



**Magner Gusse, 110180**

**Os túneis de vento no contexto da Fórmula Um**

**Aeroelasticidade-42265**



**Palavras-Chave**

Túneis, Túnel, vento, Formula Um, F1, CFD, aerodinâmica, testes, instalações, regulamentos, instrumentação.

**Abstrato**

Este estudo, enquadrado no âmbito da Unidade curricular de Aeroelasticidade, visa abordar os túneis de vento como vistos pelo lado emocionante da Formula Um, abordando uma vasta extensão de tópicos desde a história primordial à regulamentação atual, fazendo menção a todos os aspetos considerados importantes e relevantes para o estudo.



# Lista de Figuras

1	Partes do túnel de vento aberto. . . . .	5
2	Partes do túnel de vento fechado. . . . .	6
3	Partes do túnel de vento de Fórmula Um. . . . .	9
4	Partes do túnel de vento de Fórmula Um. . . . .	10
5	Simulação em CFD. . . . .	13
6	Testes em Campo usando tinta fluorescente . . . . .	14
7	Equipa do projeto de túnel de vento da McLaren. . . . .	17

# Conteúdo

Lista de Figuras	1
Conteúdo	2
Introdução	3
Túneis de Vento	4
Túneis de vento para Fórmula Um	8
Alternativas aos túneis de Vento	12
Evolução dos túneis de vento na Fórmula Um	16
Desafios do uso de túneis de vento	19
Conclusões	21
Bibliografia	22

# Introdução

A Fórmula Um, considerada a *Pinnacle* do desporto motorizado, é um desporto caracterizado pela busca de performance na forma de velocidade, é vista por muitos, desde os seus tempos primórdios como uma competição não de pilotos, mas sim de engenheiros, e no seu coração reside ferramentas essenciais no desenvolvimento dos carros mais rápidos do mundo. Entre elas estão os túneis de vento usados para estudo, desenvolvimento e refinamento dos veículos.

# Túneis de Vento

Túneis de vento são instalações experimentais (circulares, elípticas ou retangulares) usadas para simular o efeito de correntes de ar sobre objetos sólidos, consistindo num tubo que contém o objeto, onde o ar é escoado (sugado ou soprado) através de turbinas e permite visualizar, estudar e otimizar o desempenho aerodinâmico dos objetos que nele estão [1], ideia esta que foi primeiro sugerida por Leonardo Da Vinci, quando sugeriu que um objeto a passar por um fluido estático produz as mesmas forças que um objeto estático num escoamento de fluido.

O primeiro túnel de vento operacional foi construído em 1871 pelo engenheiro britânico Francis Herbert Wenham [2], mas foi apenas em 1917 que o National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), construiu o primeiro túnel de vento de grande escala nos Estados Unidos. Desde então, os túneis de vento têm desempenhado um papel crucial no desenvolvimento da aerodinâmica e na engenharia de estruturas.

E assim, no contexto da fórmula um, o bom uso dos seus resultados permite às equipas ganhar décimas importantes de segundos em relação aos adversários.

É uma ferramenta muito útil pois permite averiguar a fiabilidade dos resultados obtidos em simulação computacional CFD de forma a validar ou refutar os mesmos, uma vez que é o mais próximo das condições reais que se pode ter sem estar efetivamente na pista.

## Classificação dos túneis de Vento

- **Túneis de Vento subsónicos:** Projetados para estudar fluxos de ar em velocidades abaixo da velocidade do som ( $Mach < 0,8$ ). São amplamente utilizados na indústria automóvel e na aerodinâmica de



edifícios.

- **Túneis de Vento Transônicos:** Operam em velocidades próximas à velocidade do som (Mach 0,8 - 1,2). Utilizados principalmente na pesquisa aeronáutica para estudar fenômenos como o choque de onda e a compressibilidade do ar.
- **Túneis de Vento supersônicos:** Projetados para velocidades superiores à do som (Mach 1,2 - 5). Essenciais para o desenvolvimento de aeronaves militares e mísseis.
- **Túneis de Vento Hipersônicos:** Funcionam em velocidades extremamente elevadas (Mach > 5). Utilizados na pesquisa espacial e no desenvolvimento de veículos de reentrada atmosférica.

