

SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL PARA PROJETO DE UM TUBO DE VENTURI

Daniel Júnio Figueiredo Soares, daniel.soares@ufvjm.edu.br¹
Talles Renato dos Santos Pereira, talles.renato@ufvjm.edu.br¹
Amanda Aparecida Alves Silva, silva.amanda@ufvjm.edu.br¹
Thiago Parente Lima, thiago.parente@ufvjm.edu.br¹
José Ricardo Ferreira Oliveira, jose.ricardo@ufvjm.edu.br¹
Tiago Mendes, tiago.mendes@ufvjm.edu.br¹

¹Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Campus JK, Rodovia MGT 367, Km 583, 5.000 – Diamantina, MG – Brasil, Telefone: (38) 3532-1200, Fax: (38) 3532-6800.

Resumo.

Este trabalho tem como objetivo apresentar o dimensionar um tubo de Venturi para ser acoplado em um coletor de admissão em um protótipo do tipo Fórmula SAE. Sendo assim, foi empregado um estudo fluidodinâmico para compreender o escoamento ao longo desse componente analisando a perda de energia e o perfil de velocidade do fluido. Como principal resultado, teve-se que através de simplificações geométricas a perda de carga ao longo do tubo de Venturi é responsável por reduzir a vazão de ar admitida pelo motor, o que impacta negativamente no funcionamento da máquina.

Palavras chave: Fórmula SAE. Perfil de velocidade. Perda de carga. Escoamento. Coletor de admissão.

Abstract. This work aims to present the dimensioning of a Venturi tube to be coupled to an intake manifold in a SAE formula type prototype. Therefore, a fluid dynamic study was used to understand the flow along this component by analyzing the energy loss and the fluid velocity profile. The main result was that, through geometric simplifications, the loss of pressure along the Venturi tube is responsible for reducing the air flow admitted by the engine, which negatively impacts the machine's operation.

Keywords: SAE Formula. Speed profile. Cargo loss. Flow. Intake manifold.

1. INTRODUÇÃO

O restritor, ou tubo de Venturi, devido a sua geometria, é responsável por diversos fenômenos fluidodinâmicos presentes no escoamento, sendo capaz de impactar na potência que o motor de combustão interna possuirá por controlar a área de entrada de ar em cada um dos cilindros (Martins, 2013).

Sendo a análise fluidodinâmica computacional, conhecida como CFD, utilizada para obtenção da solução analítica de equações diferenciais complexas, logo fatores importantes na análise de escoamento de fluidos podem ser estudados no tubo de Venturi, tais como distribuição de pressões, perfil de velocidade e vazão mássica do fluido.

Além disso, o CFD é uma base para o desenvolvimento do método de elementos finitos, uma representação geométrica produzida por meio da discretização do domínio. Essa discretização consiste na formação de elementos infinitesimais que em conjunto são capazes de apresentar uma imagem aproximada da forma do objeto de estudo original, como ilustra a Figura 01 (Reddy, 2019).

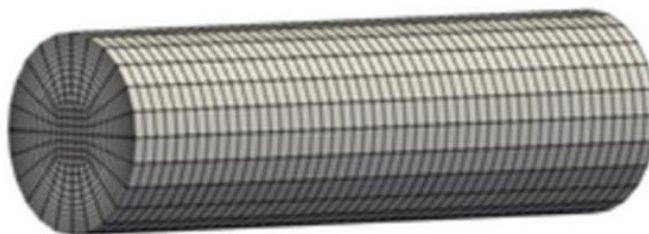


Figura 01. Discretização de um domínio 3D em volumes finitos. Fonte: Greenshields e Weller (2022).

De acordo com a Caetano (2014), a simulação computacional fluidodinâmica é capaz de promover melhor compreensão do escoamento no interior do tubo de Venturi. Sendo assim, o presente trabalho aborda um estudo fluidodinâmico realizado para descrever o escoamento ao longo de um tubo de Venturi. Esse componente foi projetado para ser acoplado ao coletor de admissão presente no motor de HONDA CB300 do protótipo do tipo Fórmula SAE.

