



# TÚNEL DE VENTO ACADÊMICO DE BAIXO CUSTO NA CAPTAÇÃO DE IMAGENS E ESTUDO DO ESCOAMENTO DO AR<sup>1</sup>

LOW-COST ACADEMIC WIND TUNNEL FOR IMAGE CAPTURE AND AIR FLOW STUDY

**E. S. Cristóvão** | [erick.cristovao@fatec.sp.gov.br](mailto:erick.cristovao@fatec.sp.gov.br) | FATEC

**J. P. M. Costa** | FATEC

**T. S. Ribeiro** | FATEC

**R. A. Moura** | FATEC

## RESUMO

O desempenho aerodinâmico de veículos tem sido investigado por desenvolvedores e projetistas. Dessa maneira, pode-se partindo de modelos matemáticos utilizar protótipos de veículos mockups em escala geométrica menores para testar as forças aerodinâmicas em um túnel de vento. Contudo, o custo e disponibilidade de acesso aos túneis de vento são restritos. Nesse sentido o objetivo deste trabalho é desenvolver um túnel de vento acadêmico de baixo custo para captação de imagens e estudo laboratorial do escoamento do ar, aerodinâmica, velocidade e identificar regimes laminar e turbulento do ar. A metodologia contou com pesquisa bibliográfica em fontes internacionais para identificar os tipos de túneis de vento existentes no mercado, limites, aplicações e complexidade. Após o estudo e ensaios virtuais, foi construído um túnel experimental com circuito aberto, para facilitar o seu desenvolvimento, construção e operacionalização. Os resultados encontrados permitiram identificar regimes de escoamento e princípios aerodinâmicos. Conclui-se que o tipo de túnel de vento e cálculos de dimensionamento definidos, o protótipo demonstrou-se como uma alternativa para o processo ensino-aprendizagem em aulas práticas em laboratórios, para que alunos construam, ensaiem e visualizem os tipos de movimentação dos fluidos, simulando em túnel de vento.

**Palavras-chave:** Aerodinâmica. Arrasto. Escoamento. Túnel de vento.

## ABSTRACT

The aerodynamic performance of vehicles has been investigated by developers and designers. In this way, starting from mathematical models, it is possible to use vehicle prototypes mockups on a smaller geometric scale to test aerodynamic forces in a wind tunnel. However, the cost and availability of access to wind tunnels are restricted. In this sense, the objective of this work is to develop a low-cost academic wind tunnel for capturing images and laboratory studies of air flow, aerodynamics, speed and identifying laminar and turbulent air regimes. The methodology included bibliographic research in international sources to identify the types of wind tunnels on the market, limits, applications and complexity. After the study and virtual tests, an experimental tunnel with an open circuit was built to facilitate its development, construction and operationalization. The results found allowed the identification of flow regimes and aerodynamic principles. It is concluded that the type of wind tunnel and sizing calculations defined, the prototype demonstrated itself as an alternative for the teaching-learning process in practical classes in laboratories, for students to build, test and visualize the types of fluid movement, simulating in a wind tunnel.

**Keywords:** Aerodynamics. Drag. Flow. Wind tunnel.

## INTRODUÇÃO

Moura *et al* (2022) citam que com a chegada da era digital, o trabalho humano e máquina se tornaram cada vez mais frequentes e próximos. Dessa forma, por exemplo, a necessidade de estudar aerodinâmica com o objetivo de melhorar o desempenho dos aviões e dos carros, túnel de vento é a máquina que fará a diferença no processo ensino-aprendizagem para estudo detalhado da aerodinâmica nos veículos sobre a ação e movimento do ar sobre a superfície do objeto (MATOS e BOTELHO, 2007).

O desenvolvimento de túneis de vento para fazer análise de objetos em tamanho real não é muito comum, pois por conta de seu tamanho eles acabam tornando-se caros e extremamente complexos de serem fabricados. Para contornar essa dificuldade, uma das alternativas é a construção de um túnel de vento menor, para se utilizar os objetos a serem analisados com tamanho em escala e proporcional ao modelo original.

Existem diferentes classificações de túneis de vento, e o tipo escolhido foi o modelo de circuito aberto, pois este tipo possui um baixo custo de fabricação, além de uma menor complexidade no projeto.

Conforme Okamoto (2011), apesar dos enormes avanços obtidos pelos métodos computacionais nos últimos anos, a realização de testes em túneis de vento permanece essencial para a obtenção de diversos dados que serão necessários para a tomada de decisões de projetos de engenharia.