Os túneis de vento podem ser mais simples ou complexos dependendo das suas aplicações, no entanto, os túneis subsônicos são constituídos essencialmente por três partes: câmara de entrada ou contração, a zona em que o ar entra no túnel normalmente através de turbinas, a zona de ensaios e o difusor (Fig.1), tendo ainda nos dias de hoje avançado para túneis de vento fechados (Fig.2) com mais secções.

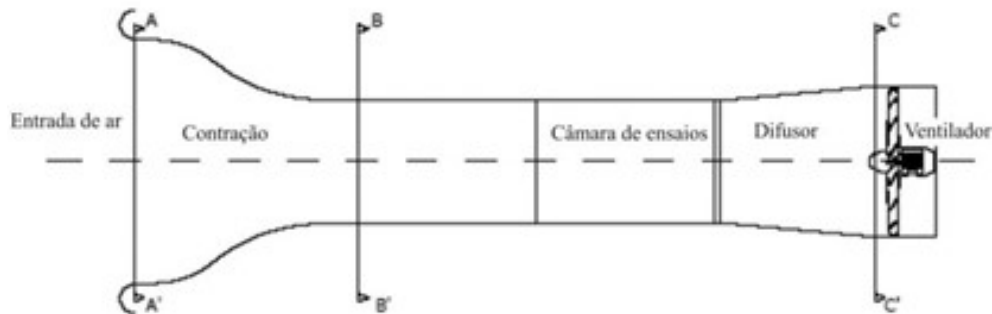


Figura 1: Partes do túnel de vento aberto.

[3]

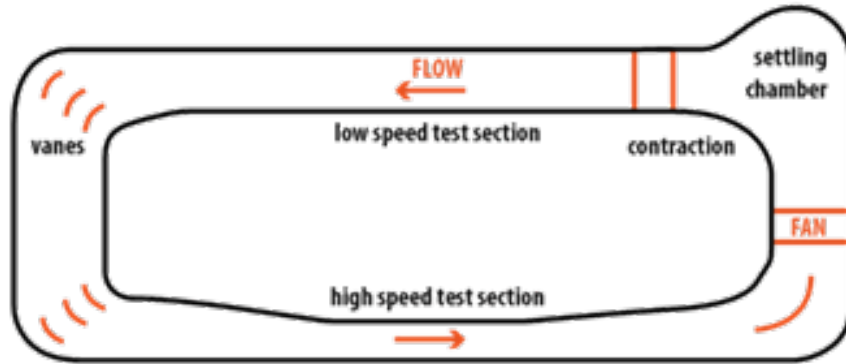


Figura 2: Partes do túnel de vento fechado.  
[4]

É importante saber que para as diferentes aplicações, os túneis de vento têm diferentes tamanhos e uma das suas vantagens é poder realizar as simulações do objeto desejado em modelos a escala do túnel, respeitando os diversos números adimensionais que possam existir para caracterizar o desempenho desejado do objeto. Por exemplo, pretende-se fazer estudos de um carro de formula 1 com as atuais dimensões de  $5500\text{mm} \times 2000\text{mm}$  (C x L), no túnel de vento do DAO na Universidade de Aveiro, com secção de ensaio de  $6,5 \times 1,5 \times 1,0$  m (C x L x A) [5], para tal fazendo uma escala no de modelo de testes de 1:6 ( $916.6 \text{ mm} \times 333.3\text{mm}$ ), têm que se garantir que os números adimensionais característicos do escoamento sobre um carro de Formula Um mantém-se os mesmos (Reynolds, Euler, Freud, Mach) alterando apenas as características do escoamento, normalmente apenas a velocidade do mesmo, de forma a que se enquadre às dimensões atuais do modelo.