Nesta perspectiva, neste trabalho o objeto de estudo faz parte do coletor de admissão o qual sua forma geométrica é constituída, de acordo com Sayyed (2017), por três principais elementos: O restritor (Tubo Venturi), o *plenum* e o tubo corredor, conforme ilustra a Figura 02

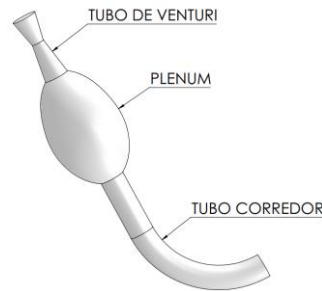


Figura 02. Coletor de admissão (Acervo Pessoal).

O tubo de Venturi, correspondente ao restritor, consiste em uma junção dos tubos convergente e divergente em uma seção denominada garganta, como ilustra a Figura 03 (BRUNETTI, 2008). Este componente é uma parte importante do coletor de admissão por ser responsável pelo controle da área de entrada de ar que adentra cada um dos cilindros do motor.

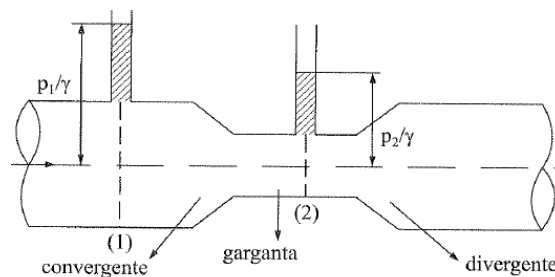


Figura 03. Tubo Venturi (Brunetti, 2008)

Sendo o tubo de Venturi responsável pela maior perda de carga no coletor de admissão, a análise do escoamento foi realizada ao longo deste elemento, possibilitando uma simplificação da geometria do sistema. Sendo assim, foi estudado o perfil de velocidade e o campo de pressão ao longo deste componente por meio da elaboração de um modelo computacional através do capote *ANSYS 2023 R1 student version*.

2. METODOLOGIA

Por meio do método dos volumes finitos, o problema deste trabalho foi implementado no pacote *ANSYS 2023 R1 student version* (2023). Logo, tornou-se possível realizar o estudo do comportamento do fluido ao longo do tubo de Venturi adicionando. Após essa implementação, a modelagem geométrica foi dimensionada através do *Ansys SpaceClaim* (2023) e arquivo foi importado para o *software Ansys Mesh* para a malha ser posteriormente gerada.

A malha consiste em um domínio discretizado que representa o objeto de estudo por meio da junção de pequenos volumes, produzindo uma imagem mais próxima da original.

Os programas mencionados anteriormente empregam as equações de quantidade de movimento (Navier-Stokes) e de continuidade (conservação da massa) para descrever o escoamento, como apresentam as Equações (01), (02) e (03) (FOX, *et al.*, 2014).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \quad (01)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \quad (02)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] \quad (03)$$

onde:

p: Pressão termodinâmica local [Pa];

u, v e w: Componentes da velocidade em x, y e z [m/s];

μ : Viscosidade dinâmica [Pa.s];

ρ : Massa específica do fluido [kg/m³].

g: aceleração da gravidade [m/s²].

Por sua vez, a conservação da massa é dada pela Equação (04) (FOX, *et al.*, 2014).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (04)$$

onde:

u, v e w são componentes da velocidade em x, y e z [m/s].

Sendo que o escoamento em estudo está em regime turbulento, logo aplica-se o modelo de solução k – ϵ . Esse modelo relaciona equações de transporte para a energia cinética turbulenta k e de dissipação de energia cinética turbulenta ϵ (Pope, 2000). Sendo assim, devido a aplicação do tubo de Venturi ser em um motor monocilíndrico, a massa de ar admitida pelo motor pode ser estimada por meio do volume do cilindro dessa máquina através da Equação (05) (Brunetti, 2008).

$$m = V \times \rho \quad (05)$$

onde:

m: Massa de ar admitida [kg];

V: Volume do cilindro [m³];

ρ : Massa específica do ar [kg/m³].

Sendo o ciclo composto por duas voltas realizadas pelo eixo do motor e a admissão em apenas uma dessas, na entrada do motor a vazão mássica de ar (\dot{m}) pode ser relacionada diretamente proporcional com a rotação (N) por meio da Equação (06).

$$\dot{m} = \frac{N}{120} \times m \quad (06)$$

onde:

\dot{m} : Vazão mássica de ar [kg/s];

N: Rotação do motor [rpm];

m: Massa de ar admitida [kg].