Apesar de se tratar de um túnel de vento simples destinado a aplicação educacional, a construção de um equipamento desse tipo requer estudos mais aprofundados. A maioria dos seus componentes precisam ser projetados e fabricados sob medida, atendendo requisitos pré-estabelecidos para que seja possível atingir o resultado esperado.

Exceto por alguns componentes que estão disponíveis em diversos tamanhos padronizados, outros não estão disponíveis para pronta entrega, podendo acarretar aumento dos custos do projeto. A fim de evitar este problema, optou-se pela utilização de materiais baratos e acessíveis, contribuindo para o barateamento de seu custo final.

A antropometria e ergonomia devem ser verificadas na construção do protótipo de túnel de vento para testar a aerodinâmica de protótipos de veículos, de modo que possa ser montado, movimentado e manipulado tanto pelo gênero masculino como pelo feminino. O túnel deve ainda ser projetado para gerar um fluxo uniforme e controlado, permitindo mensurar a resistência do ar, a estabilidade e o desempenho do veículo sem colocar em risco a integridade de quem o está manipulando (Moura *et al.*, 2019).

Para o desenvolvimento das partes estruturais, tais como a seção de testes, bocal de contração e difusor, foram utilizados softwares e parâmetros de mecânica dos fluidos para seu dimensionamento. Já para o circuito de iluminação e captação de imagens foram aplicadas técnicas de lógica de programação e de eletrônica. A Figura 1 ilustra o túnel de vento finalizado e pronto para ser usado.

**Figura 1 |** Protótipo de um túnel de vento construído com material reciclável

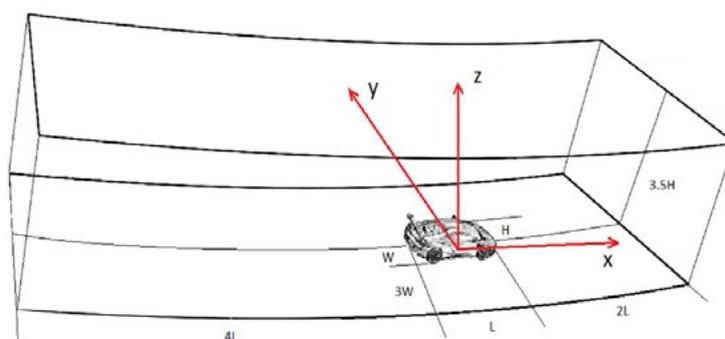


Fonte: Próprio Autores (2023).

## REVISÃO DA LITERATURA

Segundo Barlow (1999), túneis de vento tornam possível o uso de modelos que podem ser preparados no início dos ciclos de design, pois inclui toda a complexidade do fluxo de um fluido e porque também podem fornecer uma grande quantidade de dados confiáveis. Além disso, são frequentemente o meio mais rápido, mais econômico e mais preciso para conduzir pesquisas e obter dados aerodinâmicos para embasar decisões de projeto. Seu uso economiza dinheiro e salva-vidas. A Figura 2 ilustra a simulação com método de cálculo por modelagem matemática

**Figura 2 |** Simulação com método de cálculo por modelagem matemática



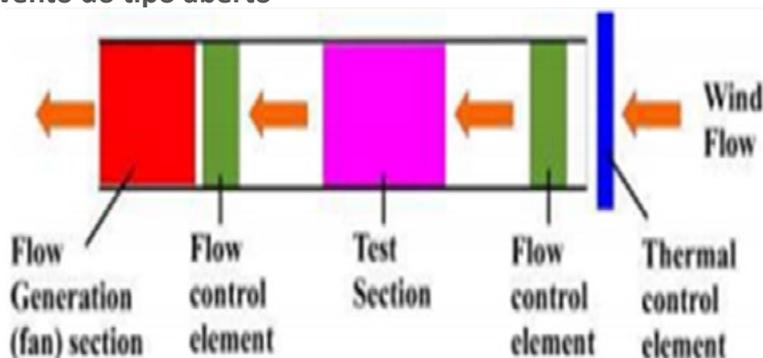
Fonte: Piechna *et al* (2022).

