



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

CARLOS HENRIQUE DA SILVEIRA

Análise qualitativa do escoamento na inclinação traseira de Corpo de Ahmed

**Ilha Solteira
2023**

CARLOS HENRIQUE DA SILVEIRA

Análise qualitativa do escoamento na inclinação traseira de Corpo de Ahmed

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Engenheiro Mecânico.

Orientador:

Alúcio Viais Pantaleão

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S587a Silveira, Carlos Henrique da.
Análise qualitativa do escoamento na inclinação traseira de corpo de Ahmed / Carlos Henrique Da Silveira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
32 f. : il.

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

Orientador: Aluísio Viais Pantaleão

Inclui bibliografia



1. Análise experimental. 2. Corpo de Ahmed. 3. Aerodinâmica veicular.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA****ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

TÍTULO: Análise qualitativa do escoamento na inclinação traseira de Corpo de Ahmed

ALUNO: Carlos Henrique da Silveira RA: 152053451

Orientador: Aluísio Viais Pantaleão

Aprovado (X) – Reprovado () pela Comissão ExaminadoraNota obtida: 7.5**Comissão Examinadora:**Prof. Aluisio Viais Pantaleão 
*Presidente (Orientador)*Prof. Alex Pereira Da Cunha Prof. Arthur Gomes da Silva Vilaronga Carlos Henrique da Silveira
*Assinatura do Aluno*Ilha Solteira (SP) 23 de junho de 2023.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a realização deste trabalho de conclusão de curso. Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, Aluísio Viais Pantaleão, pela orientação e suporte ao longo de todo o processo. Sua experiência e conhecimento foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria também de agradecer aos meus amigos que me apoiaram durante toda essa jornada. Todas as vezes que me encorajaram e me chamaram para estudar juntos me motivaram a seguir em frente.

Agradeço imensamente à minha família pelo apoio incondicional ao longo desses anos de estudo. Em especial, quero expressar minha gratidão à minha irmã, Maria Clara, que me deu valiosas dicas para a edição do texto. Seus conhecimentos nas normas de textos acadêmicos foram extremamente úteis na melhoria da qualidade do meu trabalho.

Por fim, meu mais profundo agradecimento a todos citados. Sem o apoio de cada um, este trabalho não seria possível.

RESUMO

Para se estudar aerodinâmica veicular, o estudo com análises experimentais é de suma importância, pois é possível analisar vários fenômenos que ocorrem no escoamento e, assim, entender suas características. Estes estudos contribuem para obtenção de perfis aerodinâmicos mais eficientes. Este trabalho propôs estudar qualitativamente o escoamento ao redor de um corpo de Ahmed, para comparar o resultados com outros autores e verificar a esteira gerada pelo escoamento. Para isso, utilizou-se de um túnel hidrodinâmico horizontal para realizar a visualização do escoamento ao redor deste corpo. Foram estudadas as formações de vórtices em três diferentes ângulos de inclinação traseira e em três números de Reynolds, assim como a relação do arrasto com a macroestrutura dos vórtices formados.

Palavras chaves: Análise experimental, corpo de Ahmed, aerodinâmica veicular.

ABSTRACT

To study vehicle aerodynamics, experimental analysis is of paramount importance as it allows for the examination of various phenomena occurring in the flow and thus understanding their characteristics. These studies contribute to obtaining more efficient aerodynamic profiles. This work aimed to qualitatively study the flow around an Ahmed body, comparing the results with those of other authors and assessing the wake generated by the flow. To accomplish this, a horizontal hydrodynamic tunnel was used to visualize the flow around this body. Vortex formations were studied at three different rear inclination angles and three Reynolds numbers, as well as the relationship between drag and the macrostructure of the formed vortices.

Keywords: Experimental analysis, Ahmed body, vehicle aerodynamics.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	REVISÃO DE LITERATURA	8
2.2	Visualização de escoamento	8
2.3	Regimes de Escoamentos	9
2.4	Camada Limite	10
2.1	O túnel	11
2.5	Corpo de Ahmed	12
2	MATERIAIS E MÉTODOS	16
2.1	Ensaio	20
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
3.1	Comparação com Tunay, Sahin e Ozbalt (2014)	23
3.2	Análise da morfologia do escoamento obtida por Ahmed	24
3.3	Análises qualitativas gerais do escoamento	25
3.3.3	Resultados obtidos para Corpo 15 (15º)	25
3.3.1	Resultados obtidos para Corpo 25 (25º)	26
3.3.2	Resultados obtidos para Corpo 30 (30º)	28
3.4	Análise qualitativa do arrasto	30
4	CONCLUSÃO	31
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

Os estudos para otimizar a aerodinâmica de veículos na indústria automobilística sempre são de grande interesse, a fim de buscar um menor consumo de combustível e veículos mais velozes. Para isso, é necessário entender como o escoamento ao redor dos automóveis se comporta e como isso impacta no arrasto gerado pelo escoamento. Uma das maneiras de se compreender isso é realizando análises experimentais em túneis de vento ou de água, onde usa-se um corpo de prova similar a um veículo. Um dos corpos utilizados é o Corpo de Ahmed, o qual é um corpo rombudo muito utilizado para este tipo de análise devido ao baixo custo e geometria de fácil confecção. Este corpo é usado neste trabalho e será detalhado nas sessões seguintes.

