



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

BRUNO AUGUSTO CABRAL ROQUE

**ESTUDO VIA SIMULAÇÃO DAS CONDIÇÕES HIDRODINÂMICAS EM CÉLULA
REATIVA PARA A BIOMINERALIZAÇÃO CIMENTÍCIA USANDO
PLANEJAMENTO FATORIAL E FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

Recife
2022

BRUNO AUGUSTO CABRAL ROQUE

**ESTUDO VIA SIMULAÇÃO DAS CONDIÇÕES HIDRODINÂMICAS EM CÉLULA
REATIVA PARA A BIOMINERALIZAÇÃO CIMENTÍCIA USANDO
PLANEJAMENTO FATORIAL E FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química. Área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Leonie Asfora Sarubbo

Coorientador: Prof. Dr. Mohand Benachour

Recife
2022

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz CRB-4 / 2222

- R786e Roque, Bruno Augusto Cabral.
Estudo via simulação das condições hidrodinâmicas em célula reativa para a biomineralização cimentícia usando planejamento fatorial e fluidodinâmica computacional / Bruno Augusto Cabral Roque. 2022.
195 f: figs., gráfs., tabs.
- Orientadora: Profa. Dra. Leonie Asfora Sarubbo.
Coorientador: Prof. Dr. Mohand Benachour.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
- CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Recife, 2022.
Inclui referências e apêndices.
1. Engenharia química. 2. Aeração. 3. Biomineralização. 4. Fluidodinâmica computacional. 5. Concreto. 6. Planejamento de experimentos. I. Sarubbo, Leonie Asfora (Orientadora). II. Benachour, Mohand (Coorientador). III. Título.

UFPE

660.2 CDD (22. ed.)

BCTG / 2022 - 373

BRUNO AUGUSTO CABRAL ROQUE

ESTUDO VIA SIMULAÇÃO DAS CONDIÇÕES HIDRODINÂMICAS EM CÉLULA
REATIVA PARA A BIOMINERALIZAÇÃO CIMENTÍCIA USANDO PLANEJAMENTO
FATORIAL E FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico de Tecnologia e Geociências, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química. Área de concentração: Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Aprovado em: 29 / 07 / 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Hilario Jorge Bezerra Lima Filho (Examinador Externo)
Universidade Católica de Pernambuco

Prof. Dr. Jorge Vinícius Fernandes Lima Cavalcanti (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Marcos Francisco da Silva (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela sua divina misericórdia e sabedoria sobre minha vida, e por me mostrar que tudo acontece no tempo determinado por Ele.

A Universidade Federal de Pernambuco por oportunizar a experiência acadêmica do mestrado, a Universidade Católica de Pernambuco por disponibilizar as estruturas da universidade, e ser um ponto de reencontro com as raízes acadêmicas e ao Instituto Avançado de Tecnologia e Inovação (IATI) pelo espaço disponibilizado.

A minha orientadora, Profa. Dra. Leonie Asfora Sarubbo, pela paciência, por sempre acreditar no meu potencial, por ser um ponto de equilíbrio aos seus e um grande exemplo de profissionalismo, dedicação e ser humano.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Mohand Benachour, por ter aceito compartilhar este período, mesmo sem me conhecer, pela tranquilidade, paciência e disponibilidade em ajudar no que fosse necessário.

Ao meu supervisor, amigo, e parceiro de projeto, MSc. Pedro Pinto Ferreira Brasileiro, por toda paciência, parceria e auxílio nos momentos de dificuldade.

Aos meus colegas de estudo e de trabalho.

Aos mestres por compartilhar seus conhecimentos.

Aos meus pais, Mavi e Betânia, pelo apoio incondicional e dedicação para que eu pudesse concluir mais essa etapa, mesmo diante de todas dificuldades e decisões difíceis que tiveram que ser tomadas, foram sempre meu alicerce.

A minha namorada, Ana Beatriz, por toda paciência, afeto e apoio nos momentos difíceis.

Aos meus irmãos, Amaro e Marcella, e demais familiares e amigos, que me ajudaram nessa caminhada e pela torcida irrestrita de sempre.

E por fim, agradeço todas as dificuldades que enfrentei, pois com elas aprendi grandes lições e evolui como ser humano.

“Tudo passa, a paciência tudo alcança [...]”
(D’ÁVILA, Sta. T.).

RESUMO

O concreto, como um dos materiais de construção mais comumente consumidos, é muito utilizado na construção civil. Porém, as ações antrópicas fazem com que o concreto seja bastante sensível à formação de fissuras, o que pode colocar em risco a durabilidade das estruturas de concreto como um todo. Recentemente, diversos tipos de agentes microbianos autocurativos foram incorporados ao concreto para promover a formação de carbonato de cálcio na área de fissura. Este processo bioquímico no qual os micro-organismos induzem a precipitação mineral é conhecido como biomineralização. Dessa forma, estudar as melhores condições hidrodinâmicas em célula reativa para o processo de biomineralização cimentícia é fundamental, haja vista que a implementação deste método inovador resultará em uma vida útil mais longa das estruturas de concreto. Diante disso, com o auxílio dos planejamentos de experimentos e o uso do Computational Fluid Dynamics (CFD), se apresentam como instrumentos de grande relevância, tornando o projeto em destaque a ser alvo de investigações científicas. As simulações foram realizadas seguindo 2 planejamentos fatoriais na forma de Delineamentos Compostos Centrais Rotacionais (DCCRs), divididos de acordo com o posicionamento das entradas e saídas da vazão volumétrica de ar, que se posicionam pela parte lateral ou pela parte superior da geometria da célula reacional e nomeados de: 1) Entrada e Saída Lateral; 2) Entrada e Saída Superior. Com a utilização do software SOLIDWORKS® 2020, foram construídas as geometrias das células reacionais e através do SOLIDWORKS® Flow Simulation foram realizadas as simulações de fluidodinâmica computacional. Inicialmente, foi feito um estudo de convergência de malha para avaliar se a malha está suficientemente refinada para identificar as características do escoamento e obter resultados mais confiáveis. Além de estudos de quantificação do efeito da velocidade do gás e da pressão utilizando CFD. Uma análise estatística dos dados coletados foi também efetuada. A melhor combinação de malhas para realizar as simulações é a malha global 4 e a malha local 5, sendo estas efetivando de fato um bom desempenho diante das simulações, menor números de células e menor tempo computacional. Os resultados das simulações fluidodinâmicas computacionais nas células reacionais e as análises estatísticas, para os parâmetros de velocidade do gás e de pressão, evidenciam que a vazão de ar foi o fator de maior sensibilidade em todos os casos. A

geometria com entrada e saída de ar na parte lateral é considerada a melhor opção para a realização de futuros trabalhos experimentais.

Palavras-chave: aeração; biomineralização; fluidodinâmica computacional; concreto; planejamento de experimentos.

ABSTRACT

Concrete, as one of the most commonly consumed building materials, is widely used in civil construction. However, human actions make concrete very sensitive to the formation of cracks, which can jeopardize the durability of concrete structures as a whole. Recently, several types of self-healing microbial agents have been incorporated into concrete to promote the formation of calcium carbonate in the crack area. This biochemical process in which microorganisms induce mineral precipitation is known as biomineralization. Thus, studying the best hydrodynamic conditions in a reactive cell for the cementitious biomineralization process is fundamental, given that the implementation of this innovative method will result in a longer useful life of concrete structures. Therefore, with the help of design of experiments and the use of Computational Fluid Dynamics (CFD), they present themselves as instruments of great relevance, making the project a highlight to be the target of scientific investigations. The simulations were carried out following 2 factorial designs in the form of Central Composite Rotational Designs (DCCRs), divided according to the positioning of the inlets and outlets of the volumetric air flow, which are positioned on the side or on the top of the reaction cell geometry. and nominees of: 1) Side Entry and Exit; 2) Upper Input and Output. Using the SOLIDWORKS® 2020 software, the geometries of the reaction cells were constructed and, through SOLIDWORKS® Flow Simulation, the computational fluid dynamics simulations were performed. Initially, a mesh convergence study was carried out to assess whether the mesh is sufficiently refined to identify the flow characteristics and obtain more reliable results. In addition to studies to quantify the effect of gas velocity and pressure using CFD. A statistical analysis of the collected data was also performed. The best combination of meshes to perform the simulations is the global mesh 4 and the local mesh 5. The results of the computational fluid dynamics simulations in the reaction cells and the statistical analyses, for the gas velocity and pressure parameters, show that the air flow was the most sensitive factor in all cases. The geometry with air inlet and outlet on the side is considered the best option for future experimental work.

Keywords: aeration; biomineralization; computational fluid dynamics; concrete; design of experiments.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Cicatrização de fissuras como resultado da precipitação de carbonato de cálcio através de bactérias.	28
Figura 2	(a) Estrutura bacterina; (b) Parede celular com carga negativa e presença de íons com carga positiva; (c) Produção biomineral por meio da ligação de íons à parede celular.	29
Figura 3	(a) Modelo conceitual de célula reacional com entrada e saída de ar na parte lateral; (b) Modelo conceitual de célula reacional com entrada e saída de ar na parte superior.	37
Figura 4	(a) Modelo de geometria com entrada e saída na parte lateral com linha esboçada a 1cm do final do tubo de saída de ar; (b) Modelo de geometria com entrada e saída na parte superior com linha esboçada a 1cm do final do tubo de saída de ar.	42
Figura 5	(a) Modelo de geometria com entrada e saída na parte lateral com linha esboçada a 7cm da parte superior da célula reacional; (b) Modelo de geometria com entrada e saída na parte superior com linha 7cm da parte superior da célula reacional.	43
Figura 6	Representação da malha criada após definição das malhas globais e locais, para uma geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	52
Figura 7	Representação da malha criada após definição das malhas globais e locais, para uma geometria com entrada e saída de ar na parte superior.	52
Figura 8	Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	53

Figura 9	Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.	54
Figura 10	Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	55
Figura 11	Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.	55
Figura 12	Gráfico dos valores previstos <i>versus</i> valores observados para a velocidade de escoamento do ar na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	59
Figura 13	Efeitos interativos da distância para entrada de ar e vazão de ar na velocidade, segundo o gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	60
Figura 14	Efeitos interativos da distância para saída de ar e vazão de ar na velocidade, segundo o gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	61
Figura 15	Efeitos interativos da distância para entrada de ar e distância para saída de na velocidade, segundo o gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	61
Figura 16	Gráfico dos valores previstos <i>versus</i> valores observados para a pressão interna na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	64
Figura 17	Efeitos interativos da distância para entrada de ar e vazão de ar na pressão, segundo o gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	65

Figura 18	Efeitos interativos da distância para saída de ar e vazão de ar na pressão, segundo o gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	65
Figura 19	Efeitos interativos da distância para entrada de ar e distância para saída de na pressão, segundo o gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	66
Figura 20	Gráfico dos valores previstos <i>versus</i> valores observados para a velocidade de escoamento do ar na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.	68
Figura 21	Efeitos interativos do diâmetro da célula reacional e vazão de ar na velocidade, segundo gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.	69
Figura 22	Efeitos interativos da distância para entrada de ar e vazão de ar na velocidade, segundo gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.	70
Figura 23	Efeitos interativos da distância para entrada de ar e diâmetro da célula reacional na velocidade, segundo gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.	70
Figura 24	Gráfico dos valores previstos <i>versus</i> valores observados para a pressão interna na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.	73
Figura 25	Efeitos interativos do diâmetro da célula reacional e vazão de ar na pressão, segundo gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.	73

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Velocidade <i>versus</i> comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	46
Gráfico 2	Velocidade <i>versus</i> comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.	46
Gráfico 3	Velocidade <i>versus</i> comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	47
Gráfico 4	Velocidade <i>versus</i> comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.	47
Gráfico 5	Velocidade máxima de cada refinamento <i>versus</i> total de células do ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	48
Gráfico 6	Velocidade máxima de cada refinamento <i>versus</i> total de células do ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.	48
Gráfico 7	Tempo computacional <i>versus</i> total de células do ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	49
Gráfico 8	Tempo computacional <i>versus</i> total de células do ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Dimensões padrão de construção para todas as células reacionais.	37
Tabela 2	Propriedades do material definido para as geometrias.	38
Tabela 3	Matriz dos níveis do Planejamento fatorial entrada e saída lateral.	39
Tabela 4	Matriz dos ensaios do Planejamento fatorial entrada e saída lateral.	39
Tabela 5	Matriz dos níveis do Planejamento fatorial entrada e saída superiores	40
Tabela 6	Matriz dos ensaios do Planejamento fatorial entrada e saída superiores.	40
Tabela 7	Parâmetros de trabalho para as simulações.	41
Tabela 8	Representação das melhores combinações de malhas global e local para cada ensaio, a quantidade de células e tempo de operação geradas por essas combinações de malhas, para a geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	50
Tabela 9	Representação das melhores combinações de malhas global e local para cada ensaio, a quantidade de células e tempo de operação geradas por essas combinações de malhas, para a geometria com entrada e saída de ar na parte superior.	51
Tabela 10	Tabela de efeitos para a velocidade de escoamento do ar na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	57
Tabela 11	Tabela ANOVA para a velocidade de escoamento do ar na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	58

Tabela 12	Tabela de efeitos para a pressão interna na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	62
Tabela 13	Tabela ANOVA para a pressão interna na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.	63
Tabela 14	Tabela de efeitos para a velocidade de escoamento do ar na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.	67
Tabela 15	Tabela ANOVA para a velocidade de escoamento do ar na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.	67
Tabela 16	Tabela de efeitos para a pressão interna na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.	71
Tabela 17	Tabela ANOVA para a pressão interna na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS.....	19
1.1.1	Objetivo geral.....	19
1.1.2	Objetivos específicos.....	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1	COMPOSIÇÃO DO CONCRETO.....	20
2.1.1	Cimento.....	20
2.1.2	Agregados miúdos e graúdos.....	22
2.1.3	Água.....	23
2.1.4	Tipos de concreto.....	24
2.2	CONCRETOS AUTORREGENERÁVEIS.....	25
2.2.1	Microencapsulamento.....	26
2.2.2	Agentes cicatrizantes.....	27
2.2.3	Biomineralização.....	28
2.3	CRISTALIZAÇÃO.....	30
2.4	AERAÇÃO.....	31
2.5	COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD).....	32
2.5.1	Geração de malha para CFD.....	33
2.6	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS.....	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1	MODELO CONCEITUAL DAS CÉLULAS REACIONAIS.....	36
3.2	CONSTRUÇÃO DAS GEOMETRIAS DAS CÉLULAS REACIONAIS.....	37
3.2.1	Material da geometria.....	38
3.3	PLANEJAMENTOS FATORIAIS PARA INVESTIGAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE OXIGÊNIO NAS CÉLULAS REACIONAIS.....	38
3.3.1	Planejamento fatorial entrada e saída lateral.....	39
3.3.2	Planejamento fatorial entrada e saída superiores.....	40
3.4	SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL.....	41
3.5	ESTUDO DE CONVERGÊNCIA DE MALHA.....	42
3.6	ESTUDOS DE VELOCIDADE E PRESSÃO.....	43
3.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	44

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1	ESTUDO DE CONVERGÊNCIA DE MALHA.....	45
4.2	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES CFD PARA OS PARÂMETROS DE VELOCIDADE E PRESSÃO.....	53
4.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DE VELOCIDADE E PRESSÃO OBTIDOS EM REGIÃO ESPECÍFICA.....	56
4.3.1	Geometrias com entrada e saída de ar na parte lateral.....	57
4.3.2	Geometrias com entrada e saída de ar na parte superior.....	66
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	74
5.1	CONCLUSÕES.....	74
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	75
	REFERÊNCIAS.....	76
	APÊNDICE A – VELOCIDADE <i>VERSUS</i> COMPRIMENTO PARA DIFERENTES REFINAMENTOS.....	83
	APÊNDICE B – VELOCIDADE <i>VERSUS</i> COMPRIMENTO DOS REFINAMENTOS 4, 5 E 6.....	100
	APÊNDICE C – VELOCIDADE MÁXIMA DE CADA REFINAMENTO <i>VERSUS</i> TOTAL DE CÉLULAS.....	116
	APÊNDICE D – TEMPO COMPUTACIONAL <i>VERSUS</i> TOTAL DE CÉLULAS	132
	APÊNDICE E – VELOCIDADE DE ESCOAMENTO DO AR NA CÉLULA REACIONAL E AS LINHAS DE CORRENTES.....	148
	APÊNDICE F – PRESSÃO INTERNA NA CÉLULA REACIONAL E AS LINHAS DE CORRENTES.....	172

1 INTRODUÇÃO

O material de construção mais utilizado no mundo é o concreto, que é uma mistura de cimento, agregados miúdos e agregados graúdos, combinados com água na faixa ideal. O concreto pode ser empregado em todos os tipos de projetos de engenharia civil, incluindo superfícies de estradas, cúpulas, residências, pontes, entre outros. A fácil disponibilidade de seus componentes, durabilidade e custo-benefício são os principais atributos do emprego universal do concreto na construção civil (WASIM; ABADEL; BAKAR; ALSHAIKH, 2022; DAS; SAHA; JENA; PANDA, 2022; AHMAD; ZHOU, 2022).

Porém, a baixa resistência à tração faz com que o concreto seja bastante sensível à formação de fissuras, o que pode colocar em risco a durabilidade das estruturas de concreto como um todo. As rachaduras ou microfissuras podem levar à deterioração das estruturas de concreto, uma vez que líquidos e gases agressivos são capazes de penetrar na matriz e, portanto, reduzir o desempenho mecânico das estruturas de concreto. Portanto, uma solução em potencial como a aplicação de um concreto autocurável com mecanismo de cicatrização de fissuras desencadeado sem intervenção humana seria altamente benéfico (MAULUDIN; OUCIF, 2019).

Recentemente, diversos tipos de agentes microbianos autocurativos foram incorporados ao concreto para promover a formação de carbonato de cálcio na área de fissura através da precipitação de carbonato de cálcio induzida microbiologicamente (ALGAIFI *et al.* 2020; RUAN *et al.* 2019). Este processo bioquímico no qual os micro-organismos induzem a precipitação mineral é conhecido como biomineralização. Estudos apontam o gênero *Bacillus* como o componente biológico do agente de autocura. Isso ocorre porque a cepa de *Bacillus* geralmente pode formar esporos em ambientes desfavoráveis e, mais importante, esses esporos podem adormecer em um ambiente alcalino por mais de 50 anos (NGUYEN *et al.* 2019; WIKTOR; JONKERS, 2016).

A aeração fornece gás oxigênio para as bactérias e tem um efeito significativo, já que alguns bioprocessos exigem condições de alta taxa de transferência de oxigênio, enquanto outros requerem taxas de transferência de oxigênio controladas para regular as taxas de consumo de oxigênio (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2017).

O planejamento de experimentos tem sido amplamente utilizado em diferentes áreas da ciência e da indústria, para desenvolvimento e otimização de produtos e processos. Inclui-se uma série de ferramentas estatísticas aplicadas para classificar e quantificar sistematicamente as relações de causa e efeito entre variáveis e saídas no processo ou fenômeno estudado, que pode resultar (se esse for o objetivo) em encontrar as configurações e condições sob as quais o processo se torna otimizado. O principal objetivo do planejamento de experimentos é obter a quantidade máxima de “informações” limitando o número de observações necessárias e, portanto, isso reduzirá o número total de experimentos necessários (JANKOVIC; CHAUDHARY; GOIA, 2021; LEE *et al.* 2022).

A quantificação experimental dos mecanismos fundamentais de um fenômeno seria o mais adequado devido à previsibilidade de possíveis imprevistos. O consumo de muitos recursos e o número limitado de experimentos que podem ser conduzidos na prática inviabiliza a obtenção de resultados condizentes com a realidade. Com o avanço contínuo das ferramentas de Fluidodinâmica Computacional ou Computational Fluid Dynamics (CFD) e a capacidade de computação exponencialmente aumentadas a custos relativamente baixos, juntamente com entendimentos mais profundos da física subjacente, a implementação de CFD para obter *insights* e melhorar os modelos existentes para estudar a mecânica fundamental e avaliar cenários tornar-se mais prático e alcançável (SHEN *et al.* 2020).

Dessa forma, estudar as melhores condições hidrodinâmicas em célula reativa para o processo de biomineralização cimentícia é fundamental, haja vista que a implementação deste método inovador resultará em uma vida útil mais longa das estruturas de concreto, bem como na redução significativa na produção de cimento e substituição estrutural. Diante disso, com o auxílio dos planejamentos de experimentos e o uso do CFD, que pôde ser utilizado desde a fase conceitual do projeto, determinando qual a viabilidade e a melhor solução para o estudo a ser realizado e permitindo representar diversos cenários, se apresenta como um instrumento de grande relevância, tornando o projeto em destaque a ser alvo de investigações científicas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Criar geometrias de células reacionais e realizar simulações fluidodinâmicas computacionais para determinar as melhores condições de aeração visando facilitar a biomineralização do biocimento.

1.1.2 Objetivos específicos

- Definir os parâmetros dos planejamentos fatoriais;
- Criar geometrias das células reacionais com base nos planejamentos fatoriais;
- Realizar simulação fluidodinâmica computacional visando estudo de convergência de malha e definir as malhas adequadas a serem trabalhadas posteriormente;
- Realizar simulação fluidodinâmica computacional nas células reacionais criadas, utilizando as malhas predefinidas pelo estudo de convergência de malha, determinando a influência da vazão volumétrica de ar, diâmetro da célula reacional, distância para entrada de ar e distância para saída de ar, e através dos parâmetros operacionais de velocidade e de pressão do gás será estimada a distribuição de oxigênio no recipiente;
- Avaliar os dados de velocidade e de pressão de ar obtidos das simulações fluidodinâmicas computacionais através de um planejamento de Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O envelhecimento e a degradação do concreto estão ligados à sua estrutura porosa e são promovidos pela inevitável propensão do concreto a fissuras. O desenvolvimento de tecnologias do concreto, que permitiram o projeto de concreto com porosidade extremamente baixa, não alterou da mesma forma o risco de fissuração inerente, sendo os concretos de alto desempenho ainda mais frágeis e sensíveis à fissuração precoce do que os de resistência normal. Isso resultou no desenvolvimento de metodologias de tratamento de fissuras, que podem ser categorizadas em tratamentos passivos, que são aplicados manualmente após a inspeção e apenas curam as fissuras superficiais, e métodos ativos que são incorporados na fase de construção, podem preencher fendas internas e externas, e são consideradas técnicas de autocura (DE BELIE *et al.* 2018).

2.1. COMPOSIÇÃO DO CONCRETO

Na construção civil o concreto é o material mais utilizado, muito devido às suas propriedades mecânicas, incluindo durabilidade, resistência ao fogo e materiais moldáveis, além disso, a baixa manutenção, baixo custo e rápida disponibilidade também são fatores importantes. O concreto é utilizado em edifícios e diferentes estruturas em todo o mundo e os seus principais componentes são: agregados graúdos, agregados miúdos, cimento e água (ANJALI; VENKATESAN, 2022; HE; ZHOU; WANG; ZHANG, 2020).

2.1.1 Cimento

O cimento é uma substância em forma de pó que tem sido usada há muito tempo como agente ligante, misturando-se com água para agregar com outros materiais (JUANGSA; CEZELIANO; DARMANTO; AZIZ, 2022). É produzido a partir de matérias primas de origem calcária e alumino-silicosas e é constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, principalmente. O material em pó resultante da queima e moagem das matérias primas é chamado de clínquer. Os principais constituintes do clínquer do cimento são os silicatos dicálcico (Ca_2SiO_4 ou C_2S), chamado de belita, e

tricálcico (Ca_3SiO_5 ou C_3S), conhecido como alita, o aluminato tricálcico ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ou C_3A) e o ferroaluminato tetracálcico ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ ou C_4AF). Outros minerais como a cal livre (CaO), o periclásio (MgO) e os sulfatos alcalinos podem estar presentes (FERREIRA, 2017).

A produção de cimento pode ser dividida em três processos: preparação de matéria-prima, produção de clínquer e preparação de cimento. A preparação da matéria-prima refere-se ao processo de mineração e pedreiras e é seguida por um processo mecânico utilizando britadores e moinhos para reduzir o tamanho das partículas. Cada substância é misturada com uma proporção predeterminada para produzir as propriedades desejadas. As matérias-primas preparadas são alimentadas para a produção de clínquer, que geralmente consiste em pré-aquecedor, calcinador, forno e resfriador. A produção de clínquer é o processo principal, onde a farinha crua é convertida em clínquer através de uma série de processos termodinâmicos e químicos, que são também o processo de produção de cimento mais exigente em energia. Finalmente, o clínquer é misturado com aditivos e outros componentes minerais para a preparação final do cimento para ajustar as propriedades requeridas do cimento (JUANGSA; CEZELIANO; DARMANTO; AZIZ, 2022).

O sistema de produção de cimento é um dos principais contribuintes do efeito estufa, causam aproximadamente 8% da emissão total de CO_2 mundial (CORMOS, 2022). Além disso, o consumo elétrico no processo de produção de cimento, utiliza cerca de 10% da emissão de CO_2 . Esses dados retratam, porquanto, que a fabricação de cimento ocasiona um aumento dos gases de efeito estufa tanto por um viés reacional, quanto por um viés energético (SHANKS *et al.* 2019).

Na designação dos cimentos, as iniciais CP correspondem à abreviatura de Cimento Portland, e são seguidas dos algarismos romanos de I a V, conforme o tipo de cimento, sendo a classe expressa por números (25, 32 e 40) que indicam a resistência à compressão do corpo-de-prova padrão, em MPa (LOPES, 2016).

Cada tipo de cimento apresenta suas especificidades (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018a):

- I) Cimento Comum (CP I): não possui nenhum tipo de aditivo, apenas o gesso, que tem a função de retardar o início do tempo de pega do cimento para possibilitar mais tempo na aplicação e com uma variação de aditivos pozolânicos (CP I-S) para diminuir a permeabilidade e a corrosão.

- II) Cimento Composto (CP II): tem a adição de outros materiais na sua mistura e libera menos calor quando entra em contato com a água. O CP-II é apresentado em três opções: CP-II E – cimento portland com adição de escória de alto-forno; CP-II F – cimento portland com adição de material carbonático – fíler; e CP-II Z – cimento portland com adição de material pozolânico.
- III) Cimento de Alto Forno (CP III): tem em sua composição de 35% a 70% de escória de alto-forno. Apresenta maior impermeabilidade e durabilidade, além de baixo calor de hidratação, assim como alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, além de ser resistente a sulfatos. É menos poroso e mais durável.
- IV) Cimento Pozolânico (CP IV): tem em sua composição de 15% a 50% de material pozolânico. Por isso, proporciona estabilidade no uso com agregados reativos e em ambientes de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos. Possui baixo calor de hidratação, o que o torna bastante recomendável na concretagem de grandes volumes e sob temperaturas elevadas. É pouco poroso, sendo resistente à ação da água do mar e de esgotos.
- V) Cimento de Alta Resistência Inicial (CP V): é um cimento que praticamente não contém aditivos com raras exceções, em função do seu processo de fabricação, tem alta reatividade nas primeiras horas de aplicação, fazendo com que atinja resistências elevadas em um curto intervalo de tempo.

2.1.2 Agregados miúdos e graúdos

As dimensões dos agregados utilizados em concreto variam desde dezenas de milímetros até partículas com seção transversal menor do que um décimo de milímetro. A dimensão máxima utilizada, na realidade, varia, mas, em qualquer mistura, são incorporadas partículas de diferentes dimensões. A alternativa sempre empregada para a produção de concretos de boa qualidade é a obtenção de agregados separados em, pelo menos, dois grupos de dimensões. A separação principal é a definida entre os *agregados miúdos*, comumente conhecido como areia, com dimensão inferior a 4 mm, e os *agregados graúdos*, comumente conhecido como pedregulho ou brita, que compreendem o material com dimensão mínima de 5 mm (NEVILLE, 2016).

Originalmente, todas as partículas dos agregados naturais faziam parte de uma massa maior. As quais foram fragmentadas por processos naturais de intemperismo e abrasão ou por britagem artificial. Dessa forma, muitas propriedades dos agregados dependem totalmente das propriedades da rocha matriz: composição química e mineral, características petrográficas, massa específica, dureza, resistência, estabilidade físico-química, estrutura de poros e coloração. Por outro lado, algumas propriedades dos agregados não existem na rocha matriz, como forma e dimensões das partículas, textura superficial e absorção. Todas essas propriedades podem exercer considerável influência na qualidade do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido (NEVILLE, 2016).

Além da característica petrográfica do agregado, suas características externas, em especial a forma e a textura superficial das partículas, são importantes. No entanto, devido à dificuldade em descrever a forma de corpos tridimensionais, é conveniente definir algumas de suas características geométricas. A forma das partículas foi classificada como: arredondado, irregular, lamelar, anguloso, alongado e lamelar/alongado. Isso significa que para uma similar massa de cimento, água, agregados miúdos e agregados graúdos, poderão existir dois volumes diferentes de concreto a depender da forma dos agregados, concentrando e diluindo os componentes e aumentando e reduzindo as propriedades do concreto (NEVILLE, 2016).

2.1.3 Água

A água é um componente importante do concreto e deve ser adequada para fazer e curar o concreto. Uma parte da água de amassamento é utilizada para hidratar o cimento, enquanto a água restante é necessária para dar a trabalhabilidade do concreto. Como resultado, a quantidade e a qualidade da água devem ser cuidadosamente examinadas. A qualidade da água pode variar significativamente de uma fonte para outra, dependendo da localização geográfica e da estação. Assim, a água utilizada para a mistura e cura do concreto nos canteiros de obras deve ser testada para evitar defeitos estruturais, principalmente em obras de grande porte. Devido à presença de impurezas químicas na água, a resistência e a durabilidade do concreto são reduzidas. Um número significativo de especificações incentivava o uso de água potável para fazer concreto (MOHE; SHEWALUL; AGON, 2022).

2.1.4 Tipos de concreto

O concreto como um dos materiais mais utilizados na construção civil, apresenta diferentes tipos, com propriedades diversas, para variadas finalidades. Os principais tipos são (NEVILLE, 2016):

- Convencional: é o concreto comum utilizado em obras.
- Bombeável: é utilizado quando o transporte via bomba é requerido, aumentando-se a relação água/cimento.
- Armado: é a união do concreto convencional com as barras de aço, unindo a resistência à compressão com a resistência à tração.
- Protendido: consiste em inserir cabos de aço de alta resistência no concreto com aplicações de tensões de compressão nas partes tracionadas pelas solicitações dos carregamentos. A compreensão prévia realizada na peça que venha a ser concretada permite um melhor desempenho da estrutura.
- Projetado: consiste em um transporte através de uma mangueira e projetado pneumáticamente, a alta velocidade, sobre um substrato. A energia do impacto do jato na superfície adensa o material, de modo que possa permanecer aderido sem sofrer deslocamento ou escorrimento, mesmo em uma superfície vertical ou em um teto.
- Pré-moldado: os blocos de concreto pré-fabricado são produzidos industrialmente, em local fora da obra. Assim, as peças são apenas encaixadas no local de execução do projeto.
- Leve: tem a massa específica significativamente menor do que a do concreto produzido com agregados normais, que varia entre 2.200 e 2.600 kg/m³.
- Pesado: utiliza agregados de maior massa específica para atingir valores superiores a 2.800 kg/m³, empregado para fins de atenuação de raios X, raios gama e nêutrons.
- Celular: Um produto de maior leveza que o convencional, o concreto celular tem massa específica entre 300 kg/m³ a 1.850 kg/m³. A diferença para os outros concretos leves é que o celular é obtido por um aditivo especial de espuma.
- Alto desempenho: o concreto de alto desempenho adquire essa qualidade por meio do uso de aditivos especiais que garantem grande resistência em pouco tempo, agilizando obras e atendendo a situações emergências.

- Autoadensável: Esse tipo de concreto expulsa o ar aprisionado sem vibração e se movimenta por obstáculos, como a armadura, para preencher todos os espaços nas fôrmas.
- Autorregenerável: é um concreto que pode regenerar-se após sofrer intempéries e rachaduras.

2.2 CONCRETOS AUTORREGENERÁVEIS

As abordagens de autorregeneração do concreto podem ser amplamente classificadas em autógena e autônoma. A capacidade de cura autógena é derivada principalmente de dois processos químicos: hidratação contínua de clínquer de cimento não reagido e formação de carbonato de cálcio para preencher rachaduras. Quando o agente cicatrizante nas rachaduras se esgota, os hidratos formados ficam expostos à atmosfera. Assim, o crescimento de cristais de carbonato de cálcio na superfície das rachaduras é a contribuição mais importante para a cicatrização autógena em uma idade mais avançada. A autocura autônoma depende de aditivos não convencionais, como a tecnologia de encapsulamento, no qual os agentes de cura (bactérias ou produtos químicos) são isolados por cápsulas até que as rachaduras quebrem a casca, e os agentes vazados então curam a rachadura. Em comparação com a cicatrização autógena, que apresenta a capacidade de curar fissuras com algumas centenas de micrómetros, a cicatrização autônoma pode reparar fissuras relativamente grandes (até 1000 μm) (LIU *et al.* 2022).

O concreto autorregenerável tem o potencial de aumentar a durabilidade de uma estrutura e, assim, diminuir substancialmente o custo de reparo e manutenção associado à deterioração gradual da infraestrutura. Vários estudos têm se concentrado em métodos para fornecer propriedades de autocura, seja por meio de compostos cimentícios projetados, aditivos cristalinos, bioconcreto ou agente de cura microencapsulado. Dependendo do método usado, a capacidade de cura autógena do concreto pode ser aumentada ou um novo produto pode ser formado para selar a fissura. Embora o concreto tenha uma capacidade de cura autógena inata de selar microfissuras sob a umidade, suas limitações naturais levaram à necessidade de se desenvolver algo robusto (MILLA; HASSAN; RUPNOW, 2017).

A propagação de cimento hidratado, formação de carbonato de cálcio, bloqueio de rachaduras por contaminação de água e a hidratação auxiliar de cimento não

reagido podem ocorrer naturalmente como resultado da autocura. O desenvolvimento da autorregeneração do concreto foi ampliado com produtos químicos, polímeros e geomateriais. No entanto, foi demonstrado que os micro-organismos precipitantes no carbonato de cálcio induzem a autocura no concreto. Sua capacidade para autocura pode ser melhorada por materiais que têm propriedades de expansão após terem sido incorporados a materiais cimentados e combinados com adição de minerais e misturas. Na presença de água, entretanto, deve ser coberto para evitar a expansão prematura após uma reação de cimento (JOGI; LAKSHMI, 2020).

2.2.1 Microencapsulamento

A microencapsulação é um processo no qual um material é utilizado para revestir um líquido ou sólido, formando partículas na faixa de 1 a 1.000 µm. Durante a última década, a autocura bioinspirada de materiais à base de cimento atraiu cada vez mais atenção na comunidade de pesquisa como uma abordagem promissora para prolongar a vida útil das estruturas de concreto. O encapsulamento de agentes cicatrizantes, como polímeros, minerais ou bactérias, entre outros, por um sistema vascular ou microcápsulas tem demonstrado grande potencial para promover a autocura de rachaduras. Estes agentes cicatrizantes podem ser liberados devido à quebra da cápsula desencadeada por trincas que se propagam pela matriz de concreto. Um agente de autocura ideal deve ser facilmente encapsulado e seu desempenho e resposta não devem ser sensíveis às condições ambientais (TOMIĆ *et al.* 2022; LI; WEI; CHEN; JIANG, 2021; DAI *et al.* 2022).

O mecanismo de disparo mecânico é responsável pelas propriedades mecânicas necessárias das microcápsulas sintetizadas, de modo que elas possam sobreviver ao processo de mistura e alcançar a quebra desejada após a rachadura. Além disso, as propriedades mecânicas entre o invólucro da microcápsula e a matriz hospedeira também são cruciais para garantir o acionamento. Uma variedade de materiais, inorgânicos ou orgânicos, tem sido explorado como o invólucro para uso em microencapsulação. Uma casca orgânica, como a formada por poliestireno, poliuretano, resina de uréia-formaldeído e compostos à base de melamina, possui melhor sintonização da sensibilidade do gatilho para rachaduras e confiável encapsulamento do adesivo em comparação com um invólucro inorgânico que pode

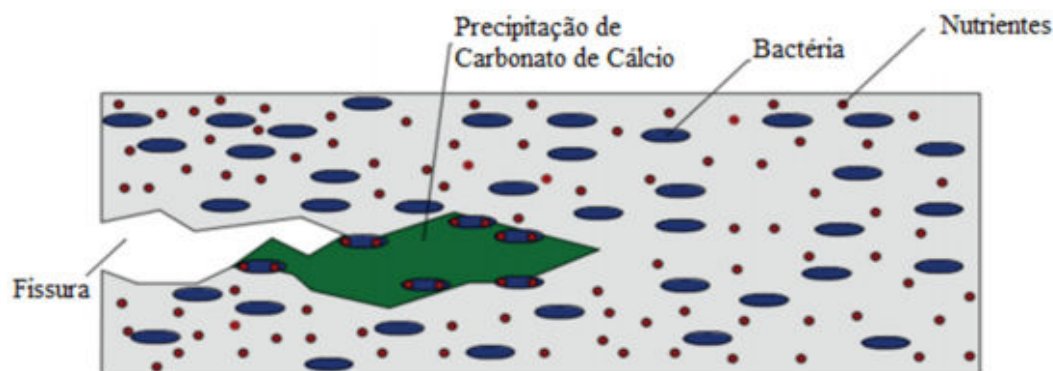
permitir a lixiviação inesperada do adesivo do miolo solto e do invólucro estrutural da malha (LI; WEI; CHEN; JIANG, 2021).

2.2.2 Agentes cicatrizantes

Os agentes de autocura de concreto são uma das áreas no campo dos materiais inteligentes que possuem o potencial de recuperar parcial ou totalmente o desempenho degradado da estrutura e restaurar as condições originais (BEKAS *et al.* 2016). Na biomimética, a autocura é a recuperação da força como resultado do condicionamento (SPECK *et al.* 2013). Um agente de autorregeneração de concreto eficaz precisa: vedar as paredes da fissura para reduzir a permeabilidade, ser compatível com a matriz de concreto, ter atividade potencial de longo prazo, processar eventos múltiplos e ter baixo custo. Para fins de autocura, os agentes podem ser classificados como bacterianos, poliméricos e compostos químicos (especificamente, silicato de sódio e magnésio) (SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019).

Os grupos dos agentes poliméricos e os dos compostos químicos apresentam a desvantagem de reagirem quimicamente em amplas faixas de temperatura e potencial hidrogeniônico. Essa amplitude é considerada uma desvantagem, pois a reação química para ser estagnada precisará ter um controlador energético, cessando a reação química. Em contrapartida, as tecnologias de cura biotecnológica são categorizadas no grupo de bactérias do gênero *Bacillus* que são altamente resistentes aos ambientes alcalinos (VAN TITTELBOOM *et al.* 2010). Uma via abordada para a cura bacteriana consiste em fornecer uma fonte de nutrientes para as bactérias e obter carbonato de cálcio precipitado como resultado do processo metabólico, como é observado na Figura 1, como fotossíntese, redução de sulfato e produção de hidrólise de ureia (VIJAY; MURMU; DEO, 2017). As bactérias são capazes de formar precipitações de carbonato de cálcio e induzir biologicamente precipitações químicas nas quais um organismo cria um microambiente extracelular ideal de fases minerais, conhecido como biomineralização (SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019).

Figura 1 – Cicatrização de fissuras como resultado da precipitação de carbonato de cálcio através de bactérias.



Fonte: Sidiq; Gravina; Giustozzi (2019).

2.2.3 Biomineralização

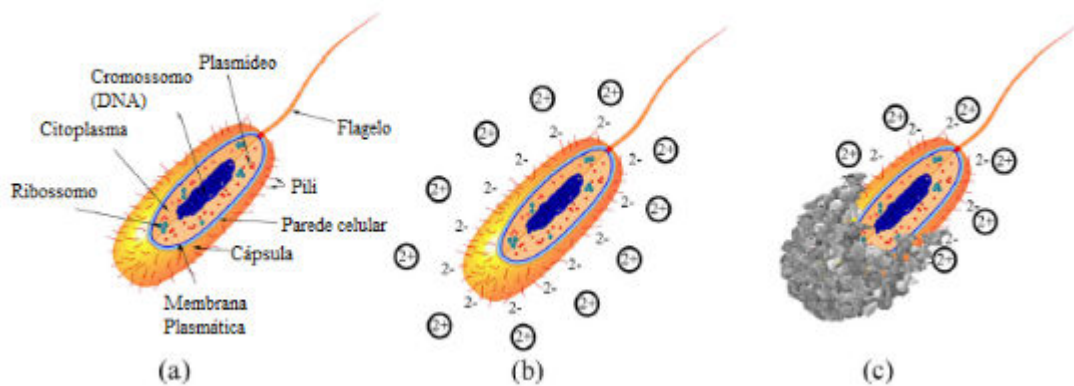
A biomineralização é um fenômeno baseado em uma síntese dirigida altamente eficiente de materiais inorgânicos e inorgânicos/orgânicos por organismos vivos, com estrutura bem definida em macro, micro e nano escala. As conchas de moluscos são modelos amplamente utilizados para pesquisar a biomineralização e também um exemplo de vanguarda para a ciência popular no assunto. Na escala microscópica, a microflora e a fauna oferecem estruturas exóticas e belas que chamam a atenção quando observadas à microscopia eletrônica, como é o caso do coccolitóforo. Os coccolitóforos são organismos marinhos unicelulares responsáveis pela biomineralização de até 40% do carbonato de cálcio no mar. Não só no mar podem ser encontrados exemplos representativos de biomineralização, mas também no corpo de vertebrados (CANO; GINER-CASARES, 2020).

A biomineralização pode ser realizada através do processo de mineralização induzida biologicamente, e este método depende de um metabolismo bacteriano específico para induzir a precipitação de carbonato de cálcio. A eficácia desta técnica levou à sua implementação para uma infinidade de aplicações, incluindo reparo de fissuras, como tratamento de superfície alternativo para concreto, para aumento da resistência à compressão, para melhorar a durabilidade dos materiais cimentícios, resistência ao gelo e estanqueidade do concreto (HAN *et al.* 2022; CHAURASIA, BISHT, SINGH, GUPTA, 2019).

A precipitação mineral ocorre por ligação bem-sucedida dos íons carregados positivamente às paredes das células microbianas carregadas negativamente. A

mineralização induzida biologicamente geralmente ocorre em um ambiente anaeróbio ou no limite óxico-anóxico. Sua eficácia depende altamente da concentração de carbono inorgânico dissolvido, local de nucleação, pH, temperatura e energia Hartree (Eh). Dentre a ampla produção de minerais por meio da biomineralização, a precipitação do carbonato de cálcio tem despertado interesse devido à sua eficiente capacidade de ligação e compatibilidade com composições de concreto. A estrutura bacteriana e um diagrama esquemático da produção de carbonato de cálcio são mostrados na Figura 2 (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2016).

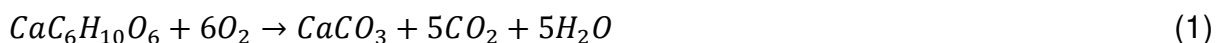
Figura 2 – (a) Estrutura bacteriana; (b) Parede celular com carga negativa e presença de íons com carga positiva; (c) Produção biomineral por meio da ligação de íons à parede celular.



Fonte: Seifan; Samani; Berenjian (2016).

A biomineralização do carbonato de cálcio utilizando as bactérias do gênero *Bacillus* como agente cicatrizante na autorregeneração do concreto provém basicamente do conjunto de três reações químicas, são as vias por lactato, ureolítica e dinitrificante (SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019).

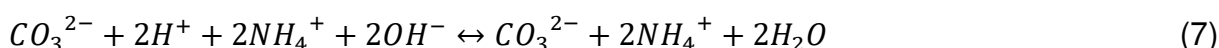
A via por lactato de cálcio é mais simples e segura, por ser a oxidação aeróbica do lactato de cálcio e combinação do hidróxido de cálcio para a síntese do carbonato de cálcio, de acordo com a Equação 1 e a Equação 2 (SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019).



A via ureolítica significa inicialmente na transformação da ureia em ácido carbônico, segundo a Equação 3 e a Equação 4 (SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019).

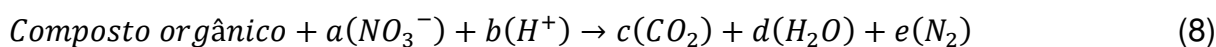


No equilíbrio, existe a formação dos ânions hidroxila e carbonato e, por consequência, o aumento do potencial hidrogeniônico, segundo a Equação 5, a Equação 6 e a Equação 7 (SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019).



A grande dificuldade do caminho ureolítico é a transformação *a posteriori* do amônio em monóxido de nitrogênio, ocasionando uma poluição ambiental, apesar de ser em níveis menores em comparação às fontes comuns de poluição. Além disso, essa via pode converter o amônio em ácido nítrico aumentando a possibilidade de corrosão (SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019).

A via por dinitrificação é uma combinação do carbonato formado com os íons de cálcio e uma redução do nitrato para o gás nitrogênio, segundo a Equação 8, a Equação 9 e a Equação 10 (SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019).



A hidrólise da ureia é o caminho mais curto para a produção do carbonato de cálcio, todavia, nem sempre o caminho mais rápido é o mais adequado, a julgar pelos problemas de corrosão e poluição citados. Uma similaridade nas três vias é a atração dos cátions de cálcio pela carga elétrica negativa da superfície bacteriana (SIDIQ; GRAVINA; GIUSTOZZI, 2019).

2.3 CRISTALIZAÇÃO

A cristalização é um fenômeno extremamente importante que sustenta processos tão diversos como a produção de nanomateriais, cerâmicas e produtos farmacêuticos, a geração de ossos, dentes e conchas, a formação de gelo e intemperismo em no ambiente e a formação de escamas em chaleiras e poços de petróleo (MELDRUM; O'SHAUGHNESSY, 2020)

A cristalização é um processo natural pelo qual os materiais se solidificam a partir de líquidos ou precipitam de soluções líquidas ou gasosas. Este processo consiste na ligação intermolecular em estruturas altamente ordenadas, denominadas cristais, e pode ser desencadeado por mudanças no ambiente físico ou químico, tais como temperatura ou pH, respectivamente. O processo de cristalização geralmente envolve nucleação e crescimento de cristais (VUKOVIC *et al.* 2020).

No caso da biomineralização através do lactato de cálcio, é preciso haver concomitantemente as reações bioquímica e química, respectivamente citadas na Equação 1 e na Equação 2, na matriz do concreto para que haja o início da formação do embrião. A efetiva formação dos núcleos cristalinos, logo, só será possível mediante os simultâneos processos de adsorção, reações química/bioquímica e cristalização (LUCAS *et al.* 2018).

2.4 AERAÇÃO

A disponibilidade de oxigênio é um parâmetro significativo que afeta a biomineralização do CaCO_3 . Em geral, os organismos aeróbicos utilizam oxigênio para facilitar o crescimento eficiente, levando à produção de bioprodutos sob certas condições. No entanto, a possibilidade de formação de toxinas, efeito inibitório sobre o metabolismo e respiração em micro-organismos pode aumentar se um alto suprimento de oxigênio (mais do que seu nível crítico) estiver presente no meio. A toxicidade do oxigênio ocorre potencialmente na fase de crescimento exponencial em vez da fase estacionária. Considerando a robustez do crescimento bacteriano na fase de crescimento exponencial, e seu papel significativo na biomineralização do CaCO_3 , é vital fornecer uma condição para potencializar o crescimento bacteriano sem elaborar uma quantidade considerável de toxina (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2017).

Aeração e agitação estão envolvidas em diferentes extensões na massa total e nas transferências de oxigênio no processo de fermentação. A aeração fornece oxigênio para as bactérias e tem um efeito significativo na mistura do fluido de fermentação, enquanto a agitação contribui para a distribuição de nutrientes e oxigênio no meio. Sabe-se que a via metabólica e os fluxos metabólicos podem ser afetados pela taxa de transferência de oxigênio. Alguns bioprocessos exigem condições de alta taxa de transferência de oxigênio, enquanto outros requerem taxas

de transferência de oxigênio controladas para regular as taxas de consumo de oxigênio (SEIFAN; SAMANI; BERENJIAN, 2017). O efeito do oxigênio no crescimento microbiano e nos bioprodutos foi amplamente documentado. Por exemplo, Zhang et al. (2016) relataram que o fornecimento de oxigênio poderia aumentar a precipitação bacteriana de CaCO_3 .

2.5 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)

O CFD é uma técnica baseada em computador destinada a caracterizar, interpretar e quantificar fenômenos de transporte de fluidos através de uma solução numérica das equações de conservação. As equações que regem a dinâmica dos fluidos são equações diferenciais parciais não lineares que, atualizadas, não podem ser resolvidas por meio de técnicas analíticas. Devido às limitações durante os estágios iniciais das tecnologias computacionais, os fenômenos de transporte de fluidos foram explicados através da interpretação de equações escalares aproximadas. Mas graças ao rápido desenvolvimento da tecnologia de computação, desde a década de 1990, é possível descrever fenômenos de transporte de fluidos encontrando soluções numéricas para as equações de Navier-Stokes capazes de replicar cenários realistas lidando com domínio tridimensional (3D) sob condições instáveis (BOURNET, ROJANO, 2022).

A utilização do CFD permite que seja representado regiões de estudo complexas, juntamente com especificações internas e circundantes. Essas regiões de estudo definidas como domínios podem ser seccionadas em volumes elementares interdependentes, denominados células, com recursos para calcular momento, energia e massa por meio de uma série de equações de conservação. Dessa forma, as ferramentas CFD geralmente oferecem a possibilidade de replicar cenários complexos como os relacionados a fluxos de ar submetidos a condições de turbulência (BOURNET, ROJANO, 2022).

As propriedades físicas de um fluido em movimento podem ser representadas por equações fundamentais, escritas na forma diferencial, também chamadas de equações governantes. Em regiões de fluidos, o Solidworks Flow Simulation permite resolver as equações de Navier-Stokes, que são formulações das equações de conservação de massa, conservação de momento e conservação de energia. Estas

equações são representadas abaixo de acordo com a Equação 11, Equação 12 e Equação 13, respectivamente (LINS *et al.* 2021):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla(\vec{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (12)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (13)$$

onde t é o tempo, $\vec{u}$ é o vetor velocidade; $\vec{\tau}$ é o tensor de tensão; ρ é a densidade; p é a pressão estática; $\vec{g}$ é o vetor de aceleração gravitacional; k é condutividade térmica; e T é a temperatura (LINS *et al.* 2021).

Uma simulação CFD consiste em quatro etapas básicas: i) geração de geometria, ii) malha, iii) solver e iv) pós-processamento. A primeira etapa é definir a geometria do problema, condições de contorno e parâmetros de fluxo; durante a segunda etapa, a geometria criada é dividida em pequenas partes por meio de malha. Na terceira etapa, as equações governantes são resolvidas por elementos finitos, volumes finitos, diferenças finitas e/ou métodos espectrais. Finalmente, os resultados são analisados graficamente na etapa de pós-processamento usando gráficos de contorno (TEIMOURI, BORUGADDA, DALAI, ABATZOGLOU, 2022). A simulação CFD precisa ser verificada por resultados experimentais para validar a configuração dos modelos e parâmetros (TU, MA, WANG, 2023).

2.5.1 Geração de malha para CFD

Classicamente, as técnicas de acoplamento consistem em dividir o domínio global em vários subdomínios locais sobre cada um dos quais um modelo local (equação a ser resolvida) pode ser analisado independentemente. A solução global pode então ser construída juntando adequadamente soluções locais de subdomínios modelados individualmente. Uma malha ajustada ao corpo é geralmente necessária para tais simulações e sua construção pode ser limitada devido aos custos computacionais necessários ou à complexidade das geometrias tratadas (AOUAD, LARCHER, HACHEM, 2022).

Um dos requisitos mais importantes, na simulação CFD, é a geração da malha. Para produzir resultados precisos, é essencial entender a influência do tamanho da malha. A análise de diferentes parâmetros da malha e a avaliação dos resultados

numéricos por comparação com soluções clássicas permitem obter uma malha adequada para um problema específico. Em segundo lugar, a malha gerada deve ser capaz de facilitar o modelo computacional para capturar as características dos campos de fluxo e o processo de transferência de calor, massa e quantidade de movimento limitado pela configuração geométrica do modelo. Por exemplo, as regiões próximas ao limite dos objetos têm alto gradiente de velocidade e a tensão de cisalhamento atinge o máximo (ZHANG; ZHANG; LAM; ARCHER, 2010).

O processo de geração da malha é referido como a etapa de pré-processamento, pois representa uma etapa necessária antes da rotina de solução da Equação de Navier-Stokes. A malha, é uma estrutura de dados que contém todas as informações de localização e topologia do domínio discretizado, desempenha um papel crítico na eficiência computacional e precisão da solução. Devido à complexidade e diversidade das geometrias, a geração da malha sempre foi um processo complicado desde o nascimento do CFD. A malha tem sido amplamente estudada em diferentes áreas da fluidodinâmica computacional, análise de estruturas e outras áreas da engenharia (YU *et al.* 2018).

O Flow Simulation considera o modelo real criado no SOLIDWORKS e gera automaticamente uma malha computacional retangular no domínio computacional distinguindo os domínios fluido e sólido. No processo de geração da malha, o domínio computacional é dividido em células retangulares uniformes em forma de paralelepípedo, que formam a chamada malha básica. Em seguida, usando informações sobre a geometria do modelo, as condições de contorno e os objetivos especificados, o Flow Simulation constrói ainda mais a malha por meio de vários refinamentos, ou seja, divisão das células da malha básica em células menores, representando melhor o modelo e as regiões do fluido. A malha, a partir da qual o cálculo começa, chamada malha inicial, é totalmente definida pela malha básica gerada e pelas configurações de refinamento. (SOLIDWORKS, 2020).

2.6 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

O planejamento de experimentos é uma técnica formal estruturada para estudar qualquer situação que envolva uma resposta que varie em função de uma ou mais variáveis independentes, onde mais de uma variável pode afetar uma resposta

e duas ou mais variáveis podem interagir entre si. Ele tem a capacidade de investigar o efeito da interação dos parâmetros no rendimento e na qualidade do produto, auxiliando na obtenção da relação entre variáveis dependentes e independentes, e pode ser usado em vários domínios, como otimização em engenharia, projetos farmacêuticos, otimização de tratamento de água, entre outros, com bons graus de sucesso (YEOLE, PARTHASARTHY, 2022; LEE *et al.* 2022).

O planejamento de experimentos pode economizar custos experimentais e maximizar as informações sobre o espaço desconhecido selecionando o mínimo de pontos de amostra com base na conclusão dos objetivos experimentais e pode ser dividido em duas categorias: métodos clássicos de planejamento experimental e métodos modernos de planejamento experimental. Os métodos clássicos de planejamento experimental incluem planejamento fatorial completo, planejamento de Plackett-Burman, delineamento composto central (DCC), delineamento composto central rotacional (DCCR), planejamento de Box-Behnken (BBD), etc. Já os métodos modernos de planejamento experimental incluem o método de Monte Carlo, amostragem por hipercubo latino, planejamento ortogonal, planejamento uniforme, método de amostragem de sequência de Hammersley, etc. A essência dos dois métodos é a mesma: ambos adotam uma série sistemática de experimentos, nos quais os fatores de entrada são alterados de forma direcionada para esclarecer as razões das mudanças significativas na resposta de saída (CHEN *et al.* 2022).

O DCCR é um tipo de planejamento experimental fatorial que permite a investigação dos efeitos de múltiplas variáveis simultaneamente, ele tem o benefício adicional de exigir menos execuções experimentais e os resultados do experimento permitem que superfícies de resposta 3D e modelos matemáticos empíricos sejam determinados para cada variável de resposta. O número de testes necessários para o DCCR são 2^k pontos fatoriais padrão com sua origem no centro, $2k$ pontos fixados axialmente na distância β do centro para gerar os termos quadráticos, replicar testes no centro, onde k se refere ao número de variáveis a ser testado. Os pontos axiais são escolhidos pela rotabilidade do planejamento, o que garante que a variância na previsão do modelo seja constante em todos os pontos equidistantes do ponto central (VENKATESAN, HARRIS, GREYLING, 2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida para auxiliar, direcionar e maximizar os resultados do sistema em cascata para biomineralização em cimento, conforme desenvolvido e descrito por Brasileiro et al. (2022).

O resumo do sistema do computador utilizado para a realização da criação das geometrias das células reacionais e todas as simulações da fluidodinâmica computacional, foi conforme Quadro 1.

Quadro 1 – Resumo do sistema do computador

Fabricante do sistema	Dell Inc.
Modelo do sistema	Inspiron 3442
Tipo do sistema	PC baseado em X64
Processador	Intel(R) Core (TM) i5-4210U CPU @ 1.70GHz, 1701 Mhz, 2 Núcleo(s), 4 Processador(es) Lógico(s)
Memória Física (RAM) Instalada	4,00 GB

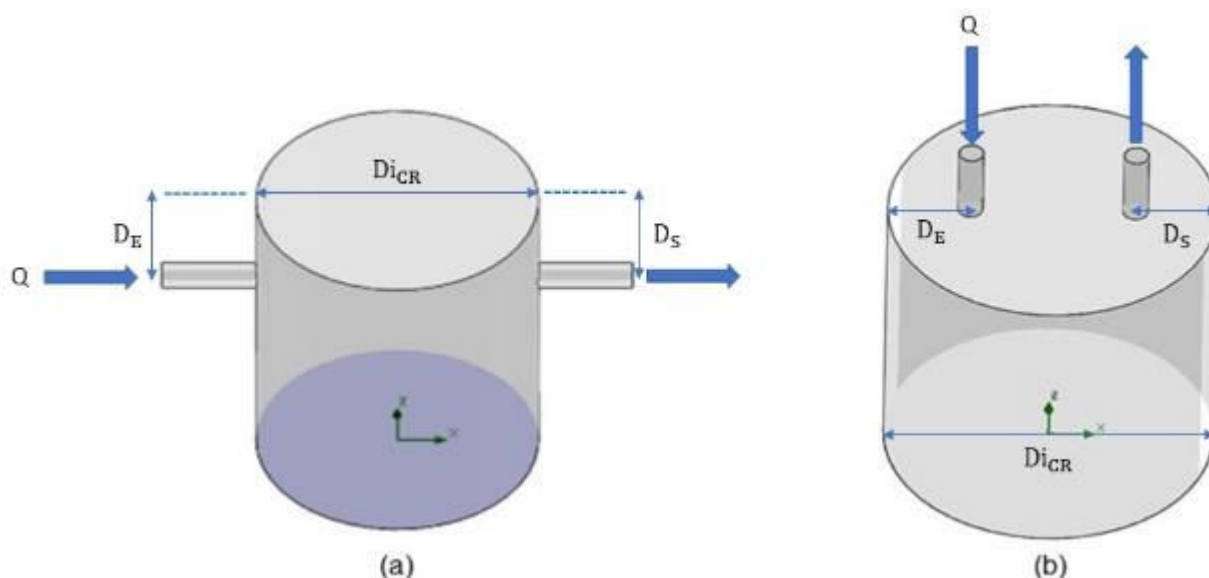
Fonte: O autor (2022).

3.1 MODELO CONCEITUAL DAS CÉLULAS REACIONAIS

Os modelos conceituais de células reacionais a serem trabalhadas foram concebidas de duas formas distintas, onde se diferem na posição das entradas e saídas da vazão volumétrica de ar. No primeiro modelo, Figura 3 (a), as entradas e saídas ficam na parte lateral e para o segundo modelo Figura 3 (b) as entradas e saídas se localizam na parte superior. Ambos exemplares de células reacionais são compostas por 4 parâmetros basilares, conforme apresentado na Figura 3, que são:

- Vazão volumétrica de ar (Q);
- Diâmetro de célula reacional (D_{iCR});
- Distância para entrada de ar (D_E);
- Distância para saída de ar (D_S).

Figura 3 – (a) Modelo conceitual de célula reacional com entrada e saída de ar na parte lateral; (b) Modelo conceitual de célula reacional com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).

3.2 CONSTRUÇÃO DAS GEOMETRIAS DAS CÉLULAS REACIONAIS

Utilizando o software SOLIDWORKS® 2020 foram construídas as geometrias das células reacionais. Cada uma delas foram desenvolvidas de acordo com as dimensões que serão especificadas na Tabela 4 e Tabela 6, citadas no item 3.3 a seguir, e respeitando o posicionamento das entradas e saídas de ar, seja na parte lateral ou superior da célula reacional, conforme Figura 3.

A construção das geometrias foi complementada com algumas dimensões padrão, que foram utilizadas em todas as geometrias produzidas, conforme Tabela 1, a seguir.

Tabela 1 – Dimensões padrão de construção para todas as células reacionais.

Dimensões padrão	cm
Altura Total das células reacionais	8,0
Comprimento das entradas e saídas de vazão de ar	2,0
Diâmetro dos tubos das entradas e saídas de vazão ar	0,6
Espessura da casca	0,001

Fonte: O autor (2022).

3.2.1 Material da geometria

O material definido para as geometrias foi o vidro. Na Tabela 2 a seguir, apresentará algumas propriedades deste material, conforme biblioteca de materiais predeterminada pelo software SOLIDWORKS® 2020.

Tabela 2 – Propriedades do material definido para as geometrias.

Propriedade	Valor
Módulo elástico	68935000000 $\frac{N}{m^2}$
Coefficiente de Poisson	0,23 v
Módulo de cisalhamento	28022000000 $\frac{N}{m^2}$
Massa específica	2457,6 $\frac{Kg}{m^3}$
Coefficiente de expansão térmica	0,000009 $^{\circ}K^{-1}$
Condutividade térmica	0,74976 $\frac{W}{m \cdot ^{\circ}K}$
Calor específico	834,61 $\frac{J}{Kg \cdot ^{\circ}K}$

Fonte: Solidworks (2020).

3.3 PLANEJAMENTOS FATORIAIS PARA INVESTIGAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE OXIGÊNIO NAS CÉLULAS REACIONAIS

Os experimentos foram realizados seguindo dois planejamentos fatoriais na forma de DCCRs. A escolha pelo DCCR foi definida, pois, este tipo de planejamento apresenta uma maior divisão dos níveis e uma maior propriedade de análise dos efeitos estimados. Para cada planejamento fatorial elaborado, tiveram 4 variáveis estudadas, e assim sendo, o DCCR, terá os níveis cúbicos de +2,00 e – 2,00, os passos são igualados, e o número total de experimentos torna-se 28 (RODRIGUES; IEMMA, 2009).

Os dois planejamentos fatoriais foram divididos de acordo com o posicionamento das entradas e saídas da vazão volumétrica de ar, que se posicionam pela parte lateral da geometria da célula reacional e pela parte superior da geometria da célula reacional. Dessa forma, os planejamentos fatoriais realizados foram nomeados de: 1) entrada e saída lateral; 2) entrada e saída superiores.

3.3.1 Planejamento fatorial entrada e saída lateral

No planejamento fatorial entrada e saída lateral, as variáveis estudadas foram: vazão volumétrica de ar (L/min), diâmetro célula reacional (cm), distância para entrada de ar (cm), distância para Saída de ar (cm). Na Tabela 3, são apresentados os valores codificados dos níveis e, na Tabela 4, a matriz dos ensaios, ambas do planejamento fatorial entrada e saída lateral.

Tabela 3 – Matriz dos níveis do Planejamento fatorial entrada e saída lateral

Níveis	Q (L/min)	Di _{CR} (cm)	D _E (cm)	D _S (cm)
-2,00	1,0	5,0	2,0	2,0
-1,00	1,5	6,0	2,5	2,5
0,00	2,0	7,0	3,0	3,0
1,00	2,5	8,0	3,5	3,5
2,00	3,0	9,0	4,0	4,0

Fonte: O autor (2022).

Tabela 4 – Matriz dos ensaios do Planejamento fatorial entrada e saída lateral

Ensaio	Q (L/min)	Di _{CR} (cm)	D _E (cm)	D _S (cm)
1	1,5	6,0	2,5	2,5
2	2,5	6,0	2,5	2,5
3	1,5	8,0	2,5	2,5
4	2,5	8,0	2,5	2,5
5	1,5	6,0	3,5	2,5
6	2,5	6,0	3,5	2,5
7	1,5	8,0	3,5	2,5
8	2,5	8,0	3,5	2,5
9	1,5	6,0	2,5	3,5
10	2,5	6,0	2,5	3,5
11	1,5	8,0	2,5	3,5
12	2,5	8,0	2,5	3,5
13	1,5	6,0	3,5	3,5
14	2,5	6,0	3,5	3,5
15	1,5	8,0	3,5	3,5
16	2,5	8,0	3,5	3,5
17	1,0	7,0	3,0	3,0
18	3,0	7,0	3,0	3,0
19	2,0	5,0	3,0	3,0
20	2,0	9,0	3,0	3,0
21	2,0	7,0	2,0	3,0
22	2,0	7,0	4,0	3,0
23	2,0	7,0	3,0	2,0
24	2,0	7,0	3,0	4,0
25	2,0	7,0	3,0	3,0

Fonte: O autor (2022).

3.3.2 Planejamento fatorial entrada e saída superiores

No planejamento fatorial entrada e saída superiores, as variáveis estudadas foram: vazão volumétrica de ar (L/min), diâmetro célula reacional (cm), distância para entrada de ar (cm), distância para Saída de ar (cm). Na Tabela 5, são apresentados os valores codificados dos níveis e, na Tabela 6, a matriz dos ensaios, ambas do planejamento fatorial entrada e saída superiores.

Tabela 5 – Matriz dos níveis do Planejamento fatorial entrada e saída superiores

Níveis	Q (L/min)	Di _{CR} (cm)	D _E (cm)	D _S (cm)
-2,00	2,0	7,0	1,75	1,75
-1,00	2,5	8,0	2,00	2,00
0,00	3,0	9,0	2,25	2,25
1,00	3,5	10,0	2,50	2,50
2,00	4,0	11,0	2,75	2,75

Fonte: O autor (2022).

Tabela 6 – Matriz dos ensaios do Planejamento fatorial entrada e saída superiores

Ensaio	Q (L/min)	Di _{CR} (cm)	D _E (cm)	D _S (cm)
1	2,5	8,0	2,00	2,00
2	3,5	8,0	2,00	2,00
3	2,5	10,0	2,00	2,00
4	3,5	10,0	2,00	2,00
5	2,5	8,0	2,50	2,00
6	3,5	8,0	2,50	2,00
7	2,5	10,0	2,50	2,00
8	3,5	10,0	2,50	2,00
9	2,5	8,0	2,00	2,50
10	3,5	8,0	2,00	2,50
11	2,5	10,0	2,00	2,50
12	3,5	10,0	2,00	2,50
13	2,5	8,0	2,50	2,50
14	3,5	8,0	2,50	2,50
15	2,5	10,0	2,50	2,50
16	3,5	10,0	2,50	2,50
17	2,0	9,0	2,25	2,25
18	4,0	9,0	2,25	2,25
19	3,0	7,0	2,25	2,25
20	3,0	11,0	2,25	2,25
21	3,0	9,0	1,75	2,25

22	3,0	9,0	2,75	2,25
23	3,0	9,0	2,25	1,75
24	3,0	9,0	2,25	2,75
25	3,0	9,0	2,25	2,25

Fonte: O autor (2022).

3.4 SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Modelos numéricos foram construídos no SOLIDWORKS® e o estudo de simulação foi realizado pela ferramenta Flow Simulation, do mesmo software. O SOLIDWORKS® Flow Simulation é uma nova classe de software de análise CFD e foi utilizada para estudos de fenômenos de transporte de fluidos (PALANISAMY; AYALUR, 2021).

Através do SOLIDWORKS® Flow Simulation foram realizadas as simulações de fluidodinâmica computacional, utilizando as Q (L/min) apresentadas nos ensaios descritos pelas Tabela 4 e Tabela 6, onde estas vazões volumétricas de ar foram aplicadas nas geometrias das células reacionais construídas conforme relatado anteriormente.

Para se chegar as vias finais de simulação, se faz necessário ajustar alguns parâmetros no software, conforme definido na Tabela 7, a seguir.

Tabela 7 – Parâmetros de trabalho para as simulações.

Parâmetros de trabalho	Definições
Sistemas de trabalho	SI
Temperatura	°C
Tipo de análise	Interna
Considerar cavidades fechadas	Excluir cavidades sem condições de fluxo
Características físicas	Gravidade
Fluido	Ar
Tipo de fluxo	Laminar
Condição térmica padrão da parede	35°C
Rugosidade da parede	2 micrometros
Pressão	101325 Pa
Temperatura	35°C
Condição de contorno de entrada	Vazão volumétrica de entrada (Q)
Condição de contorno de Saída	Pressão ambiente

Fonte: O autor (2022).

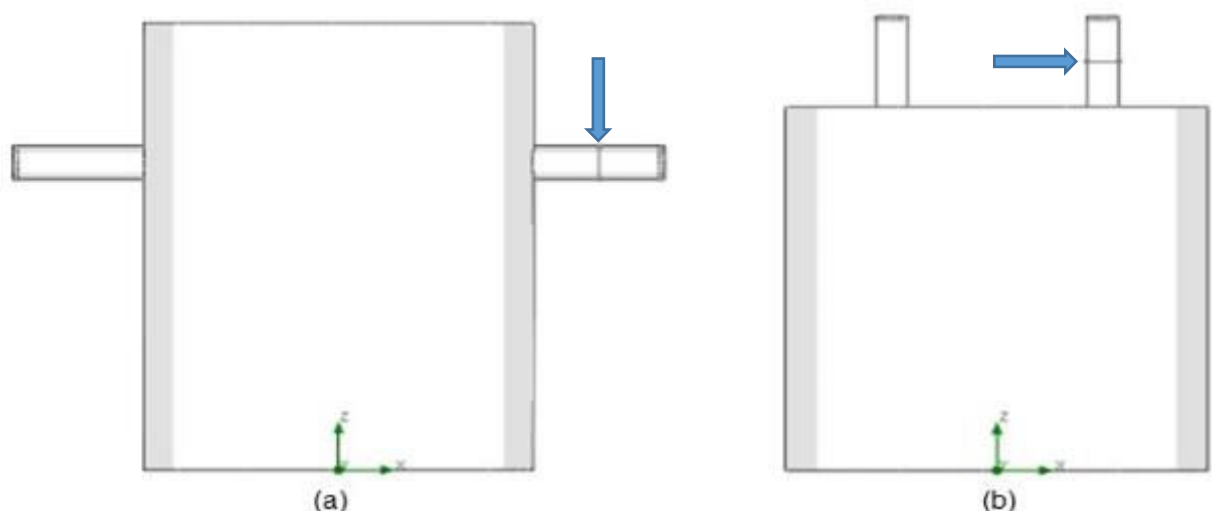
3.5 ESTUDO DE CONVERGÊNCIA DE MALHA

O estudo de convergência de malha consiste em determinar se a malha está suficientemente refinada para se identificar as características do escoamento e obter resultados mais confiáveis. Para isso, sugere-se fazer análise comparativa entre duas ou mais malhas de diferentes graus de refinamento (BOTAN, 2019).

Para dar início ao estudo de convergência das malhas, se utilizou todas as geometrias construídas, como abordado no item 3.2, e os parâmetros de trabalhos utilizados seguem na Tabela 7, citada anteriormente.

A malha global definida para todas as geometrias das células reacionais construídas foi a de nível 4 (a malha global comporta do nível 1 ao 7). Para realizar o estudo de convergência de malha foi necessário fazer refinamentos locais nas regiões de maiores fluxos da geometria, ou seja, nas entradas e saídas. Estes refinamentos locais tiveram os níveis avaliados de 0 a 6 (a malha local comporta do nível 0 ao 9). Para que o estudo se tornasse possível, foi criado uma linha na região de saída de cada célula, vertical ao escoamento do fluido, na região central do tubo e ficando 1 cm do final do mesmo, conforme Figura 4, e ao utilizar este recurso, se pretende captar todo o perfil de velocidade sobre a linha traçada, obter dados de todos os refinamentos e realizar análises gráficas para que se consiga estudar e definir a melhor malha para desenvolver as simulações.

Figura 4 – (a) Modelo de geometria com entrada e saída na parte lateral com linha esboçada a 1 cm do final do tubo de saída de ar; (b) Modelo de geometria com entrada e saída na parte superior com linha esboçada a 1 cm do final do tubo de saída de ar.

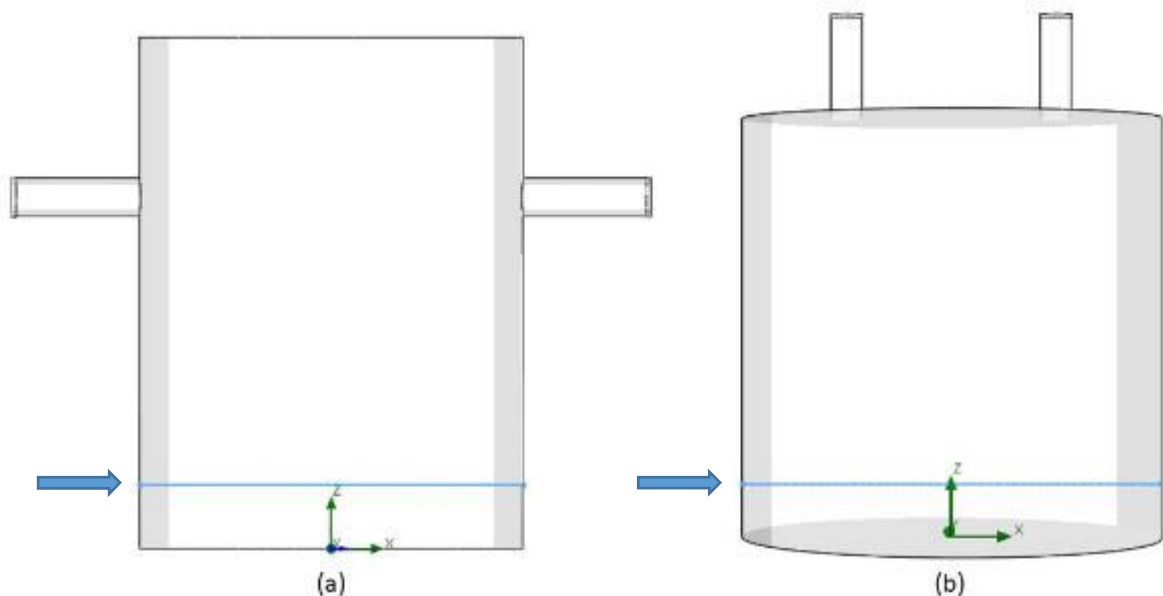


Fonte: O autor (2022).

3.6 ESTUDOS DE VELOCIDADE E PRESSÃO

Ao finalizar o estudo de convergência de malha e definido as melhores malhas a serem utilizadas nas simulações, foram avaliadas as condições de velocidade e pressão do ar inserido nas células reacionais. Assim sendo, foram realizadas duas análises diferentes para estes parâmetros, uma global, onde podemos avaliar os dois fatores de forma completa na célula reacional e outra de forma personalizada, em uma região de interesse, em que se projeta para futuros trabalhos que práticos, posicionar uma lâmina do biocimento. Esta região, fica a 7 cm da parte superior do objeto, e foi traçado uma linha de acordo com o diâmetro de cada geometria construída, conforme exemplo da Figura 5, e sobre esta linha foram capturados dados de alguns pontos, através de interpolações, e desta forma, pretende-se visualizar o comportamento da velocidade e pressão nesta determinada região, e os dados obtidos servirão para as análises estatísticas realizadas posteriormente.

Figura 5 – (a) Modelo de geometria com entrada e saída na parte lateral com linha esboçada a 7cm da parte superior da célula reacional; (b) Modelo de geometria com entrada e saída na parte superior com linha 7cm da parte superior da célula reacional.



Fonte: O autor (2022).

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados de velocidade e pressão em região específica obtidos no item 3.6 foram utilizados para as análises estatísticas, com o auxílio do software *Statistica* 10.0 para realizar a modelagem dos dados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As observações realizadas via simulação apresentaram um estudo de convergência de malha, investigações utilizando simulações CFD para os parâmetros velocidade e pressão e análise estatística para avaliar melhores condições de operação.

4.1 ESTUDO DE CONVERGÊNCIA DE MALHA

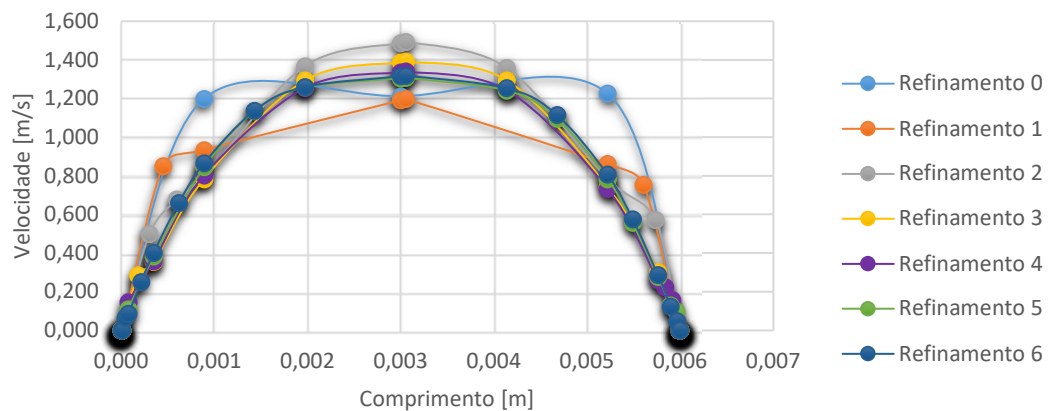
A abordagem computacional do Flow Simulation é baseada em malhas retangulares refinadas localmente próximas aos limites da geometria. As células da malha são paralelepípedos retangulares com faces ortogonais aos eixos especificados do sistema de coordenadas cartesianas. (SOLIDWORKS, 2020).

O estudo de convergência malha realizado, foi avaliado através de análise gráfica, e estas verificações, apresentam uma tendência a convergência, onde confrontando os 4 gráficos gerados para cada ensaio, verificou-se que os estudos são complementares.

O principal parâmetro desse estudo foi a velocidade, e através dela, se utilizou também, o tempo de CPU utilizado em cada refinamento, para todos os ensaios. Hoiberg e Shah (2021) relataram que a componente velocidade foi selecionada para o estudo de convergência de malha, pois sua magnitude era significativamente maior do que outras componentes e tinha um impacto significativo na sedimentação. Martins et al. (2014) consideram que as malhas mais eficientes são aquelas que atendem a dois critérios: a máxima precisão e o mínimo esforço computacional (ou seja, tempo computacional).

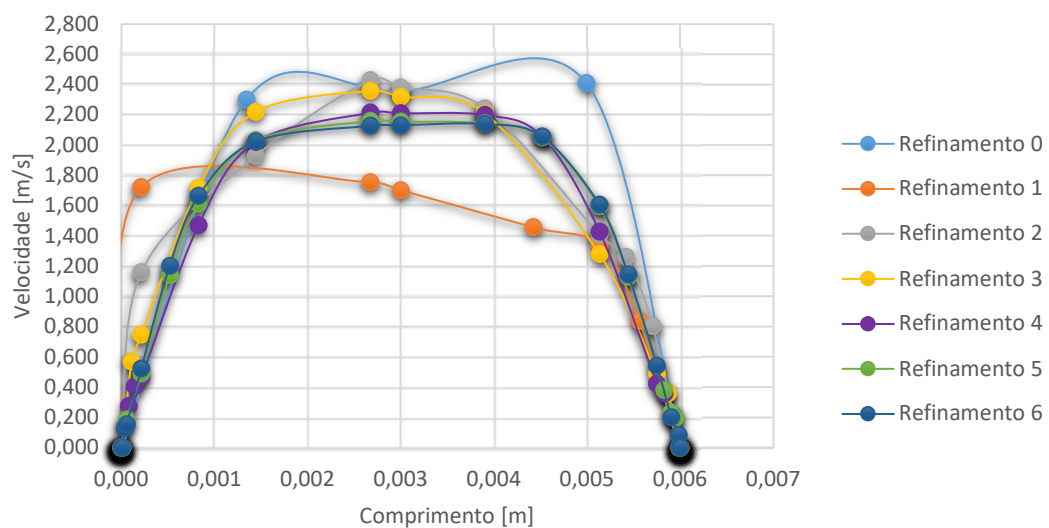
Para os Gráfico 1, Gráfico 2 e conforme Apêndice A que avaliam a velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos, em todos os casos, tanto para as geometrias com entrada e saída de ar na parte lateral quanto para geometrias com entrada e saída de ar na parte superior é possível observar uma dispersão nos refinamentos iniciais, porém ao refinar mais as regiões de estudo, o comportamento das curvas tende a se estabilizar e a convergir, de forma a se sobrepor uma sobre as outras.

Gráfico 1 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



Fonte: O autor (2022).

Gráfico 2 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.

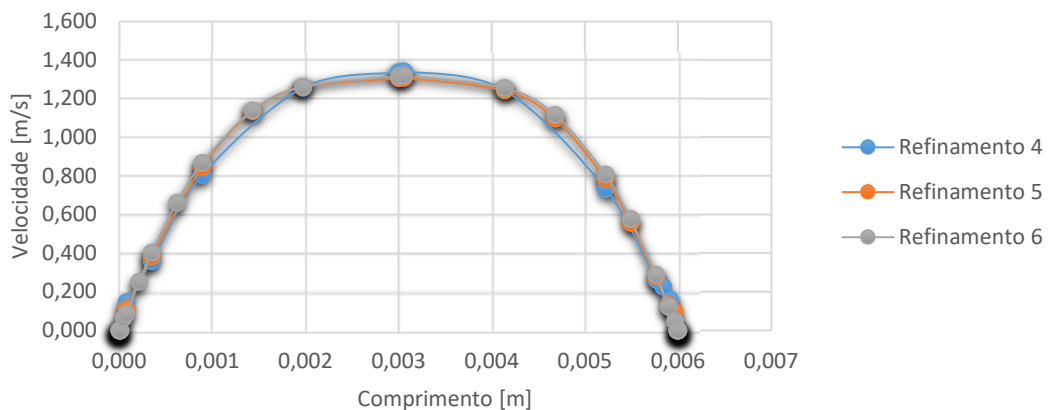


Fonte: O autor (2022).

Para os Gráfico 3, Gráfico 4 e conforme Apêndice B que analisam a velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, em todos os casos, tanto para as geometrias com entrada e saída de ar na parte lateral quanto para geometrias com entrada e saída de ar na parte superior, foram selecionados os últimos três refinamentos, pois, é onde se apresentou os melhores ajustes das curvas, e se pode constatar uma tendencia a convergência, onde basicamente as malhas se sobrepõe, principalmente nos níveis de refinamento 5 e 6, apresentando estabilidade nos refin. Hoiberg e Shah (2021) evidenciaram que a independência da malha foi investigada

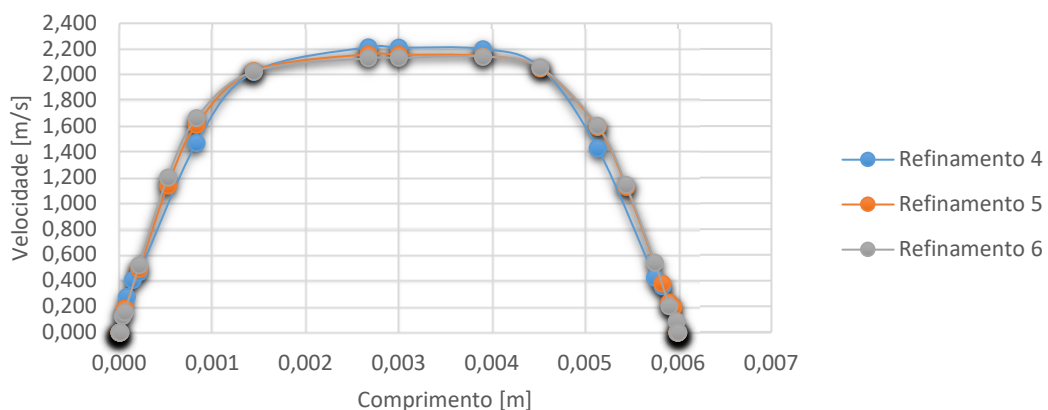
simulando malhas de três níveis. As previsões quantitativas estavam em estreita concordância com discrepâncias em aproximadamente 10%. Consequentemente, os resultados foram considerados suficientemente independentes e a geometria com aproximadamente 1,5 milhão de células foi usada na simulação.

Gráfico 3 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



Fonte: O autor (2022).

Gráfico 4 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.

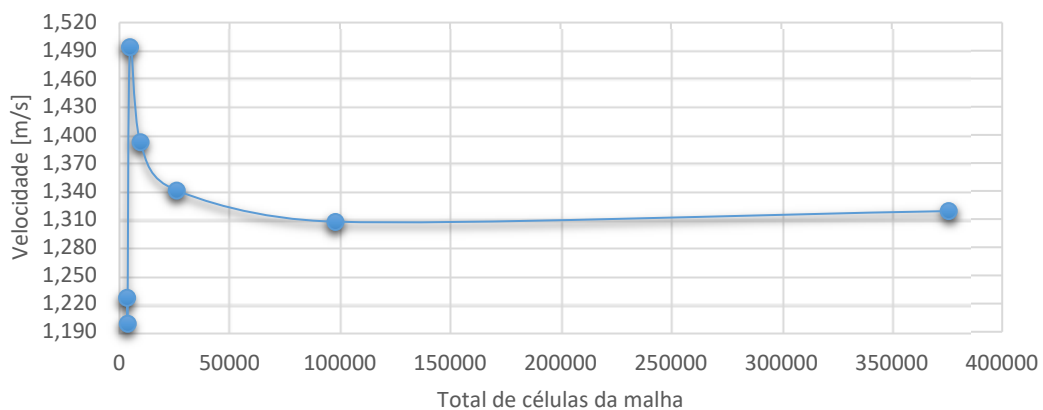


Fonte: O autor (2022).