## Instrumentos de extração de dados

A extração e o tratamento de dados em túneis de vento são processos cruciais para obter informações precisas sobre o comportamento aerodinâmico de um objeto em teste. O processo envolve várias etapas, desde a coleta de dados brutos até a análise e interpretação dos resultados.

Sabendo isso, existem diferentes tipos de instrumentos para diferentes tipos de dados a obter.

**1. Medição de Fluxo de Ar:**

- **Anemômetros** ( de fio quente, de hélice, de tubo de pitot).
- **Vane Anemômetros.**
- **Sistemas de PIV (*Particle Image Velocimetry*)**

**2. Medição de Pressão:**

- **Manômetros** ( diferenciais e de coluna de líquido).
- **sensores de pressão**(Piezoelétricos ou MEMS).

**3. Medição de Força:**

- **Balanças aerodinâmicas ou de forças.**
- **Células de carga.**

**4. Visualização de escoamento**

- **Tinta fluorescente.**
- **Fumaça.**
- **Laser Doppler velocimetry(LDV).**

**5. Outros Instrumentos:**

- **Computadores:** Controlam os instrumentos e guardam os dados.
- **Câmeras de alta velocidade.**
- **Sistemas de telemetria.**

# Túneis de vento para Fórmula Um

Apesar de ser uma tecnologia em uso há décadas, os túneis de vento são adaptáveis às diferentes aplicações que são necessárias, isto significa que o túnel de vento pode ser o melhor para aviação e ao mesmo tempo não ser o melhor para o caso da Fórmula Um, dadas as características do mesmo. Como tal, os túneis de vento para a fórmula um apresentam diversas particularidades, em termos de forma, instrumentação e aquisição de dados.

Os túneis de vento das equipas de Fórmula Um são de circuito fechado, o que significa que o ar que passa pelo modelo estudado é de seguida puxado e re-circula dentro do túnel enquanto este estiver em funcionamento, tudo isto implica uma estrutura mais complexa e com diferentes desafios em relação aos túneis de circuito aberto, sendo vantajoso porque há menos ruído e interferências causadas pelo meio externo, são mais eficientes(gastam menos energia para atingir a velocidade desejada na secção de testes e geram um fluxo de ar mais uniforme [6].

Estes que podem ser alimentados por uma grande turbina ou por pequenas turbinas que tentam replicar o mesmo efeito, no entanto, apesar de ser mais custosa, o uso de uma só turbina é mais eficaz e gera menos turbulência no fluxo de ar. Adicionalmente, as paredes devem ser o menos rugosas possível de forma a evitar formação indesejada de turbulência no fluxo de ar, assim como as curvas da estrutura são desenhadas de forma específica para evitar a formação de correntes turbulentas.

