CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO COEFICIENTE DE ARRASTO DO CORPO DE AHMED EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO TRASEIRA

Odailton Pereira dos Anjos[1];
Augusto Salomão Bornschlegell[2];
Rodrigo Borges Santos[3];
Bruno Arantes Moreira[4]

[1]Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, Brasil
(odailton_anjos@hotmail.com)
[2]Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, Brasil
(augustosalomao@ufgd.edu.br)
[3]Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, Brasil
(rodrigobsantos@ufgd.edu.br)
[4]Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, Brasil
(brunomoreira@ufgd.edu.br)

Resumo: O presente trabalho investigou experimentalmente a influência do ângulo de inclinação traseira (φ) de um corpo de prova tipo Ahmed no seu coeficiente de arrasto aerodinâmico (C_d), visando contribuir para a otimização energética de veículos, uma vez que o arrasto de pressão é o principal fator de resistência em corpos rombudos. Para isso, foram realizados ensaios em túnel de vento subsônico com um modelo em escala do Corpo de Ahmed, utilizando traseiras intercambiáveis e uma célula de carga adaptada ao modelo, para medir a força de arrasto (F_d). Os experimentos contemplaram os seguintes ângulos (φ) de traseira: 0°, 15°, 30°, 40° e 50°, em uma faixa de Número de Reynolds (Re) de 1,4 x 10^4<Re $< 6{,}1 \times 10^4$. Os resultados confirmaram a relação quadrática da força de arrasto com a velocidade ($F_d \propto V^2$). A análise revelou um comportamento não-linear do C_d em função do ângulo φ, com destaque para um pico máximo em 30° ($C_d \approx 0{,}562$). A ocorrência do pico em 30° reforça a natureza crítica desse ângulo, sugerindo a separação do escoamento e o aumento do arrasto para essa geometria. Conclui-se que a identificação desses ângulos críticos fornece subsídios relevantes para a compreensão dos fenômenos de arrasto, indicando que a otimização aerodinâmica veicular deve considerar cuidadosamente a faixa de operação de Re para garantir máxima eficiência energética.
Palavras-chave: coeficiente de arrasto; corpo de Ahmed; aerodinâmica veicular; ângulo de inclinação; túnel de vento.

Abstract: The present study experimentally investigated the influence of the rear slant angle (φ) of an Ahmed body on its aerodynamic drag coefficient (C_d), aiming to contribute to vehicle energy optimization, since pressure drag is the main source of resistance in bluff bodies. To achieve this, experiments were conducted in a subsonic wind tunnel using a scaled model of the Ahmed Body, equipped with interchangeable rear sections and a load cell adapted to the model to measure the drag force (F_d). The experiments considered the following rear slant angles (φ): 0°, 15°, 30°, 40° e 50°, within a Reynolds number (Re) range of approximately 1,4 x 10^4<Re $< 6{,}1 \times 10^4$. The results confirmed the quadratic relationship between drag force and velocity ($F_d \propto V^2$). The analysis revealed a nonlinear behavior of C_d as a function of the angle φ, with a pronounced peak at 30° ($C_d \approx 0{,}562$). The occurrence of this peak at 30° reinforces the critical nature of this angle, suggesting flow separation and increased drag for this geometry. It is concluded that identifying such critical angles provides valuable insights into drag phenomena, indicating that vehicle

aerodynamic optimization should carefully consider the operating Reynolds number range to ensure maximum energy efficiency.
Keywords: drag coefficient; Ahmed body; vehicle aerodynamics; slant angle; wind tunnel.

1. INTRODUÇÃO

A otimização aerodinâmica de veículos tem sido um foco central na indústria automotiva, especialmente devido à crescente demanda por eficiência energética e sustentabilidade ambiental. O coeficiente de arrasto (C_d) é uma das principais métricas utilizadas para avaliar a resistência que um corpo imerso em um fluido, como o ar, exerce sobre u veículo em movimento. Reduzir o C_d resulta diretamente em menor consumo de combustível e maior desempenho, aspectos críticos tanto para veículos convencionais quanto para veículos elétricos modernos.

Dentro deste contexto, o corpo de Ahmed tornou-se uma das ferramentas experimentais mais utilizadas para investigar o comportamento aerodinâmico de formas simplificadas de veículos. Introduzido por Ahmed em 1984, o modelo tem sido amplamente empregado em tuneis de vento e simulações fluidodinâmicas computacionais (CFD) para estudar a separação do escoamento e a formação de vórtices na região traseira de veículos. Segundo Ahmed *et al.* (1984), o coeficiente de arrasto de um veículo é dominado por aproximadamente 85% de arrasto de pressão, especialmente gerado pela geometria da traseira. Este modelo simplificado permite isolar os efeitos de variáveis geométricas, como o ângulo traseiro, na dinâmica dos vórtices formados na esteira do corpo.

Estudos subsequentes expandiram as investigações sobre o corpo de Ahmed, incluindo simulações numéricas detalhadas para prever com maior precisão a distribuição de pressão e os efeitos de vórtice em diferentes ângulos traseiros. Almeida (2022) utilizou ferramentas CFD, como o *OpenFOAM* e o *SolidWorks Flow*, para avaliar simulações numéricas com dados experimentais de túneis de vento, destacando como pequenas variações no ângulo traseiro podem alterar significativamente a estrutura do escoamento e, consequentemente, o C_d. Essas simulações confirmam que ângulos traseiros críticos, como 25° e 30°, resultam em transições abruptas de um escoamento mais laminar para um com maior separação, impactando diretamente o arrasto.