Para os Gráfico 5, Gráfico 6 e conforme Apêndice C que retratam a velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células, em todos os casos, tanto para as geometrias com entrada e saída de ar na parte lateral quanto para geometrias com entrada e saída de ar na parte superior, se observou uma linearidade nos resultados, onde por mais que se varie o número total de células, o comportamento tenderá a

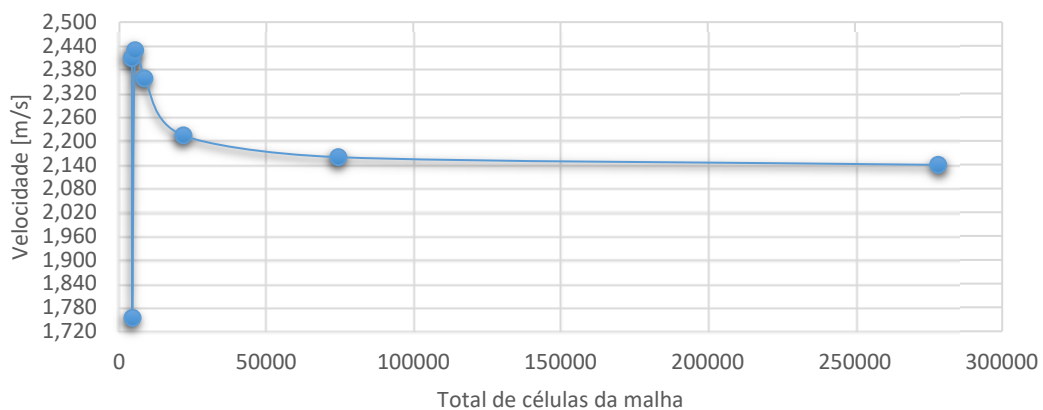
convergência. Palanisamy e Ayalur (2021) observaram em seus estudos menos de 5% de variação nos parâmetros analisados entre os níveis de refinamento de 5 e 6 com contagens totais de células de 228.0800 e 482.0487. Para todos estes gráficos, se encontra valores percentuais iguais ou menores da variação encontrada pela literatura mencionada.

Gráfico 5 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



Fonte: O autor (2022).

Gráfico 6 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.

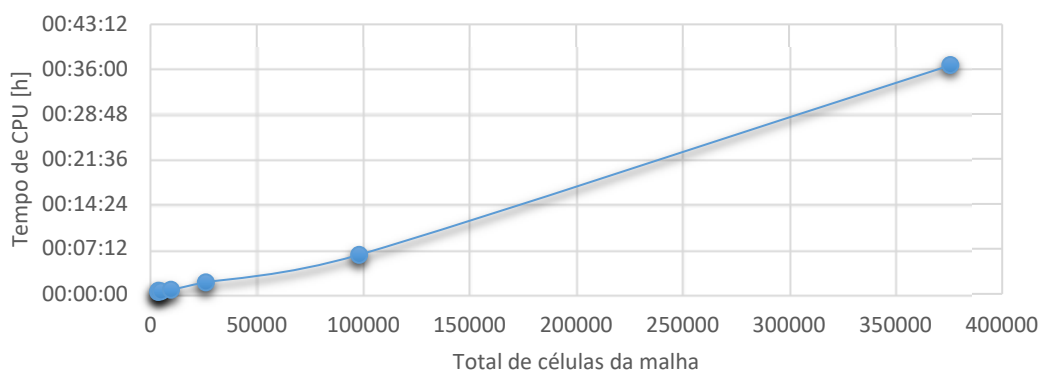


Fonte: O autor (2022).

Para os Gráfico 7, Gráfico 8 e conforme Apêndice D que abordam sobre o de tempo computacional *versus* total de células, em todos os casos, tanto para as geometrias com entrada e saída de ar na parte lateral quanto para geometrias com entrada e saída de ar na parte superior, pode-se observar principalmente nos últimos

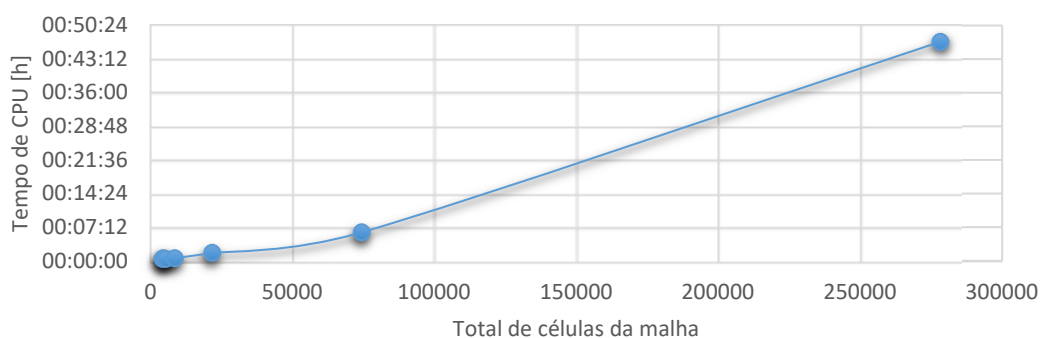
dois pontos dos gráficos, que são referentes ao refinamento de nível 5 e o refinamento de nível 6, existe uma disparidade entre os parâmetros trabalhados. Para o número total de células, chegando a ser 3 ou 4 vezes maior quando se vai do nível de refinamento 5 ao 6, além do esforço computacional que se é elevado também. O tempo de CPU e o número de células necessárias para a convergência foram avaliados por Serra e Semiao (2021), no cenário mais eficiente do estudo conseguiram melhorias que variam de 7% a 39% de menos iterações e de 10% a 185% de tempo de CPU mais rápido, em relação aos outros parâmetros estudados.

Gráfico 7 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



Fonte: O autor (2022).

Gráfico 8 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).

Assim sendo, as Tabela 8 e Tabela 9, apresentam as representações das melhores combinações de malhas globais e locais para cada ensaio, as quantidades de células e tempos de operação geradas por essas combinações de malhas, para as

geometrias com entrada e saída de ar na parte lateral e na parte superior, respectivamente. Para ambos os modelos de geometrias criados, e diante de toda a análise gráfica discutida anteriormente, para a malha local, definiu-se como a mais adequada para as simulações, a malha de refinamento nível 5. Já para a malha global, a escolhida foi a de nível 4, de forma a ter uma maior precisão nos resultados. Segundo o Solidworks (2020), se as razões estimadas não forem muito grandes, recomenda-se criar a malha usando as configurações de malha padrão (automática). Iniciando com o nível da malha global de 3 se a geometria do modelo e o campo de fluxo forem relativamente suaves, e para problemas mais complexos, recomenda-se o nível de malha 4 ou 5.

Tabela 8 – Representação das melhores combinações de malhas global e local para cada ensaio, a quantidade de células e tempo de operação geradas por essas combinações de malhas, para a geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.

Ensaio	Malha global	Malha local	Total de células	Tempo de CPU
1	4	5	97.867	00:06:14
2	4	5	96.322	00:08:32
3	4	5	72.649	00:05:13
4	4	5	74.356	00:06:16
5	4	5	99.563	00:05:52
6	4	5	92.883	00:07:03
7	4	5	71.866	00:05:09
8	4	5	72.571	00:05:34
9	4	5	95.869	00:06:19
10	4	5	97.995	00:07:27
11	4	5	76.073	00:05:08
12	4	5	77.433	00:05:57
13	4	5	98.167	00:05:36
14	4	5	102.552	00:06:54
15	4	5	77.668	00:06:44
16	4	5	71.576	00:11:31
17	4	5	80.647	00:04:39

18	4	5	77.454	00:07:24
19	4	5	110.969	00:06:40
20	4	5	61.536	00:04:51
21	4	5	80.836	00:07:37
22	4	5	81.680	00:05:41
23	4	5	83.453	00:06:02
24	4	5	81.675	00:07:29
25	4	5	79.594	00:04:41

Fonte: O autor (2022).

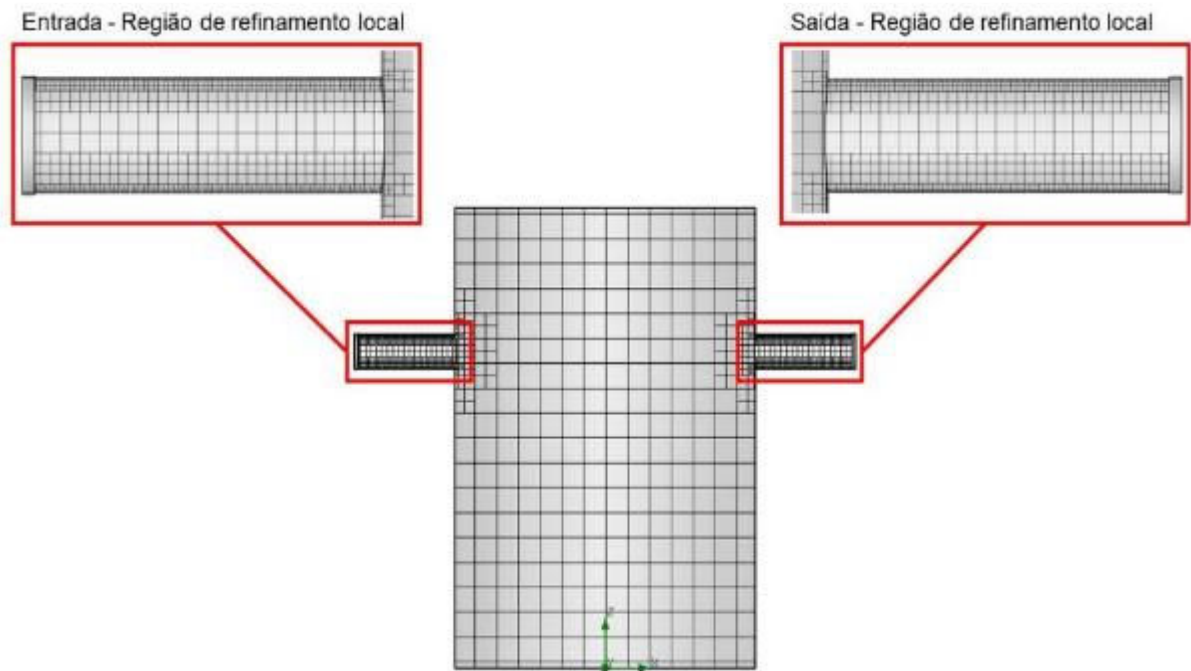
Tabela 9 – Representação das melhores combinações de malhas global e local para cada ensaio, a quantidade de células e tempo de operação geradas por essas combinações de malhas, para a geometria com entrada e saída de ar na parte superior.

Ensaio	Malha global	Malha local	Total de células	Tempo de CPU
1	4	5	74.393	00:06:09
2	4	5	83.326	00:08:31
3	4	5	66.487	00:15:27
4	4	5	65.374	00:11:11
5	4	5	77.516	00:05:58
6	4	5	84.140	00:06:14
7	4	5	65.217	00:06:17
8	4	5	64.102	00:10:11
9	4	5	85.438	00:14:50
10	4	5	87.247	00:22:13
11	4	5	61.874	00:07:35
12	4	5	62.396	00:08:35
13	4	5	83.749	00:05:59
14	4	5	87.232	00:06:14
15	4	5	59.558	00:04:03
16	4	5	62.351	00:04:29
17	4	5	80.308	00:06:31
18	4	5	81.577	00:10:26
19	4	5	102.110	00:06:15
20	4	5	55.496	00:06:44
21	4	5	73.166	00:05:13
22	4	5	79.710	00:05:56
23	4	5	73.034	00:07:23
24	4	5	78.307	00:12:32
25	4	5	76.280	00:09:00

Fonte: O autor (2022).

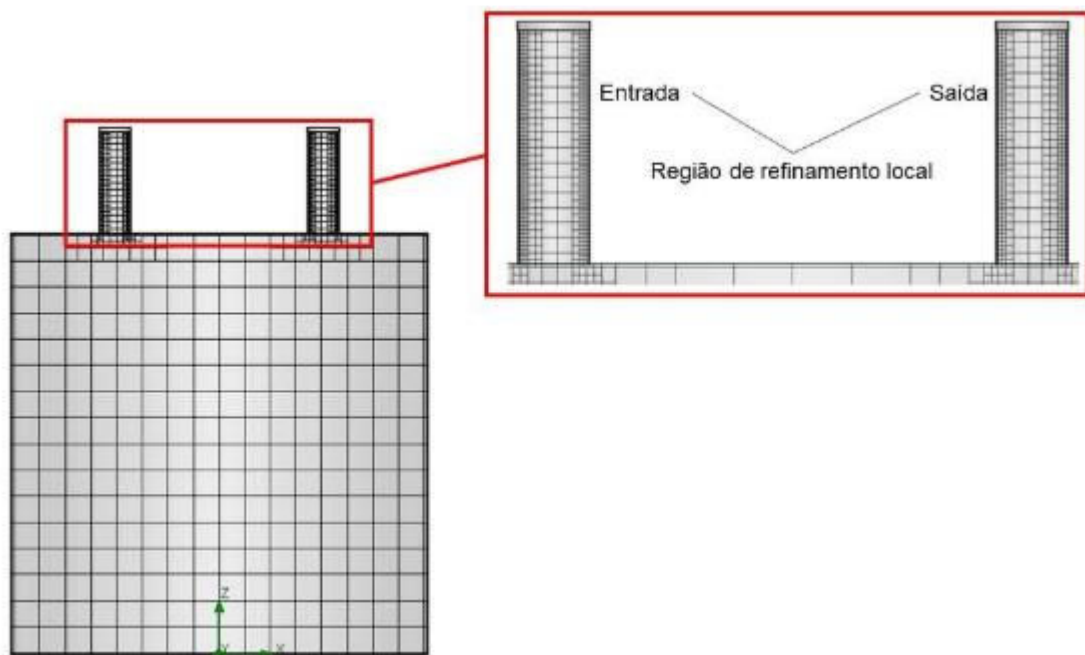
As Figura 6 e Figura 7, apresentam as representações das melhores malhas obtidas após o estudo de convergência, para os dois modelos de geometrias criados.

Figura 6 – Representação da malha criada após definição das malhas globais e locais, para uma geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



Fonte: O autor (2022).

Figura 7 – Representação da malha criada após definição das malhas globais e locais, para uma geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



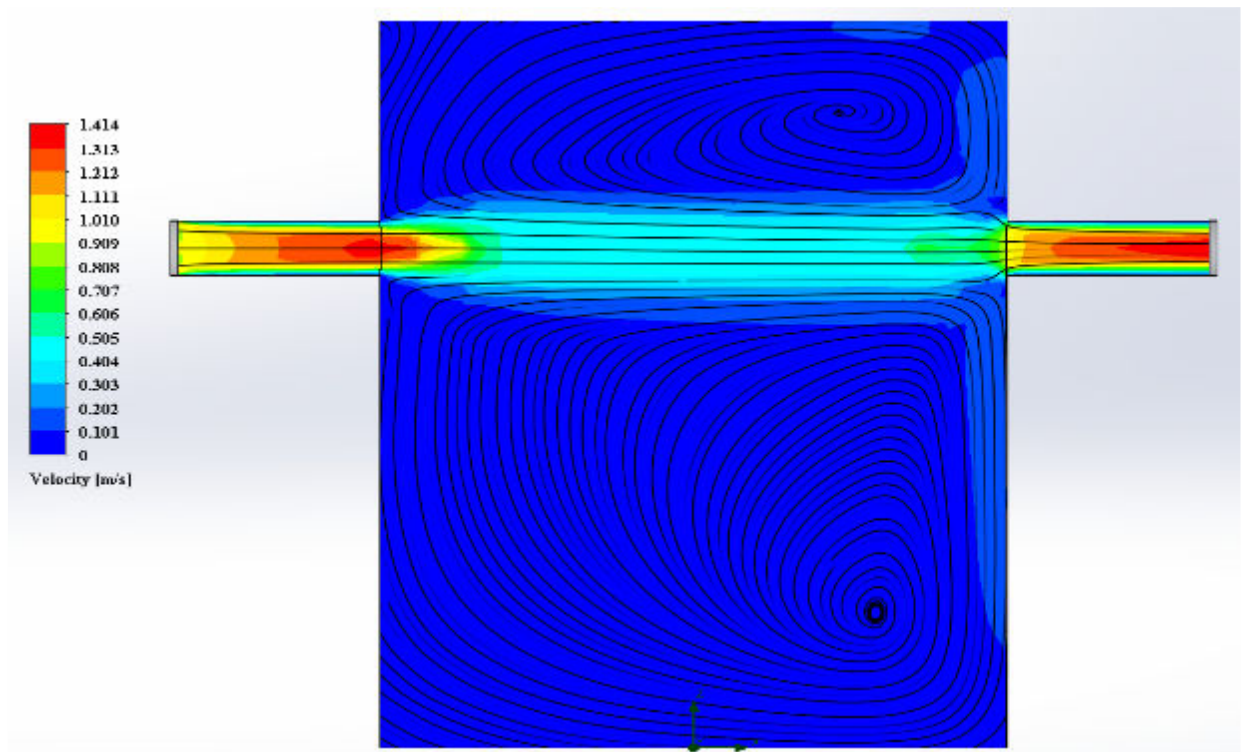
Fonte: O autor (2022).

4.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES CFD PARA OS PARÂMETROS DE VELOCIDADE E PRESSÃO

As observações dos resultados das simulações fluidodinâmicas computacionais, para os parâmetros de velocidade e pressão, apresentaram algumas tendências, independentemente do tipo de geometria utilizada, seja com entrada e saída de ar na parte lateral ou com entrada e saída de ar na parte lateral superior.

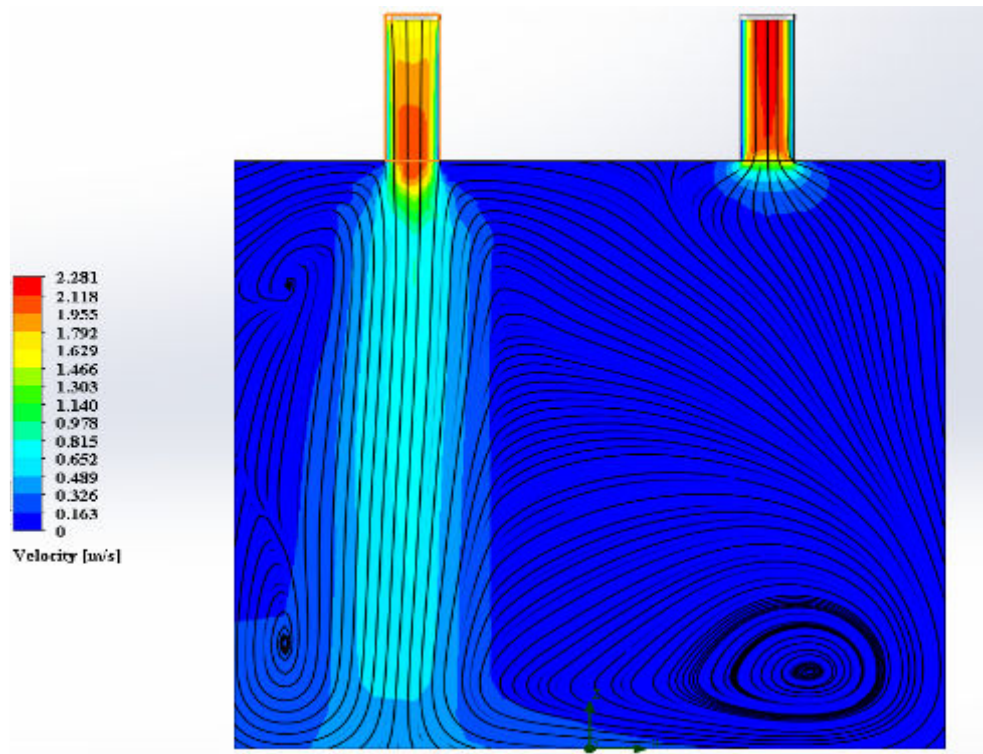
Para as Figura 8, Figura 9 e conforme Apêndice E, que são correspondentes a velocidade de escoamento do ar na célula reacional, em todos os casos, tanto para as geometrias com entrada e saída de ar na parte lateral quanto para geometrias com entrada e saída de ar na parte superior, a vazão de ar (L/min) foi o fator de maior importância para estes resultados, onde, nos ensaios que detinham os maiores e menores valores de vazão de ar, obteve-se os maiores e menores valores de velocidade, respectivamente.

Figura 8 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



Fonte: O autor (2022).

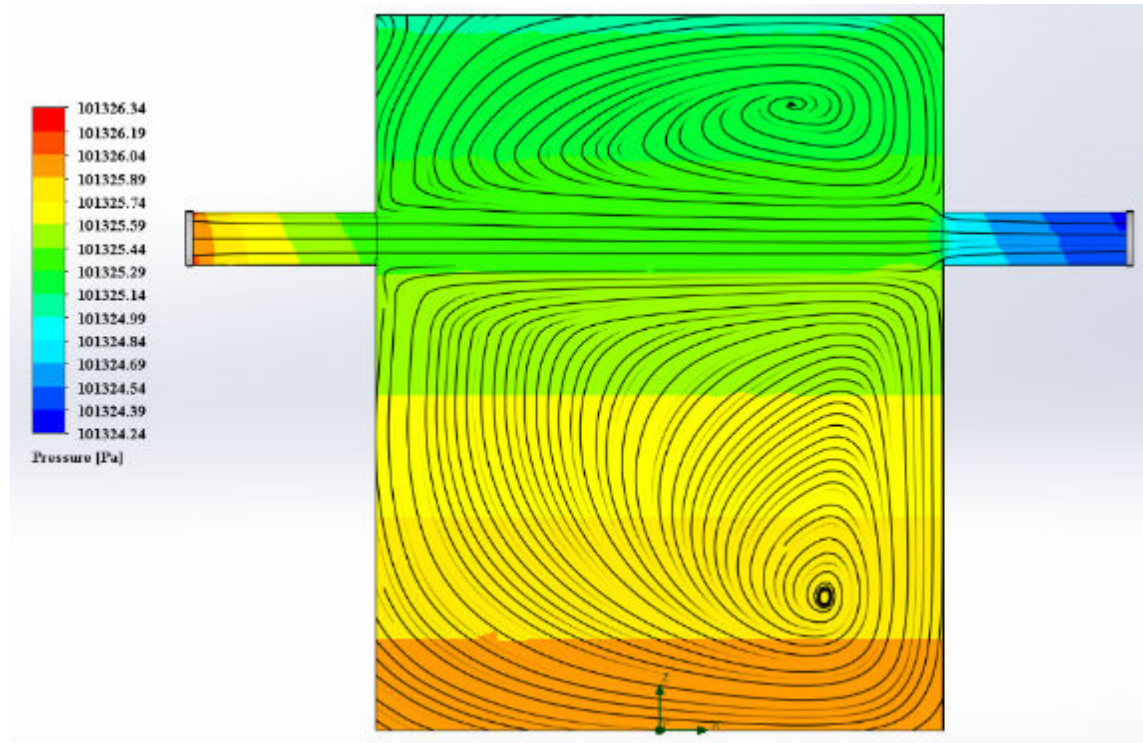
Figura 9 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).

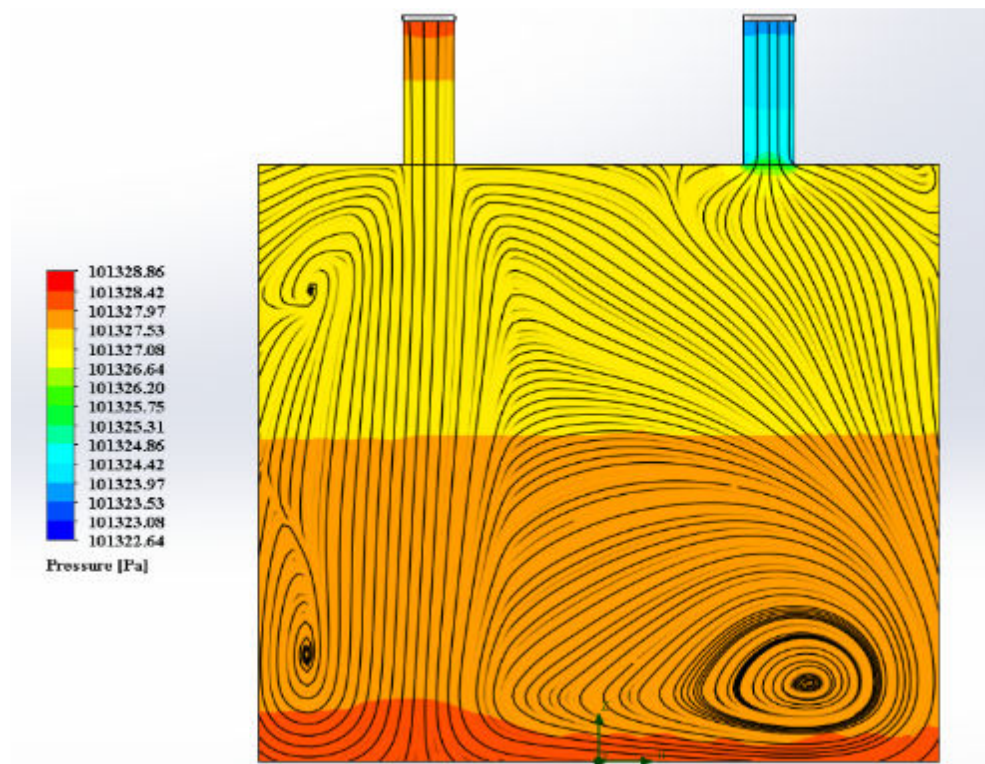
Quanto as Figura 10, Figura 11 e conforme Apêndice F, que são referentes a pressão interna na célula reacional, em todos os casos, tanto para as geometrias com entrada e saída de ar na parte lateral quanto para geometrias com entrada e saída de ar na parte superior, observou-se uma variação de pressão bem moderada, com valores em torno do parâmetro de trabalho estabelecido previamente, 101325 Pa (valor da pressão atmosférica padrão ao nível médio do mar), que era algo já aguardado.

Figura 10 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



Fonte: O autor (2022).

Figura 11 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 1, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).

As linhas de correntes apresentadas em todos os modelos para a velocidade e pressão, tanto para as geometrias com entrada e saída de ar na parte lateral quanto para geometrias com entrada e saída de ar na parte superior, evidenciam a trajetória das partículas de ar em forma de linhas, e pode-se constatar que a célula reacional está totalmente preenchida de ar, dando bons indicativos para futuros trabalhos práticos, mostrando uma boa disponibilidade de ar na célula. Na mecânica dos fluidos, as linhas de corrente são as trajetórias de partículas imaginárias suspensas no fluido e transportadas com ele. Em escoamento permanente, o fluido está em movimento, mas as linhas de corrente são fixas e instantaneamente tangentes ao vetor de velocidade do escoamento (ALHAJAHMAD; MITTELSTEDT, 2022).

Ao realizar um comparativo entre as figuras referentes a velocidade de escoamento do ar e a pressão interna na célula reacional, mesmo tendo o parâmetro de pressão com valores discretos, é possível considerar efeitos do princípio de Bernoulli sobre essas resoluções. Visto que, o princípio de Bernoulli teoriza que a pressão ou soma das energias cinética e potencial de uma corrente de fluido movendo-se através de um tubo é constante. Se o gás se move com um fluxo laminar, se move através de uma constricção em um tubo, a energia cinética do fluido aumentará e, portanto, a energia potencial deve cair de acordo com a lei da conservação da energia, para manter a soma total da energia constante (THOMPSON; HARDY, 2021).

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DE VELOCIDADE E PRESSÃO OBTIDOS EM REGIÃO ESPECÍFICA

O planejamento fatorial pode ser definido como o ramo da estatística envolvido no planejamento, coleta e análise de dados experimentais para garantir que conclusões válidas e objetivas sejam alcançadas. O planejamento fatorial trata do entendimento do efeito de variáveis independentes ou de entrada (fatores) sobre a variável dependente ou de saída (resposta). Este tipo de experimentos envolve o teste de todas as combinações possíveis de dois ou mais fatores e seus níveis (fatorial completo) ou o teste de apenas um subconjunto do fatorial completo (fatorial fracionário) (ROMÁN-RAMÍREZ; MARCO, 2022).

A representação de algum fenômeno através de um modelo é, por muitas vezes, demorada, refletindo a preocupação de encontrar um rumo mais adequado em busca desta equação, ou seja, em busca da otimização. A preservação do processo, a tabela de efeitos, a análise de variância (ANOVA), a análise dos resíduos, gráficos de contorno e superfície são ferramentas essenciais para guiar o pesquisador por onde se deve seguir.

Assim sendo, neste trabalho foram analisados os resultados de pressão e velocidade via CFD, em uma região específica, para os planejamentos fatoriais com Entrada e Saída Lateral e Entrada e Saída Superiores, com a finalidade de propor as condições mais viáveis em busca da otimização do processo.

4.3.1 Geometrias com entrada e saída de ar na parte lateral

Avaliando-se a resposta da velocidade de escoamento do ar na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral, observou-se que são estatisticamente significativos os efeitos da vazão de ar linear, distância para entrada de ar e distância para saída de ar. Recalculando apenas com os termos significativos, obtém-se os dados apresentados na Tabela 10, verificadas pelo valor-p e pelos limites mínimo e máximo dos efeitos estudados.

Tabela 10 – Tabela de efeitos para a velocidade de escoamento do ar na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.

Fatores	Efeito	Erro Padrão	t(21)	p	Limite Mínimo (-95%)	Limite Máximo (+95%)
Média	0,054845	0,001953	28,08876	0,000000	0,050784	0,058905
Vazão de ar	0,038322	0,003986	9,61509	0,000000	0,030034	0,046611
Distância para Entrada de ar	0,022192	0,003986	5,56802	0,000016	0,013904	0,030481
Distância para Saída de ar	-0,016901	0,003986	-4,24056	0,000366	-0,025190	-0,008613

Fonte: O autor (2022).

Os resultados experimentais foram também avaliados usando análise de variância (ANOVA), que é um método estatístico usado para comparar a distribuição de três ou mais grupos em amostras independentes (KORGAL; UPADHYAYA; ANILKUMAR, 2022).

Na ANOVA, a soma dos quadrados representa o desvio de cada variável da média populacional. O quadrado médio é calculado dividindo a soma dos quadrados pelos graus de liberdade. O valor F é construído como a razão entre o quadrado médio de cada termo do modelo e o quadrado médio do resíduo. Um valor F superior ao valor crítico deve ser obtido para garantir a significância suficiente do termo do modelo. O valor-p é definido como o nível mínimo de teste de significância para rejeição da hipótese nula (YU; SHI; LIU; LIU, 2022).

A Tabela 11 apresenta os resultados da análise de variância para a velocidade que foi feita com um nível de confiança de 95%, e pode-se observar, mais uma vez, que a vazão de ar tem um impacto substancial na velocidade, com a distância para a entrada de ar e a distância para saída de ar apresentando também exercendo efeitos significativos sobre o parâmetro estudado.

Tabela 11 – Tabela ANOVA para a velocidade de escoamento do ar na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.

Fatores	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F	p
Vazão de ar	1	0,008812	0,008812	92,44991	0,000000
Distância para Entrada de ar	1	0,002955	0,002955	31,00290	0,000016
Distância para Saída de ar	1	0,001714	0,001714	17,98236	0,000366
Erro	21	0,002002	0,000095		
Total Soma dos quadrados	24	0,015482			

Fonte: O autor (2022).

Um dos objetivos do planejamento de experimentos é obter um modelo matemático que representa a relação entre a resposta e os fatores (ROMÁN-

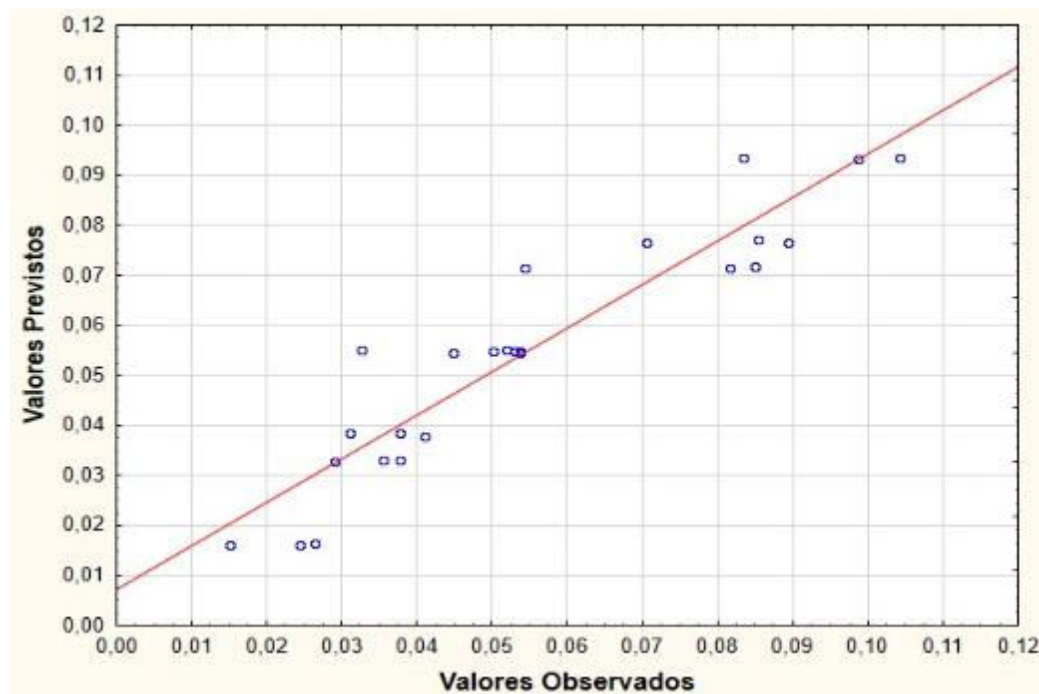
RAMÍREZ; MARCO, 2022). A Equação 14 a seguir, representa o modelo matemático encontrado para a velocidade de escoamento do ar na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral e seus efeitos estatisticamente significativos, e o respectivo coeficiente de determinação (R^2). O R^2 é usado para medir a qualidade do ajuste para o modelo de regressão, e um valor de R^2 mais próximo de 1 indica que o modelo se ajusta melhor aos dados observados (YU; SHI; LIU; LIU, 2022).

$$V = 0,06 + 0,02Q + 0,01D_E - 0,01D_S \quad (14)$$

$$R^2 = 87,1\%$$

A Figura 12, apresenta o gráfico dos valores previstos *versus* valores observados, onde pode-se observar um ajuste satisfatório aos dados da amostra e com resíduos pequenos, dando mais confiabilidade aos resultados.

Figura 12 – Gráfico dos valores previstos *versus* valores observados para a velocidade de escoamento do ar na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



Fonte: O autor (2022).

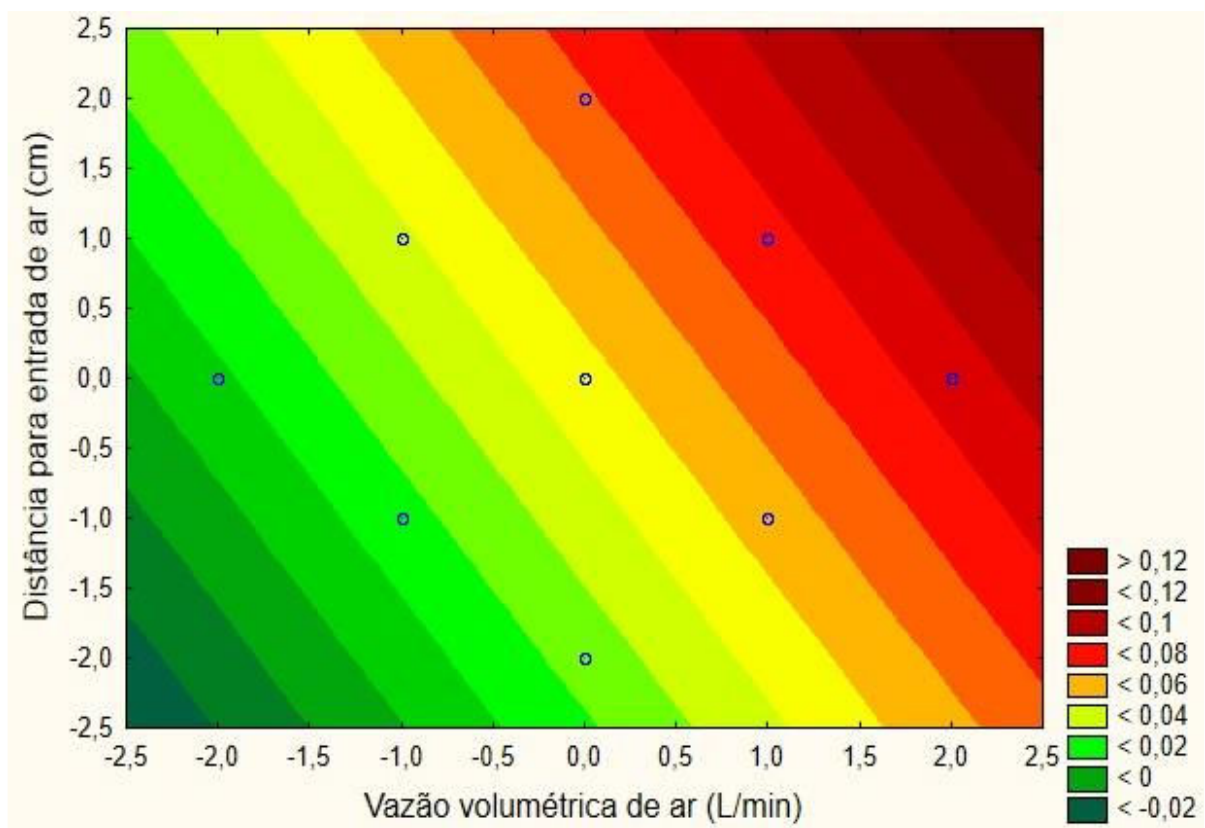
A metodologia de superfície de resposta é um conjunto de ferramentas matemáticas e estatísticas para modelagem e avaliação de problemas em que o

objetivo é maximizar uma resposta que é influenciada por inúmeras variáveis (KALIYAVARADHAN; LI; LING, 2022).

A Figura 13, Figura 14, Figura 15 apresentam os gráficos de superfície de resposta 2-D para analisar os efeitos interativos das variáveis estatisticamente significativas na velocidade, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.

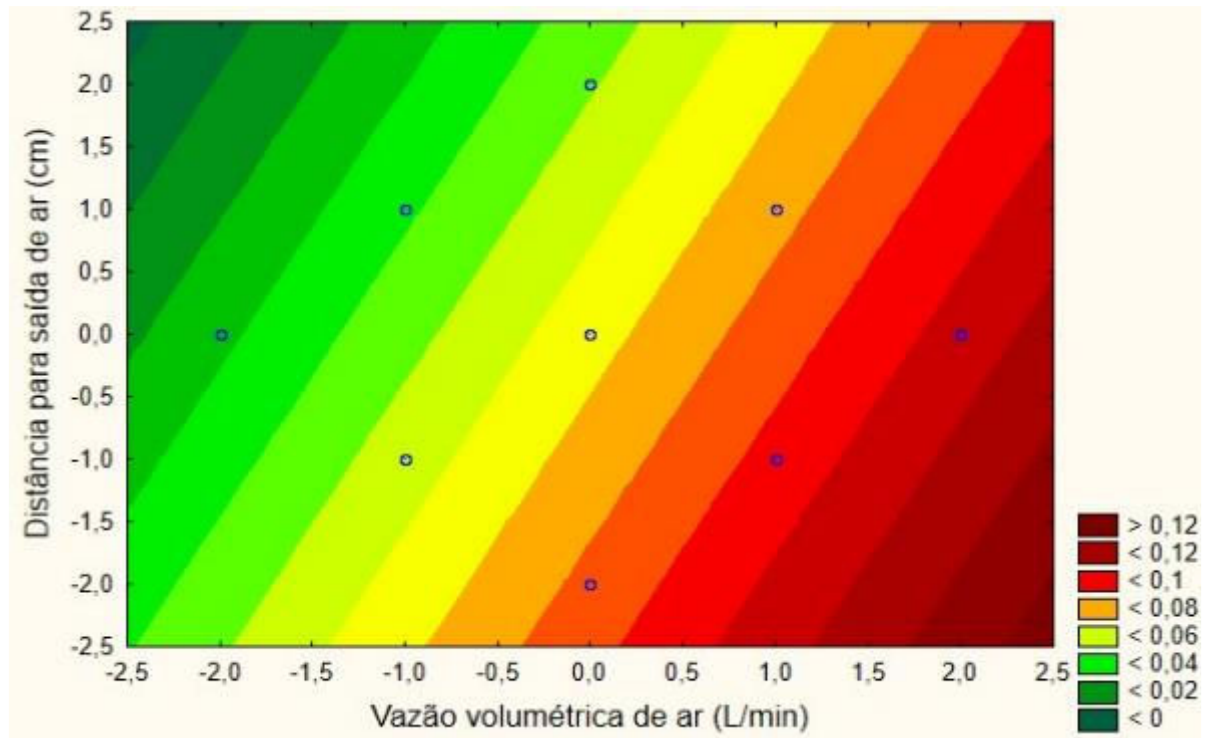
As Figura 13 e Figura 14, mostram que com o aumento da vazão de ar tem-se o aumento da velocidade, sendo a vazão de ar o efeito de maior importância. Porém, o valor mais significativo para a distância de entrada de ar, neste caso, é o de maior nível, enquanto, que para a distância de saída de ar, é para o de menor nível, esse antagonismo era algo esperado para estas análises e são corroborados na Figura 15.

Figura 13 – Efeitos interativos da distância para entrada de ar e vazão de ar na velocidade, segundo o gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



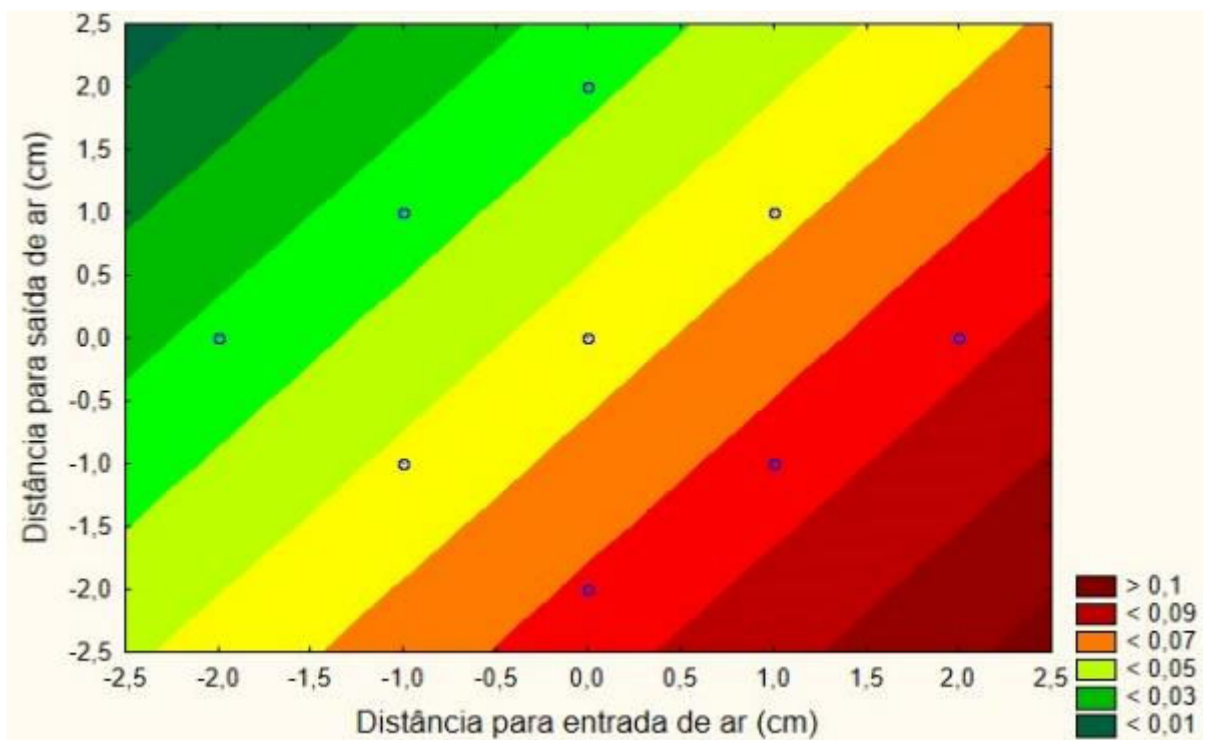
Fonte: O autor (2022).

Figura 14 – Efeitos interativos da distância para saída de ar e vazão de ar na velocidade, segundo o gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



Fonte: O autor (2022).

Figura 15 – Efeitos interativos da distância para entrada de ar e distância para saída de na velocidade, segundo o gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



Fonte: O autor (2022).

Avaliando-se a resposta da pressão interna na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral, observou-se que são estatisticamente significativos os efeitos da vazão de ar linear, vazão de ar quadrática e interação da distância para entrada de ar e distância para saída de ar. Recalculando apenas com os termos significativos, obtém-se os dados apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Tabela de efeitos para a pressão interna na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.

Fatores	Efeito	Erro Padrão	t(21)	p	Limite Mínimo (-95%)	Limite Máximo (+95%)
Média	101326,7	0,037198	2723950	0,000000	101326,7	101326,8
Vazão de ar Linear	1,5	0,054755	28	0,000000	1,4	1,6
Vazão de ar Quadrática	0,1	0,053691	2	0,038729	0,0	0,2
Distância para Entrada de ar e Distância para Saída de ar	-0,3	0,067060	-4	0,000728	-0,4	-0,1

Fonte: O autor (2022).

A Tabela 13 apresenta os resultados da análise de variância para a velocidade que foi feita com um nível de confiança de 95%, e pode-se observar que todos os fatores citados tem efeitos significativos sobre o parâmetro estudado, especialmente a vazão linear.

Tabela 13 – Tabela ANOVA para a pressão interna na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.

Fatores	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F	p
Vazão de ar Linear	1	14,10721	14,10721	784,2383	0,000000
Vazão de ar Quadrática	1	0,08747	0,08747	4,8626	0,038729
Distância para Entrada de ar e Distância para Saída de ar	1	0,28101	0,28101	15,6217	0,000728
Erro	21	0,37776	0,01799		
Total Soma dos quadrados	24	14,85345			

Fonte: O autor (2022).

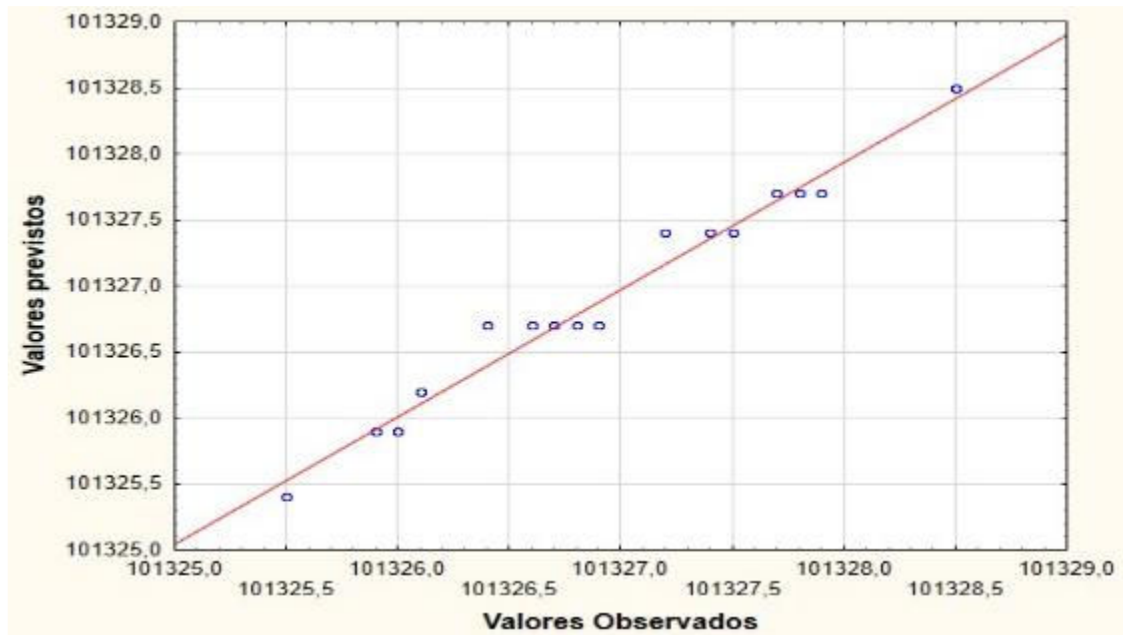
A Equação 15 representa o modelo matemático encontrado para a Pressão interna na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral e seus efeitos estatisticamente significativos, e o respectivo coeficiente de determinação (R^2).

$$P = 101326,7 + 0,8Q + 0,1Q^2 - 0,1D_E D_S \quad (15)$$

$$R^2 = 97,5\%$$

A Figura 16, apresenta o gráfico dos valores previstos *versus* valores observados, onde pode-se observar um ajuste excelente aos dados da amostra, com resíduos pequenos, bem próximos a reta, dando mais confiabilidade aos resultados.

Figura 16 – Gráfico dos valores previstos *versus* valores observados para a pressão interna na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.

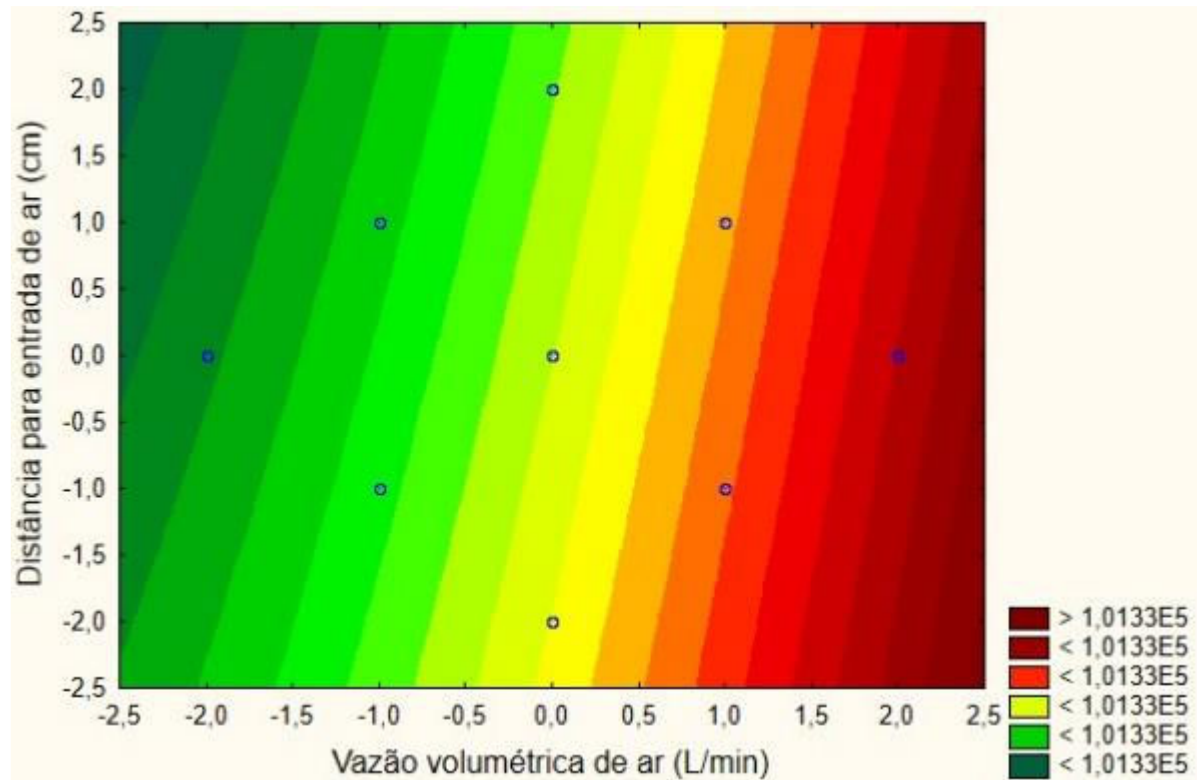


Fonte: O autor (2022).

A Figura 17, Figura 18 e Figura 19 apresentam os gráficos de superfície de resposta 2-D para analisar os efeitos das variáveis estatisticamente significativas da pressão, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral. Na Figura 17 e Figura 18, apresentam características bem parecidas, pode-se observar que com o aumento da vazão de ar, existe um aumento de pressão, mesmo que discreta. O efeito da distância, é ainda mais discreto. O gráfico foi gerado colocando-se o nível da distância para saída de ar em +1.

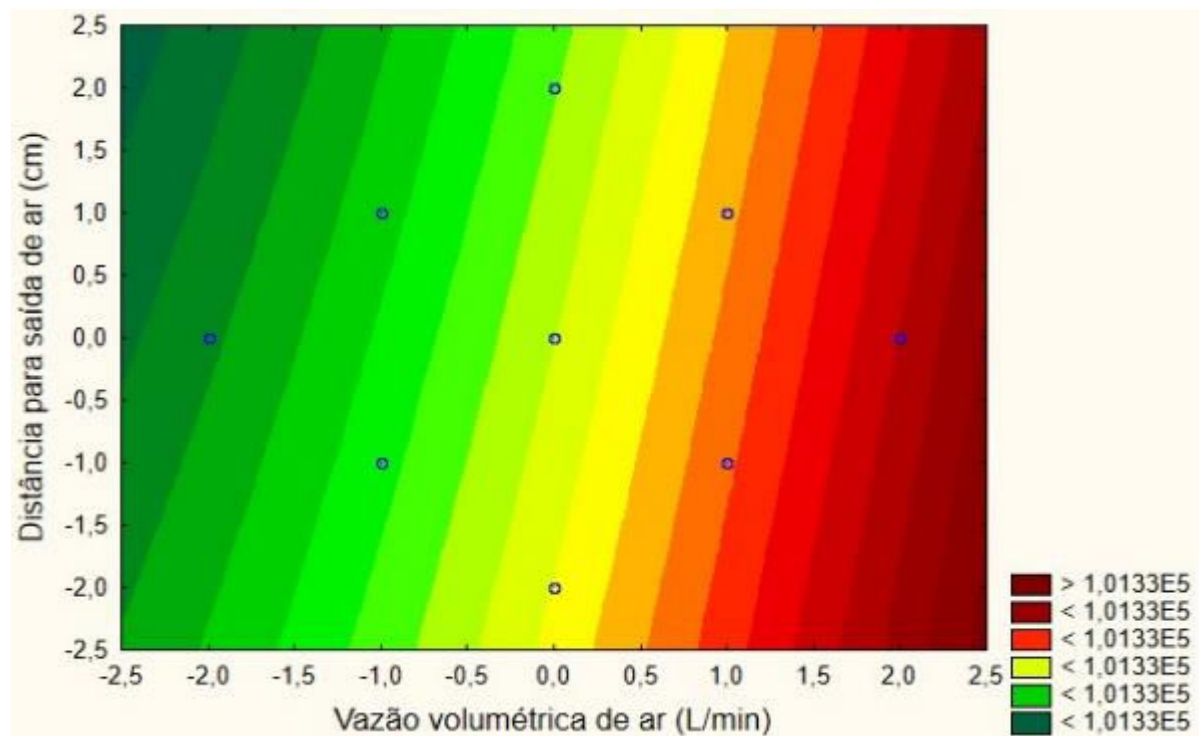
A Figura 19, apresenta em ambas as distâncias, uma tendência de leve aumento da pressão, quando as distancias estão nos níveis +1, -1 ou -1, +1, devido ao termo de com sinal negativo (Equação 15). O gráfico foi gerado colocando-se o nível da vazão em zero.

Figura 17 – Efeitos interativos da distância para entrada de ar e vazão de ar na pressão, segundo o gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



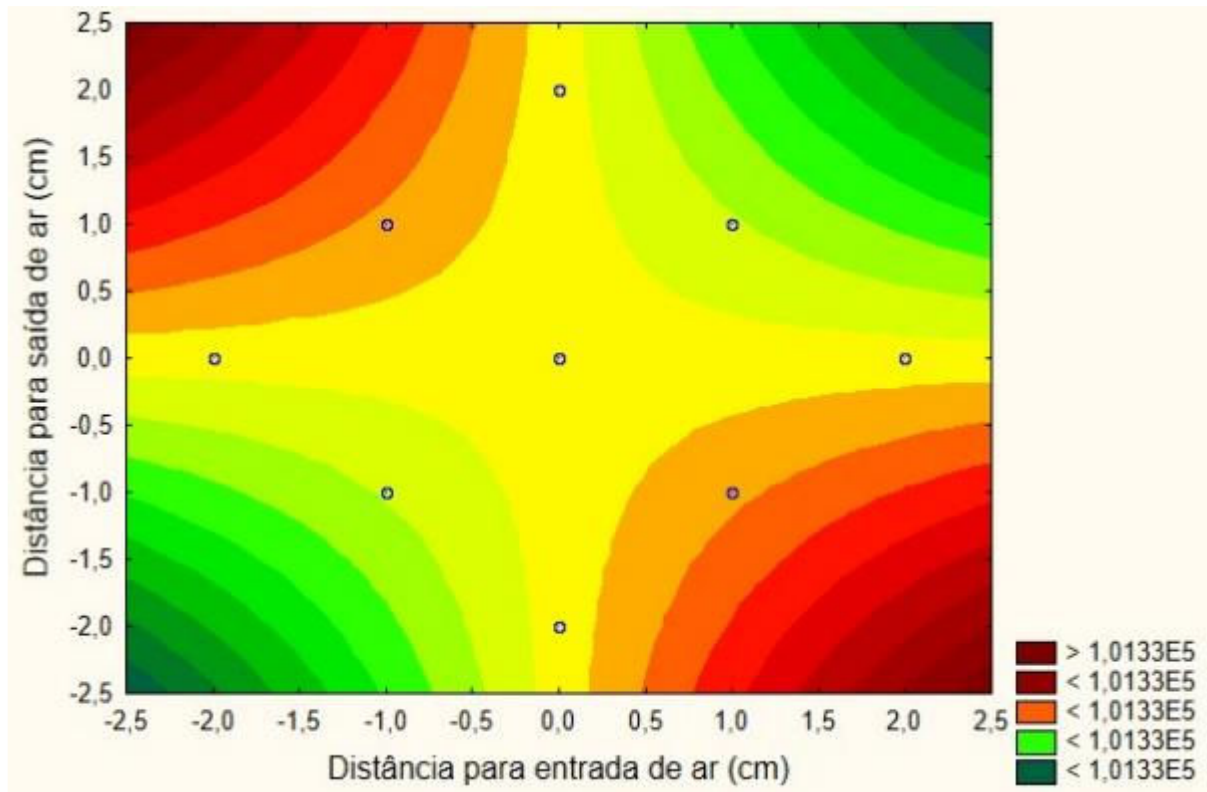
Fonte: O autor (2022).

Figura 18 – Efeitos interativos da distância para saída de ar e vazão de ar na pressão, segundo o gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



Fonte: O autor (2022).

Figura 19 – Efeitos interativos da distância para entrada de ar e distância para saída de na pressão, segundo o gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



Fonte: O autor (2022).

4.3.2 Geometrias com entrada e saída de ar na parte superior

Avaliando-se a resposta da velocidade de escoamento do ar na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior, observou-se que são estatisticamente significativos os efeitos da vazão de ar linear, diâmetro célula reacional, distância para entrada de ar, e a combinação do diâmetro célula reacional e distância para entrada de ar. Recalculando apenas com os termos significativos, obtém-se os dados apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Tabela de efeitos para a velocidade de escoamento do ar na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.

Fatores	Efeito	Erro Padrão	t(21)	p	Limite Mínimo (-95%)	Limite Máximo (+95%)
Média	0,216170	0,006613	32,68760	0,000000	0,202376	0,229965
Vazão de ar	0,081394	0,013499	6,02957	0,000007	0,053236	0,109553
Diâmetro célula reacional	-0,029033	0,013499	-2,15071	0,043906	-0,057192	-0,000874
Distância para Entrada de ar	0,034176	0,013499	2,53169	0,019841	0,006017	0,062335
Diâmetro célula reacional e Distância para Entrada de ar	0,071424	0,016533	4,32008	0,000333	0,036937	0,105911

Fonte: O autor (2022).

A Tabela 15 apresenta os resultados da análise de variância para a velocidade, e pode-se observar que a vazão de ar tem um efeito de grande impacto na velocidade.

Tabela 15 – Tabela ANOVA para a velocidade de escoamento do ar na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.

Fatores	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F	p
Vazão de ar	1	0,039750	0,039750	36,35577	0,000007
Diâmetro célula reacional	1	0,005057	0,005057	4,62556	0,043906
Distância para Entrada de ar	1	0,007008	0,007008	6,40947	0,019841
Diâmetro célula reacional e Distância para Entrada de ar	1	0,020406	0,020406	18,66305	0,000333
Erro	20	0,021867	0,001093		
Total Soma dos quadrados	24	0,094089			

Fonte: O autor (2022).

A Equação 16 representa o modelo matemático encontrado para a Velocidade de escoamento do ar na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar

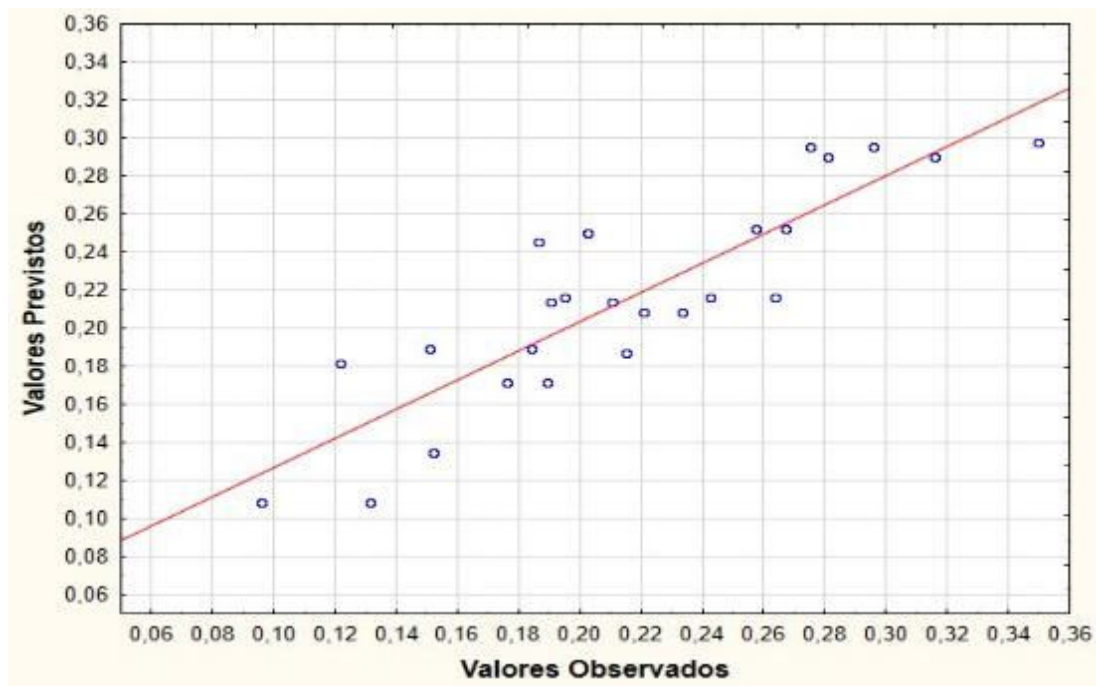
na parte superior e seus efeitos estatisticamente significativos, e o respectivo coeficiente de determinação (R^2).

$$V = 0,216 + 0,041Q - 0,015Di_{CR} + 0,017D_E + 0,036Di_{CR}D_E \quad (16)$$

$$R^2 = 76,8\%$$

A Figura 20, apresenta o gráfico dos valores previstos *versus* valores observados, onde pode-se observar um ajuste satisfatório aos dados da amostra, apesar de uma leve dispersão próximo a reta, dando mais confiabilidade aos resultados.

Figura 20 – Gráfico dos valores previstos *versus* valores observados para a velocidade de escoamento do ar na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



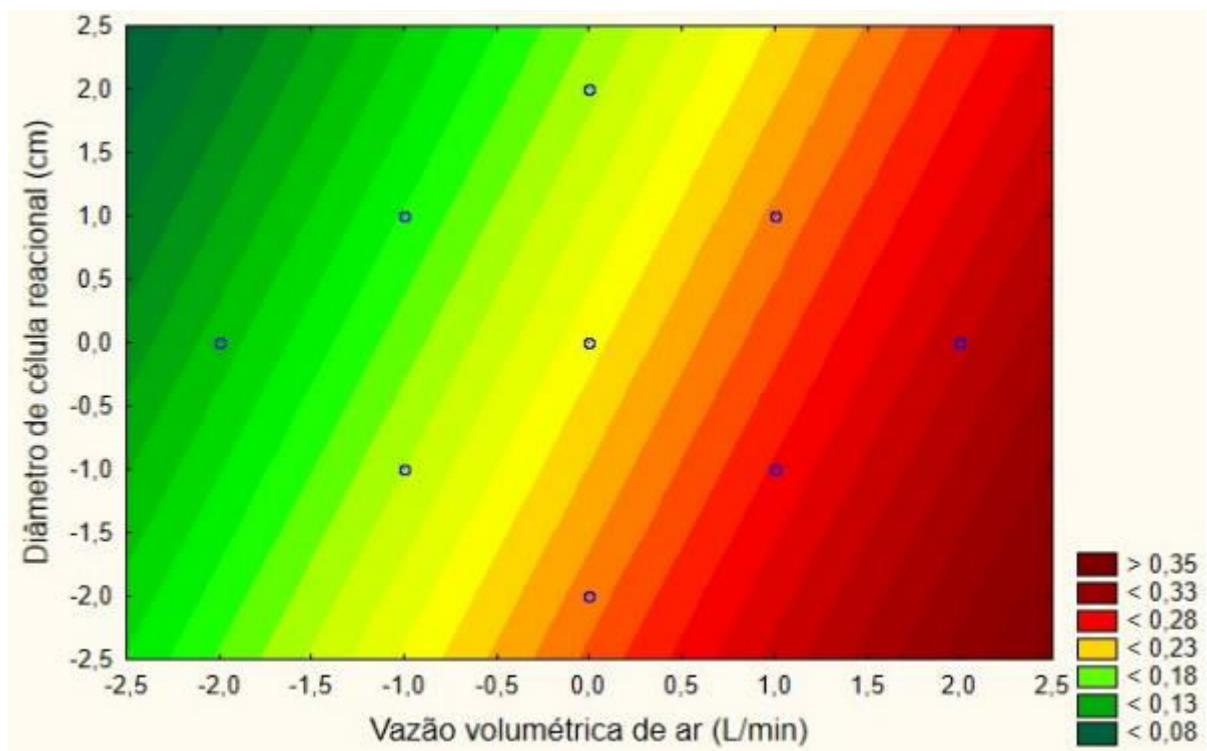
Fonte: O autor (2022).

A Figura 21, Figura 22, e Figura 23 apresentam os gráficos de superfície de resposta 2-D para analisar os efeitos interativos das variáveis estatisticamente significativas da velocidade, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior. Na Figura 21, indique que com o aumento da vazão também há o aumento da velocidade, e para o diâmetro da célula reacional, existe um leve aumento na velocidade com a diminuição do diâmetro.

A Figura 22, mostra que com o aumento da vazão de ar, tem-se o aumento da velocidade, já para a distância de entrada de ar ao aumentar os níveis, se tem um leve aumento da velocidade.

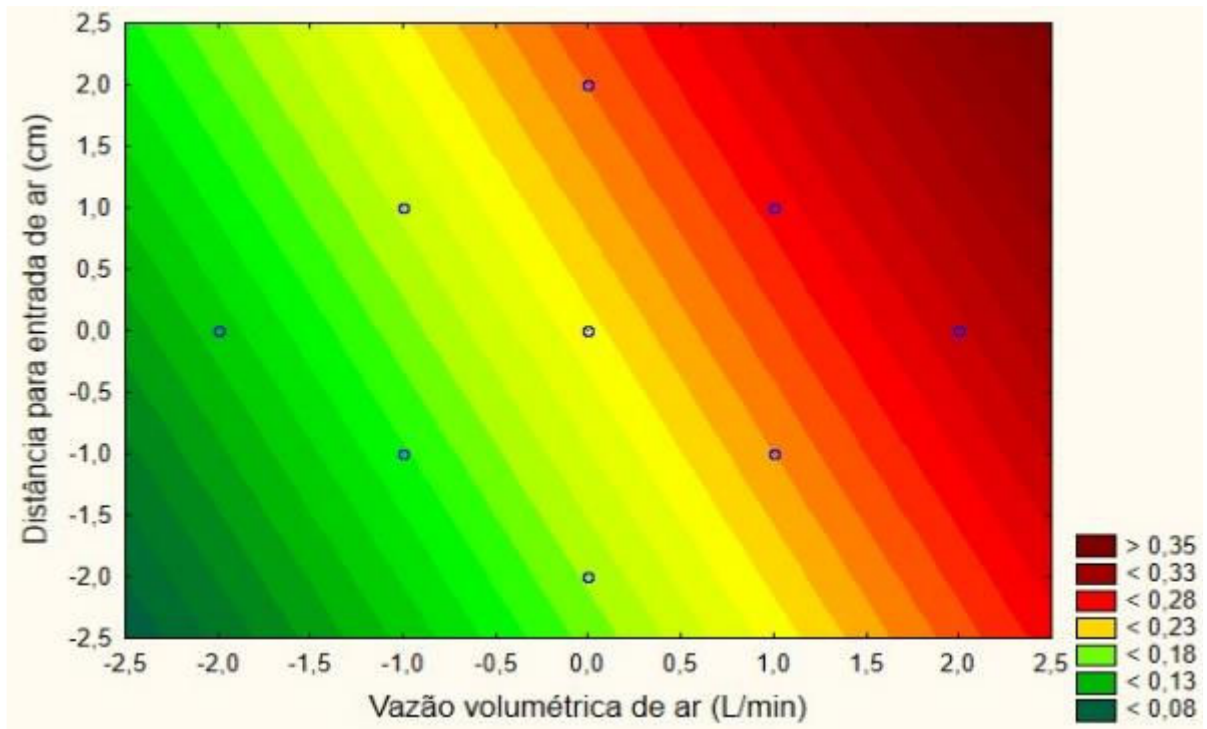
A Figura 23, apresenta em ambas as distâncias, uma tendencia de leve aumento da velocidade, quando as distancias estão nos níveis +1, +1 ou -1, -1, devido ao termo de com sinal positivo (Equação 16). O gráfico foi gerado colocando-se o nível da vazão em zero.

Figura 21 – Efeitos interativos do diâmetro da célula reacional e vazão de ar na velocidade, segundo gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



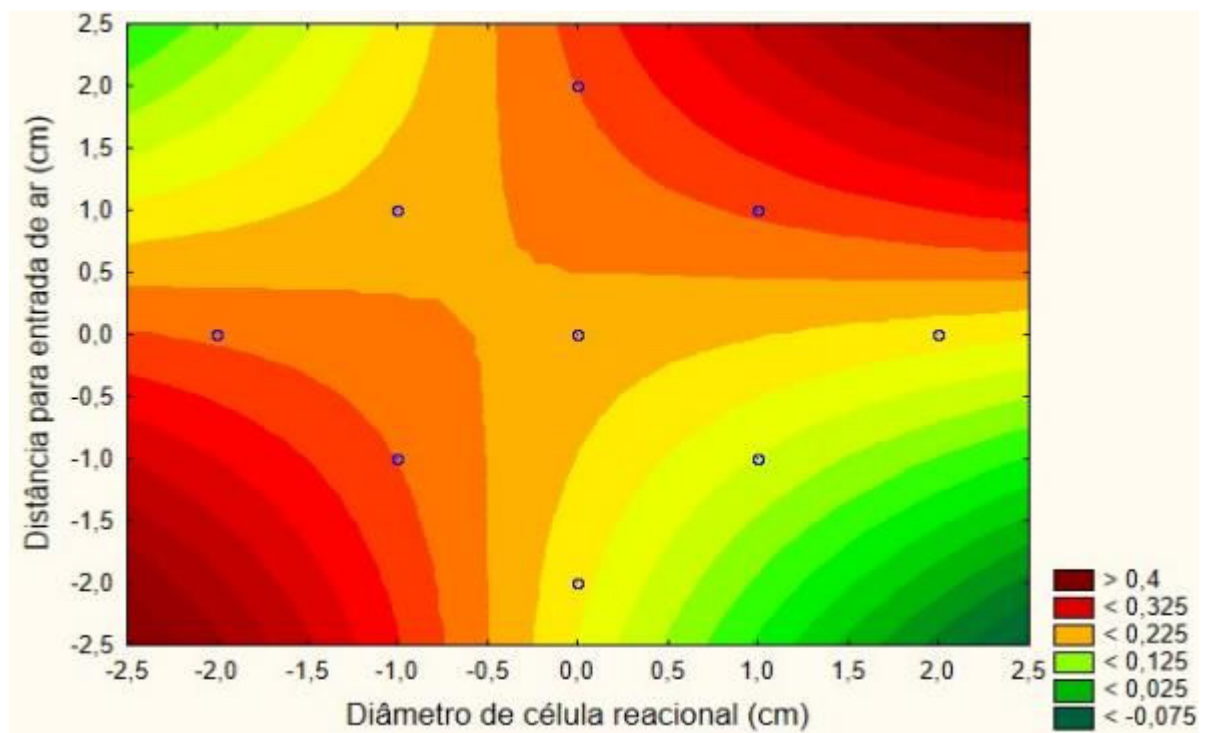
Fonte: O autor (2022).

Figura 22 – Efeitos interativos da distância para entrada de ar e vazão de ar na velocidade, segundo gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).

Figura 23 – Efeitos interativos da distância para entrada de ar e diâmetro da célula reacional na velocidade, segundo gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).

Avaliando-se a resposta da pressão interna na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior, observou-se que são estatisticamente significativos os efeitos da vazão de ar linear, vazão de ar quadrática, diâmetro da célula reacional e interação da vazão de ar linear e diâmetro da célula reacional. Recalculando apenas com os termos significativos, obtém-se os dados apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Tabela de efeitos para a pressão interna na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.

Fatores	Efeito	Erro Padrão	t(21)	p	Limite Mínimo (-95%)	Limite Máximo (+95%)
Média	101329,0	0,009367	10818186	0,000000	101329,0	101329,0
Vazão de ar Linear	2,5	0,013787	179	0,000000	2,4	2,5
Vazão de ar Quadrática	0,2	0,013519	13	0,000000	0,1	0,2
Diâmetro célula reacional	0,1	0,013787	4	0,001304	0,0	0,1
Vazão de ar Linear e Diâmetro célula reacional	0,1	0,016886	3	0,004154	0,0	0,1

Fonte: O autor (2022).

A Tabela 17 apresenta os resultados da análise de variância para a pressão, e pode-se observar que todos os fatores citados tem efeitos significativos sobre o parâmetro estudado, especialmente a vazão linear.

Tabela 17 – Tabela ANOVA para a pressão interna na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.

Fatores	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	F	p
Vazão de ar Linear	1	36,45345	36,45345	31962,19	0,000000
Vazão de ar Quadrática	1	0,18768	0,18768	164,56	0,000000
Diâmetro célula reacional	1	0,01592	0,01592	13,96	0,001304
Vazão de ar Linear e Diâmetro célula reacional	1	0,01193	0,01193	10,46	0,004154
Erro	20	0,02281	0,00114		
Total Soma dos quadrados	24	36,69179			

Fonte: O autor (2022).

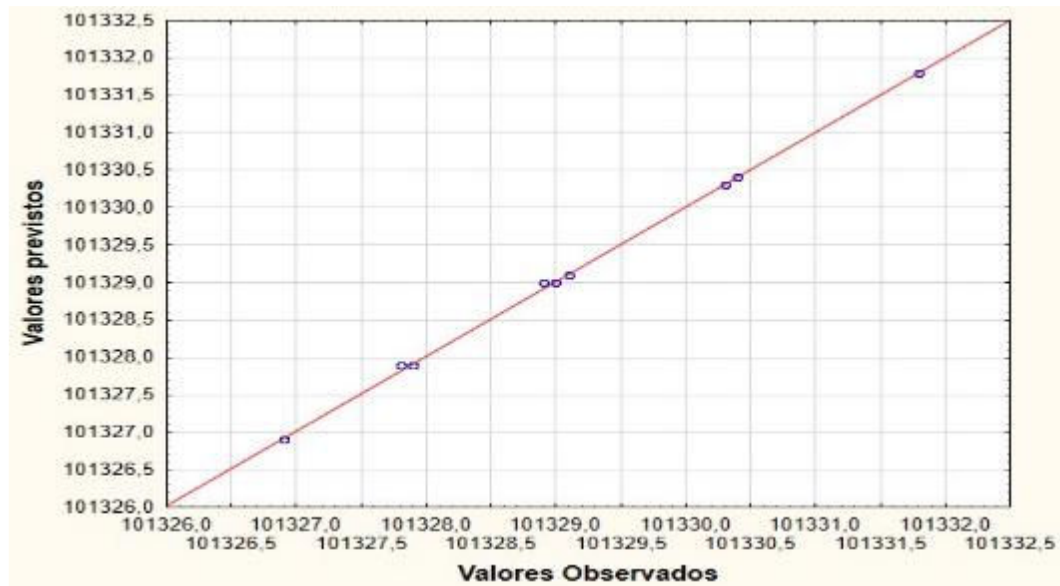
A Equação 17 representa o modelo matemático encontrado para a Velocidade de escoamento do ar na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior e seus efeitos estatisticamente significativos, e o respectivo coeficiente de determinação (R^2).

$$P = 101329,0 + 1,2Q + 0,1Q^2 + 0,026Di_{CR} + 0,027QDi_{CR} \quad (17)$$

$$R^2 = 99,9\%$$

A Figura 24, apresenta o gráfico dos valores previstos *versus* valores observados, onde pode-se observar um ajuste excelente aos dados da amostra, com resíduos pequenos, basicamente tudo sobre a reta, dando mais confiabilidade aos resultados.

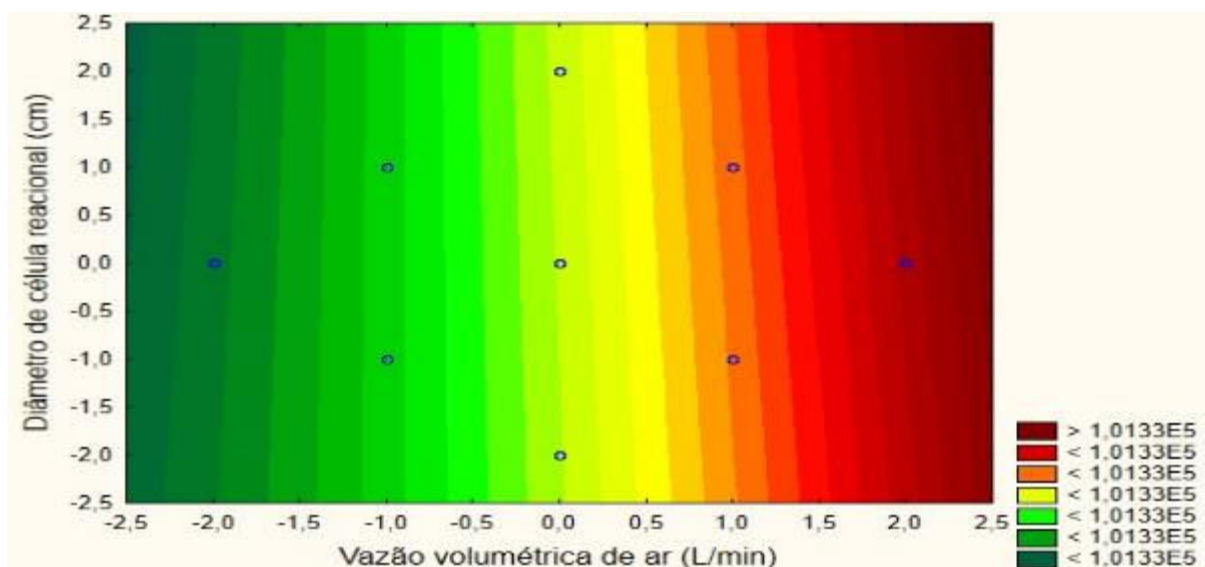
Figura 24 – Gráfico dos valores previstos *versus* valores observados para a pressão interna na célula reacional, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).

A Figura 25 apresenta o gráfico de superfície de resposta 2-D para analisar os efeitos interativos das variáveis estatisticamente significativas da pressão, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior. É possível observar que a vazão de ar é o fator com maior importância e com o seu aumento existe um crescimento da pressão, porém, no que se refere ao diâmetro da célula reacional, independentemente do valor, a pressão é praticamente a mesma.

Figura 25 – Efeitos interativos do diâmetro da célula reacional e vazão de ar na pressão, segundo gráfico de contorno 2-D, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

5.1 CONCLUSÕES

Utilizando planejamentos fatoriais e CFD foram analisados os efeitos dos seguintes parâmetros: vazão de ar, diâmetro da célula reacional, distância para entrada de ar e distância para saída de ar, sobre a velocidade de escoamento de ar e pressão interna da célula reacional, visando as melhores condições para favorecer a biomineralização cimentícia. Com os resultados experimentais obtidos, conclui-se que:

1 - O estudo de convergência de malha trouxe uma maior confiabilidade aos resultados obtidos, entregando malhas mais eficientes, com a máxima precisão e o mínimo esforço computacional. São definidas pela malha global 4 e a malha local 5 para todos os ensaios, tanto para as geometrias com entrada e saída de ar pela parte lateral quanto para as geometrias com entrada e saída de ar pela parte superior.

2 – Os resultados das simulações fluidodinâmicas computacionais nas células reacionais, para os parâmetros de velocidade e pressão, revelaram que a vazão de ar foi o fator de grande importância. Pois, nos ensaios que detinham os maiores e menores valores de vazão de ar, obteve-se os maiores e menores valores de velocidade, respectivamente. Quanto aos resultados referentes a pressão interna na célula reacional, observou-se em todos os casos, uma variação de pressão bem pouca significativa, em torno da pressão ambiente, como já se era esperado.

3 – As linhas de correntes simuladas em todos os modelos, evidenciam que a célula reacional está totalmente preenchida de ar, mostrando uma boa disponibilidade de oxigênio na célula, que é de grande valia para o mecanismo de biomineralização.

4 - As análises estatísticas para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral, tanto para o parâmetro velocidade de escoamento do ar na célula reacional quanto para a pressão interna na célula reacional, existe um certo espelhamento em seus fatores. Pois, os efeitos estatisticamente significativos encontrados foram a vazão de ar, distância para entrada de ar e distância para saída de ar, tendo a vazão como principal fator, com o seu aumento, se aumenta a velocidade, corroborando com as

análises discutidas anteriormente, já o diâmetro da célula reacional não tem efeito estatisticamente significativo.

5 – As análises estatísticas para geometria com entrada e saída de ar na parte superior, tanto para o parâmetro velocidade de escoamento do ar na célula reacional quanto para a pressão interna na célula reacional tem a vazão como principal fator, com o seu aumento, se aumenta a velocidade, corroborando com as análises discutidas anteriormente. Além disso, o diâmetro tem efeito significativo sobre a velocidade. Outro efeito significativo é a distância de entrada de ar. Pois, diante da repetição dos efeitos estatisticamente significativos sobre a velocidade e a pressão, que foram da vazão de ar e as distâncias para entrada e saída de ar, sendo estas conservando as dimensões e apenas alocadas de acordo com a distância, não haveria tanto custo adicional do material. Em contrapartida, a geometria com entrada e saída de ar na parte superior, como o diâmetro tem um efeito estatisticamente significativo, poderia trazer um custo suplementar ao projeto, devido a variação do diâmetro.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Passados os estudos de simulação via CFD e definido qual o melhor tipo de geometria para se operar, se faz necessário realizar estudos complementares que levem em consideração a taxa de consumo de oxigênio dos micro-organismos, de forma prática, visando fixar as melhores condições para a biomineralização cimentícia.

Alguns bioprocessos exigem condições de alta taxa de transferência de oxigênio, enquanto outros exigem taxas de transferência de oxigênio controladas para regular as taxas do consumo de oxigênio pelos micro-organismos da biomineralização. Se torna então interessante e oportuno, buscar um ponto ótimo, que favoreça a melhor produção de CaCO_3 . A aeração fornece oxigênio para as bactérias, e sabe-se que a via metabólica e os fluxos metabólicos podem ser afetados pela taxa de transferência de oxigênio.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, J.; ZHOU, Z. Mechanical properties of natural as well as synthetic fiber reinforced concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 333, p. 127353, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127353>.
- ALGAIFI, H. A.; BAKAR, S. A.; SAM, A. R. M.; ISMAIL, M.; ABIDIN, A. R. Z.; SHAHIR, ALTOWAYTI, S., W. A. H. Insight into the role of microbial calcium carbonate and the factors involved in self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 254, p. 119258, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119258>.
- ALHAJAHMAD, A.; MITTELSTEDT, C. A novel grid-stiffening concept for locally reinforcing window openings of composite fuselage panels using streamline stiffeners. **Thin-Walled Structures**, v. 179, p. 109731, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109731>.
- ANJALI, R.; VENKATESAN, G. Optimization of mechanical properties and composition of M-sand and pet particle added concrete using hybrid deep neural network-horse herd optimization algorithm. **Construction and Building Materials**, v. 347, p. 128334, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128334>.
- AOUAD, S.E.; LARCHER, A.; HACHEM, E. Anisotropic adaptive body-fitted meshes for CFD. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 400, p. 115562, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2022.115562>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, p. 12, 2018.
- BEKAS, D. G.; TSIRKA, K.; BALTZIS, D.; PAIPETIS, A. S. Self-healing materials: A review of advances in materials, evaluation, characterization and monitoring techniques. **Composites Part B: Engineering**, v. 87, p. 92–119. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.057>.
- BOTAN, A.C.B. **Otimização de um modelo de turbina hidráulica tipo bulbo aplicada em condições de queda ultrabaixa**, 2019. Tese de doutorado. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2019.
- BOURNET, P.-E.; ROJANO, F. Advances of Computational Fluid Dynamics (CFD) applications in agricultural building modelling: Research, applications and challenges. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 201, p. 107277, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107277>.
- BRASILEIRO, P.P.F.; ROQUE, B.A.C.; BRADÃO, B.Y.; CASAZZA, A.A.; CONVERTI, A.; BENACHOUR, M.; SARUBBO, L.A. Cascade system for biomineralization in cement: Project, construction and operationalization to enhance building energy efficiency. **Energies**, v. 15, p. 5262, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15145262>.