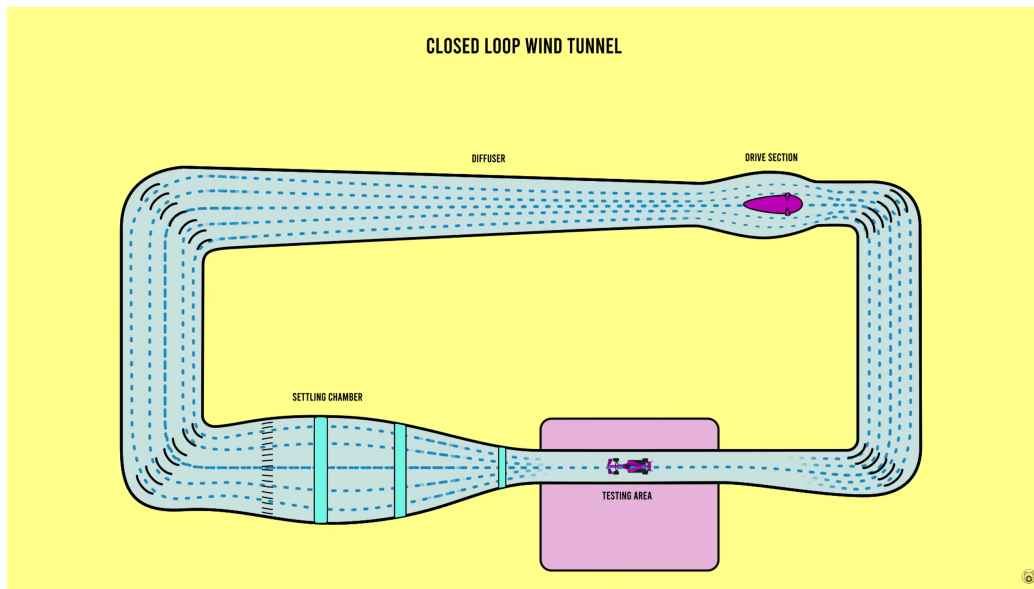


Figura 3: Partes do túnel de vento de Fórmula Um.  
[7]

Assim sendo, as particularidades normalmente associadas aos túneis de vento usados pelas equipas de Fórmula Um incluem [8]:

- Modelos a escala máxima de 60% por restrições regulamentares;
- Velocidade máxima de escoamento de 50m/s por restrições regulamentares;
- Pista rolante, para aproximar o efeito da estrada nos pneus, igualando a velocidade do ar.
- Um ou dois braços que seguram o carro;
- Instrumentação específica para recolha de dados.

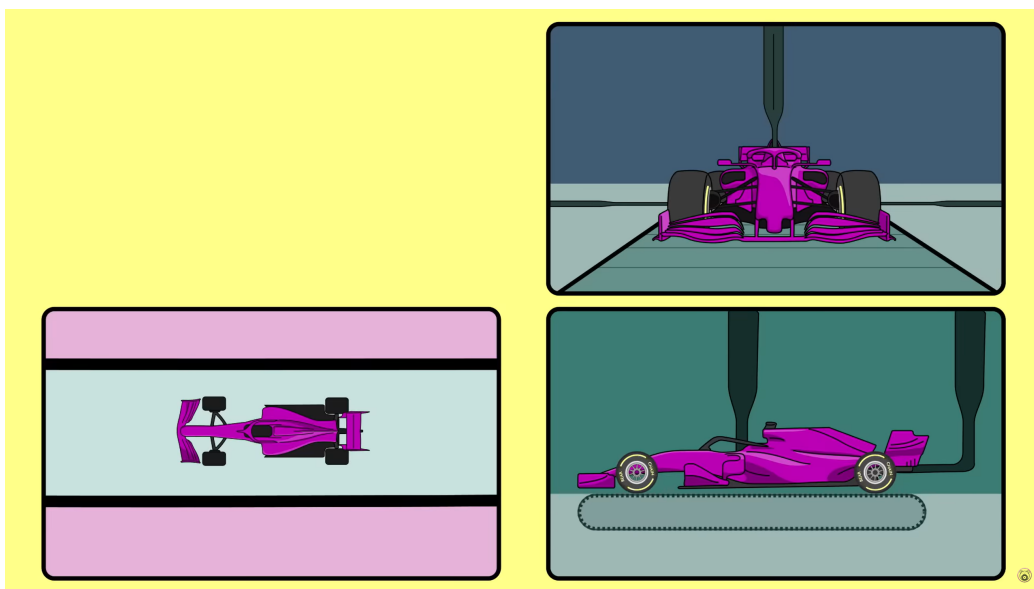


Figura 4: Partes do túnel de vento de Fórmula Um.

[7]

Com isto, os testes conseguem ainda ser mais precisos, adicionando graus de liberdade ao modelo e às suas rodas, como forma de simular o seu efeito em pista, simulando as curvas, efeito do DRS, subidas e descidas da pista, aspetos estes que ajudam a entender melhor o comportamento do carro em condições de pista e com a melhor aproximação possível do efeito que poderá ter.