Além dos experimentos com um único corpo de Ahmed, a literatura também explora cenários com múltiplos corpos em interação. Rocha (2016) investigou como a

proximidade entre corpos pode intensificar a formação de vórtices e modificar o comportamento aerodinâmico de veículos dispostos lado a lado. Em experimentos similares, Nakashima et al. (2020) analisaram a aerodinâmica de veículos em movimento de curva e destacaram que distúrbios induzidos por interações entre fluxos podem aumentar o arrasto em até 15% dependendo das configurações geométricas e da proximidade entre os corpos. Esses resultados demonstram a importância de estudar as interações entre veículos em condições dinâmicas variadas, como em comboios ou em estradas congestionadas, onde os efeitos de interferência entre fluxos se tornam mais pronunciados.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo principal investigar experimentalmente a influência de diferentes ângulos de inclinação traseira de um corpo de prova tipo Ahmed no seu coeficiente de arrasto aerodinâmico, com foco na identificação e caracterização de possíveis zonas de transição no comportamento do C_d. Foram avaliadas configurações com ângulos de 0°, 15°, 30°, 40°e 50° em um túnel de vento, medindo-se à força de arrasto em função da velocidade do escoamento. A análise buscou determinar qual angulação ocorre uma alteração significativa no padrão do coeficiente de arrasto, investigando os ângulos críticos que podem levar a mudanças abruptas na estrutura do escoamento e, consequentemente, no arrasto.

A relevância deste estudo reside na contribuição para o entendimento aprofundado dos fenômenos de arrasto em geometrias veiculares simplificadas, fornecendo dados experimentais valiosos para a validação de modelos numéricos e a otimização do design de veículos visando a eficiência energética. A identificação precisa das angulações de transição do C_d é de particular interesse, pois auxilia na compreensão da interação entre a geometria traseira e a formação da esteira, que são fundamentais para o desempenho aerodinâmico. Tais insights são cruciais para o desenvolvimento de designs veiculares mais eficientes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Desde a publicação pioneira de Ahmed em 1984 (AHMED *et al*., 1984), diversos estudos tem sido realizados, ora para propor novos pontos de vista, ora para corroborar paradigmas já estabelecidos. A presente revisão bibliográfica, contudo, não se propõe a

uma discussão exaustiva de todos os conceitos da aerodinâmica e da mecânica dos fluidos. Este capitulo dedica-se, em vez disso, a apresentar os pilares essenciais para a compreensão do arrasto, da importância da camada-limite e dos regimes de escoamento relevantes para o experimento.

Adicionalmente, serão revisitados estudos clássicos e os mais recentes que utilizaram o corpo de Ahmed como modelo, a fim de solidificar a base teórica que fundamenta o trabalho experimental aqui desenvolvido.

2.1 Conceitos Fundamentais da Aerodinâmica

A aerodinâmica estuda o comportamento dos fluidos em movimento ao redor de objetos sólidos, como veículos. O objetivo principal da análise aerodinâmica é minimizar as forças resistivas ao movimento, particularmente o arrasto aerodinâmico, que é uma força que se opõe ao movimento de um corpo em um fluido, como o ar, e pode ser subdividido em dois componentes principais:

- **Arrasto de fricção:** originado da interação entre o fluido e a superfície do corpo, causado pela viscosidade do fluido. Para a maioria dos veículos e corpos rombudos, este componente é geralmente menor (MUNSON *et al*., 2004).
- **Arrasto de forma (ou arrasto de pressão):** relacionado a separação do fluxo de ar ao redor do corpo, formando regiões de baixa pressão na parte traseira (a esteira), o que aumenta significativamente a resistência ao movimento. Para corpos rombudos, como automóveis, o arrasto de forma é o componente dominante do arrasto total (HUCHO *et al*., 1987).

Essa resistência, especialmente o arrasto de forma, esta intrinsecamente ligada ao comportamento da camada limite. A camada limite é a região delgada de fluido perto da superfície de um corpo, onde os efeitos viscosos são mais pronunciados e o gradiente de velocidade e significativo. Conforme descrito por Prandtl, a separação do fluxo dentro dessa camada limite, particularmente na parte traseira de um corpo é responsável por grande parte do arrasto experimentado por veículos e outros corpos rombudos (FOX *et al.*, 2014; WHITE, 2011; HUCHO *et al*., 1987). A separação cria uma esteira de baixa pressão que "puxa" o corpo para trás.

Vale mencionar também que o regime de escoamento, determinado pelo Número de Reynolds (Re), é crucial para o comportamento da camada limite e da esteira. Para as velocidades e dimensões típicas de veículos, o escoamento é predominantemente turbulento, o que influencia diretamente o ponto de separação e as características da esteira, impactando o arrasto de forma (MUNSON *et al*., 2004; WHITE, 2011).

Esses princípios de arrasto e de separação do escoamento são fundamentais para a análise de corpos rombudos, como os veículos. Para o estudo sistemático desses fenômenos em um ambiente controlado, modelos simplificados como o corpo de Ahmed são amplamente utilizados, como será detalhado a seguir.

2.2 O Corpo de Ahmed como Modelo de Estudo

Para o estudo sistemático dos fenômenos de arrasto e separação de escoamento em um ambiente controlado, modelos simplificados como o corpo de Ahmed são amplamente utilizados. Este modelo, proposto por S.R. Ahmed em 1984 (AHMED *et al*., 1984), tornou-se uma ferramenta padrão na pesquisa em aerodinâmica veicular, servindo tanto como referência para calibração de tuneis de vento quanto como benchmark para a validação de modelos de turbulência em simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) (VARELA; PAULA, 2016). Sua geometria simplificada, que reproduz as características essenciais do escoamento ao redor de um veículo real (com exceção de efeitos específicos como rodas e asperezas) (VARELA; PAULA, 2016), permite isolar e investigar os efeitos de variáveis geométricas, como o ângulo de inclinação traseira, na dinâmica dos vórtices formados na esteira.

A variação do ângulo de inclinação da traseira do corpo de Ahmed é um fator determinante para a estrutura da esteira de vórtices e, consequentemente, para o arrasto total do corpo (VARELA; PAULA, 2016). Estudos pioneiros, como o de Ahmed (1984), já demonstravam o impacto desse ângulo nas características aerodinâmicas, identificando um pico de arrasto significativo com no ângulo de inclinação de 30° (VARELA; PAULA, 2016). Este ângulo é frequentemente denominado "ângulo de inclinação traseira crítico", pois marca uma região onde ocorrem mudanças abruptas no comportamento do escoamento.