Segundo Piechna *et al.* (2022), as simulações numéricas podem ser realizadas em um objeto em escala reduzida 1:18 na parede ortogonal e área de design curvo com dimensões no domínio computacional com comprimento  $L = 4,75$  cm, altura  $H = 1,2$  cm e largura  $W = 2,05$  cm. O túnel de vento permite aos pesquisadores estudarem o comportamento do fluxo de um fluido sobre qualquer objeto de interesse, além das forças atuantes e sua interação com o meio. Desde o início têm sido usados para verificar teorias aerodinâmicas visando facilitar o projeto de aeronaves sendo que durante muito tempo foi sua principal finalidade. Atualmente, a pesquisa aerodinâmica expandiu-se para os mais diversos campos, tais como automotivos, arquitetura, meio ambiente, educação e outros. Isto evidencia sua importância nos testes realizados nos túneis de vento de baixa velocidade. Apesar das técnicas de dinâmica dos fluidos computacional terem melhorado expressivamente, milhares de horas de teste em túneis de vento ainda se fazem necessários durante o desenvolvimento de uma nova aeronave, turbina eólica ou qualquer outro produto onde existam interações complexas com um fluido (Hernández, 2013).

### TIPOS DE TÚNEL DE VENTO: ABERTO E FECHADO

De maneira simplificada no túnel de vento do tipo aberto, o fluxo de ar é puxado ou soprado para a sua entrada e expelido na saída, conforme Figura 3 (Merrison, 2011).

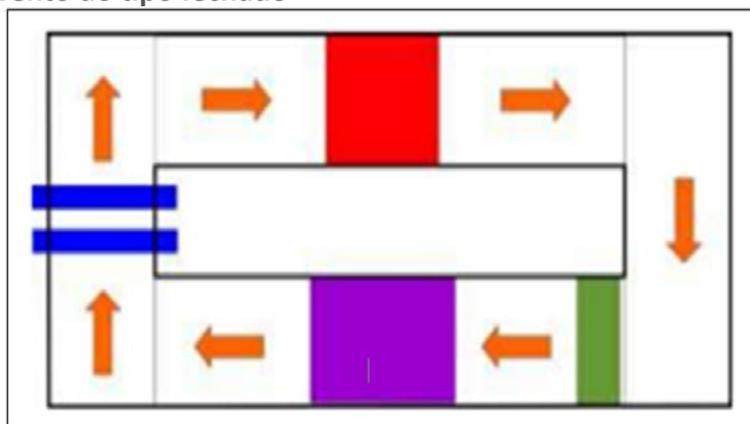
**Figura 3 | Túnel de vento do tipo aberto**



Fonte: Merrison (2011).

No tipo fechado de túnel de vento, o ar que é expelido é alimentado novamente na entrada, de modo que o mesmo ar recirculará, conforme Figura 4 (Merrison, 2011).

Figura 4 | Túnel de vento do tipo fechado



Fonte: Merrison (2011).

De maneira resumida, as etapas de funcionamento de ambos os tipos de túnel são: direção do fluxo do vento, elemento de controle térmico, elemento de controle de fluxo, seção de teste e, finalmente, a seção de geração de fluxo.

Nas instalações destes tipos de túneis tradicionais a escolha dos materiais a serem utilizados em sua fabricação não possui restrições, ou seja, qualquer material pode ser selecionado. Os tipos de materiais são, portanto, normalmente selecionados de acordo com algumas propriedades mecânicas requeridas e leva em conta o custo e disponibilidade de tais materiais. Por exemplo, a madeira é um material largamente utilizado neste processo de fabricação (Merrison, 2011).

Segundo Hernández *et al* (2013), o tamanho da seção de testes deve ser definido conforme as especificações principais do túnel de vento, incluindo também a velocidade de operação e a quantidade de fluxo desejada. Seu tamanho e a velocidade de operação irão determinar o tamanho máximo dos modelos que serão utilizados e o maior número de *Reynolds* (*Re*) alcançável. A forma da seção transversal depende de quais serão suas aplicações. Para aplicações civis ou industriais, normalmente recomenda-se uma seção transversal quadrada. Neste caso, os modelos possuem área frontal equivalente a no máximo 10% da área da seção transversal da seção de testes, para se evitar fazer correções necessárias.

No entanto, para aplicações aeronáuticas é recomendável uma seção transversal retangular. No caso de testes tridimensionais, uma proporção típica entre largura e altura é de 4:3, no entanto, para testes bidimensionais recomenda-se uma razão de 2:5 (Hernández *et al.*, 2013).

Dessa forma, as competências e as habilidades técnicas pode ser ensinada e treinada com o auxílio da tecnologia e máquinas (Moura *et al.*, 2022).