Portanto os graus de liberdade permitidos são [9]:

1. Rotação das rodas em relação ao próprio eixo.
2. Mudanças de altura do modelo e ângulo *roll* em relação ao plano do chão e associadas aos elementos de suspensão.
3. Mudanças de carga aplicada nas rodas.
4. Variação do ângulo de *yaw* em relação ao fluxo de ar.
5. Expulsão de gases de escape.
6. Ajuste de ângulo dos flaps da asa dianteira.

7. Ajuste da incidência do DRS na asa traseira.

## Extração e tratamento de Dados em Túneis de Vento da F1

Num teste em túnel de vento existem diversos dados que podem ser retirados, e são estes baseados nos objetivos do teste, se é para estudos de forças e momentos, pressões e velocidades, visualização de escoamentos e ou campos de velocidades e pressões, com isto em mente existem diversas estratégias para alcançar esses objetivos.

Para **estudos de forças e momentos**, é comum o uso de balanças de forças, que são instrumentos que medem forças e torques que atuam sobre um modelo que está a ser testado no túnel de vento [10] e com isso determinar tanto a sustentação (e *downforce* na F1) , arrasto e momento aerodinâmico [11]. Ainda nos estudos de forças e momentos, podem ser usadas células de carga para análise do balanço do carro e medir a distribuição de peso nas rodas do monocoque.

Para medição de **velocidades e campos de velocidades**, são usados anemômetros, tubos de pitot e sistemas de PIV(*Particle Image Velocimeter* que permitem saber a velocidade do ar em relação ao modelo de testes e traçar um campo de velocidades para estudos.

Para **visualização de escoamentos**, que é um aspeto muito importante para estudo da aerodinâmica dos veículos, e permite saber ao certo a distribuição do escoamento de ar ao longo do veículo, usam-se LDV(*Laser Dopler Velocimeter*), fumaça e tinta fluorescente. Adicionalmente todos os dados extraídos, passam por tratamento computacional de forma a facilitar a sua posterior análise por parte dos engenheiros responsáveis nas equipas.

# Alternativas aos túneis de Vento

Os túneis de vento apesar de serem ferramentas muito úteis e precisas, apresentam custos elevados e não podem ser usados em larga escala de testes, e com essa informação, podem-se usar algumas alternativas, de entre as quais apresentam-se algumas das mais comuns:

1. **Computational Fluid Dynamics (CFD):** A alternativa mais comum e usada, é geralmente uma fase que antecede aos testes em túnel de vento na F1 [12] e seus resultados são posteriormente validados pelos testes de túnel de vento. É vantajoso por ser mais rápido em relação aos processos totais de um teste em túnel de vento, pode fornecer informação mais detalhada e difícil de obter em túnel de vento e permite a simulação de modelos com geometrias complexas. No entanto, precisa de modelos matemáticos precisos para garantir a fiabilidade dos resultados [13], o que implica que seus resultados podem ser menos precisos e requer equipamentos especializados para mais rápido processamento.



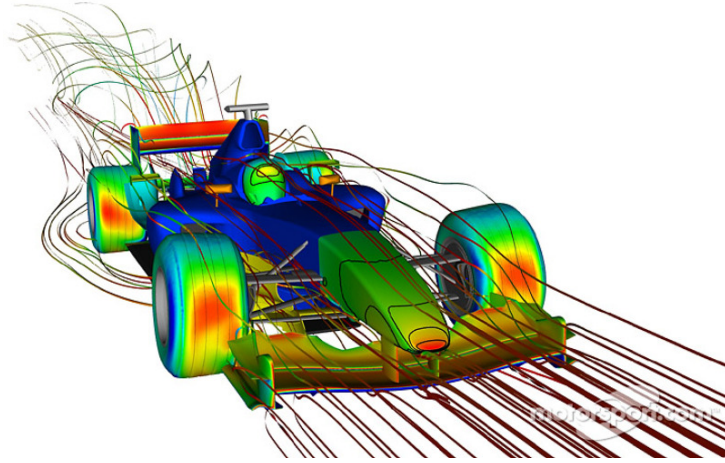


Figura 5: Simulação em CFD.