Após encontrar a vazão mássica de ar (\dot{m}), através da Equação (07) se torna possível a velocidade da entrada do ar no Tubo de Venturi pode ser determinada (Fox, *et al.*, 2014).

$$\dot{m} = \rho \times Vel \times A \quad (07)$$

onde:

\dot{m} : Vazão mássica de ar [kg/s];

ρ : Massa específica do ar [kg/m³];

Vel: Velocidade do fluído [m/s];

A: Área da seção [m²].

Além disso, o número adimensional de Reynolds (Re) pode ser estimado para a geometria do Tubo de Venturi através da velocidade do ar, como apresenta a Equação (08) (Brunetti, 2008).

$$Re = \frac{Vel \times D}{\nu} \quad (08)$$

onde:

Re : Número de Reynolds [-];
 Vel : Velocidade do fluido [m/s];
 D : Diâmetro do tubo [m];
 ν : Viscosidade cinemática [m²/s].

Para que a perda de carga entre a entrada e a saída do tubo fosse determinada, foi considerada pressão nula na saída do tubo. Sendo assim, tornou-se possível analisar a diferença de pressão relativa entre as suas extremidades além do perfil de velocidade do fluido ao longo da linha A, que corta a seção transversal da Figura 04.

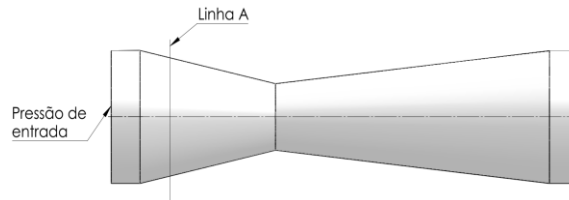


Figura 04. **Parâmetros de análise** (Acervo Pessoal)

Essa simulação foi realizada em um *Notebook Dell* dispoindo de um processador *Intel i3* com 2.00 GHz e 12 GB de memória. Além disso, o tubo de Venturi apresentou a seção mínima de 20mm de diâmetro interno e suas dimensões são apresentadas pela Figura 05.

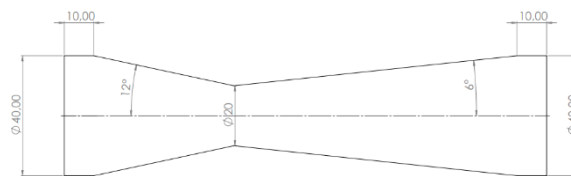


Figura 05. Dimensões do tubo de Venturi (Acervo Pessoal)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A superfície foi modelada adotando condições de contorno do volume, como eixo de rotação, parede e saída. A superfície foi modelada por meio do *software SpaceClaim* disponível no pacote *Ansys* (2023), de acordo com a Figura 06.

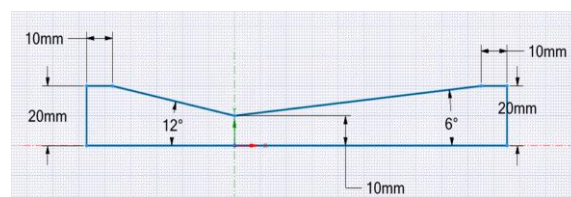


Figura 06. Superfície de revolução modelada no *SpaceClaim* (Acervo Pessoal)

Dessa forma, foi a malha foi criada pela ferramenta “*Mesh*” no modelo 2D. Para este desenvolvimento, os contornos dos modelos foram nomeados inicialmente para otimizar a sua produção, como ilustra a Figura 07.

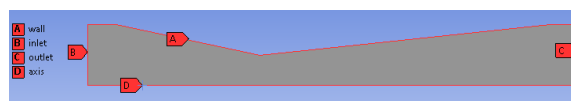


Figura 07. Superfície de revolução modelada no “*Mesh*” (Acervo Pessoal)

Contudo, para criação da malha foram empregados elementos 2D estruturados com três ou quatro arestas definidas. Além disso, os efeitos da camada-limite como contrafluxo e separação referente ao fluxo do fluido foram capturados por meio ferramenta “*inflation*” (Fox, *et al.*, 2014). Em seguida, pequenas camadas que aumentam de espessura conforme se

afastam da parede foram desenvolvidas, de acordo com o fator “*Growth Rate*”. A Tabela 01 apresenta os principais parâmetros dessa malha gerada e a Figura 08 ilustra a malha resultante.