O interesse em investigar esses ângulos críticos reside no fato de que pequenas variações na geometria da traseira podem alterar significativamente a estrutura da esteira e,

portanto, o coeficiente de arrasto. Simulações numéricas, por exemplo, confirmam que ângulos como 25° e 30° podem resultar em transições abruptas de um escoamento mais laminar para um com maior separação (ALMEIDA, 2022). Essa mudança na estrutura da esteira é fundamental, pois uma esteira turbulenta de baixa pressão na parte traseira é a principal causa do arrasto de forma (FOX *et al.*, 2014; WHITE, 2011). Assim, a caracterização dessas zonas de transição são cruciais para o entendimento aprofundado da aerodinâmica veicular e para o design otimizado, buscando mitigar as forças de arrasto.

3. METODOLOGIA

Os procedimentos e o delineamento experimental que guiaram a execução desta pesquisa são essenciais para validar os resultados obtidos (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020). A abordagem empregada caracteriza-se como uma pesquisa experimental, fundamental para a obtenção de dados empíricos e a análise rigorosa dos fenômenos investigados. Serão apresentadas as etapas que compuseram o estudo, incluindo a construção do modelo, o arranjo experimental, os procedimentos de coleta de dados e o tratamento estatístico, todos cruciais para a compreensão e reprodutibilidade do trabalho.

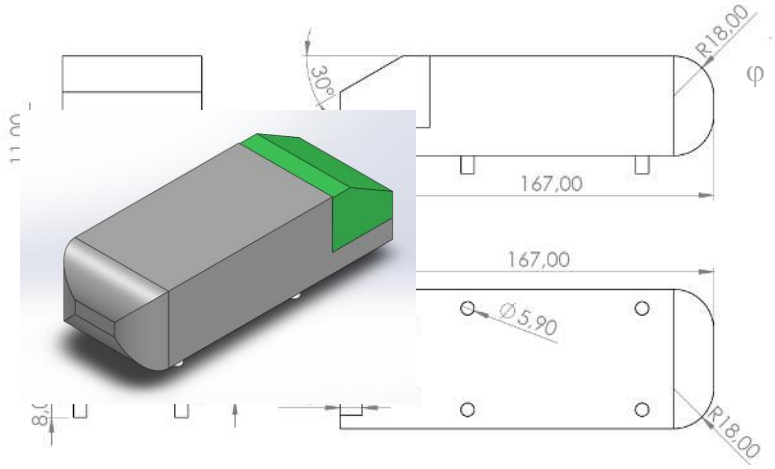
3.1 Construção do Modelo

Um modelo em escala 1:6 do corpo de Ahmed foi construído utilizando impressão 3D. A escolha dessa tecnologia permite que protótipos sejam facilmente modificados e ajustados, favorecendo testes iterativos e o aprimoramento continuo do design. No entanto, no presente estudo, a manutenção da geometria principal é de suma importância. Pequenas modificações ou adaptações, que não comprometam a fidelidade ao design geométrico original, podem ser consideradas para fins funcionais.

Manter o design original ao replicar o corpo de Ahmed e essencial, pois a manutenção exata do design geométrico assegura que os resultados obtidos possam ser comparados diretamente com estudos anteriores, validando as conclusões originais. Alterações no design podem introduzir novas variáveis não presentes no experimento original, potencialmente influenciando os resultados. Logo, a consistência no design geométrico é fundamental para a reprodutibilidade do experimento, permitindo que outros

pesquisadores confirmem os achados e contribuam para o avanço do conhecimento cientifico. A Figura 1 ilustra uma vista 3D e as dimensões da réplica em escala 1:6 do modelo proposto por Ahmed.

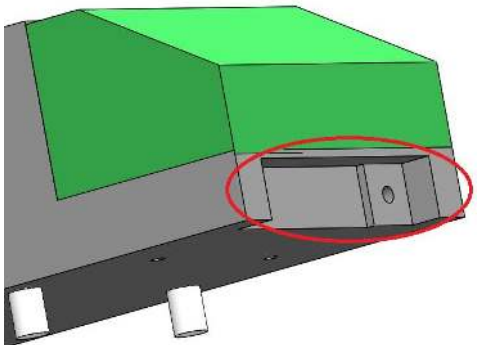
Figura 1 – Dimensões (em mm) e representação3D da réplica adaptada ao nosso experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Apesar da preocupação em manter a forma e o design geométrico, conforme exposto, um entalhe foi criado na parte traseira do modelo, Figura 2. Este entalhe permite acomodar uma célula de carga adaptada de uma balança de precisão. Essa adaptação foi realizada para possibilitar a medição da força peso aferida pela célula de carga. A parte superior com geometria verde é removível e permite alternar a inclinação φ, que pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 2 – Vista em detalhe para inserção da célula de carga



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.1.1 Descrição da Célula de Carga

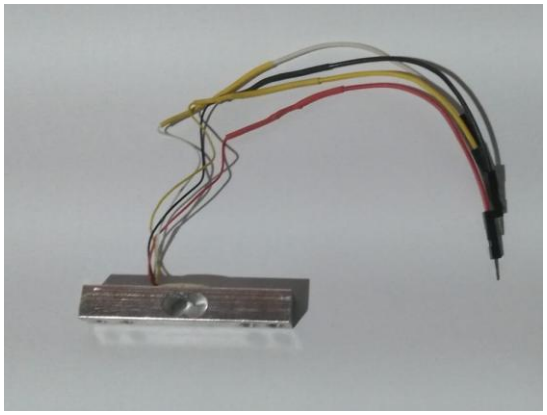
Uma célula de carga e um transdutor que converte uma força mecânica (como compressão ou tração) em um sinal elétrico que pode ser medido e interpretado. A Figura 3 mostra a célula de carga utilizada em nosso arranjo. As células de carga são amplamente utilizadas em várias aplicações, incluindo:

- Balanças: Medindo o peso de objetos em diversas industrias.
- Monitoramento de Força: Em testes de materiais ou em sistemas de controle de processos.
- Medidas de Arrasto: Como no presente estudo, onde a célula de carga mede a força de arrasto atuando sobre um corpo em movimento em um túnel de vento.