2. **Testes de Campo:** Uma alternativa também popular no contexto da F1, uma vez que é usada para visualização do escoamento, recorrendo a tinta fluorescente, geralmente na procura de informação como a visualização do escoamento em condições reais e separação do fluido. No entanto esta estratégia é mais utilizada após produção das atualizações implementadas nos carros, e serve mais de validação de resultados e não testes de protótipos, uma vez que é usado no carro final e nas condições reais de pista, provendo assim resultados mais fidedignos.



Figura 6: Testes em Campo usando tinta fluorescente

Estas são as alternativas mais comuns no cenário da Fórmula Um, no entanto, podem surgir diversas outras alternativas consoante o tipo de aplicação, o tipo de escoamento, tempo disponível e complexidade geométrica do objeto em estudo, as quais são importantes também mencionar:

- Testes em escalas reduzida;
- Testes em túneis de água;
- Métodos analíticos e empíricos;
- Simuladores com recurso a resultados CFD.

## Vantagens e desvantagens do uso dos túneis de Vento

### Vantagens:

- Recriação de condições reais em ambientes controlados;
- Gera resultados fidedignos e precisos;
- Permite visualização de fluxos;

- Permite análise do comportamento do objeto com os objetos de medição;
- Complementa os resultados de simulações CFD;

**Desvantagens:**

- Custo elevado de produção, manutenção e operação das infraestruturas;
- Tempo de execução elevado desde a preparação à obtenção de resultados;
- Complexidade técnica e limitações de escala;
- Dependência de métodos complementares para validação;
- Impacto ambiental, numa altura em que o mundo e a F1 buscam por sustentabilidade.

# Evolução dos túneis de vento na Fórmula Um

Nos primórdios do desporto, o uso controlado e intencional de aerodinâmica era uma ideia não popular, numa altura em que as equipas exerciam maior esforços em desenvolver um chassi mais leve e um motor mais potente, sendo Enzo Ferrari citado por dizer *Aerodynamics are for people who can't build engines*", o que resume o estado em que o desporto estava na década de 50.

Nos anos 60, os estudos aerodinâmicos na F1 eram feitos maioritariamente em testes na pista, o que provava-se muito custoso, limitado em termos de condições e no geral demorado. Assim sendo, o uso de túneis de vento na Fórmula Um começou nos finais dos anos 60 e início dos anos 70.

Adiante, em 1968 **Colin Chapman**, um engenheiro Inglês, levou ao GP de Mônaco, o Lotus 49B da sua equipa, equipado de asas e *spoilers* com perfis aerodinâmicos de forma a gerar maior *downforce* e estabilidade em relação aos outros [14]. Nos anos seguintes esta viu-se ser uma ideia revolucionária, e a importância da aerodinâmica tornou-se cada vez mais importante e o uso dos túneis de vento se popularizou, particularmente depois do Lotus 49B.

Nos dias de hoje, a aerodinâmica é o aspeto mais importante do carro, e permite ganhar segundos em relação aos adversários, e por consequência os túneis de vento fazem parte dos recursos mais importantes para as equipas, e o seu bom uso pode significar glória na pista. No entanto o seu elevado custo de produção e operação têm-se tornado um tópico forte de discussão diante das preocupações com a sustentabilidade económica e ecológica do desporto. Com isso, a Federação Internacional de Automobilismo (FIA), como entidade reguladora da Fórmula Um, impõe nos regulamentos limitações no tempo de

uso dos túneis de vento, tipos de túnel de vento e exige que as equipas usem somente uma instalação ao longo do período de 12 meses, sendo esta declarada no máximo 7 dias antes do início deste período e adicionalmente o pessoal envolvido nestes testes, de forma a evitar partilha de informação entre as equipas, deve ser declarado no fim de cada teste [15].

