

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

THOMSON TAISUKE TAKAGI

**Simulação numérica fluidodinâmica do escoamento dos gases no silencioso
de um escapamento automotivo utilizando o ANSYS**

**Ilha Solteira
2023**

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Simulação numérica fluidodinâmica do escoamento dos gases no silencioso de um escapamento automotivo utilizando o ANSYS

Thomson Taisuke Takagi

Orientador: Prof. Dr. Marcio Antonio Bazani

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Engenharia – FE/UNESP – Câmpus de Ilha Solteira, para cumprimento de requisito para obtenção do Grau de Engenheiro Mecânico.

Ilha Solteira – SP

Junho/2023

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

T136s Takagi, Thomson Taisuke.
Simulação numérica fluidodinâmica do escoamento dos gases no silencioso de um escapamento automotivo utilizando o Ansys / Thomson Taisuke Takagi. -
- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
40 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia Mecânica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Marcio Antonio Bazani

Inclui bibliografia

1. Fluidodinâmica. 2. Ansys. 3. Silencioso.


Raiane da Silva Santos
Supervisora Técnica de Seção
Serviço Técnico de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: Simulação numérica fluidodinâmica do escoamento dos gases no silencioso de um escapamento automotivo utilizando o ANSYS

ALUNO: Thomson Taisuke Takagi RA: 161053221

Orientador: Prof. Dr. Marcio Antonio Bazani

Aprovado (X) – Reprovado () pela Comissão Examinadora

Nota obtida: 7,5

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 MARCIO ANTONIO BAZANI
Data: 28/06/2023 15:41:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Presidente (Orientador) – Prof. Dr. Marcio Antonio Bazani

Documento assinado digitalmente

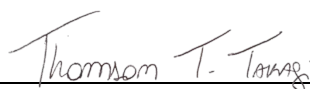
 EDUARDO PRETO
Data: 28/06/2023 09:15:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eduardo Preto

Documento assinado digitalmente

 MATHEUS MEDEIROS DONATONI
Data: 28/06/2023 09:20:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Matheus Medeiros Donatoni



Assinatura do Aluno

Ilha Solteira (SP) 27 de Junho de 2023

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais João e Elza e ao meu irmão Talles, por sempre me incentivarem a estudar e compreensão e suporte nos momentos mais difíceis. Sem eles, eu não teria essa oportunidade de formação acadêmica.

Agradeço imensamente a Deus, pela vida e por me ajudar a enfrentar todos os obstáculos encontrados ao longo da vida.

Agradeço também ao meu orientador Prof. Dr. Marcio Antonio Bazani, pela paciência, confiança e direcionamentos durante todo este trabalho.

Um agradecimento a todos que contribuíram, direta e indiretamente, para a realização deste trabalho.

Resumo

O sistema de exaustão do veículo automotivo é um dos sistemas periféricos de importante relevância, visto que são responsáveis por conduzir os gases resultantes da combustão, devidamente tratados e filtrados para amenizar o efeito estufa. Este, é um assunto que está em destaque no mundo, sendo pautas de conferências mundiais de meio ambiente perante ao aumento gradativo da temperatura média global. Diante dessa situação e também dispondo do estágio realizado em uma multinacional do setor automotivo, com a fabricação do escapamento dentro de seu portfólio, este trabalho visa demonstrar a fluidodinâmica dos gases dentro do silencioso de um escapamento automotivo. O estudo da mecânica dos fluidos, no geral, e da dinâmica dos fluidos computacional e também do *software* Ansys, permitiram a visualização do comportamento do fluido, na qual é observado a redução da pressão dentro das câmaras ao longo do escoamento, a redução da velocidade do fluido perto das paredes do tubo interno, maiores vetores de tensão de cisalhamento próximos aos furos dos tubos, perfis de velocidade de entrada e saída do volume de controle e também zonas de recirculação. Portanto, este trabalho proporcionou reprodutibilidade da análise feita para os outros componentes do escapamento e também para aplicações similares.

Palavras-chave: Fluidodinâmica. ANSYS. Silencioso.

Abstract

The exhaust system of automotive vehicle is one peripherals systems of high relevance, since it's responsible of conducting the resulting gases of combustion, duly treated and filtered to ease the greenhouse effect. This is a subject stand out in the world, on the agenda of environment world conferences facing gradual increase in global average temperature. Facing this situation and also having the internship carried out in a multinational company of automotive sector, with the manufacture of exhaust system on it's portfolio, this article aims to demonstrate the fluid dynamics of gases inside the muffler of an automotive exhaust. The study of fluid mechanics, in general, and computational fluid dynamics and the Ansys software, allowed the visualization of the fluid behavior, which is observed the reduction of pressure inside the chambers along the flow, the reduction of the fluid velocity near the walls of the inner tube, higher shear stress vectors near the tube holes, inlet and outlet velocity patterns of the control volume and also recirculation zones. Therefore, this work provided reproducibility of the analysis made to the other components of the exhaust and also for similar applications.

Keywords: Fluid dynamic. ANSYS. Muffler

Lista de Figuras

Figura 1: Vista Isométrica Frontal e Traseira da Geometria do Escapamento VOLVO	9
Figura 2: Geometria do escapamento FIAT	10
Figura 3: Silencioso 2	11
Figura 4: Tubo perfurado.....	12
Figura 5: Silencioso – Primeira câmara.....	12
Figura 6: Geometria do Silencioso	13
Figura 7: Malha da geometria final	14
Figura 8: Pressão (visualização em contornos).....	15
Figura 9: Tensão de Cisalhamento.....	15
Figura 10: Tensão de cisalhamento	16
Figura 11: Velocidade de entrada.....	16
Figura 12: Velocidade de saída.....	17
Figura 13: Velocidade (visualização em linhas de corrente)	17
Figura 14: Velocidade (visualização em linhas de corrente)	18
Figura 15: Velocidade (visualização em vetores).....	18
Figura 16: Velocidade (visualização em vetores).....	19

Lista de Tabelas

Tabela 1: Constantes empíricas para modelo k- ϵ	8
Tabela 2: Malha dos silenciosos 1 e 2	9

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS (opcional)

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
RNG	<i>Re-Normalisation Group</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
HD	<i>Hard Disk</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
SSD	<i>Solid State Drive</i>
GB	<i>Giga Byte</i>

LISTA DE SÍMBOLOS (opcional)

$C_{\varepsilon 1}$	Contante do modelo $k - \varepsilon$
$C_{\varepsilon 2}$	Contante do modelo $k - \varepsilon$
C_{μ}	Contante do modelo $k - \varepsilon$
ε	Dissipação de energia cinética turbulenta [J/kg.s]
Φ	Incógnita
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
k	Energia cinética turbulenta [J/kg]
L	Comprimento característico [m]
μ	Viscosidade dinâmica [m ² /s]
μ_t	Viscosidade turbulenta [m ² /s]
∇	Gradiente
p	Pressão termodinâmica local [Pa]
P_k	Taxa de produção de energia cinética turbulenta [kg/ms ³]
Re	Reynolds
ρ	Massa específica [kg/m ³]
σ_k	Contante do modelo $k - \varepsilon$
σ_{ε}	Contante do modelo $k - \varepsilon$
t	Tempo [s]
u	Velocidade na direção x [m/s]
u_i	Velocidade instantânea em notação tensorial
u_j	Velocidade instantânea em notação tensorial
u'_i, v'_j	Velocidade flutuante em notação tensorial
V	Velocidade média do fluido [m/s]
v	Velocidade na direção y [m/s]
w	Velocidade na direção z [m/s]

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO	2
2	REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1	ESCOAMENTO INCOMPRESSÍVEL	3
2.2	ESCOAMENTO LAMINAR E TURBULENTO	3
2.3	EQUAÇÕES GOVERNANTES	4
2.4	DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)	5
2.5	MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS	6
2.6	EQUAÇÕES DE REYNOLDS AVERAGED NAVIER-STOKES (RANS)	6
2.7	MODELO DE TURBULÊNCIA $k-\varepsilon$	7
2.8	MODELO DE TURBULÊNCIA RNG $k-\varepsilon$	8
3	METODOLOGIA	9
3.1	GEOMETRIA DO ESCAPAMENTO VOLVO	9
3.2	GEOMETRIA DO ESCAPAMENTO FIAT	10
3.3	CONFIGURAÇÕES DE SOLUÇÃO	13
4.	RESULTADOS	14
5.	CONCLUSÃO	20
6.	REFERÊNCIAS	21
	APÊNDICE A – Resultados da simulação no tubo perfurado	24
	APÊNDICE B – Resultados da simulação da primeira câmara	26

1 INTRODUÇÃO

No ciclo de funcionamento de um veículo com motor de combustão interna, o sistema de escapamento é um item fundamental para seu desempenho. Pode-se considerar como importantes funções do escapamento:

Direcionamento dos gases resultantes da combustão para uma região distante do motor, desenvolvido de forma a maximizar a eficiência do veículo; Aumentar a massa de ar aspirada pelo motor, consequentemente aumentando a eficiência volumétrica; Reduzir a quantidade emitida de gases causadores do efeito estufa; E atenuar os ruídos oriundos do motor. (ROCHA, 2011).

Em termos gerais, o sistema de escapamento de um veículo é composto por seis componentes: coletor de escape, tubos, catalisador, silenciador, abafador e ponteira.

O coletor de escape é responsável por coletar os gases resultantes da combustão e canalizar para um tubo. Geralmente feito em ferro fundido ou aço inoxidável, capazes de suportar às mais severas condições de transferência de calor.