A seção de contração (ou bocal de contração) é a parte mais crítica do túnel de vento pois ela tem o maior impacto na qualidade do fluxo de ar para a seção de teste. Seu objetivo é acelerar o fluxo do fluido em direção a seção de testes, contribuindo para reduzir sua turbulência e não-uniformidades (Moura; Moura, 2019).

A aceleração do fluxo e a atenuação das não-uniformidades dependem principalmente do que é conhecido como razão de contração (N) relacionada entre as áreas das seções de entrada e de saída que pode ultrapassar a 20, porém, normalmente essa razão é mantida numa faixa entre 6 até 10 (Hernández *et al.*, 2013).

Vários arranjos de exaustores podem ser utilizados levando-se em consideração sua capacidade e a necessidade de vazão requerida. Porém, a turbulência mostra-se um pouco diferente quanto maior for o número de exaustores, porém, seus efeitos não irão alterar o fluxo na seção de testes desde que seja utilizada uma câmara de estabilização que tenha sido bem dimensionada (Okamoto *et al.*, 2011).

Após o fluxo sair da fonte emissora, ele deverá sofrer um processo de uniformização através da câmara de decantação. Quando é necessário prover um fluxo de ar de alta qualidade alguns dispositivos precisam ser instalados para aumentar a sua uniformidade além de reduzir o nível de turbulência. Para atingir estes objetivos costuma-se usar telas e colmeias (*honeycombs*), pois eles atingem as condições necessárias. A principal função dos difusores é recuperar a pressão estática para aumentar a eficiência do túnel de vento e, obviamente, fechar o circuito. Foi comprovado que para evitar o descolamento do fluxo, o ângulo máximo de abertura no difusor deve ser menor que 3,5°. Desta forma é altamente recomendado não exceder o limite do ângulo de abertura além de projetar o difusor para que ele seja o mais longo possível. O objetivo principal do sistema de exaustão fechado (Figura 5) é manter o fluxo do fluido circulando dentro do túnel de vento a uma velocidade constante, compensando todas as perdas e dissipações (Hernández *et al.*, 2013).



No sistema a somatória de todas as perdas podem ser verificadas por seção do túnel de vento (Barlow *et al.*, 1999).

Os valores da perda de carga em cada seção do túnel de vento são demonstrados no Tabela 1.

**Tabela 1 | Perda de carga em cada seção**

Componente	Peças	k	Q (N/m <sup>2</sup> )	ΔP (N/m <sup>2</sup> )
Câmara	1		2,44	
Colmeia	1	0,358		
Telas	4	2,36	0,022	0,205
Bocal de contração	1		39,04	
Seção de teste	1		39,04	
Difusor	1		2,18	
Total	9		82,72	0,2057

Fonte: Brunetti (2008)

No desenvolvimento deste trabalho optou-se por visualizar a camada limite bem como o escoamento do fluxo do fluido e o seu comportamento ao redor do modelo analisado. Para isso foi utilizado um umidificador de ambientes caseiro. Ele foi responsável por gerar a fumaça introduzida na seção de testes com o auxílio de um pequeno duto. Além disso, com o intuito de disponibilizar o túnel de vento como uma ferramenta didática para o ensino de dinâmica dos fluidos foi utilizada uma câmera de alta definição acoplada a um microcomputador *Raspberry Pi* para conexão a um computador em sala de aula via cabo HDMI. Desta forma foi possível projetar as imagens e visualizar o que ocorreu durante o deslocamento do fluido, mudanças de geometria, perfis aerodinâmicos etc.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma alternativa didática para estudar a dinâmica dos fluidos, comparando os resultados teóricos calculados em sala de aula com os resultados práticos obtidos. Visualizar o comportamento de um fluido que escoar através de uma superfície em análise, identificando oportunidades de melhoria aerodinâmica, bem como possíveis erros de projeto. Além disso, estudar seu comportamento em diferentes tipos de superfícies (aerodinâmicas e não aerodinâmicas). A Figura 6 ilustra a seção de testes do túnel em funcionamento.

**Figura 6 | Túnel de vento em funcionamento.**



Fonte: Próprio Autores (2023).

Finalmente, após a fabricação das peças constituintes do túnel de vento foi realizada a montagem de todo o sistema.

A Figura 7 ilustra o protótipo do túnel de vento completo.