CANO, M.; GINER-CASARES, J. J. Biomineralization at fluid interfaces. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 286, 102313, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102313>.

CHAURASIA, L.; BISHT, V.; SINGH, L.P.; GUPTA, S. A novel approach of biomineralization for improving micro and macro-properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 195, p. 340-351, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.031>.

CHEN, F.; ZHU, G.; YAO, B.; GUO, W.; XU, T. Sand-ejecting fire extinguisher parameter sensitivity analysis based on DOE and CFD-DEM coupling simulations. **Advanced Powder Technology**, v. 33, p. 103719, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2022.103719>.

CORMOS, C.-C. Decarbonization options for cement production process: A techno-economic and environmental evaluation. **Fuel**, v. 320, p. 123907, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123907>.

DAI, Z.; TSANGOURI, E.; VAN TITTELBOOM, K.; ZHU, X.; GILABERT, F.A. Understanding fracture mechanisms via validated virtual tests of encapsulation-based self-healing concrete beams. **Materials & Design**, v. 213, p. 110299, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110299>.

DAS, S.; SAHA, P.; JENA, S.P.; PANDA, P. Geopolymer concrete: Sustainable green concrete for reduced greenhouse gas emission – A review. **Materials Today: Proceedings** v. 60, p. 62-71, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.588>.

DE BELIE, N.; GRUYAERT, E.; AL-TABBAA, A.; ANTONACI, P.; BAERA, C.; BAJARE, D.; DARQUENNES, A.; DAVIES, R.; FERRARA, L.; JEFFERSON, T.; LITINA, C.; MILJEVIC, B.; OTLEWSKA, A.; RANOGAJEC, J.; ROIG-FLORES, M.; PAINE, K.; LUKOWSKI, P.; SERNA, P.; TULLIANI, J.; VUCETIC, S.; WANG, J.; JONKERS, H. M. A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures. **Advanced Materials Interfaces**, 1800074, 2018. <https://doi.org/10.1002/admi.201800074>.

FERREIRA, E. G. A. **Modelagem descritiva do comportamento do cimento Portland em ambiente de repositório para rejeitos radioativos**. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2017.

HAN, R.; XU, S.; ZHANG, J.; LIU, Y.; ZHOU, A. Insights into the effects of microbial consortia-enhanced recycled concrete aggregates on crack self-healing in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 343, p. 128138, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128138>.

HE, X.; ZHOU, J.; WANG, Z.; ZHANG, L. Study on mechanics and water transport characteristics of sea-sand concrete based on the volume analysis of each solid composition. **Construction and Building Materials**, v. 257, p. 119591, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119591>.

HOIBERG, B.; SHAH, M.T. CFD study of multiphase flow in aerated grit tank. **Journal of Water Process Engineering**, v. 39, p. 101698, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101698>.

JANKOVIC, A.; CHAUDHARY, G.; GOIA, F. Designing the design of experiments (DOE) – An investigation on the influence of different factorial designs on the characterization of complex systems. **Energy and Buildings**, v. 250, p. 111298, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111298>.

JOGI, P. K.; LAKSHMI, T. V. S. V. Self-healing concrete based on different bacteria: A review. **Materials Today: Proceedings**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.765>.

JUANGSA, F.B.; CEZELIANO, A.S.; DARMANTO, P.S.; AZIZ, M. Thermodynamic analysis of hydrogen utilization as alternative fuel in cement production. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 42, p. 23-31, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.07.003>.

KALIYAVARADHAN, S.K.; LI, L.; LING, T.C. Response surface methodology for the optimization of CO₂ uptake using waste concrete powder. **Construction and Building Materials**, v. 340, p. 127758, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127758>.

KORGAL, A.; UPADHYAYA, S.; ANILKUMAR, T. Grain refinement of aluminium 4032 alloy with the impact of vibration using Taguchi technique and analysis of variance (ANOVA). **Materials Today: Proceedings**, v. 54, p. 507-512, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.504>

LEE, B.C.Y.; MAHTAB, M.S.; NEO, T.H.; FAROOQI, I.H.; KHURSHEED, A. A comprehensive review of Design of experiment (DOE) for water and wastewater treatment application - Key concepts, methodology and contextualized application. **Journal of Water Process Engineering**, v. 47, p. 102673, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102673>.

LI, W.; WEI, Q.; CHEN, Q.; JIANG, Z. Microencapsulation and evaluation of styrene maleic anhydride/epoxy for mechanical triggering self-healing of cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 124, p. 104247, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104247>.

LINS, I.X.; FILHO, H.J.B.L.; SANTOS, V.A.; PEREIRA, J.C.S.; MAK, J.; VIEIRA, C.W. Hydrodynamic study of the oil flow in a protective relay coupled to a power transformer: CFD simulation and experimental validation. **Engineering Failure Analysis**, v. 128, p. 105599, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105599>.

LIU, Y.; ZHUGE, Y.; FAN, W.; DUAN, W.; WANG, L. Recycling industrial wastes into self-healing concrete: A review. **Environmental Research**, v. 214, p. 113975, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113975>.

LOPES, T. B. **Comparação da microestrutura do concreto auto adensável com o concreto convencional**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2016.

LUCAS, S.S.; MOXHAM, C.; TZIVILOGLOU, E.; JONKERS, H. Study of self-healing properties in concrete with bacteria encapsulated in expanded clay. **Science and Technology of Materials**, v. 30, p. 93-98, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.stmat.2018.11.006>.

MARTINS, N.M.C.; CARRIÇO, N.J.G.; RAMOS, H.M.; COVAS, D.I.C. Velocity-distribution in pressurized pipe flow using CFD: Accuracy and mesh analysis. **Computers & Fluids**, v. 105, p. 218–230, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.09.031>.

MAULUDIN, L. M.; OUCIFJ, C. Modeling of Self-Healing Concrete: A Review. **Journal of Applied and Computational Mechanics**, v. 5(3), p. 526-539, 2019. <https://doi.org/10.22055/jacm.2017.23665.1167>.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 4ª edição. Universidade da Califórnia, Berkeley, Estados Unidos, 2014.

MELDRUM, F. C., O'SHAUGHNESSY, C. Crystallization in Confinement. **Advanced Materials**, v. 32, 2001068, 2020. <https://doi.org/10.1002/adma.202001068>.

MILLA, J.; HASSAN, M. M.; RUPNOW, T. Evaluation of Self-Healing Concrete with Microencapsulated Calcium Nitrate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29(12), 04017235, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002072](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002072).

MOHE, N.F.; SHEWALUL, Y.W.; AGON, E.C. Experimental investigation on mechanical properties of concrete using different sources of water for mixing and curing concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. e00959, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00959>.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NGUYEN, T. H.; GHORBEL, E.; FARES, H.; COUSTURE, A. Bacterial self-healing of concrete and durability assessment. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103340>.

PALANISAMY, D.; AYALUR, B. K. Impact of condensate cooled air purging on indoor air quality in an air conditioned laboratory. **Building and Environment**, v. 188, p. 107511, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107511>.

RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A.F. **Planejamento de Experimentos & Otimização de Processos**. 2. ed. Campinas: Cárita, p. 358, 2009.

ROMÁN-RAMÍREZ, L.A.; MARCO, J. Design of experiments applied to lithium-ion batteries: A literature review. **Applied Energy**, v. 320, p. 119305, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119305>.

RUAN, S.; QIU, J.; WENG, Y.; YANG, Y.; YANG, E.; CHU, J.; UNLUER, C., The use of microbial induced carbonate precipitation in healing cracks within reactive magnesia cement-based blends. **Cement and Concrete Research**, v. 115, p. 176–188, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.10.018>.

SEIFAN, M.; SAMANI, A. K.; BERENJIAN, A. Bioconcrete: next generation of self-healing concrete. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 100, p. 2591–2602, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7316-z>.

SEIFAN, M.; SAMANI, A. K.; BERENJIAN, A. New insights into the role of pH and aeration in the bacterial production of calcium carbonate (CaCO₃). **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 101(8), p. 3131–3142, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8109-8>.

SERRA, N.; SEMIAO, V. ESIMPLE, a new pressure–velocity coupling algorithm for built-environment CFD simulations. **Building and Environment**, v. 204, p. 108170, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108170>.

SHANKS, W.; DUNANT, C.F.; DREWNIOK, M.P.; LUPTON, R.C.; SERRENHO, A.; ALLWOOD, J.M. How much cement can we do without? Lessons from cement material flows in the UK. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 141, p.441-454, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.002>.

SHEN, R.; JIAO, Z.; PARKER, T.; SUN, Y.; WANG, Q. Recent application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in process safety and loss prevention: A review. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 67, 104252, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104252>.

SIDIQ, A.; GRAVINA, R.; GIUSTOZZI, F. Is concrete healing really efficient? A review. **Construction and Building Materials**, v. 205, p. 257-273, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.002>.

SOLIDWORKS - **Technical Reference Solidworks Flow Simulation 2020**, 2020.

SPECK, O.; SCHLECHTENDAHL, M.; SCHMICH, F.; SPECK, T. **Self-healing processes in plants: A treasure trove for biomimetic self-repairing materials**. Em Proceedings of the 4th International Conference on Self-Healing Materials (ICSHM 2013), Ghent, Bélgica, 2013.

TEIMOURI, Z.; BORUGADDA, V.B.; DALAI, A.K.; ABATZOGLOU, N. Application of computational fluid dynamics for modeling of Fischer-Tropsch synthesis as a sustainable energy resource in different reactor configurations: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 160, p. 112287, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112287>.

THOMPSON, N.; HARDY, L. Physics of gases. **Anaesthesia & Intensive Care Medicine**, v. 22, p. 33-36, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mpaic.2020.11.002>.

TOMIĆ, N.Z.; MUSTAPHA, A.N.; ALMHEIRI, M.; ALSHEHHI, N.; ANTUNES, A. Advanced application of drying oils in smart self-healing coatings for corrosion

protection: Feasibility for industrial application. **Progress in Organic Coatings**, v. 172, p. 107070, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107070>.

TU, Q.; MA, Z.; WANG, H. Investigation of wet particle drying process in a fluidized bed dryer by CFD simulation and experimental measurement. **Chemical Engineering Journal**, v. 452, p. 139200, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139200>.

VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N.; DE MUYNCK, W.; VERSTRAETE, W. Use of bacteria to repair cracks in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 40(1), p. 157–166, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.025>.

VENKATESAN, L.; HARRIS, A.; GREYLING, M. Optimisation of air rate and froth depth in flotation using a CCD factorial design – PGM case study. **Minerals Engineering**, v. 66-68, p. 221-229, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.07.012>.

VIJAY, K.; MURMU, M.; DEO, S.V. Bacteria based self-healing concrete – A review. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 1008–1014, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.040>.

VUKOVIC, M.; DINIC I.; NIKOLIC, M. G.; MARINKOVIC, B. A.; COSTA, A. M. L. M.; RADULOVIC, K.; MILOSEVIC. O.; MANCIC. L. Effects of different polymers and solvents on crystallization of the NaYF₄:Yb/Er phase. **Bulletin of Materials Science**, v.43(1), p. 1–10, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12034-019-1975-1>.

WASIM, M.; ABADEL, A.; BAKAR, A.; ALSHAIKH, I.M.H. Future directions for the application of zero carbon concrete in civil engineering – A review. **Case Studies in Construction Materials**, v. 17, p. e01318, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01318>.

WIKTOR, V.; JONKERS, H. M. Bacteria-based concrete: from concept to market. **Smart Materials and Structures**, v. 25(8), p. 084006, 2016. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/8/084006>.

YEOLE, N.R.; PARTHASARTHY, V. Design of experiments (DOE) for adsorptive desulfurization (ADS) of liquid fuels – A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 57, p. 1613-1618, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.230>.

YU, M.; SHI, C.; LIU, Z.; LIU, W. Design and multi-objective optimization of a new annular constructal bifurcation Stirling regenerator using response surface methodology. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 195, p. 123129, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123129>.

YU, F.; ZHANG, H.; LI, Y.; XIAO, J.; CLASS, A.; JORDAN, T. Voxelization-based high-efficiency mesh generation method for parallel CFD code GASFLOW-MPI. **Annals of Nuclear Energy**, v. 117, p. 277-289, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.03.045>.

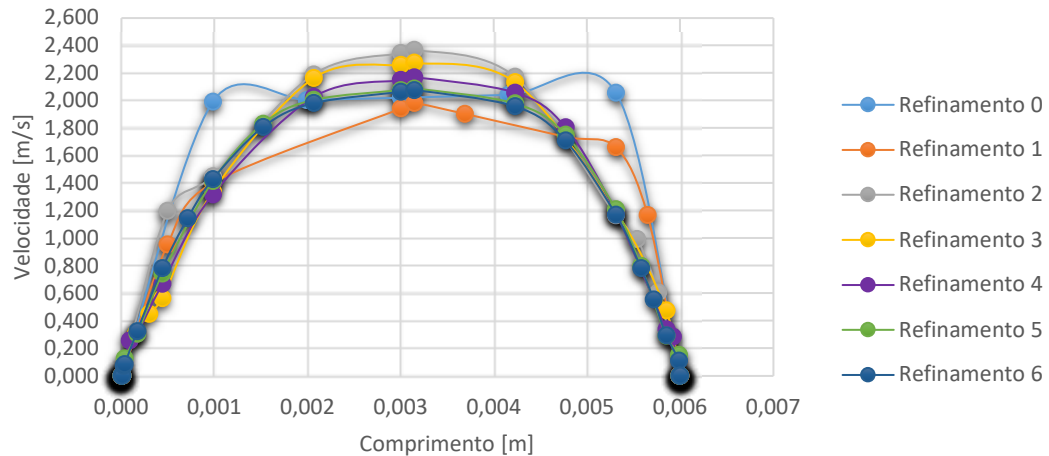
ZHANG, J. L.; WANG C.G.; WANG Q. L.; FENG J. L.; PAN W.; ZHENG X. C.; LIU B.; HAN N. X.; XING F., DENG X. A binary concrete crack self-healing system containing

oxygen-releasing tablet and bacteria and its Ca^{2+} - precipitation performance. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 100, p. 10295–10306, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00253-016-7741-z>.

ZHANG, R.; ZHANG, Y.; LAM, K.P.; ARCHER, D.H. A prototype mesh generation tool for CFD simulations in architecture domain. **Building and Environment**, v. 45, p. 2253-2262, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.04.007>.

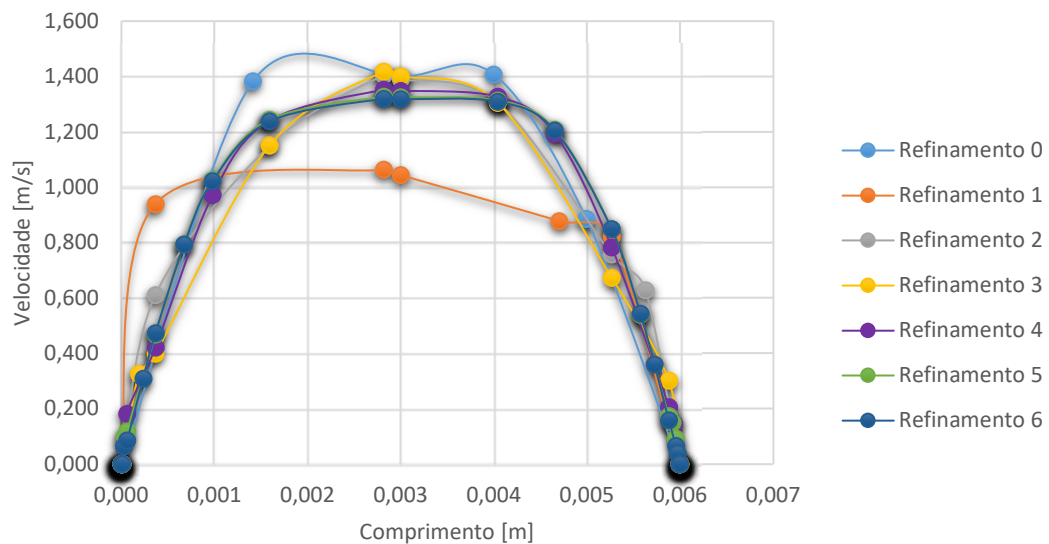
APÊNDICE A – VELOCIDADE *VERSUS* COMPRIMENTO PARA DIFERENTES REFINAMENTOS

Gráfico A1 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 2, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



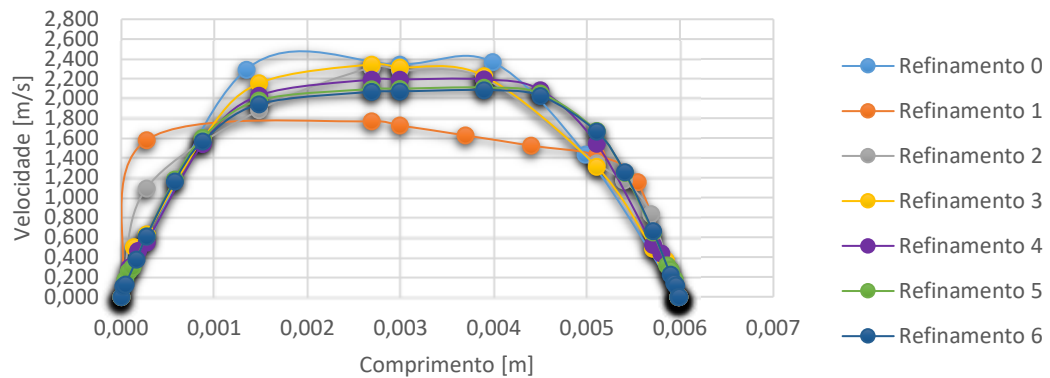
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A2 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 3, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



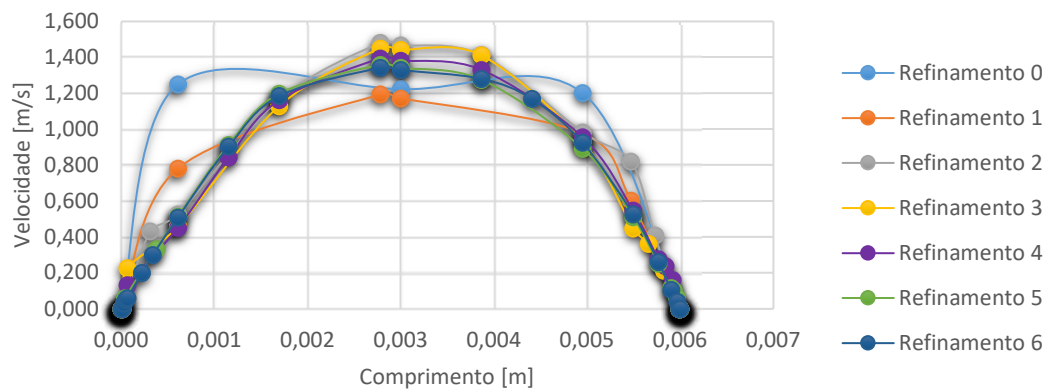
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A3 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 4, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



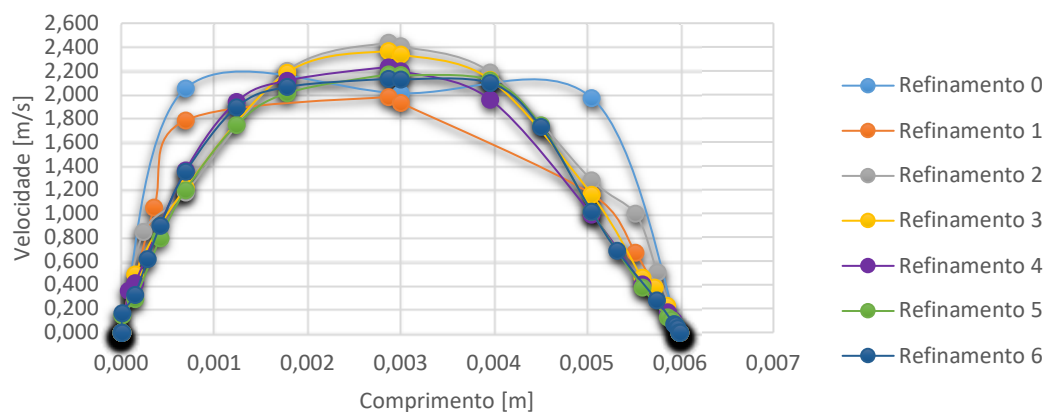
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A4 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 5, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



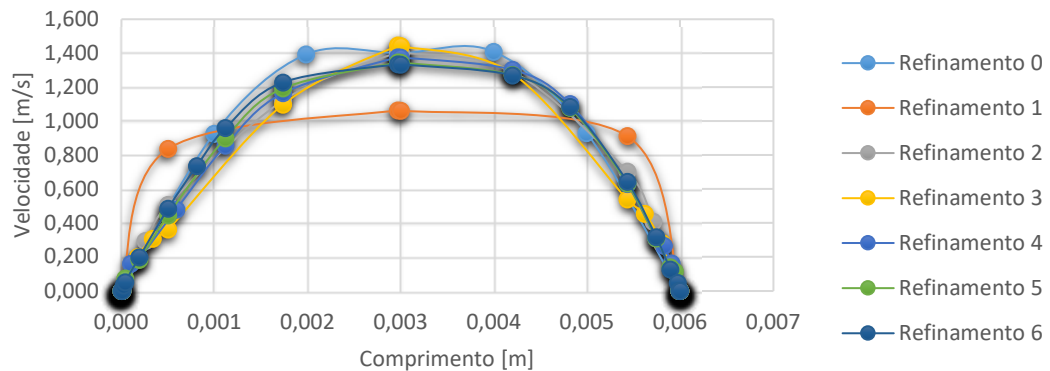
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A5 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 6, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



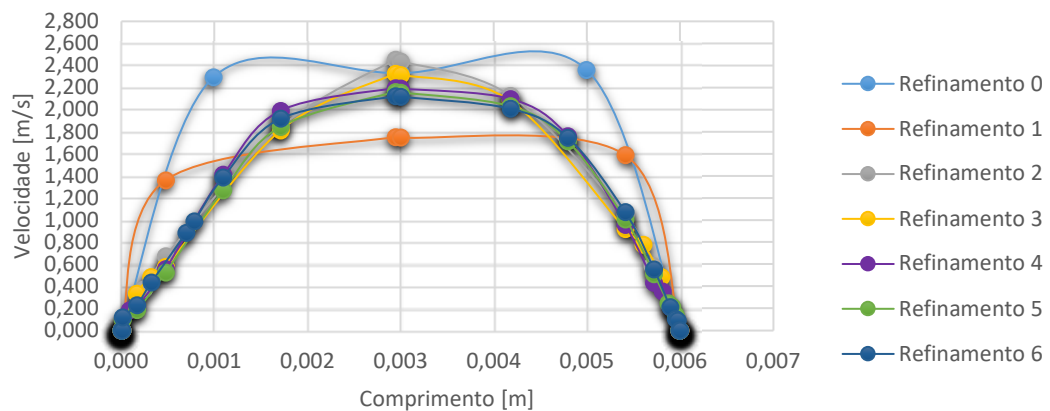
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A6 – Velocidade versus comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 7, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



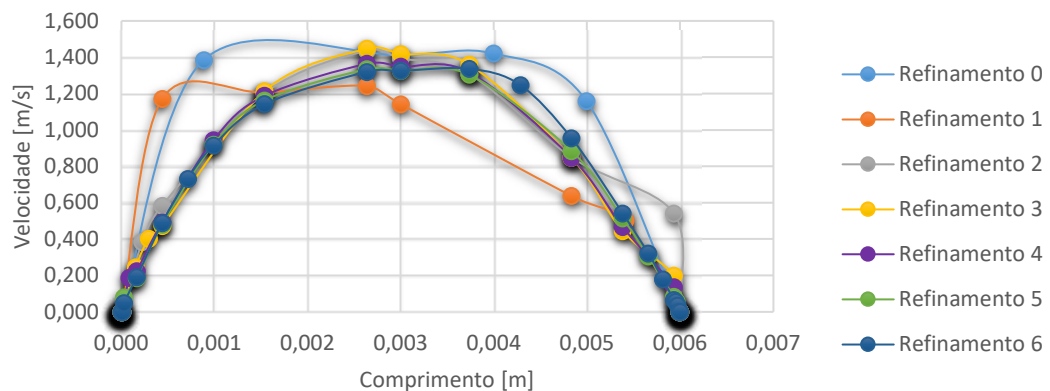
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A7 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 8, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



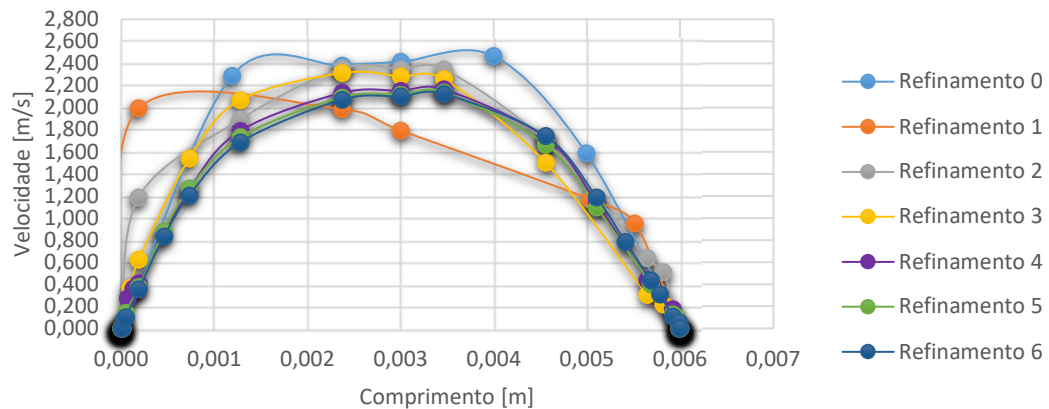
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A8 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 9, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



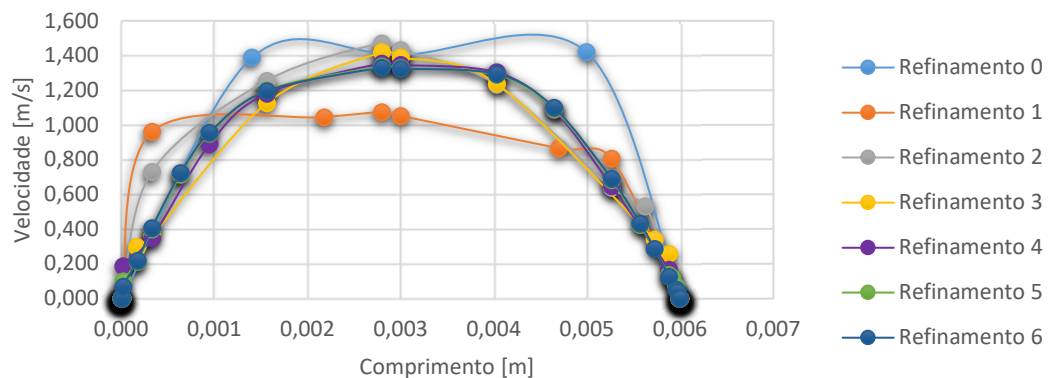
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A9 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 10, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



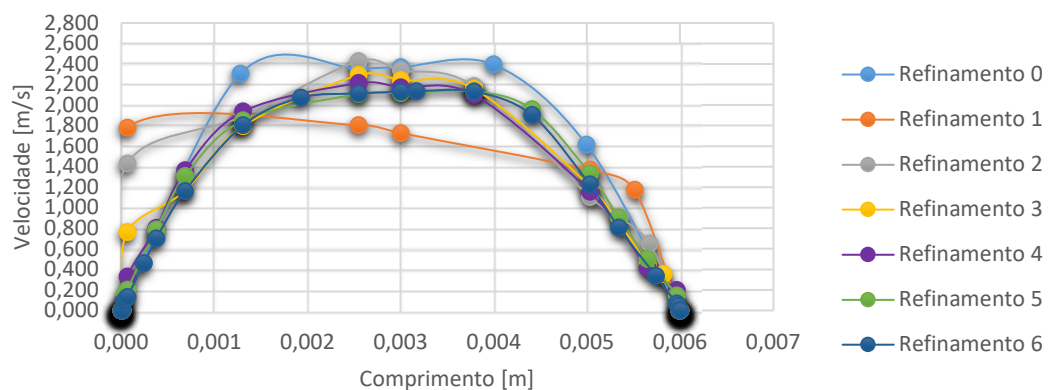
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A10 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos, no ensaio 11, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



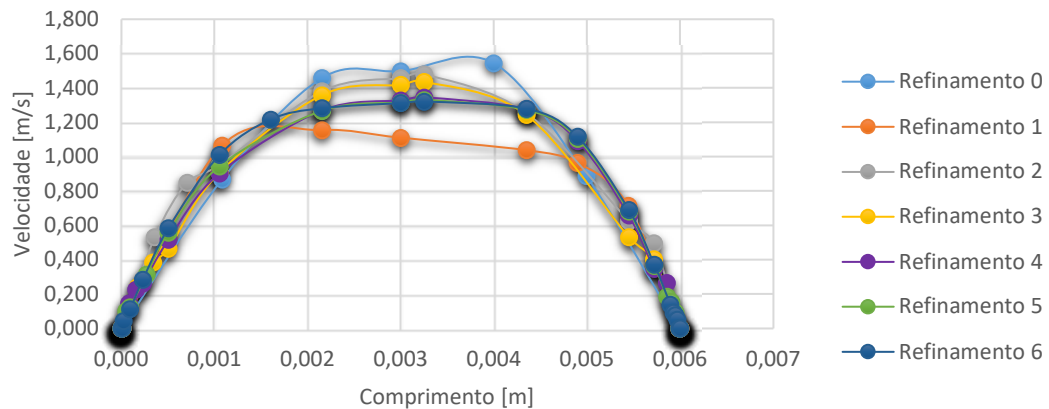
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A11 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 12, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



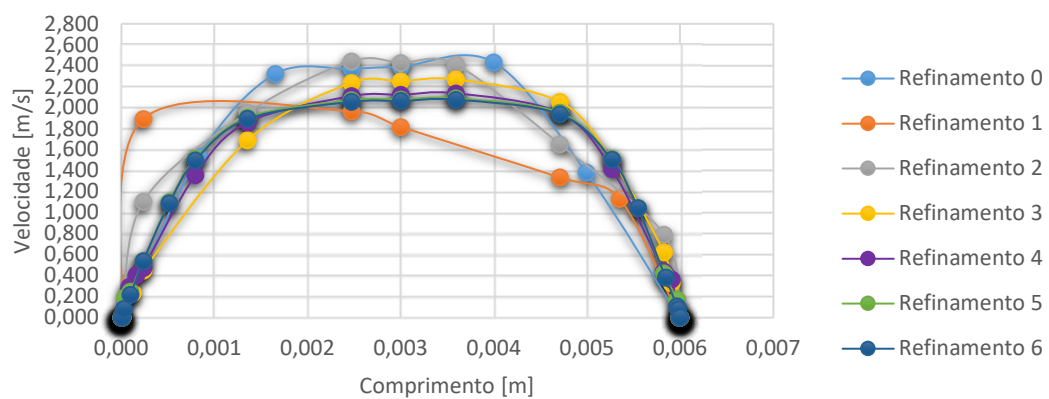
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A12 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 13, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



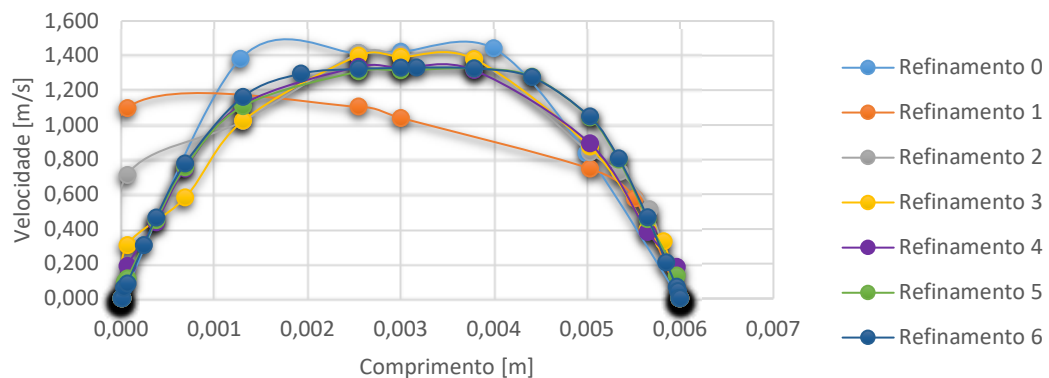
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A13 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 14, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



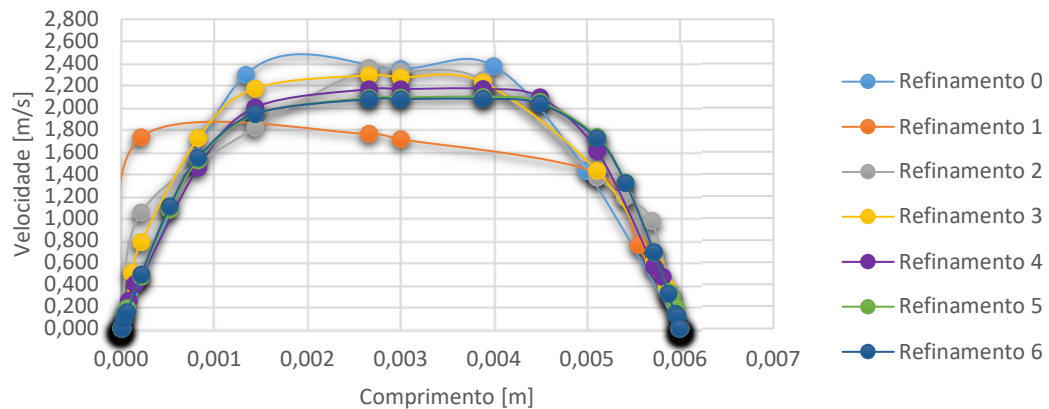
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A14 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 15, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



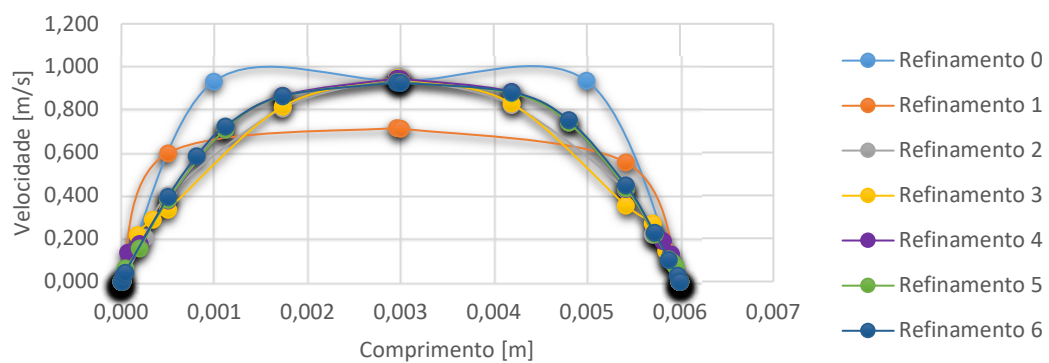
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A15 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 16, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



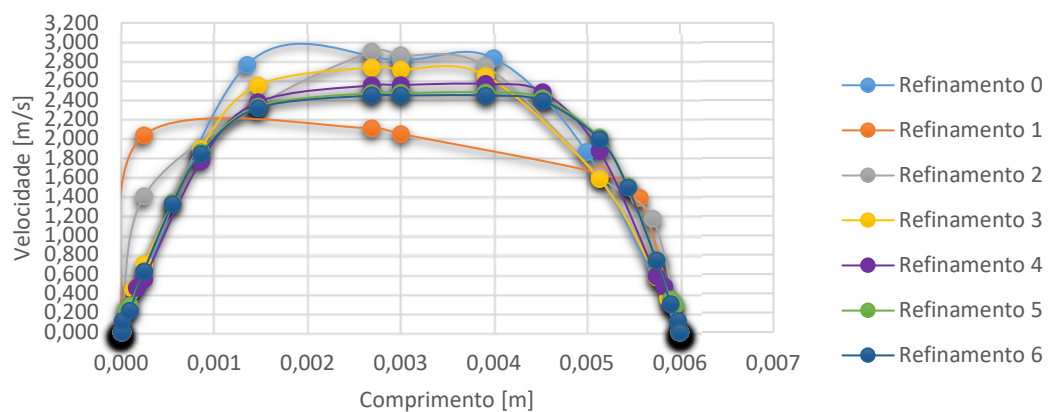
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A16 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 17, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



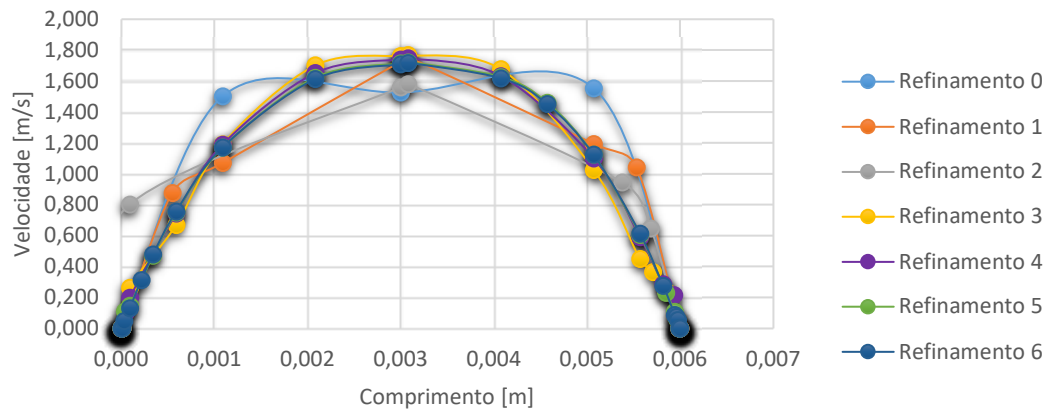
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A17 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 18, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



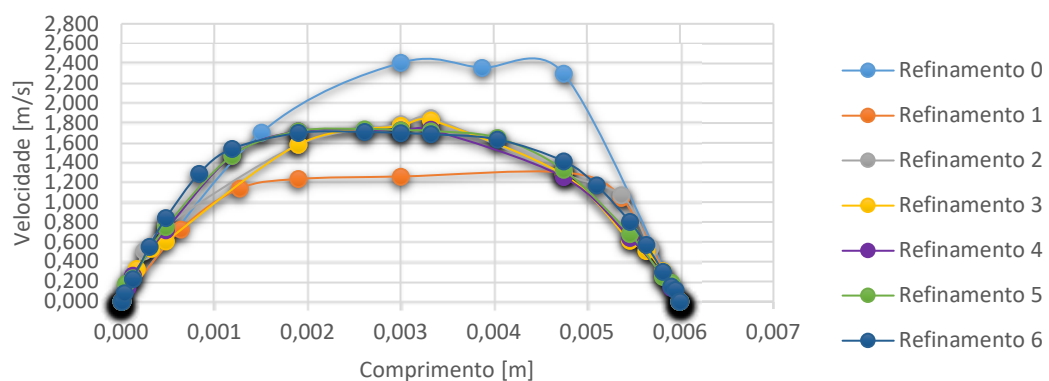
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A18 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 19, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



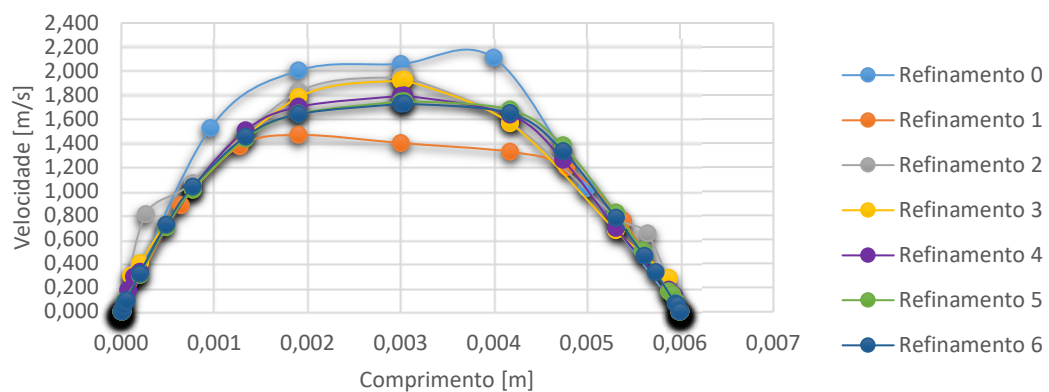
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A19 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 20, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



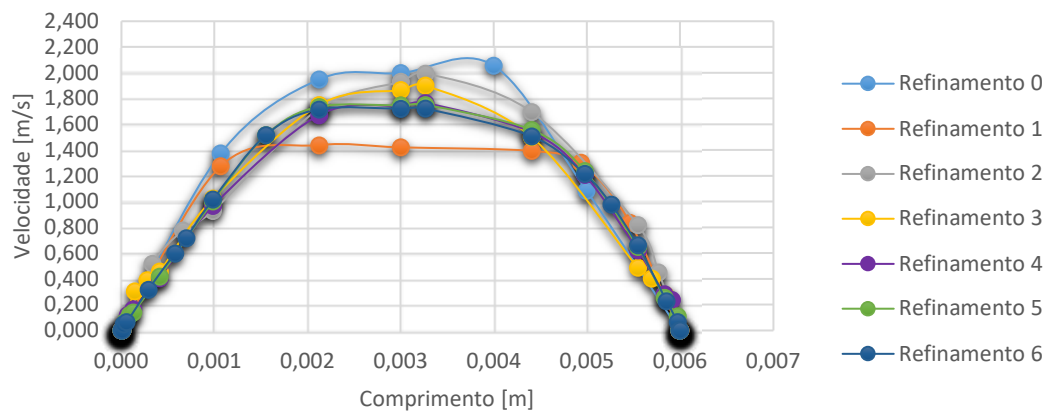
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A20 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 21, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



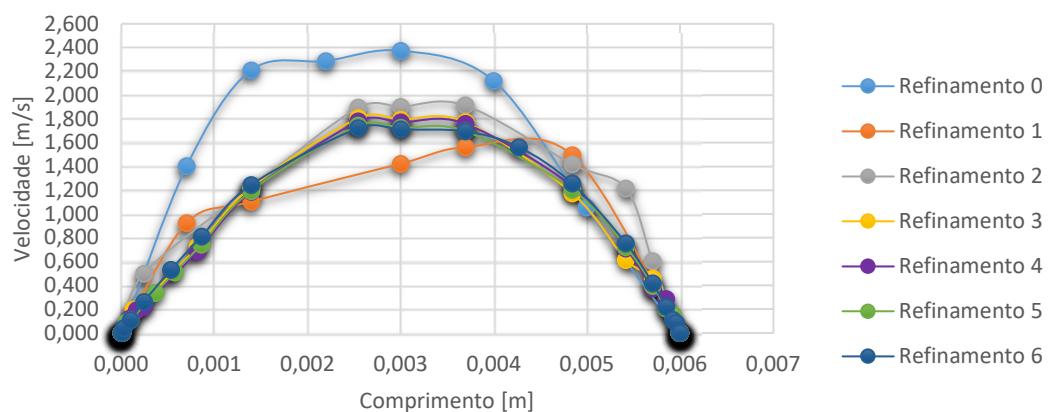
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A21 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 22, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



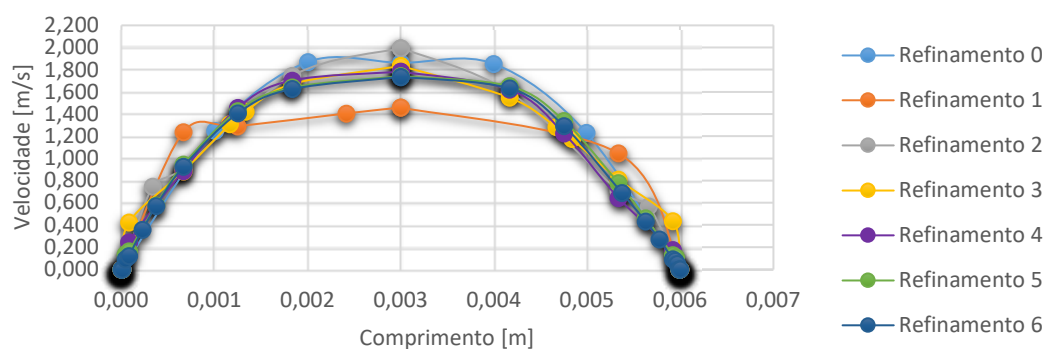
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A22 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 23, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



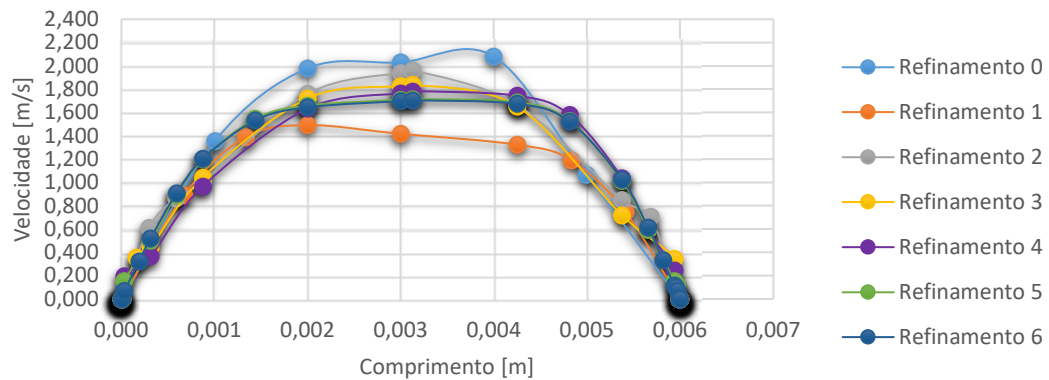
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A23 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 24, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



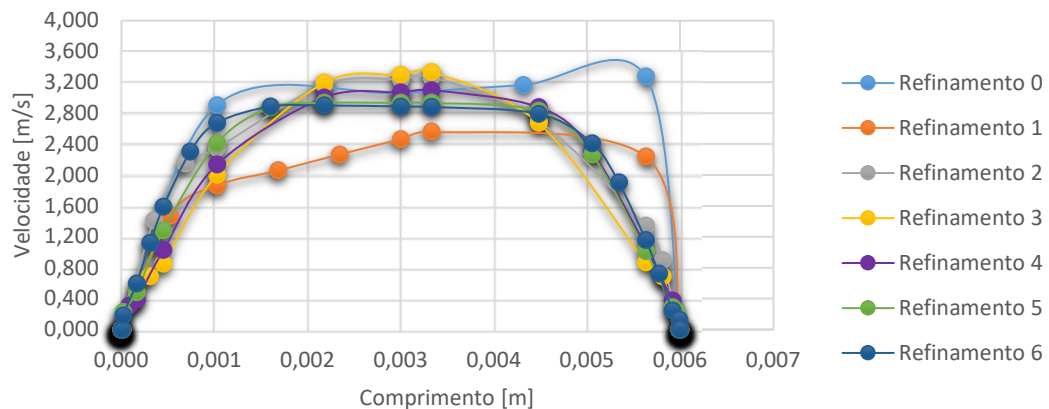
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A24 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 25, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



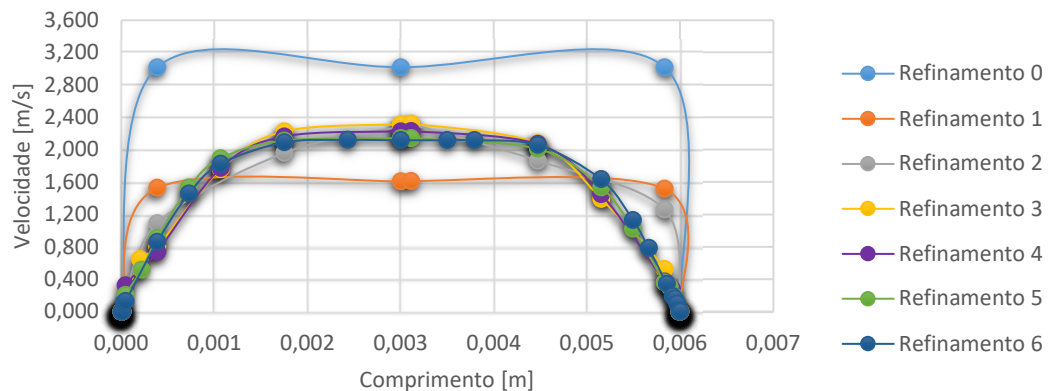
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A25 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 2, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



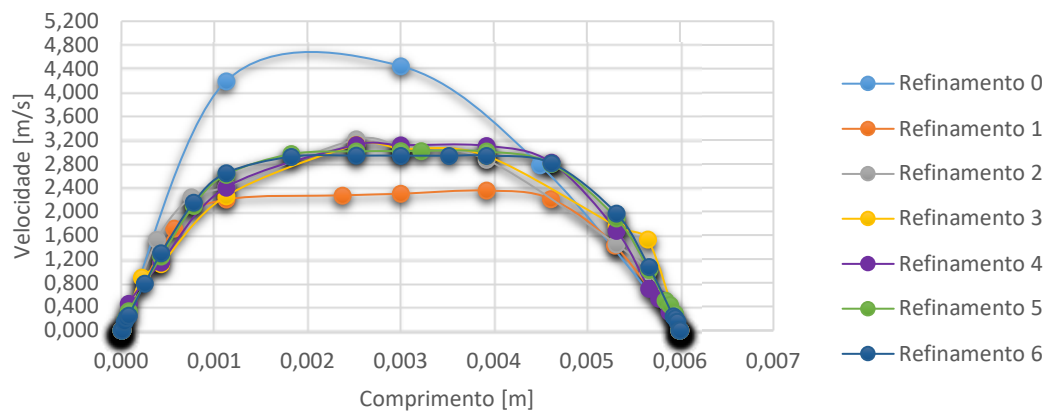
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A26 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 3, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



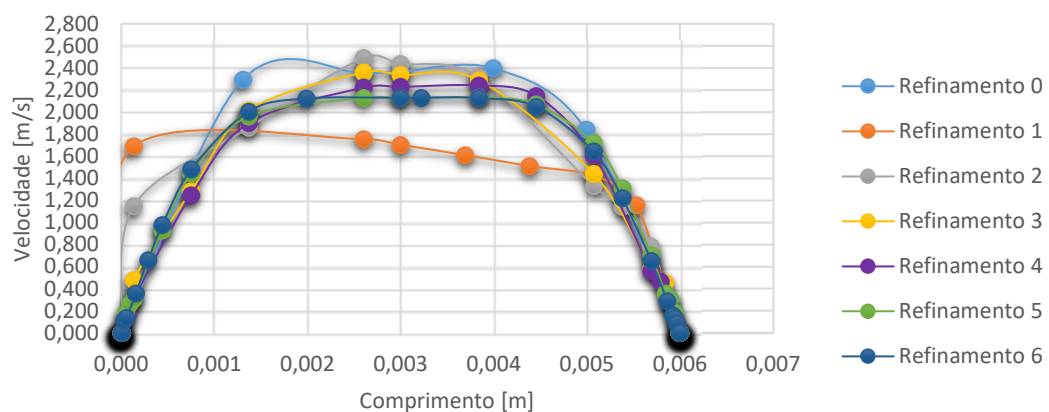
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A27 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 4, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



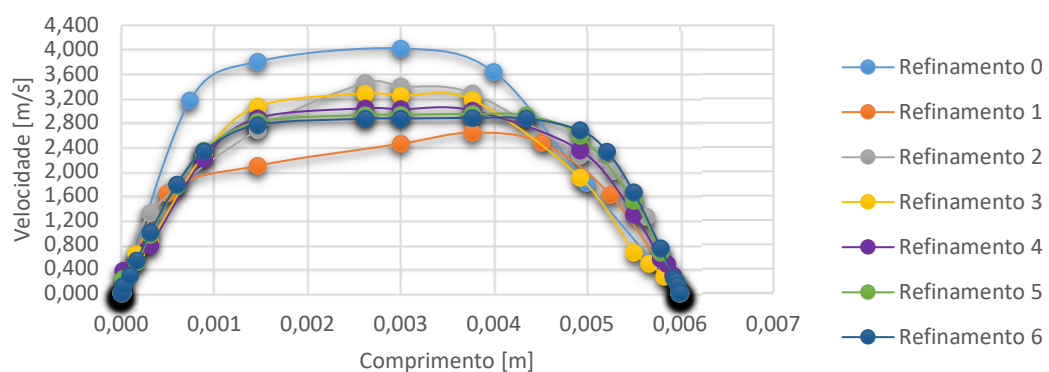
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A28 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 5, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



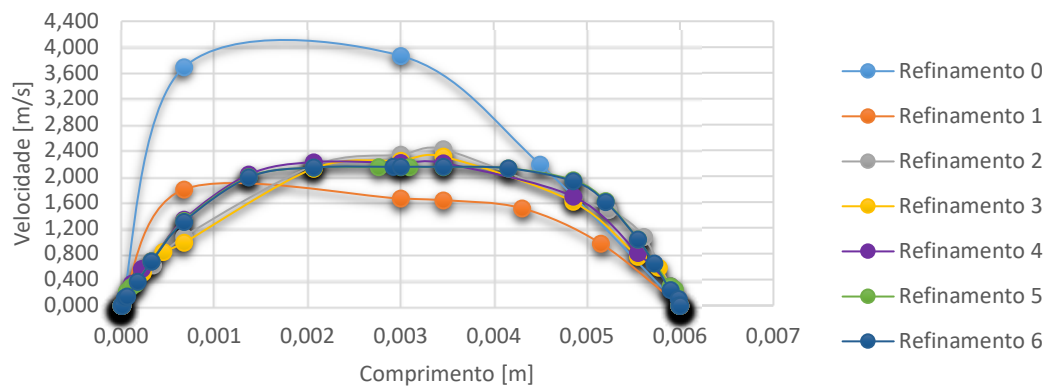
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A29 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 6, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



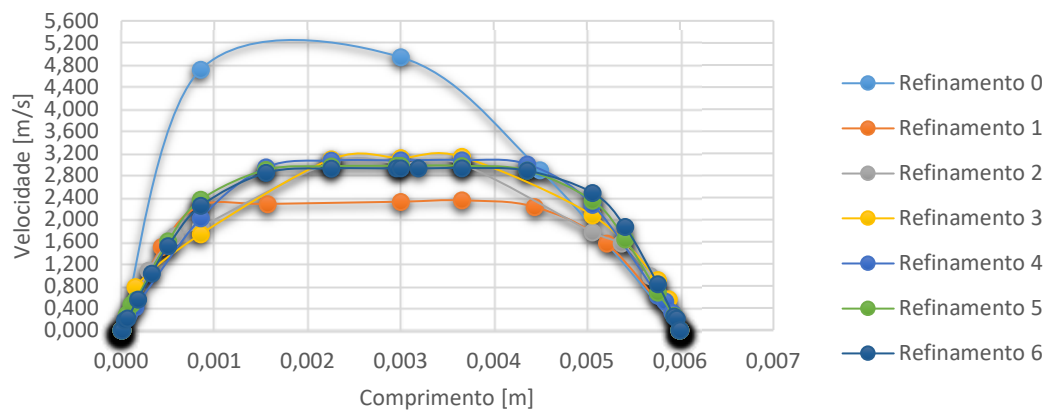
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A30 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 7, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



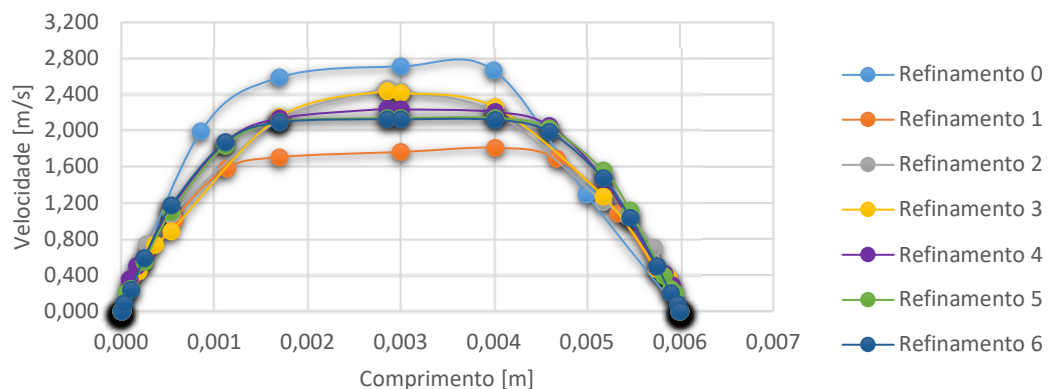
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A31 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 8, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



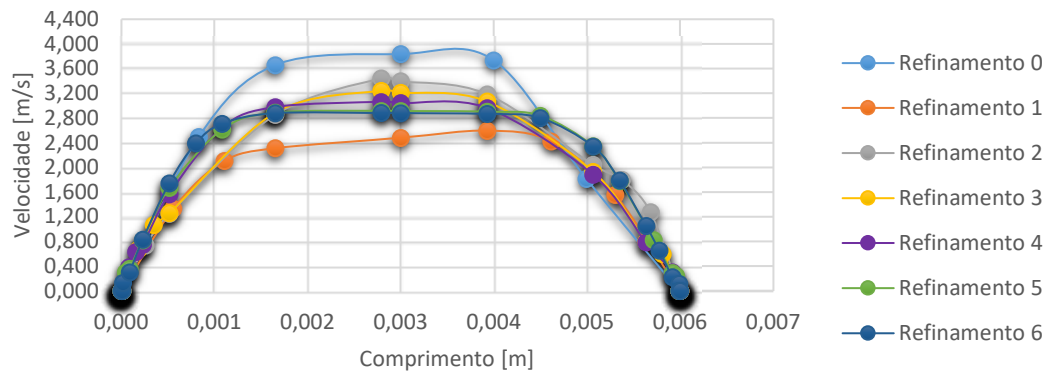
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A32 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 9, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



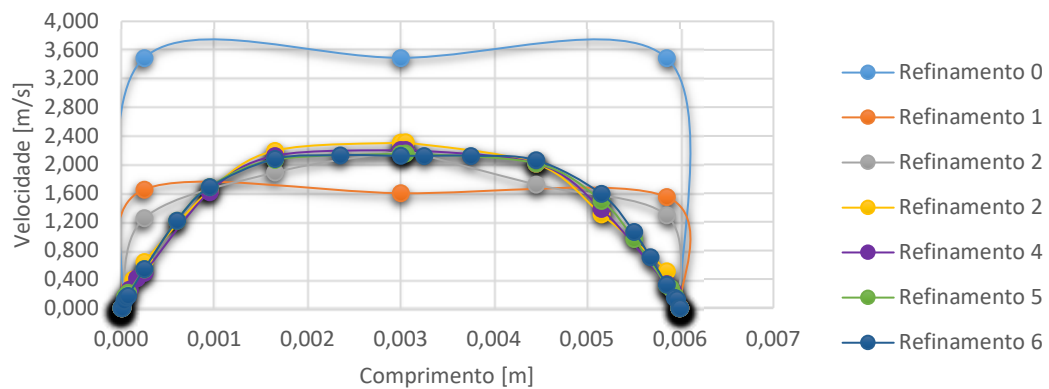
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A33 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 10, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



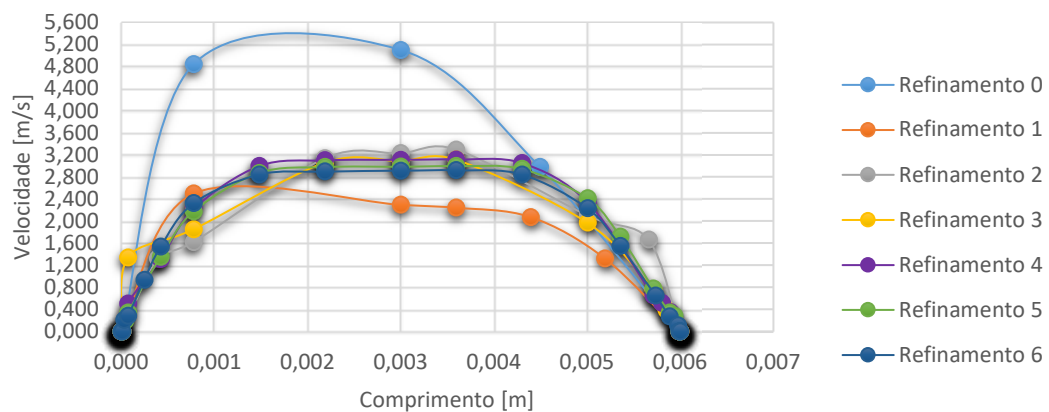
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A34 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 11, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



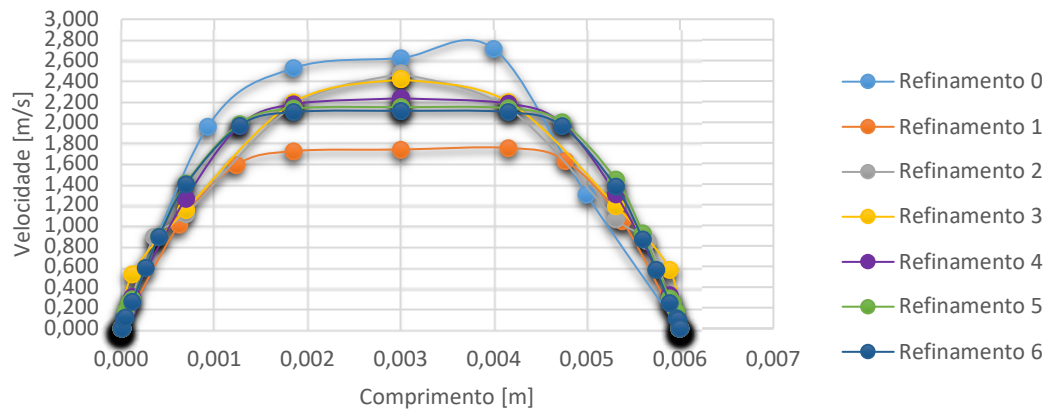
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A35 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 12, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



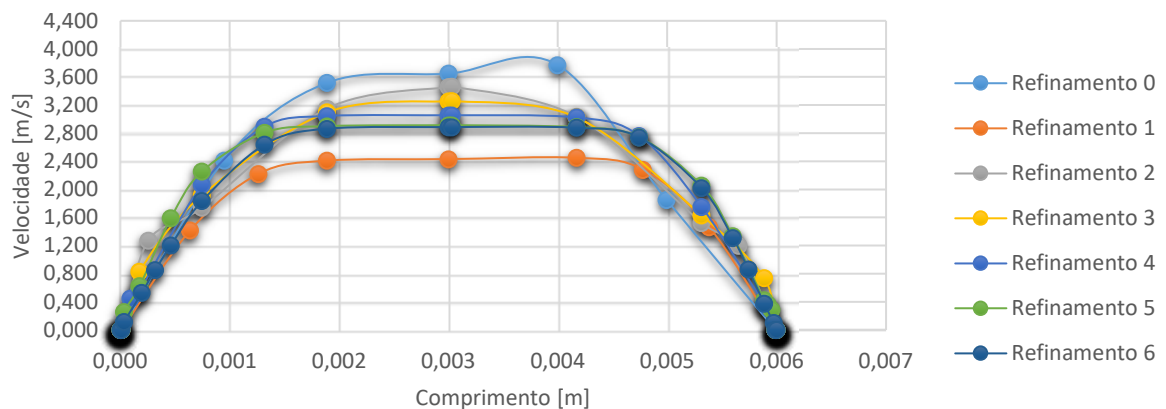
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A36 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 13, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



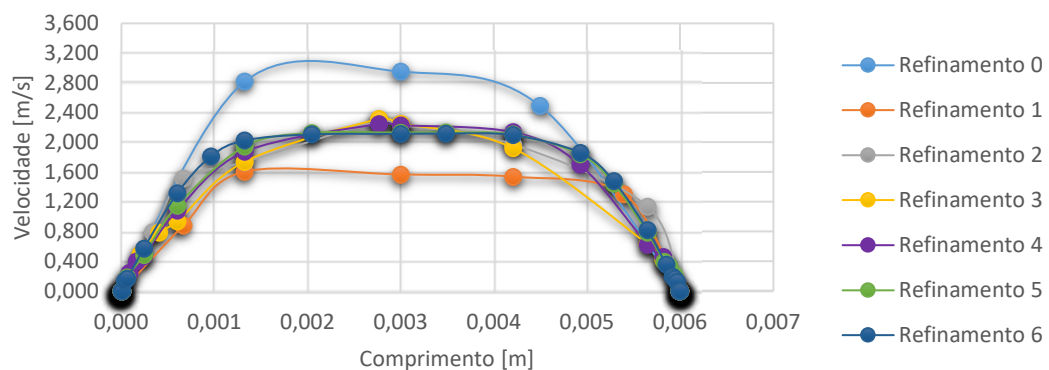
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A37 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 14, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



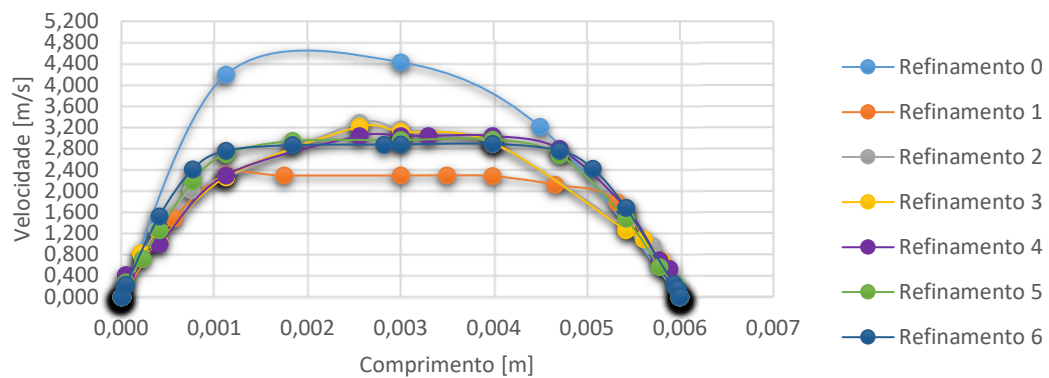
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A38 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 15, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



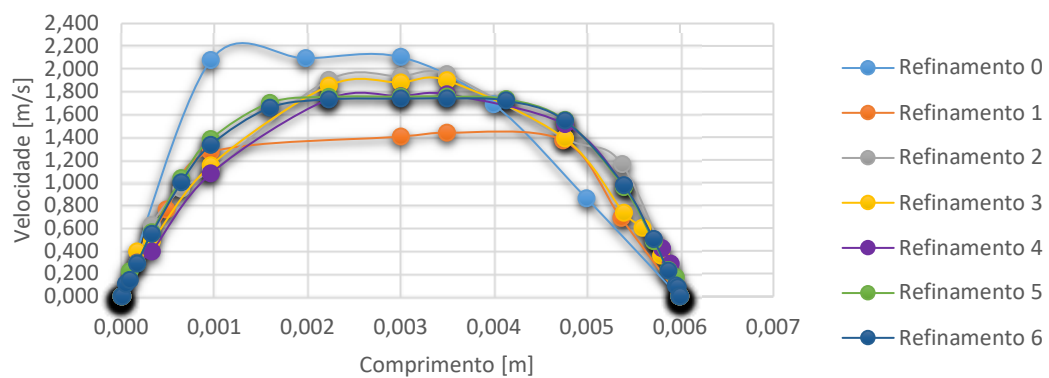
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A39 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 16, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



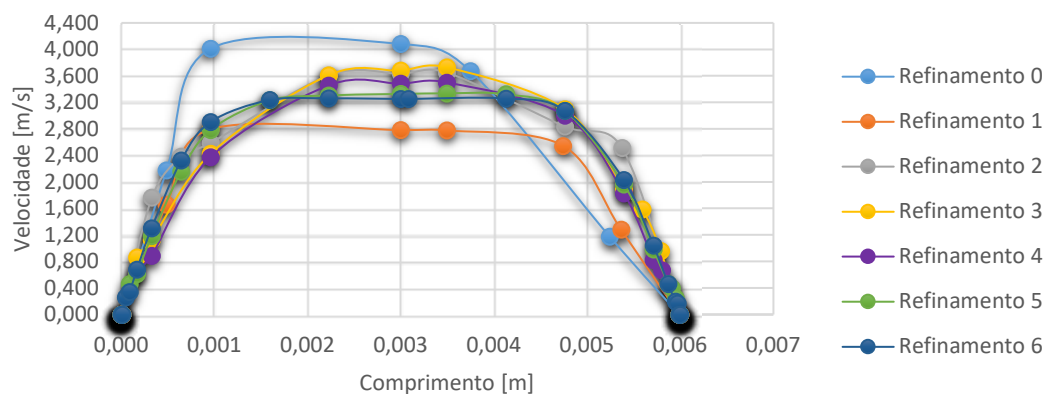
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A40 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 17, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



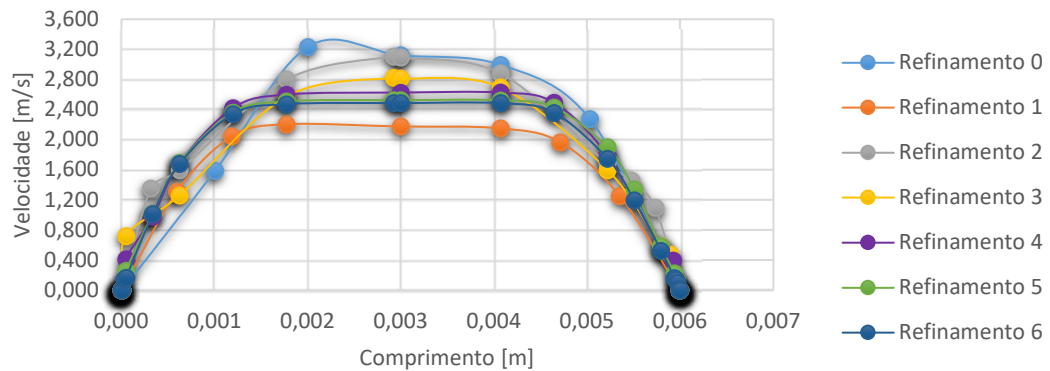
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A41 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 18, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



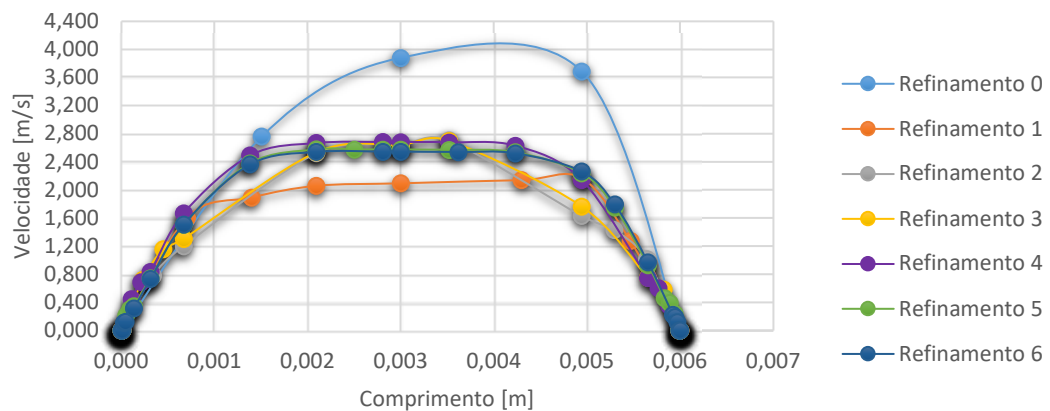
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A42 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 19, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



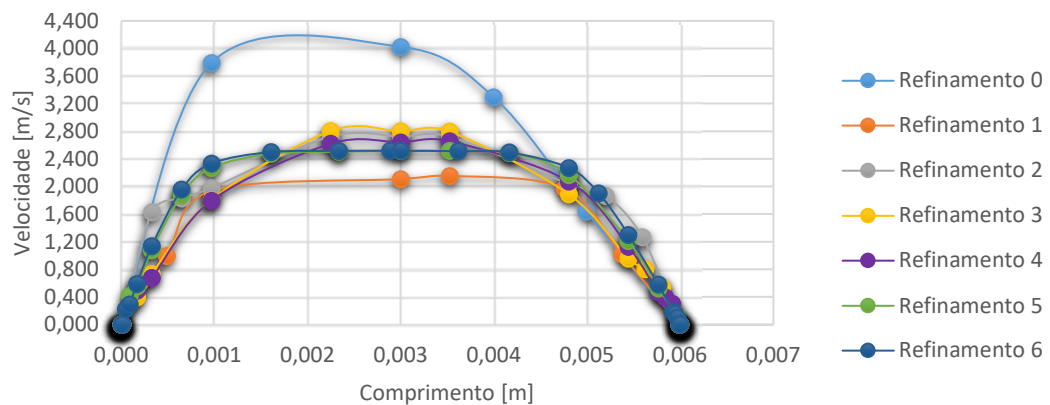
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A43 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 20, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



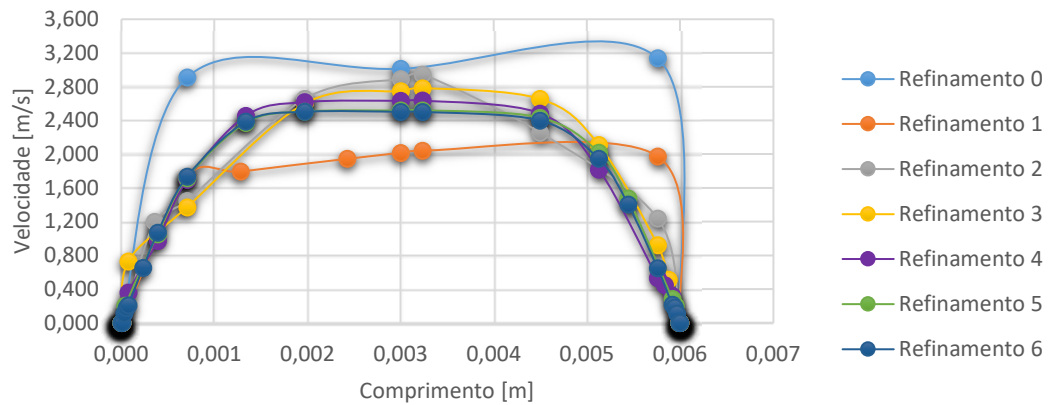
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A44 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 21, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



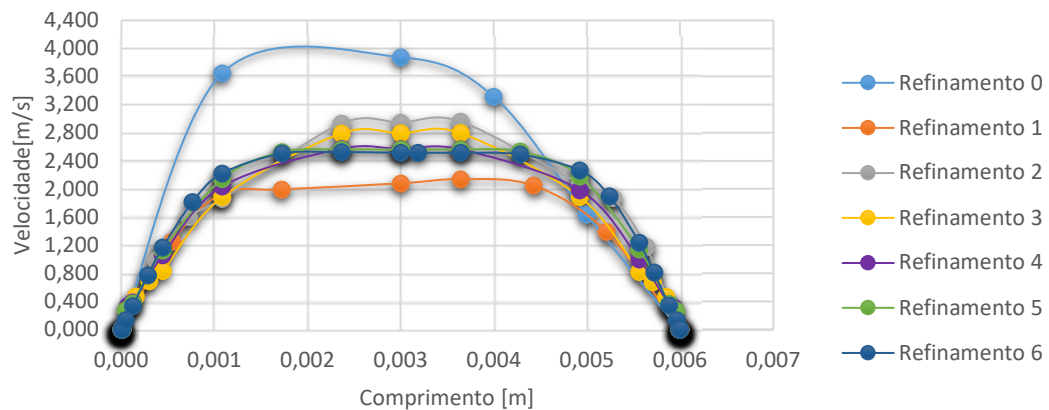
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A45 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 22, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



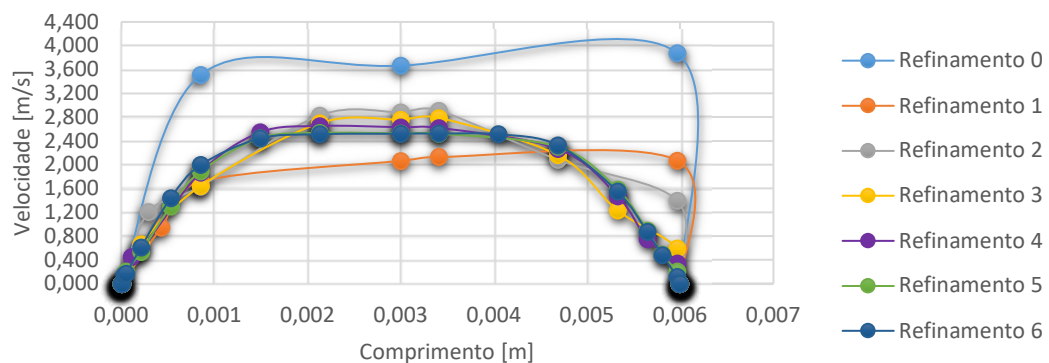
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A46 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 23, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



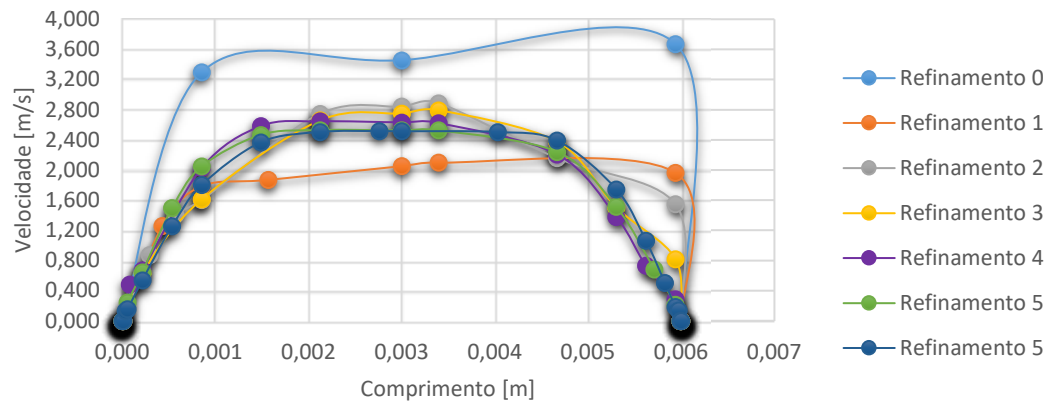
Fonte: O autor (2022).

Gráfico A47 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 24, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).

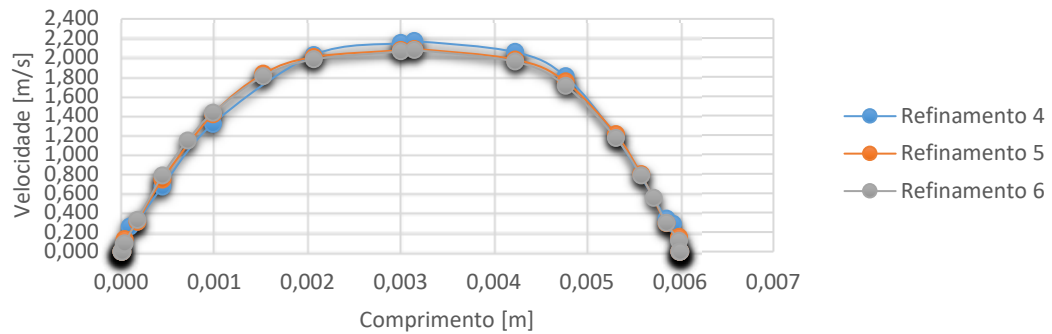
Gráfico A48 – Velocidade *versus* comprimento para diferentes refinamentos no ensaio 25, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).