O tubo de escape é feito de aço inoxidável e percorre grande parte da extensão do veículo e conecta todos os componentes do sistema. Sua função não deve ser menosprezada, pois caso o diâmetro seja muito pequeno, a potência em alta rotação será reduzida. Caso muito grande, reduzirá a potência em baixa rotação.

O catalisador é constituído por uma cerâmica composta de metais nobres (paládio, ródio, platina e molibdênio, por exemplo), uma manta expansiva (isolante térmico e posicionador da cerâmica) e um corpo feito de aço inoxidável, que envolve os outros componentes. Seu principal propósito é reduzir as emissões de hidrocarbonetos, monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio no meio ambiente, sendo que o tratamento desses gases é efetivo apenas em um intervalo de alta temperatura.

O silenciador e abafador são responsáveis em atenuar os ruídos, provenientes do motor do veículo, até o nível aceito pela regulamentação do país, sendo que se diferem apenas nas frequências sonoras que trabalham. E por fim, a ponteira direciona o fluxo de gases para fora do sistema de escapamento e sua finalidade é estética.

1.1 OBJETIVO

Esse trabalho irá apresentar o processo de simulação numérica utilizando o *software* ANSYS e analisar o comportamento fluidodinâmico dos gases resultantes da combustão de um veículo automotor a partir do pós processamento com visualizações em contorno, tensões de cisalhamento, perfis de velocidade, linhas de corrente e vetores.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A mecânica dos fluidos é o estudo de fluidos em repouso ou em movimento. Ela tem sido tradicionalmente aplicada em diversas áreas de engenharia tais como projeto de bombas, compressores, tubulações, etc. Ela permitiu o desenvolvimento de muitos campos instigantes como microfluidos, fluidos inteligentes, biomecânica, esportes, meio ambiente e energia. (FOX et al, 2010).

2.1 ESCOAMENTO INCOMPRESSÍVEL

Escoamentos nos quais as variações na massa específica são desprezíveis denominam-se incompressíveis; quando as variações de massa específica não são desprezíveis, o escoamento é denominado compressível. O exemplo mais comum de escoamento compressível é o escoamento de gases, enquanto o escoamento de líquidos pode, geralmente, ser tratado como incompressível. (ÇENGEL; CIMBALA, 2006)

No caso de escoamento de gases, podem ser tratados como incompressíveis desde que as velocidades de escoamento sejam pequenas em relação à velocidade do som, ou seja, escoamentos com velocidades menores que 100 m/s são considerados incompressíveis. (ÇENGEL; CIMBALA, 2006)

2.2 ESCOAMENTO LAMINAR E TURBULENTO

O escoamento laminar tem como característica o movimento das partículas fluidas em camadas lisas ou lâminas, em que o fluido é altamente ordenado sendo possível identificar linhas de corrente. Este comportamento continua até que uma zona de transição é atingida, na qual ocorre mudança das condições laminares para turbulentas. Já o escoamento turbulento é altamente irregular, sendo caracterizado pela mistura rápida das partículas do fluido enquanto escoam devido a flutuações aleatórias no campo tridimensional de velocidades. (INCROPERA et al., 2008).

O número de Reynolds é um agrupamento adimensional de parâmetros que representam a razão entre as forças de inércia e as viscosas. Se as forças de inércias

são insignificantes se comparados às forças viscosas, então os distúrbios são dissipados e o escoamento permanece laminar. Contudo, se o número de Reynolds for maior que 2400, as forças de inércias podem potencializar os mecanismos de gatilho e ocorre a transição para o regime turbulento. (INCROPERA et al., 2008).

O número de Reynolds é definido pela Eq. 1.

$$R_e = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (1)$$

Onde ρ é a massa específica [kg/m^3], V é a velocidade média do fluido [m/s], L é o comprimento característico e μ é a viscosidade dinâmica do fluido [kg/ms].

Na dinâmica dos fluidos computacional, a irregularidade do escoamento implica diretamente no custo operacional do processo já que é necessária mais potência para descrever o movimento das partículas em função do tempo t e das coordenadas x , y , z (LJUNGSTRÖM; OTTOSSON; SAEED, 2016).

2.3 EQUAÇÕES GOVERNANTES

Na forma diferencial e descrição Euleriana, o princípio de conservação de massa é expresso pela equação de continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0 \quad (2)$$

A massa específica ρ é constante para fluidos incompressíveis, portanto a Eq. 2 pode ser descrita pela Eq. 3.

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (3)$$

Ou

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Onde, u , v e w correspondem às velocidades nas direções x , y e z .

As equações de Navier-Stokes, expressas em coordenadas cartesianas são descritas pela Eq. (5).

$$\begin{aligned}\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (5) \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)\end{aligned}$$

Onde, ρ é a massa específica do fluido e p é a pressão termodinâmica local.

As Eq. 4 e Eq. 5 juntas, formam um sistema de equações diferenciais parciais não lineares acopladas para u , v , w e p , fornecendo uma descrição matemática completa do escoamento incompressível de um fluido newtoniano. (MUSON et al., 2004).

2.4 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Computational fluid dynamics (CFD) é a análise de sistemas envolvendo escoamentos de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados a partir de métodos computacionais via simulação numérica. (ESSS, 2016).

Os escoamentos podem ser descritos por equações diferenciais parciais, mas que não são resolvidos analiticamente, com algumas exceções. A partir do uso do CFD, é possível obter uma aproximação numérica utilizando o método de discretização que aproxima as equações diferenciais parciais com base em um sistema de equações algébricas. (FERZIGER; PERIĆ, 2002).

Os resultados numéricos são sempre aproximados, pois os erros surgem de cada parte do processo usado para produzir soluções numéricas. Podem ser citados como causadores as aproximações e idealizações nas equações diferenciais; aproximações feitas durante o processo de discretização; e os métodos iterativos. (FERZIGER; PERIĆ, 2002).

Portanto, se não for possível obter soluções precisas para o escoamento, é necessário entender o que é possível produzir e aprender a analisar os resultados.

2.5 MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

No método de volumes finitos, o domínio da solução é dividido em um número finitos de pequenos volumes de controle e as equações conservativas são aplicadas em cada volume de controle. No centroide de cada volume de controle, fica alojada um nó computacional que serão calculadas as equações de continuidade e Navier-Stokes. (FERZIGER; PERIĆ, 2002).

O Ansys Fluent é um dos *softwares* comerciais de grande prestígio e uso, e utiliza o método numérico baseado em volumes finitos para soluções em problemas de mecânica de fluidos. Além disso, a abordagem é uma das mais simples para entender e para programar, por esse motivo é muito popular entre os engenheiros e também motivo pela utilização neste trabalho.

2.6 EQUAÇÕES DE REYNOLDS AVERAGED NAVIER-STOKES (RANS)

As equações RANS são equações usadas para determinar a fluidodinâmica e são utilizadas para descrever escoamentos turbulentos. Elas são obtidas a partir de um conjunto de médias das equações de Navier-Stokes e da continuidade, na qual descrevem os valores instantâneos das variáveis do movimento turbulento como a soma do valor médio e a flutuação daquele valor. (NIECKELE, 2018)

$$\Phi = \overline{\Phi} + \Phi' \quad (6)$$

Onde,

$$\overline{\Phi} = \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} \Phi \, dt \quad (7)$$

Sendo a média das flutuações,

$$\overline{\Phi'} = 0 \quad (8)$$

Substituindo os valores instantâneos das variáveis pelos valores médios mais suas flutuações, nas equações de conservação de massa e Navier-Stokes, obtêm-se as Eq. 9 e Eq. 10.

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) + g_i \quad (10)$$

O termo $-\overline{u'_i u'_j}$ é chamado de Tensor de Reynolds, que representa a influência das flutuações turbulentas no fluxo médio. (FERZIGER; PERIĆ, 2002).

Para resolver as equações de RANS, é necessário utilizar modelos de turbulência que determinam as tensões de Reynolds, na qual a mais utilizada é o modelo $k - \varepsilon$.

2.7 MODELO DE TURBULÊNCIA $k - \varepsilon$

O modelo de turbulência $k - \varepsilon$ é baseado no conceito de viscosidade turbulenta apresentando duas equações diferenciais de transporte de propriedades turbulentas, sendo estável e numericamente robusto, e também é o mais utilizado nos códigos de CFD.

A equação diferencial de transporte de energia cinética turbulenta (k) e da taxa de dissipação de energia cinética turbulenta (ε) são representadas pelas Eq. 11 e Eq. 12, respectivamente. (FERZIGER; PERIĆ, 2002).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho \overline{V} k) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho \overline{V} \varepsilon) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (12)$$

Onde P_k é a taxa de produção de energia cinética turbulenta, a viscosidade turbulenta μ_t é descrito pela Eq. 13 e os valores mais comuns das constantes C_μ , σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$ e $C_{\varepsilon 2}$ estão dispostas na Tabela 1.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (13)$$

Tabela 1: Constantes empíricas para modelo k-ε

C_μ	σ_k	σ_ϵ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$
0,09	1,00	1,30	1,44	1,92

Fonte: (FERZIGER; PERIĆ, 2002).

2.8 MODELO DE TURBULÊNCIA RNG k-ε

O modelo RNG k-ε surgiu a fim de cobrir deficiências do modelo k-ε, como por exemplo a falha na previsão de escoamentos distantes do estado de equilíbrio local e também na previsão de escoamentos complexos. Esse modelo é derivado das equações de Navier-Stokes e suas constantes são redefinidas com finalidade de normalizar essas equações. (KLEIN, 2007).