**Figura 7 | Ensaio no protótipo do túnel de vento.**



Fonte: Próprios Autores (2023)

Durante a montagem, alguns ajustes foram necessários para finalizar a atividade se prejudicar ou afetar a montagem do conjunto e a realização dos testes programados.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O presente trabalho conseguiu atingir os objetivos para os quais ele foi projetado. Apresentou um comportamento dentro do previsto, sendo possível gerar o escoamento do fluido de maneira adequada. A câmera conseguiu captar de maneira bastante nítida o comportamento do fluido, possibilitando distinguir alguns dos fenômenos estudados na dinâmica dos fluidos.

Para obter o efeito de fumaça que facilita a visualização do comportamento do fluido foi utilizado um umidificador de ambiente. Ele usa água para gerar a fumaça, desta forma ela não é agressiva a saúde, podendo ser usada por qualquer estudante.

## REFERÊNCIAS

AHMAD, K., KHARE, M., & CHAUDHRY, K. K. (2005). Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections - a review. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93(9), 697–717. DOI:[10.1016/j.jweia.2005.04.002](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2005.04.002)

ALMEIDA, J. L. Projeto mecânico de um túnel de vento para testes aerodinâmicos em laboratório. Universidade Alto Vale Rio do Peixe. Campus Caçador/SC, 2016.

ANAC.GOV.BR. Agência Nacional de Aviação Civil. ANACPÉDIA. Disponível em: [https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por\\_esp/tr352.htm#:~:text=Nota%20adicional1-,O%20n%C3%BAmero%20Mach%201%2C00%20%C3%A9%20igual%20%C3%A0%20velocidade%20do,valor%20inferior%20a%201%2C00](https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por_esp/tr352.htm#:~:text=Nota%20adicional1-,O%20n%C3%BAmero%20Mach%201%2C00%20%C3%A9%20igual%20%C3%A0%20velocidade%20do,valor%20inferior%20a%201%2C00). Acesso em: 04/02/2023.

BAK, C; JOHANSEN, J.; ANDERSEN, P.B. “Three-dimensional corrections of airfoil characteristics based on pressure distributions”. *Proceedings of the European Wind Energy Conference*, 2006.

BARLOW, B.J.; RAE, W.H.; POPE, A. *Low Speed Wind Tunnel Testing*. 3<sup>rd</sup> edition, New York, John Wiley & Sons, 1999.

BRESSA, C.V.X.; JESUS, D.C. *Elaboração de um Túnel de Vento Para Bancada Experimental*. Universidade Católica Dom Bosco, 2010. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/184557432/86330814-TCC-Elaboracao-de-Um-Tunel-de-Vento-Para-Bancada-Experimental>. Acessado em: 14/02/2023.

BRETON, S. P., COTON, F.N., MOE, G. “A study on rotational effects and different stall delay models using a prescribed wake vortex scheme and NREL phase VI experiment data,” *Wind Energy*, Vol.11, pp:459-482,2008.

BRUNETTI, F. *Mecânica dos Fluidos*. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: Pearson, 2008.

CHAVIAROPOULOS, P.K., HANSEN, M.O.L. “Investigating three-dimensional and rotational effects on wind turbine blades by means of a quasi-3D Navier Stokes solver”, *Journal of Fluids Engineering*, Vol.122, pp:330-336, 2000.

DUTHINH, D.; SIMIU, E. *The Use of Wind Tunnel Measurements in Building Design*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, United States of America, 2011. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/wind-tunnels-and-experimental-fluid-dynamics-research/the-use-of-wind-tunnel-measurements-in-building-design> Acesso em: 28/01/2022.

ESFAHANIAN, V.; SALAVATIPOUR, A.; HARSINI, I. Numerical analysis of flow field around NREL Phase II wind turbine by a hybrid CFD/BEM method”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.120, pp:29-36,2013.

GARRAD, H. *Bladed 4.0 theory manual*, 2010.

GRC.NASA.GOV. Whirling Arms and the First Wind Tunnels. Disponível em: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/Wind-Tunnel/history.html#:~:text=Frank%20H.,to%20build%20a%20wind%20tunnel>. Acesso em: 28.01.23.

GRC.NASA.GOV. 1901 Wind Tunnel Tests. Disponível em: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/wrights/test1901.html> Acesso em: 28/01/2023.

GUO, Q., ZHOU, L., WANG, Z. “Comparison of BEM-CFD and full rotor geometry simulations for the performance and flow field of a marine current turbine”, *Renewable Energy*, Vol.75, pp:640-648, 2015.