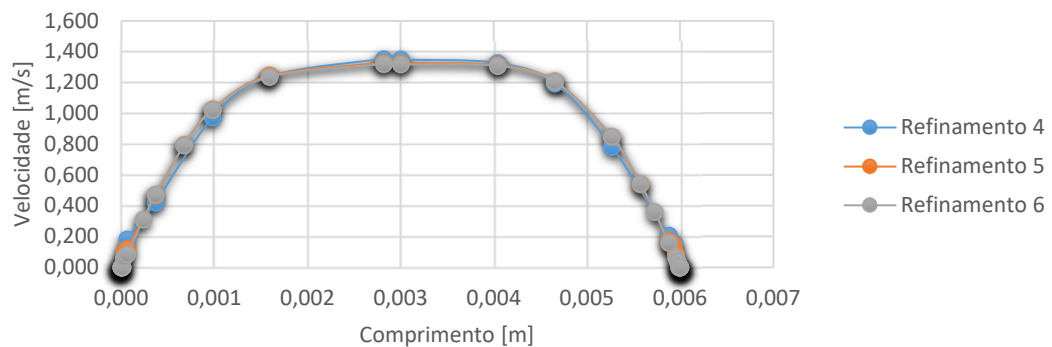
APÊNDICE B – VELOCIDADE *VERSUS* COMPRIMENTO DOS REFINAMENTOS 4, 5 E 6

Gráfico B1 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 2, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



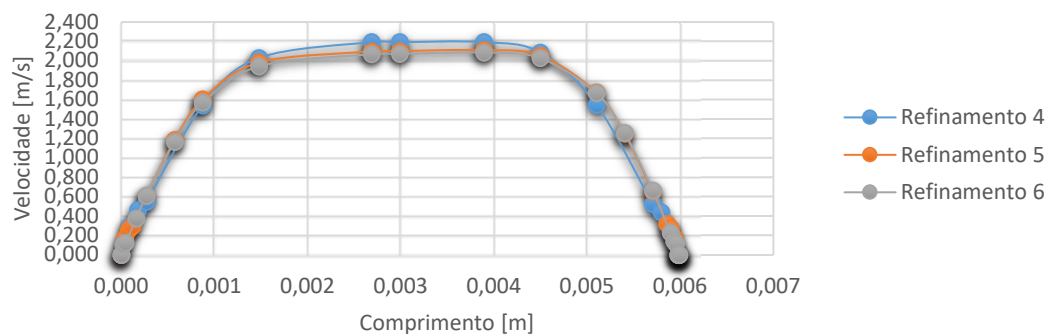
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B2 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 3, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



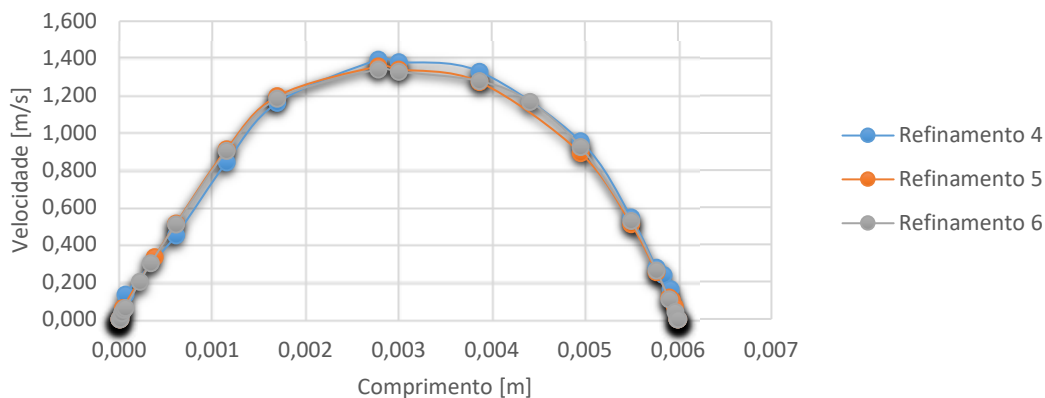
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B3 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 4, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



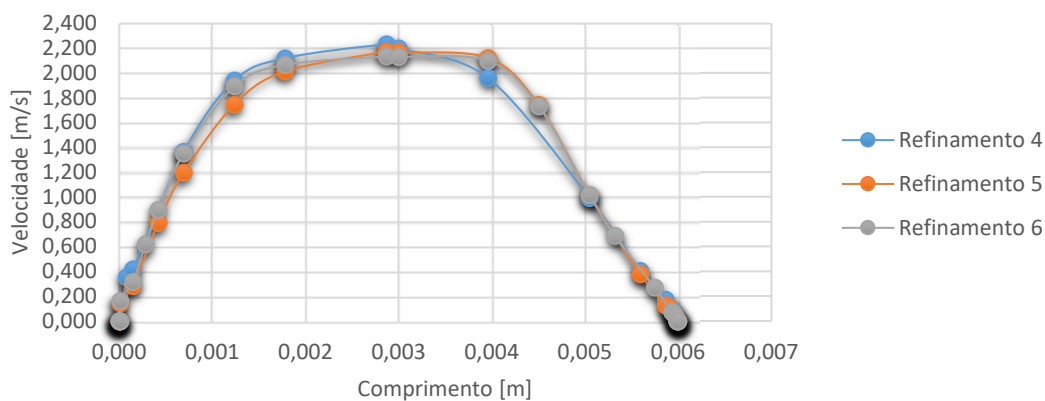
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B4 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 5, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



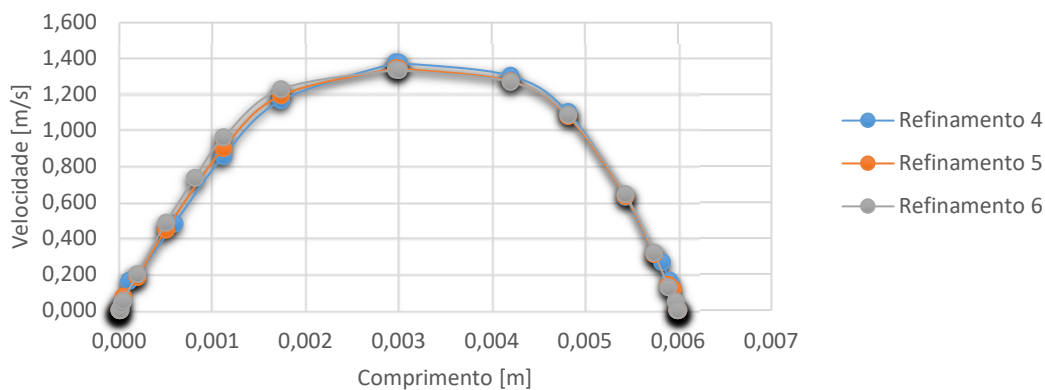
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B5 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 6, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



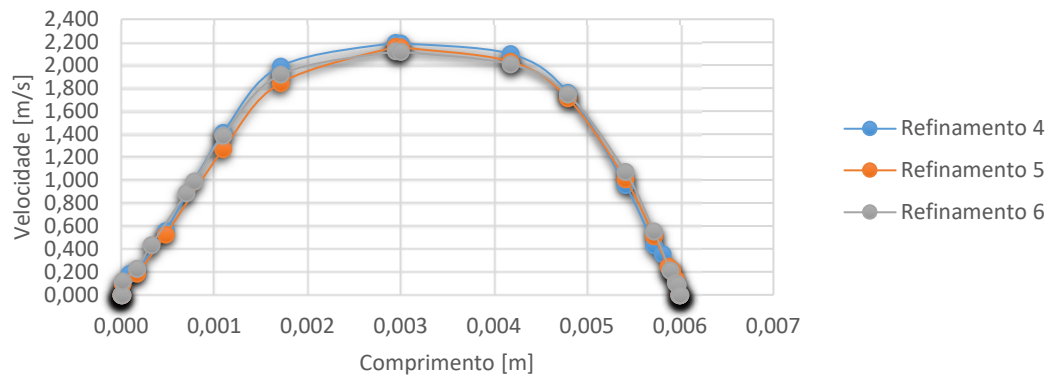
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B6 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 7, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



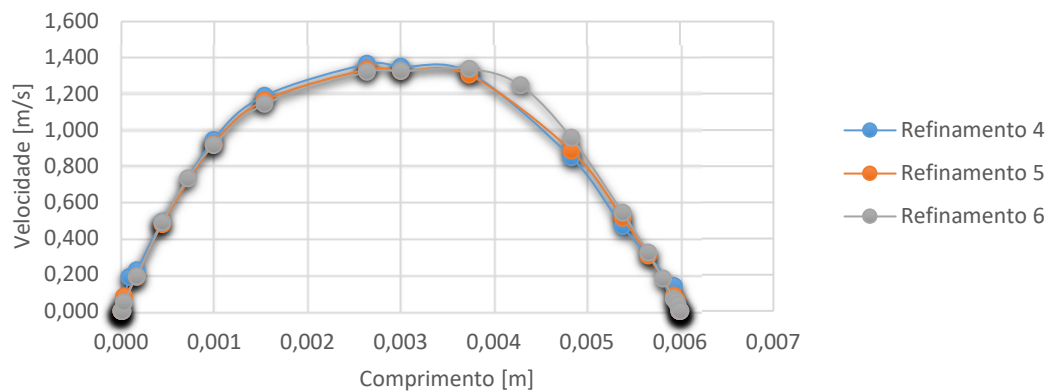
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B7 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 8, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



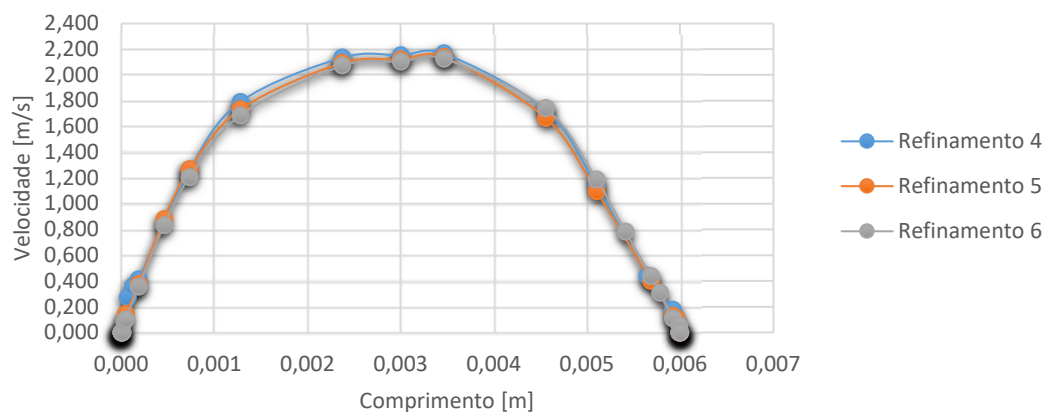
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B8 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 9, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



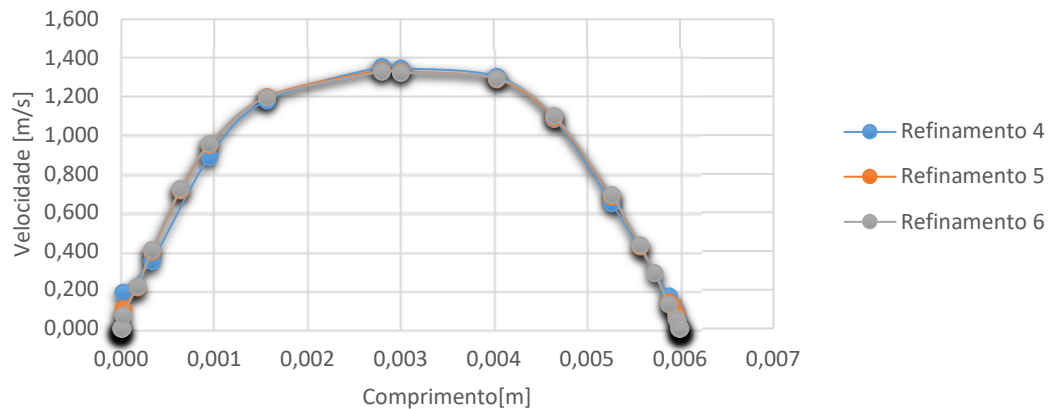
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B9 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 10, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



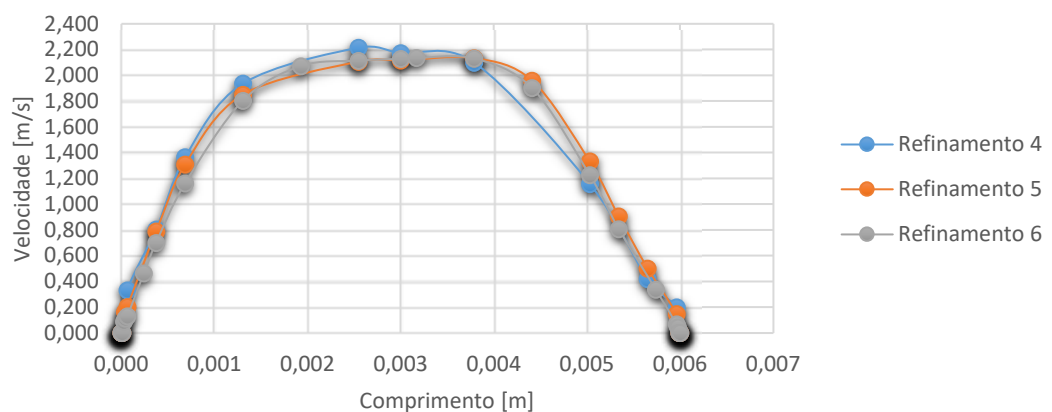
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B10 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 11, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



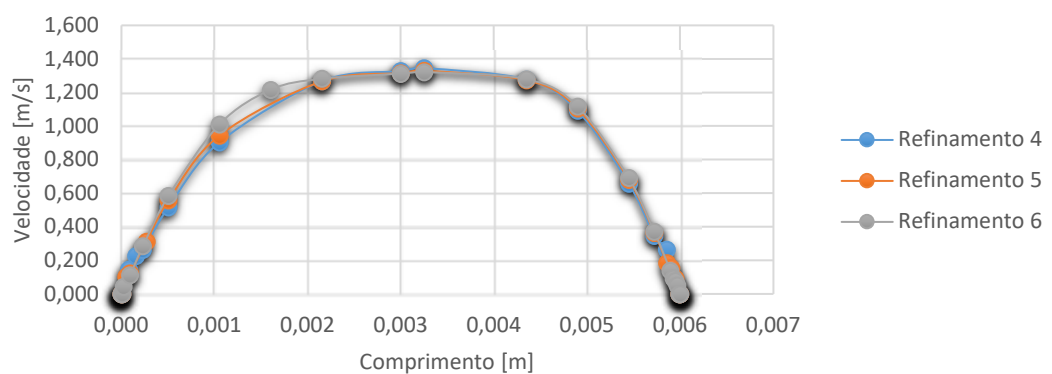
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B11 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 12, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



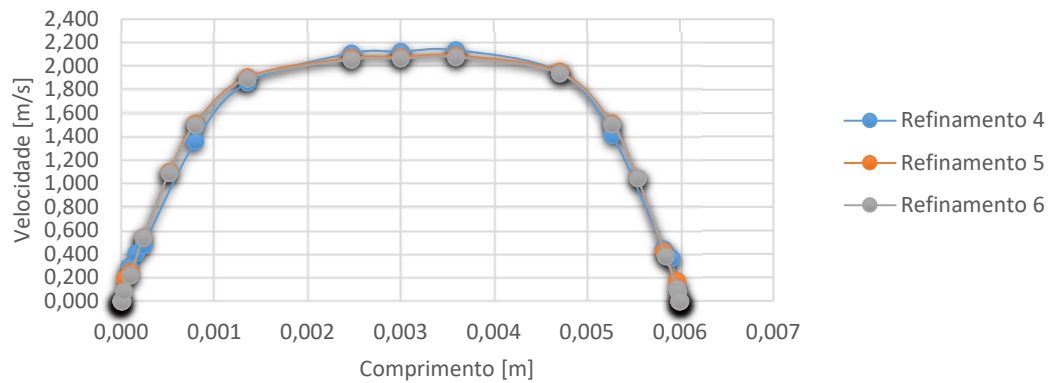
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B12 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 13, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



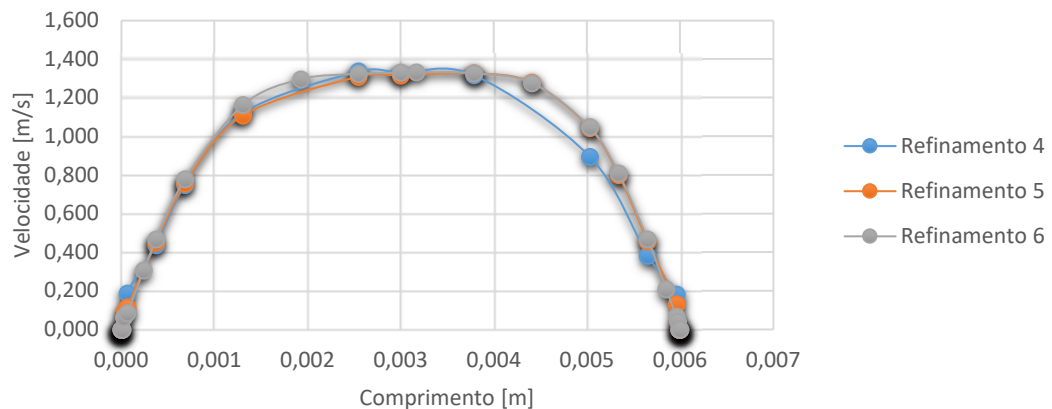
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B13 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 14, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



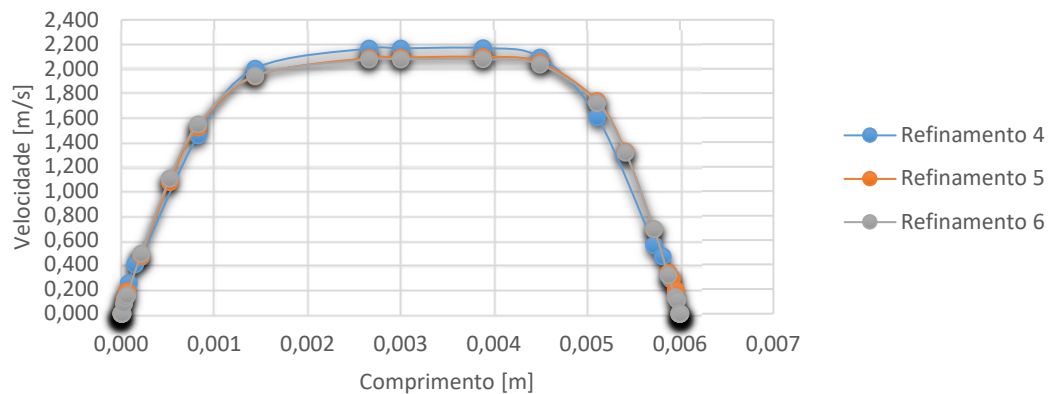
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B14 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 15, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



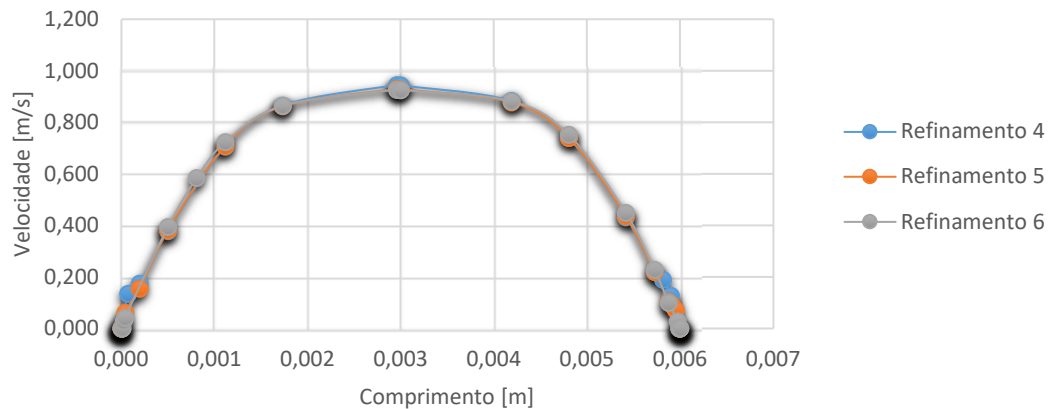
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B15 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 16, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



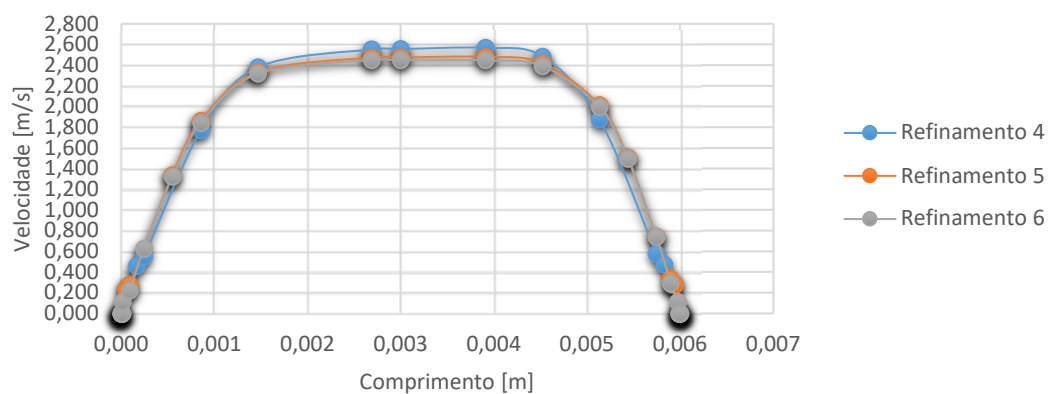
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B16 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 17, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



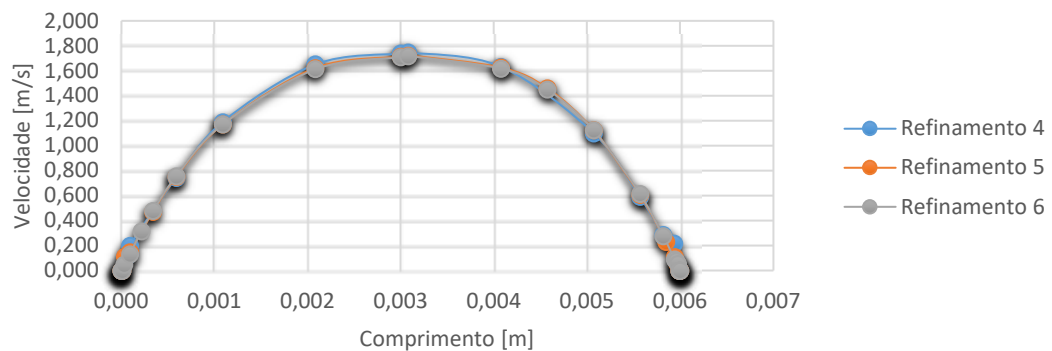
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B17 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 18, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



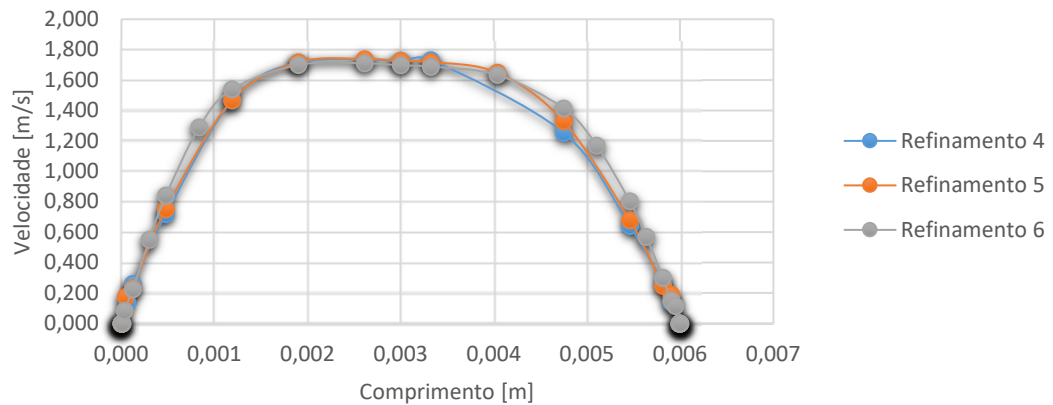
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B18 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 19, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



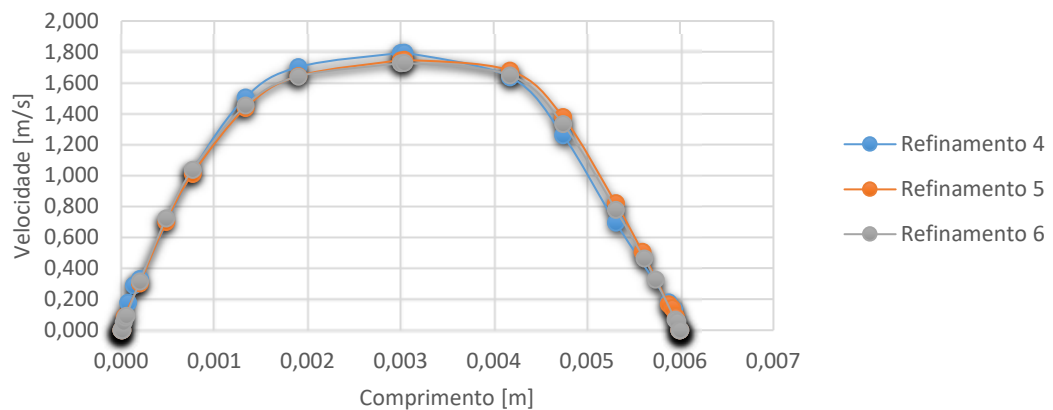
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B19 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 20, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



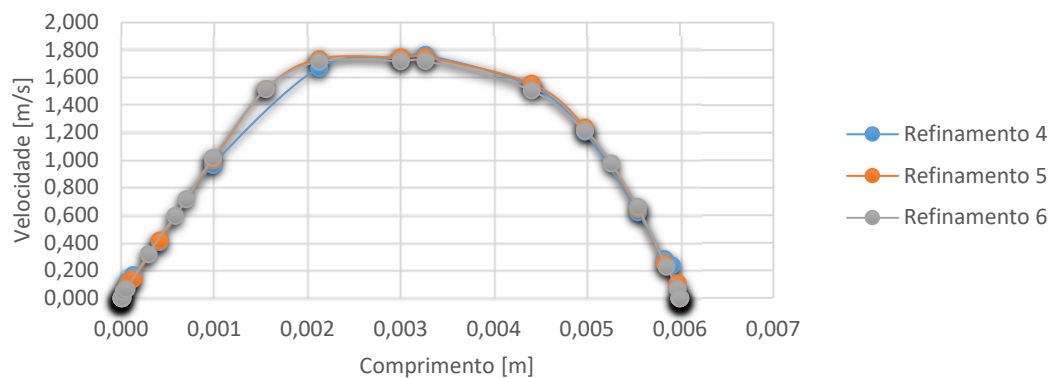
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B20 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 21, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



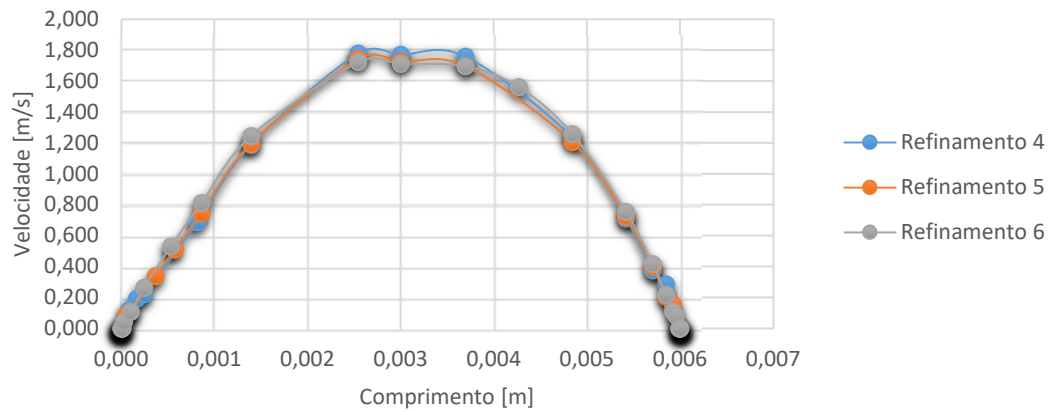
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B21 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 22, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



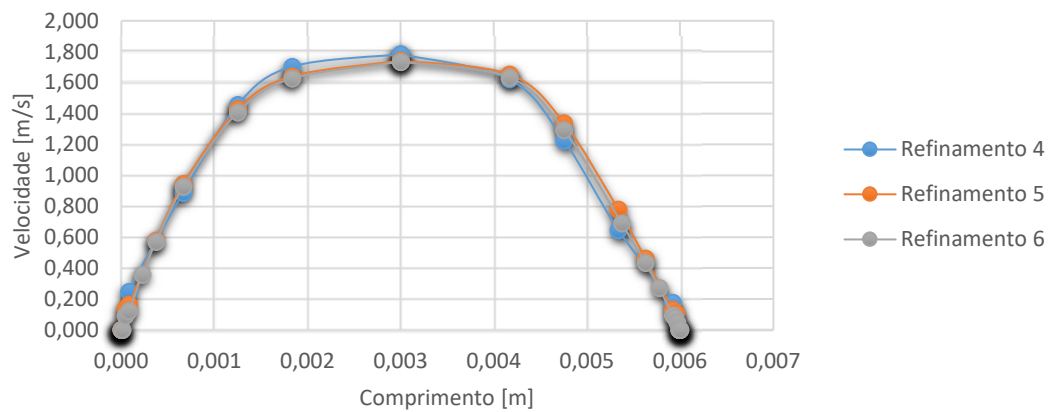
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B22 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 23, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



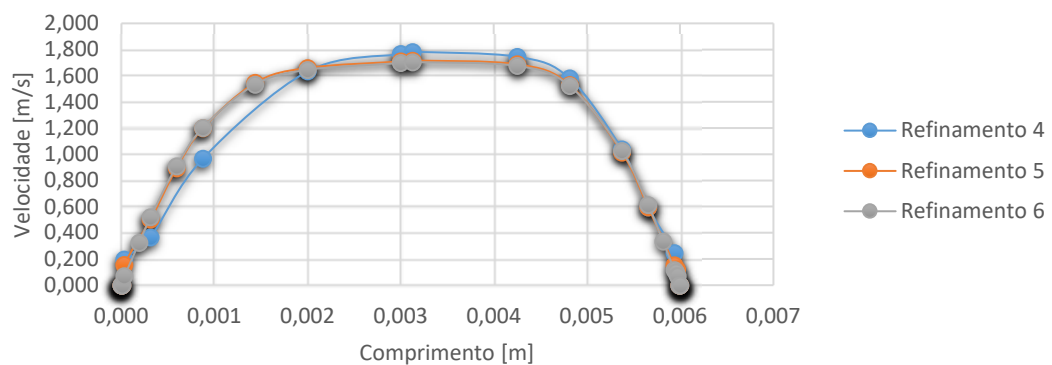
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B23 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 24, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



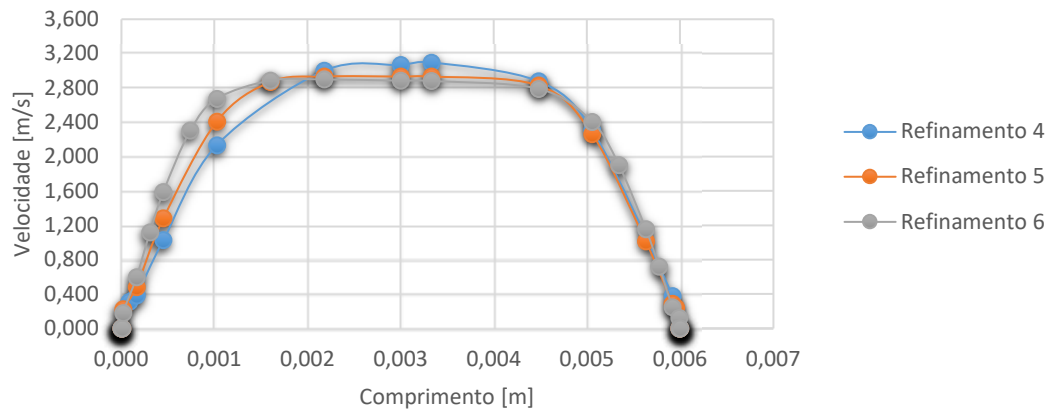
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B24 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 25, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



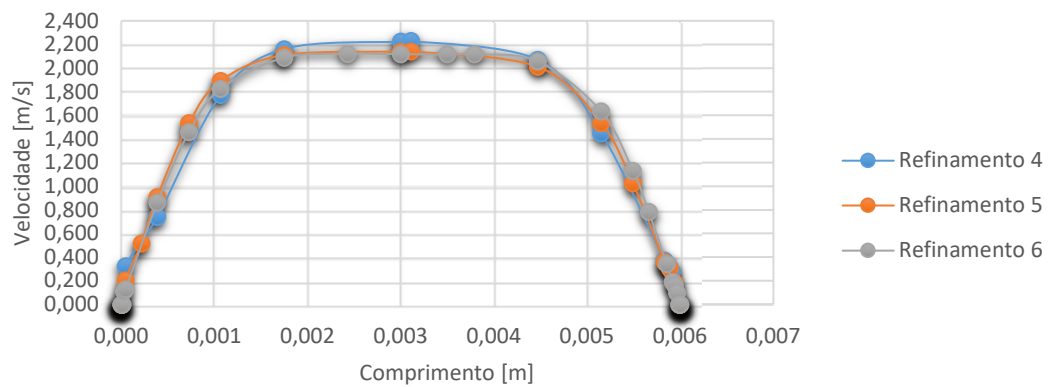
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B25 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 2, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



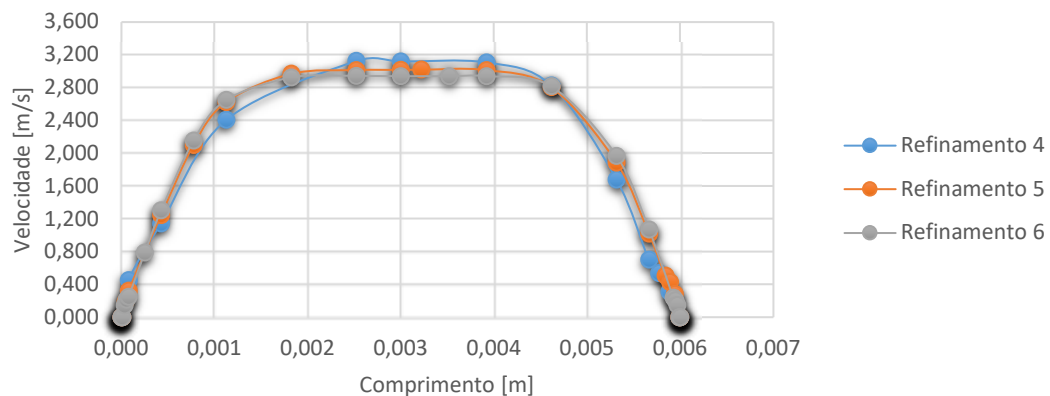
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B26 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 3, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



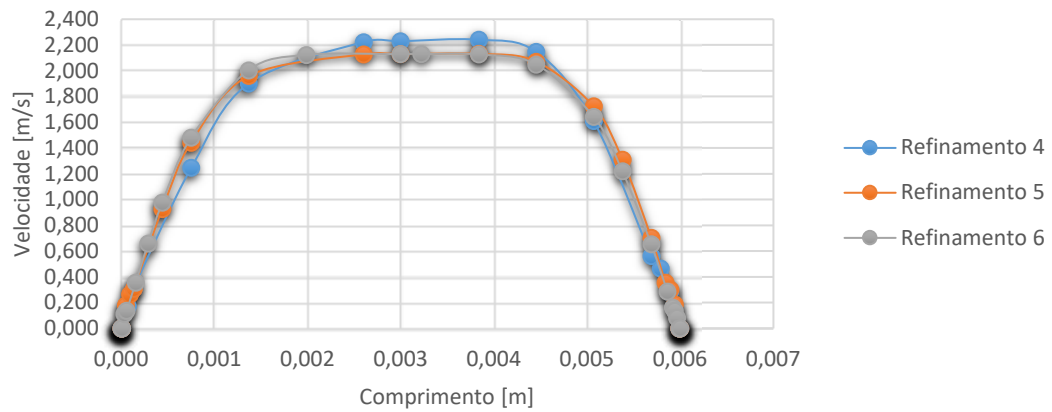
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B27 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 4, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



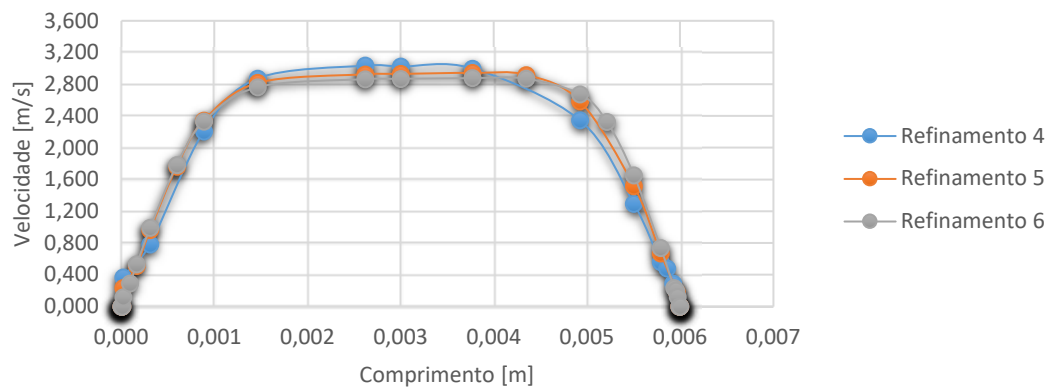
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B28 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 5, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



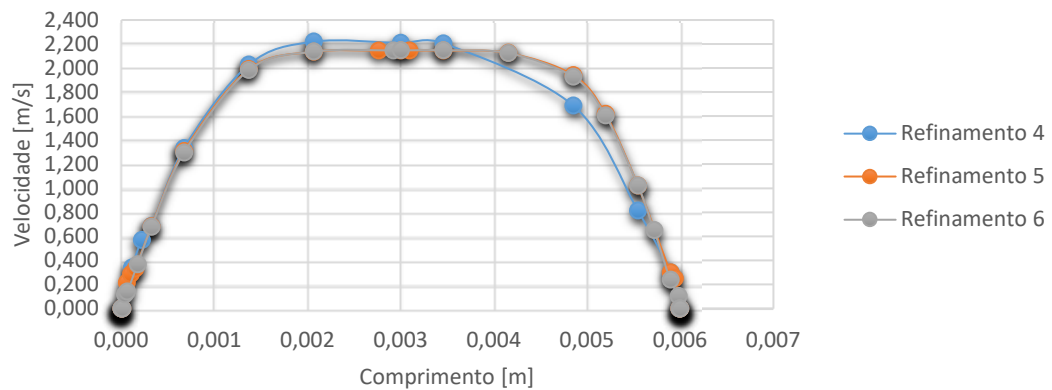
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B29 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 6, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



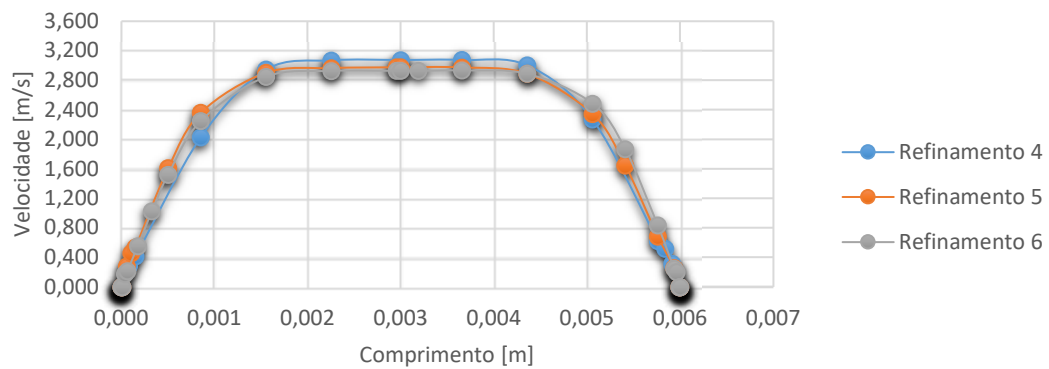
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B30 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 7, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



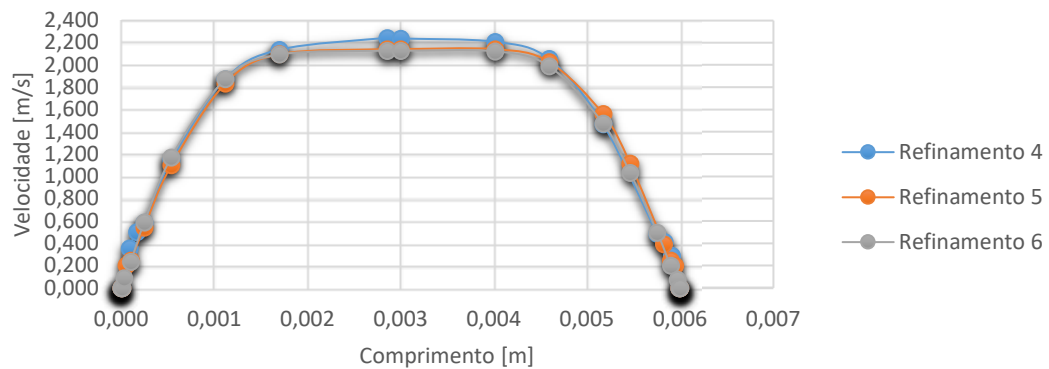
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B31 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 8, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



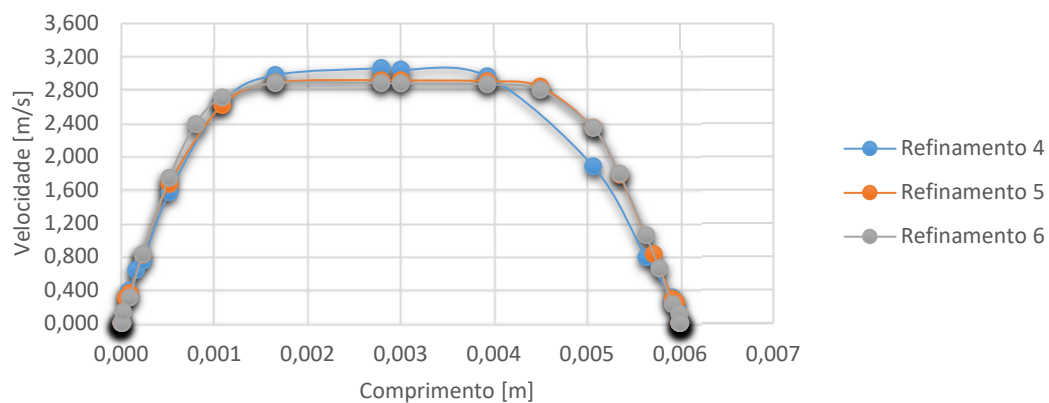
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B32 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6 no ensaio 9, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



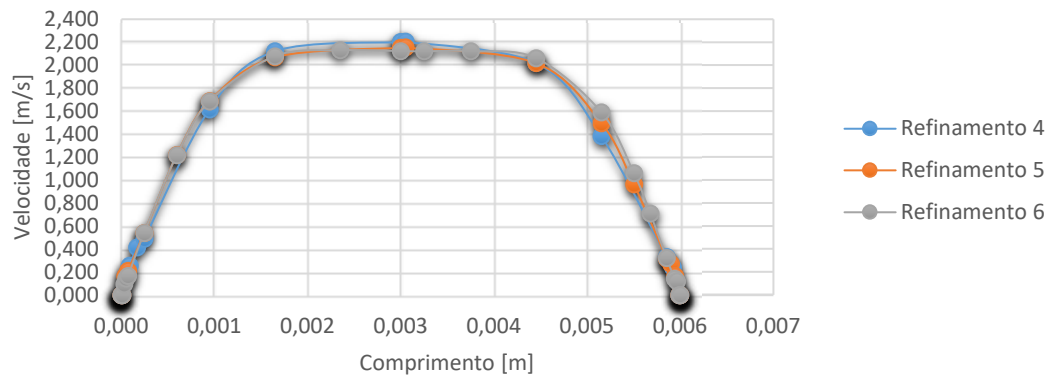
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B33 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 10, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



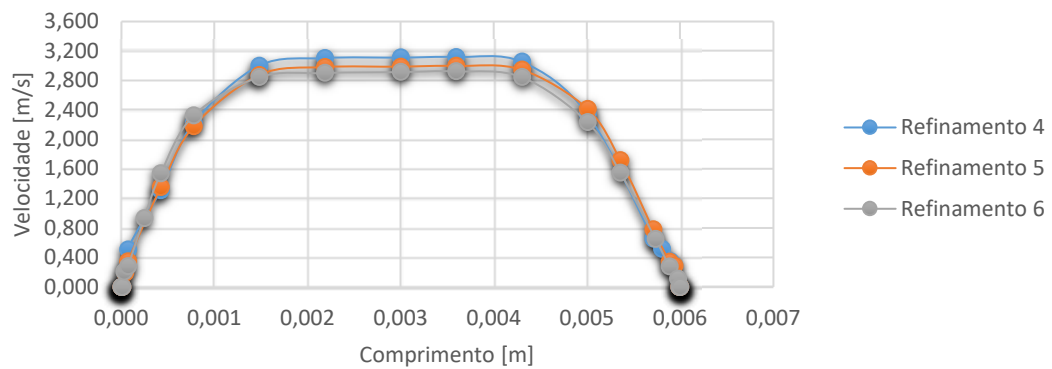
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B34 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 11, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



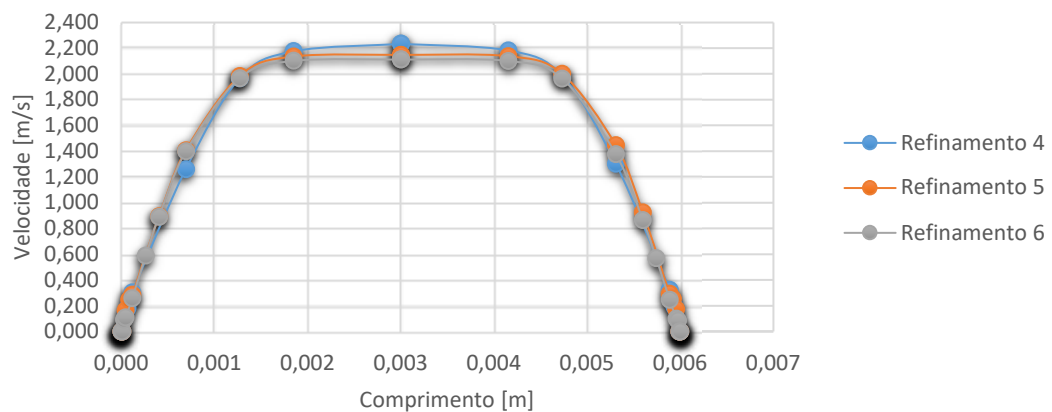
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B35 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 12, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



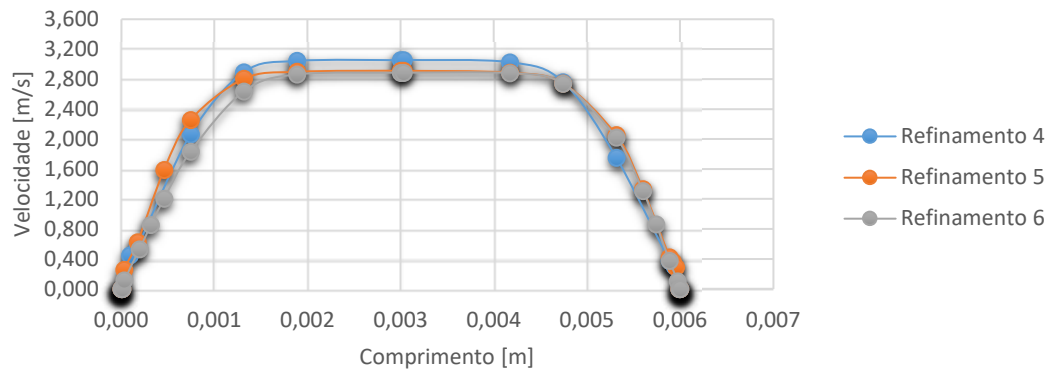
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B36 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 13, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



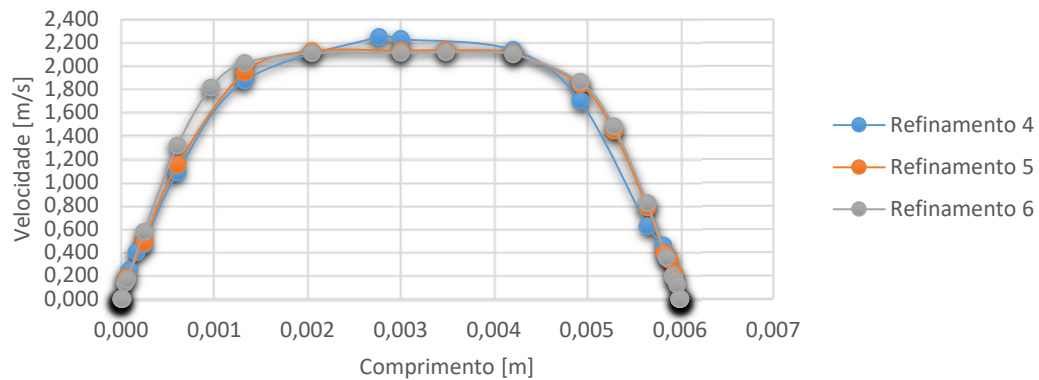
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B37 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 14, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



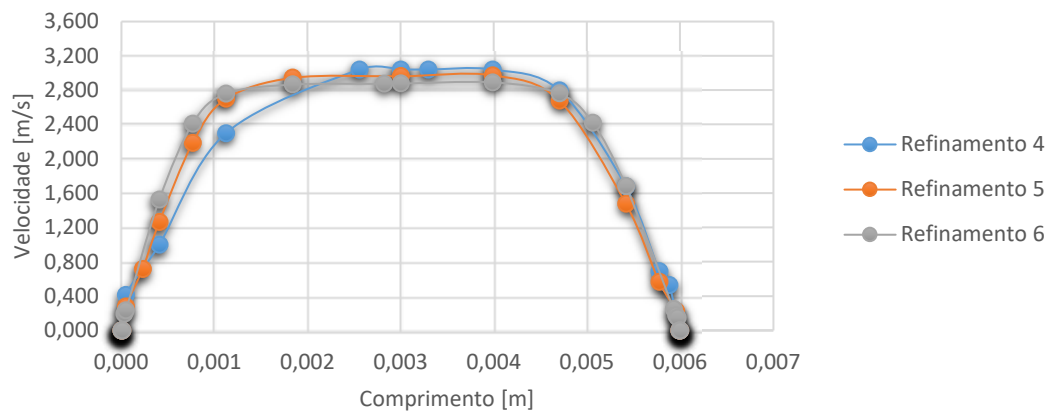
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B38 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 15, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



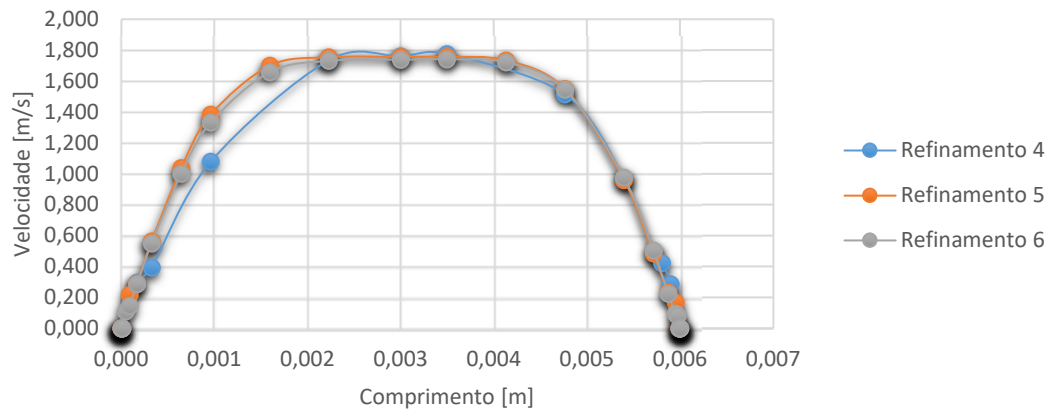
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B39 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 16, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



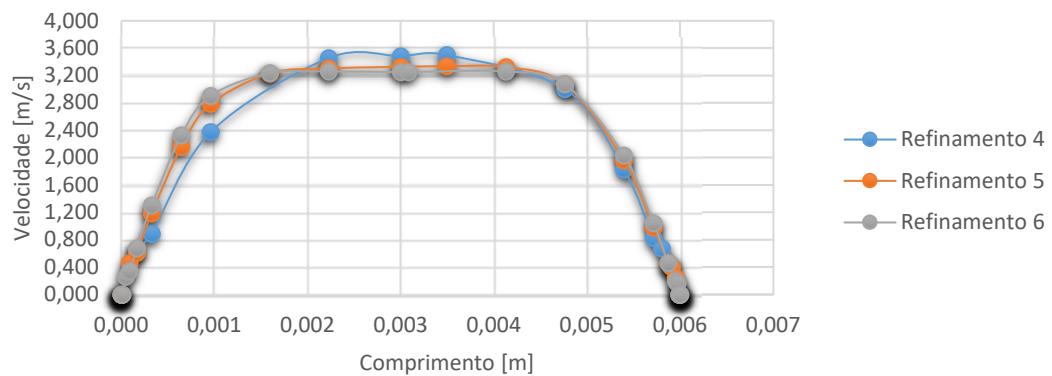
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B40 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 17, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



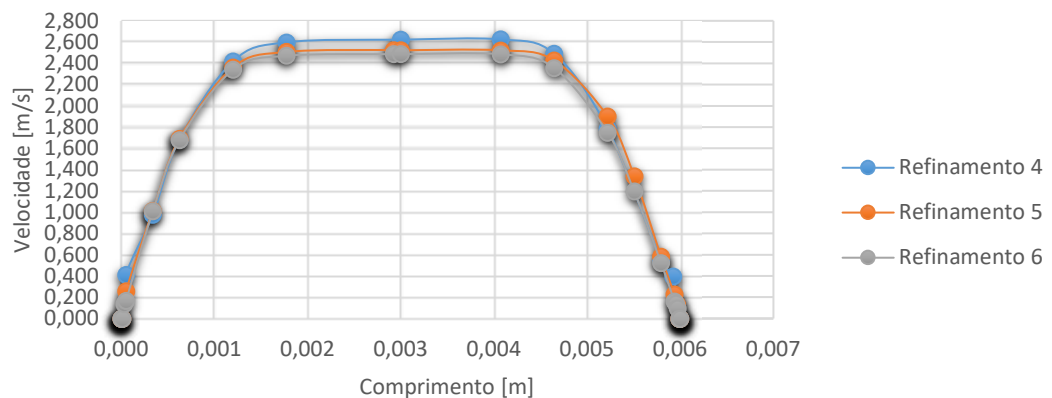
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B41 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 18, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



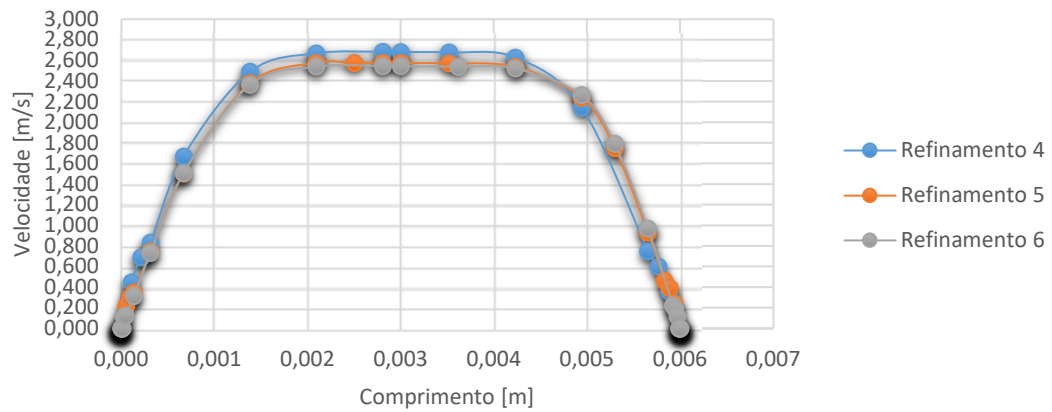
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B42 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 19, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



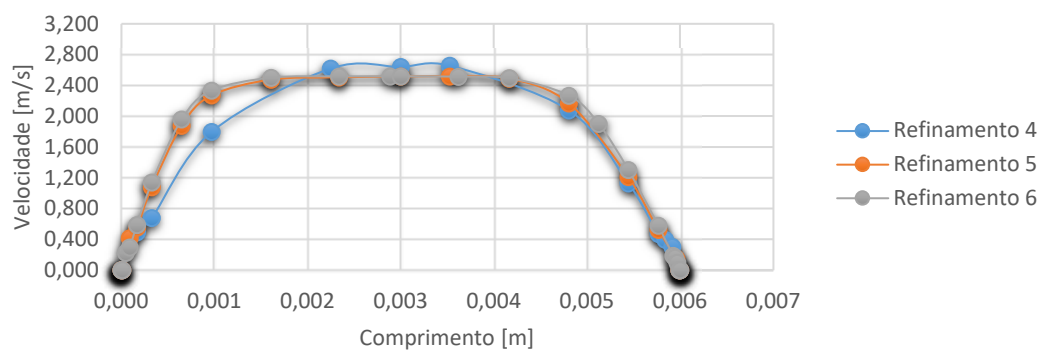
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B43 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 20, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



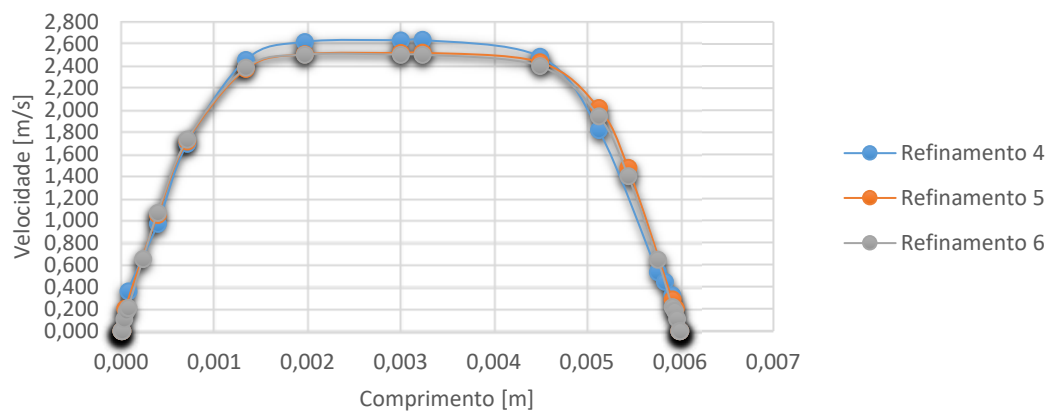
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B44 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 21, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



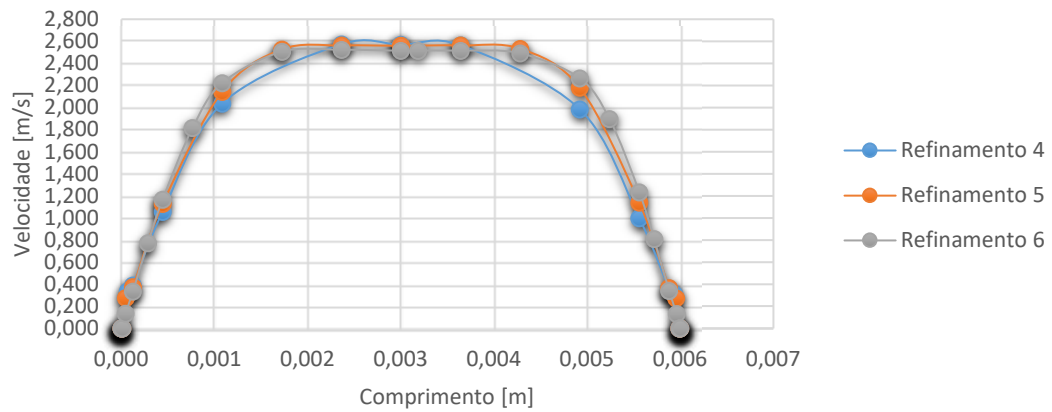
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B45 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 22, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



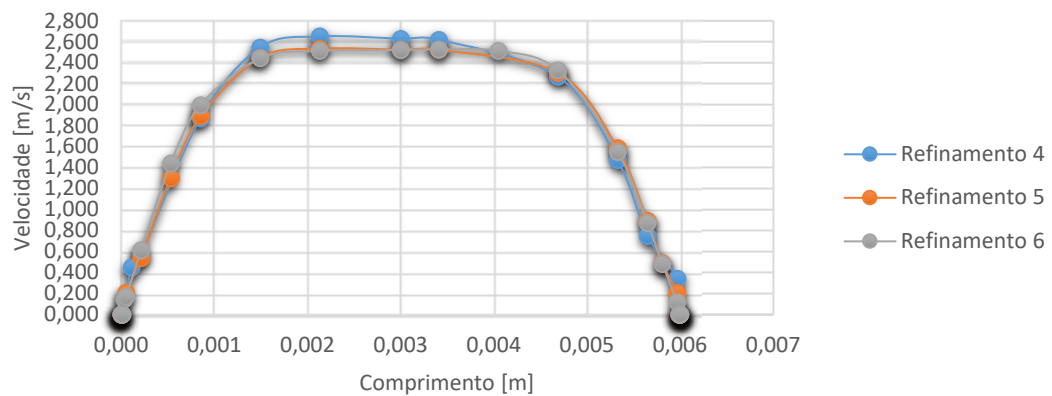
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B46 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 23, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



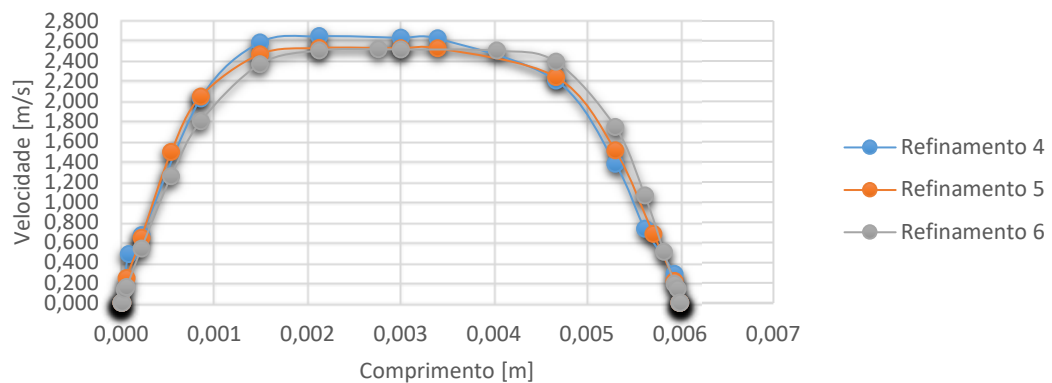
Fonte: O autor (2022).

Gráfico B47 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 24, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).

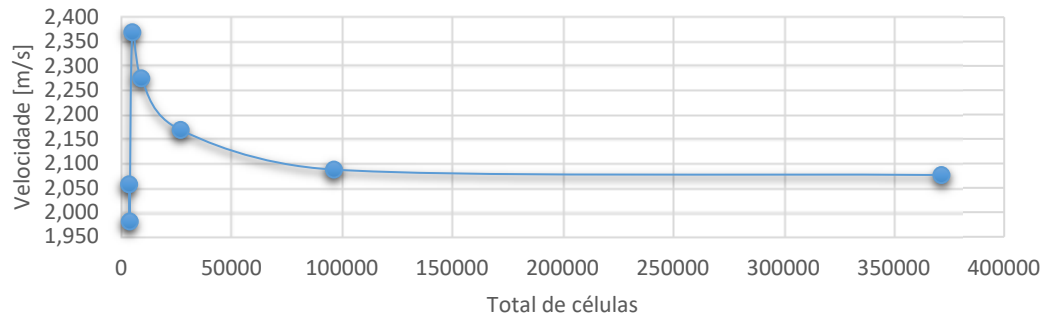
Gráfico B48 – Velocidade *versus* comprimento dos refinamentos 4, 5 e 6, no ensaio 25, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).

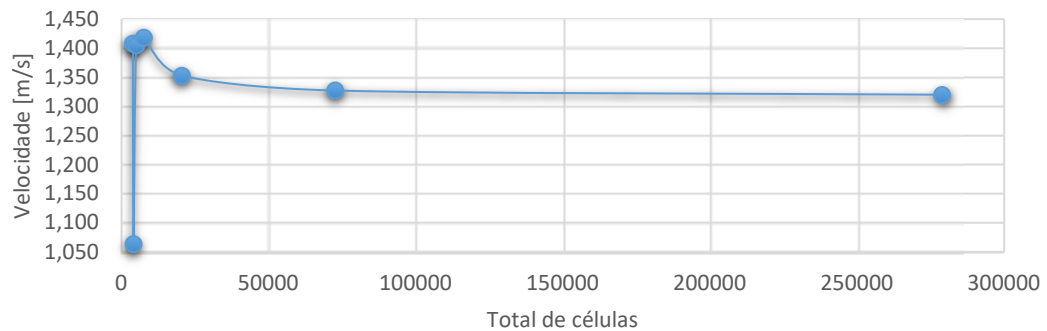
APÊNDICE C – VELOCIDADE MÁXIMA DE CADA REFINAMENTO *VERSUS* TOTAL DE CÉLULAS

Gráfico C1 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 2, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



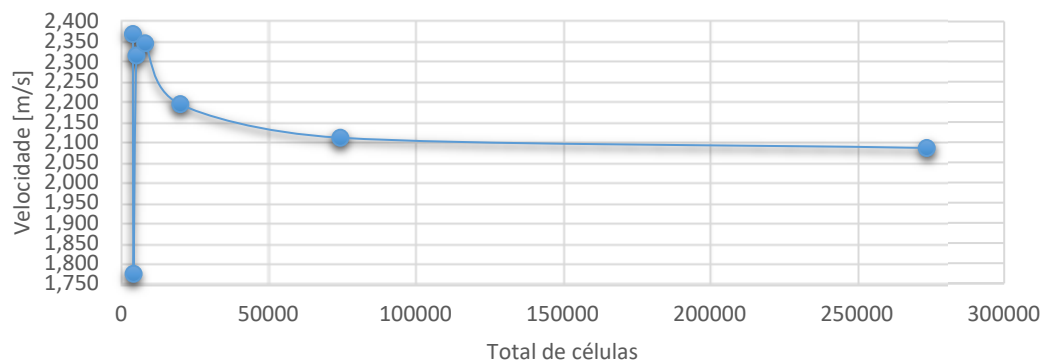
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C2 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 3, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



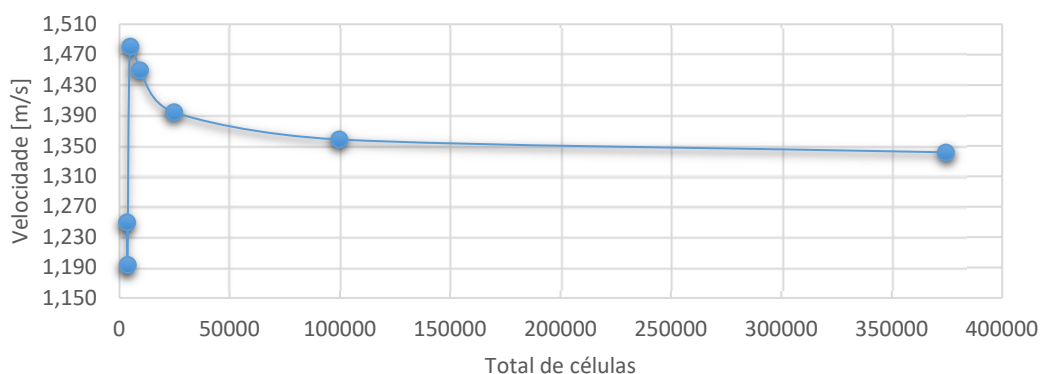
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C3 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 4, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



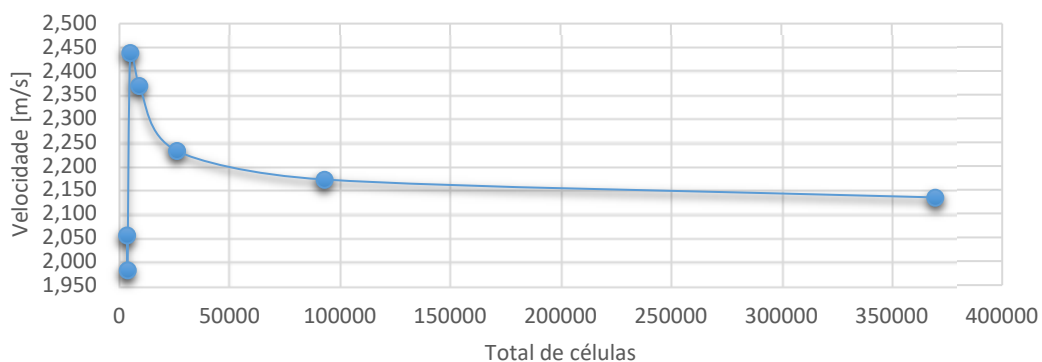
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C4 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 5, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



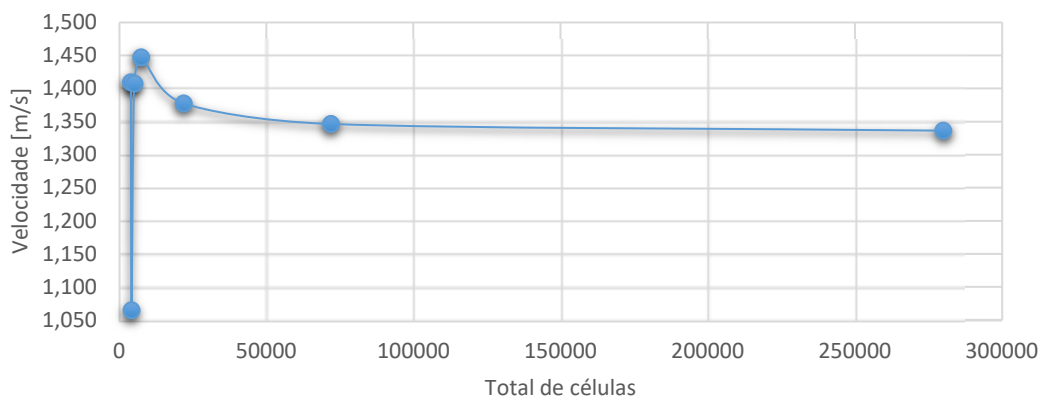
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C5 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 6, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



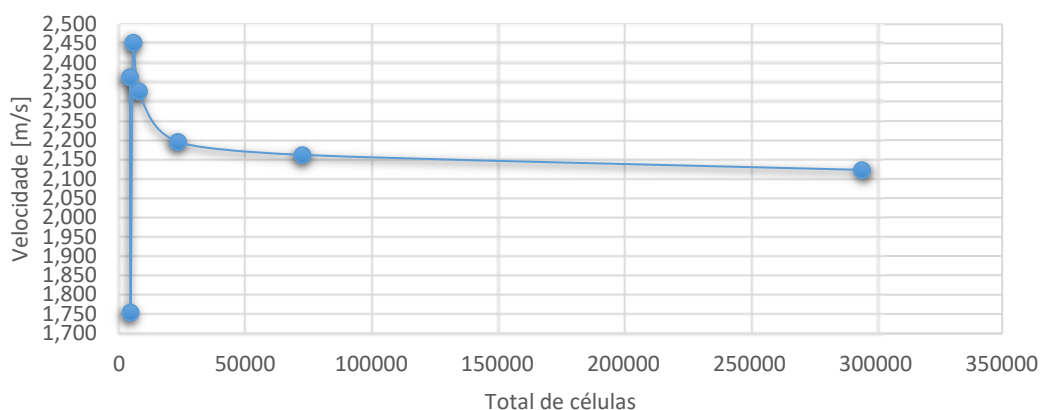
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C6 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 7, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



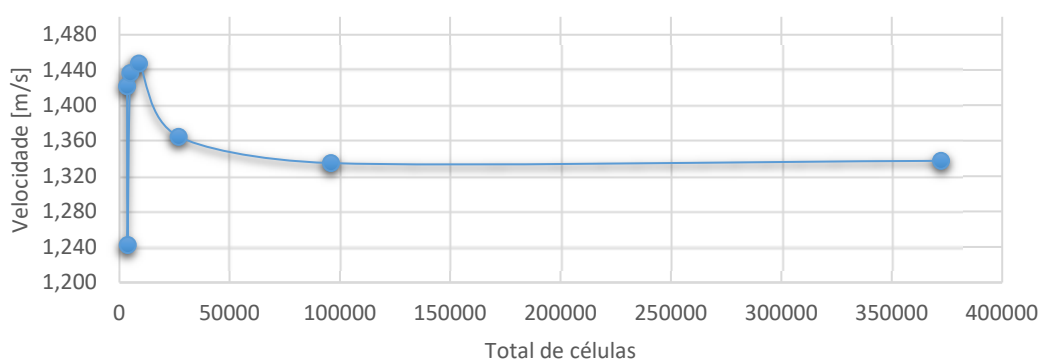
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C7 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 8, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



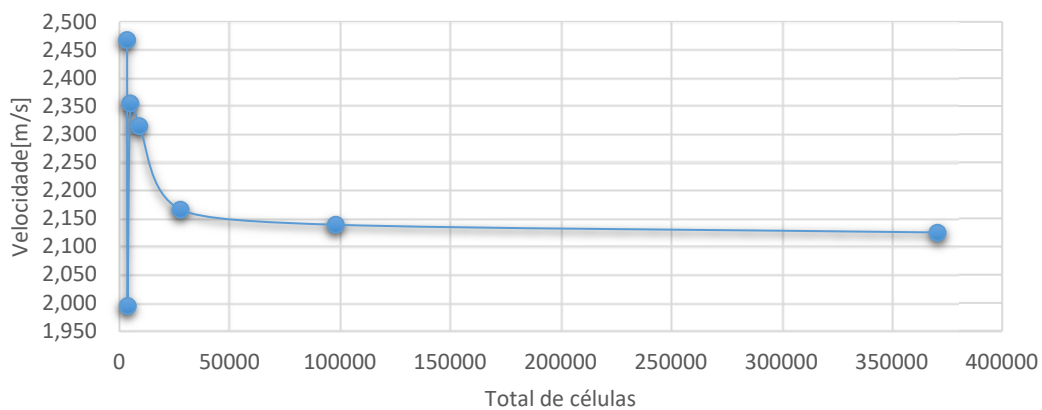
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C8 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 9, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



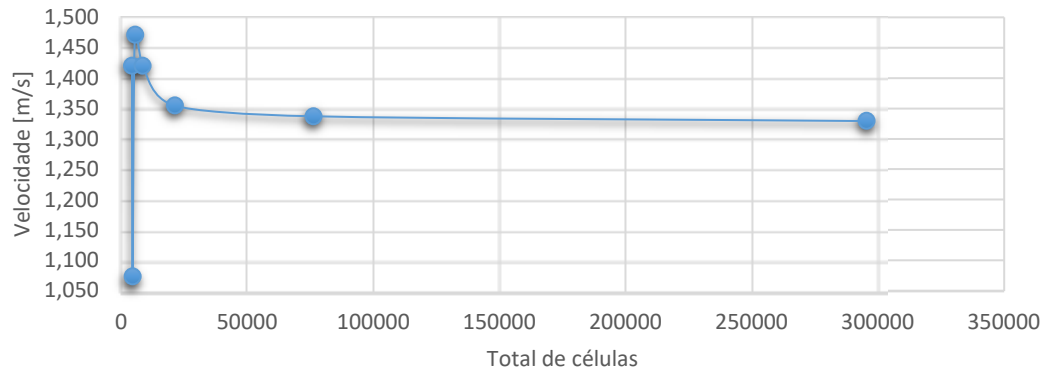
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C9 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 10, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



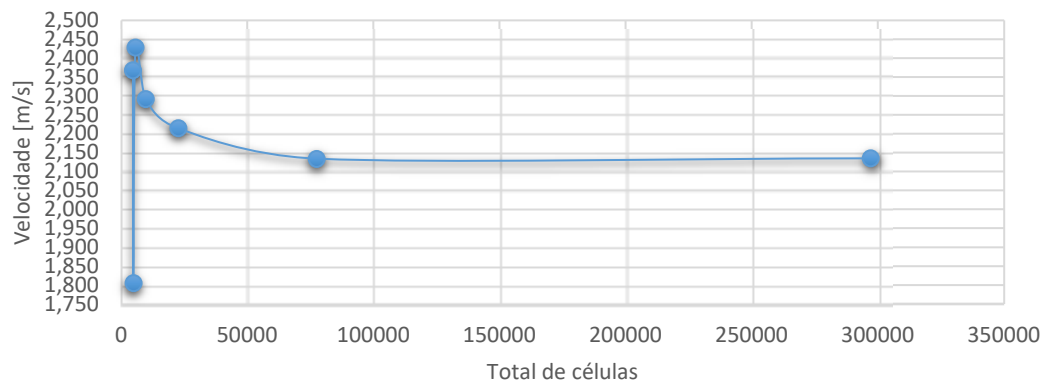
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C10 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 11, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



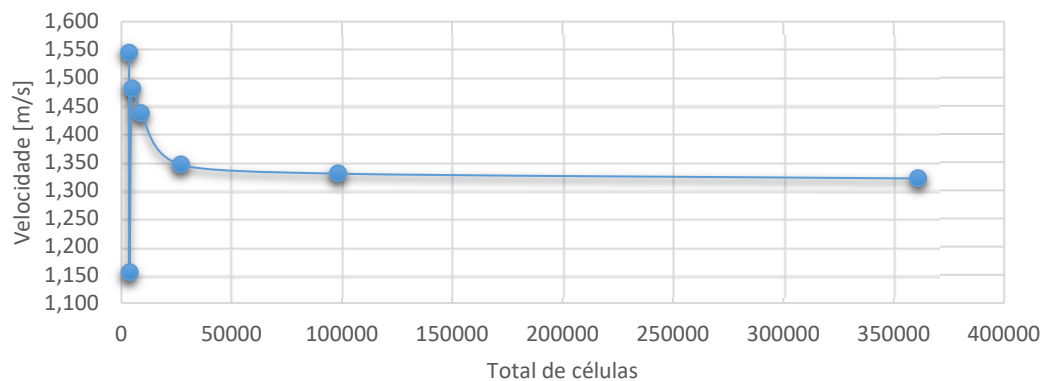
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C11 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 12, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



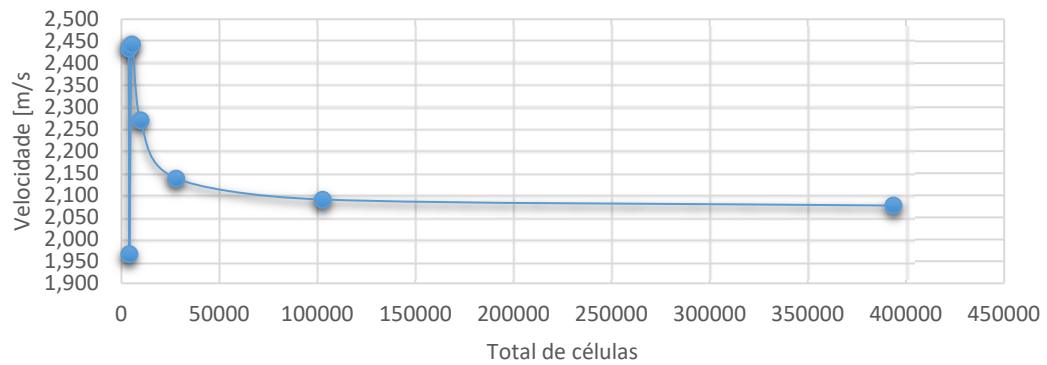
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C12 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 13, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



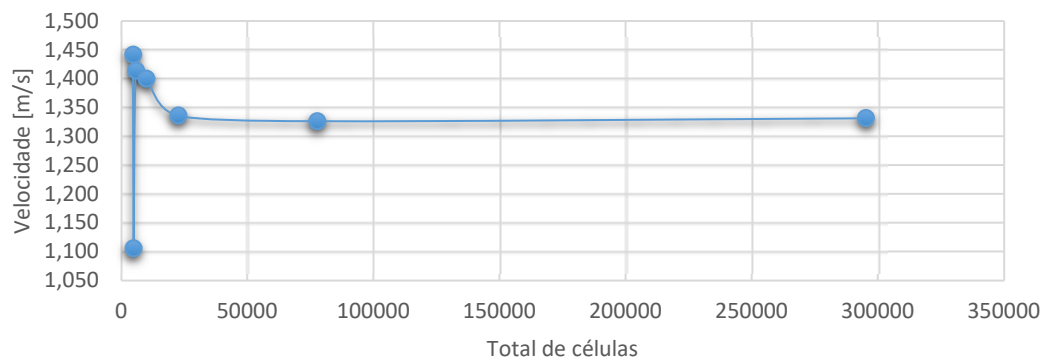
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C13 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 14, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



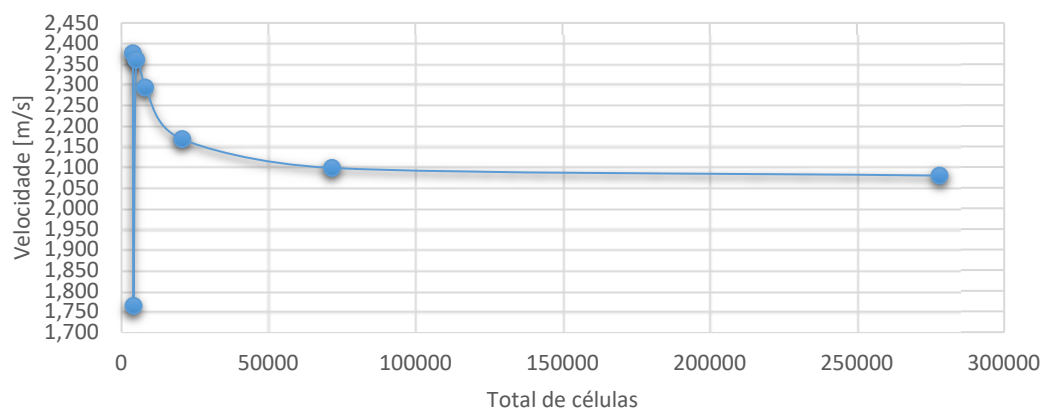
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C14 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 15, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



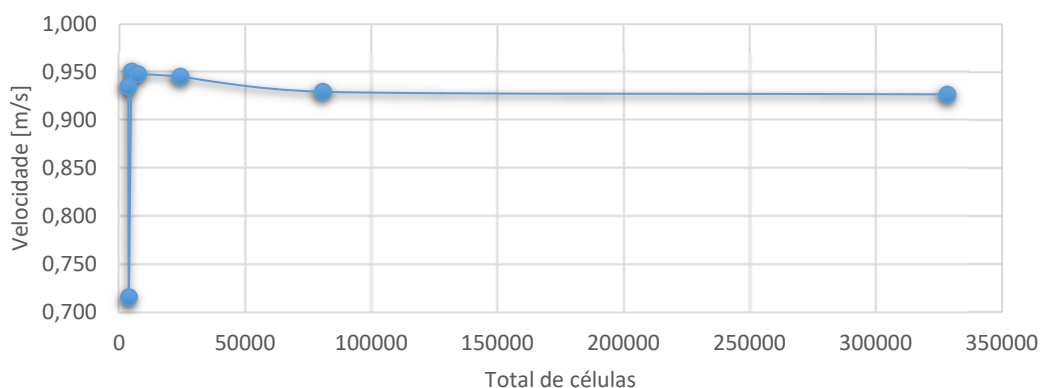
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C15 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 16, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



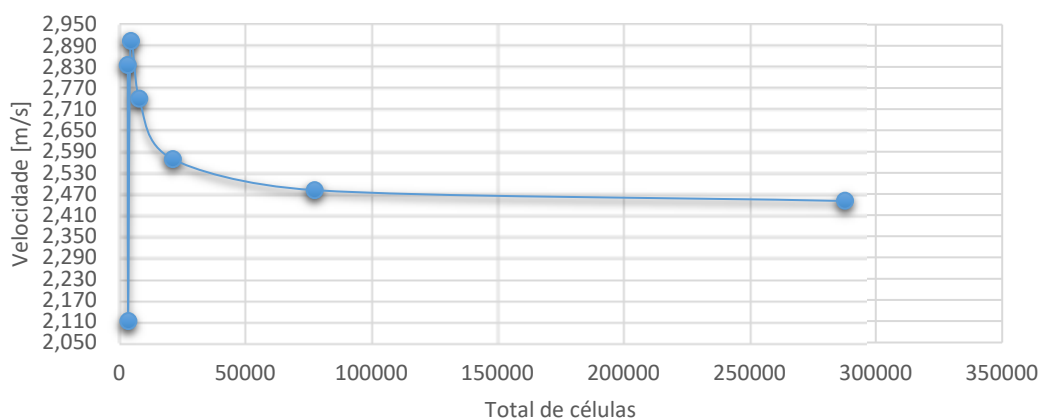
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C16 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 17, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



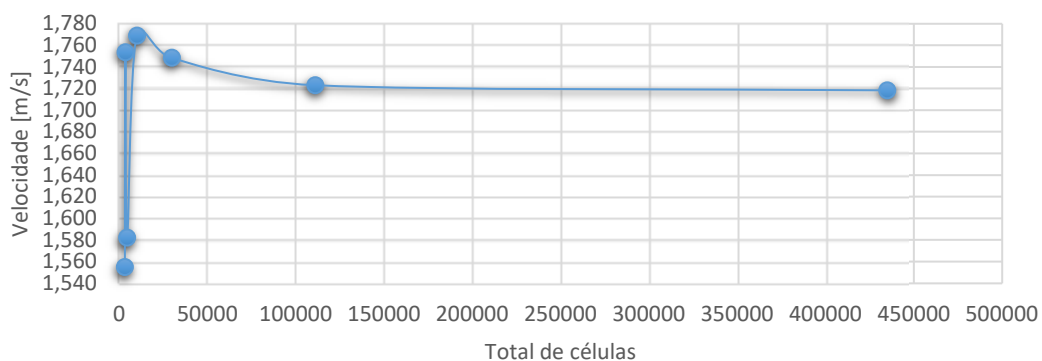
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C17 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 18, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



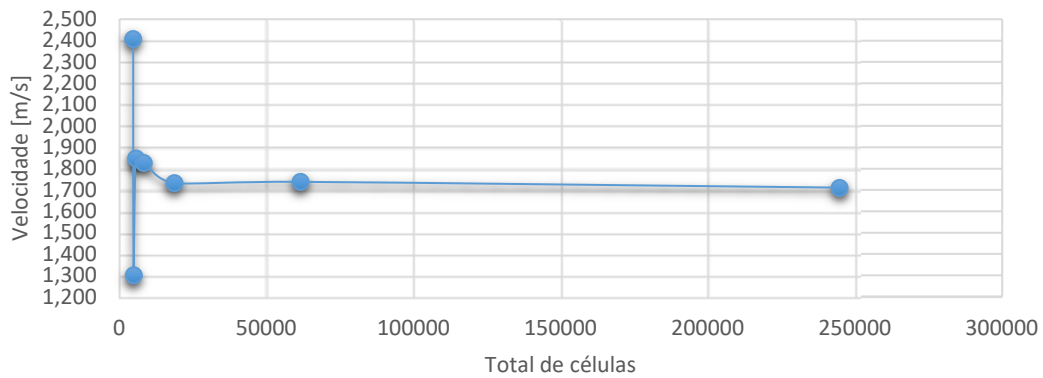
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C18 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 19, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



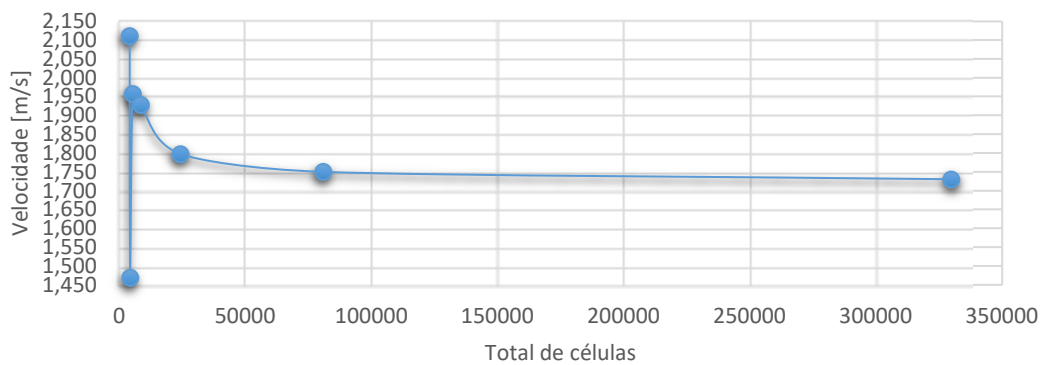
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C19 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 20, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



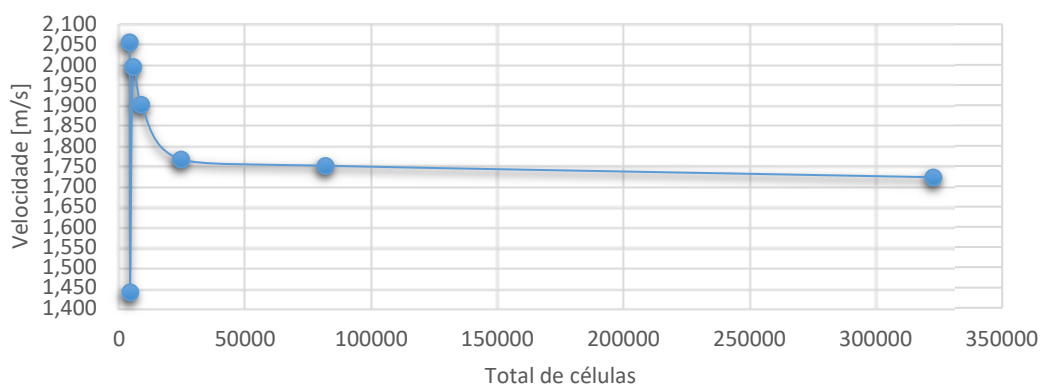
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C20 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 21, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



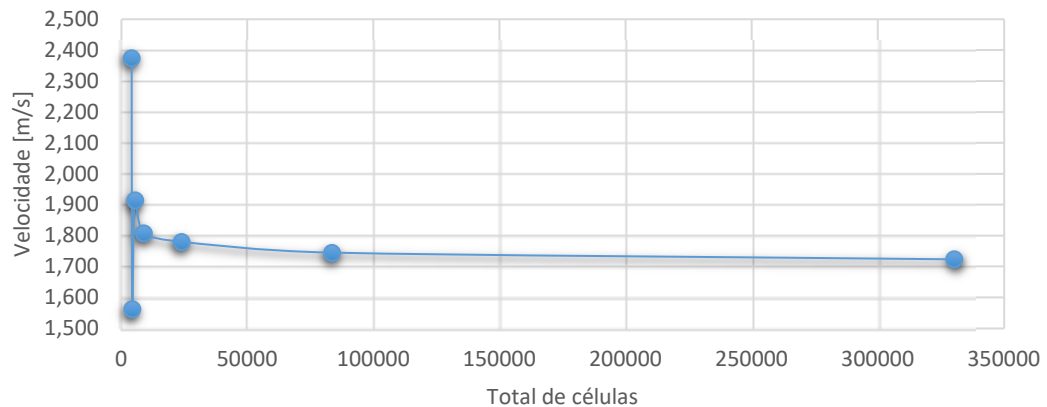
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C21 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 22, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