As células de carga geralmente utilizam elementos piezoelétricos ou extensômetros (*strain gauges*) que alteram sua resistência elétrica quando submetidos a uma força. A variação de resistência é convertida em um sinal elétrico, que pode ser calibrado para fornecer uma leitura precisa da força aplicada. Os principais tipos de células de carga incluem:

- Cisalhamento: medem forças em um plano, geralmente usadas em balanças.
- Compressão: medem forças de compressão, comuns em aplicações industriais.
- Tensão: Medem forças de tração, frequentemente usadas em testes de materiais.

Figura 3 – Célula de Carga

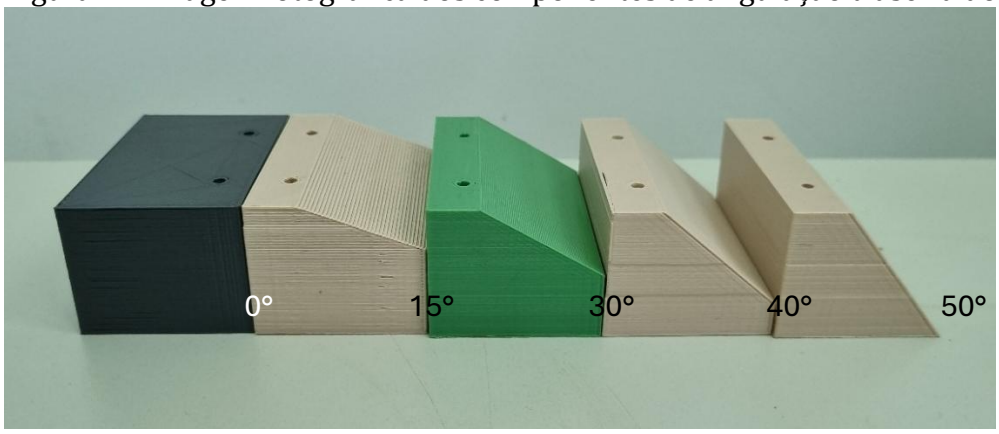


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.2 Arranjos Experimental

O experimento foi realizado em um túnel de vento subsônico, modelo AA-TVSH1-H1c (modificado), da fabricante *AeroAlcool*, com seção de ensaio de 465mm x 465mm x 1200mm, conforme a Figura 5. Neste túnel, a velocidade do vento foi controlada e variada. A célula de carga acoplada ao corpo de prova mede a força que atua sobre o modelo. Para cada configuração, foram realizados registros para diferentes inclinações traseiras de 0°, 15°, 30°, 40° e 50°. O modelo possui a parte traseira com a parte inclinada intercambiável, Figura 4, o que proporciona agilidade na troca de ângulo para o ensaio e dispensa a necessidade de imprimir vários corpos de prova completos.

Figura 4 – Imagem fotográfica dos componentes de angulação traseira do modelo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 5 – Túnel de vento subsônico

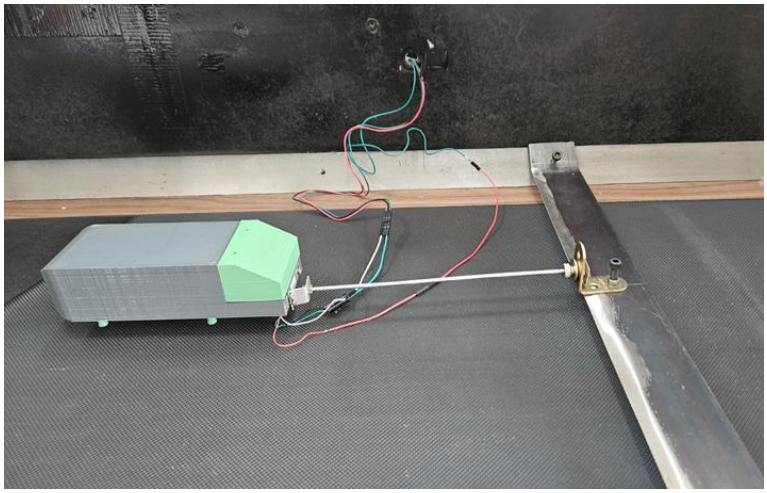


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Conforme descrito por Ahmed et al. (1984), o aumento do arrasto aerodinâmico está intimamente ligado ao aumento da inclinação de saída dos corpos. As estruturas aerodinâmicas mais comuns são o vórtice formado na traseira e uma grande zona de recirculação, sendo essas as principais fontes de arrasto, as quais devem ser modificadas para se obter uma diminuição no arrasto do corpo (GHEYSSENS, 2016).

Dois ensaios foram realizados para cada configuração da seção traseira, assegurando a confiabilidade e a reprodutibilidade dos dados obtidos. O arranjo experimental foi projetado para maximizar a precisão das medições, utilizando a célula de carga como elemento central na avaliação do desempenho aerodinâmico do modelo. A Figura 6 mostra o arranjo experimental na seção de testes do túnel de vento.

Figura 6 – Vista do arranjo experimental na seção de testes do túnel de vento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.2.1 Sistema de Medição de Força

A fixação do modelo na seção de teste é realizada por meio de uma barra transversal, fixada e posicionada a 200 mm do modelo por uma barra roscada de 6 mm de diâmetro. O peso do modelo, confeccionado por impressão 3D em PLA (ácido polilático) adicionado ao peso da célula de carga, é suficientemente baixo, não ultrapassando em nenhuma das configurações de inclinação traseira utilizadas um peso significativo a ponto de causar flambagem visível na barra roscada, a qual é engastada ao suporte transversal e a célula

de carga. Tal arranjo mantém o conjunto (modelo + célula de carga) a cerca de 10mm da base da seção de testes.