Para este trabalho foi realizada uma abordagem experimental em um túnel hidrodinâmico horizontal e os seguintes objetivos foram propostos:

- estudar e comparar a formação de vórtices em corpos de prova com três diferentes ângulos de inclinação traseira, sendo de 15°, 25° e 30° para diferentes números de Reynolds;
- comparar os resultados obtidos com a literatura, a fim de comprovar e explicar o arrasto aerodinâmico gerado pela traseira do corpo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.2 Visualização de escoamento

O conceito de visualização de escoamento é definido por Vieira e Mansur (2004, p. 12) como “uma aplicação de métodos capazes de tornar visíveis fenômenos ou propriedades associadas ao movimento dos fluidos”. À princípio, essa definição pode parecer complexa, porém está mais presente no nosso dia a dia do que se possa imaginar. O encontro de dois rios com características muito diferentes gera um ótimo local para visualizar o fluido e seu comportamento, como por exemplo no encontro do rio Tapajós com rio Amazonas (Figura 1). Além disso, a simples observação da fumaça de um palito de fósforo queimado já pode ser considerado como visualização de um escoamento. Assim, percebe-se que é um método simples para o emprego em estudos mais complexos.

Figura 1 - Encontro Rio Tapajós com Rio Amazonas.



Fonte: Tripadvisor, 2023.

Aproveitando desta facilidade, o emprego de métodos experimentais é utilizado desde o início dos estudos de mecânica dos fluidos e foi utilizada por importantes autores, como por exemplo no experimento de Osborn Reynolds (1842-1912), no qual encontrou a transição entre o escoamento laminar e turbulento no interior de dutos. Também, por meio dessa técnica, Ludwig Prandtl (1875-1953) definiu o conceito de camada limite (VIEIRA; MANSUR, 2004).

O uso de métodos experimentais ainda é de suma importância para a análise do comportamento de fluidos, mesmo nos dias atuais. Com essa técnica, é possível compreender as características do escoamento em um determinado cenário de maneira simples. Porém, o

quão simples será o método, dependerá muito da experiência do pesquisador e as condições e características do aparato experimental usado. Logo, podem-se haver algumas divergências nos resultados obtidos se comparado com outros trabalhos.

Alguns conceitos de mecânica dos fluidos devem ser conhecidos para o desenvolvimento deste trabalho. Nessa seção serão definidos alguns deles.

2.3 Regimes de Escoamentos

Na vida real, existem apenas escoamentos viscosos, porém podem-se adotar modelos matemáticos que simplificam para escoamentos não viscosos. Assim, deve-se entender o quão importante são as forças viscosas para cada caso e se podem ser desprezíveis. Para isso, usa-se o número adimensional de Reynolds (FOX et al. 2010).

Um escoamento pode ser considerado laminar, de transição ou turbulento. Para definir cada regime usa-se faixas de valores de número de Reynolds, e essas faixas dependem do tipo de escoamento.

O escoamento laminar é aquele no qual o fluido se move em camadas ou lâminas e há grande influência das forças viscosas, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema de um escoamento laminar



Fonte: Stroher, 2020.

O escoamento turbulento é aquele em que as partículas fluidas se misturam ao longo do deslocamento, devido a flutuações aleatórias no campo de velocidades, que é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Esquema de um escoamento turbulento.



Fonte: Stroher, 2020.

Já o escoamento de transição é aquele em que há partículas que começam a ter características de turbulento, porém não caracterizando um escoamento turbulento, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Esquema de um escoamento de transição.



Fonte: Stroher, 2020.

Neste trabalho o escoamento é considerado um escoamento externo pois sua superfície está em contato com o um ambiente aberto. Este tipo de escoamento também podem ser laminar ou turbulento. Para um escoamento em um canal de superfície livre, como o túnel utilizado, para $Re < 500$ é regime laminar, para valores de $500 < Re < 2000$ o regime está na transição laminar para turbulento e para valores de $Re > 2000$ o regime é turbulento (DE MELO PORTO, 1997).

2.4 Camada Limite

Segundo Fox et al. (2010), a condição de não deslizamento, onde o fluido permanece em repouso, explica a existência da camada limite, uma camada próxima à superfície em que o escoamento possui um rápido crescimento da velocidade, isto devido à influência do atrito. A velocidade nesta camada vai de zero até a velocidade prevista caso o fluido não fosse viscoso. Logo, todo corpo em um escoamento terá arrasto.