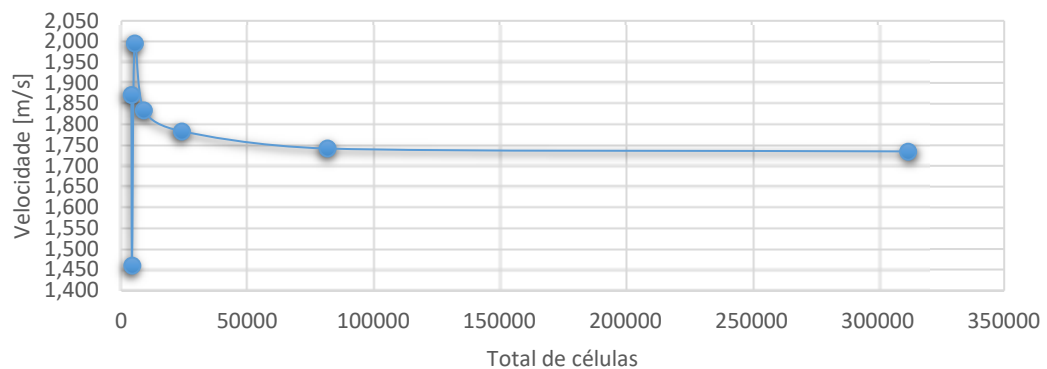
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C22 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 23, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



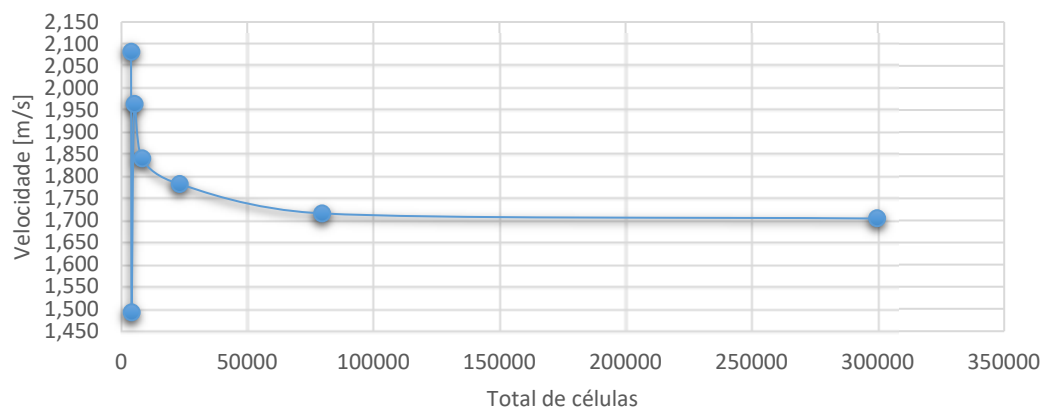
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C23 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 24, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



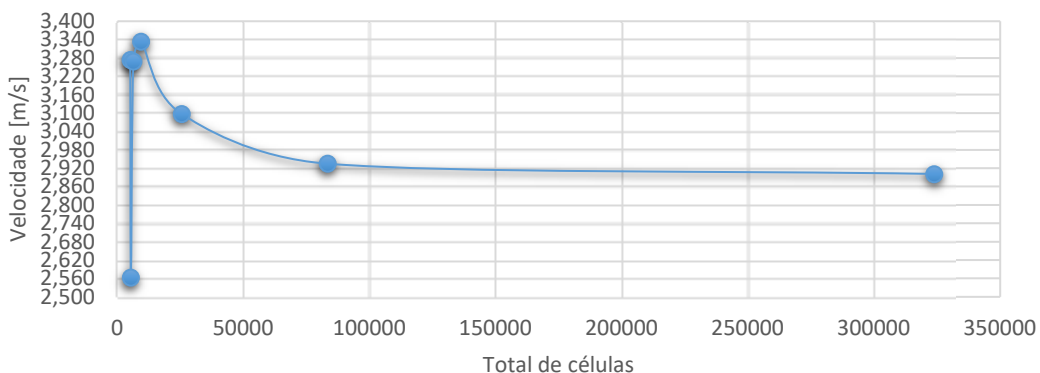
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C24 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 25, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



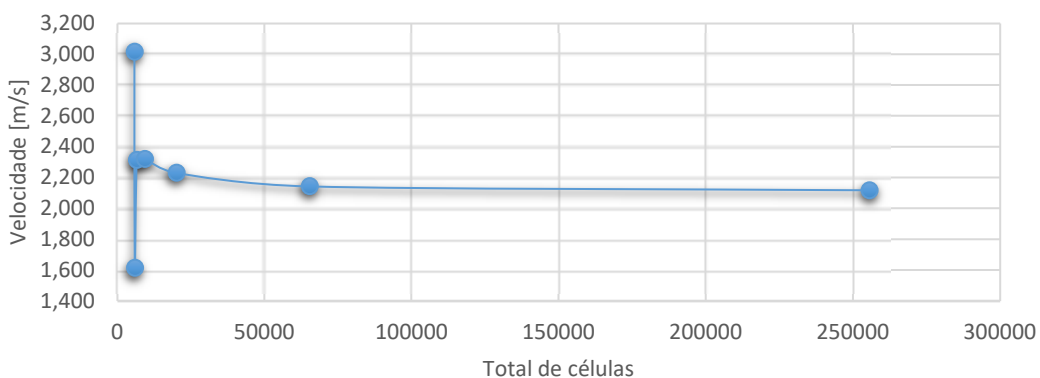
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C25 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 2, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



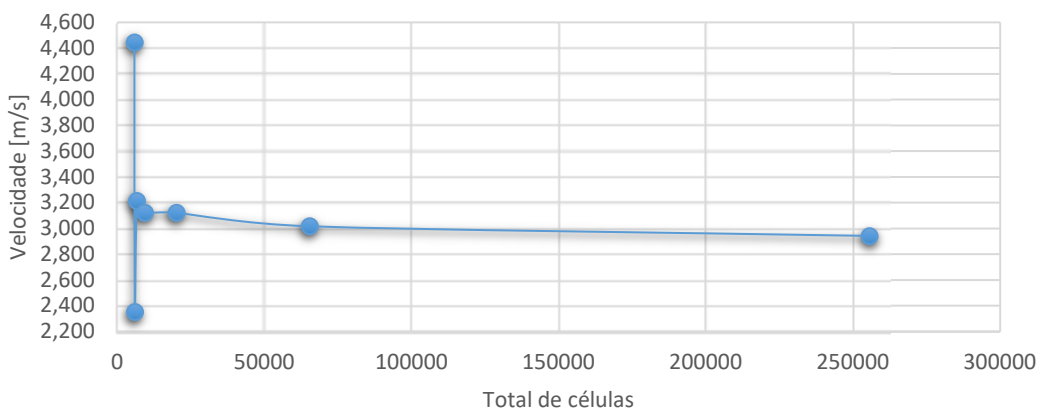
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C26 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 3, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



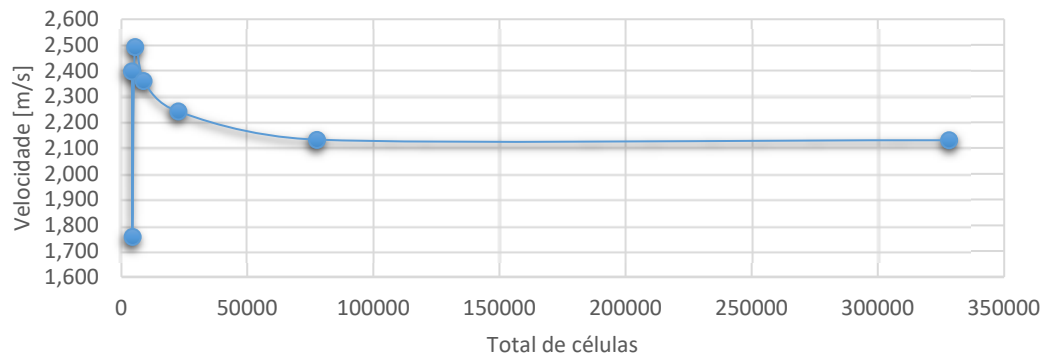
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C27 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 4, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



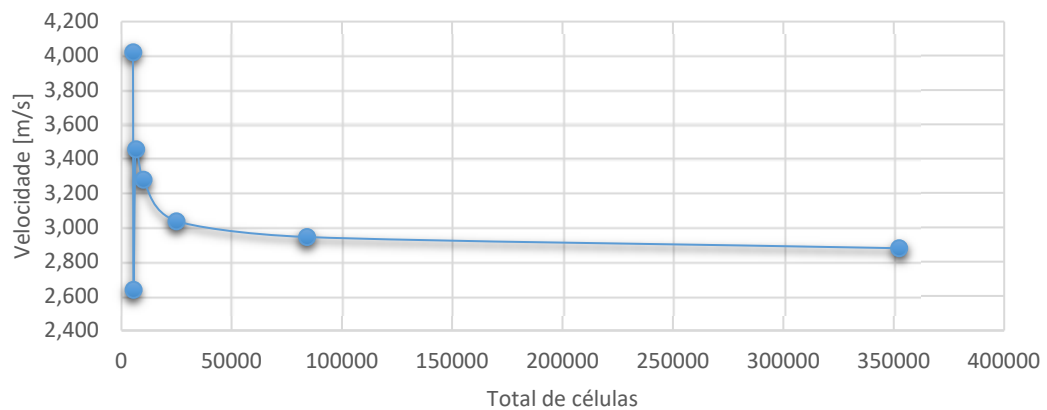
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C28 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 5, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



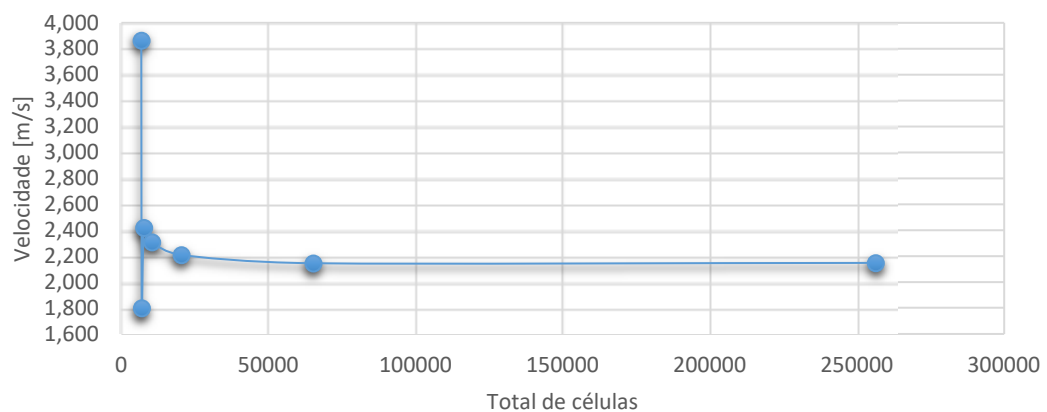
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C29 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 6, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



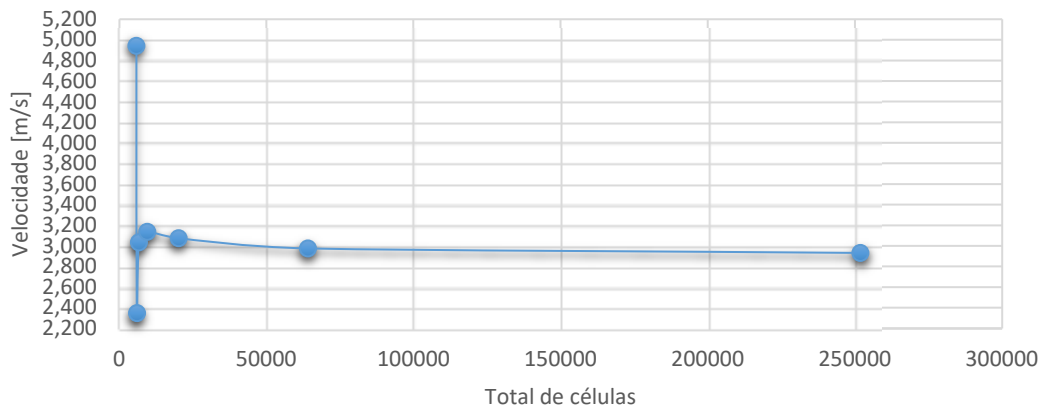
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C30 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 7, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



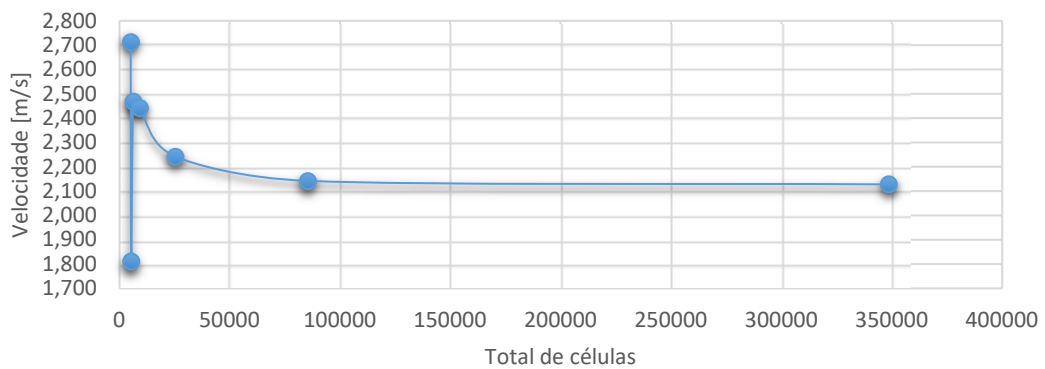
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C31 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 8, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



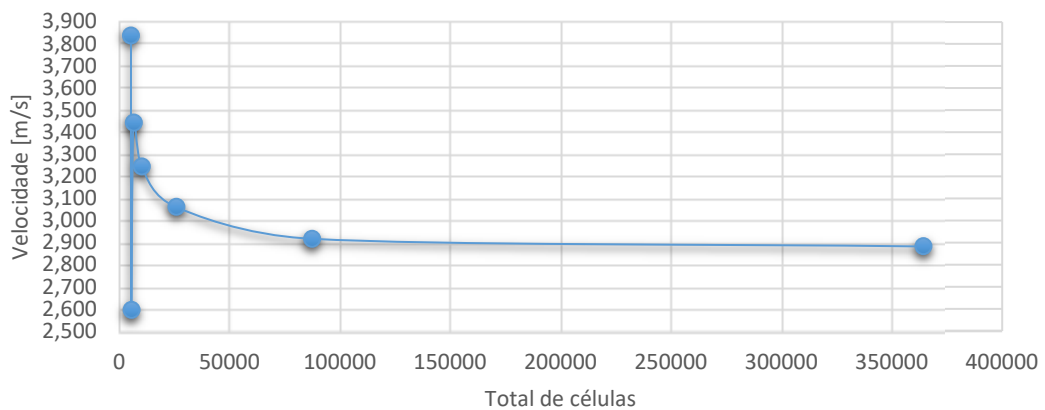
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C32 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 9, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



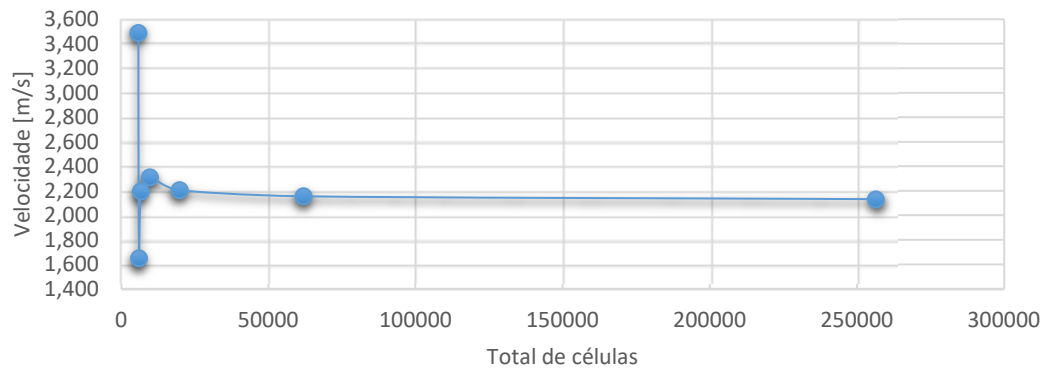
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C33 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 10, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



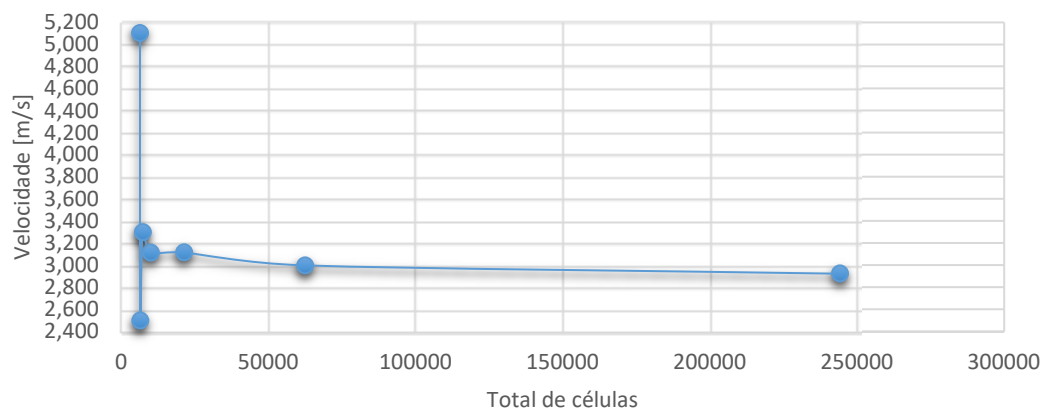
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C34 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 11, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



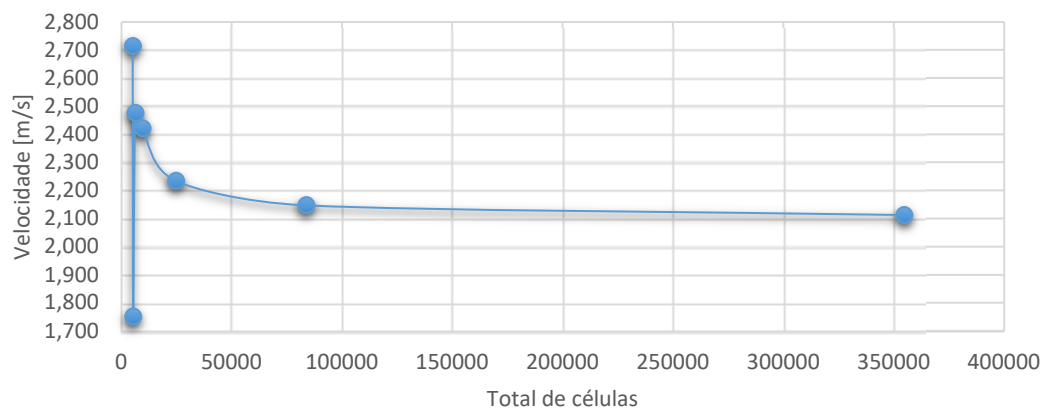
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C35 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 12, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



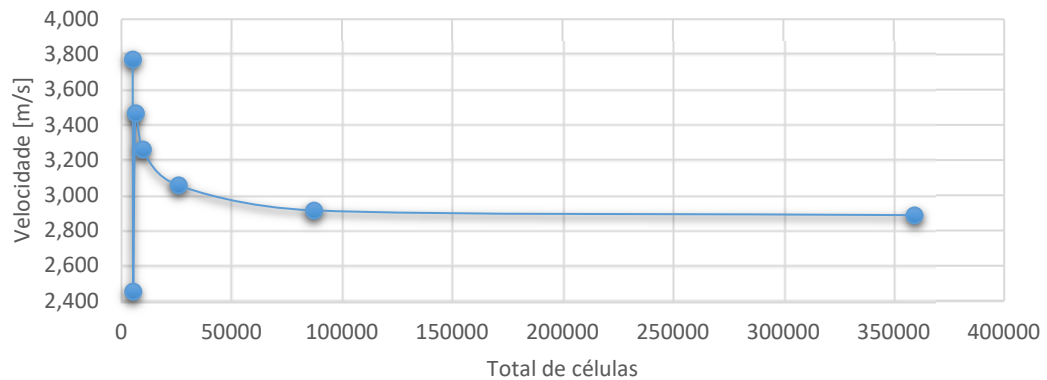
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C36 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 13, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



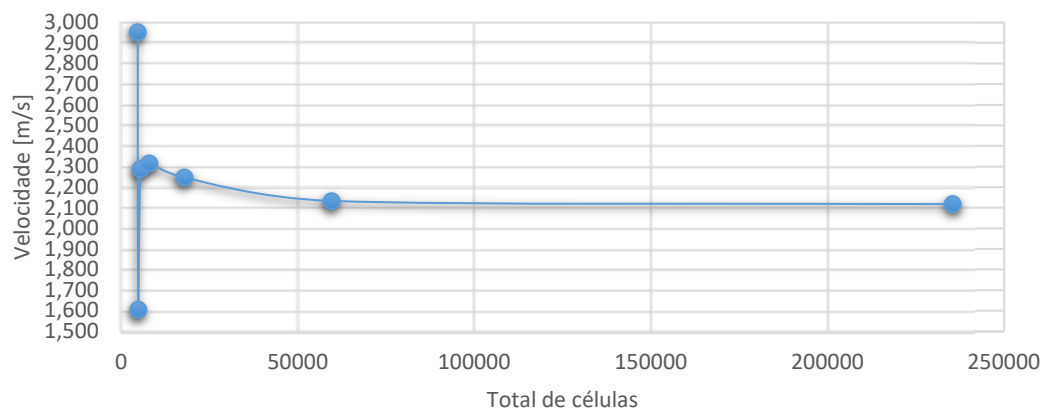
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C37 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 14, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



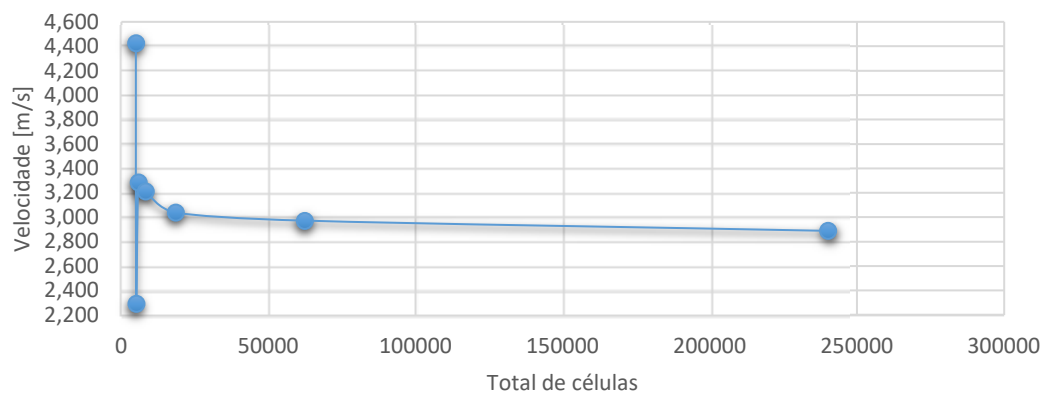
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C38 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 15, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



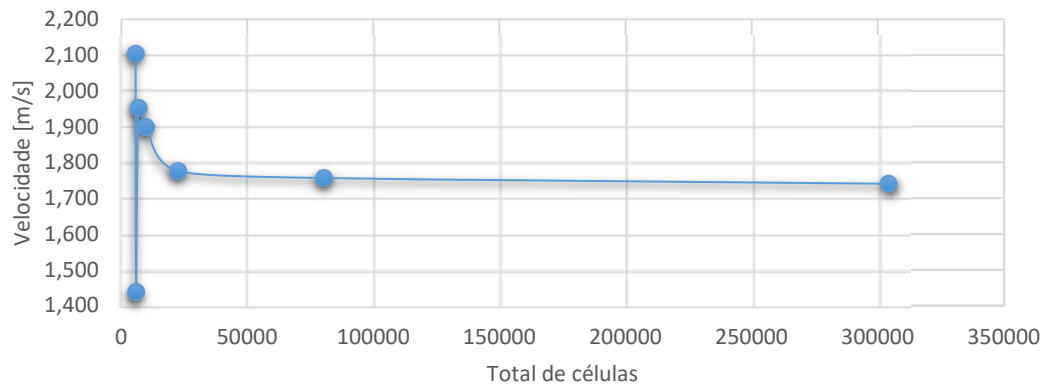
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C39 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 16, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



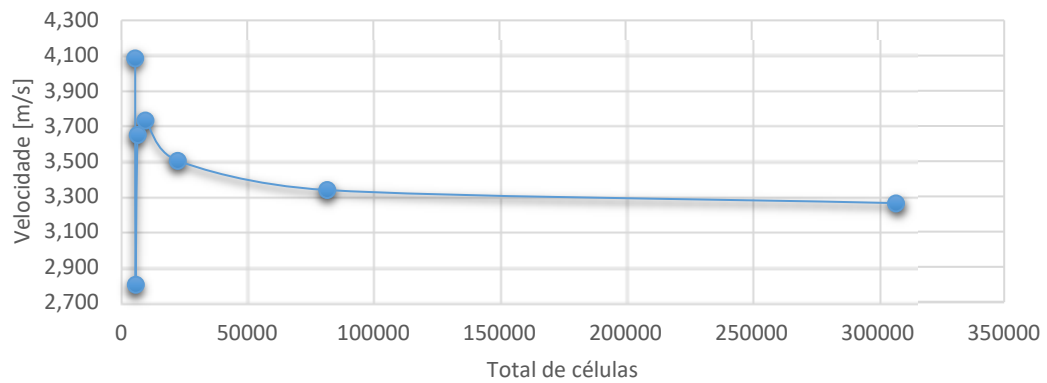
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C40 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 17, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



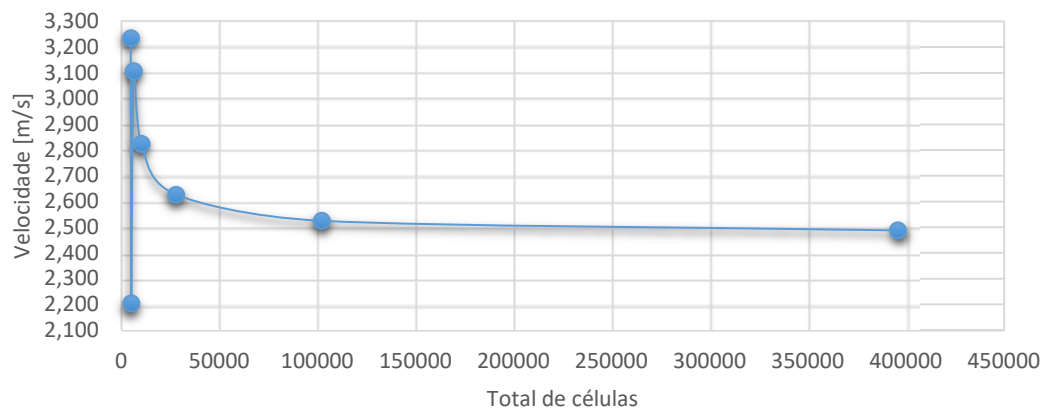
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C41 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 18, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



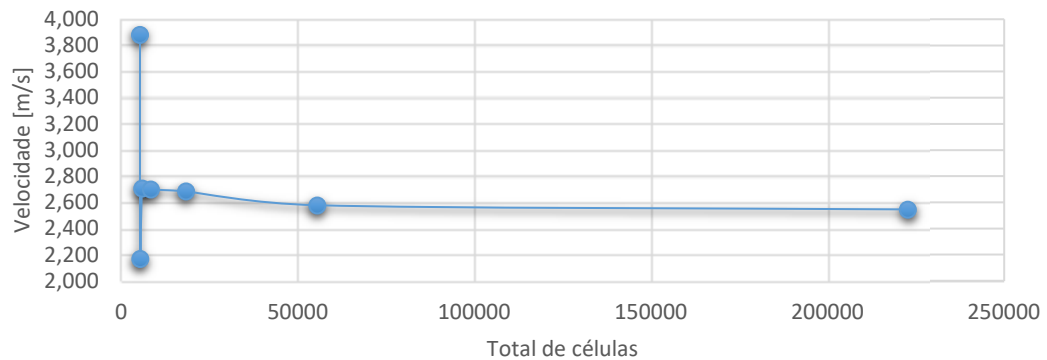
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C42 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 19, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



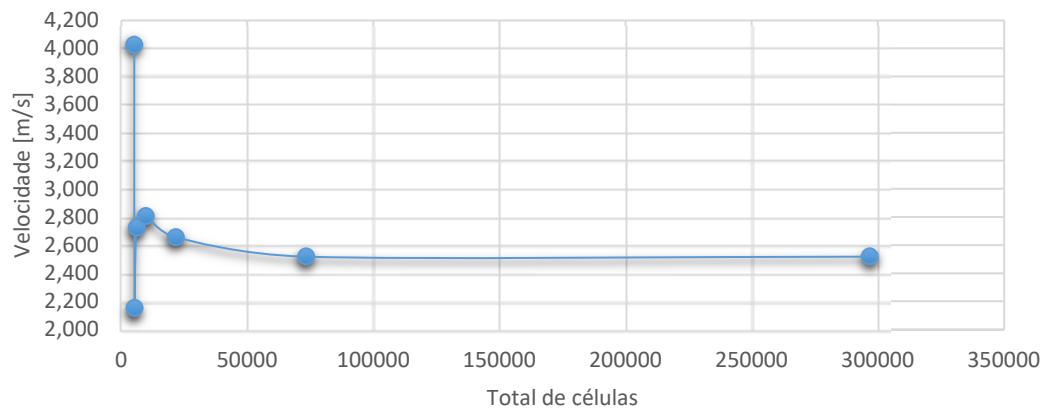
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C43 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 20, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



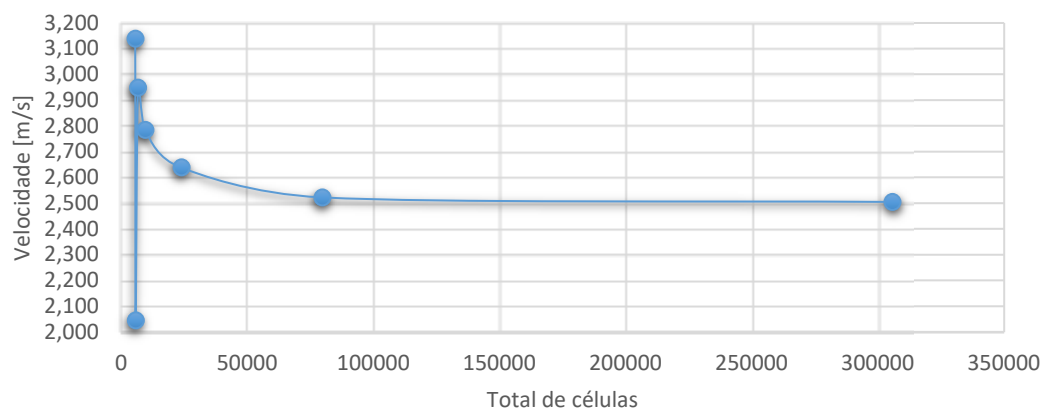
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C44 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 21, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



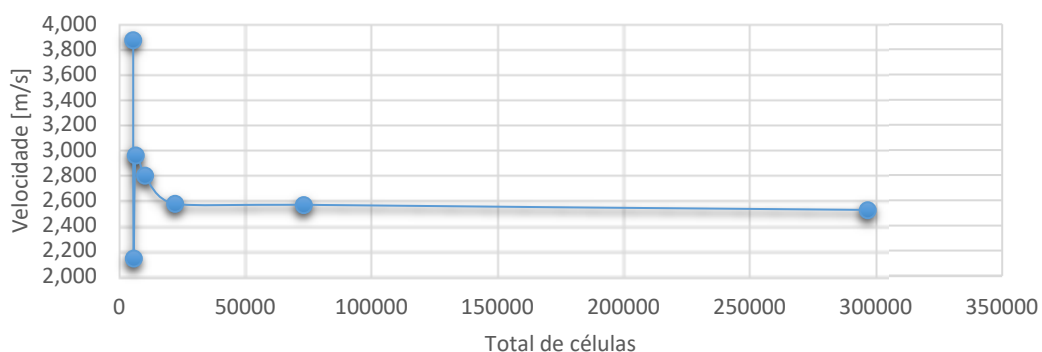
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C45 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 22, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



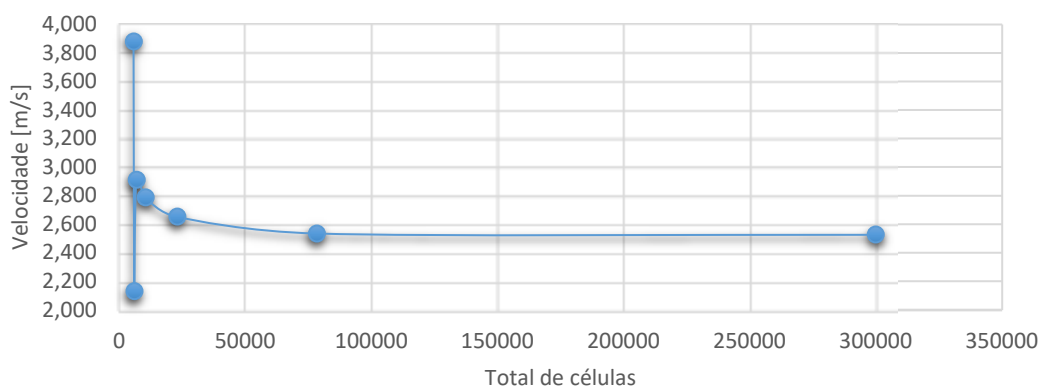
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C46 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 23, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



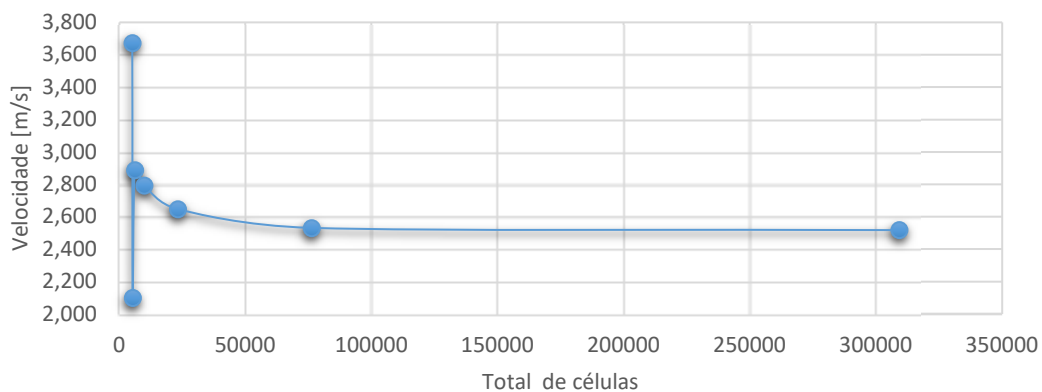
Fonte: O autor (2022).

Gráfico C47 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 24, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).

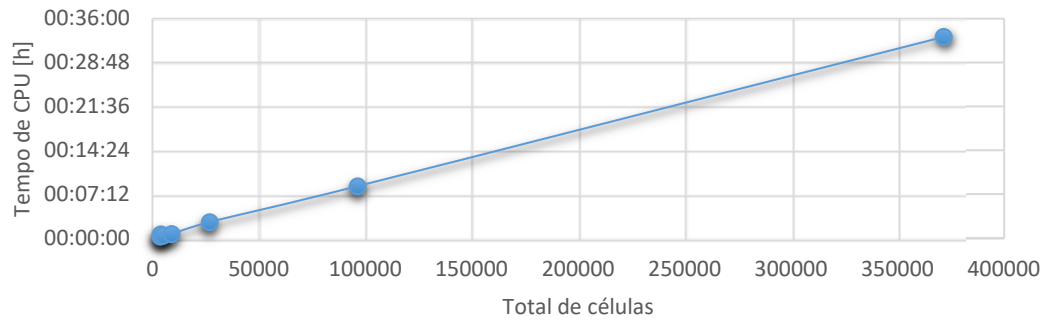
Gráfico C48 – Velocidade máxima de cada refinamento *versus* total de células do ensaio 25, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).

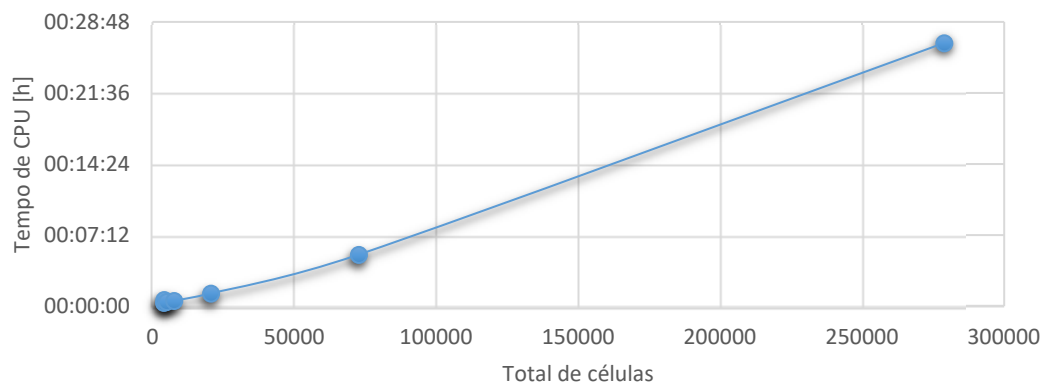
APÊNDICE D – TEMPO COMPUTACIONAL *VERSUS* TOTAL DE CÉLULAS

Gráfico D1 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 2, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



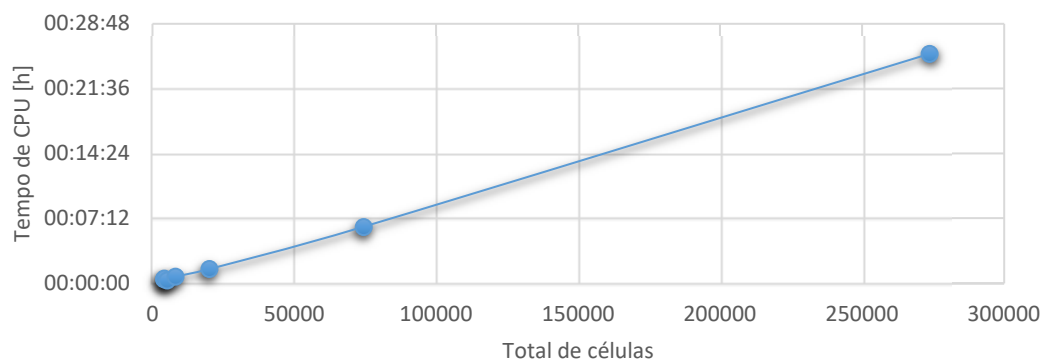
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D2 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 3, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



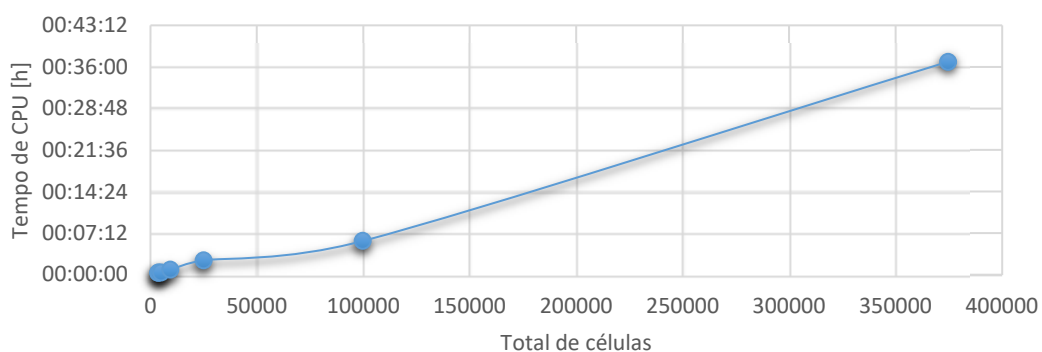
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D3 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 4, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



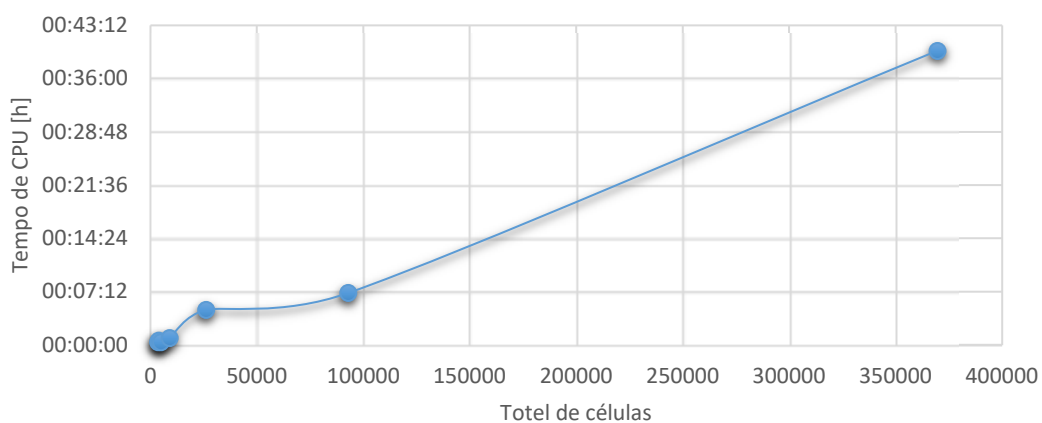
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D4 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 5, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



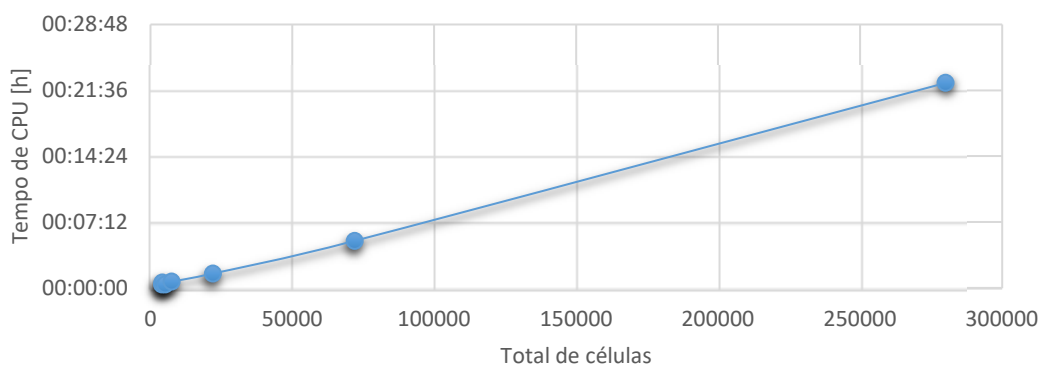
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D5 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 6, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



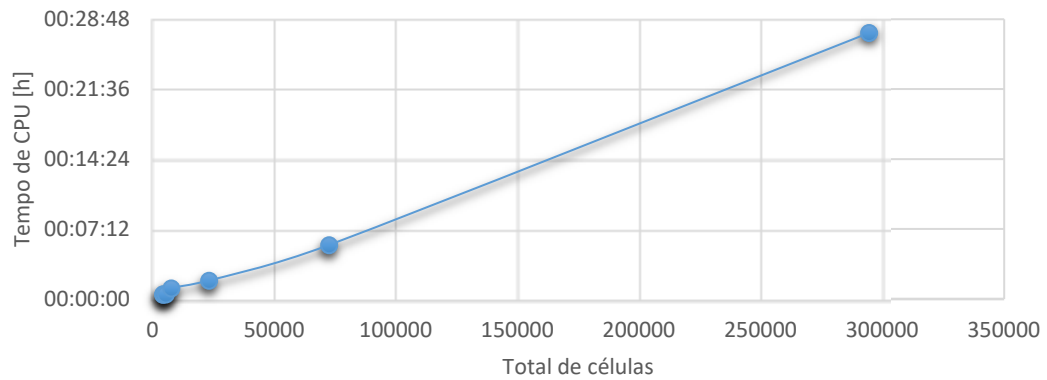
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D6 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 7, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



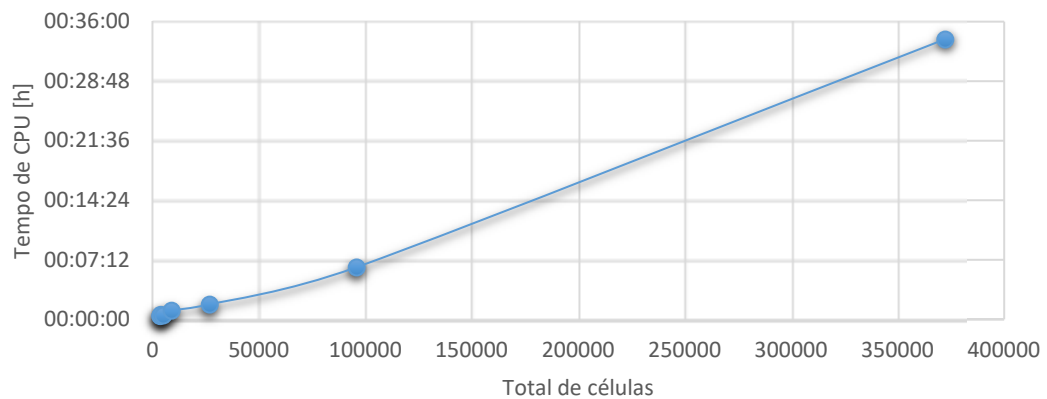
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D7 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 8, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



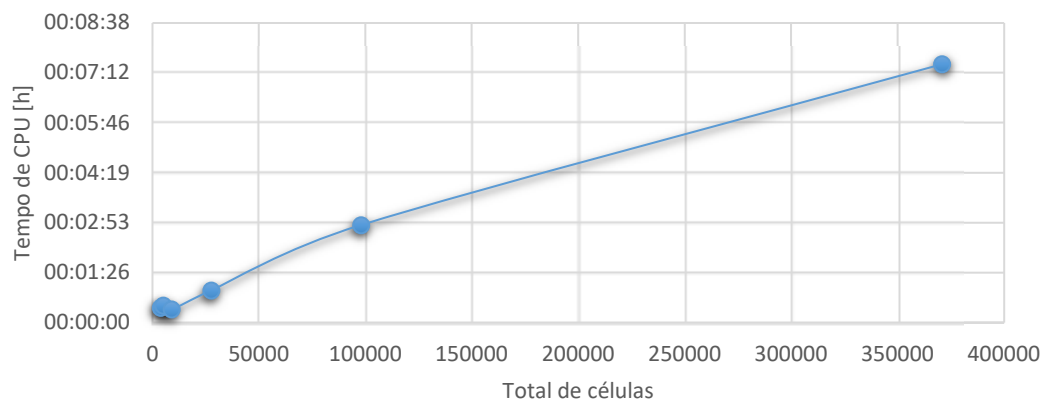
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D8 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 9, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



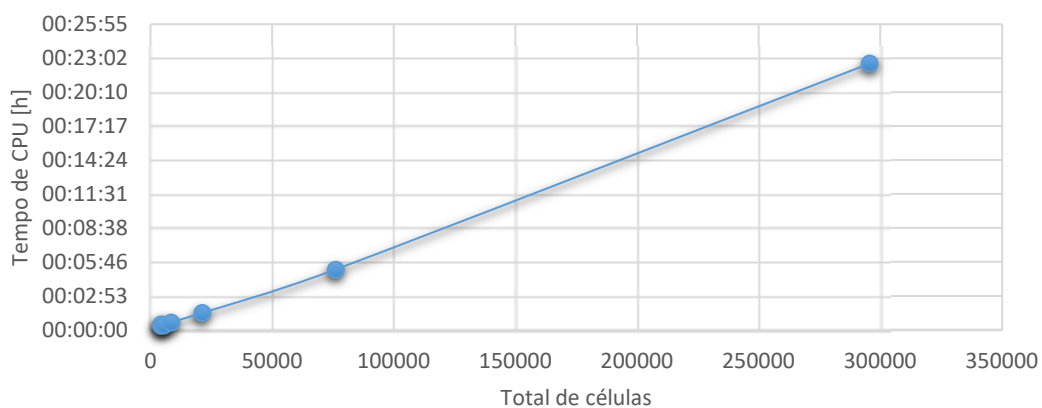
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D9 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 10, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



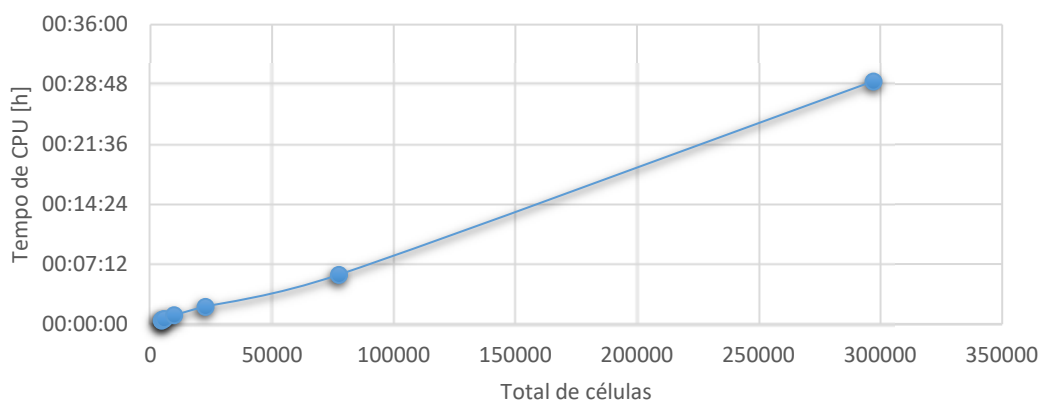
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D10 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 11, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



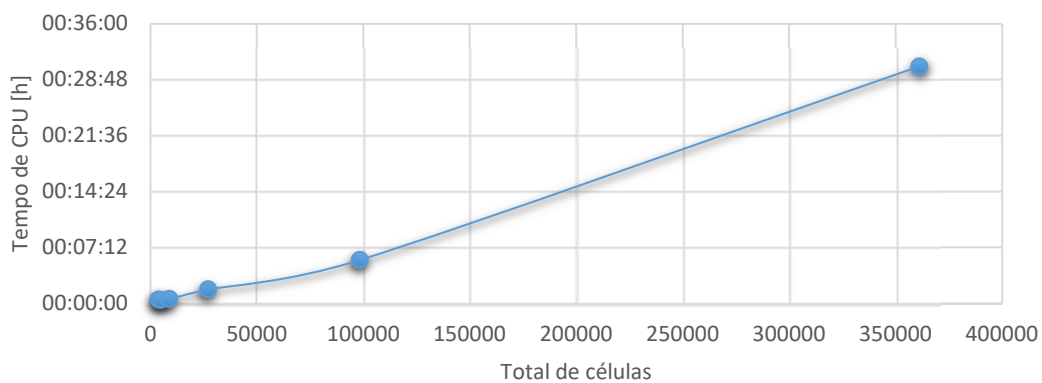
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D11 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 12, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



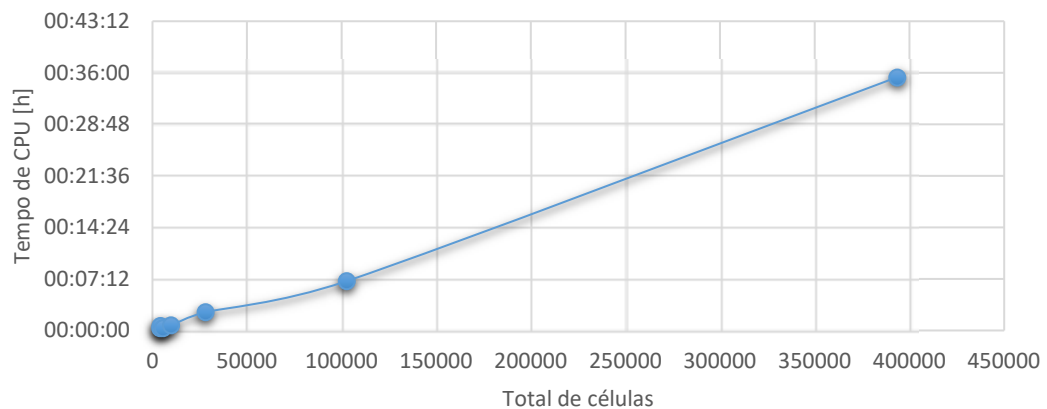
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D12 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 13, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



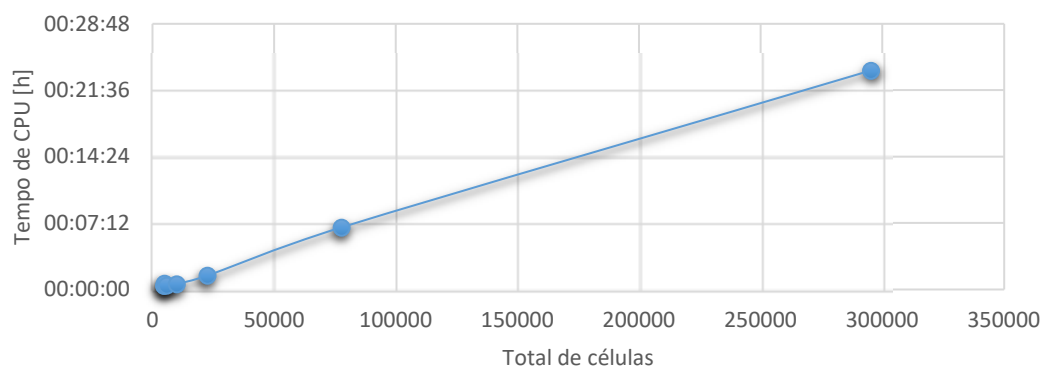
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D13 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 14, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



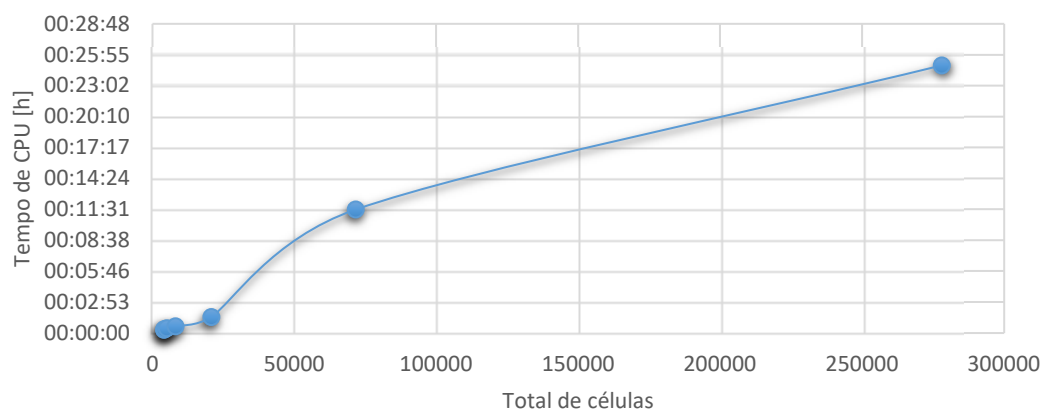
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D14 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 15, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



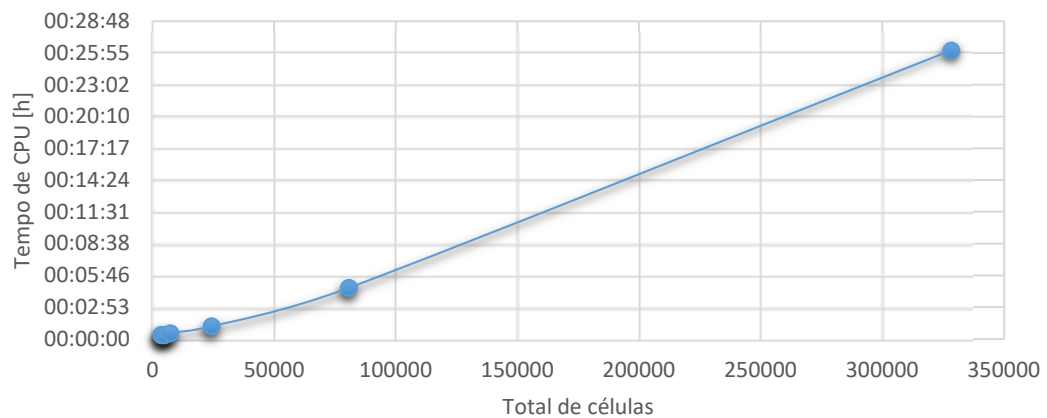
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D15 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 16, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



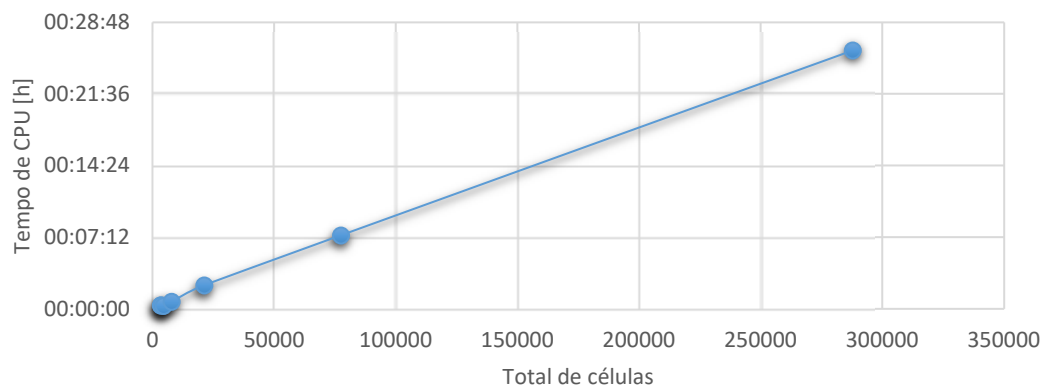
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D16 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 17, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



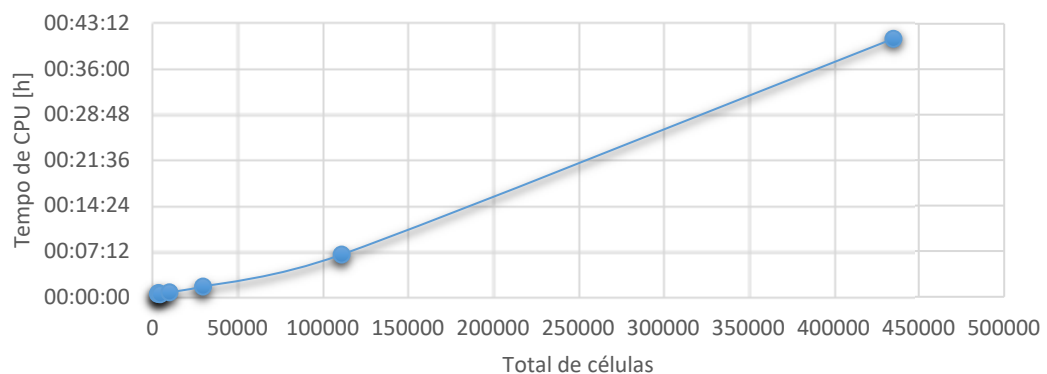
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D17 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 18, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



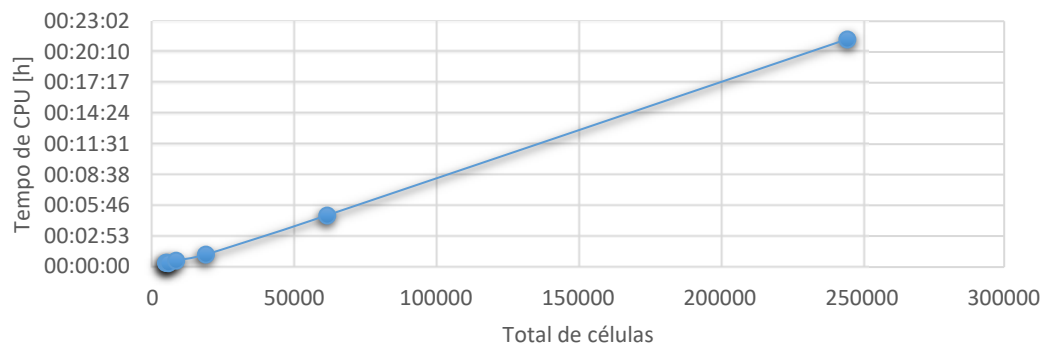
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D18 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 19, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



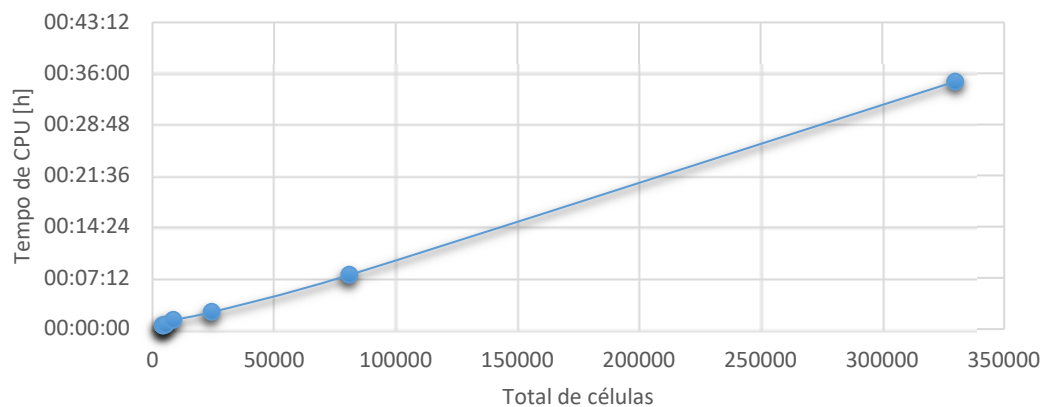
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D19 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 20, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



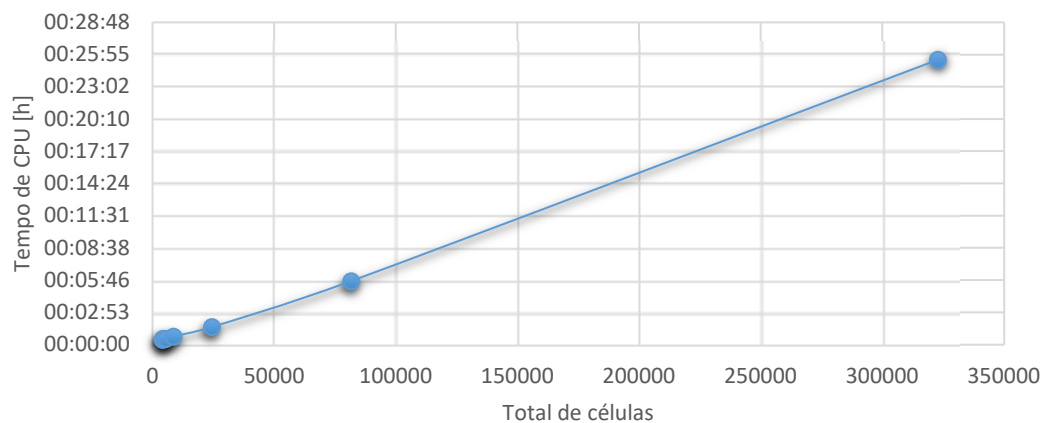
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D20 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 21, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



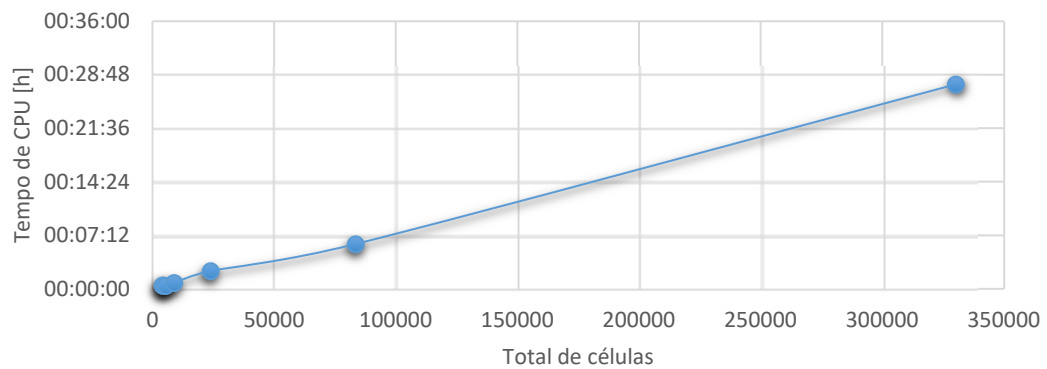
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D21 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 22, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



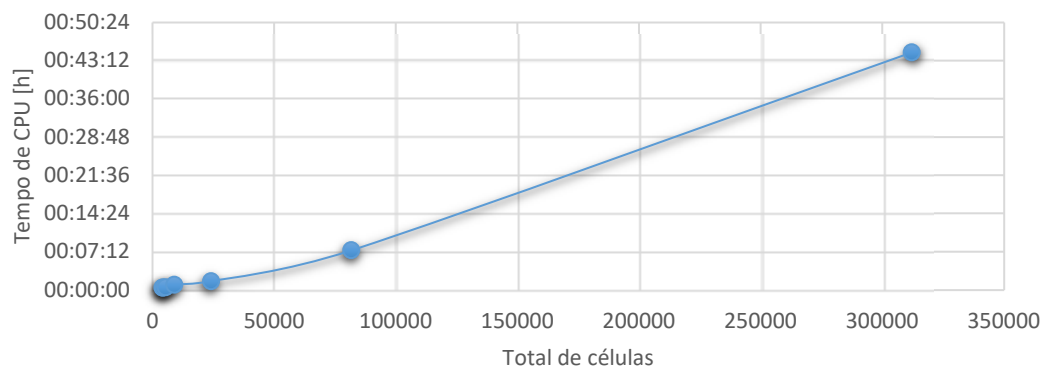
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D22 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 23, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



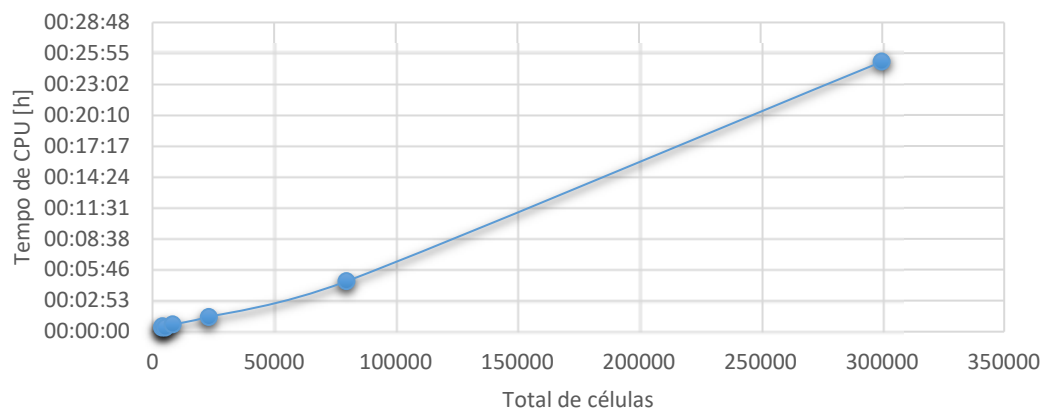
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D23 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 24, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



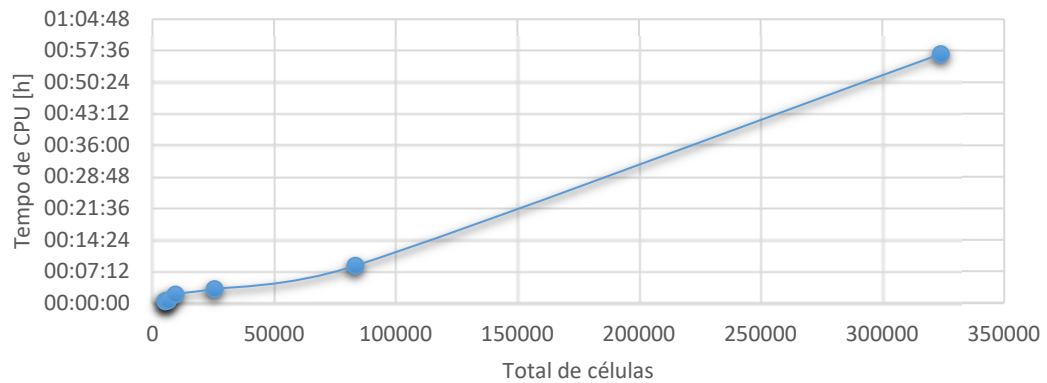
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D24 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 25, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



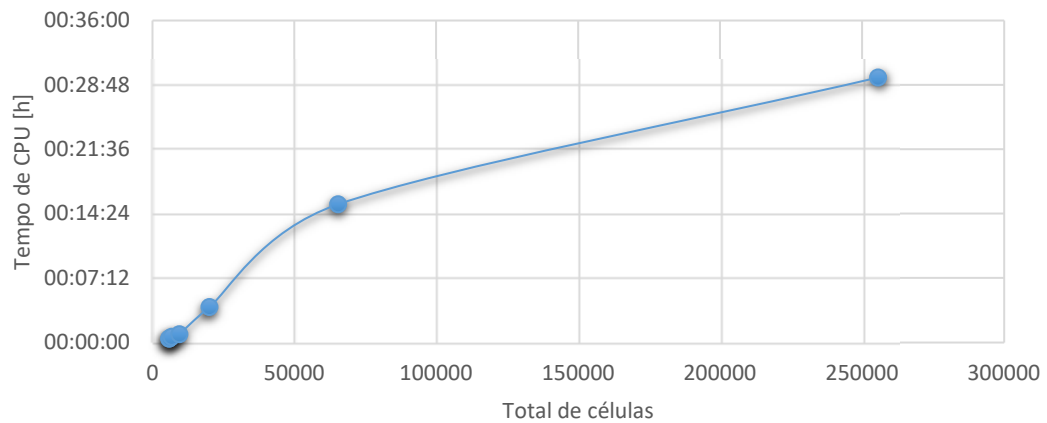
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D25 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 2, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



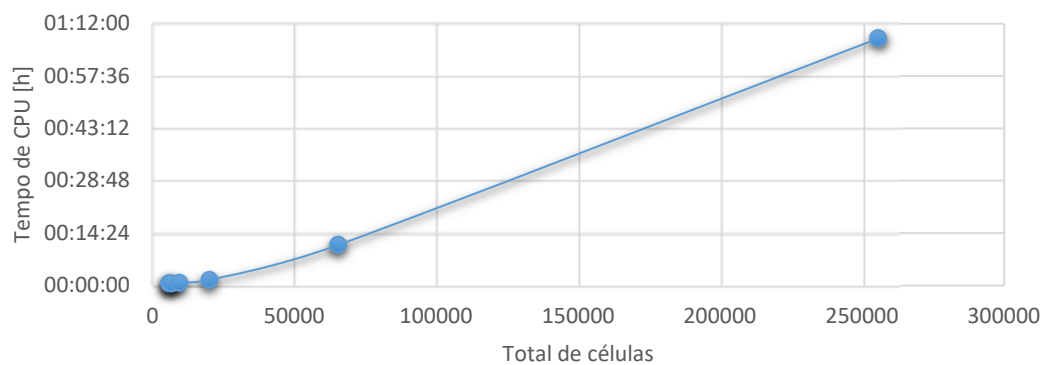
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D26 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 3, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



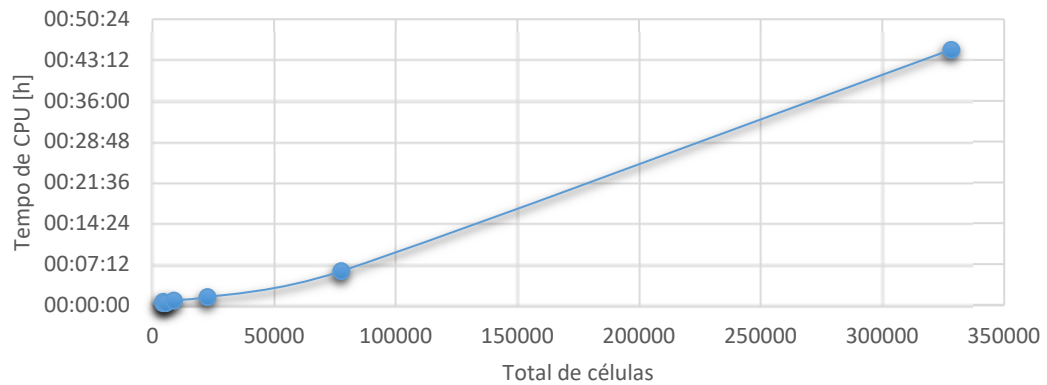
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D27 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 4, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



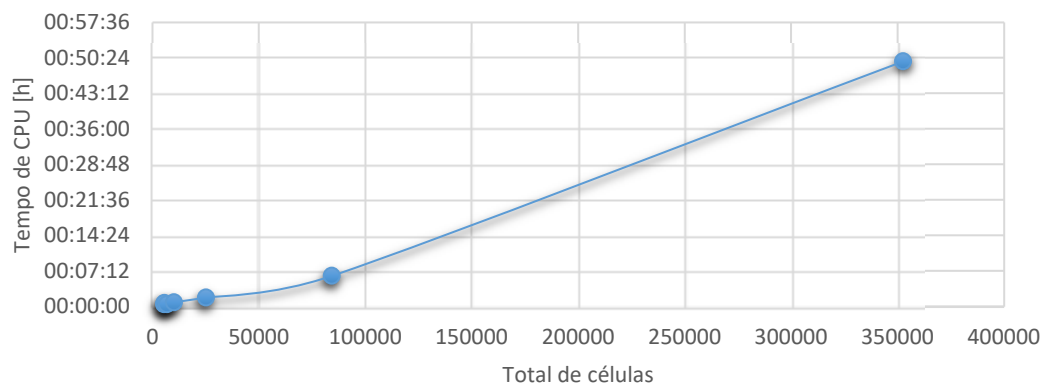
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D28 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 5, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



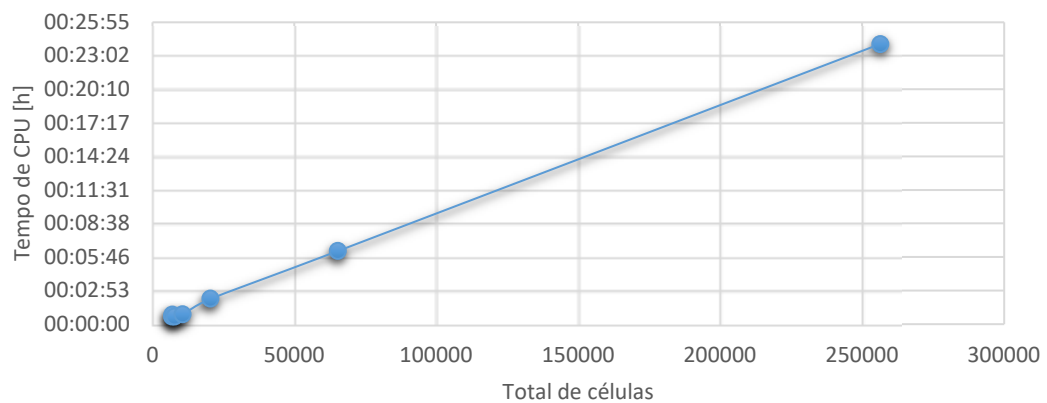
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D29 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 6, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



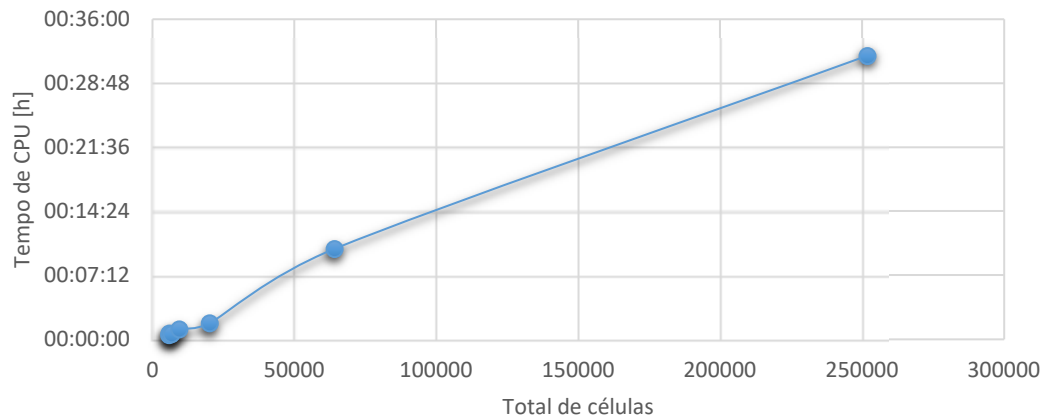
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D30 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 7, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



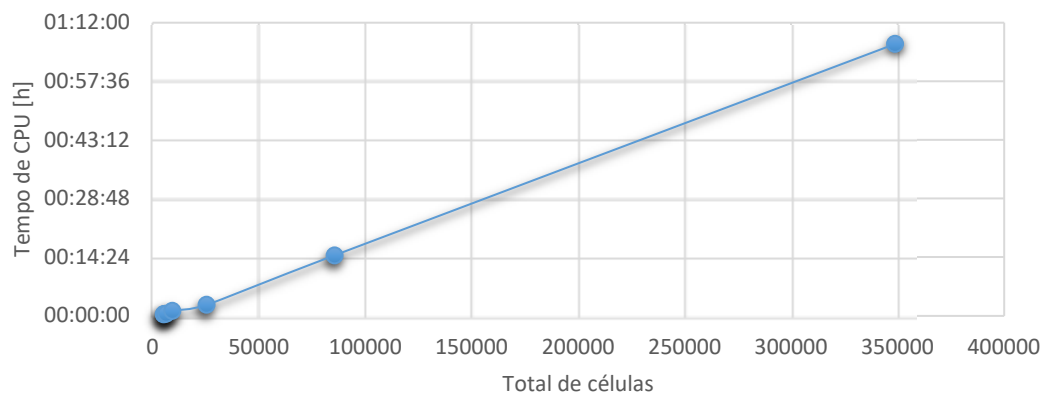
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D31 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 8, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



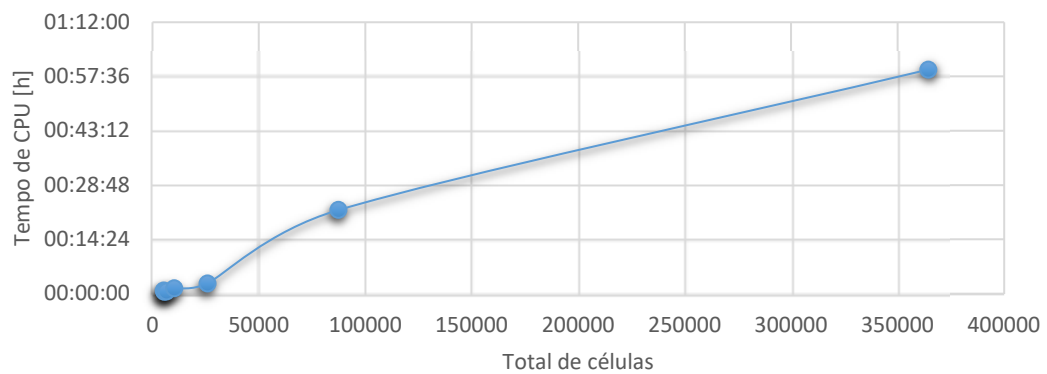
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D32 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 9, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



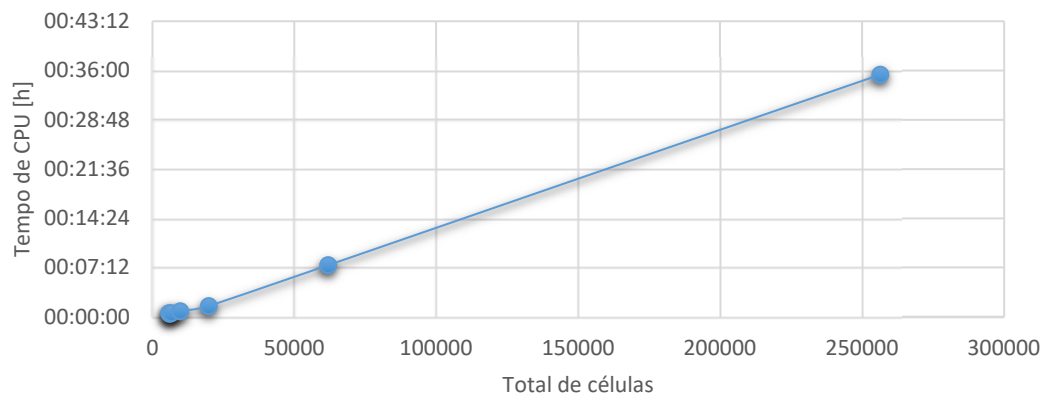
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D33 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 10, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



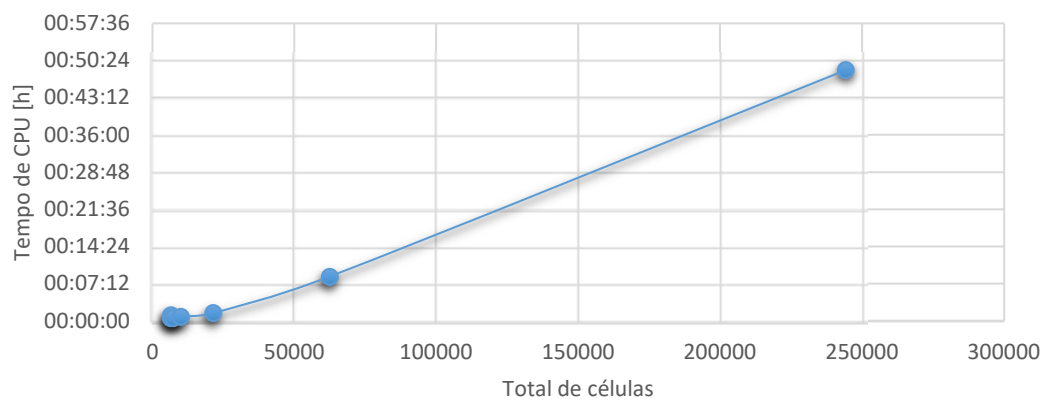
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D34 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 11, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



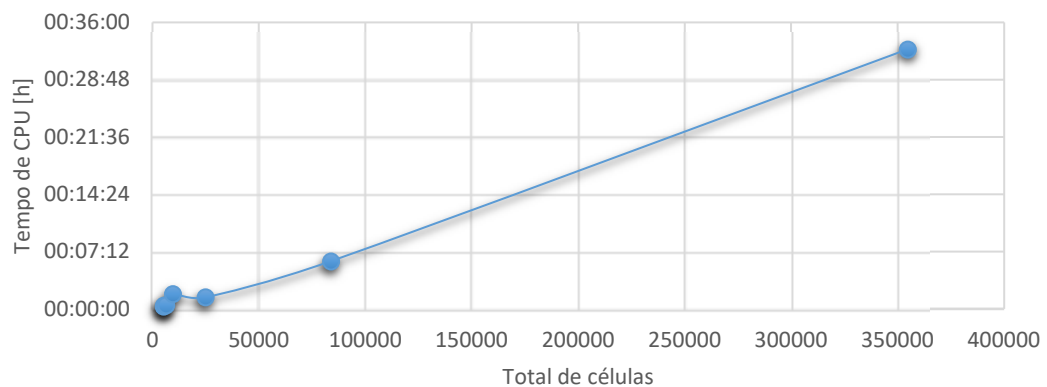
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D35 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 12, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



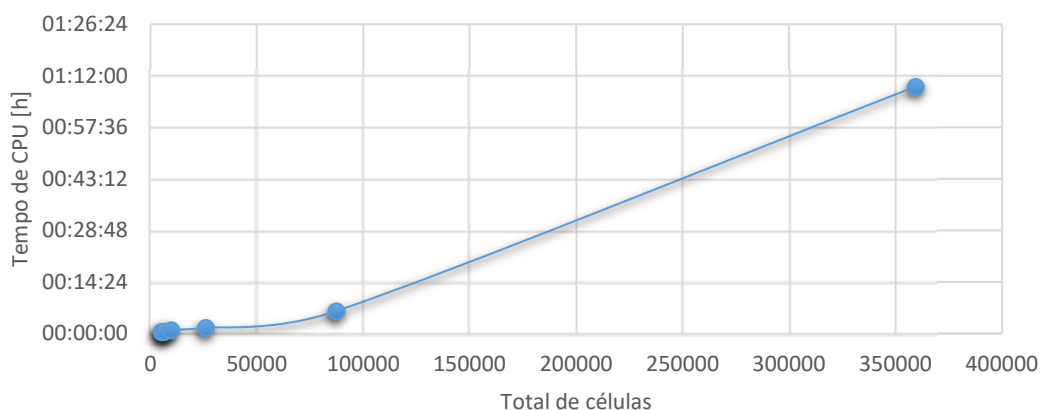
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D36 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 13, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



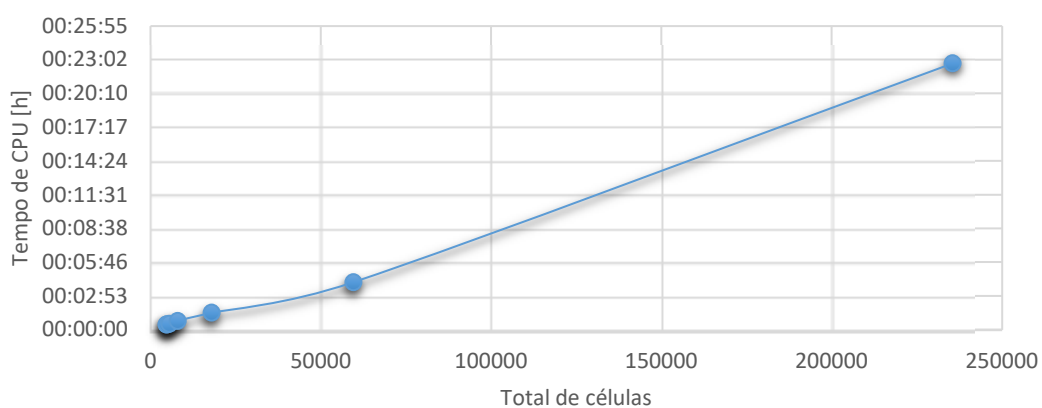
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D37 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 14, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