No entanto, apesar das instalações apresentarem um papel fundamental no desenvolvimento dos veículos, não são o fator mais importante e decisivo, uma vez que o trabalho em equipa e a criatividade e esforço dos engenheiros é que faz a maior diferença, por isso, apesar de ser importante o uso das melhores instalações possíveis, de forma a melhor aproximar os resultados daquilo que efetivamente acontece em pista. É fundamental o conhecimento e *expertise* dos engenheiros responsáveis pelo seu uso.



Figura 7: Equipa do projeto de túnel de vento da McLaren.

Nos novos tempos, o desporto enfrenta outros desafios que podem significar grandes mudanças para o atual paradigma, com a busca por sustentabilidade, o uso dos túneis de vento é cada vez mais restrito, e as horas de uso são limitadas para todas as equipas, sendo que as equipas com

maior sucesso têm direito a menos horas de uso comparadas às equipas com menos sucesso seguindo a ordem de classificação do campeonato, ou seja, o primeiro classificado têm menos horas disponíveis para o desenvolvimento e o último classificado têm direito a mais horas, segundo o regulamento desportivo em vigor(2022-2025) apresentado e extraído de [15], em que o coeficiente é multiplicado pelos parâmetros para determinar as limitações de cada equipa:

Número de Utilizações	#	320
Tempo útil de testes	horas	80
tempo de ocupação	horas	400

Posição no ultimo Campeonato	P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10+
Coeficiente	%	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115

Tabela 1: Limitações de uso de túnel de vento impostas pela FIA<sup>1</sup>.

Entretanto, estas limitações, apesar de serem maioritariamente tidas como forma de aumentar a competitividade e diminuir a vantagem das grandes equipas, são também entendidas por muitos como apenas o início de uma renovação que pode estar por vir nos próximos anos, e que está a ser cogitada pelas direções da Fórmula Um e FIA, com o objetivo de erradicar definitivamente o seu uso, dadas as implicações financeiras e ambientais que o uso dos túneis de vento acarreta.

---

<sup>1</sup>Estas limitações são também impostas para o uso de CFD.

# Desafios do uso de túneis de vento

Os túneis de Vento são instalações super importantes no desenvolvimento de objetos aerodinâmicos desde aviões a carros de Fórmula Um, projetos edifícios e turbinas eólicas, mas apesar de serem muito úteis apresentam desafios diversos, de entre os quais:

## 1. Custos e Recursos:

- **Investimento inicial:** Construir e operar túneis de vento é muito caro, e exige investimento em termos de infraestrutura, equipamentos e *staff* qualificado, o que pode dificultar empresas com recursos limitados.
- **Custos de operação:** Os custos de operação desde a energia, manutenção e salários de pessoal são contínuos e elevados

## 2. Limitações físicas e técnicas:

- **Tamanho:** O tamanho do túnel pode limitar a sua alocação, é necessário ter espaço para a construção do túnel o que pode gerar problemas logísticos.
- **Efeitos de escala:** As dimensões do túnel restringem também as dimensões do modelo a usar, e o que pode se tornar um problema no momento de igualar as variáveis adimensionais como o número de Reynolds.

## 3. Manutenção e Calibração:

- Túneis de vento e toda a sua instrumentação para obtenção de dados precisam de manutenção regular e calibração frequente para garantir a precisão dos resultados, gerando custos adicionais.

#### 4. Expertise necessária:

- A operação e análise de dados requerem conhecimento em fluidodinâmica, aerodinâmica e instrumentação, dificultando o acesso para equipes sem pessoal devidamente qualificado.

#### 5. Tempo de uso:

- Fazer testes em túneis de vento pode ser um processo bastante lento, desde a preparação do modelo até a coleta e análise dos dados, o que pode atrasar o desenvolvimento dos produtos e aumentar os custos do projeto.

#### 6. Impacto ambiental:

- Túneis de vento consomem muita energia, especialmente os de alta velocidade, o que impacta negativamente o meio ambiente. Além disso, geram bastante ruído e vibrações.