Para assegurar a precisão durante a utilização da célula de carga, sem a necessidade de calibrações e ajustes sucessivos (que seriam exigidos, por exemplo, em uma célula de carga ligada a plataformas de prototipagem como Arduino ou ESP32), optou-se por utilizar uma balança de precisão, conforme ilustrado na Figura 7. A balança possui capacidade de 1000 g e precisão de 0,1 g. A célula de carga desta balança foi removida e devidamente preparada para operar em nosso arranjo, enviando seu sinal para a balança, que permaneceu fora do túnel de vento, facilitando assim sua leitura e garantindo a acurácia das medições.

Figura 7 – Balança de precisão adaptada e imagem ilustrativa de modelo similar



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.3 Obtenção dos Dados Experimentais

Os dados experimentais foram obtidos modulando a velocidade do vento através de faixas de RPM especificas para o mecanismo de impulsão. As faixas de RPM utilizadas foram: 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1100 e 1200. Para cada faixa de RPM, obteve-se uma velocidade do vento com variação aproximada.

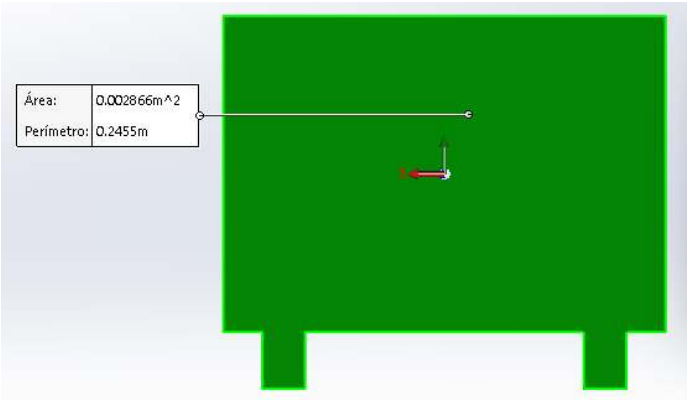
Para cada uma das angulações da traseira do corpo de prova (0°, 15°, 30°, 40° e 50°), foram realizadas duas sessões de testes dentro das faixas de RPM mencionadas. Destes, foram registrados dados de velocidade do vento [m/s] e da força peso, em grama-força [gf], exercida sobre a célula de carga acoplada ao modelo.

Com a força de arrasto (F_d) e a velocidade do fluido (v), foi possível apurar o Coeficiente de Arrasto (C_d), que é adimensional, utilizando a Equação 1 a seguir:

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho A v^2} \qquad (1)$$

A área frontal do corpo de prova (A) é de 0,002866 m^2, obtida diretamente do modelo 3D do corpo de prova utilizando recursos do software de modelagem a fim de evitar imprecisões, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Area da seção transversal frontal do corpo de prova



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A densidade do ar (ρ) utilizada nos cálculos foi estimada em 1,082 kg/m^3. Essa estimativa considerou as condições ambientais de Dourados-MS durante o experimento: temperatura de aproximadamente 30 °C (303,15K) e altitude de cerca de 459 m acima do nível do mar.

3.3.1 Propagação de Incertezas

Em experimentos científicos, todas as medições estão associadas a uma incerteza ou erro. Essa incerteza pode ser devida a limitações do equipamento, condições ambientais ou outras fontes. A propagação de incertezas é o processo que permite calcular a incerteza associada a grandezas que dependem de outras variáveis, cada uma com sua própria incerteza.

Quando se calcula uma grandeza *f* que depende de variáveis independentes x_1, x_2, ..., x_n, a incerteza total em f , denotada por Δf , pode ser determinada através da expansão de Taylor.

No entanto, para funções mais complexas de várias variáveis, a propagação de erros leva em consideração a contribuição de cada variável com a seguinte formula geral:

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\Delta x_2\right)^2 + \ldots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\Delta x_n\right)^2} \qquad (2)$$

Aqui, $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ é a derivada parcial de f em relação a variável x_i, e Δx_i a incerteza associada a x_i. O termo $\frac{\partial f}{\partial x_i}\Delta x_i$ representa a contribuição de cada incerteza individual para a incerteza total de f.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados iniciais, obtidos diretamente da instrumentação experimental, passaram por um processo de apuração que envolveu a conversão de unidades e a aplicação das equações fundamentais da aerodinâmica para determinar a Força de Arrasto (F_d), o Coeficiente de Arrasto (C_d) e o Número de Reynolds (Re). Adicionalmente, foi realizada a propagação de incertezas para todas as grandezas calculadas, assegurando que a confiabilidade e a precisão das medições fossem devidamente consideradas, em conformidade com as diretrizes de tratamento de dados experimentais (AZEVEDO; ENSSLIN, 2020).

A análise dos dados experimentais revelou o comportamento aerodinâmico do corpo de prova sob os ângulos de inclinação da sua traseira.

4.1 Força de Arrasto em Função da Velocidade

Os experimentos demonstraram que, para todas as configurações angulares investigadas, a força de arrasto (F_d) aumenta em função da velocidade do escoamento (V). A relação observada aproxima-se consistentemente de um comportamento quadrático ($F_d \propto V^2$), o que é fundamental e esperado para o regime de escoamento turbulento e dominante para

o arrasto de forma em corpos rombudos. Este comportamento reflete a dependência direta da força de arrasto em relação à pressão dinâmica, ($q = \frac{1}{2}\rho V^2$).