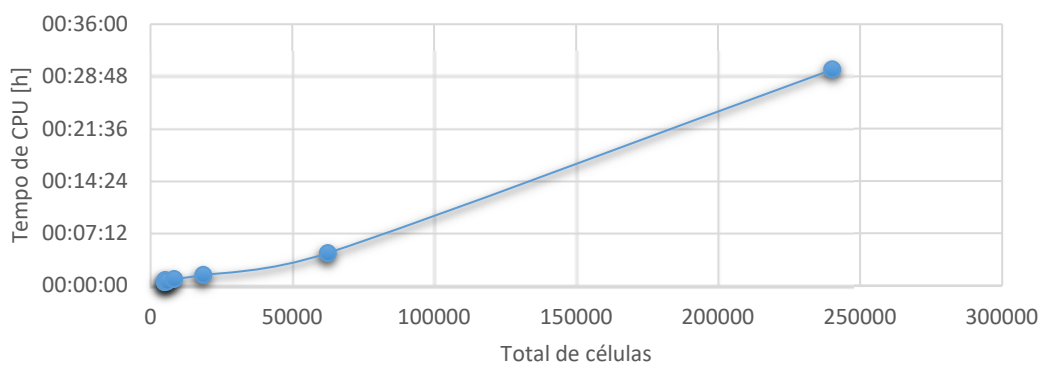
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D38 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 15, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



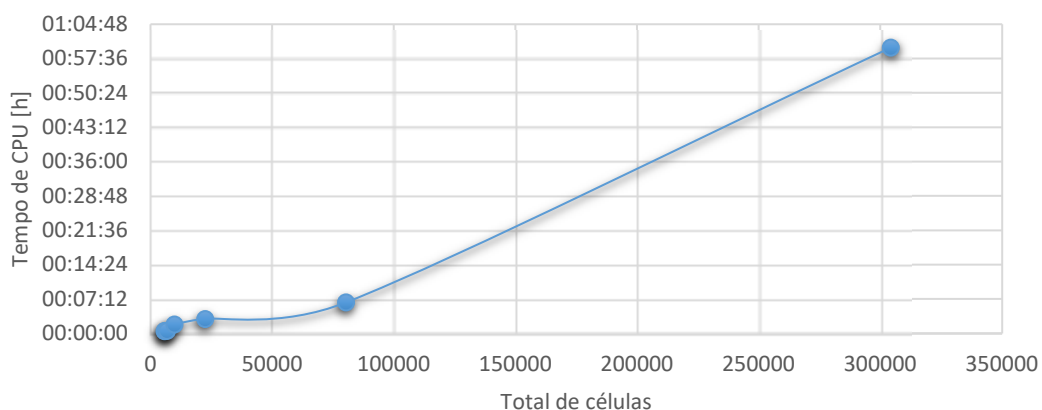
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D39 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 16, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



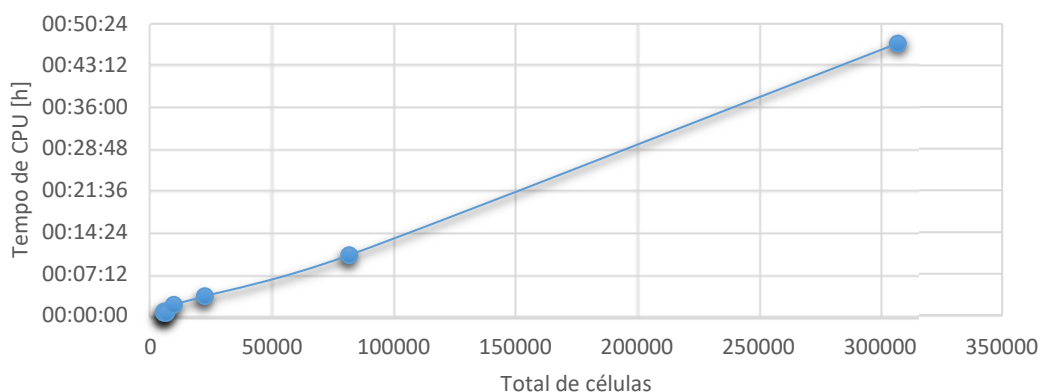
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D40 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 17, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



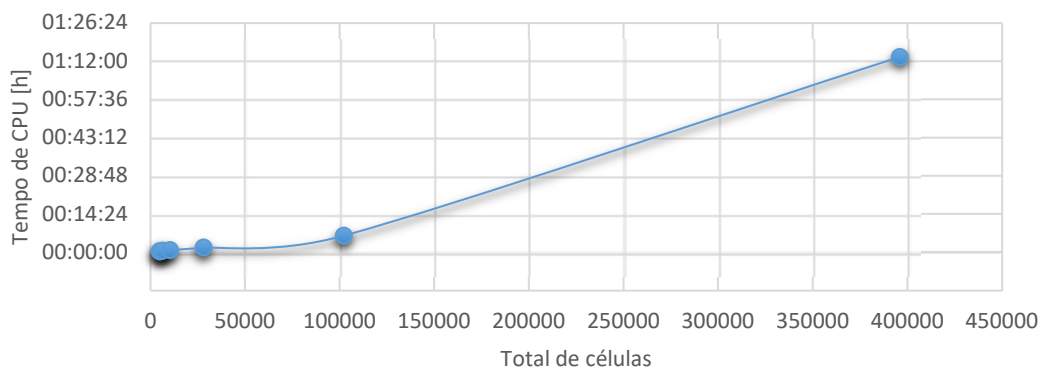
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D41 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 18, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



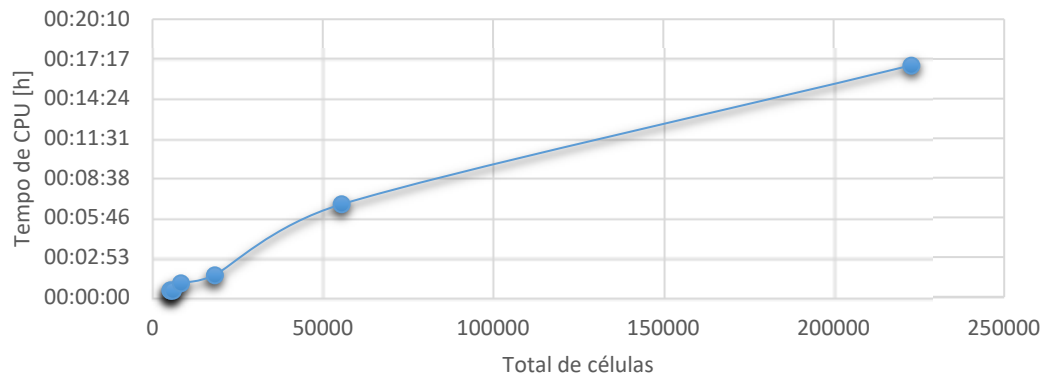
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D42 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 19, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



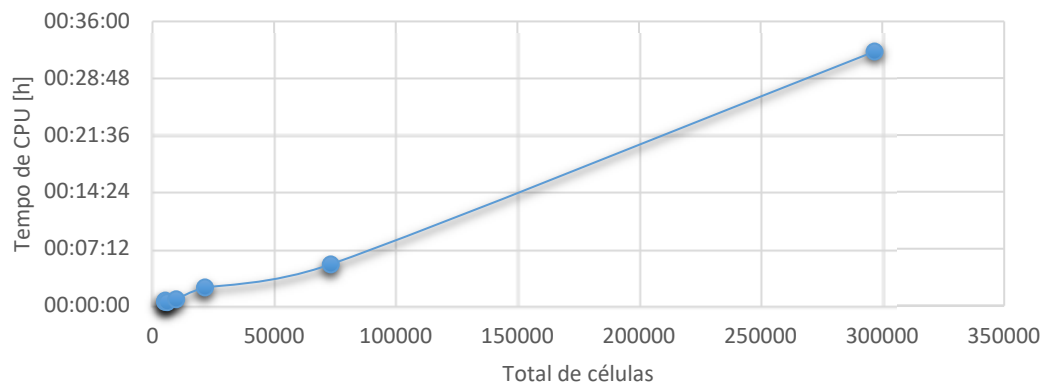
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D43 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 20, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



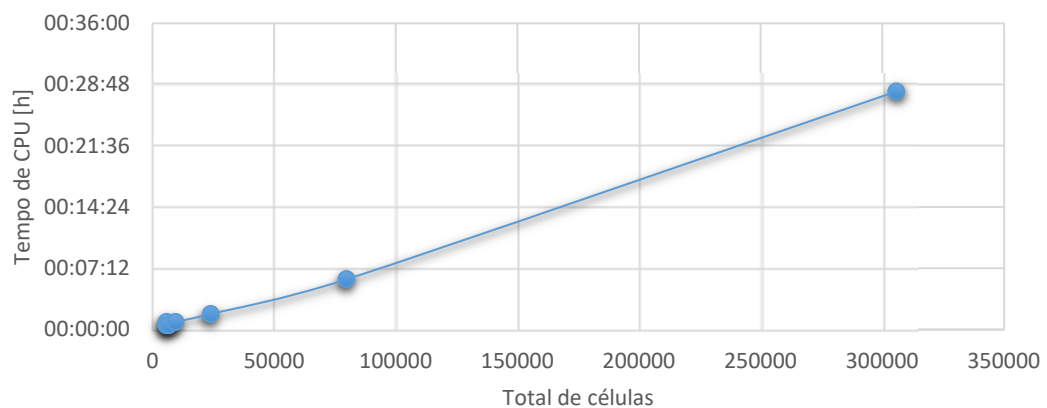
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D44 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 21, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



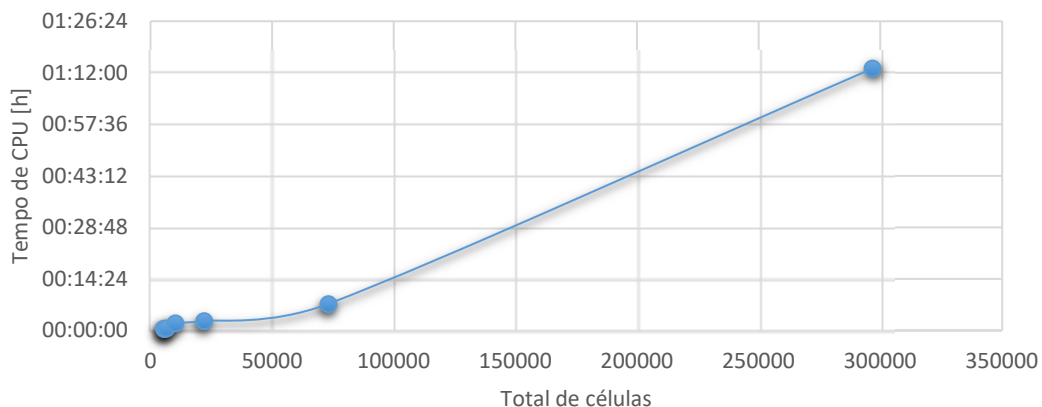
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D45 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 22, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



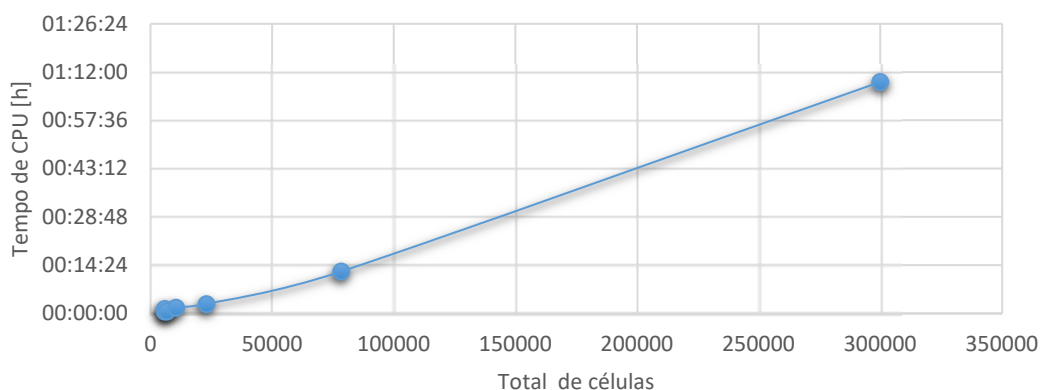
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D46 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 23, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



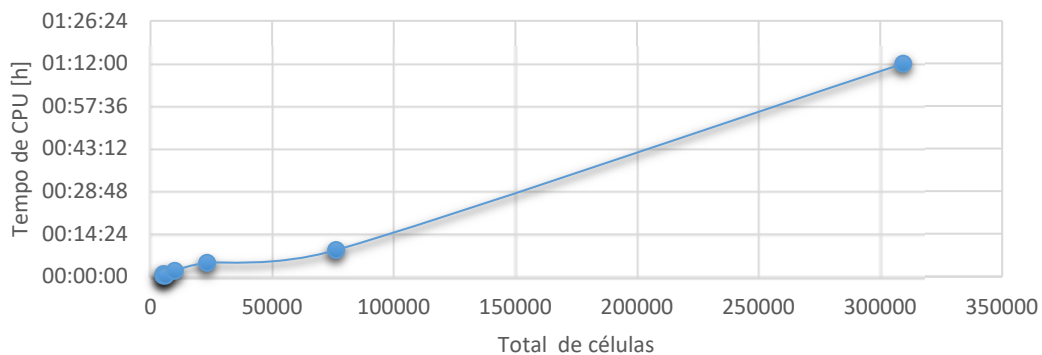
Fonte: O autor (2022).

Gráfico D47 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 24, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).

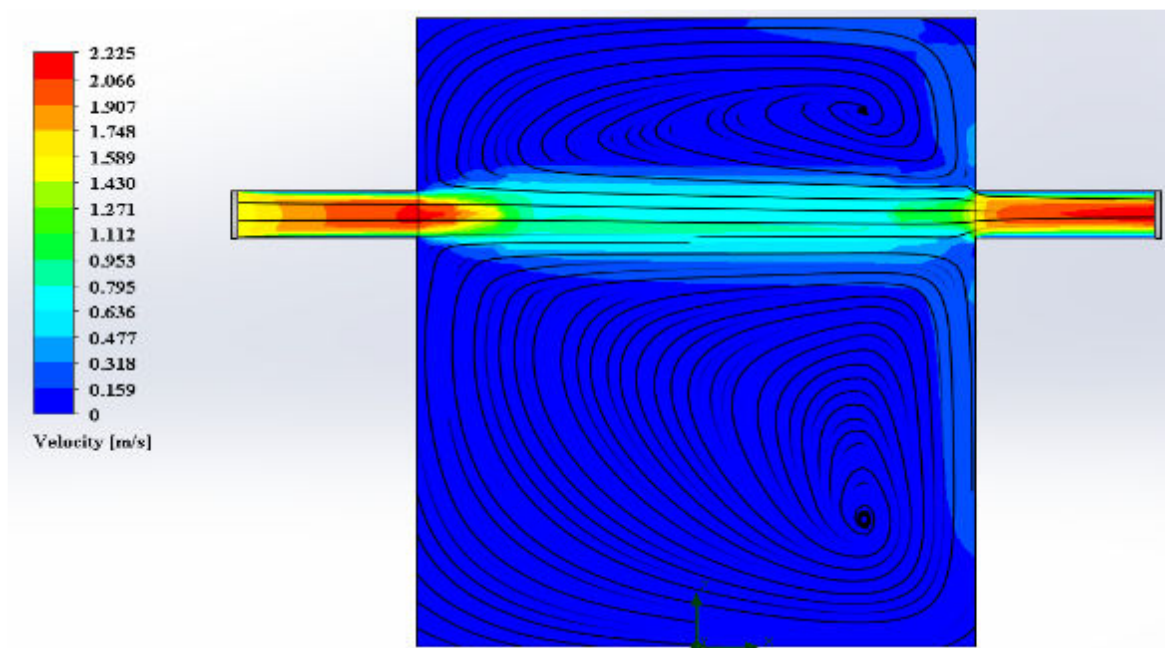
Gráfico D48 – Tempo computacional *versus* total de células do ensaio 25, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).

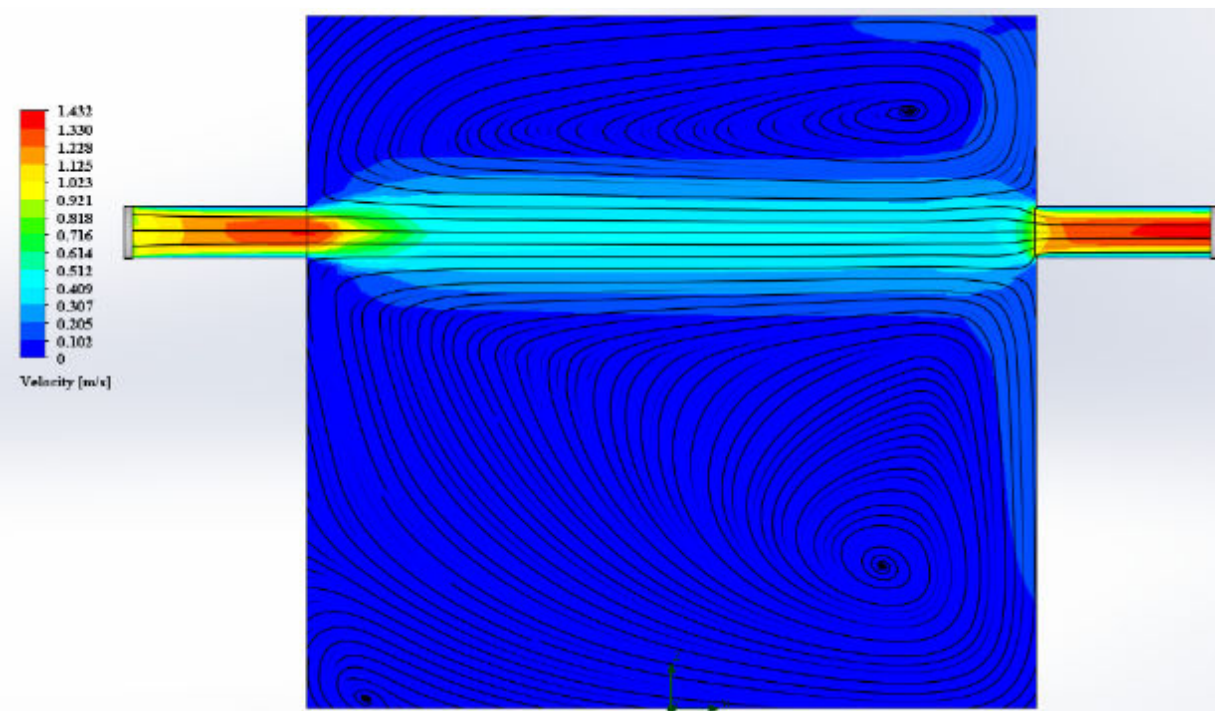
APÊNDICE E – VELOCIDADE DE ESCOAMENTO DO AR NA CÉLULA REACIONAL E AS LINHAS DE CORRENTES

Figura E1 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 2, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



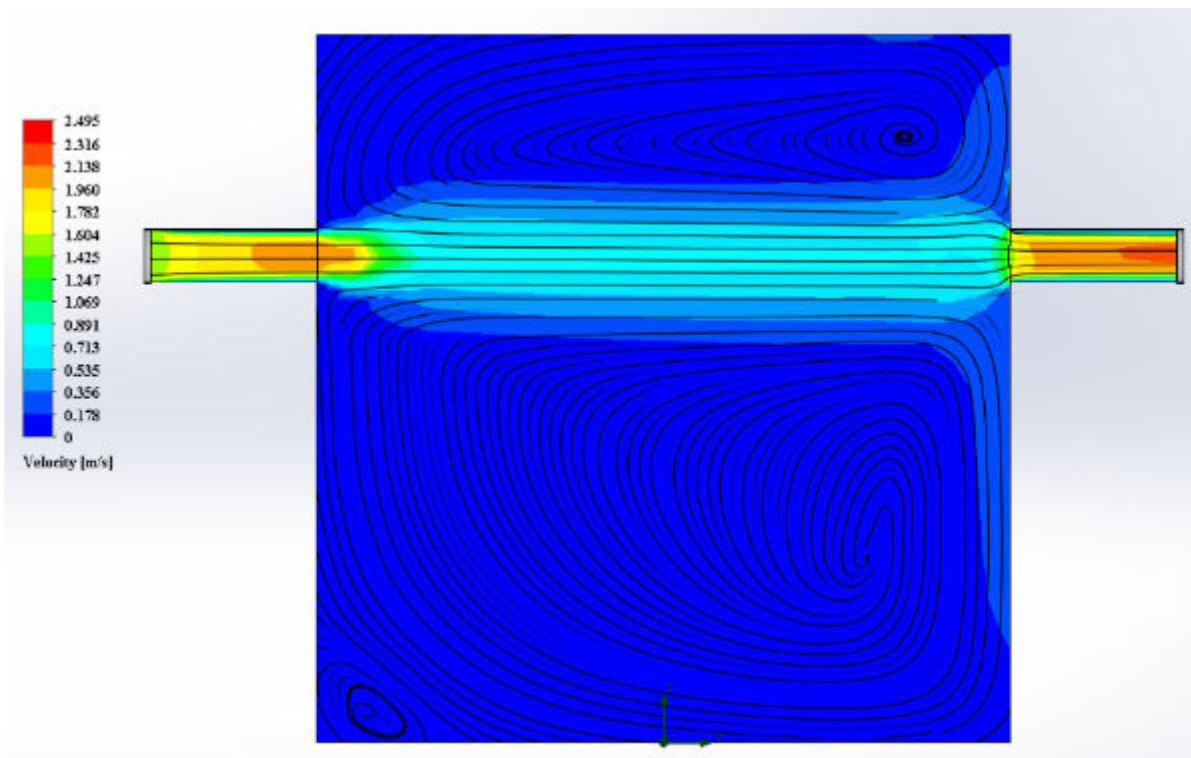
Fonte: O autor (2022).

Figura E2 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 3, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



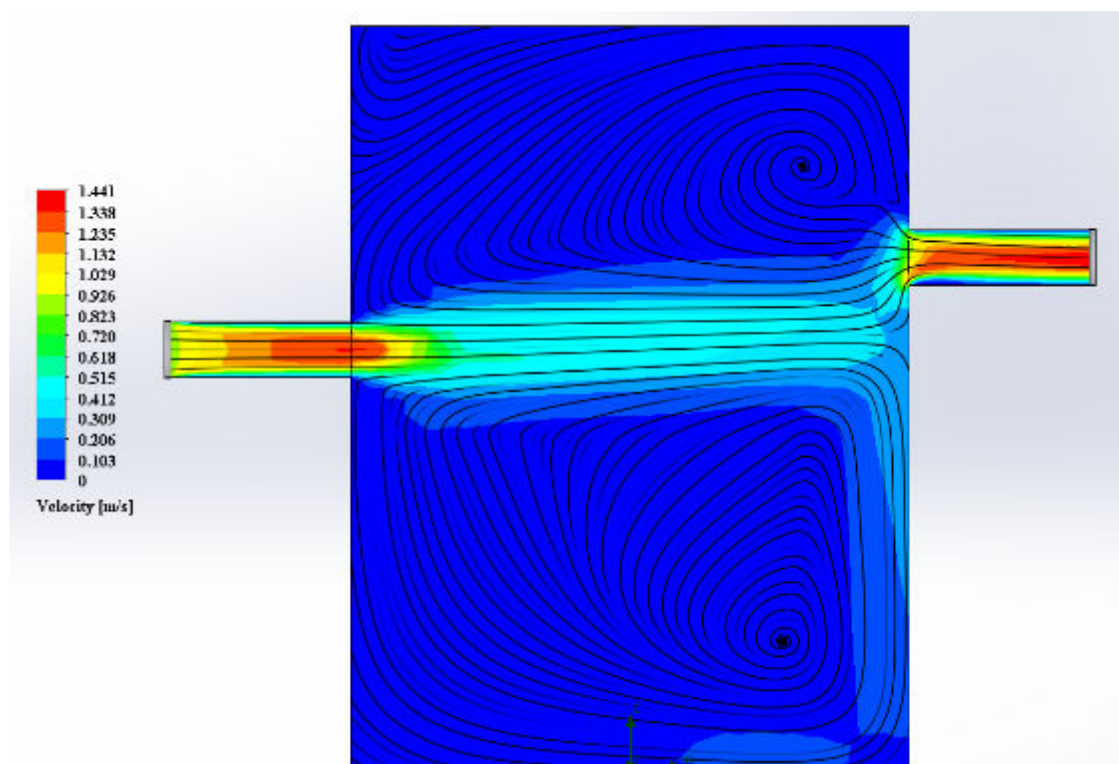
Fonte: O autor (2022).

Figura E3 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 4, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



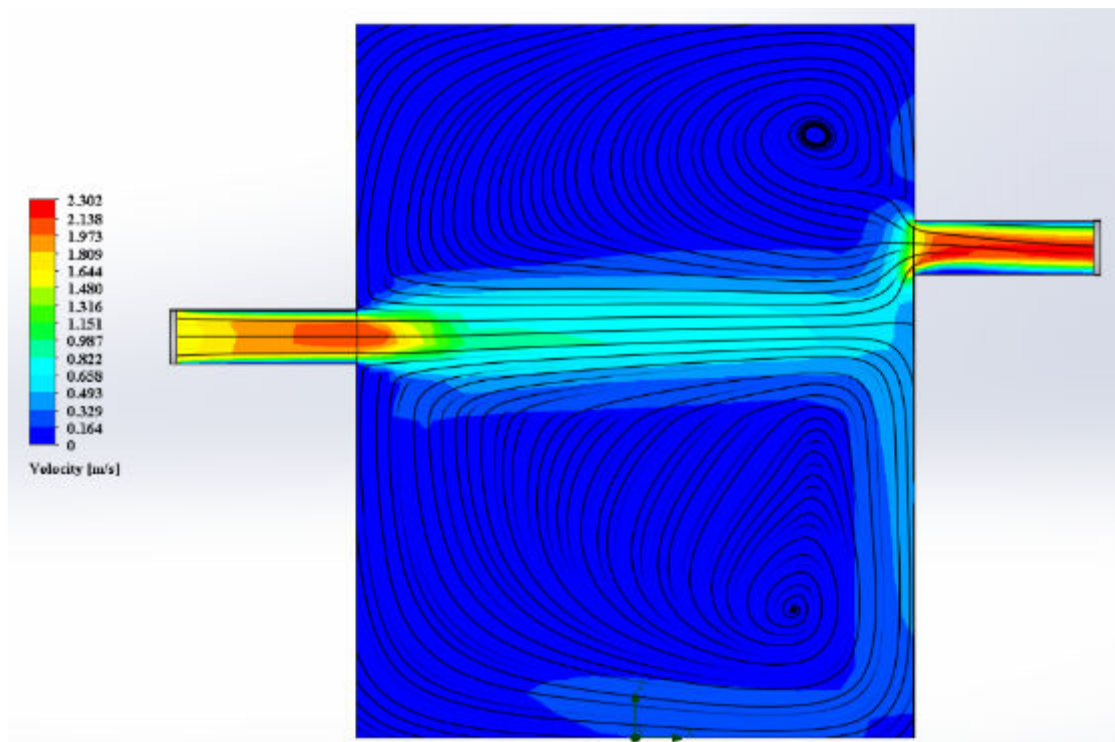
Fonte: O autor (2022).

Figura E4 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 5, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



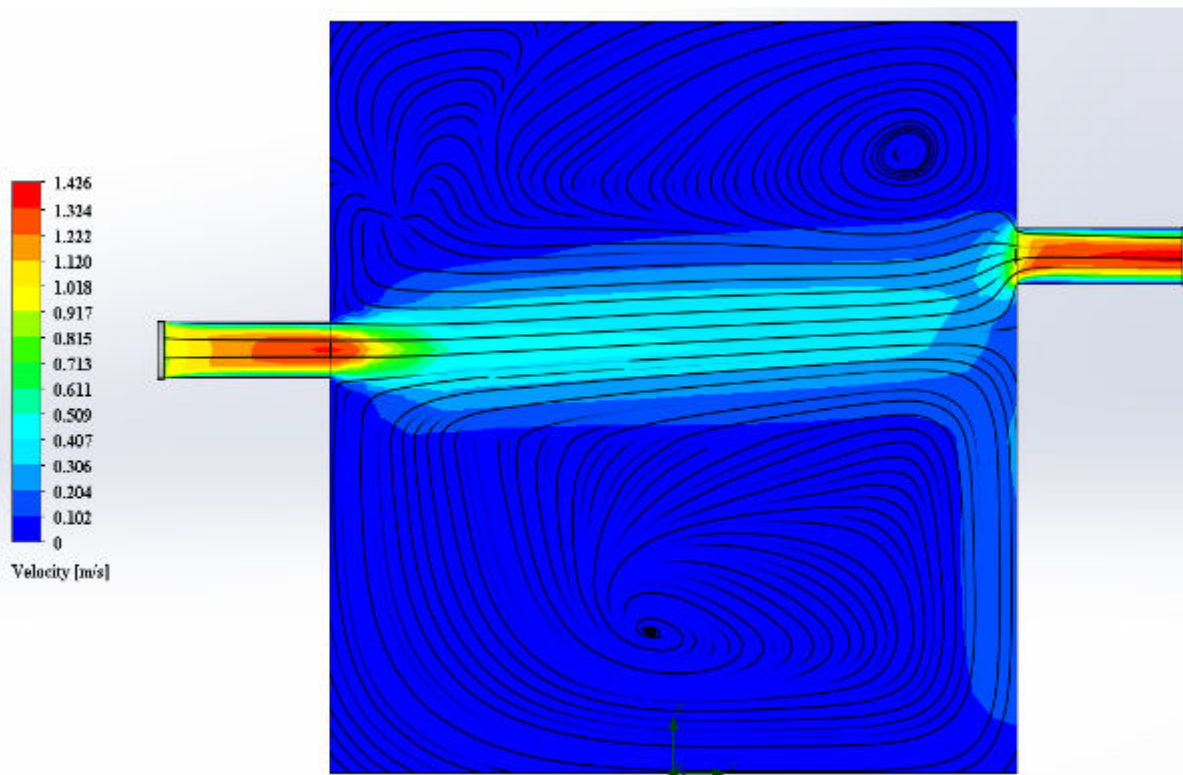
Fonte: O autor (2022).

Figura E5 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 6, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



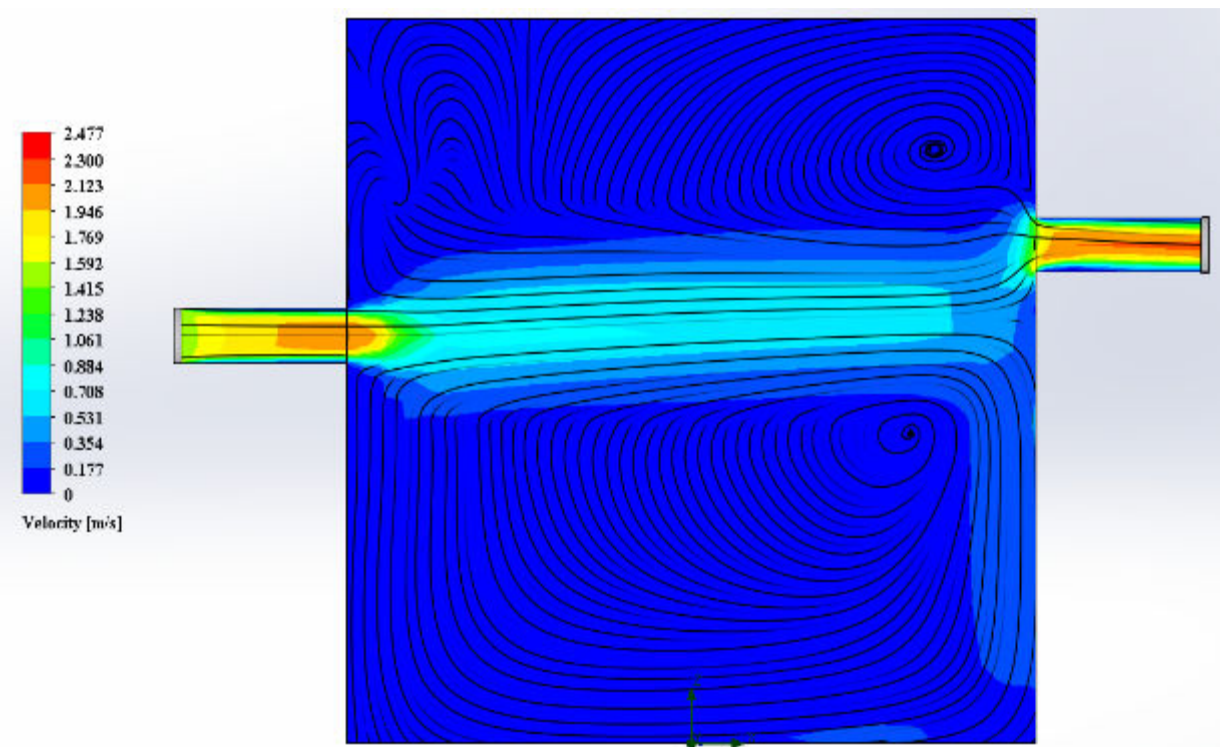
Fonte: O autor (2022).

Figura E6 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 7, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



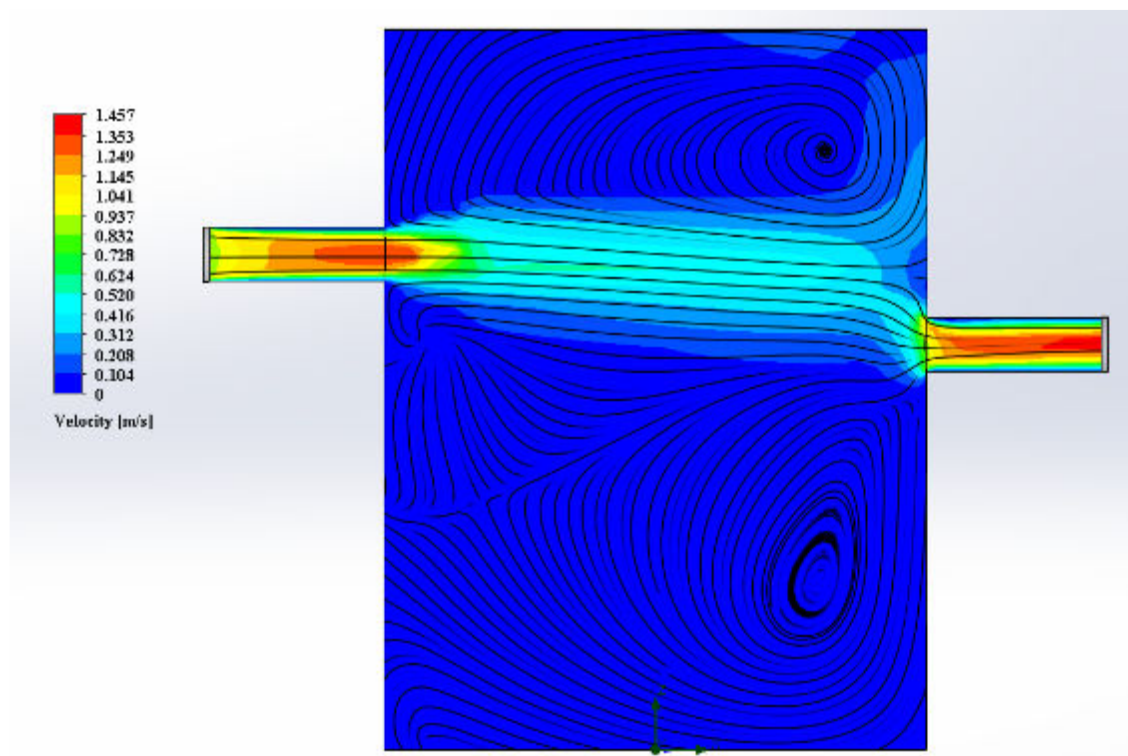
Fonte: O autor (2022).

Figura E7 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 8, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



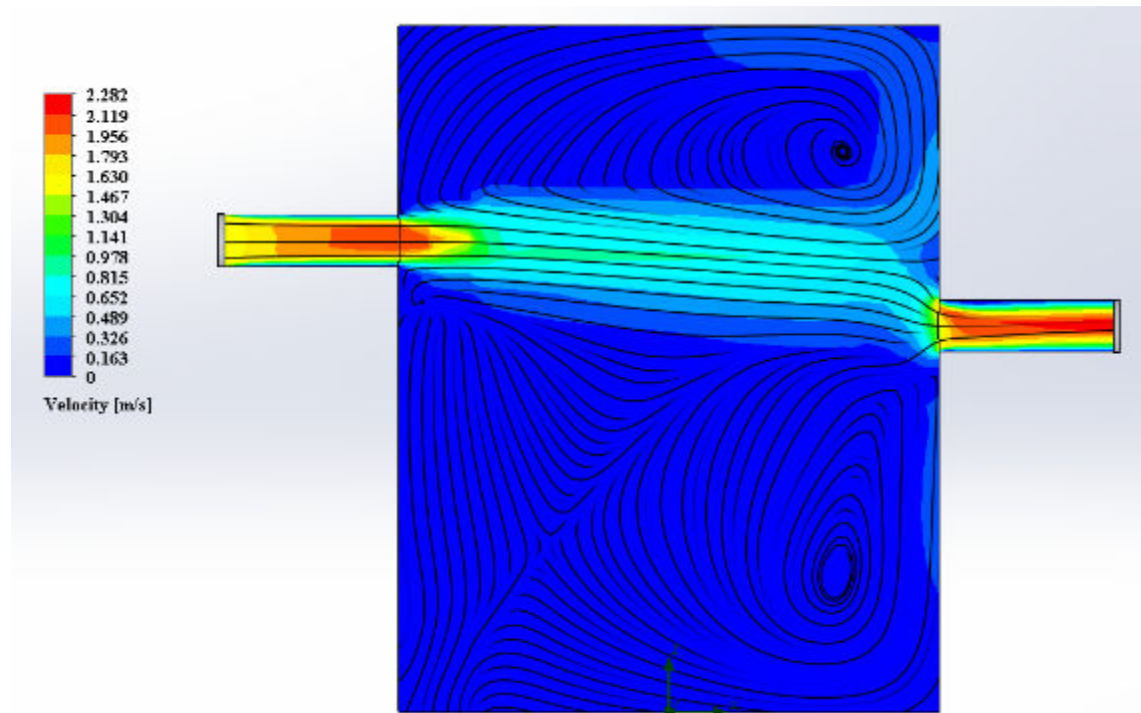
Fonte: O autor (2022).

Figura E8 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 9, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



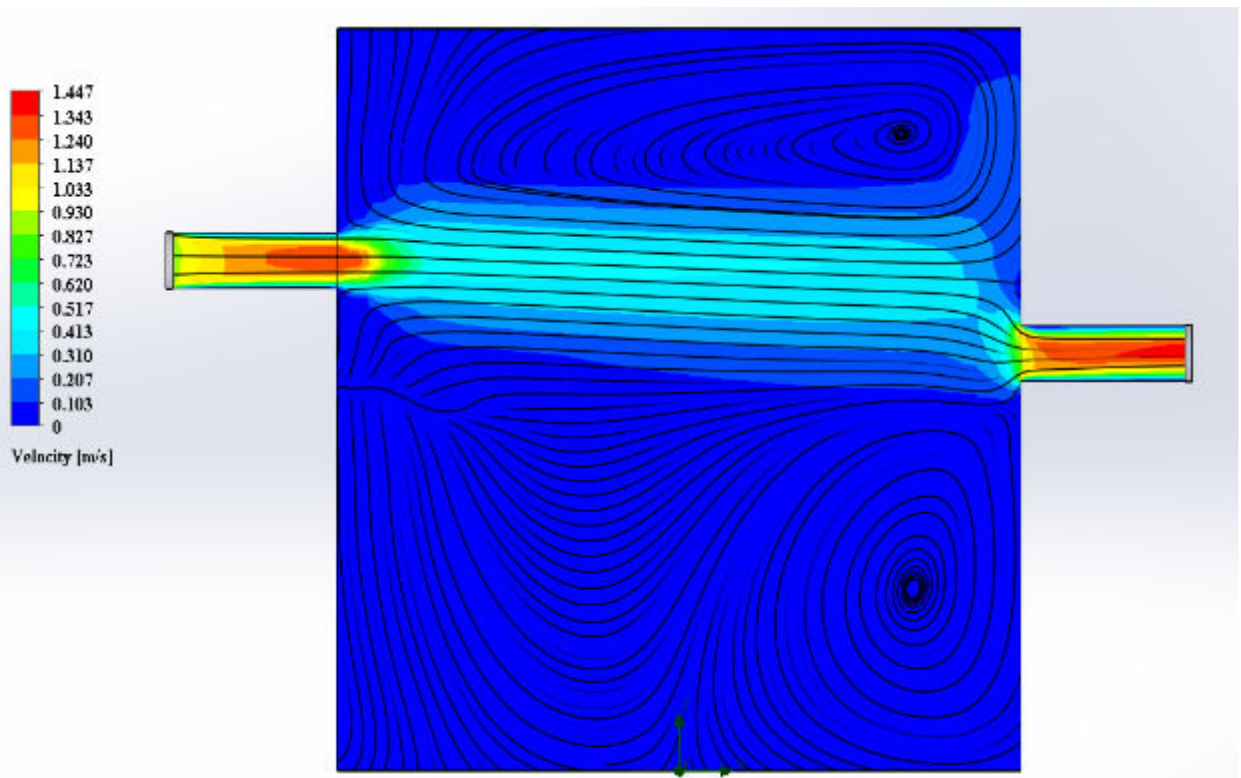
Fonte: O autor (2022).

Figura E9 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 10, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



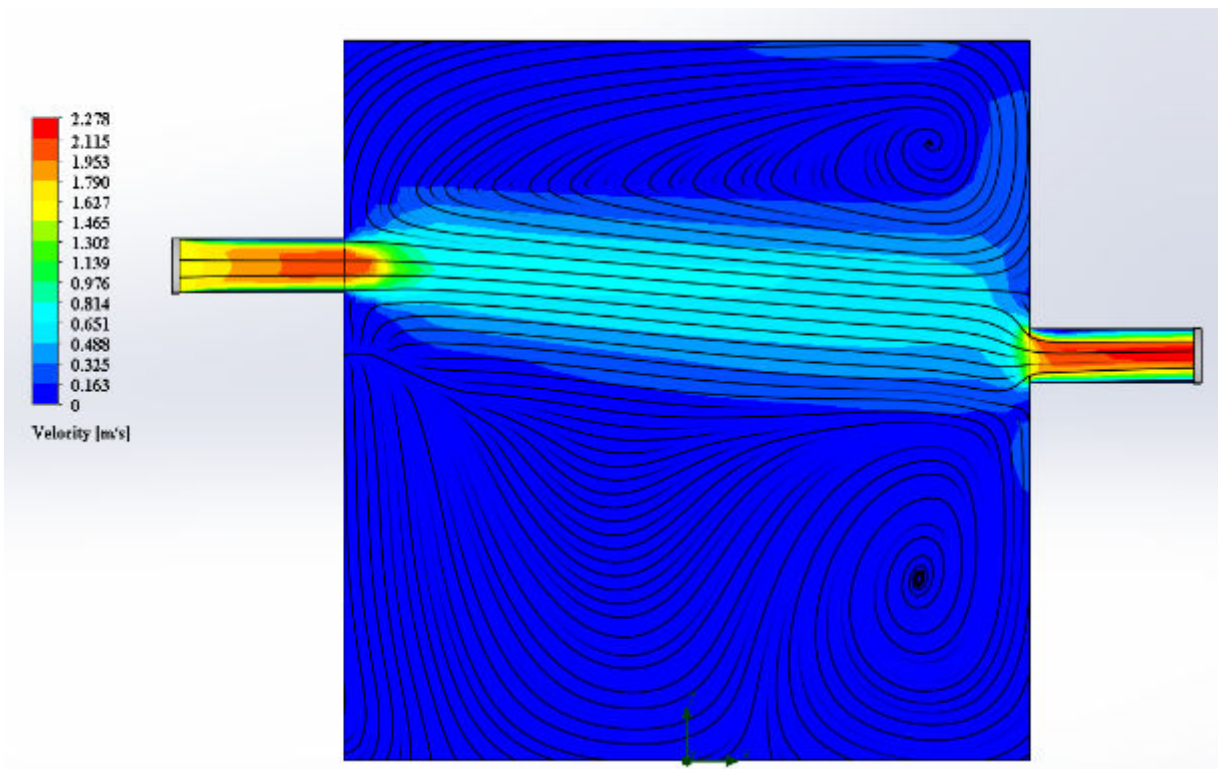
Fonte: O autor (2022).

Figura E10 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 11, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



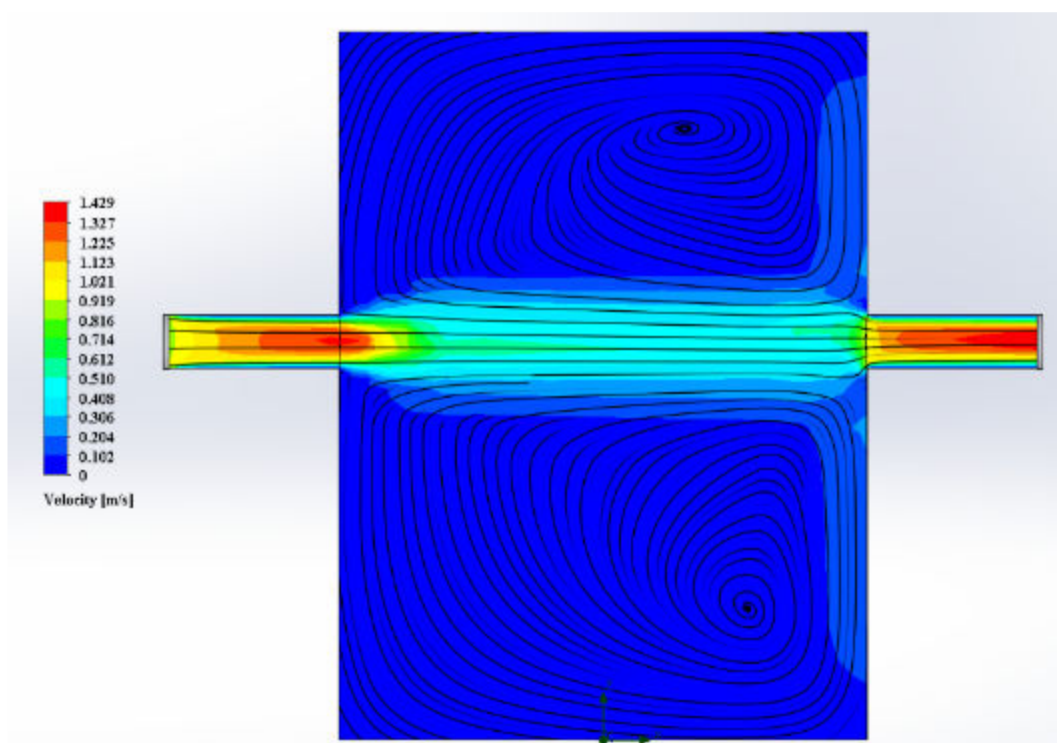
Fonte: O autor (2022).

Figura E11 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 12, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



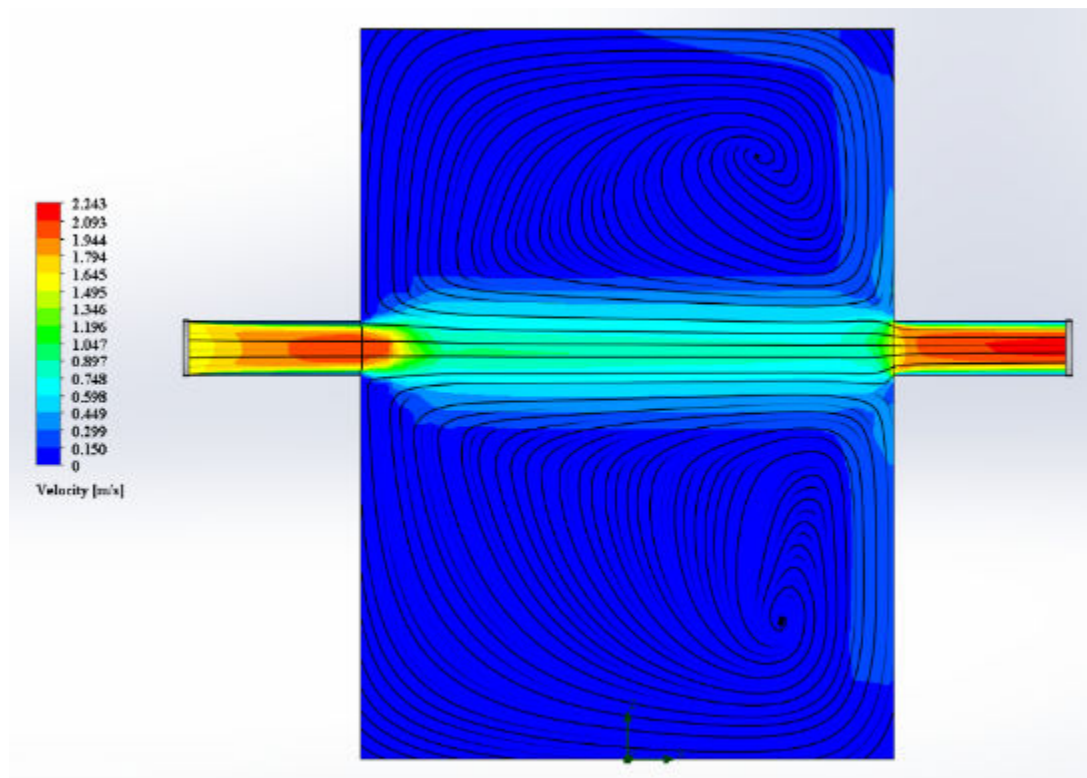
Fonte: O autor (2022).

Figura E12 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 13, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



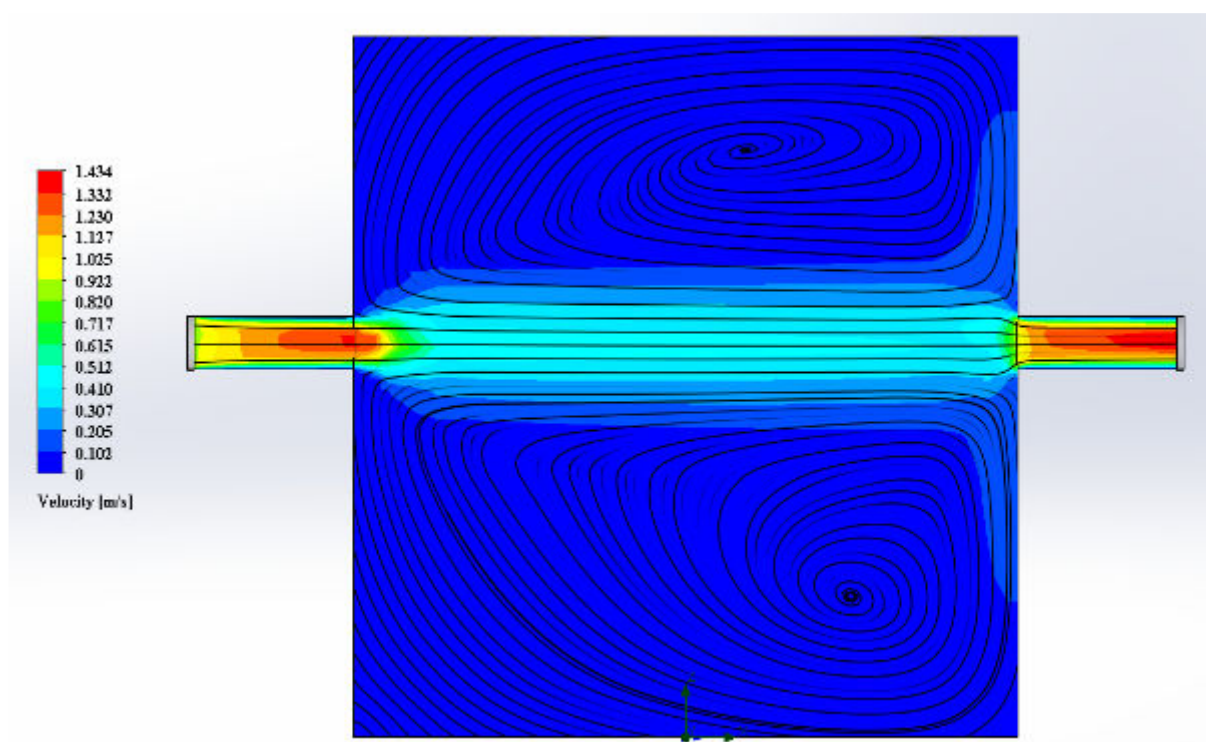
Fonte: O autor (2022).

Figura E13 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 14, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



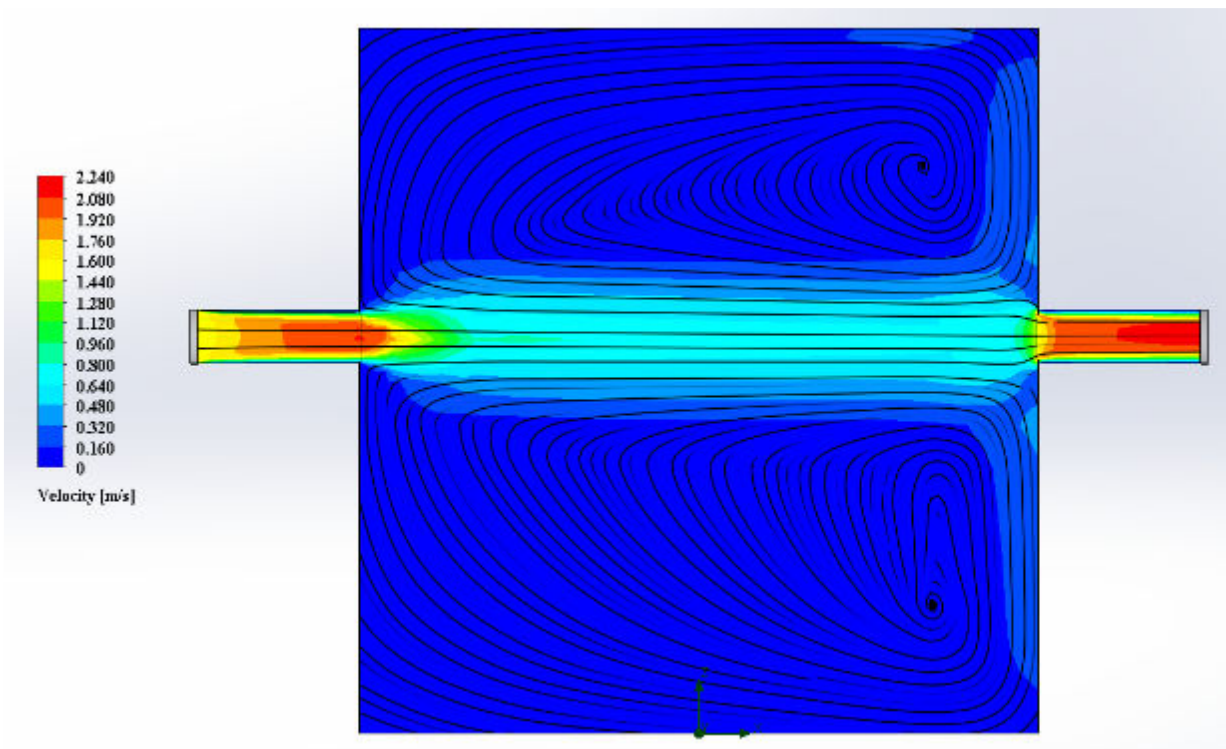
Fonte: O autor (2022).

Figura E14 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 15, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



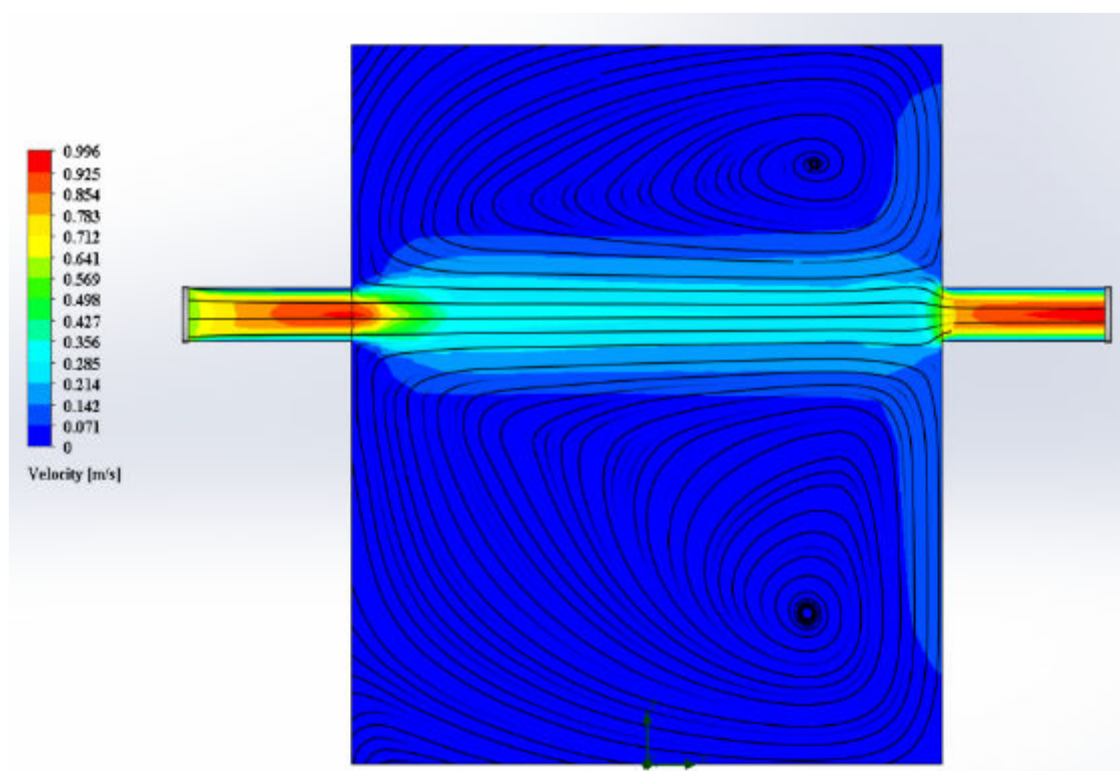
Fonte: O autor (2022).

Figura E15 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 16, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



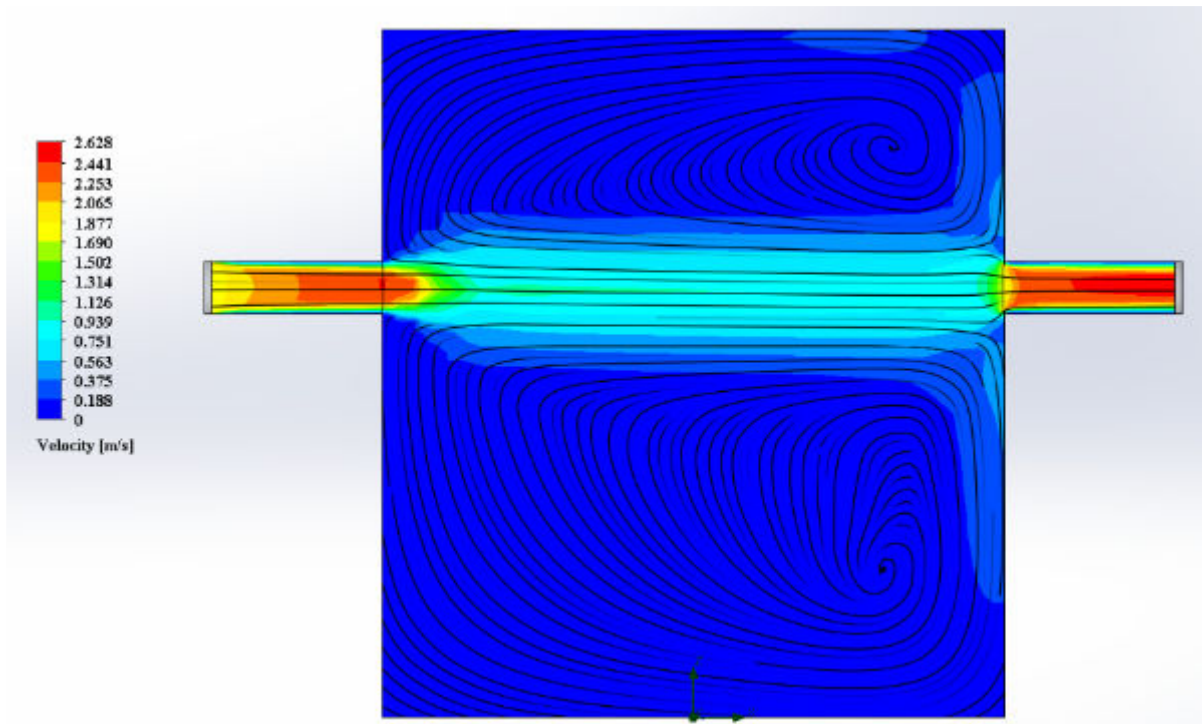
Fonte: O autor (2022).

Figura E16 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 17, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



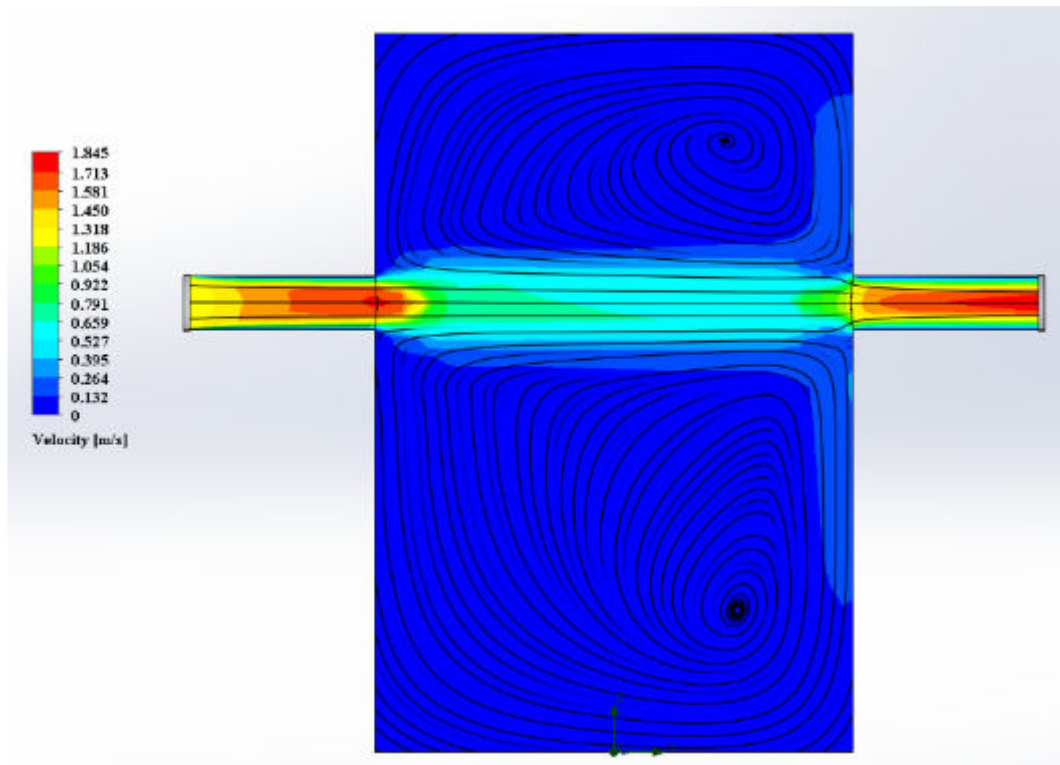
Fonte: O autor (2022).

Figura E17 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 18, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



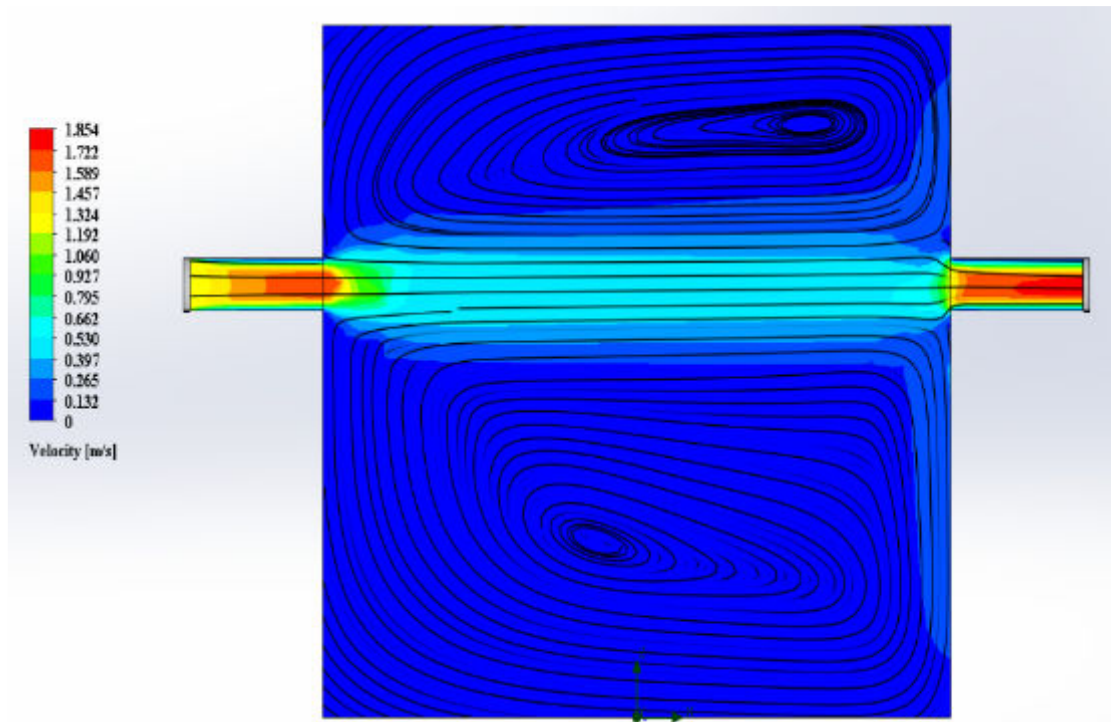
Fonte: O autor (2022).

Figura E18 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 19, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



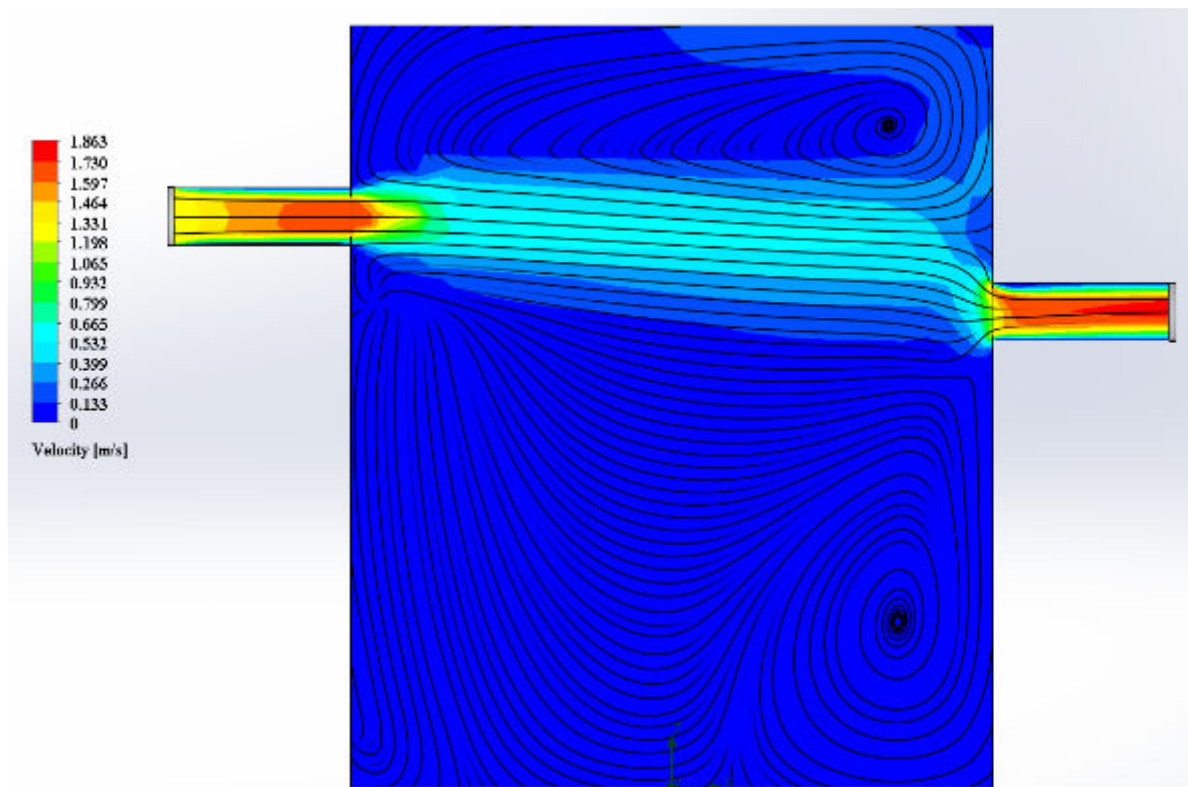
Fonte: O autor (2022).

Figura E19 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 20, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



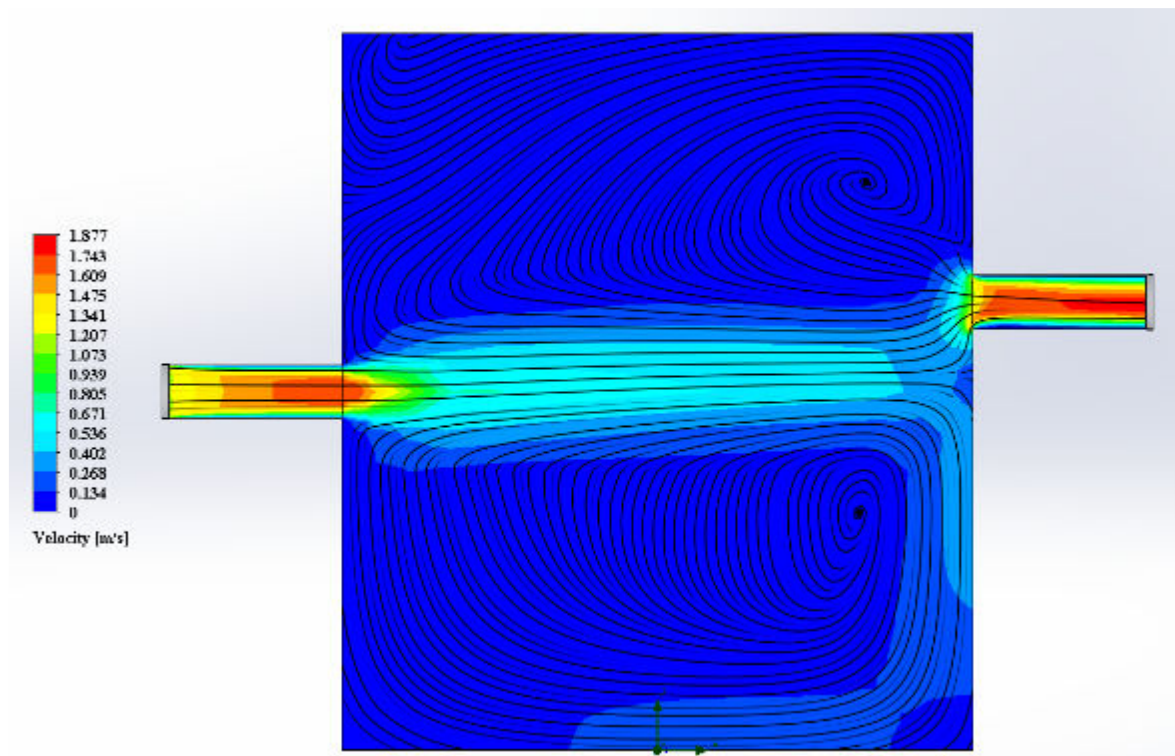
Fonte: O autor (2022).

Figura E20 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 21, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



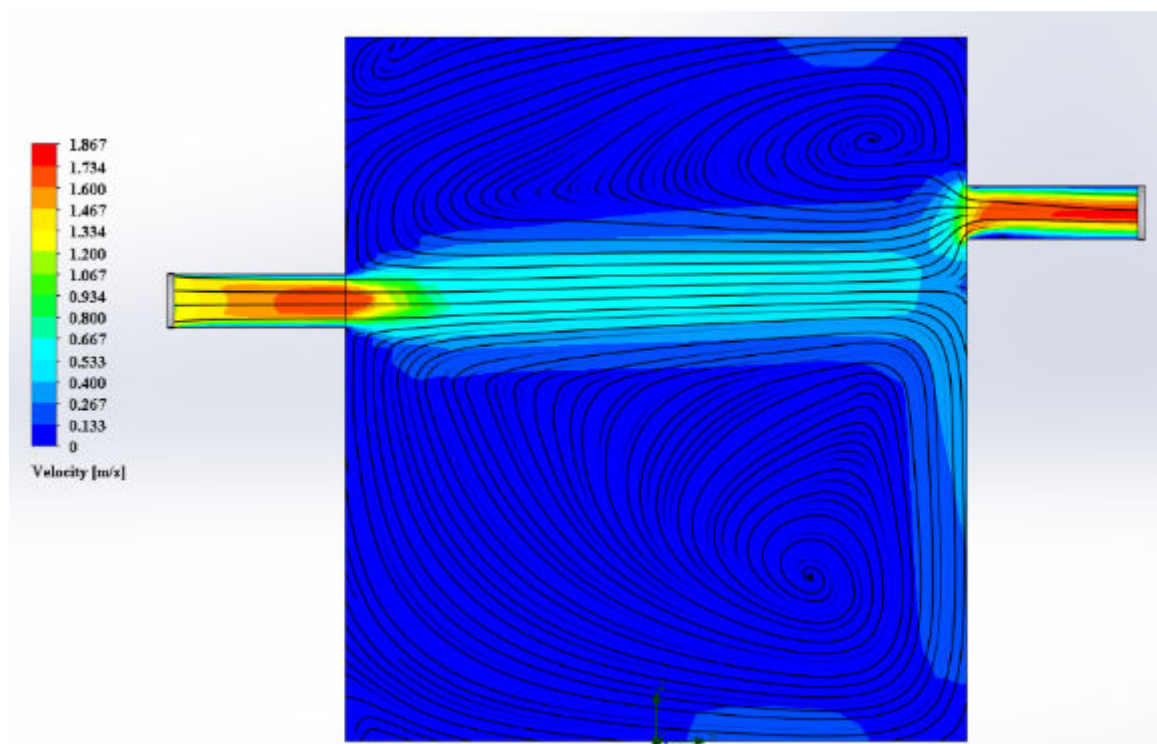
Fonte: O autor (2022).

Figura E21 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 22, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



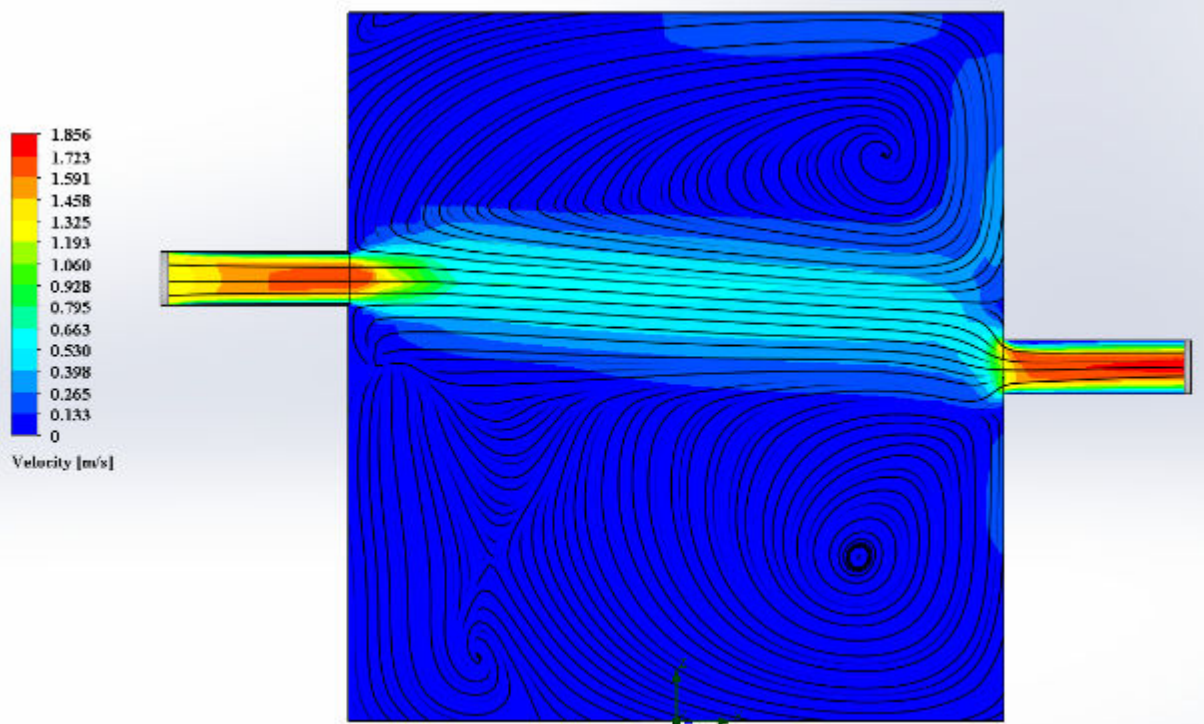
Fonte: O autor (2022).

Figura E22 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 23, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



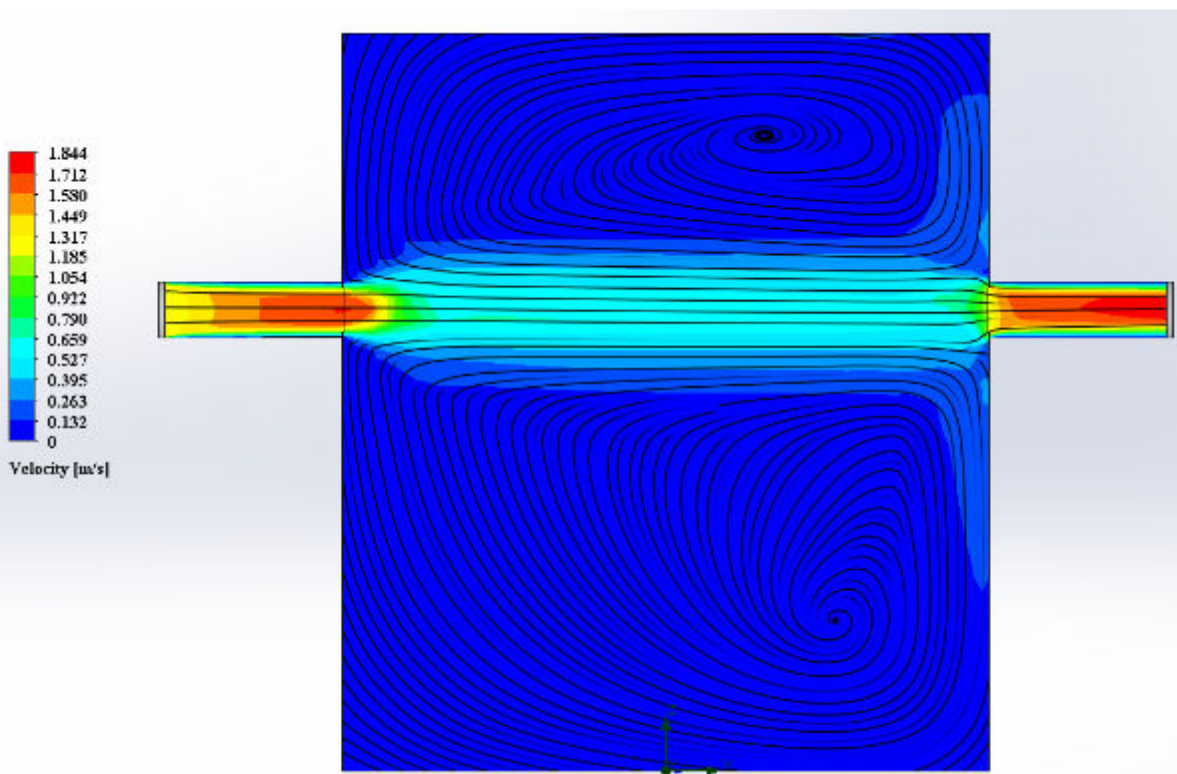
Fonte: O autor (2022).

Figura E23 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 24, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



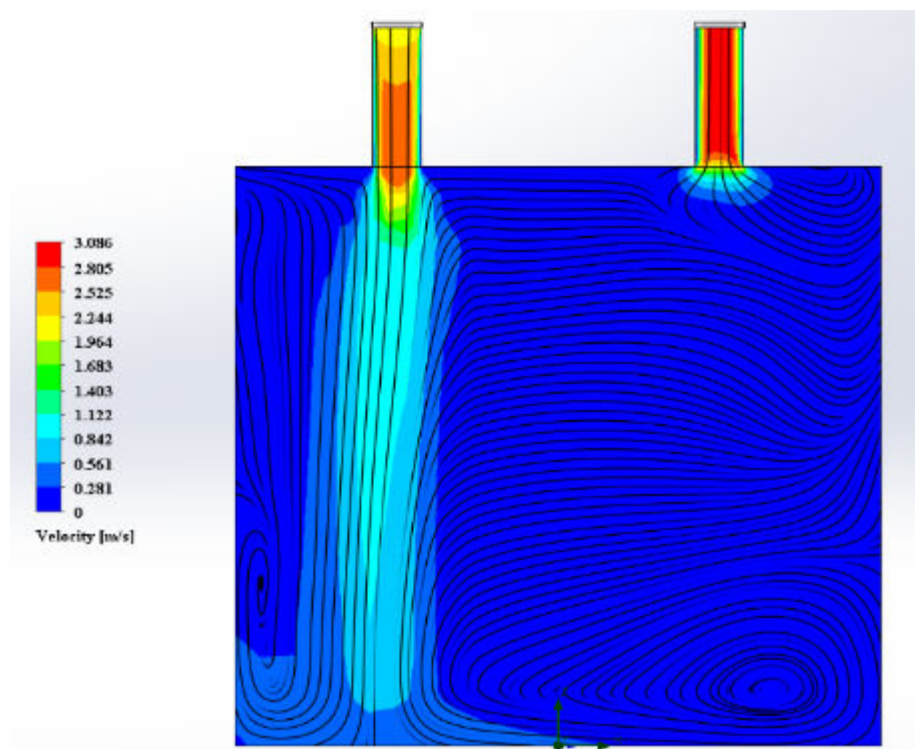
Fonte: O autor (2022).

Figura E24 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 25, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



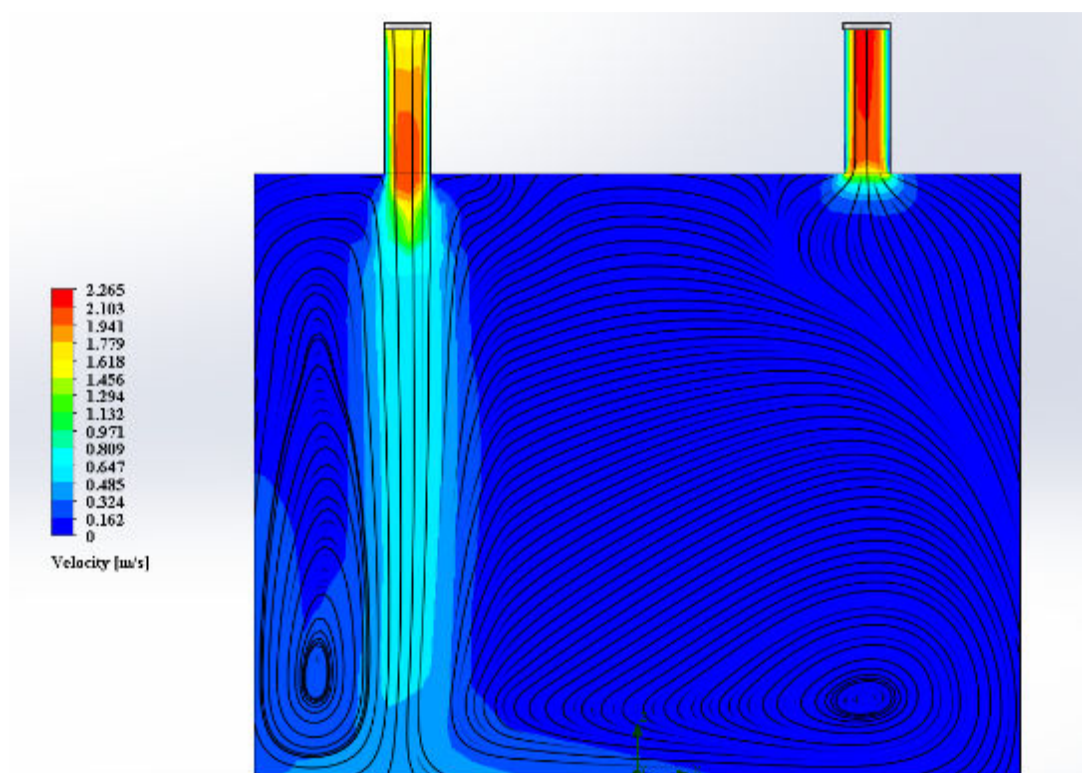
Fonte: O autor (2022).