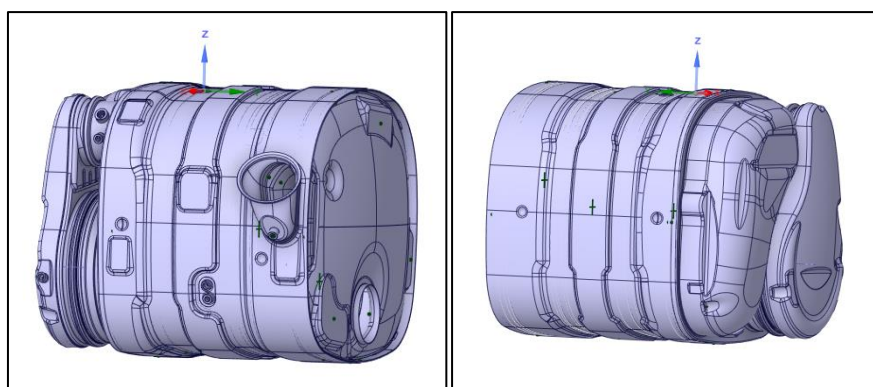
3 METODOLOGIA

As geometrias e dados foram obtidos a partir de projetos realizados pela Faurecia Automotive do Brasil, para fins estudantis e, a simulação foi realizada com o *software* Ansys 2021R1 através do sistema de análise *Fluid Flow (Fluent)*.

3.1 GEOMETRIA DO ESCAPAMENTO VOLVO

O desenho inicial foi obtido a partir da Faurecia Automotive do Brasil, para fins estudantis, no formato .stp, que é a extensão de arquivo utilizado pelo *software* CAD da empresa, então foi feito a conversão para o SpaceClaim. Assim, a geometria do escapamento do projeto de 2018 da VOLVO (sendo futuramente utilizadas nos caminhões Volvo, Renault, Nissan, etc) é apresentado na Figura 1.

Figura 1: Vista Isométrica Frontal e Traseira da Geometria do Escapamento VOLVO



Fonte: Elaboração do próprio do autor.

Como é possível verificar, a geometria é complexa e com inúmeras curvaturas, dobras, cordões de solda, *sensor bosses* e reforços estruturais que não seriam considerados na análise fluidodinâmica, portanto foram feitas diversas simplificações nessa geometria para diminuir a quantidade de nós e elementos na malha.

Conforme foram feitas as simplificações, em paralelo foram criadas malhas bem simples apenas com intuito de observar a quantidade de nós e elementos, já visualizando a dificuldade e demora na obtenção dos resultados nas análises futuras.

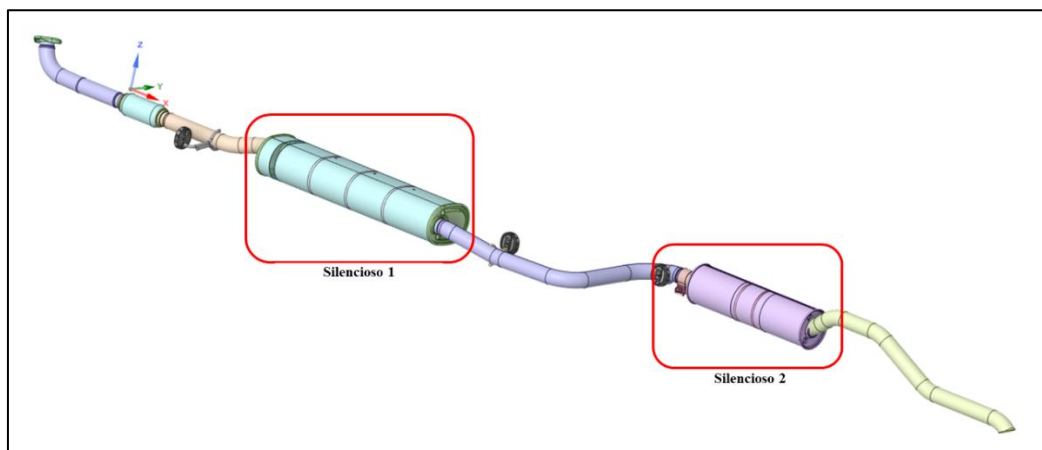
Com a configuração de malha no modo *Default* do Ansys, foram obtidas 221.382 nós e 851.791 elementos. Nesse exemplo foi evidenciado que em apenas

uma parte de todo escapamento, sendo a tampa superior, houve grande concentração de nós e elementos, em destaque as partes com curvaturas. Assim, pode-se inferir que todos os itens resultantes de processo de conformação de estampagem que compõem o escapamento, terão essa característica de concentrar elementos. Portanto, a abordagem utilizando essa geometria foi descontinuada, visto que nesta geometria de escapamento há diversas peças estampadas.

3.2 GEOMETRIA DO ESCAPAMENTO FIAT

A segunda abordagem foi feita a partir do desenho do escapamento do FIAT Strada, também fornecido pela Faurecia Automotive do Brasil, no formato .x_T, que é a extensão de arquivo utilizado pelo *software* CAD da empresa, então foi feito a conversão para o SpaceClaim. Assim, a geometria do escapamento é apresentada na Figura 2.

Figura 2: Geometria do escapamento FIAT



Fonte: Elaboração do próprio do autor.

A partir dessa geometria, foram feitas simplificações, excluindo as partes inúteis para a análise (como por exemplo o conjunto dianteiro, conjunto catalisador, tubos intermediários, flanges, suportes e ponteira) assim restando apenas o Silencioso 1 e o Silencioso 2. A fim de otimizar o tempo de simulação e análise, foram criadas as

malhas para ambos silenciosos no modo *Default* do Ansys, para observar qual geometria é a mais simples. As malhas estão dispostas conforme a Tabela 2.

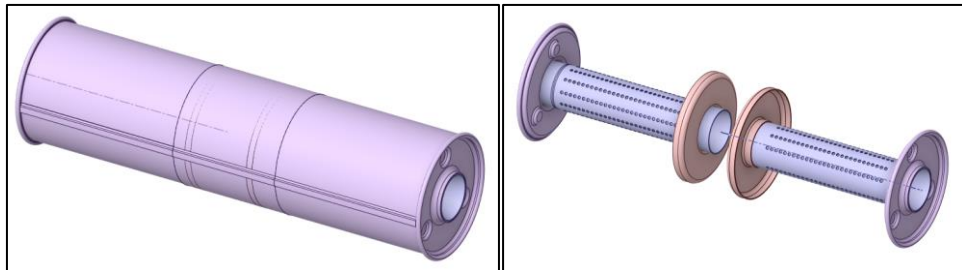
Tabela 2: Malha dos silenciosos 1 e 2

Geometria	Nós	Elementos
Silencioso 1	1.191.076	4.487.312
Silencioso 2	858.307	2.294.852

Fonte: Elaboração do próprio do autor.

Assim, foi escolhido o silencioso 2 para a análise deste trabalho, evidenciado na Figura 3.

Figura 3: Silencioso 2

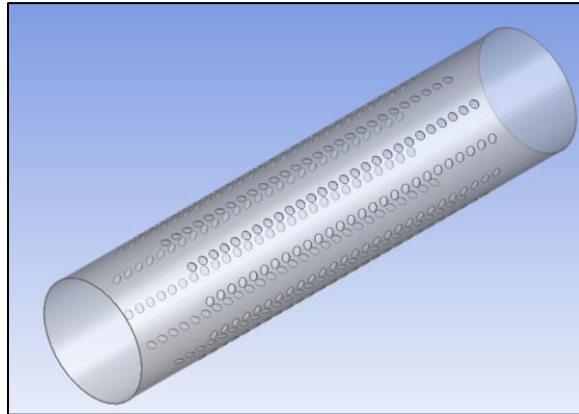


Fonte: Elaboração do próprio do autor.

Com intuito qualitativo, foi realizado a simulação com pequenas simplificações na geometria do silencioso, contudo a simulação falhou no processo, indicando falha na convergência de formatação dos desenhos. Foram feitas correções nas arestas e faces e simplificações na geometria, contudo persistia a falha. Assim, o caminho seguido foi refazer o desenho do começo.

A primeiro momento, foi desenhado o tubo perfurado (Figura 4) e feitas algumas simulações. Estas, estão dispostas no Apêndice A.

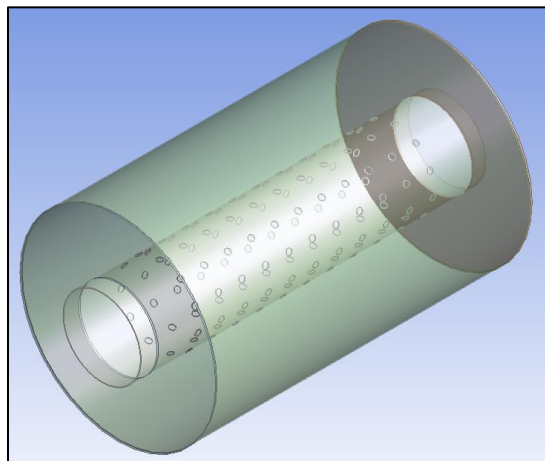
Figura 4: Tubo perfurado



Fonte: Elaboração do próprio do autor.

Em seguida, foram adicionadas a tampa lateral e as tampas de entrada e saída (Figura 5) e feitas algumas simulações. Estas estão dispostas no Apêndice B.