Tabela 1. Principais Parâmetros da Malha Gerada.

Parâmetros	Valor
Nós	1025
Elementos	952
<i>Growth Rate</i>	1,2
N. Camadas	5
Tamanho dos elementos	3 mm

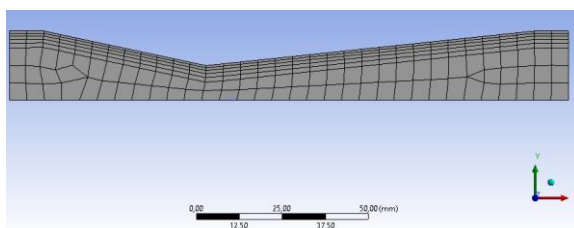


Figura 08. Malha computacional (Acervo Pessoal)

Sendo que o volume do motor (V), de acordo com o manual do usuário Honda (2010), corresponde a $2.916 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, por meio da Equação 05 a massa de ar da entrada de cada ciclo é de $0,345 \times 10^{-3} \text{ kg}$.

Uma vez que a velocidade da análise é de 5000 rpm, a Equação 6 pode ser empregada, o que resulta em uma vazão mássica (\dot{m}) de ar ao longo do tubo de Venturi de $14,386 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$. Ao mesmo tempo, a área da seção transversal (A) do tubo que possui diâmetro de $1,257 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ possui velocidade do fluxo (Vel) 9,669 m/s, de acordo com a Equação 07.

Sendo essa velocidade (Vel) utilizada para obtenção do número de Reynolds (Re), de acordo com a Equação 08 este valor é de 24.951,387. Por este ser superior a 2300, comprova-se que o escoamento é turbulento (Hibbeler, 2011).

Após a determinação dessa velocidade, todas as condições de contorno do fluxo foram adicionadas à “*Setup*”, como apresenta a Figura 09.

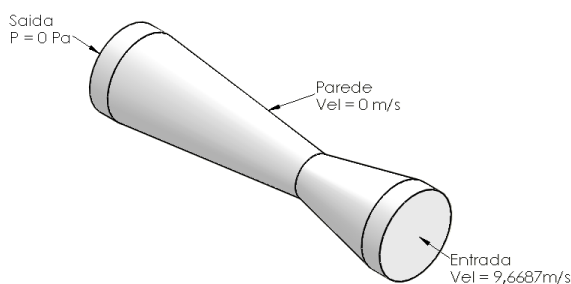


Figura 09. Condições de contorno do escoamento (Acervo Pessoal)

Sendo assim, para dar continuidade, o programa realiza iterações limitadas até que seja atendida a condição de convergência imposta pelo usuário. Contudo, a condição empregada foi de aproximação do valor da pressão na entrada, um dos valores presentes na análise.

Além disso, o usuário também insere as condições de desperdício. Logo, valores residuais são calculados de desequilíbrio variável. Porém, leva-se em consideração a conservação de quantidades importantes do problema no momento da medição. Referente à qualidade da solução quanto menor o valor, melhor ela será.

Como resultado, foram realizadas 148 iterações durante a simulação e a forma que os resíduos se comportaram pode ser observada por meio da Figura 10.

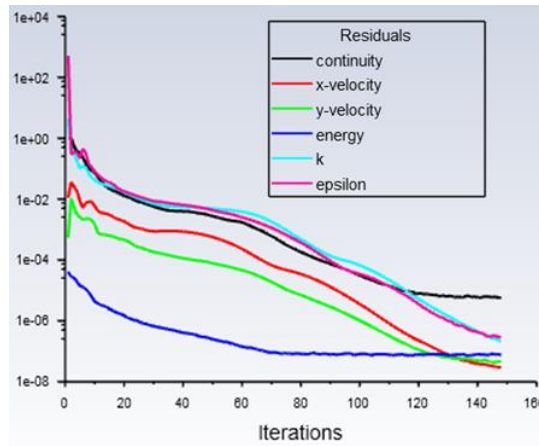


Figura 10. Gráfico dos resíduos da simulação realizada (Acervo Pessoal)

Na Figura 11, à esquerda é possível observar valores de pressão (Pa) por iteração na entrada do tubo de Venturi e, à direita, o perfil de velocidade após a malha ser refinada em proximidade à parede. Dessa forma, foi possível observar que a malha produziu uma excelente discretização do modelo devido a precisão na curva gerada.