A relação teórica que define o coeficiente de arrasto (C_d), equação (1), pode ser rearranjada obtendo-se:

$$F_d = \frac{1}{2}\rho A C_d V^2 \qquad (3)$$

Considerando que ρ, A e C_d permanecem constantes para uma dada configuração geométrica, conclui-se que $F_d \propto V^2$. Assim, define-se uma constante de proporcionalidade "a", que agrupa os parâmetros físicos e geométricos do sistema:

$$a = \frac{1}{2}\rho A C_d \qquad (4)$$

Dessa forma, a força de arrasto pode ser expressa como:

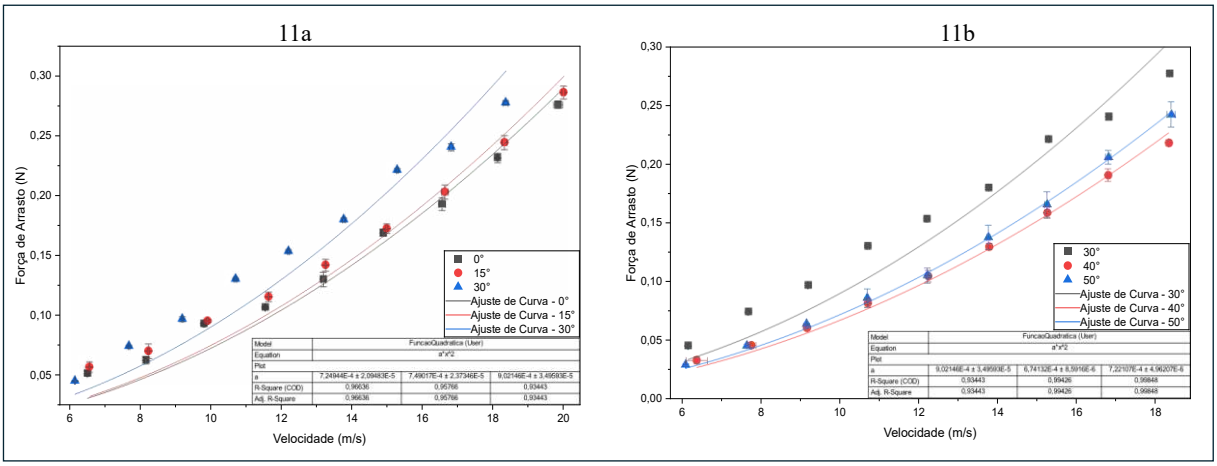
$$F_d = aV^2 \qquad (5)$$

Essa formulação, da equação (5), permite-nos então evidenciar que o coeficiente de arrasto (C_d) pode ser obtido a partir do coeficiente de proporcionalidade experimental a, segundo a relação:

$$C_d = \frac{2a}{\rho A} \qquad (6)$$

Para validar essa dependência, foi realizado um ajuste de curva quadrático da forma da equação (5) aos dados experimentais de cada configuração. As Figuras 9a e 9b apresentam os resultados para os ângulos de $0°, 15°, 30°$ e $30°, 40°$ *e* $50°$ respectivamente.

Figura 9 – Força de Arrasto em Função da Velocidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A alta correlação (valores de R^2 próximos de 1) obtida pelos ajustes quadráticos para todas as configurações, confirma que a força de arrasto para o corpo de prova segue a dependência esperada com o quadrado da velocidade dentro da faixa experimental.

É importante ressaltar a notável exceção no ângulo de 30°, cujo coeficiente de determinação ($R^2 \approx 0{,}93443$) é o mais baixo. Esta correlação ligeiramente inferior, combinada com o maior coeficiente a obtido ($9{,}02146 \times 10^{-4}$), sugere que o escoamento nesta configuração é o mais instável e variável, mesmo na faixa de alta velocidade, indicando uma maior dificuldade do ajuste quadrático em representar todos os pontos com precisão.

Portanto, a análise da magnitude relativa desses coeficientes a é diretamente indicativa da variação do Coeficiente de Arrasto (C_d). O ângulo 30° exibe o maior coeficiente a e, consequentemente, o maior C_d, enquanto o 40° apresenta o menor valor. Os valores de a obtidos nestes ajustes de curva serão agora utilizados na Equação (8) para o cálculo dos Coeficientes de Arrasto (C_d)

4.2 Analise do Coeficiente de Arrasto em Função do Número de Reynolds

Os valores do Coeficiente de Arrasto Médio ($C_{d,médio}$) obtidos para cada ângulo de inclinação, utilizando a média dos dados na região estável de escoamento turbulento, os três maiores Números de Reynolds, esta abordagem isola o regime de escoamento estável e evita a inclusão de dados da região de transição de baixa velocidade.

A análise primária desses valores revela que o C_d varia significativamente com a geometria da traseira. O valor máximo de $C_d \approx 0{,}56252$ é observado em 30°, enquanto o valor mínimo é obtido em 40°, com $C_d \approx 0{,}43133$. Esta variação de 30,4% entre o pior e o melhor cenário demonstra a alta sensibilidade do arrasto de forma à geometria com ângulo de inclinação (φ) variável.

Os valores de Coeficiente de Arrasto (C_d) foram calculados para cada velocidade de escoamento e, consequentemente, para uma faixa de Número de Reynolds (Re) para cada ângulo de inclinação (φ) testado ($0°,\ 15°,\ 30°,\ 40°e\ 50°$).