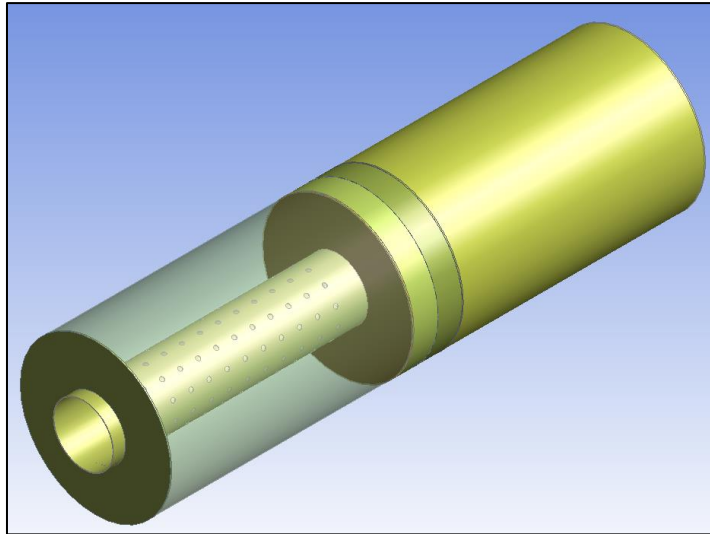
Figura 5: Silencioso – Primeira câmara



Fonte: Elaboração do próprio do autor.

Posteriormente, foi adicionada a câmara intermediária, que funciona como *mixer*, e a segunda câmara do silencioso. Assim, foram feitas as simulações e estão dispostas no Capítulo 4. Portanto, a geometria final obtida está conforme a Figura 6.

Figura 6: Geometria do Silencioso



Fonte: Elaboração do próprio do autor.

3.3 CONFIGURAÇÕES DE SOLUÇÃO

O método de solução baseado em Pressão é aplicável em ampla variedade de regimes de escoamento desde escoamento incompressível de baixa velocidade até compressível de alta velocidade. Esse método requer menos processamento e permite flexibilidade na solução, por isso foi o método escolhido. (ANSYS, 2010).

No acoplamento Pressão-Velocidade do Ansys, foi utilizado o método padrão SIMPLE. Nos métodos de interpolação, na discretização, o modelo utilizado neste trabalho foi o *First-Order Upwind*, pois é o mais fácil de convergir em virtude por considerar apenas a precisão de primeira ordem.

Nos gradientes foi utilizado o *Least-Squares Cell-Based*. É o método padrão, tem a mesma precisão e propriedades que o *Node-Based Gradients*, que minimiza as falsas difusões, e requer menos poder computacional. Por fim, nos métodos de interpolação para calcular as pressões nas faces das células, utilizou-se o método padrão *Standard*.

4. RESULTADOS

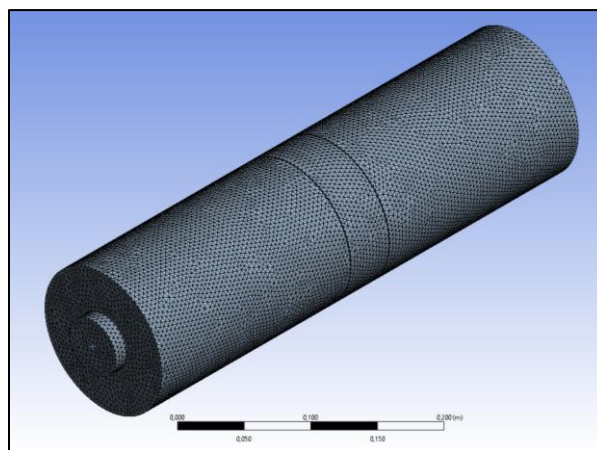
Considerando as condições de contorno obtidos da empresa, a velocidade de entrada no escapamento é de 44 m/s, a pressão de saída é zero e a temperatura dos gases de entrada na entrada do escapamento é de 765° C. Visto que este é a temperatura de entrada no escapamento após a passagem no coletor de escape, então foi considerada a temperatura de entrada no silencioso de 340° C, pois é a temperatura média encontrada. (PASSOS, 2015).

Foi considerado o ar como fluido, pois não foram obtidas da empresa as propriedades do fluido e também buscando na literatura, com base na equação química resultante da combustão da gasolina comum com o catalisador, não foi possível obter as características do fluido de forma consolidada.

Portanto, a partir da geometria sólida desenvolvida, foi extraída o domínio do fluido e, para definir o refino da malha, foi analisado três ferramentas: *Inflation* com 10 camadas, para ter uma solução mais precisa nas camadas limites sem perdas de ortogonalidade e diminuir a quantidade de células. O *Skewness* representa a assimetria da célula, ou seja, ela representa a diferença entre a forma da célula com a sua forma equilateral, respeitando o valor máximo de 0,95 e a média menor que 0,33. A ortogonalidade evita os problemas de volumes nulo e negativos da malha, respeitando o valor mínimo de 0,1 e a média quanto mais próximo de 1, melhor. Segundo o ANSYS, esses valores obtidos são bons.

Portanto, a versão final foi obtida com 422.800 nós e 1.020.976 elementos, conforme a Figura 7.

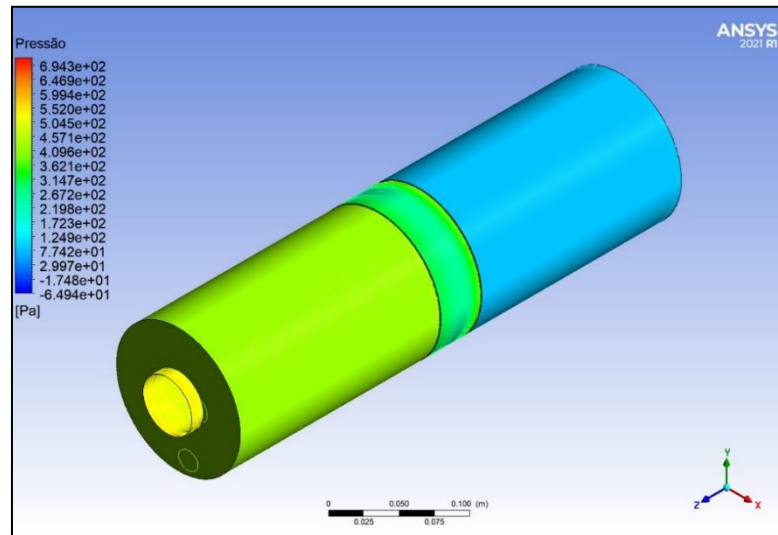
Figura 7: Malha da geometria final



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados obtidos da simulação numérica do escoamento estão dispostos nas Figura 8 - 16.

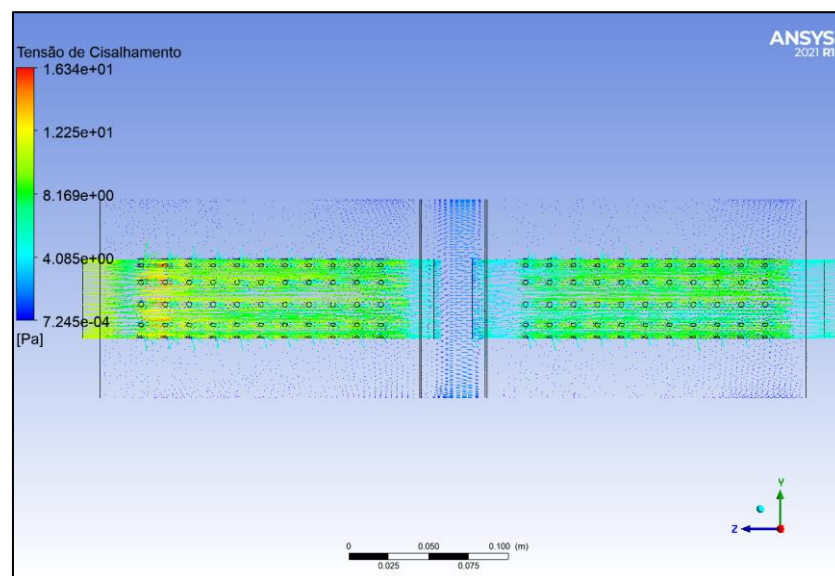
Figura 8: Pressão (visualização em contornos)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

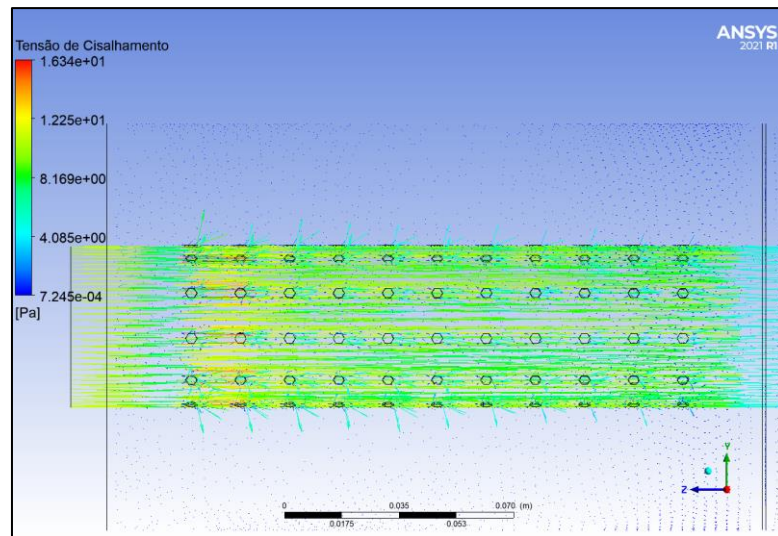
Na Figura 8 é possível visualizar que a pressão da segunda câmara é menor do que na primeira, e o *mixer* é intermediário. Isso se deve ao fato de que o tipo de silencioso é o reativo, na qual o fluido entra pelas cavidades e são refletidas ao encontro das paredes, consequentemente reduzindo sua energia cinética.

Figura 9: Tensão de Cisalhamento



Fonte: Elaboração do próprio autor.