Para superar estes obstáculos, um conjunto de Medidas pode ser implementado, de forma atornar o seu uso mais eficiente:

- **Avaliação de Alternativas:** Considerar simulações computacionais (CFD) e testes em escala reduzida antes de realizar os testes em um túnel de vento.
- **Planeamento Detalhado:** Planejar cuidadosamente os testes para minimizar custos, otimizar o tempo e garantir resultados fiáveis.
- **Validação Rigorosa:** Validar os resultados com outros métodos para assegurar precisão e fiabilidade.
- **Especialização em Equipe:** Ter uma equipa especializada para operar e analisar dados de forma eficaz.
- **Práticas mais Sustentáveis:** Implementar medidas para reduzir o consumo de energia e minimizar impactos ambientais.
- **Segurança:** Priorizar a segurança dos operadores e visitantes para evitar acidentes.



# Conclusões

As conclusões deste estudo sobre a aerodinâmica na Fórmula Um destacam a importância fundamental dos túneis de vento no desenvolvimento dos carros de corrida. A evolução dos túneis de vento ao longo dos anos permitiu às equipas obterem ganhos significativos em termos de *downforce*, estabilidade e desempenho geral dos veículos.

Além disso, a introdução de tecnologias inovadoras surgiram para obtenção de dados nos túneis de vento e têm contribuído para uma análise mais precisa e detalhada dos dados aerodinâmicos, auxiliando na tomada de decisões de projeto.

Embora os túneis de vento sejam recursos essenciais para as equipas de Fórmula Um, é importante considerar os desafios associados ao seu uso, como os altos custos de produção e operação, bem como as preocupações com a sustentabilidade económica e ambiental do desporto.

Em resumo, as conclusões ressaltam que os túneis de vento continuam desempenhando um papel crucial no sucesso das equipas de Fórmula Um, permitindo a busca constante por inovações aerodinâmicas que possam resultar em vantagens competitivas na pista.

# Bibliografia

- [1] Bruno Chanetz. A century of wind tunnels since eiffel. *Comptes Rendus Mécanique*, 345, 07 2017.
- [2] N H Randers-Pehrson. Smithsonian miscellaneous collections volume 93, number 4 pioneer wind tunnels (with 4 plates).
- [3] Alex Geraldés Uzueli, Alessandra Prata-Shimomura, Denise Helena, and Silva Duarte. Túnel de vento da fauusp-instrumento para ensaios de modelos físicos em conforto ambiental. 2008.
- [4] Carsten Frederiksen. A lista de instalações de teste de túnel de vento, 2 2023.
- [5] Universidade de Aveiro. Túnel de vento.
- [6] Elizabeth Blackstock. Formula one wind tunnels: Explained. <https://jalopnik.com/formula-one-wind-tunnels-explained-1845734903>.
- [7] Chain Bear. (306) how f1 wind tunnels work - youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=tNwkANPl3ck>.
- [8] F1 Chronicle. How does an f1 wind tunnel work? | f1 news. <https://f1chronicle.com/how-does-an-f1-wind-tunnel-work-f1-technology/>.
- [9] Gary Anderson. Gary anderson: How f1 uses windtunnels, and how it'll change - the race. <https://www.the-race.com/formula-1/gary-anderson-how-f1-uses-windtunnels-and-how-itll-change/>.
- [10] Jewel B. Barlow, William H. Rae, Alan Pope, and Alan Pope. *Low-speed wind tunnel testing*. Wiley, 1999.

- [11] Nancy Hall and NASA. Wind tunnel testing. <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuntest.html>.
- [12] Mercedes AMG Petronas F1 Team. The seven stages of developing an f1 car - mercedes-amg petronas f1 team. <https://www.mercedesamgf1.com/news/the-seven-stages-of-developing-an-f1-car>.
- [13] Ansys. What is computational fluid dynamics (cfd)? | ansys. <https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-computational-fluid-dynamics>.
- [14] Yuvraj Thakur. From wings to wind tunnels: “uncovering the evolution of formula one aerodynamics” | by yuvraj thakur | medium.
- [15] FIA. 2023 formula one sporting regulations.