Nos experimentos realizados com o corpo de Ahmed, o Número de Reynolds (Re) foi calculado com base na velocidade do escoamento no túnel de vento e em uma dimensão característica (L) associada ao comprimento do modelo. Assim, utilizou-se a definição clássica:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \mathrm{VL}}{\mu} \qquad (7)$$

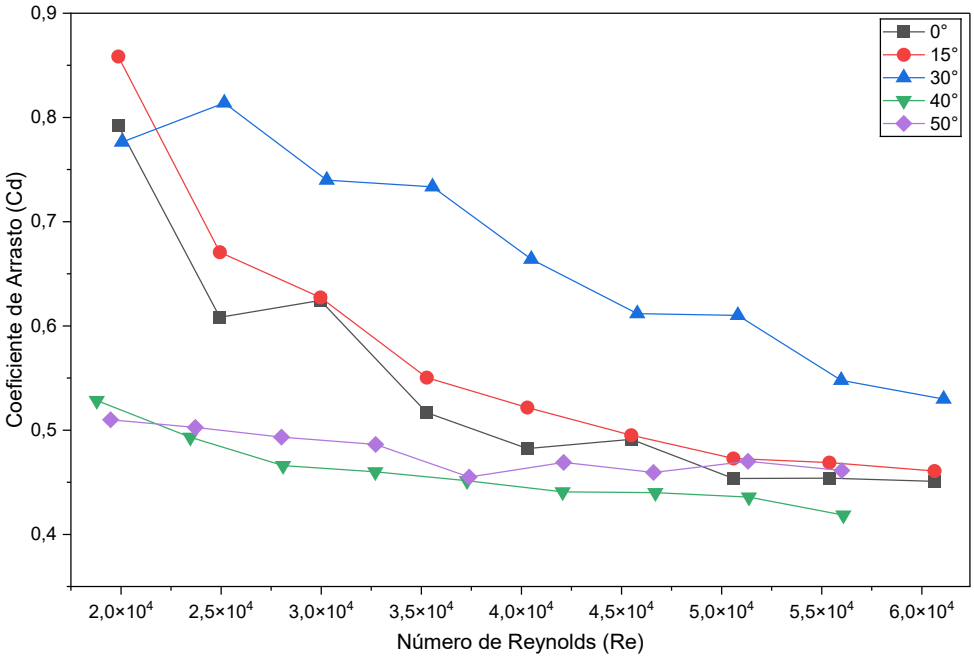
Onde ρ é a densidade do ar, V é a velocidade do escoamento medida à montante do modelo, L é o comprimento característico do corpo de Ahmed empregado no experimento, e μ é a viscosidade dinâmica do ar. Essa formulação é amplamente adotada em estudos de aerodinâmica externa e permite comparar diretamente os resultados obtidos aqui com referências como Ahmed *et al.* (1984). A partir dessa relação, foram obtidos os valores de Re na faixa de $1{,}4 \times 10^4$ a $6{,}1 \times 10^4$ utilizados nas análises apresentadas.

Essa faixa de Números de Reynolds investigada, é significativamente menor em comparação com o estudo seminal de Ahmed *et al.* (1984) ($\mathrm{Re} \approx 4{,}29 \times 10^6$). No entanto, é relevante para a caracterização do escoamento de corpos rombudos, onde a camada limite é afetada.

A Figura 10 ilustra a variação do C_d com o Re para todas as configurações testadas. Observa-se que, para todos os ângulos de inclinação:

1. O C_d tende a diminuir com o aumento do Re nas velocidades mais baixas.
2. Para Números de Reynolds mais elevados, aproximadamente acima de $4{,}0 \times 10^4$, o Cd tende à estabilização, indicando o estabelecimento de um escoamento turbulento plenamente desenvolvido. Destaca-se que as configurações de 40° e 50° atingem essa estabilidade de forma mais precoce, sugerindo que tais ângulos promovem uma transição mais rápida do escoamento.

Figura 10 – Coeficiente de Arrasto (Cd) vs. Número de Reynolds



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Esta estabilização é uma tendência característica do escoamento turbulento em torno de corpos rombudos, onde o coeficiente de arrasto geralmente se torna aproximadamente constante e menos sensível a variações adicionais do Re acima de um limite crítico (tipicamente $\mathrm{Re} \geq 10^4$). Atingir este patamar permite a comparação significativa dos coeficientes de arrasto entre os diferentes ângulos de inclinação, uma vez que o escoamento está em um regime estável dentro das condições do túnel de vento.

A análise da propagação de incertezas revelou que todas as incertezas relativas associadas ao coeficiente de arrasto ($\Delta Cd/Cd \times 100\%$) permaneceram abaixo de 10%, o que indica elevada precisão nas medições e robustez nos resultados obtidos. Essa constatação é particularmente relevante em estudos experimentais de escoamento, onde pequenas variações podem impactar significativamente a interpretação do regime aerodinâmico.

4.2.1 Coeficiente de Arrasto Médio para Cada Ângulo

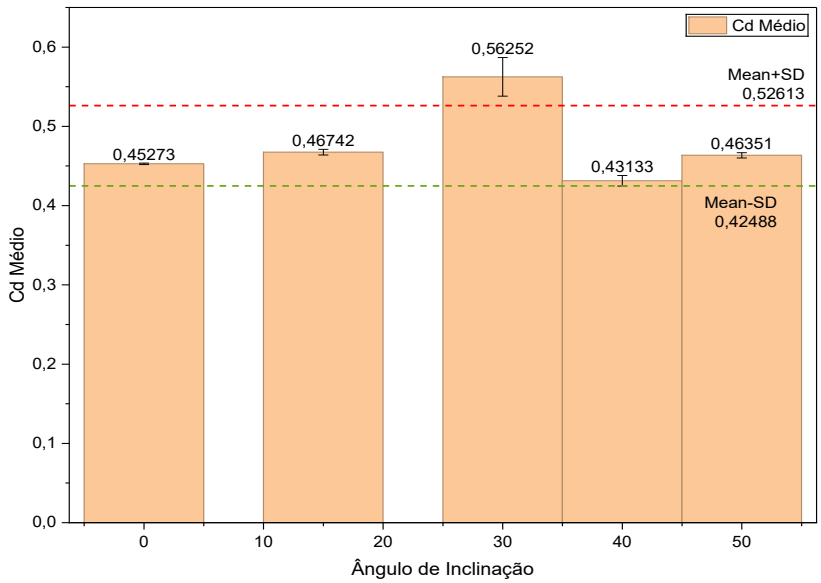
A Figura 11 apresenta graficamente a relação entre o coeficiente de arrasto médio para os maiores números de Reynolds, ou seja, para a região em que o coeficiente de arrasto estabiliza.