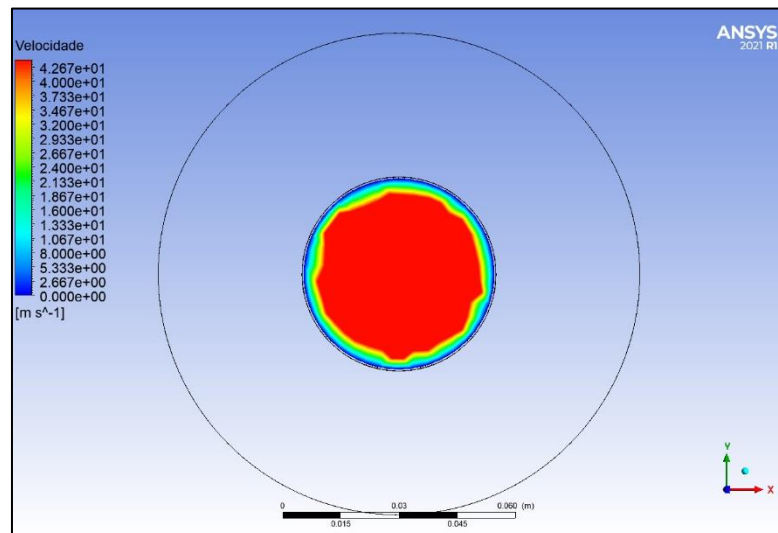
Figura 10: Tensão de cisalhamento



Fonte: Elaboração do próprio autor.

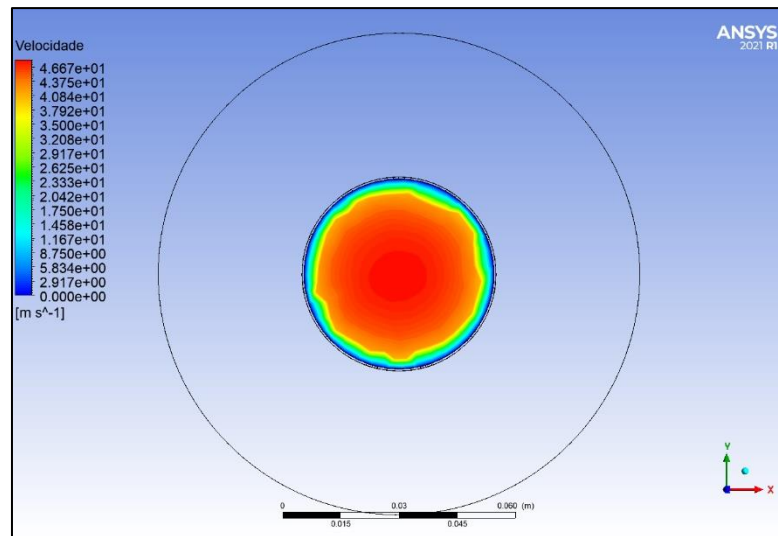
Na parte das tensões de cisalhamento, percebe-se que os maiores vetores estão localizados nos furos dos tubos perfurados, pois o fluido entra pelo tubo interno e escoar para dentro das câmaras, onde a passagem é minúscula.

Figura 11: Velocidade de entrada



Fonte: Elaboração do próprio autor.

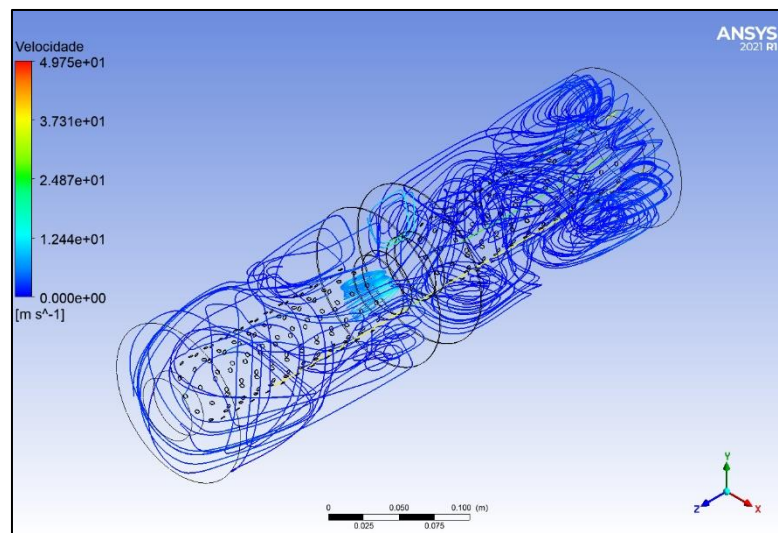
Figura 12: Velocidade de saída



Fonte: Elaboração do próprio autor.

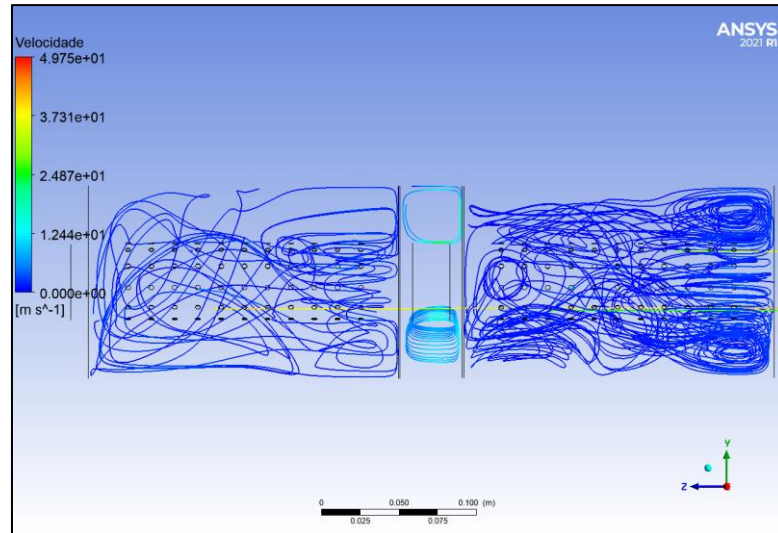
Nas Figuras 11 e 12, é possível verificar o perfil da velocidade na entrada e saída do escoamento. O perfil de velocidade deveria ser homogêneo, visto que o escoamento é dentro do tubo circular. Contudo, essa homogeneidade é aceitável, pois para melhorá-la, seria necessário refinar ainda mais a malha, que consequentemente aumentaria a quantidade de nós e elementos.

Figura 13: Velocidade (visualização em linhas de corrente)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

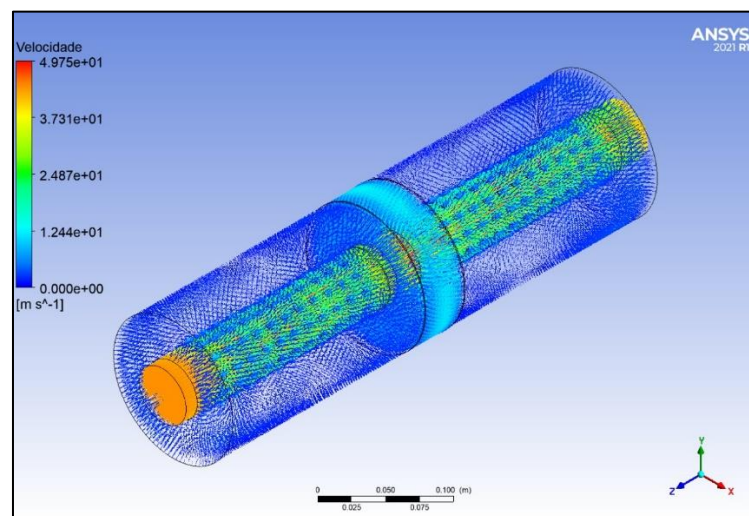
Figura 14: Velocidade (visualização em linhas de corrente)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

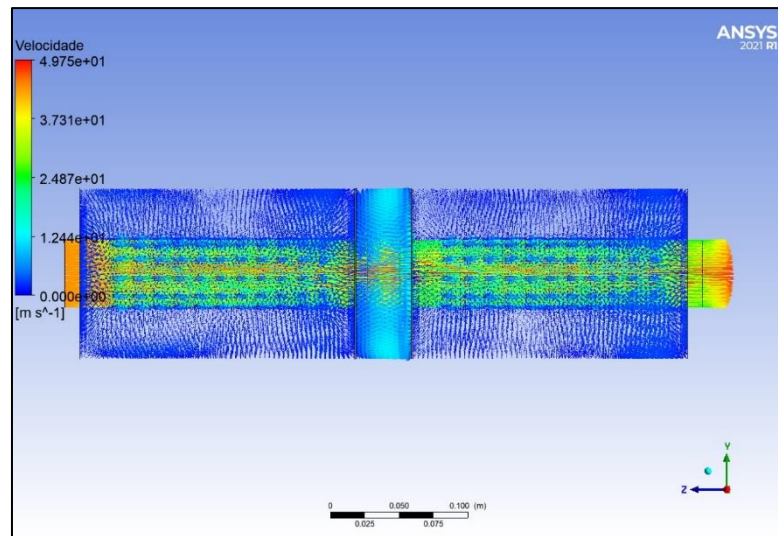
A partir da simulação realizada, percebe-se que o silencioso apresenta várias zonas de recirculação de fluido, observadas nas Figuras 13 e 14. Nas câmaras 1 e 2 do silencioso, é possível observar as zonas de recirculação localizadas perto das extremidades de respectivas câmaras. Já no *mixer*, visualiza-se recirculações, porém não deveriam ocorrer, pois propriamente dita, o *mixer* tem como objetivo misturar os gases, reduzindo sua temperatura e ruídos. Pode-se considerar como causa as simplificações feitas na geometria para que ela fosse otimizada nas questões de complexidade geométrica e tempo de simulação.