Figura E25 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 2, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



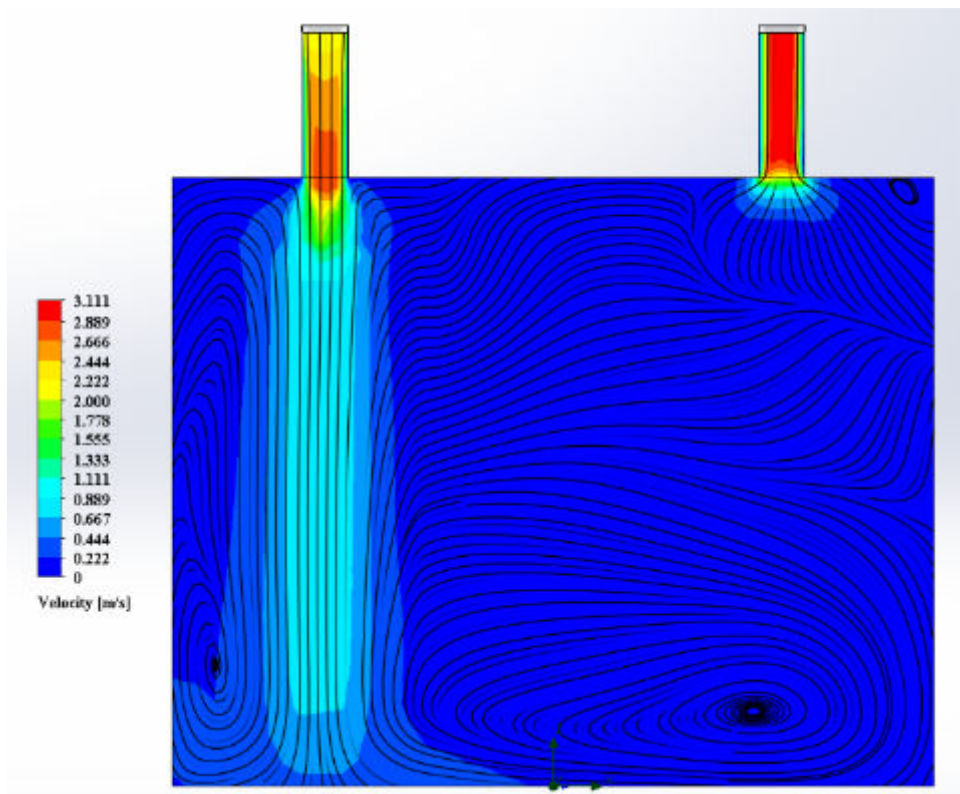
Fonte: O autor (2022).

Figura E26 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 3, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



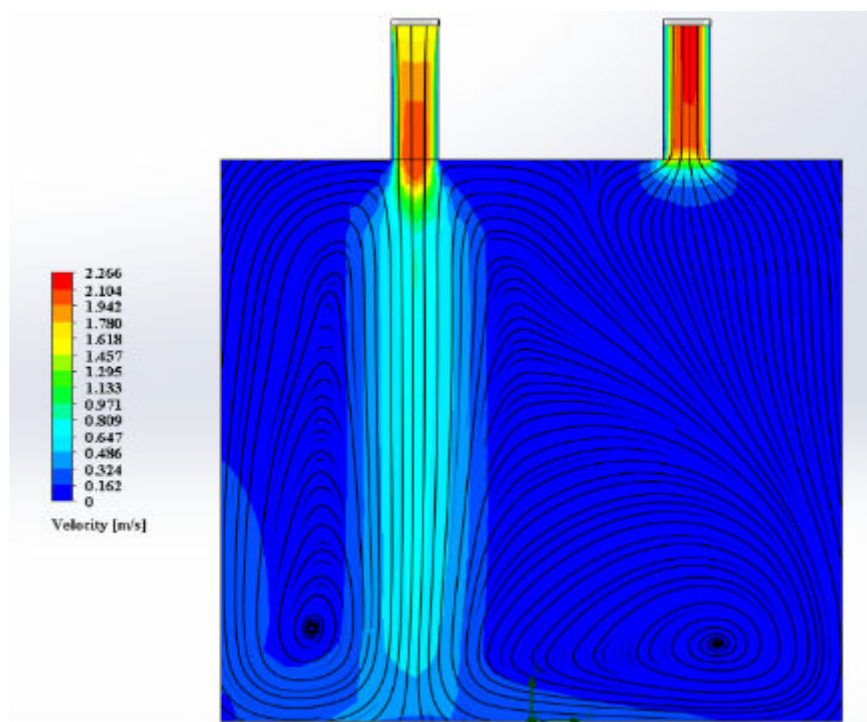
Fonte: O autor (2022).

Figura E27 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 4, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



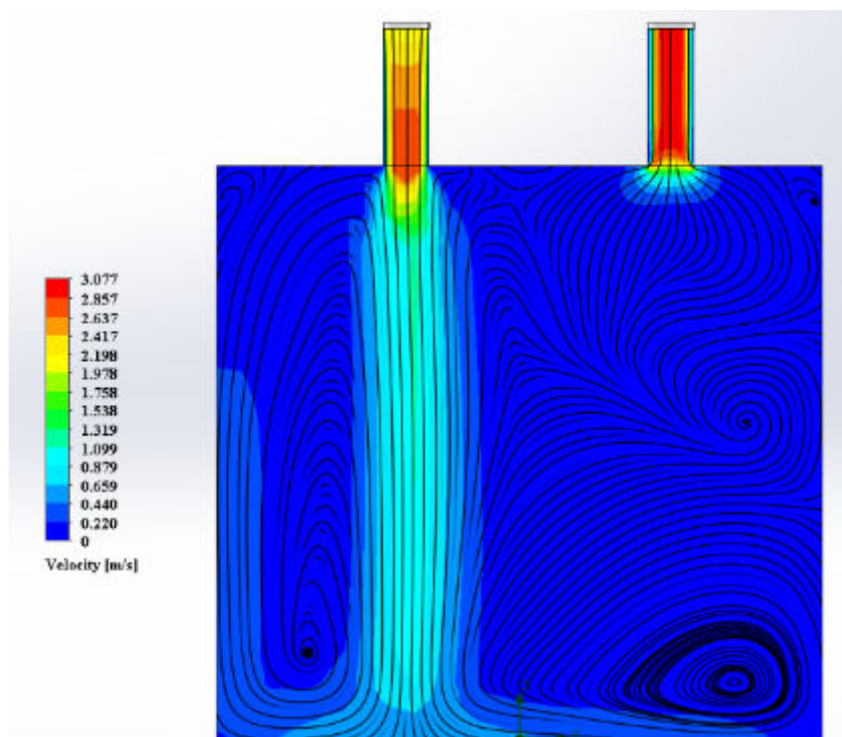
Fonte: O autor (2022).

Figura E28 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 5, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



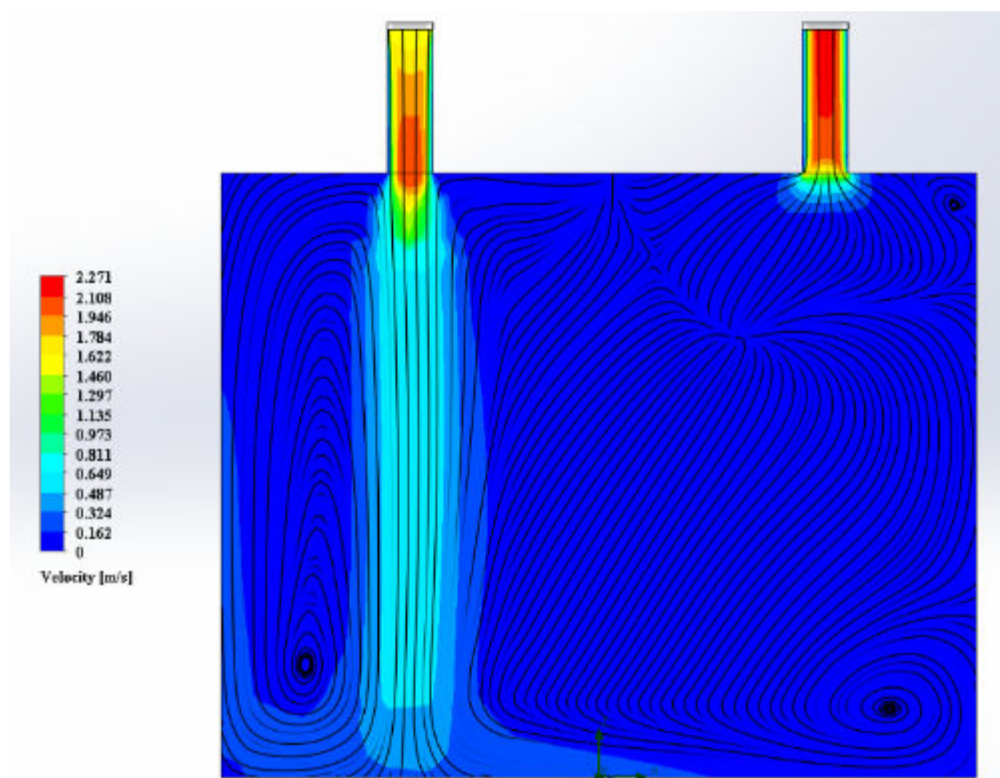
Fonte: O autor (2022).

Figura E29 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 6, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



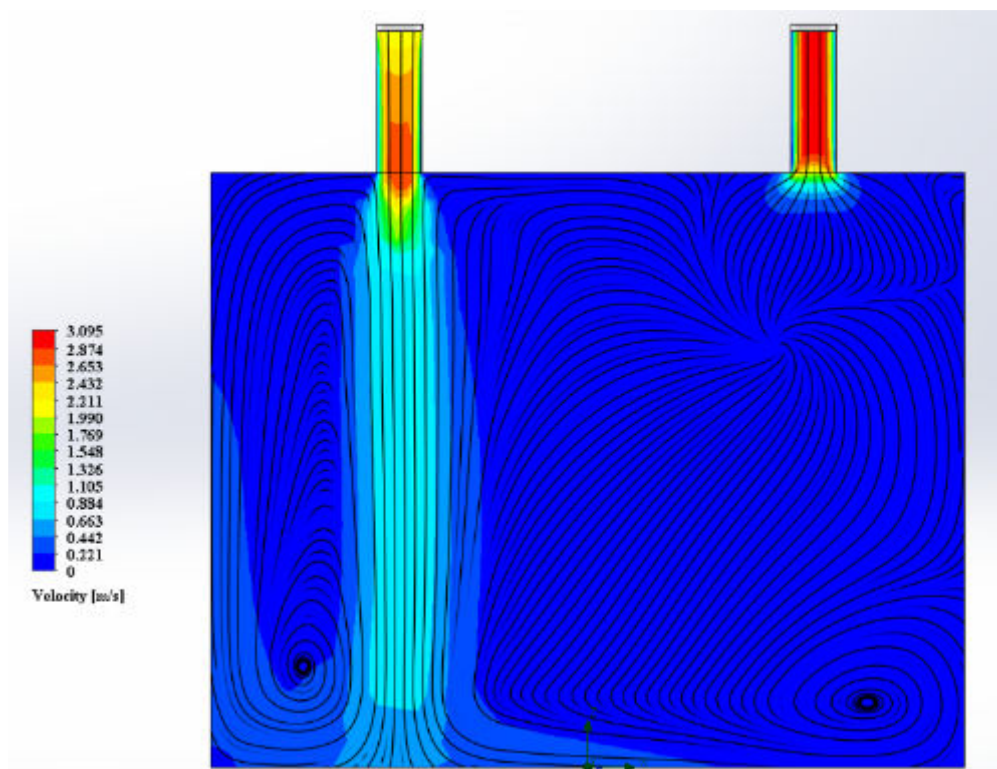
Fonte: O autor (2022).

Figura E30 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 7, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



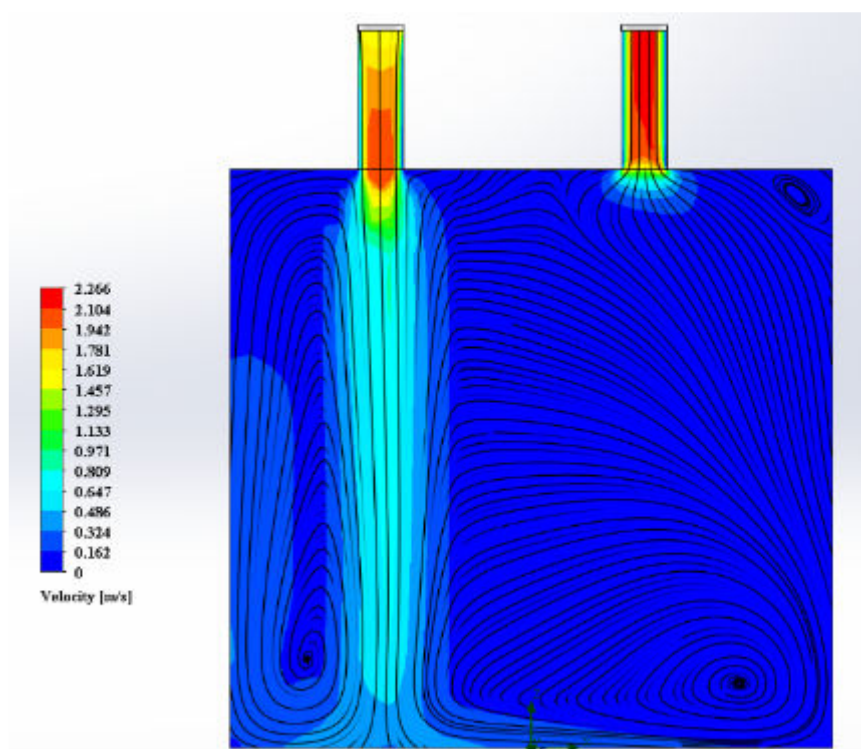
Fonte: O autor (2022).

Figura E31 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 8, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



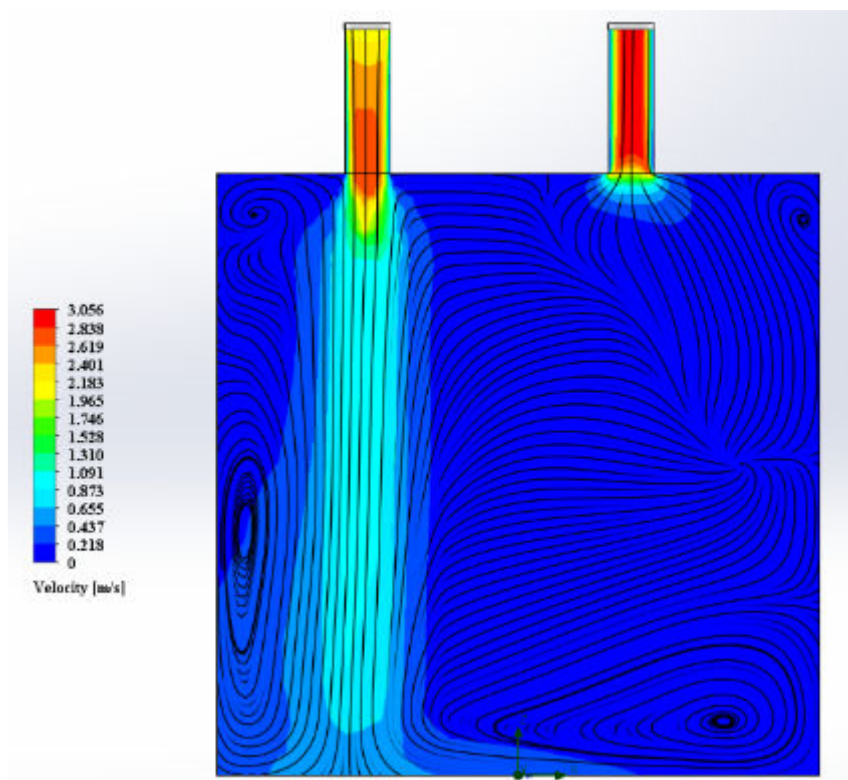
Fonte: O autor (2022).

Figura E32 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 9, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



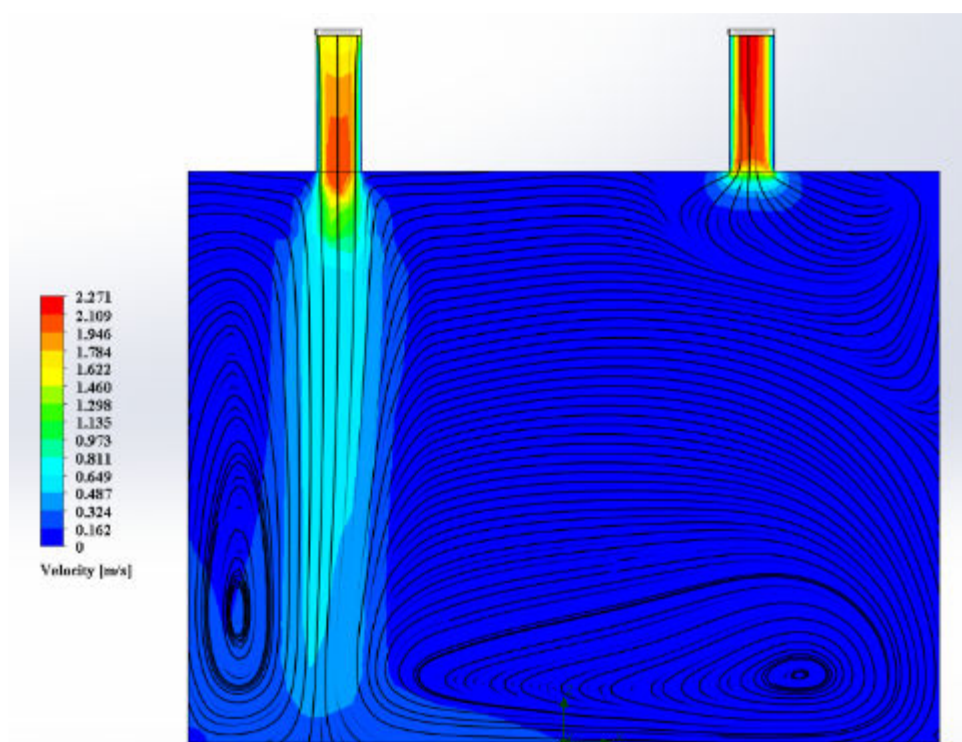
Fonte: O autor (2022).

Figura E33 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 10, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



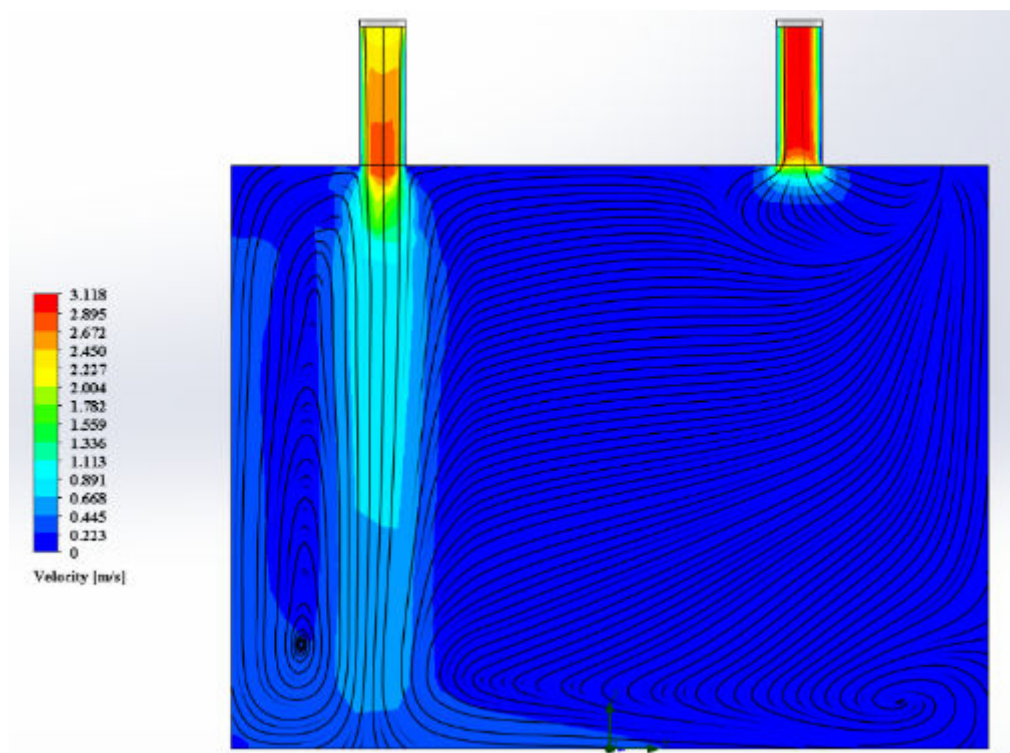
Fonte: O autor (2022).

Figura E34 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 11, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



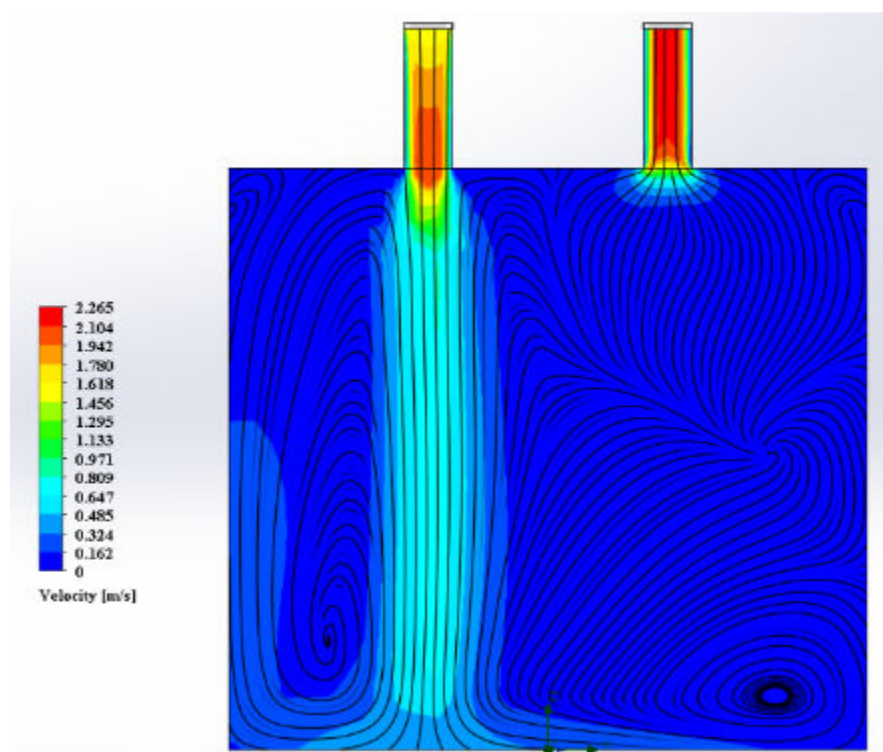
Fonte: O autor (2022).

Figura E35 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 12, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



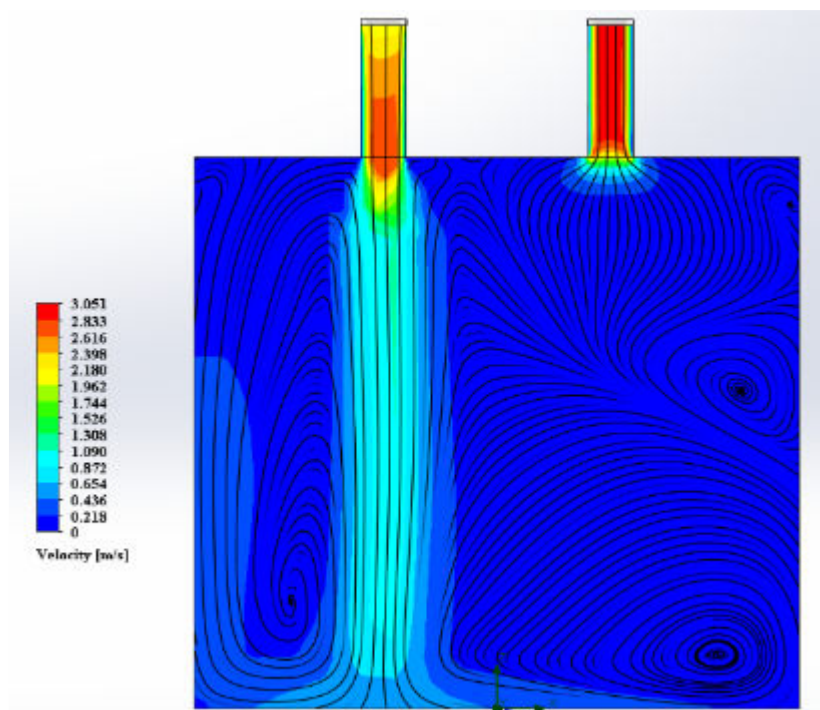
Fonte: O autor (2022).

Figura E36 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 13, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



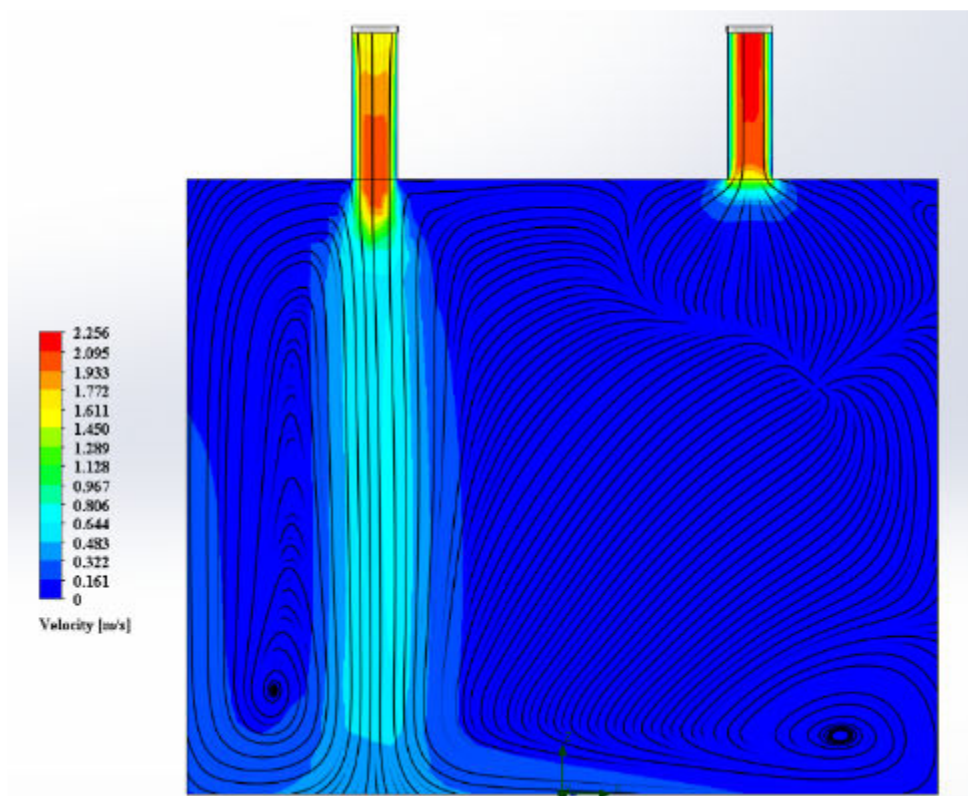
Fonte: O autor (2022).

Figura E37 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 14, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



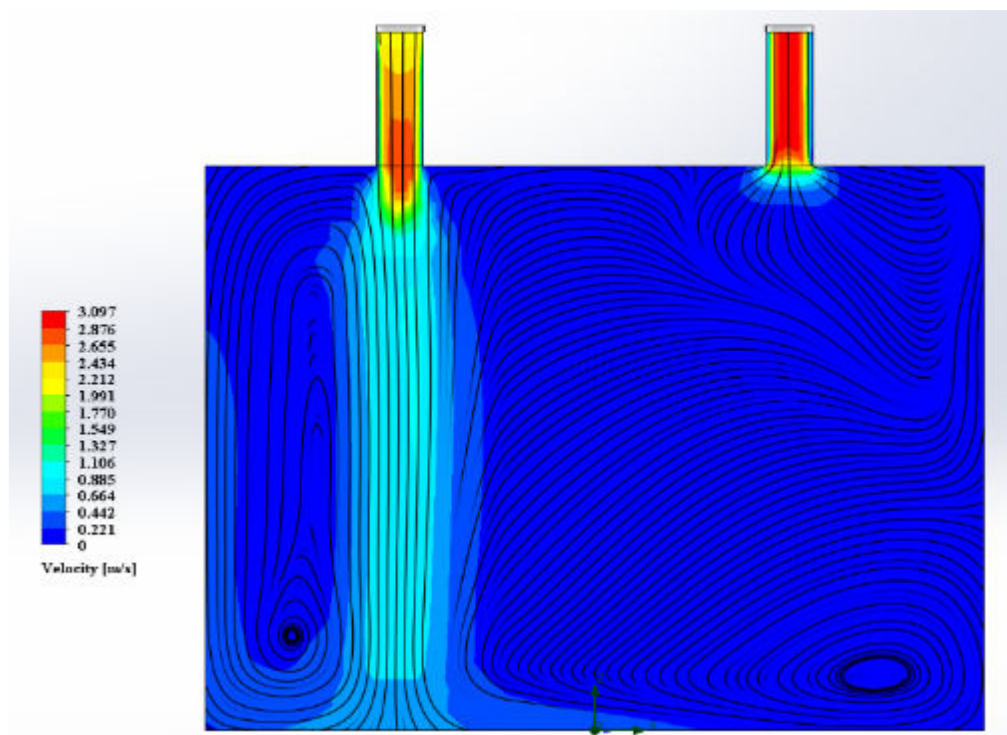
Fonte: O autor (2022).

Figura E38 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 15, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



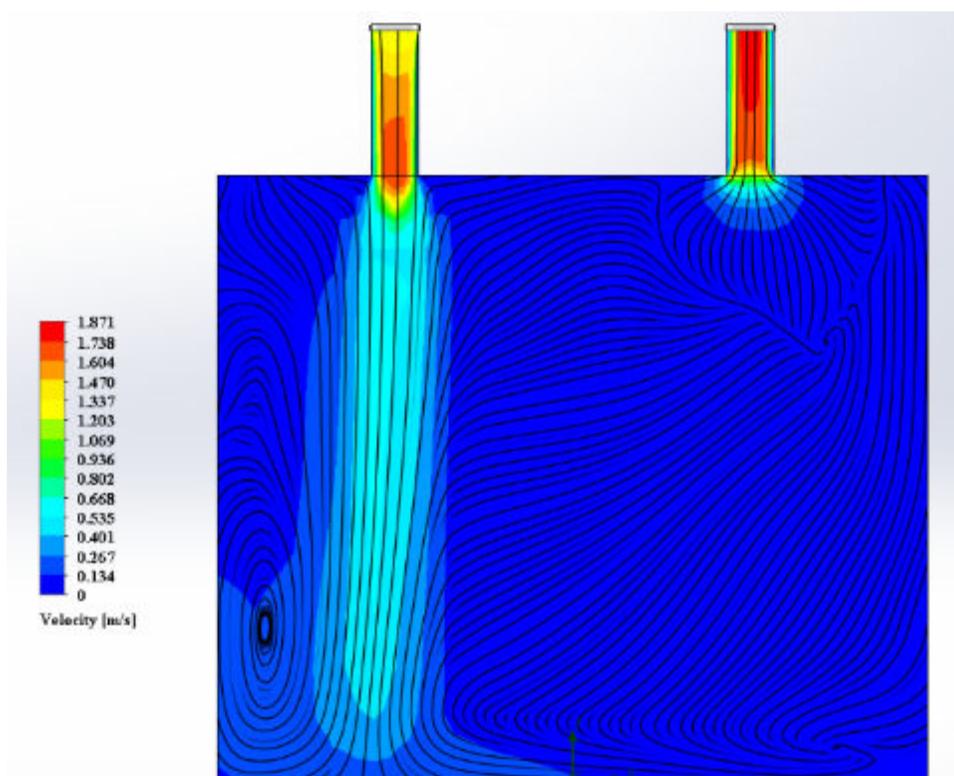
Fonte: O autor (2022).

Figura E39 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 16, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



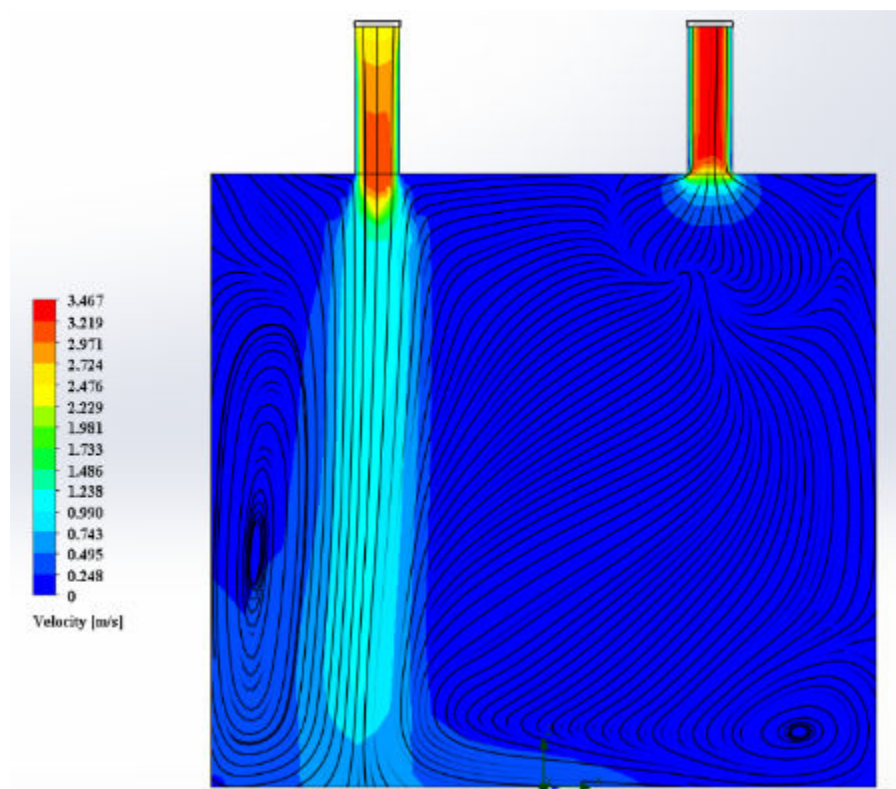
Fonte: O autor (2022).

Figura E40 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 17, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



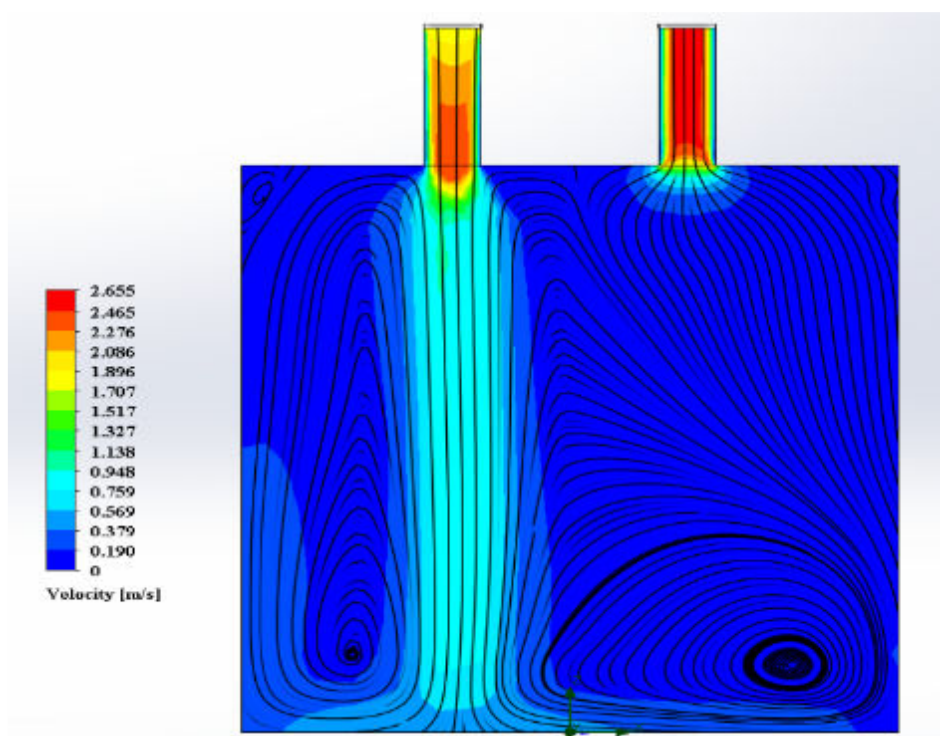
Fonte: O autor (2022).

Figura E41 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 18, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



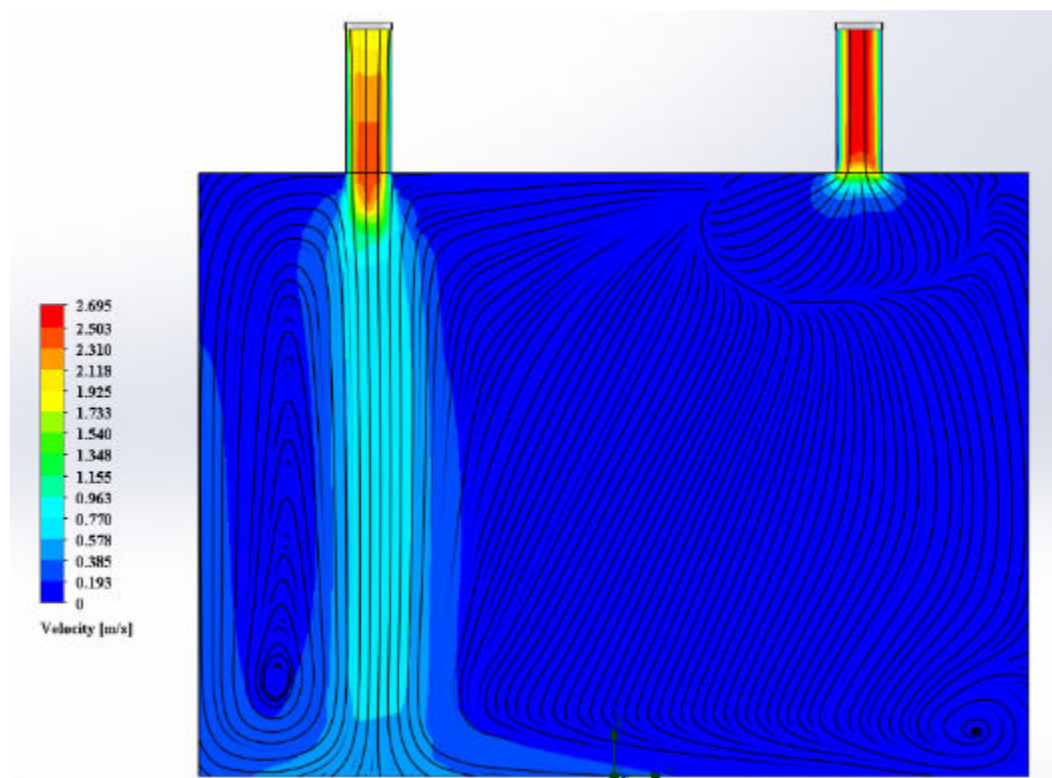
Fonte: O autor (2022).

Figura E42 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 19, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



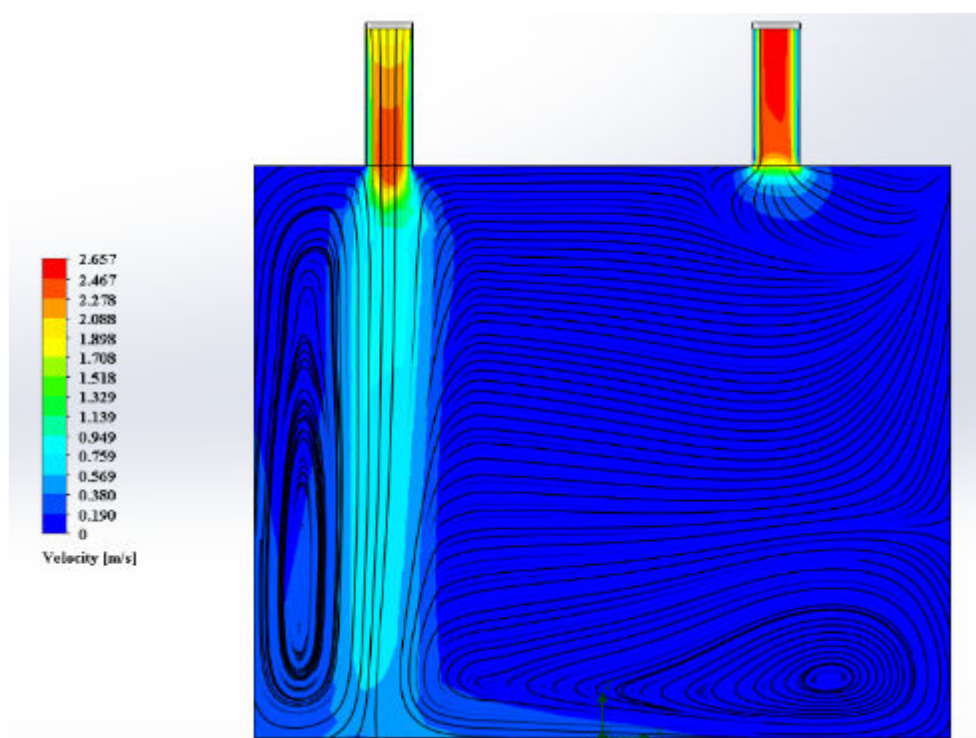
Fonte: O autor (2022).

Figura E43 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 20, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



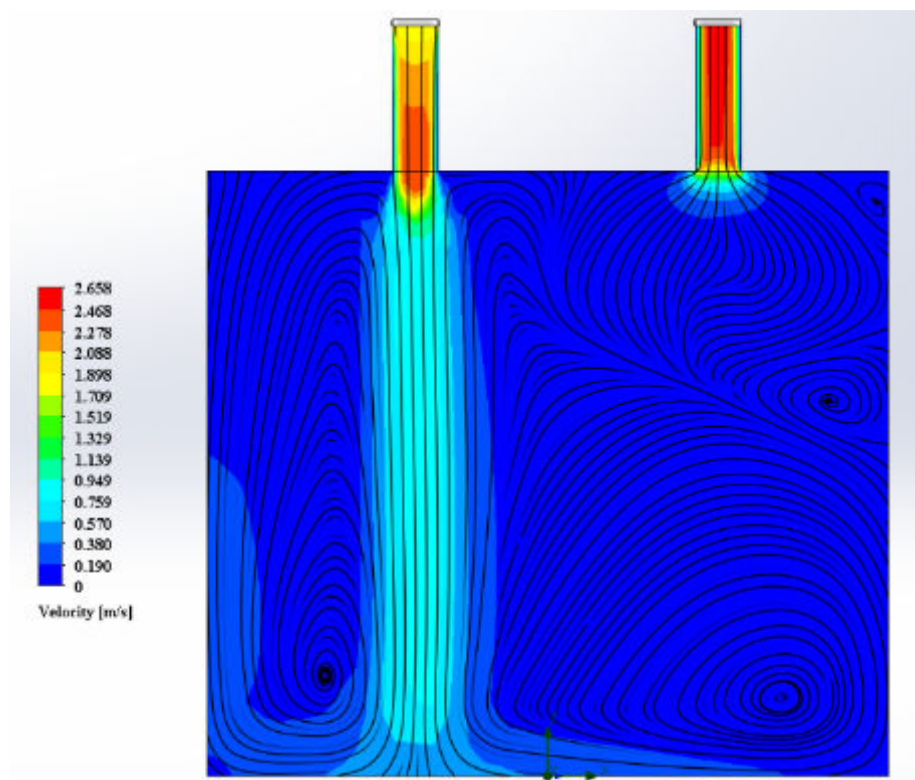
Fonte: O autor (2022).

Figura E44 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 21, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



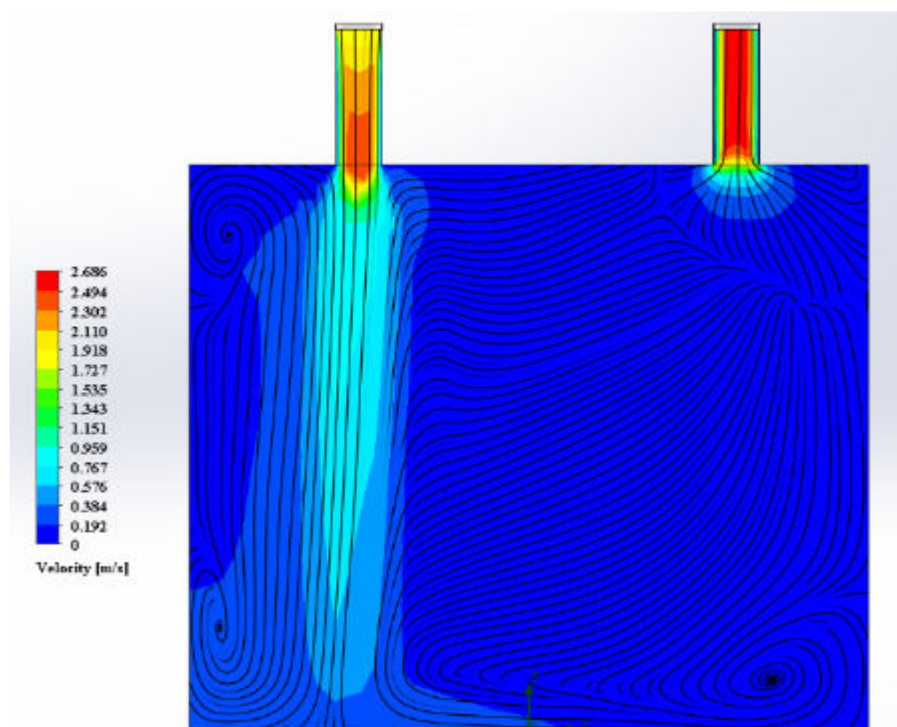
Fonte: O autor (2022).

Figura E45 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 22, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



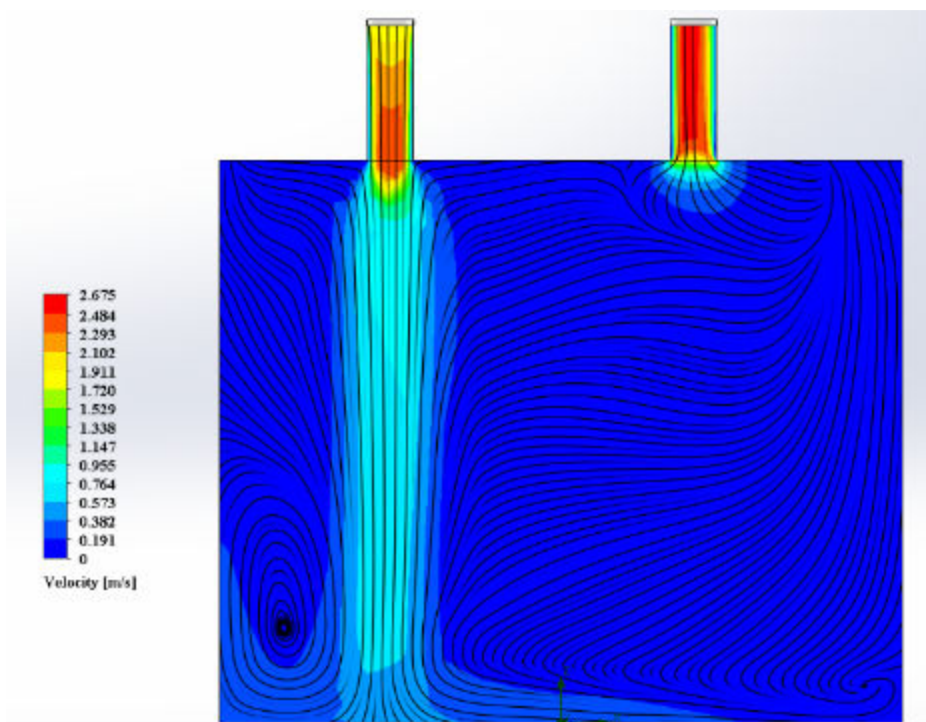
Fonte: O autor (2022).

Figura E46 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 23, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



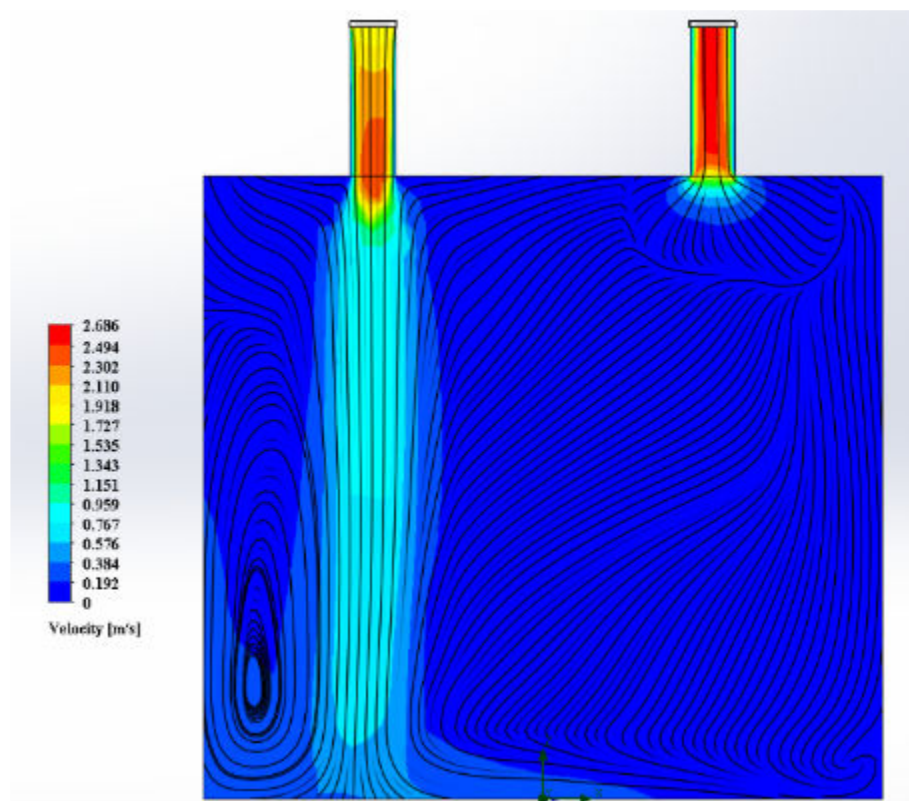
Fonte: O autor (2022).

Figura E47 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 24, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).

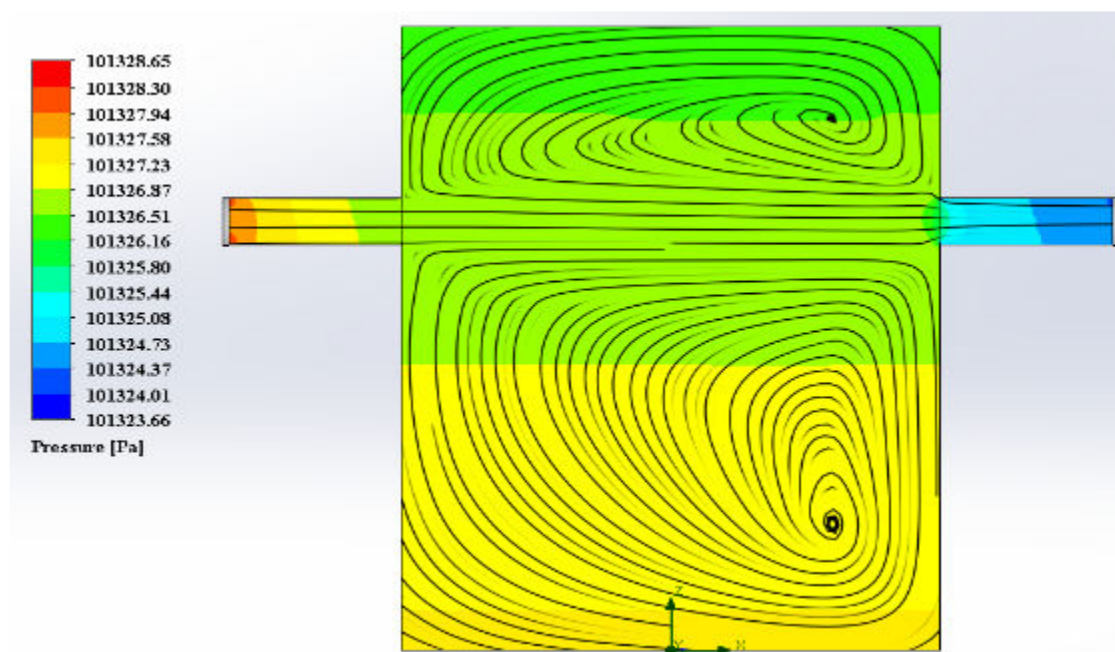
Figura E48 – Velocidade de escoamento do ar na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 25, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).

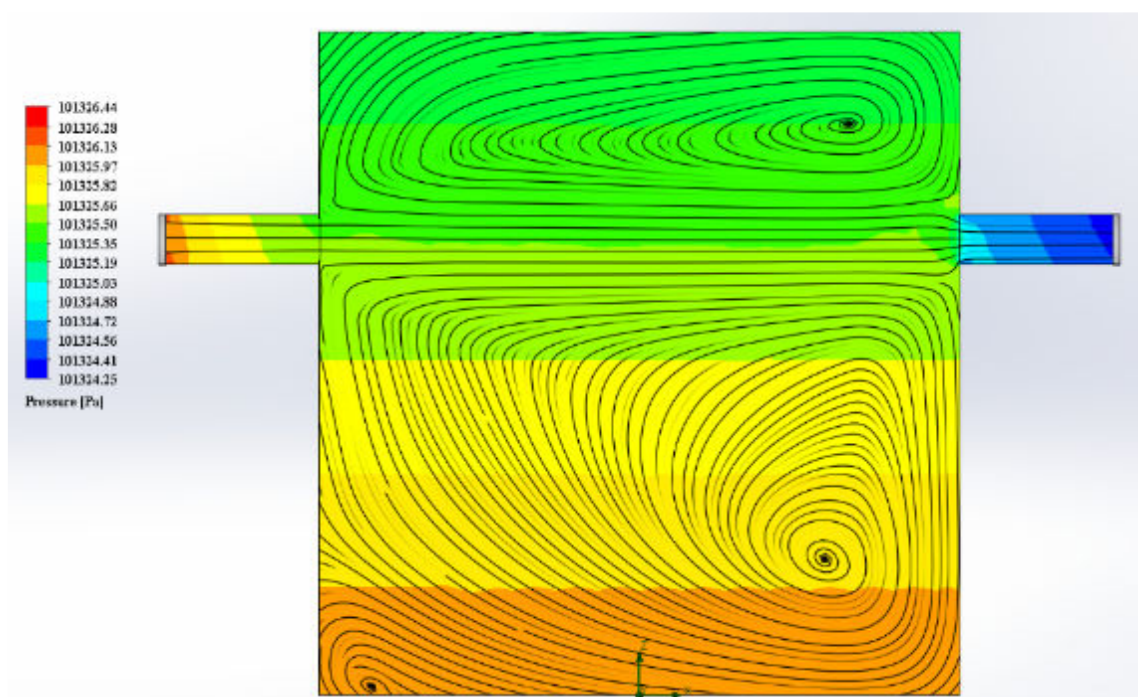
APÊNDICE F – PRESSÃO INTERNA NA CÉLULA REACIONAL E AS LINHAS DE CORRENTES

Figura F1 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 2, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



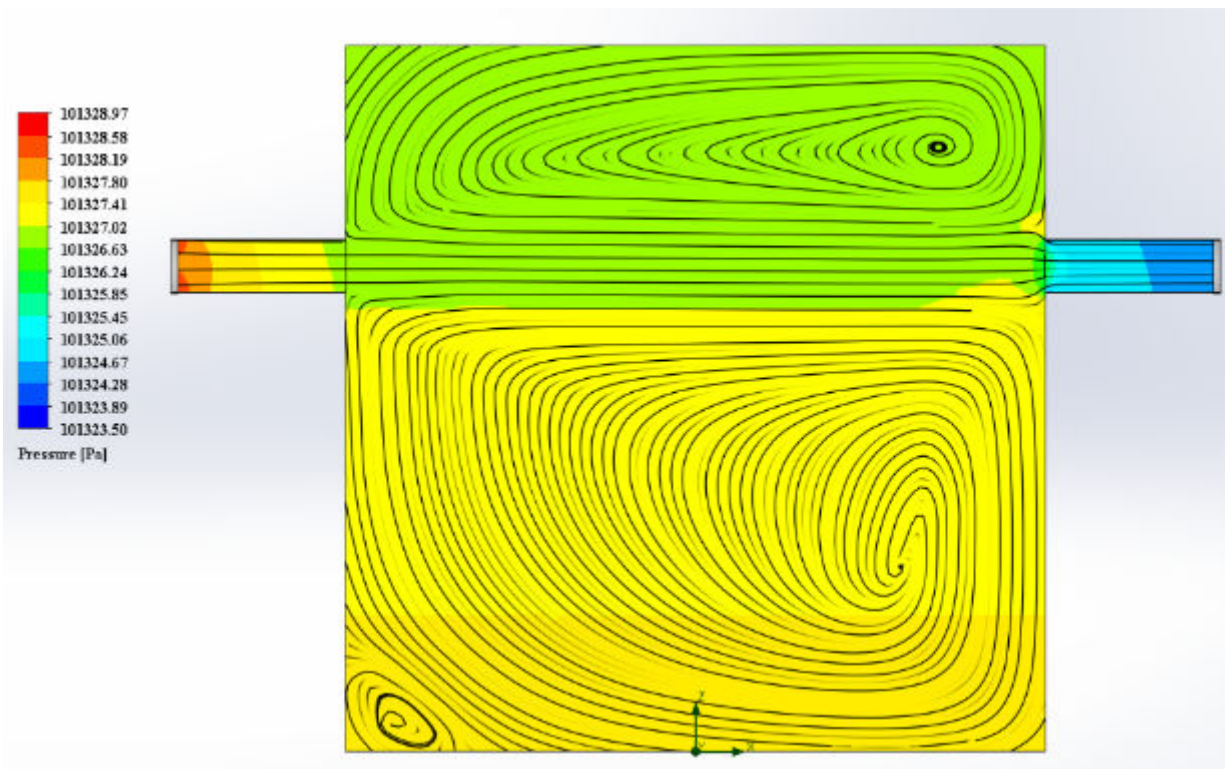
Fonte: O autor (2022).

Figura F2 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 3, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



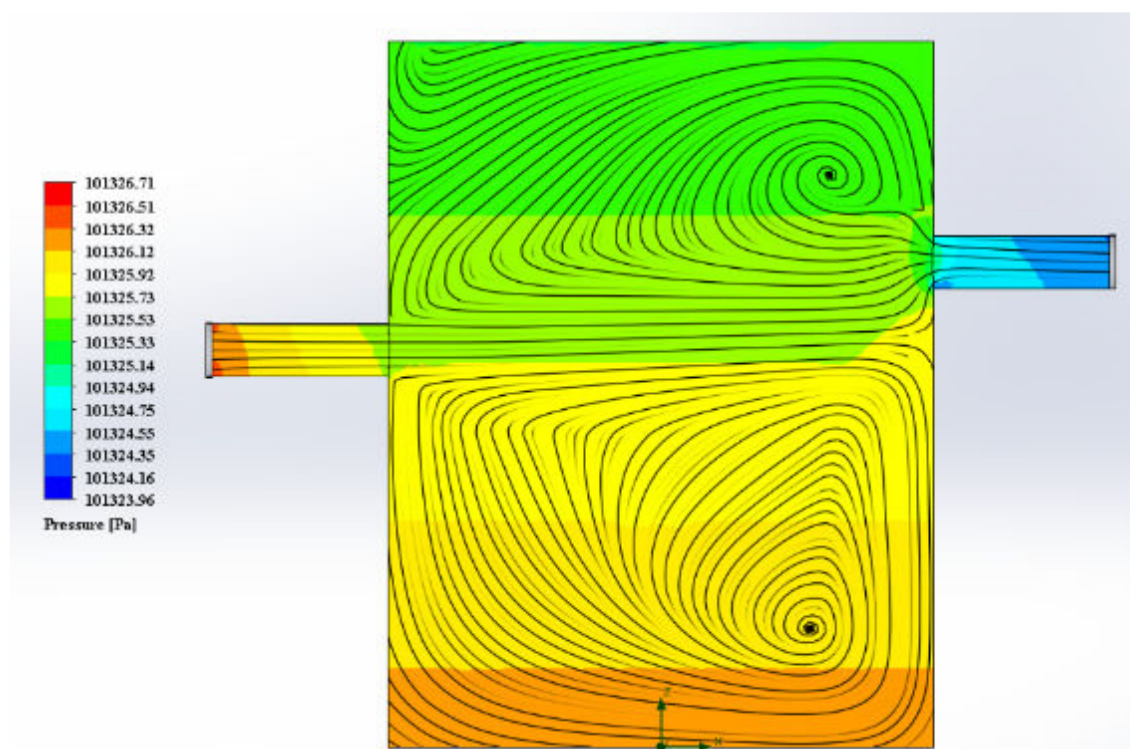
Fonte: O autor (2022).

Figura F3 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 4, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



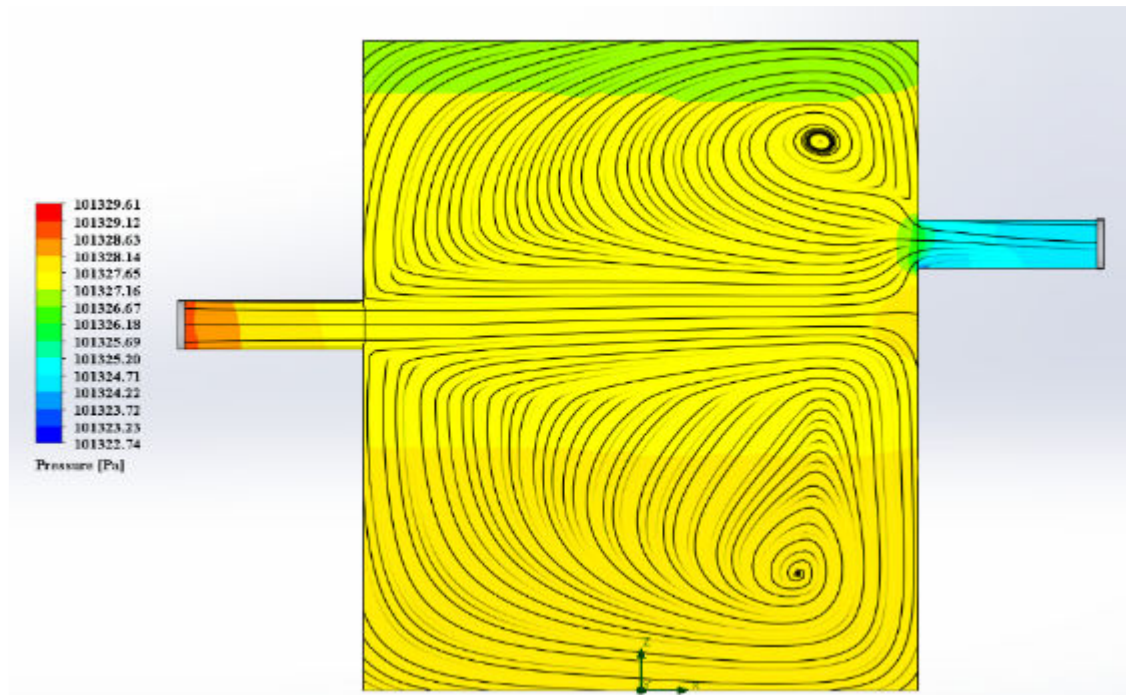
Fonte: O autor (2022).

Figura F4 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 5, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



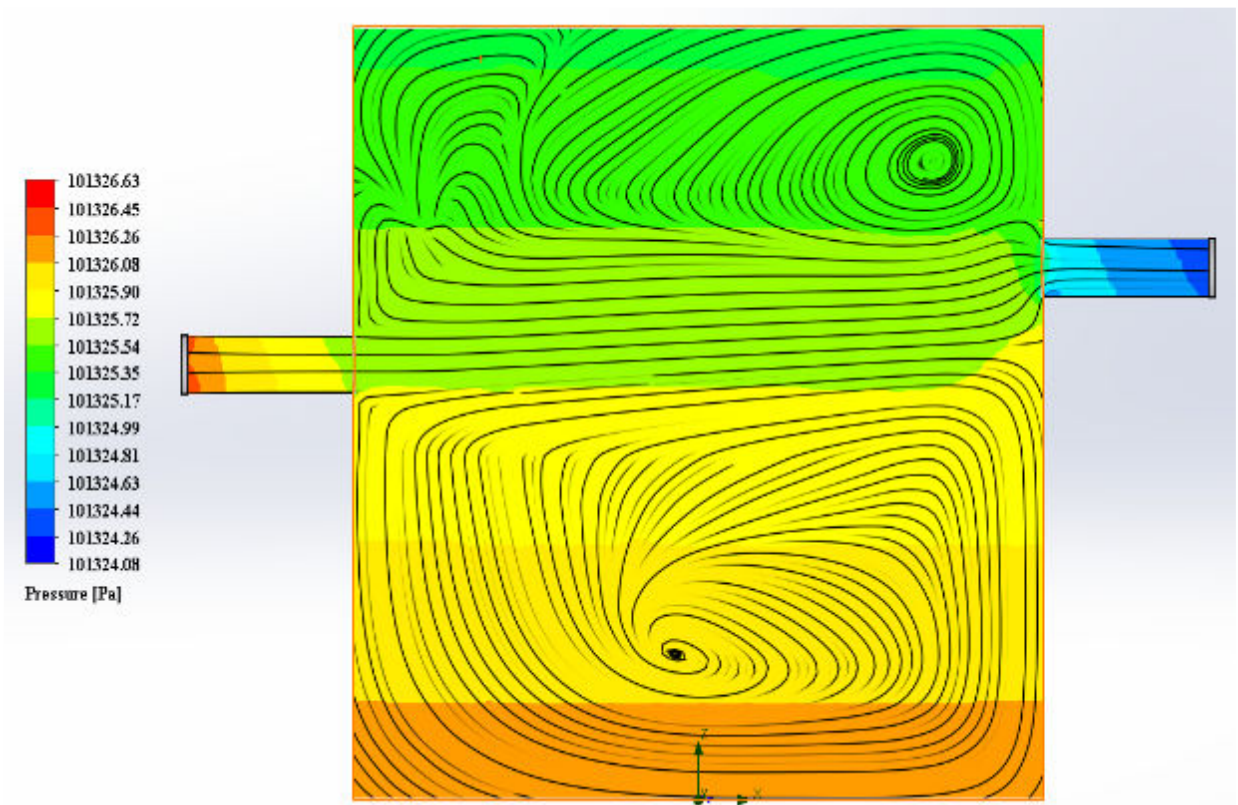
Fonte: O autor (2022).

Figura F5 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 6, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



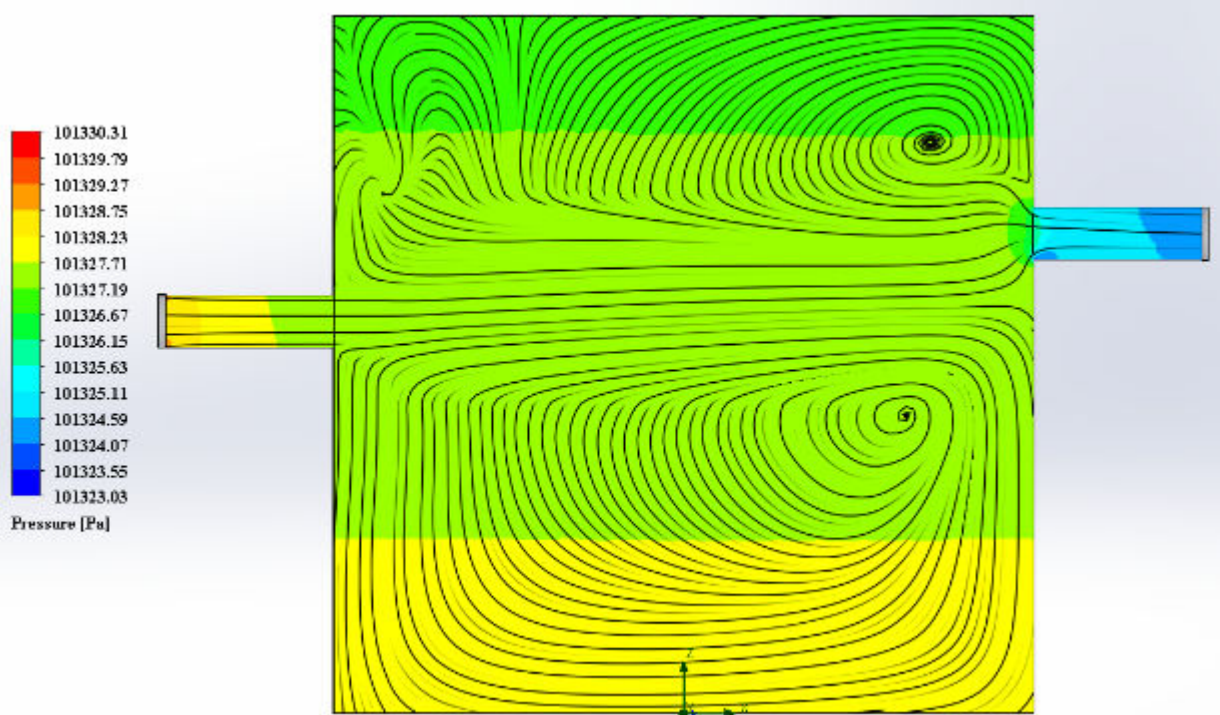
Fonte: O autor (2022).

Figura F6 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 7, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



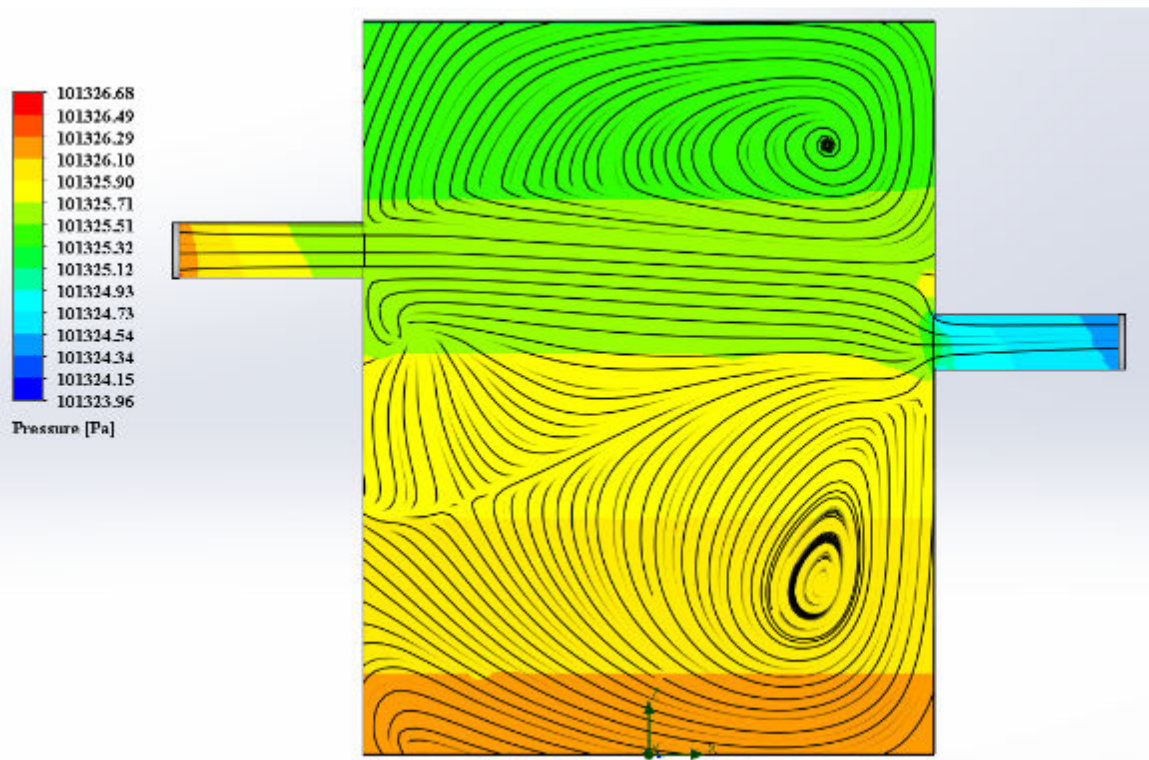
Fonte: O autor (2022).

Figura F7 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 8, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



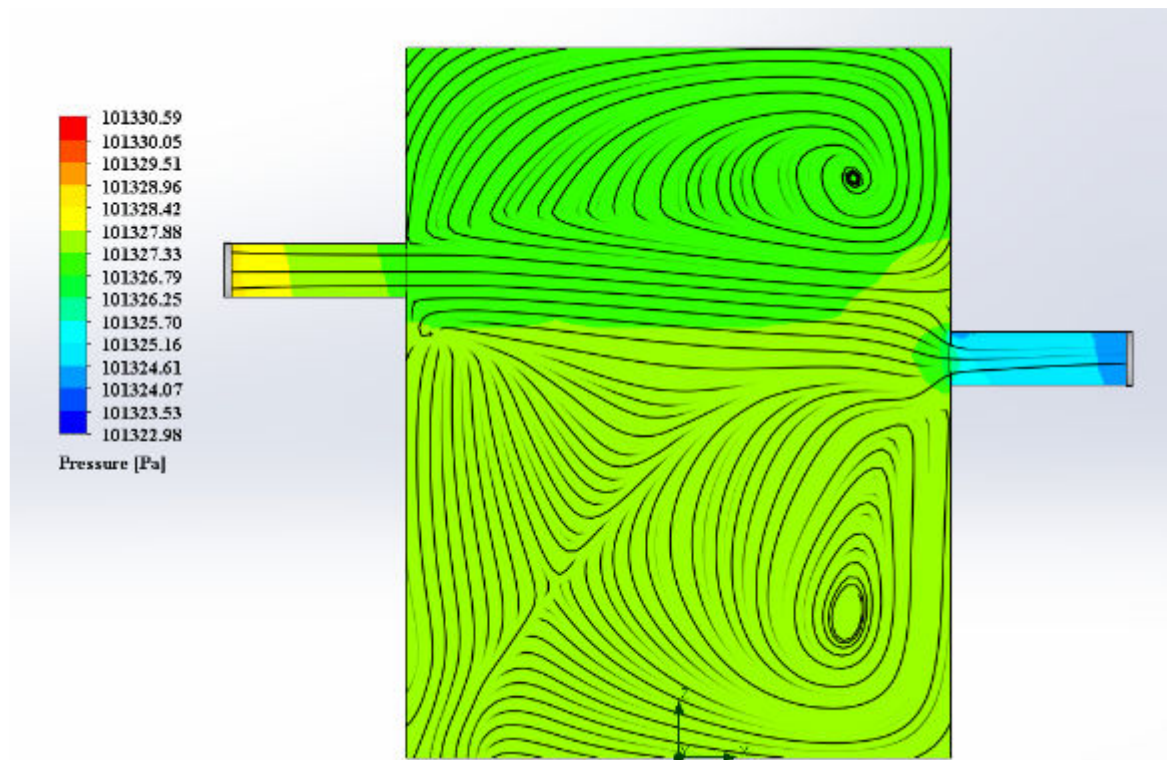
Fonte: O autor (2022).

Figura F8 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 9, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



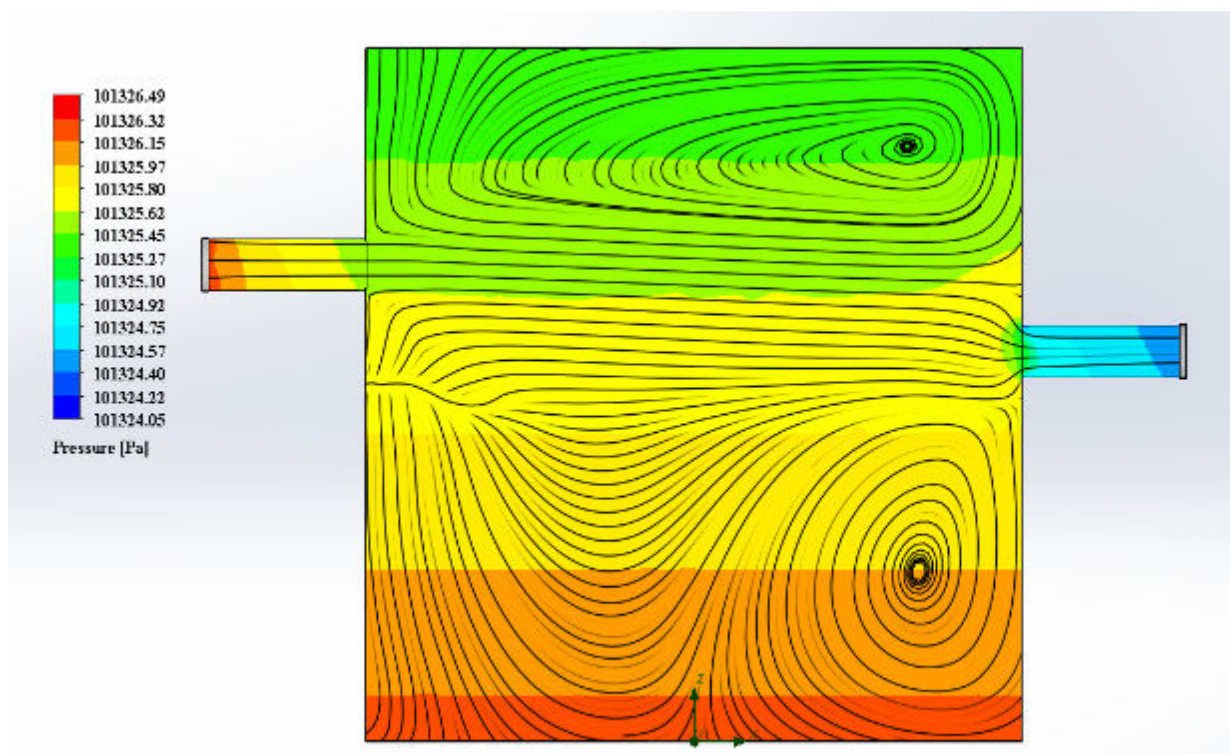
Fonte: O autor (2022).

Figura F9 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 10, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



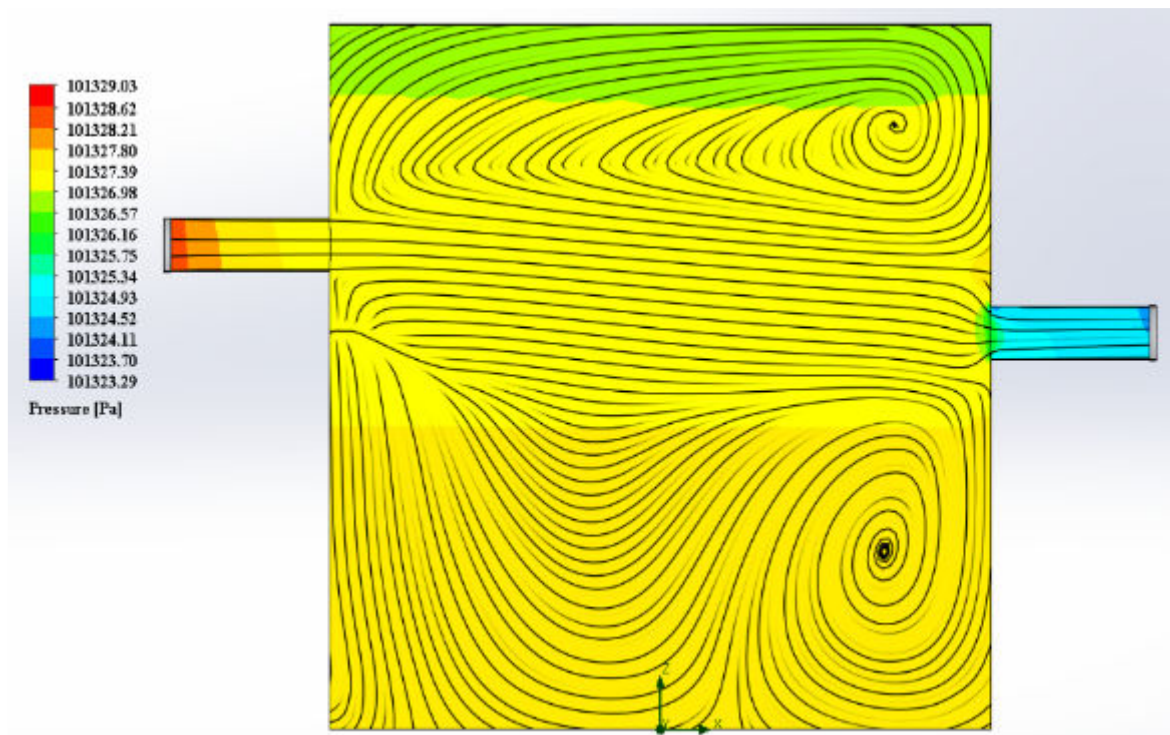
Fonte: O autor (2022).

Figura F10 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 11, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



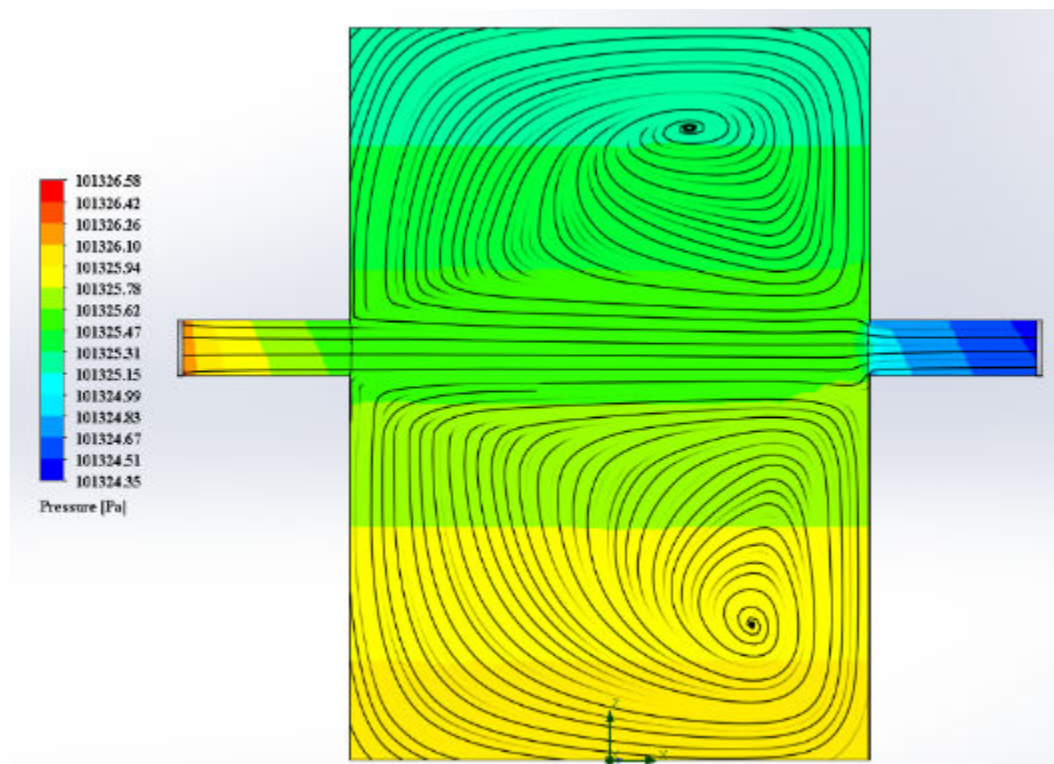
Fonte: O autor (2022).

Figura F11 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 12, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



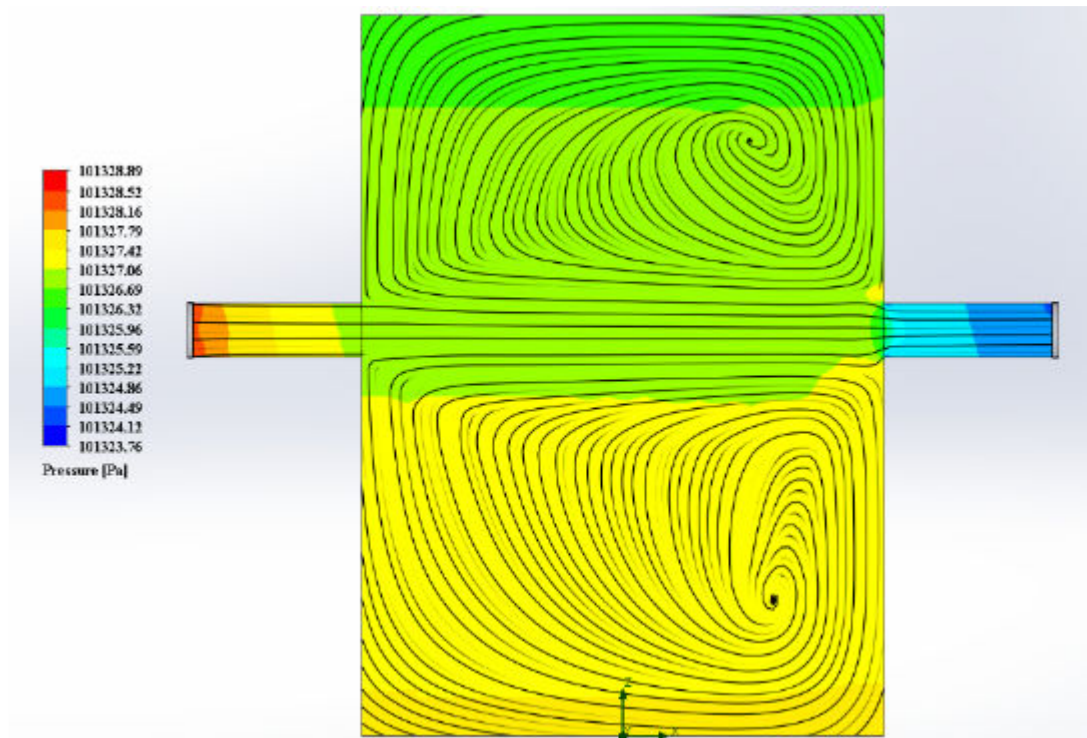
Fonte: O autor (2022).