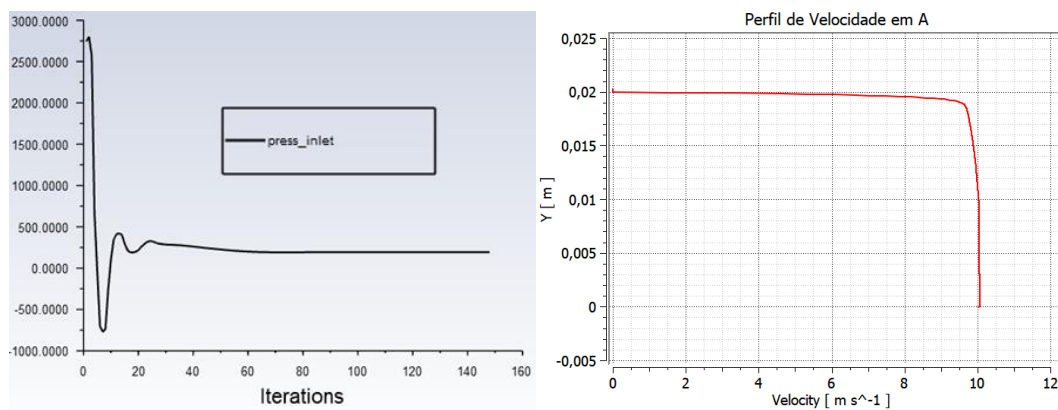


Figura 11. Gráfico do valor da pressão na simulação realizada e perfil de velocidade (Acervo Pessoal)

Com a definição do modelo de rede foram analisados os resultados obtidos até então. Na Figura 12, a velocidade do líquido ao longo do Tubo de Venturi pode ser observada à esquerda e o comportamento da pressão ao longo do Tubo de Venturi à direita.

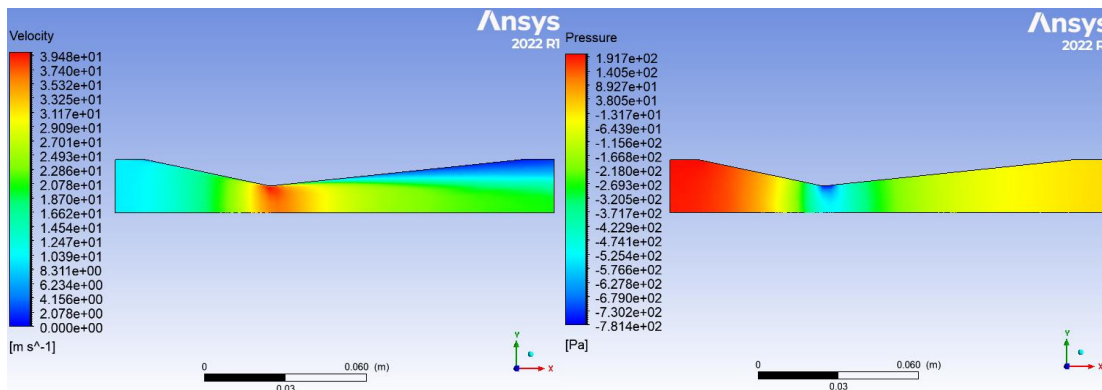


Figura 12. Velocidade e pressão do fluido ao longo do tubo (Acervo Pessoal)

Além disso, em um ponto específico da geometria foi possível ser aplicada a pressão. No momento em que este ponto esteve na entrada do tubo, a pressão encontrada foi de 188.992 Pa. Sendo nula o valor da pressão na saída da tubulação, esse valor encontrado corresponde a perda de pressão ao longo do tubo.

Mantendo a velocidade de rotação de 5.000 rpm, a queda de queda de pressão ao longo do tubo de Venturi foi de 907.180 Pa.