Figura 15: Velocidade (visualização em vetores)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 16: Velocidade (visualização em vetores)



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se nas Figuras 15-16 o comportamento dos vetores velocidade do fluido dentro do silencioso, em destaque para o *mixer* em que há maiores vetores velocidade, promovendo assim melhor mistura. Também é possível ver vetores de baixa velocidade estão localizadas próximas paredes e também é possível verificar zonas com acúmulo de vetores decorrentes à mudança de direção do fluxo do escoamento que vão de encontro às paredes. Nos tubos perfurados internos, é possível ver que a velocidade do escoamento perto das paredes reduziu, devido às tensões cisalhantes atuantes.

5. CONCLUSÃO

O escapamento de um veículo automotivo com motor de combustão interna é um item importante para eficiência do veículo, influenciando na massa de ar aspirada pelo motor, atenuação dos ruídos produzidos e também na quantidade emitida de gases causadores do efeito estufa ao meio ambiente.

Diante dessa situação, este trabalho visou demonstrar a fluidodinâmica dos gases no escapamento, especificamente no silencioso. Logo, fez-se necessário o estudo da mecânica dos fluidos, os tipos de escoamentos, seus comportamentos e propriedades, das equações governantes regentes na análise, da dinâmica dos fluidos computacional, das equações que este utiliza, dos modelos de turbulência e suas melhorias feitas ao longo do tempo.

Ademais fez-se o estudo da geometria obtida da empresa, realizando simulações simples e breves para nortear qual caminho seguir durante o trabalho realizado. E também, estudos do *software* Ansys Fluent, dos seus geradores de geometria, malha computacional, configurações da simulação e pós processamento.

Os resultados obtidos permitiram a visualização do comportamento do fluido no escapamento, na qual é observado a redução da pressão dentro das câmaras ao longo do escoamento e a redução da velocidade do fluido perto das paredes do tubo interno. Permitiram também a identificação de regiões de recirculação de fluido e de baixa velocidade próximo das paredes do silencioso. Assim, foi possível compreensão dos fenômenos físicos envolvidos em todo o silencioso.

Deve-se ressaltar que a análise feita só será efetivamente validado quando desfazer-se das simplificações realizadas, aplicado uma malha mais refinada e havendo mais tempo hábil durante as simulações para melhorar a precisão dos resultados. Dado que os parâmetros utilizados foram parte fornecidas pela empresa e parte obtidas a partir de outros trabalhos acadêmicos, os resultados representam uma projeção da realidade do escoamento do fluido dentro de silenciosos.

Portanto, este trabalho proporcionou conhecimento sobre a fluidodinâmica dos gases resultantes do motor de combustão interna no escapamento de um automóvel, desde a fundamentação teórica até a simulação numérica do escoamento e seus resultados. Assim, disponibilizando a reprodutibilidade da análise feita para todos os outros componentes do escapamento.

6. REFERÊNCIAS

Exhaust system. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Exhaust_system. Acesso em: 3 out. 2022.

Escapamento esportivo: para o que ele serve? Disponível em <http://blog.sigmacar.com.br/escapamento-esportivo-para-o-que-ele-serve/>. Acesso em: 3 out. 2022.

Escape dimensionado rende mais potência ao motor? Disponível em: <https://www.canaldapeca.com.br/blog/escape-dimensionado-rende-mais-potencia-ao-motor/>. Acesso em: 3 out. 2022.

A diferença entre ponteira de escapamento e o abafador esportivo. Disponível em: <http://blog.tuningparts.com.br/veja-qual-a-diferenca-entre-ponteira-de-escapamento-e-o-abafador-esportivo/>. Acesso em: 3 out. 2022.

FERNÁNDEZ-YÁÑEZ, P; ARMAS, O; GÓMEZ, A; GIL, A. **Developing Computational Fluid Dynamics (CFD) Models to Evaluate Available Energy in Exhaust Systems of Diesel Light-Duty Vehicles.** MDPI Applied Sciences Journal, Espanha. 2017.

ESSS. **Fluidodinâmica Computacional: o que é?** Disponível em: <https://www.esss.co/blog/fluidodinamica-computacional-o-que-e/>. Acesso em: 1 jun 2023.

LAUNDER, B. E.; SHARMA, B. I. **Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc.** Pergamon Press, v. 1, p 131-138, 1974.

XU, J.; ZHOU, S. **Analysis of Flow Field for Automotive Exhaust System Based on Computational Fluid Dynamics.** The Open Mechanical Engineering Journal, v. 8, p 587-593, 2014.

SHIMIZU, T.; OHTANI, M. **Numerical simulation of heat transfer and fluid flow applied to exhaust manifold.** JSAE Review, v. 17, p. 17-23, 1996.

SOUZA SILVA, P. M. **Estudo comparativo entre modelos de turbulência para escoamentos em condutas com rugosidade.** 2018. 78 f. Tese (Mestrado integrado em Engenharia mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. 2018.

NIECKELE, A. O. **MEC 2355: Turbulência**. Rio de Janeiro. Disponível em: http://mecflu2.usuarios.rdc.puc-rio.br/Turbulencia_Mec2355/6-Turbulencia%E2%80%9393Eq_Medias.pdf. Acesso em: 25 maio 2023.

GOMES DA ROCHA, R. **Estudo de um método para projectar sistemas de escape de um motor de combustão interna a 4 tempos**. 2011. 79 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. 2011.

PASSOS, R. **Sistemas de escape parte III: tudo sobre abafadores e uma calculadora de coletores**. 2015. Disponível em: <https://flatout.com.br/sistemas-de-escape-parte-iii-tudo-sobre-abafadores-e-uma-calculadora-de-coletores>. Acesso em: 1 jun. 2023.

RÚBIO, G. P.; TEIXEIRA, R. L. P.; CARRILLO, R. A. M.; SIGNORETT, V. T.; LACERDA, J. C.; BRITO, R.F. Numerical Analysis of the Thermal and Aerodynamic Influence in an Automotive Exhaust System Using Computational Fluid Dynamics. **American Journal of Engineering Research (AJER)**, Itabira, v. 6, n. 2, p. 20-27. 2017.

FOX, Robert W. et al. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2010. 710 p. Tradução de Ricardo Nicolau Nassar Koury.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 6th ed. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

LJUNGSTRÖM, Filip; OTTOSSON, Martin; SAEED, Mohammed. **Aerodynamic improvement of Chalmers' Shell Eco-marathon car Smarter**. 2016. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Applied Mechanics, Department Of Applied Mechanics, Chalmers University Of Technology, Gothenburg, 2016.

MUSON, Bruce R. et al. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2004. 571 p. Tradução de Euryale de Jesus Zerbini.

FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M.. **Computational methods for fluid dynamics**. 3. ed. Berlin: Springer, 2002. 423 p.

KLEIN, T. S. **Estudo de um novo modelo de turbulência**. 2007. 204 f. Tese (Mestrado em Ciências) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

ANSYS, Inc. **FLUENT in Workbench User's Guide**. 2009.

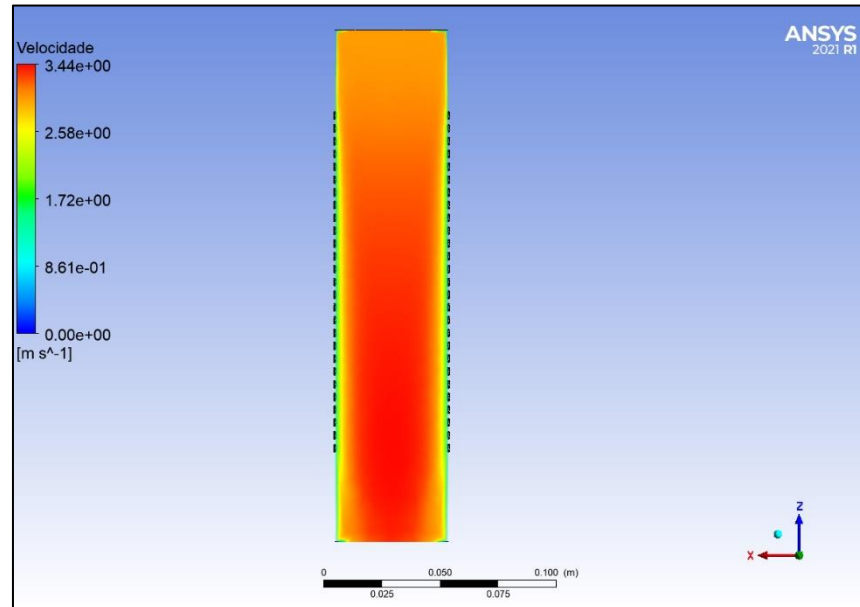
ANSYS, Inc. **ANSYS fluent theory guide**. 2015.

ANSYS, Inc. **Introduction to ANSYS Fluent: Solver Settings**. 2010.