Figura F12 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 13, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



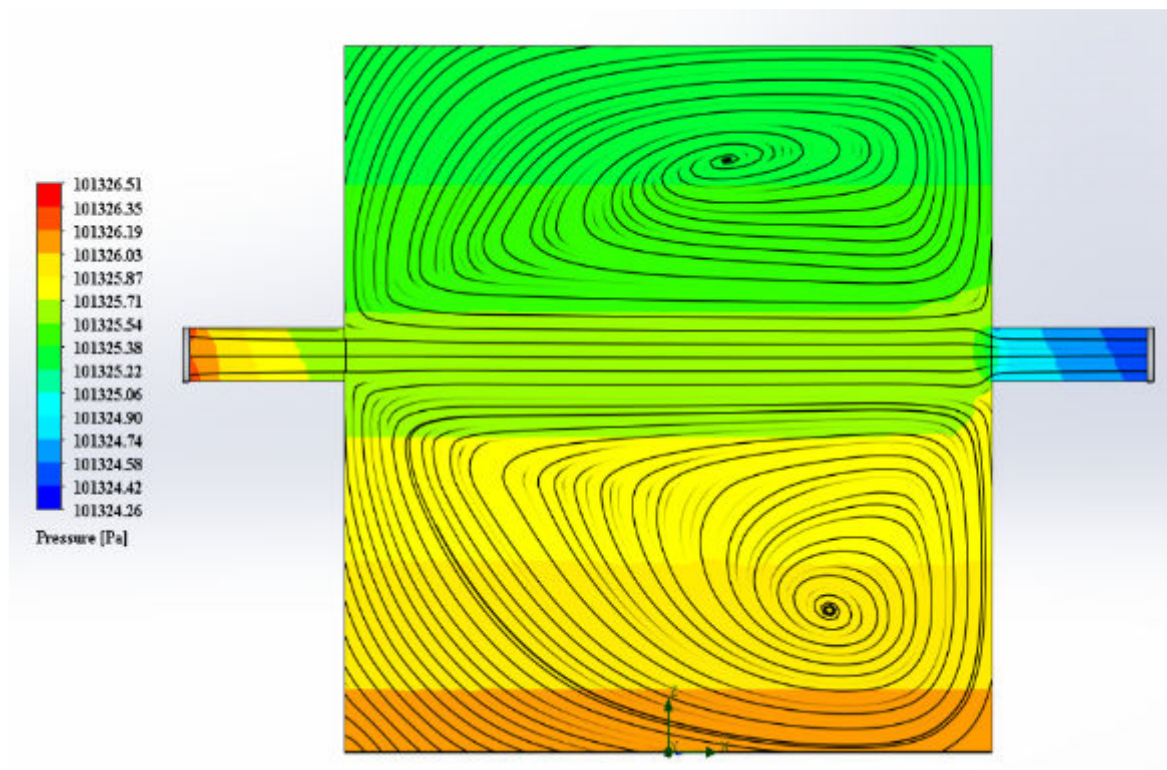
Fonte: O autor (2022).

Figura F13 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 14, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



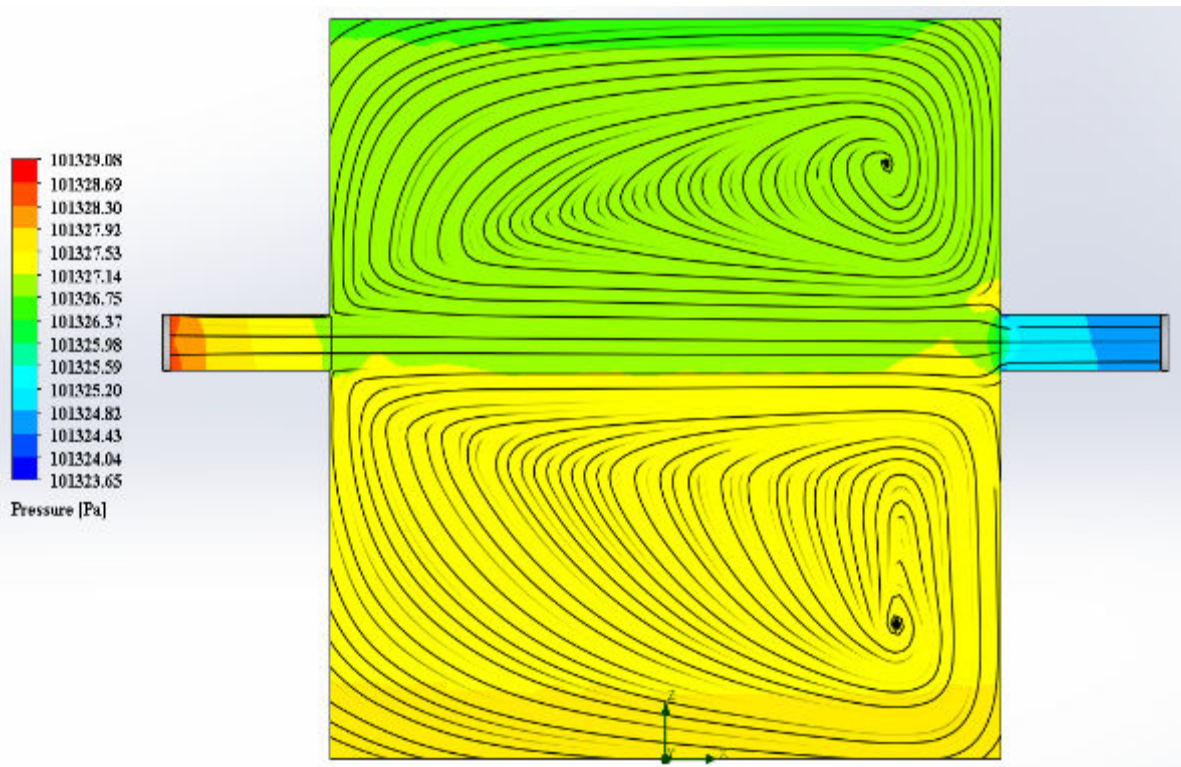
Fonte: O autor (2022).

Figura F14 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 15, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



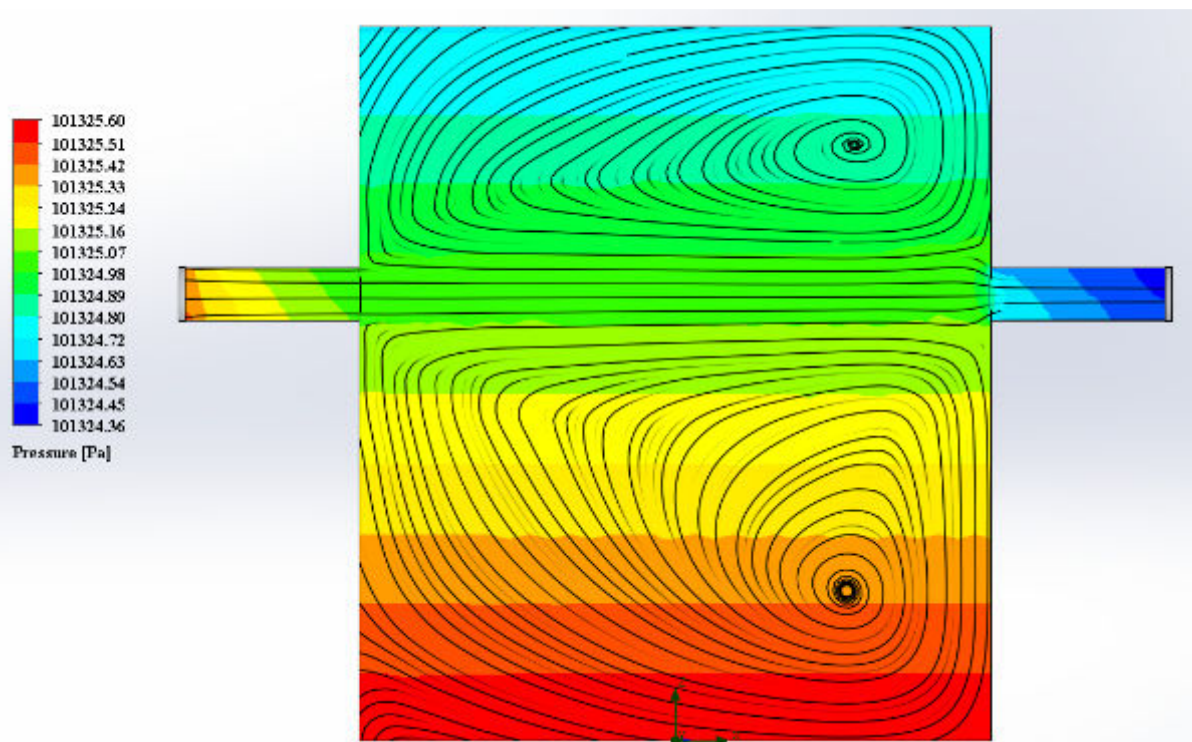
Fonte: O autor (2022).

Figura F15 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 16, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



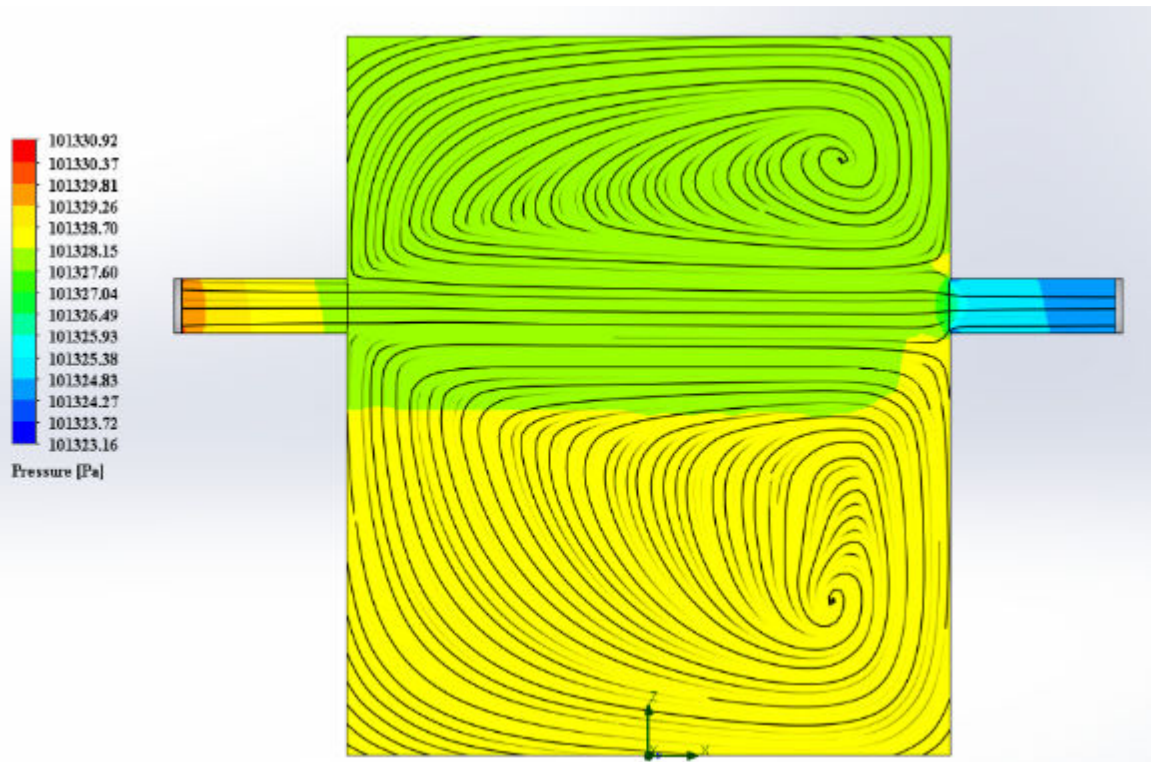
Fonte: O autor (2022).

Figura F16 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 17, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



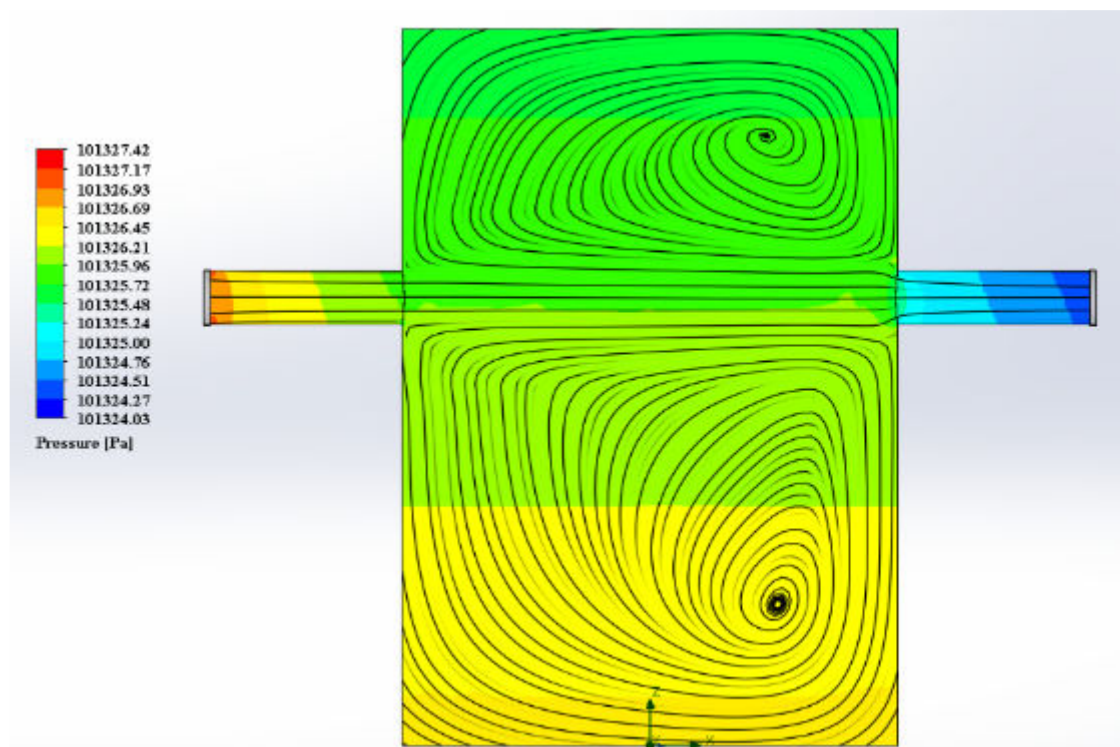
Fonte: O autor (2022).

Figura F17 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 18, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



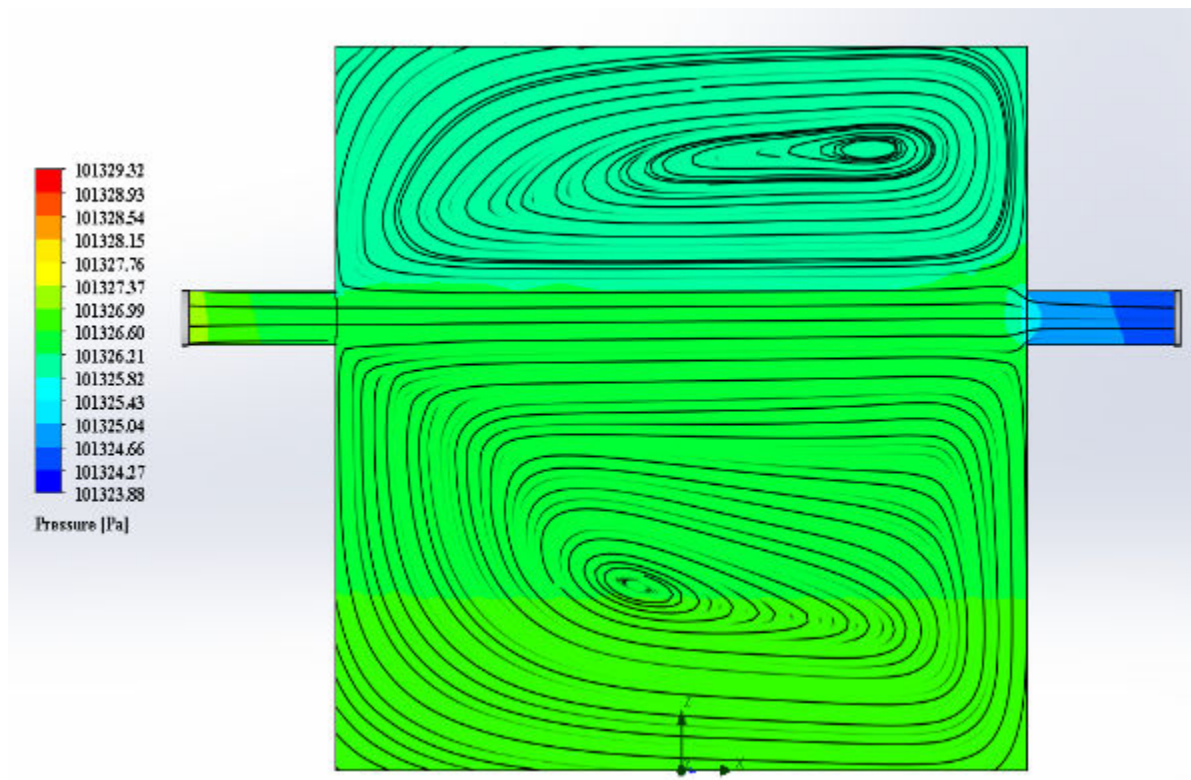
Fonte: O autor (2022).

Figura F18 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 19, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



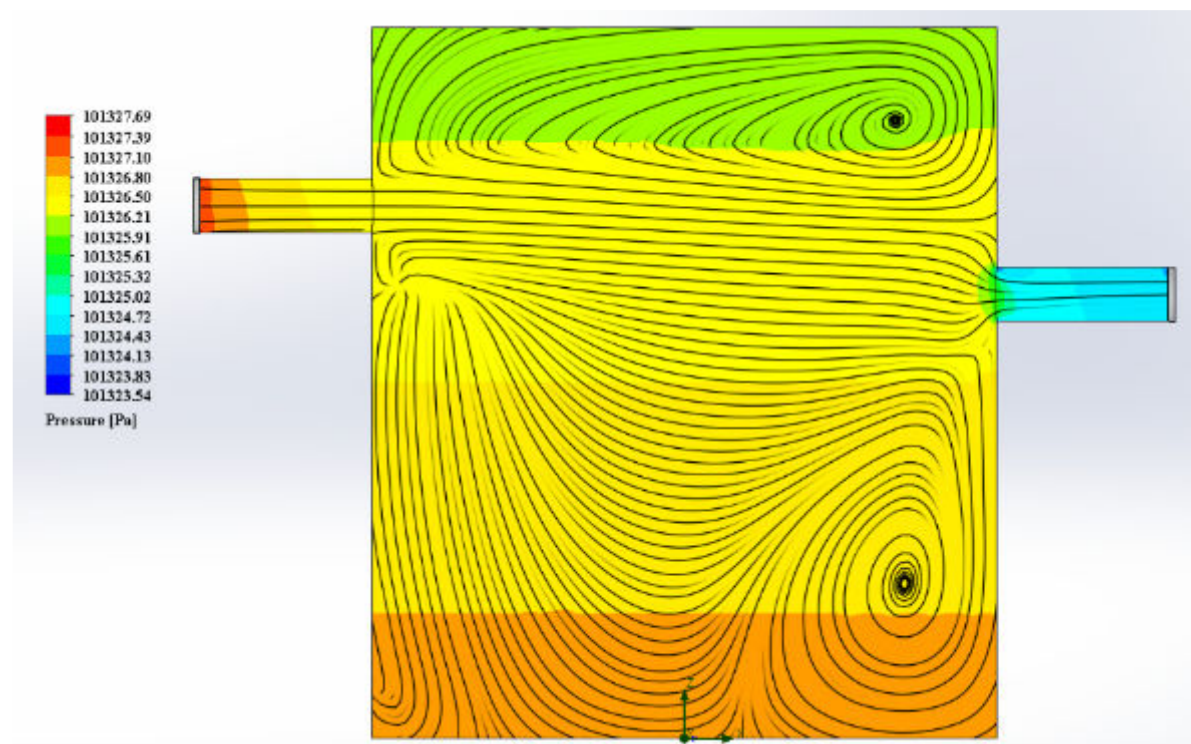
Fonte: O autor (2022).

Figura F19 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 20, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



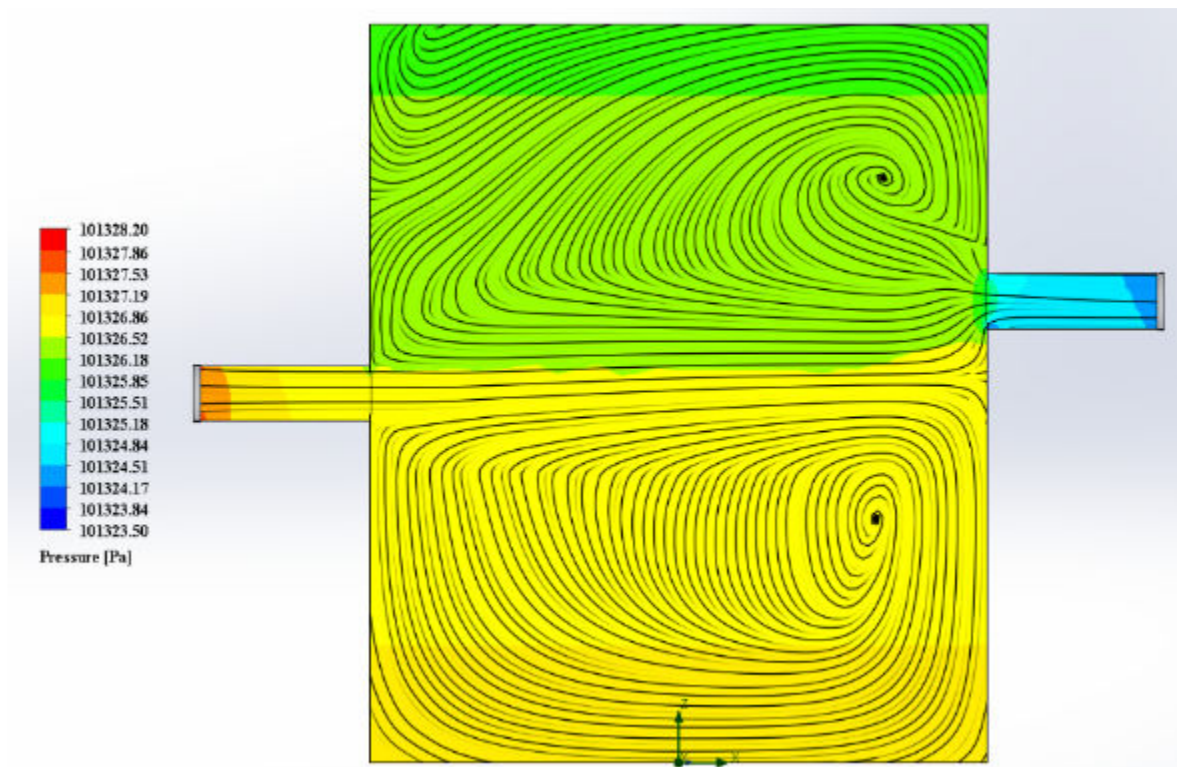
Fonte: O autor (2022).

Figura F20 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 21, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



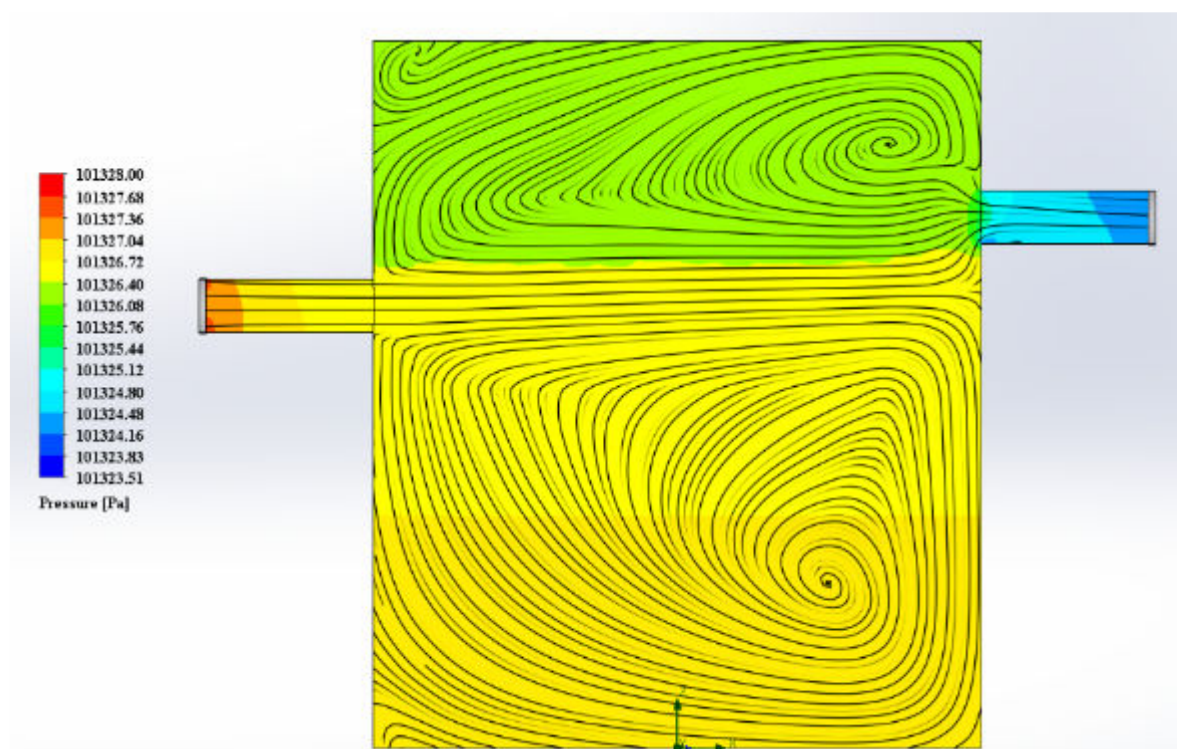
Fonte: O autor (2022).

Figura F22 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 22, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



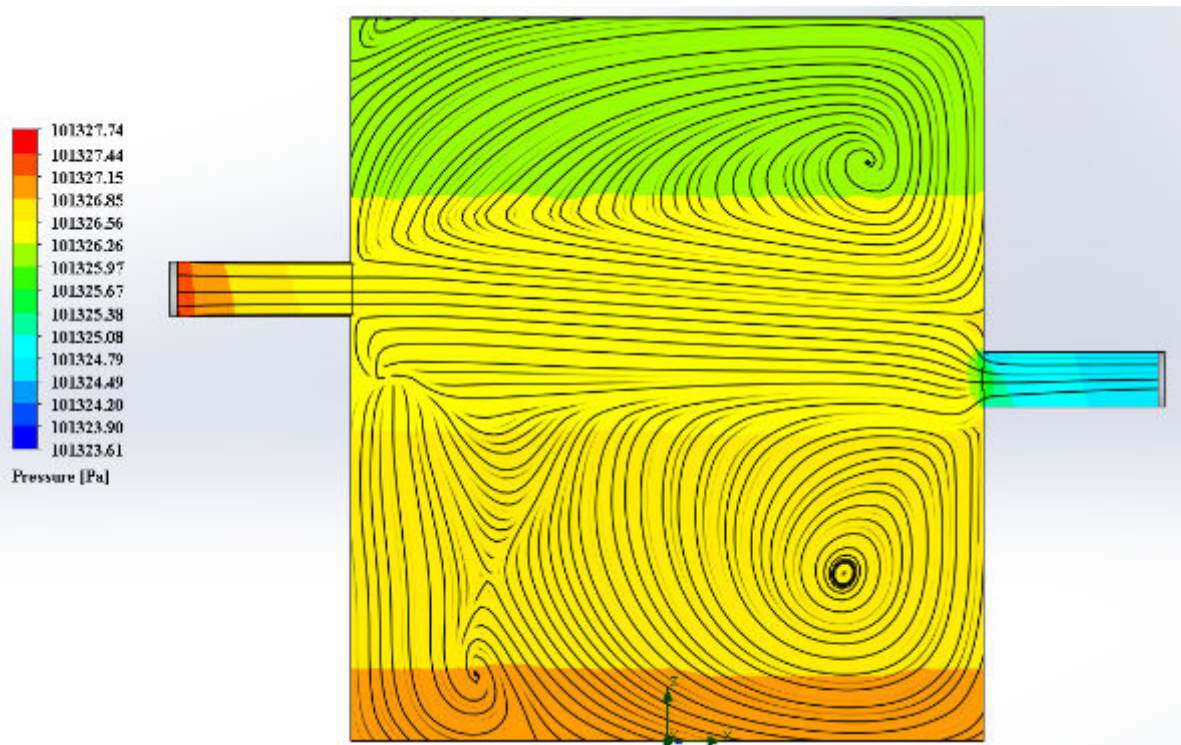
Fonte: O autor (2022).

Figura F23 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 23, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



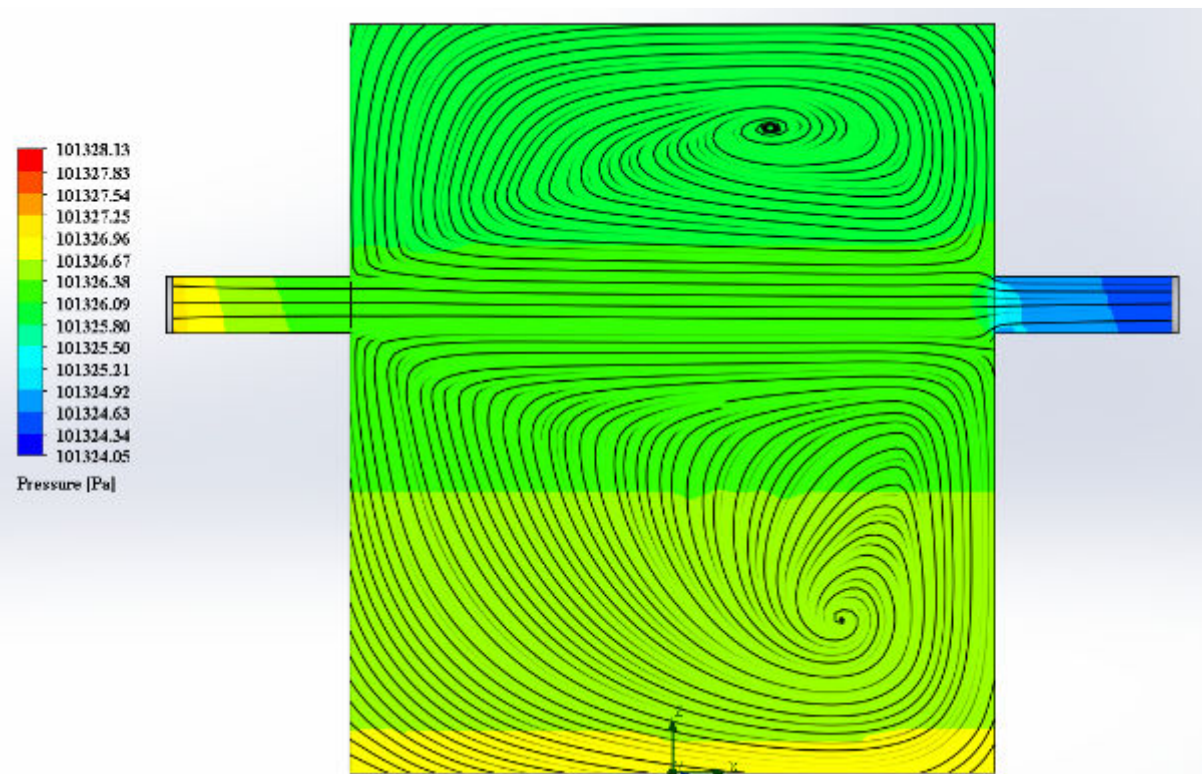
Fonte: O autor (2022).

Figura F24 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 24, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



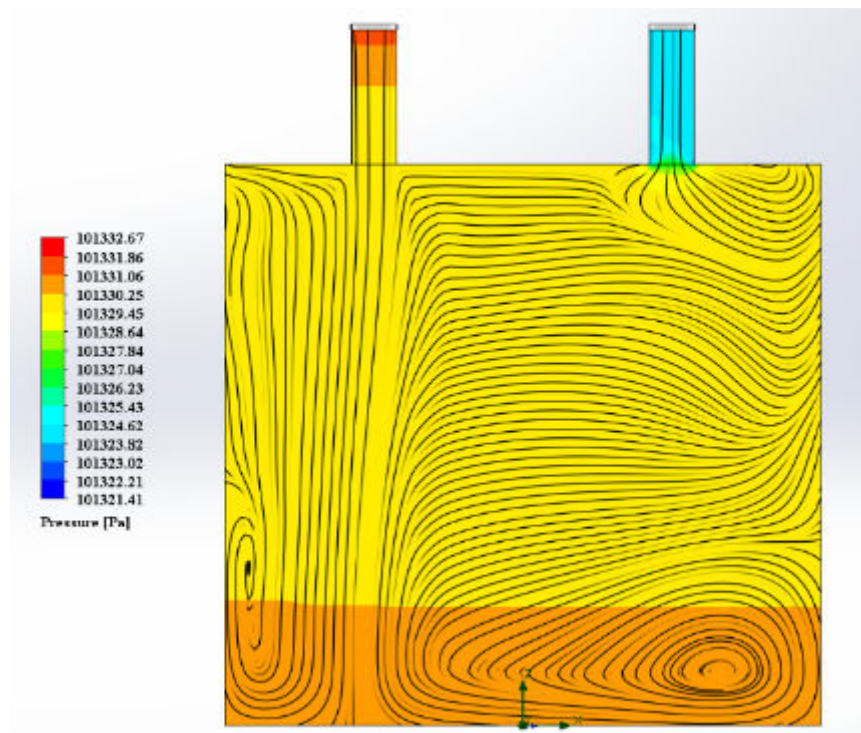
Fonte: O autor (2022).

Figura F25 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 25, para geometria com entrada e saída de ar na parte lateral.



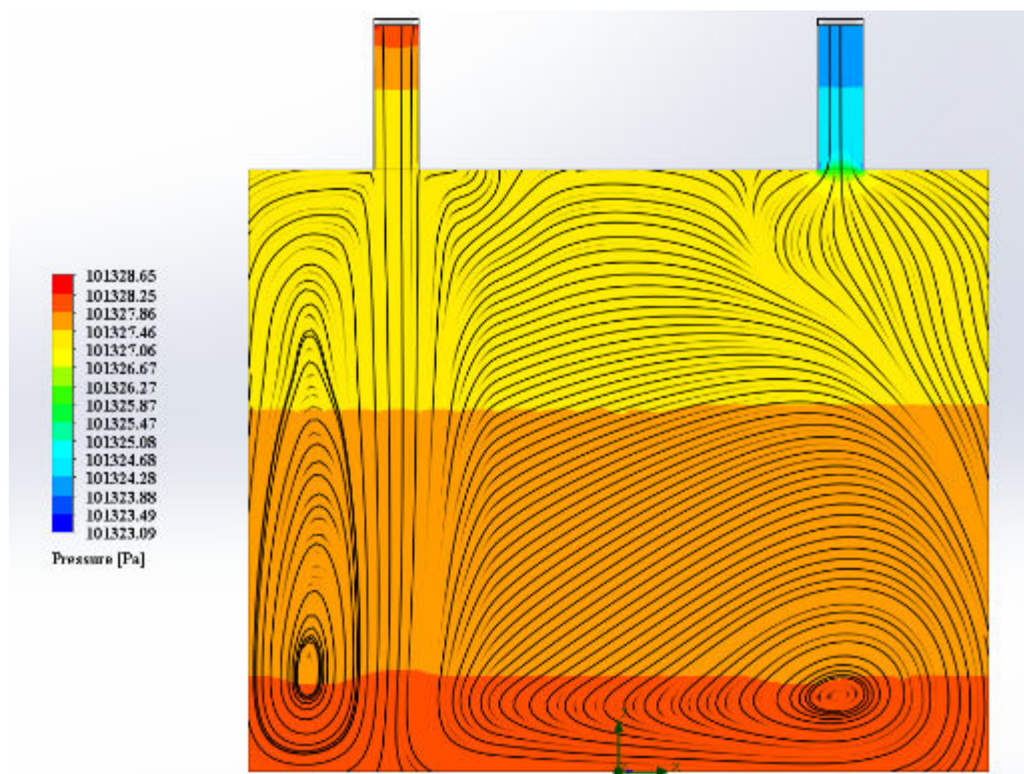
Fonte: O autor (2022).

Figura F26 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 2, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



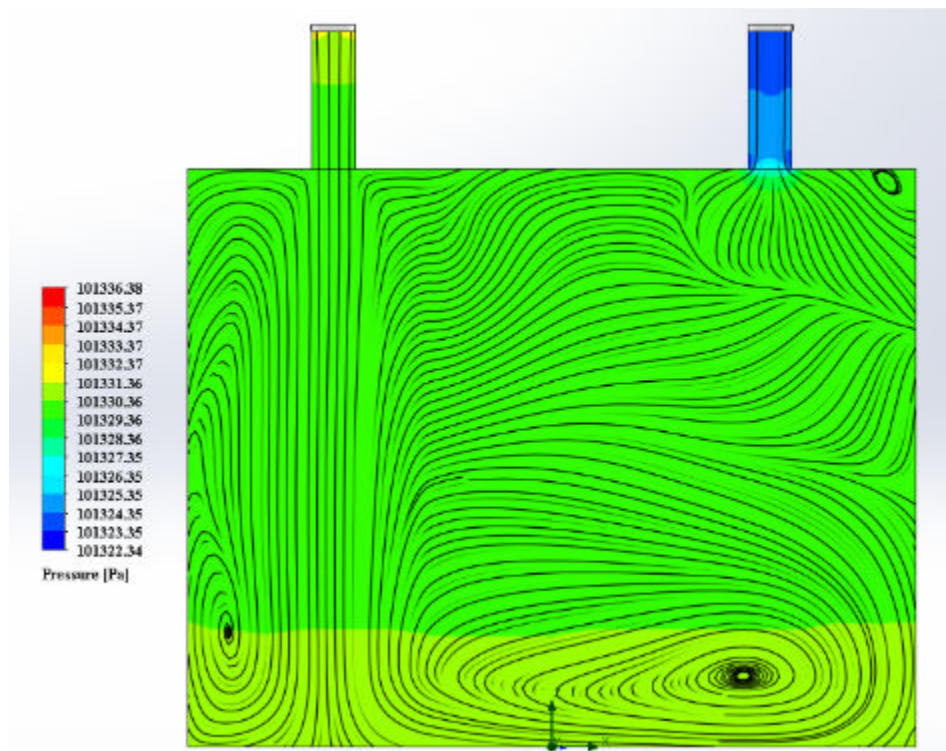
Fonte: O autor (2022).

Figura F27 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 3, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



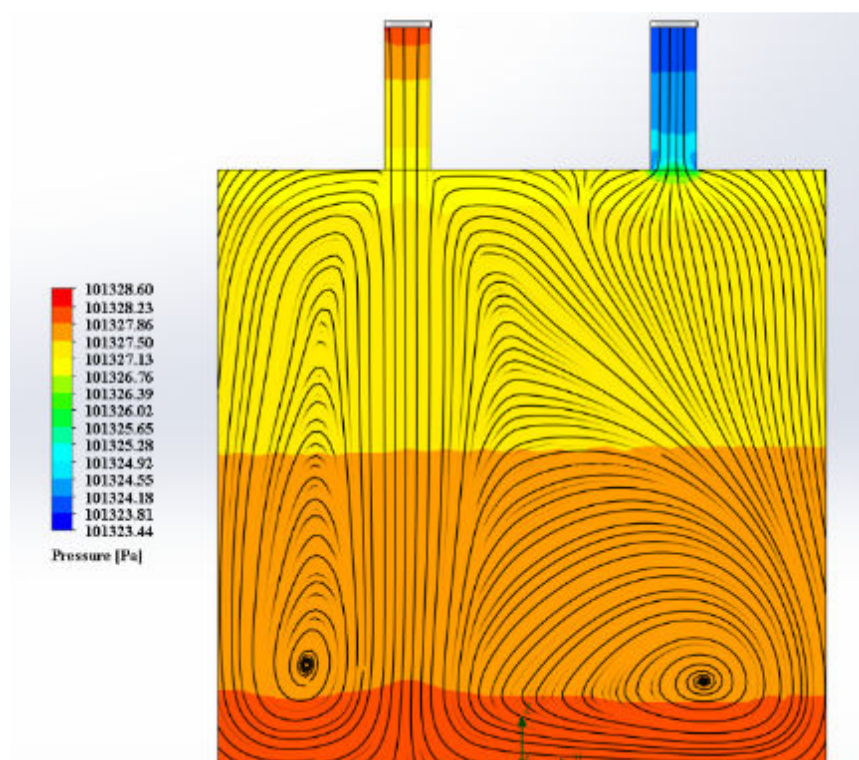
Fonte: O autor (2022).

Figura F28 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 4, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



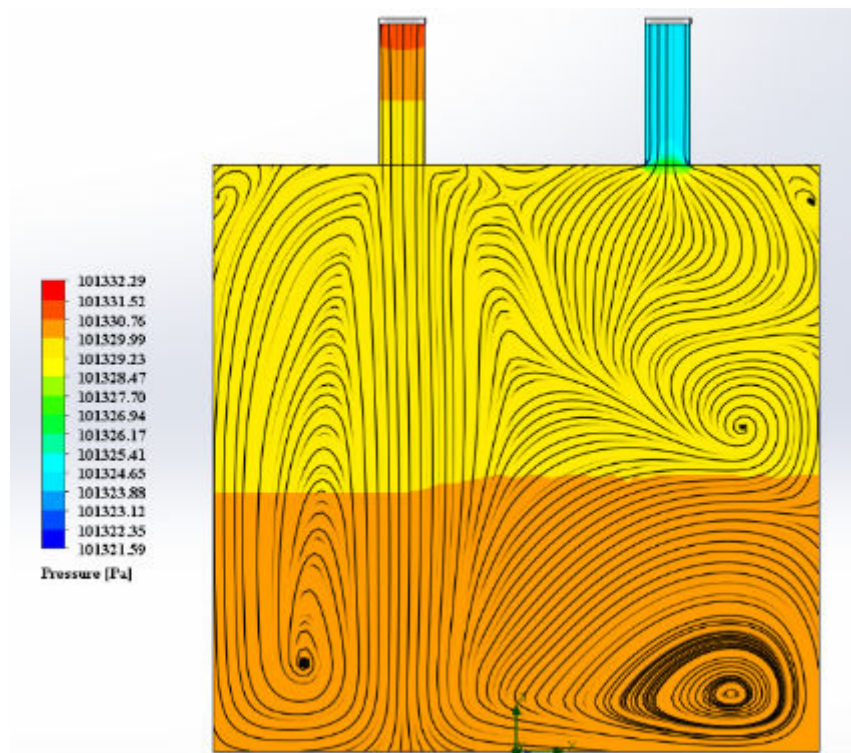
Fonte: O autor (2022).

Figura F29 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 5, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



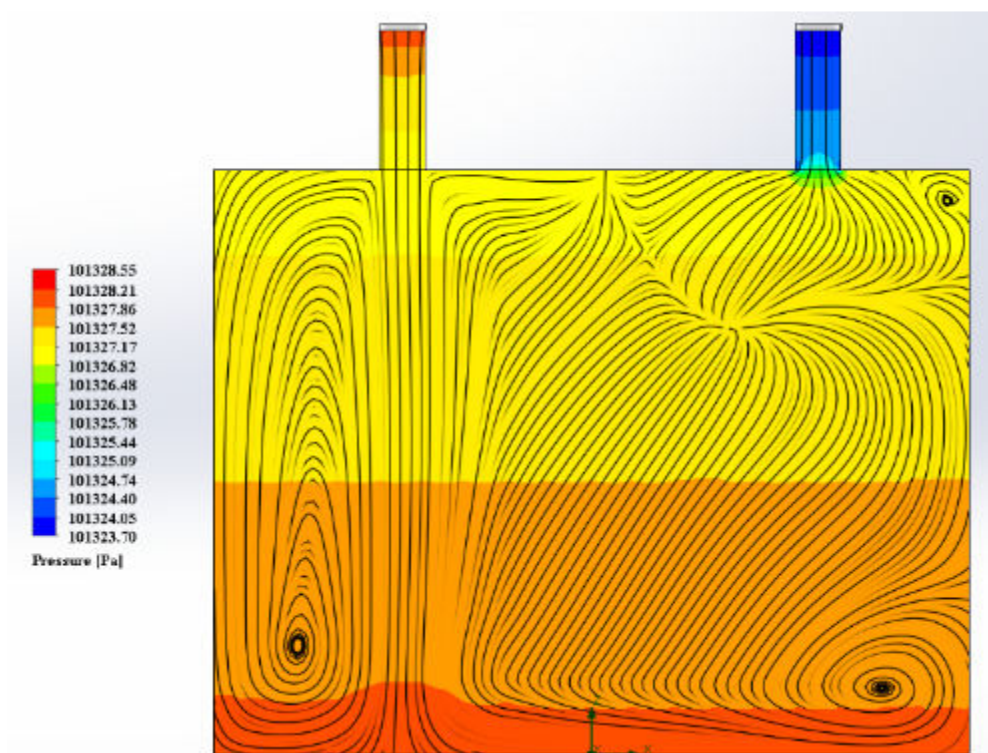
Fonte: O autor (2022).

Figura F30 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 6, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



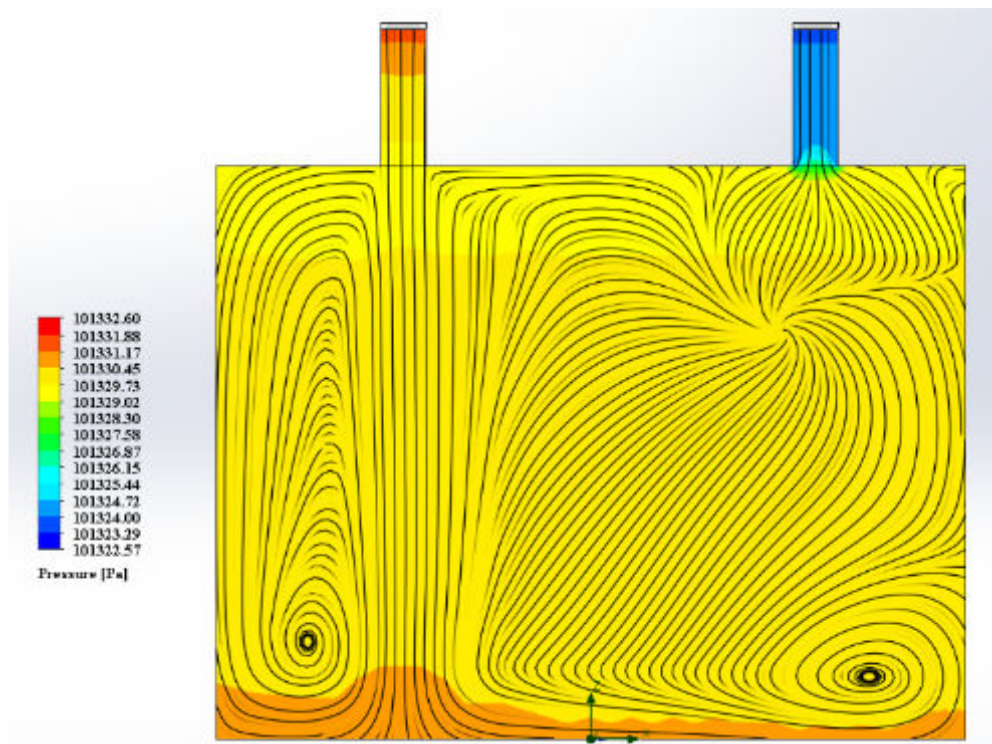
Fonte: O autor (2022).

Figura F31 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 7, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



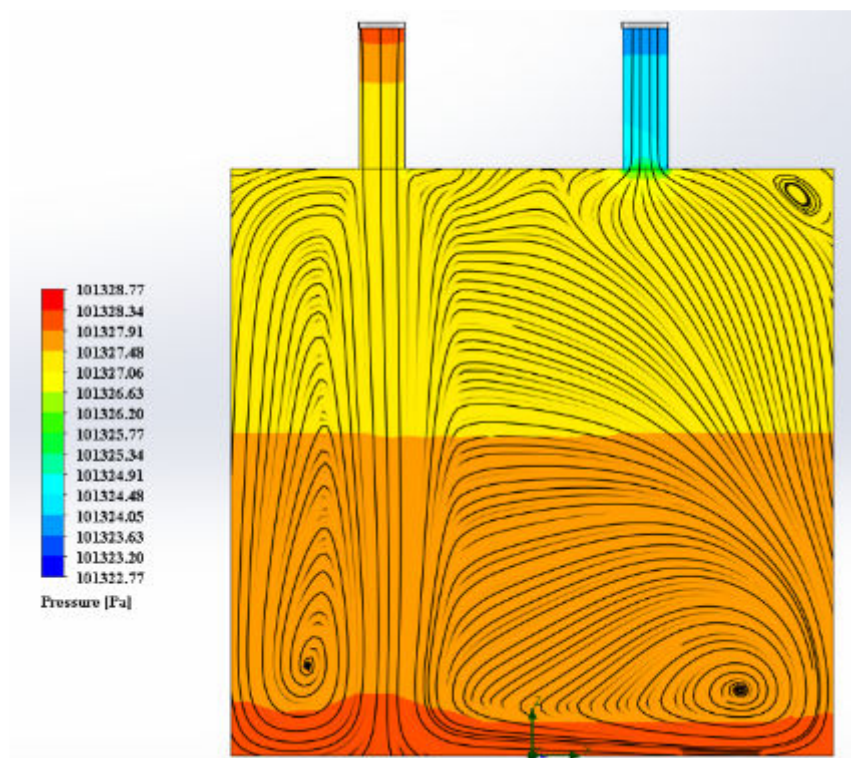
Fonte: O autor (2022).

Figura F31 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 8, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



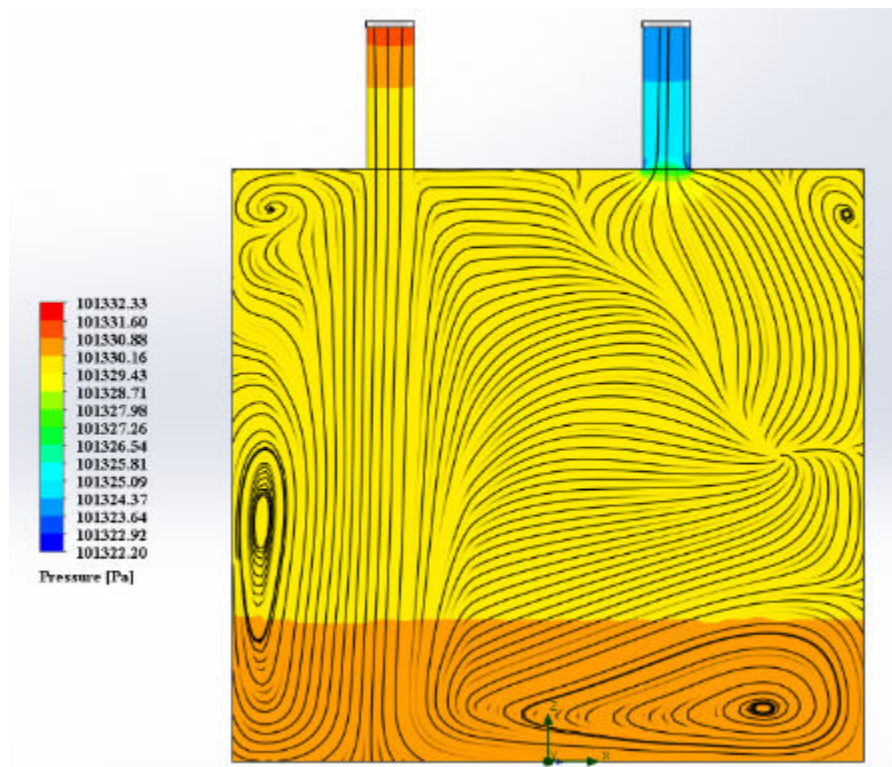
Fonte: O autor (2022).

Figura F32 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 9, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



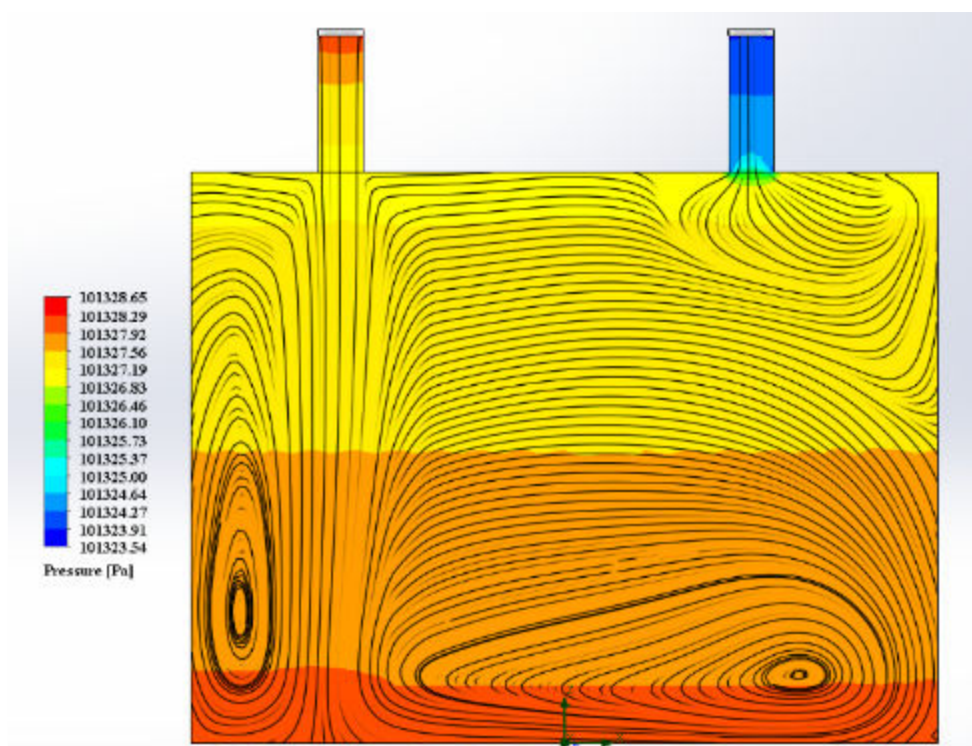
Fonte: O autor (2022).

Figura F33 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 10, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



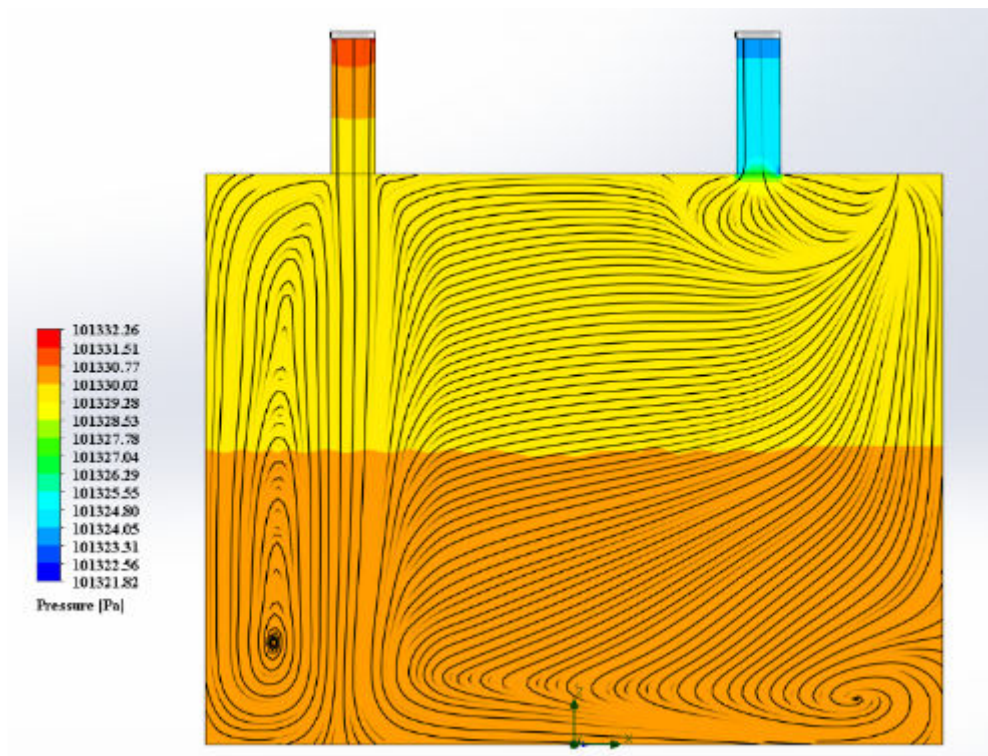
Fonte: O autor (2022).

Figura F34 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 11, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



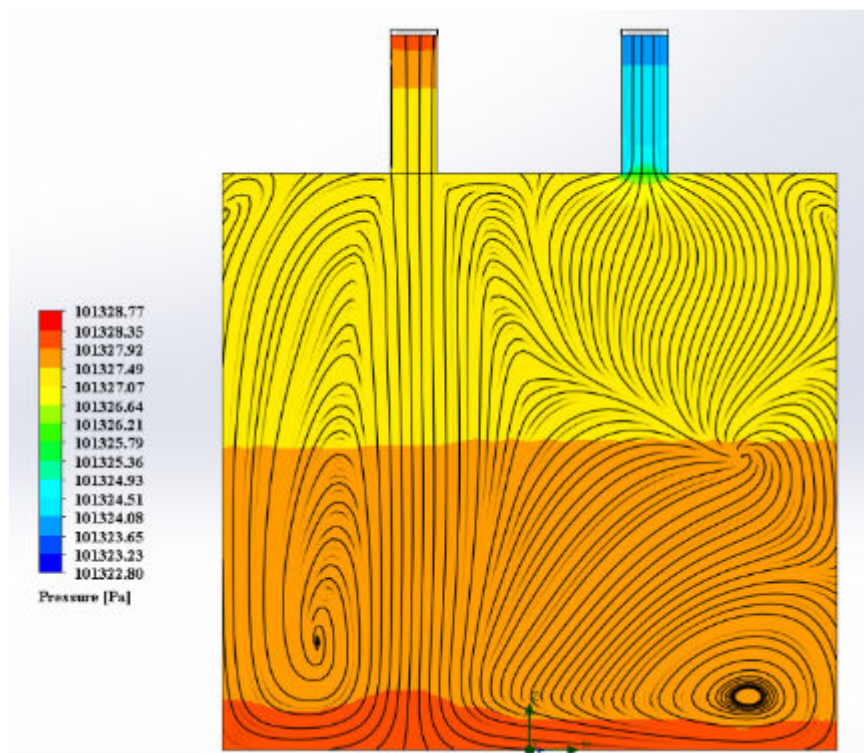
Fonte: O autor (2022).

Figura F35 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 12, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



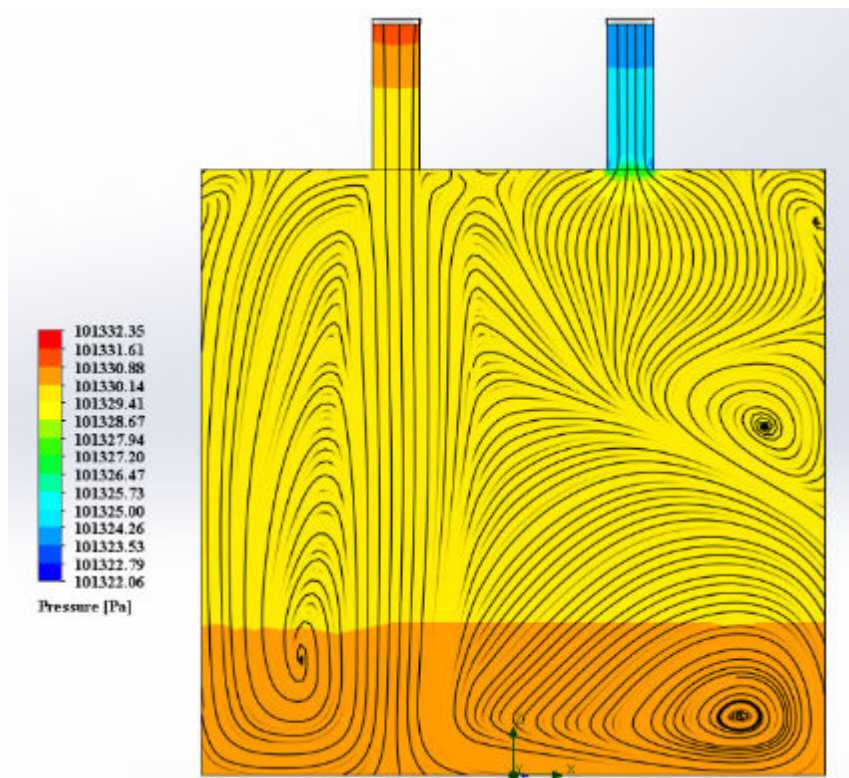
Fonte: O autor (2022).

Figura F36 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 13, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



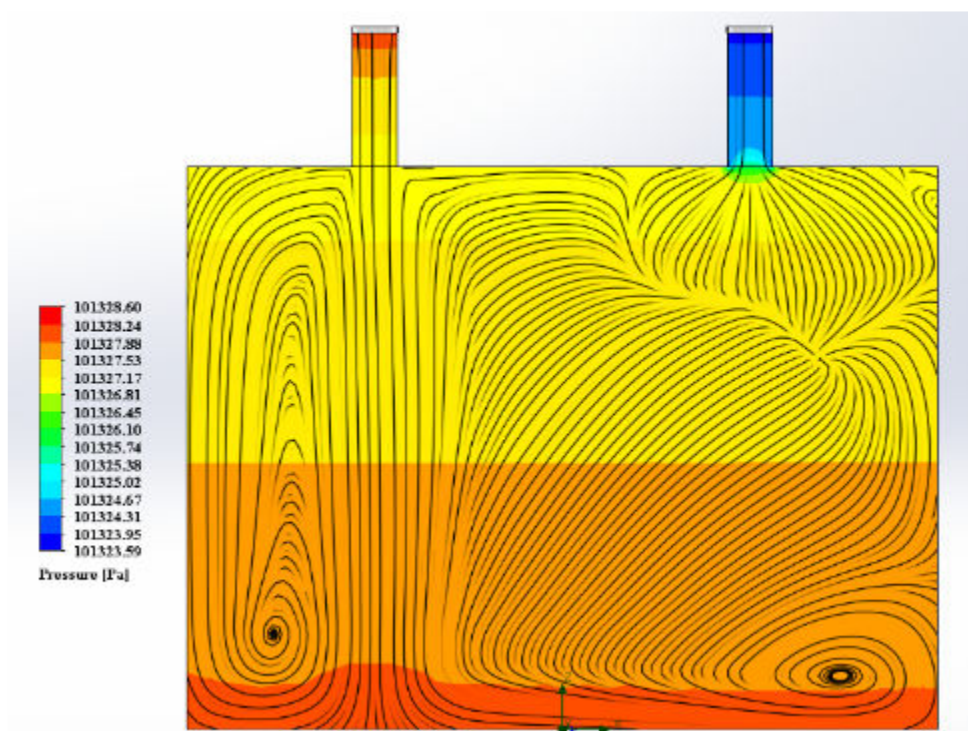
Fonte: O autor (2022).

Figura F37 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 14, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



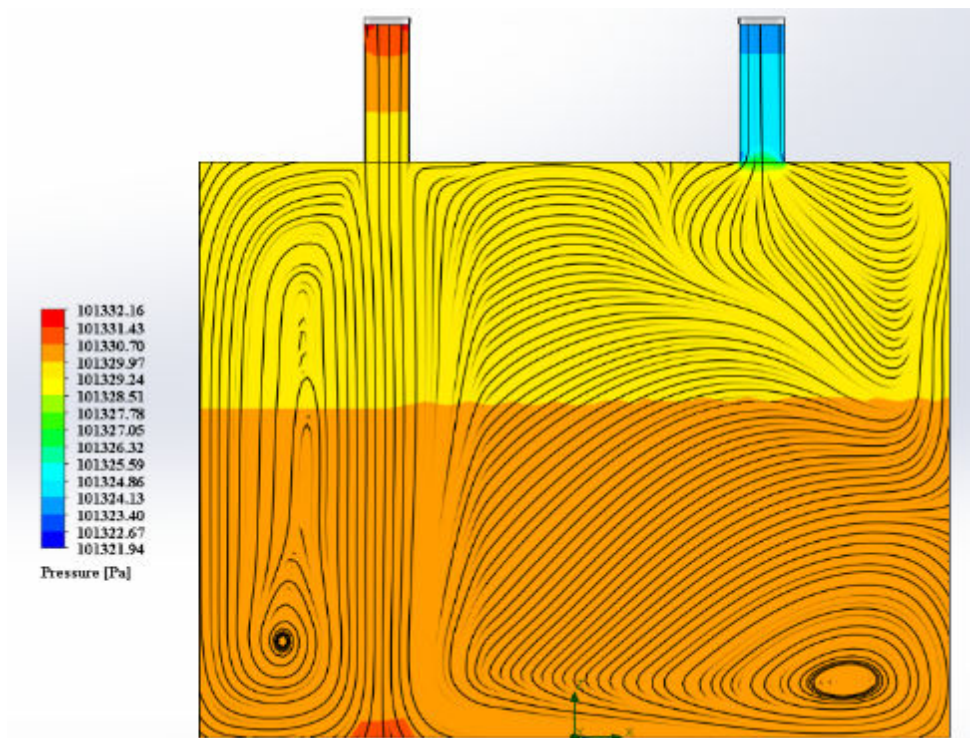
Fonte: O autor (2022).

Figura F38 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 15, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



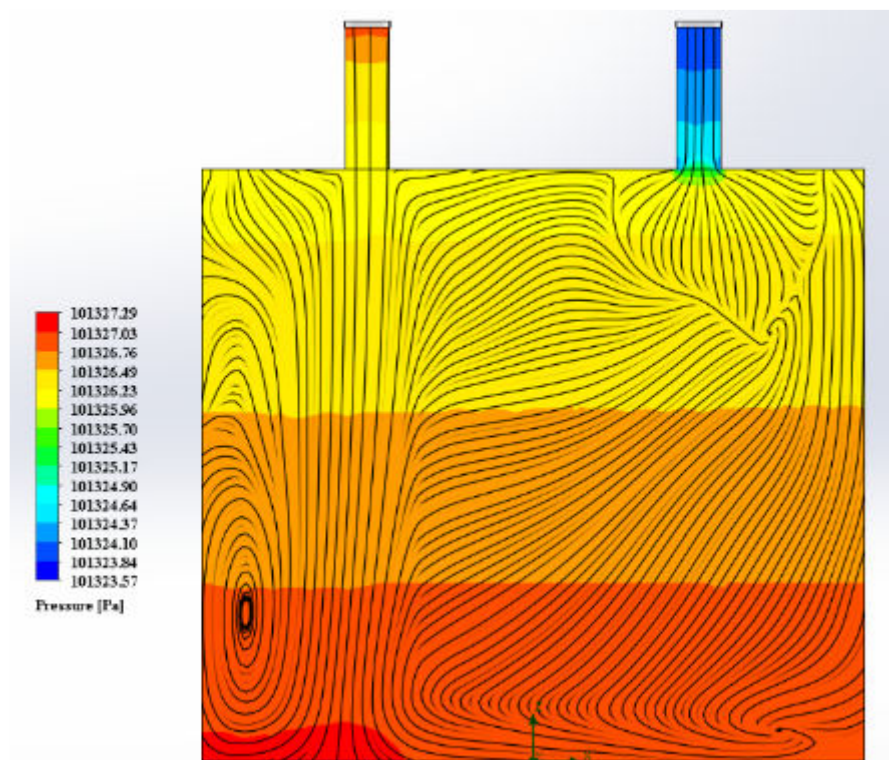
Fonte: O autor (2022).

Figura F39 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 16, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



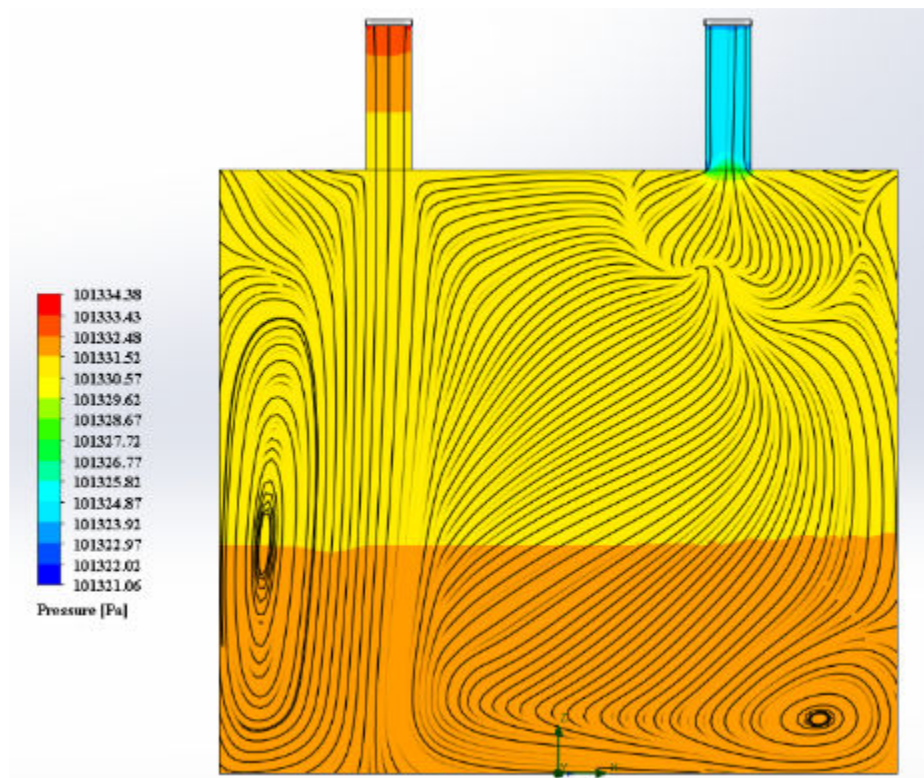
Fonte: O autor (2022).

Figura F40 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 17, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



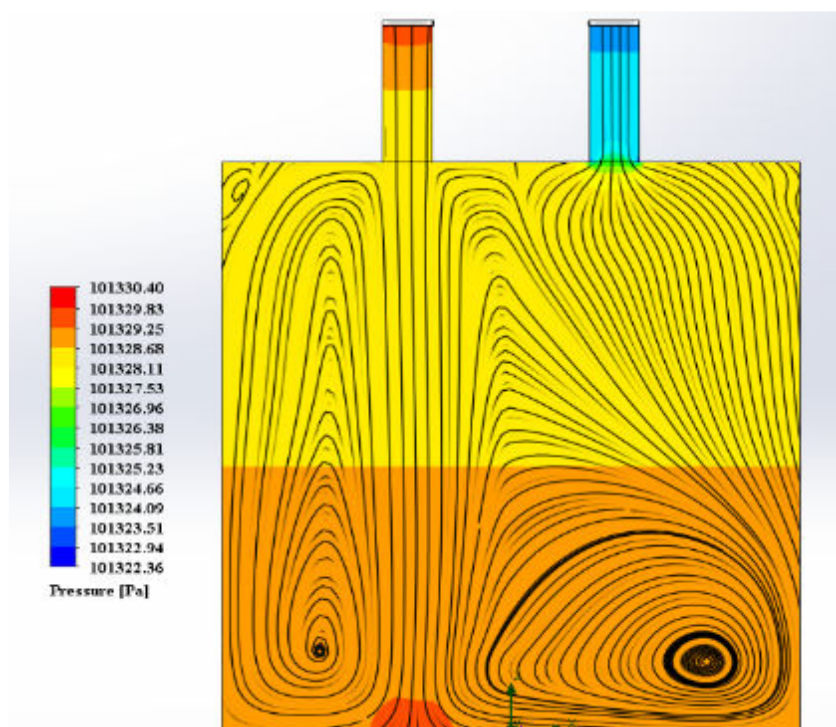
Fonte: O autor (2022).

Figura F41 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 18, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



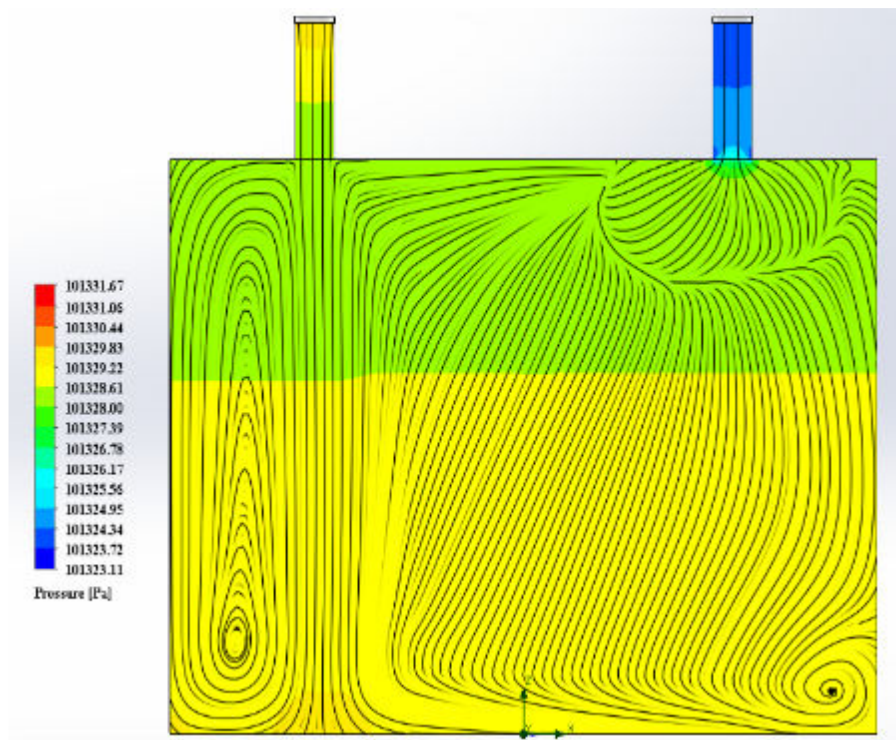
Fonte: O autor (2022).

Figura F42 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 19, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



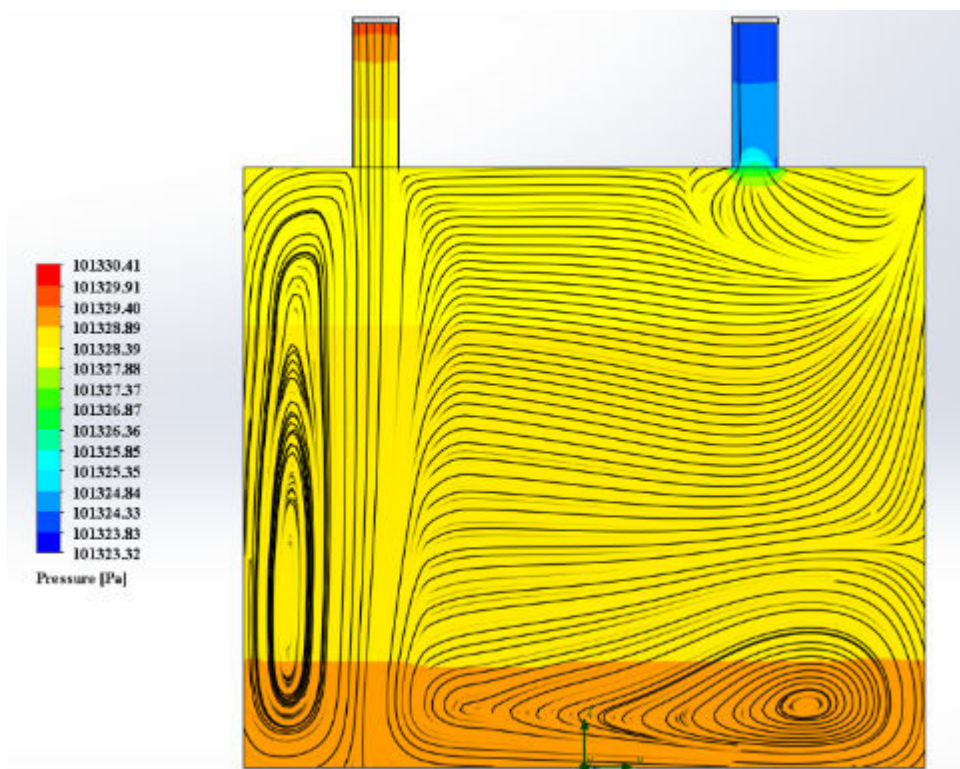
Fonte: O autor (2022).

Figura F43 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 20, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



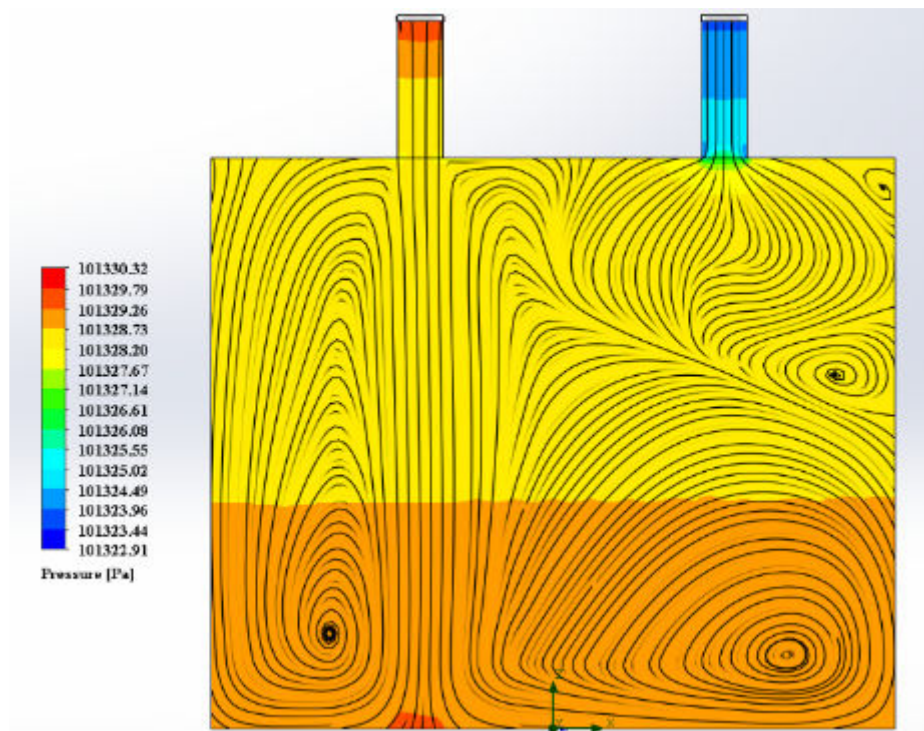
Fonte: O autor (2022).

Figura F44 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 21, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



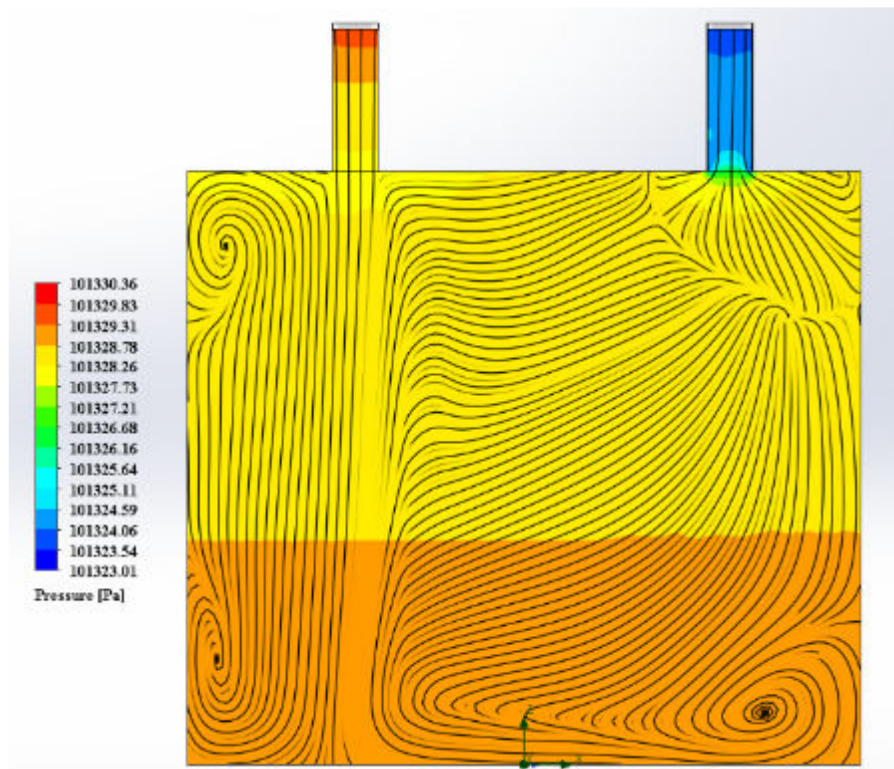
Fonte: O autor (2022).

Figura F45 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 22, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



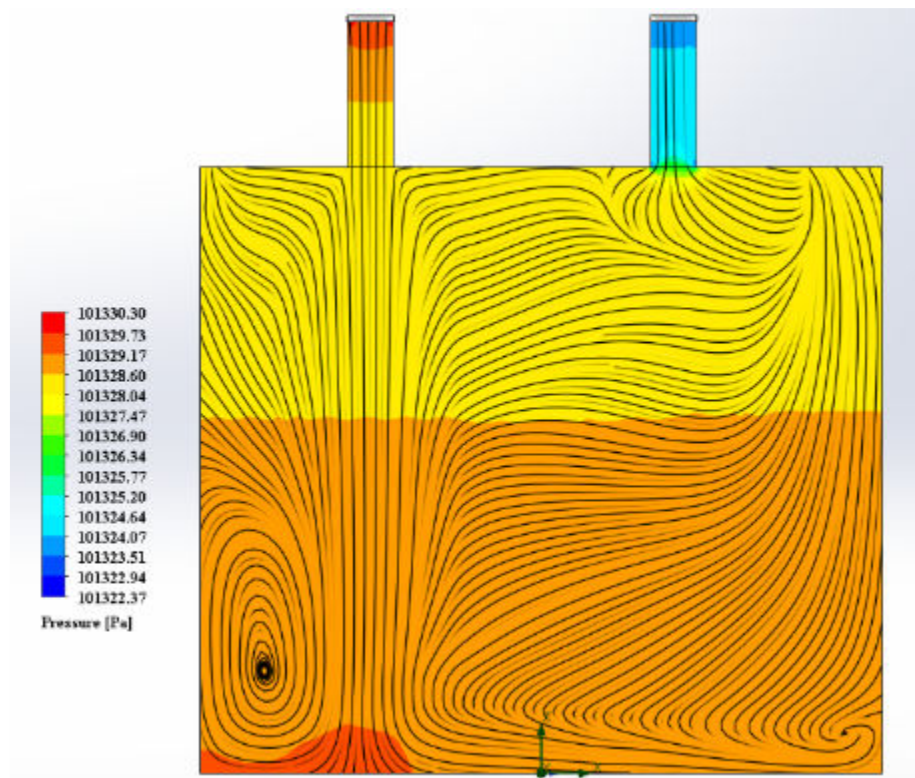
Fonte: O autor (2022).

Figura F46 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 23, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



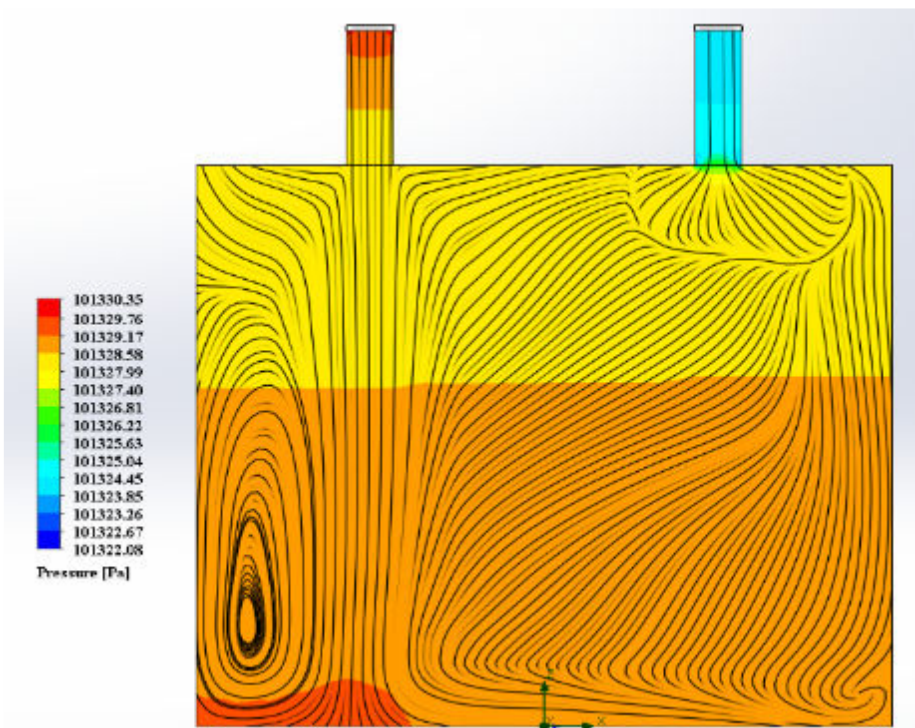
Fonte: O autor (2022).

Figura F47 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 24, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).

Figura F48 – Pressão interna na célula reacional e as linhas de correntes, no ensaio 25, para geometria com entrada e saída de ar na parte superior.



Fonte: O autor (2022).