Conforme pode ser observado na Figura 11, os valores do coeficiente de arrasto médio ($C_{d,médio}$) mantêm-se próximos para os ângulos de 0°, 10°, 40° e 50°, indicando comportamento similar entre essas configurações. No entanto, observa-se que, para o ângulo de 30°, ocorre um aumento expressivo do coeficiente de arrasto, ultrapassando o limite superior da faixa média (Mean + SD).

Esse acréscimo indica alterações significativas no regime de escoamento, possivelmente associadas à formação de vórtices e à ampliação da região de recirculação na zona de esteira, fenômenos característicos de separação antecipada da camada limite. Como consequência, há um incremento no arrasto de pressão, resultando no maior valor de C_d registrado entre os ângulos analisados.

E embora o ângulo de 40° encontre-se dentro da faixa média, como já mencionado, este registra o menor valor de $C_{d,médio}$ da análise. Este é um indicativo de que o aumento do ângulo facilitou a separação da camada limite na porção final do corpo. Esse fenômeno reduziu o tamanho e a intensidade da região de recirculação, resultando na minimização do arrasto de pressão e estabelecendo a geometria de 40° como o ponto de máxima eficiência aerodinâmica dentro da faixa estudada.

Figura 11 – Coeficiente de Arrasto Médio (C_d) vs. Ângulo de Inclinação (φ)



Fonte: Autor (2025)

CONCLUSÃO

Este trabalho experimental investigou a influência do ângulo de inclinação da traseira (φ) de um corpo de prova tipo Ahmed sobre seu coeficiente de arrasto aerodinâmico (C_d) na faixa de Número de Reynolds (Re) compreendida entre $1{,}4 \times 10^4$ a $6{,}1 \times 10^4$.

Os resultados confirmaram a relação esperada entre a força de arrasto e o quadrado da velocidade ($F_d \propto V^2$), validando a consistência dos dados experimentais. A análise do (C_d) evidenciou uma dependência não linear com a geometria da traseira, destacando a sensibilidade do arrasto às variações do ângulo de inclinação.

O principal achado foi a identificação de um pico de arrasto máximo em 30° ($C_d \approx 0{,}562$) e de um arrasto mínimo em 40° ($C_d \approx 0{,}431$). O ângulo de 30° confirmou-se como uma condição crítica de separação de escoamento, em concordância com o estudo seminal de Ahmed et al. (1984). Por outro lado, a ocorrência do mínimo de C_d em 40° sugere que, no regime de baixo Re testado, o processo de reanexação do escoamento e a minimização da esteira ocorrem para ângulos mais acentuados.

Esses resultados indicam a existência de uma zona de transição pronunciada entre 30° e 40°, na qual pequenas variações geométricas produzem mudanças significativas no comportamento aerodinâmico. Tal evidência reforça que a otimização do design veicular é altamente dependente do regime de escoamento e que estratégias de redução de arrasto devem considerar as condições de operação correspondentes ao intervalo de Re relevante para cada aplicação.

Em síntese, o estudo contribui para o entendimento experimental dos mecanismos de formação da esteira e oferece subsídios para futuras análises numéricas e otimizações de geometrias veiculares em escala reduzida.

REFERÊNCIAS

AHMED, S. R. et al. (1984) Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. SAE Transactions - Technical Paper, n. 840300, p. 473–503.

ALMEIDA, Evelyn Natalie Aguiar de (2022). Simulações de escoamento ao redor do Corpo de Ahmed via CFD código aberto e comercial. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

AZEVEDO, R. C.; ENSSLIN, L. (2020). Metodologia da pesquisa para engenharias. Belo Horizonte: PPGEC/CEFET-MG. ISBN 978-65-00-10268-0.

(BIPM), B. I. de Pesos e M. BIPM – "The International System of Units (SI)"(Brochure do SI). Disponível em: https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure, 1901.

CUDNIK, B.; PATEL, M. Physics 2511 Laboratory Manual. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.pvamu.edu/physics/wp-content/uploads/sites/55/Physics%202511%20Lab%20Manual%208.3E.pdf>. Acesso em: 10 julho de 2025.

FOX, R. W. et al. (2014). Introdução a Mecânica dos Fluidos. 8. ed. [S.l.: s.n.]. ISBN 10-852162302x 13-978-8521623021.

GHEYSSENS, T. (2016). Aerodynamic analysis of a platoon of bluff bodies subjected to cross wind: A numerical investigation on the effect of drag reduction devices. Tese (Doutorado)
— Delft University of Technology.

HUCHO, W.-H. et al. (1987). Aerodynamik of road vehicles - From Fluid Mechanics to Vehicle
Engineering. 1. ed. [S.l.: s.n.].

META. topographic-map.com. (2025). Acessado em: 03 de marco de 2025. Disponível em: <https://pt-br.topographic-map.com/map-ftks8/Dourados/?center=-22.19722%2C-54.93203&
zoom=16&popup=-22.19921%2C-54.93245>

MUNSON, B. R. et al. (2004). Fundamentos da mecânica dos fluidos. [S.l.]: São Paulo.

NAKASHIMA, T. et al. (2020). Fluid-dynamic force measurement of Ahmed model in steady-state cornering. Energies, v. 13, n. 24.

ROCHA, S. L. (2016). Analise numérica do campo de escoamento externo na geometria de referência Ahmed para aplicações automotivas. p. 34.

VARELA, D. J. C.; PAULA, A. V. (2016). Analise experimental do escoamento ao redor do corpo de Ahmed. PERSPECTIVA, Erechim., v. 40, n. 150, p. 85–96.

WHITE, F. M. Mecânica dos Fluidos. 6. ed. [S.l.: s.n.], 2011. ISBN 978-85-8055-009-2.

Y. A. Mecânica dos Fluidos: fundamentos e Aplicações. 3. ed. [S.l.: s.n.], 2014. ISBN 978-0-07-338032-2.