Entretanto, é importante frisar que esses valores estimados da queda de pressão foram obtidos por meio da simplificação geométrica atrelada às propriedades do fluido. Sendo assim, a fim de enriquecer os dados obtidos, um gráfico foi produzido para descrever o valor da pressão em função comprimento do tubo de Venturi. Logo, o eixo de rotação foi tomado com base e o ponto $X=0$ foi adicionado na garganta do tubo. Dessa forma, esta curva pode ser ilustrada pela Figura 13.

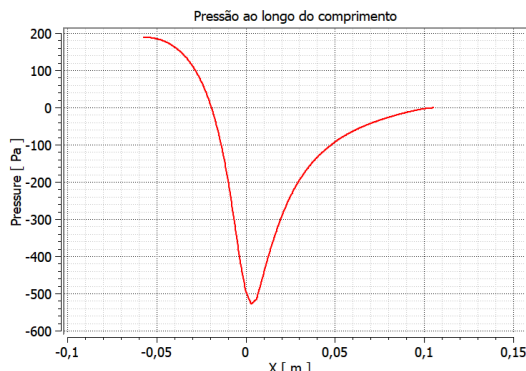


Figura 13. Pressão do fluido ao longo do tubo. Fonte: Acervo Pessoal.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho objetiva realizar uma análise fluidodinâmica computacional através do método de elementos finitos para estudar o escoamento de ar em regime turbulento. Este estudo corresponde ao projeto de um tubo de Venturi que será acoplado ao coletor de admissão de um veículo do tipo Fórmula SAE.

Durante este estudo, foi simplificada a geometria deste elemento a uma superfície de revolução que corresponde ao coletor de admissão e os resultados qualitativos referentes ao escoamento presente nesse estudo se tornaram altamente eficazes. Porém, para continuação deste estudo necessita-se executar uma análise de convergência para obtenção de um resultado quantitativo satisfatório. Essa análise de convergência indicará a qualidade da discretização da geometria através da geração da independência da malha.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPEMIG, CAPES, CNPq, a PRPPG da UNIFEI e a PRPPG e PROEXC UFVJM pelo apoio financeiro. Também expressam gratidão ao ICT/UFVJM, ao NEST/UNIFEI e ao Programa de Tutorial (PET) Estratégias para reduzir a retenção e a evasão, além da equipe de liderança discente Fórmula Real Racing.

6. REFERÊNCIAS

- ANSYS INCORPORATION. 2023. "Ansys Fluent Workbench Tutorial Guide 2023 R2". 22 Jan. 2023 <<https://studylib.net/doc/27126237/ansys-fluent-workbench-tutorial-guide-2023-r2>>.
- BRUNETTI, F. 2008. *Mecânica dos Fluidos*. Person Prentice Hall, São Paulo, 2ª edição.
- CAETANO, N.M. 2014. *Modelagem e simulação do escoamento em um Venturi*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Paraná, Ponta Grossa.
- FOX, R.W., PRITCHARD, P.J. e MCDONALD, A.T. 2014. *Introdução à mecânica dos fluidos*. LTC, Rio de Janeiro, 8ª edição.
- GREENSHIELDS, C. e WELLER, H. 2022. "Notes on Computational Fluid Dynamics: General Principles." 22 Jan. 2023 <<https://doc.cfd.direct/notes/cfd-general-principles/computational-mesh>>.
- HIBBELER, R.C. 2011. *Estática: mecânica para engenharia*. Pearson, São Paulo, 12ª edição.
- HONDA. 2010. "Manual do Proprietário". 22 Jan. 2023 <https://www.honda.com.br/pos-venda/motos/sites/customer_service_motos/files/manuais/CB%20300R%202013.pdf>.
- MARTINS, J. 2013. *Motores de Combustão Interna*. Políndústria, Braga, 2ª edição.
- POPE, S.B. 2000. *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, Cambridge, [Edição indisponível].

REDDY, J.N. 2019. *Introduction to the Finite Element Method*. McGraw-Hill Education, New York, 4ª edição.
SAYYED, A. 2017. “Air Flow Optimization through an Intake System for a Single Cylinder Formula Student (FSAE) Race Car”. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Vol. 6, p. 183-188.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.