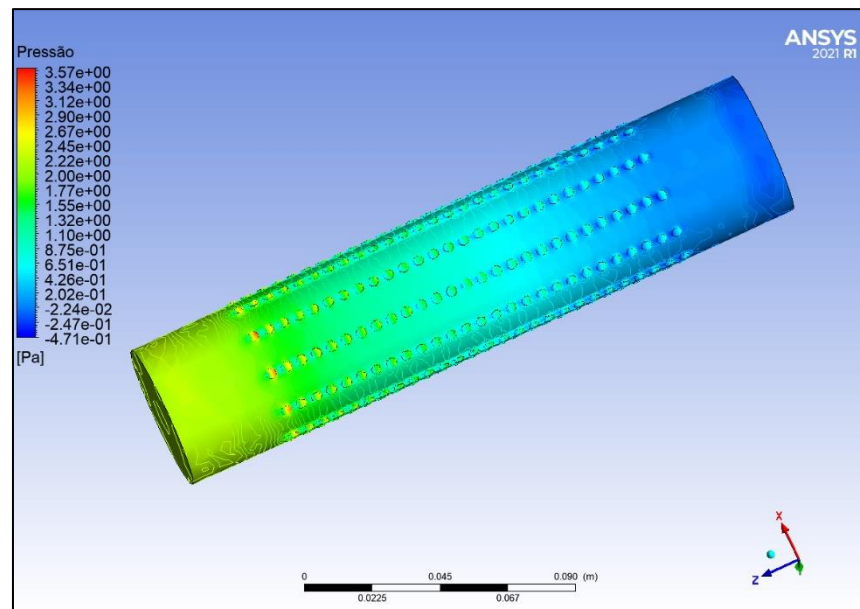
WILEY, J. & Sons. **Handbook of fluid dynamics and fluid machinery: Volume 2: Experimental and Computational Fluid Dynamics**. Canadá. 1996.

APÊNDICE A – Resultados da simulação no tubo perfurado

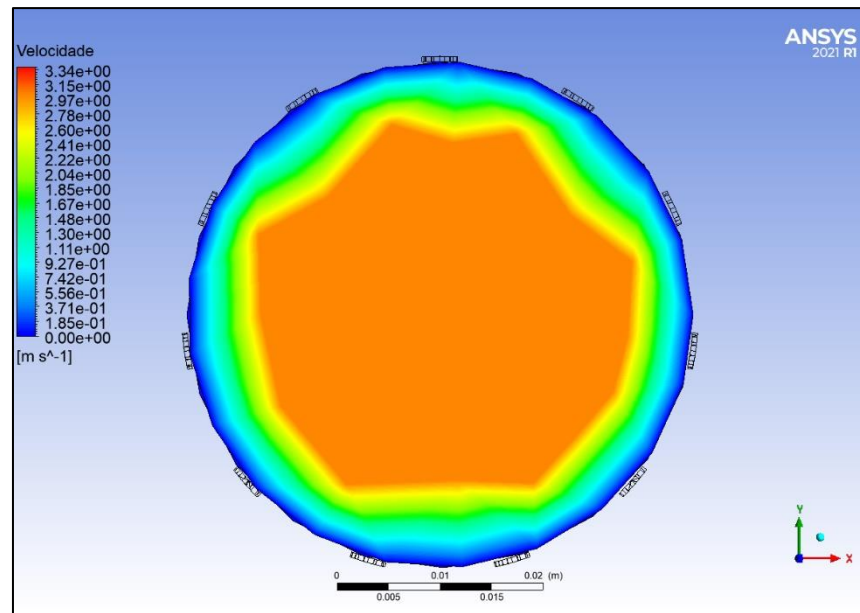
a) Velocidade dentro do tubo perfurado



b) Pressão dentro do tubo perfurado

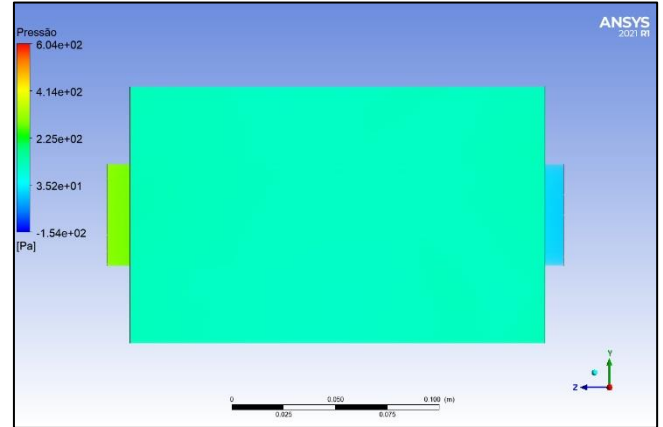
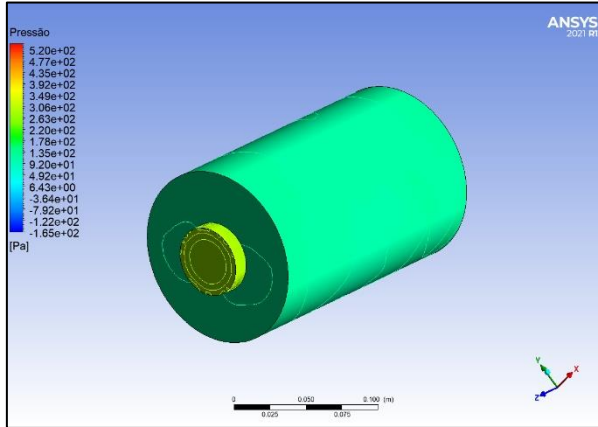


c) Velocidade na entrada do tubo perfurado

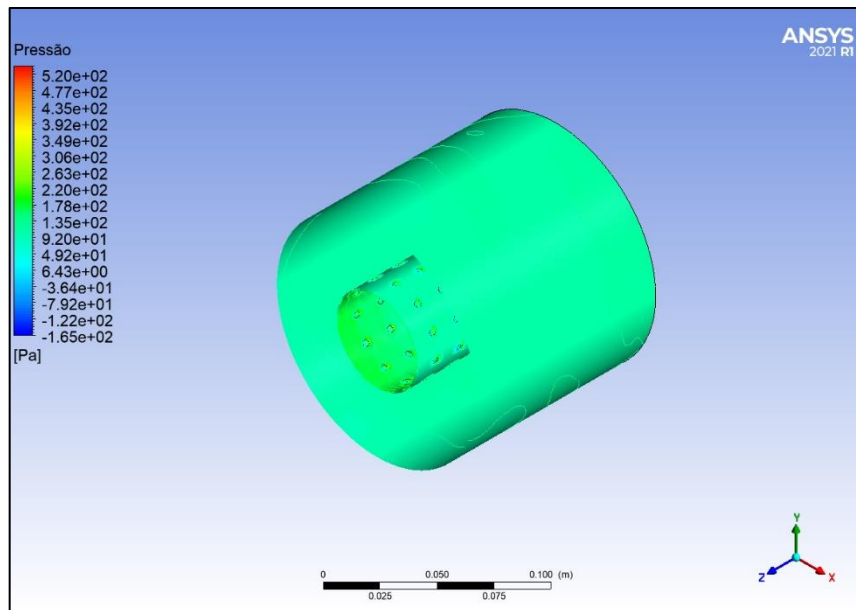


APÊNDICE B – Resultados da simulação da primeira câmara

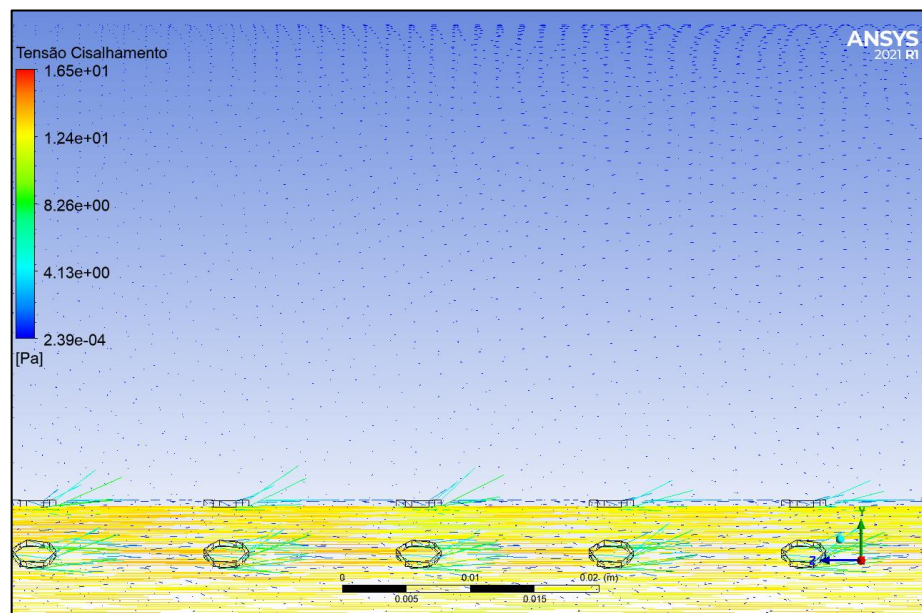
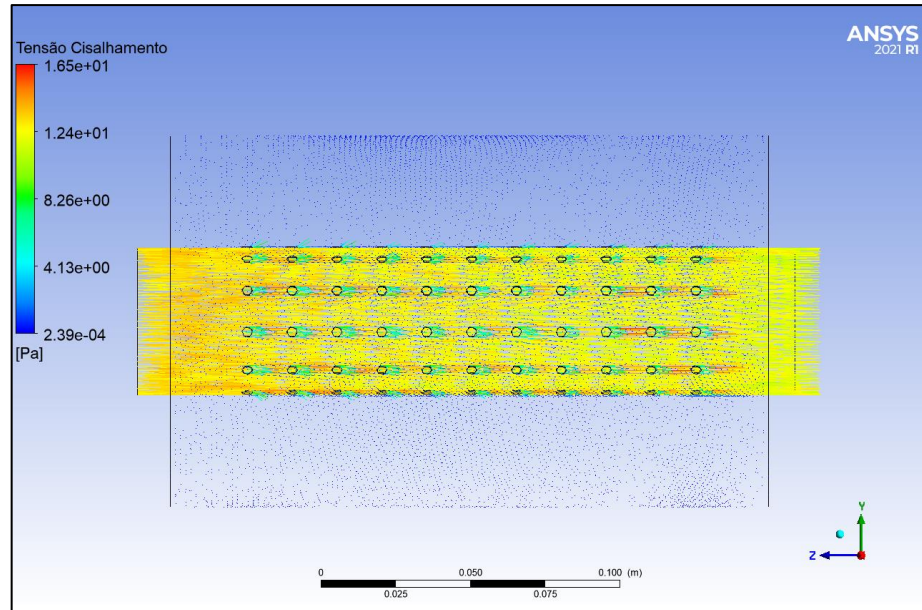
a) Pressão na primeira câmara (Contour).