HAND, M. M., SIMMS, D.A., FINGERSH, L.J., JAGER, D.W., COTRELL, J.R., SCHRECK, S., LARWOOD, S.M. "Unsteady aerodynamics experiment phase VI: wind tunnel test configurations and available data campaigns," NREL/TP-500-29955, 2001.

HERNÁNDEZ, Miguel A. González; LÓPEZ, Ana I. Moreno; JARZABEK, Artur A.; PERALES, José M. Perales; WU, Yuliang; XIAOXIAO, Sun. Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel. Polytechnic University of Madrid, Spain & Beijing Institute of Technology, China, 2013. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/wind-tunnel-designs-and-their-diverse-engineering-applications/design-methodology-for-a-quick-and-low-cost-wind-tunnel> Acesso em: 28/01/2023.

LANZAFAME, R. "BEM theory: How to take into account the radial flow inside of a 1-D numerical code," Renewable Energy, Vol.39, No.1, pp:440-446, 2012.

LI, X., TAN, Y., QIU, X., GONG, Z., & WANG, M. (2021). Wind tunnel measurement of aerodynamic characteristics of trains passing each other on a simply supported box girder bridge. Railway Engineering Science, 29(2), 152–162. DOI:[10.1007/s40534-021-00231-4](https://doi.org/10.1007/s40534-021-00231-4)

MATOS, C. C.; BOTELHO, R. D. A influência da aerodinâmica no design. Disponível em: <https://dspace.palermo.edu/ojs/index.php/actas/article/view/3268>. Acesso em: 05/02/2023.

MERRISON, J. Environmental Wind Tunnels. Aarhus University, Denmark, 2011. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/wind-tunnels/environmental-wind-tunnels> Acesso em 28/01/2023.

MORIARTY, P.J., HANSEN, A.C. "AeroDyn theory manual", Technical report NREL/TP-500-36881, 2005.

MOURA, R. A.; JESUS, N. M. R.; SOUZA, R. S. Antropometria e ergonomia como ferramentas de vanguarda produtivas nas indústrias do futuro. Revista Sodebras. Vol 14. Ed.157. 2019, p.109-112. ISSN. 1809-3957. DOI: <https://doi.org/10.29367/issn.1809-3957.14.2019.157.109>

MOURA, R. A.; MOURA M. L. S. Aplicação da engenharia estrutural segura na montagem do veículo "baja" para aprendizado acadêmico e aprimoramento profissional dos discentes. Revista Sodebras [on line]. vol. 14. nº 12, pp 31-36. junho/2019. ISSN 1809-3957. DOI: [10.29367/issn.1809-3957.14.2019.162.31](https://doi.org/10.29367/issn.1809-3957.14.2019.162.31)

MOURA, R.; RICETTO, M.; LUCHE, D.; TOZI, L. AND SILVA, M. (2022). New Professional Competencies and Skills Learning towards Industry 4.0. In Proceedings of the 14th International Conference on Computer Supported Education – Volume 2: CSEDU. ISBN: [978-989-758-562-3](https://doi.org/10.5220/0011047300003182), pp. 622-630. DOI: <http://dx.doi.org/10.5220/0011047300003182>

OKAMOTO, S.; MERRISON, J.; PORTMAN, V.; SANDLER, B.; CHAPSKY, V.; LIU, X.; QIU, Y.; DUAN, X.; BENEDETTO, S. D.; RUFOLLO, G. C.; MARINI, M.; TRIFONI, E.; ANDRIANNE, T.; RAZAK, N. A.; DIMITRIADIS, G.; KOTHEA, C. S.; WERELEY, N.M. Wind Tunnels. Shimane University, Japan, 2011. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/wind-tunnels> Acesso em: 28/01/2023.

PIECHNA, J.R.; KUREC, K.; BRONISZEWSKI, J.; REMER, M.; PIECHNA, A.; KAMIENIECKI, K.; BIBIK, P. Influence of the Car Movable Aerodynamic Elements on Fast Road Car Cornering. *Energies* 2022, 15, 689. DOI: [10.3390/en15030689](https://doi.org/10.3390/en15030689)

TECIAM. Especificações técnicas e Tabela de Tecidos Metálicos. Disponível em: <https://www.teciam.com.br/pdf/f01283d4279a95ad700ce9bedd09fffc.pdf> Acesso em: 28/02/2021

WHITE, F. M. Mecânica dos Fluidos. 6ª ed. São Paulo: AMGH Editora Ltda, 2011.

“O conteúdo expresso no trabalho é de inteira responsabilidade dos Autores.”