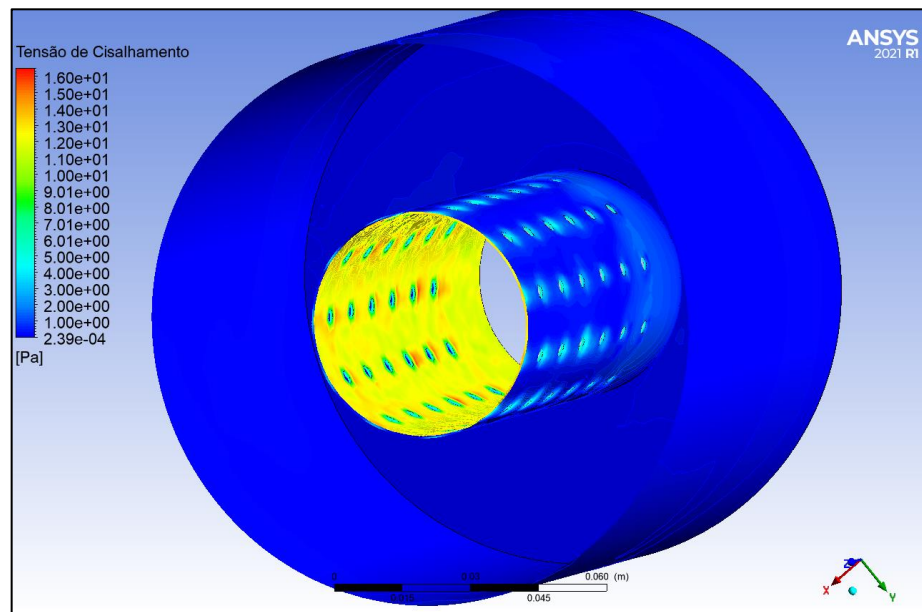
b) Pressão na primeira câmara (Contour), com visualização na metade do comprimento longitudinal.



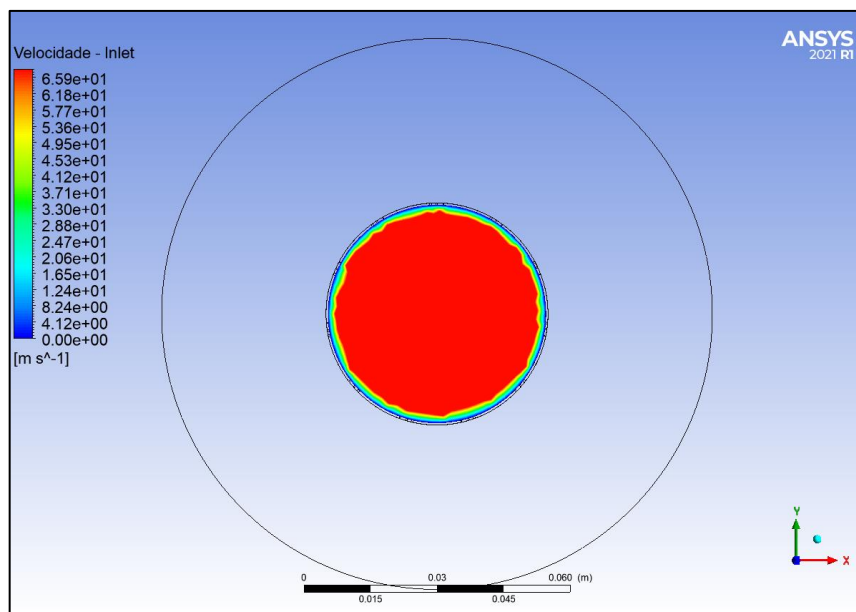
c) Tensão de cisalhamento na primeira câmara



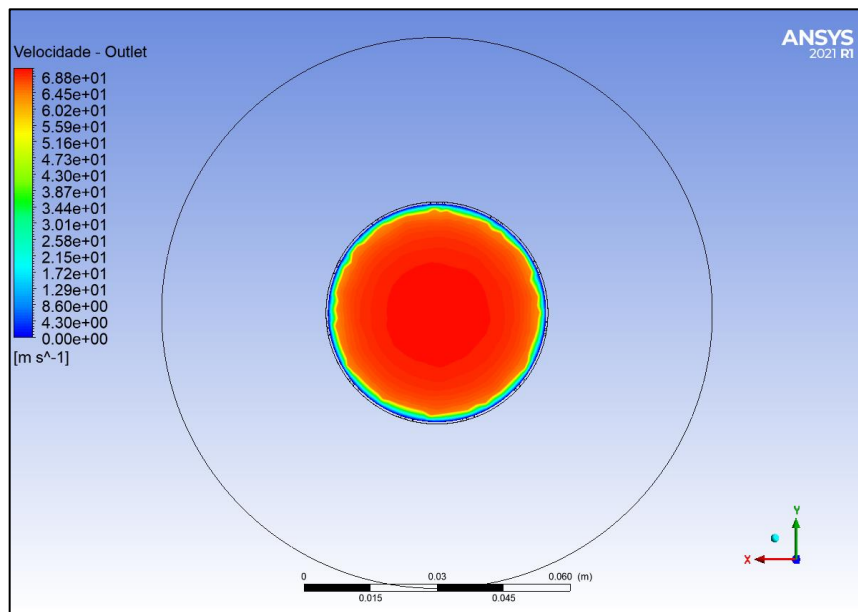
d) Tensão de cisalhamento na primeira câmara, com visualização na metade do comprimento longitudinal.



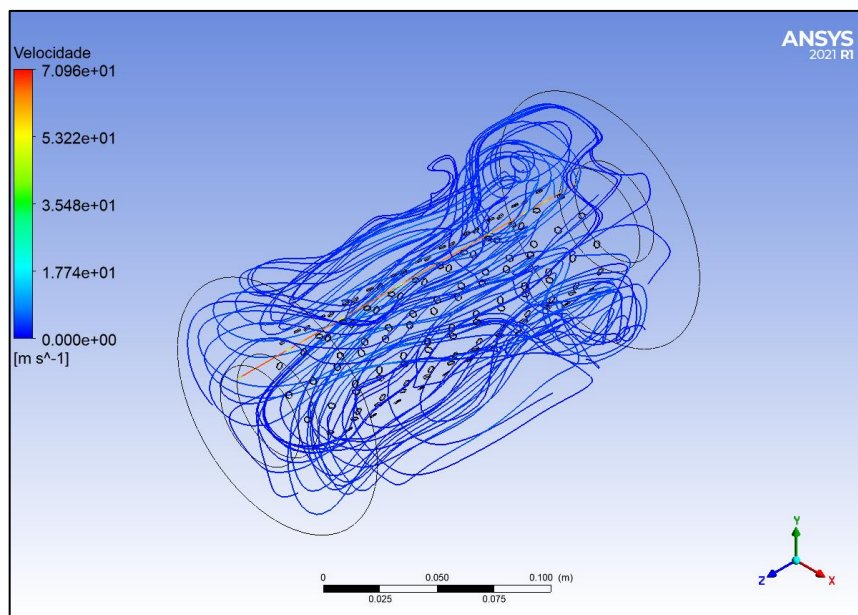
e) Velocidade na entrada da primeira câmara.



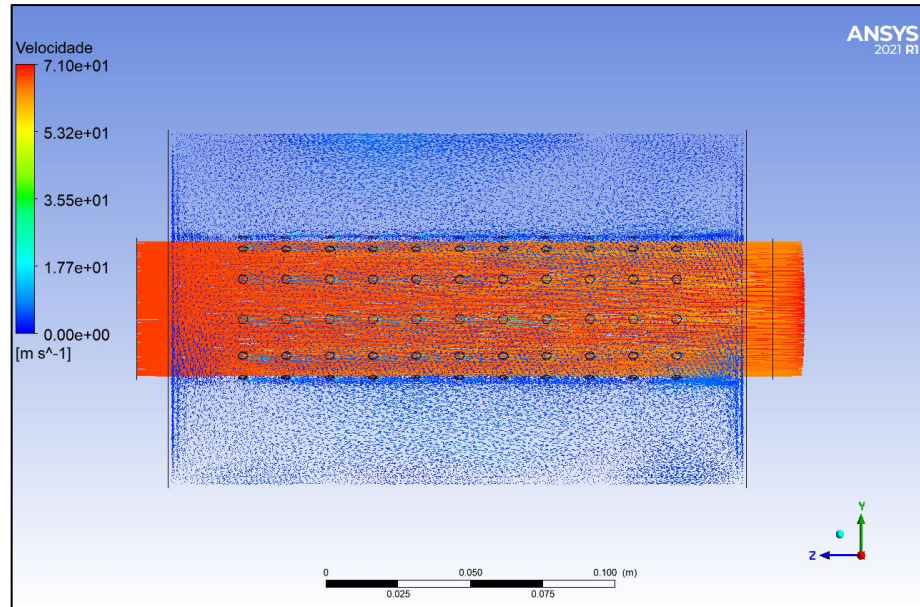
f) Velocidade na saída da primeira câmara.



g) Velocidade na primeira câmara (*Streamline*).



h) Velocidade na primeira câmara (Vetores).



i) Velocidade na primeira câmara (*Volume Rendering*).