Ainda de acordo com Fox et al. (2010), esta camada limite também é responsável pela formação de esteiras nos corpos, devido ao seu descolamento, onde partículas fluidas são afastadas da superfície do objeto. A esteira ocorre sempre quando houver um gradiente adverso de pressão, ou seja, o escoamento vai de uma pressão baixa para uma pressão mais alta (FOX et al. 2010). A pressão e velocidade de uma partícula são inversamente proporcionais, quando uma aumenta, outra diminui e vice-versa. Assim, neste caso, o fluido em seu deslocamento acaba diminuindo de velocidade (FOX et al. 2010). Além disso, existe o atrito imposto pela camada limite que também diminui a velocidade, levando as partículas ao repouso que por sua vez serão afastadas da superfície pelas partículas seguintes, formando a esteira. A esteira acaba gerando um arrasto de pressão, pois sempre as partículas a frente terão uma pressão maior neste fenômeno. Logo, a força de arrasto é gerada pela esteira de baixa pressão (FOX et al. 2010).

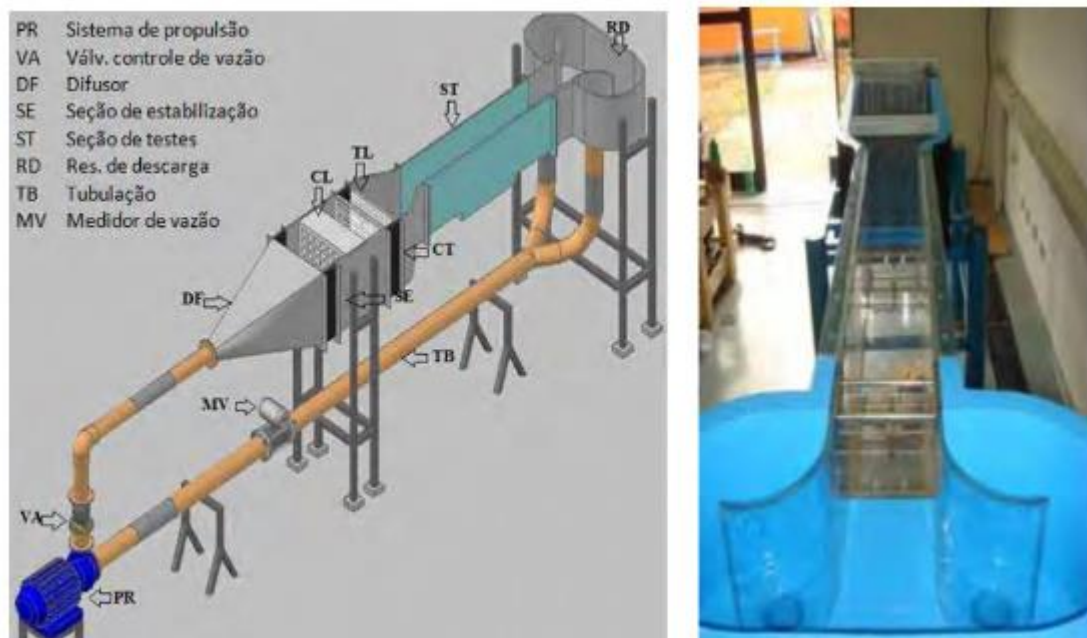
Para um escoamento em um corpo submerso deve-se levar em conta a forma do objeto,

podendo ser carenado ou rombudo (FOX et al. 2010). O primeiro possui baixo coeficiente de arrasto, pois seu arrasto de pressão é pequeno. Já o segundo, o coeficiente de arrasto de pressão é alto, devido a sua forma (FOX et al. 2010). No caso deste trabalho, o corpo utilizado é rombudo.

2.1 O túnel

Para a realização deste trabalho, foi utilizado o túnel horizontal hidrodinâmico, mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Túnel horizontal hidrodinâmico.



Fonte: Rosim, 2012.

À princípio, é necessário saber algumas características do aparato e também de seu escoamento, que foram estudadas por Silveira (2020). O túnel possui uma seção de testes de 200 mm de largura, 300 mm de altura e 1200 mm de comprimento. Possui um motor com um inversor de frequência que regula a rotação da bomba e, conseqüentemente, a velocidade do escoamento.

Por ser um túnel de superfície aberta, com um escoamento circulando constantemente, é notório que o nível de turbulência intrínseca do aparato também é alta. Além disso, há outros fatores que podem influenciar nesta alta turbulência como a vibração da bomba, que está instalada diretamente do chão, passando para o solo essa vibração, onde também o túnel está

apoiado. Veículos pesados passando na rua também podem afetar o escoamento, pois a distância do laboratório para a rua é bem próxima.

1.1 Razão de Bloqueio (dentro do tópico “o tunel”)

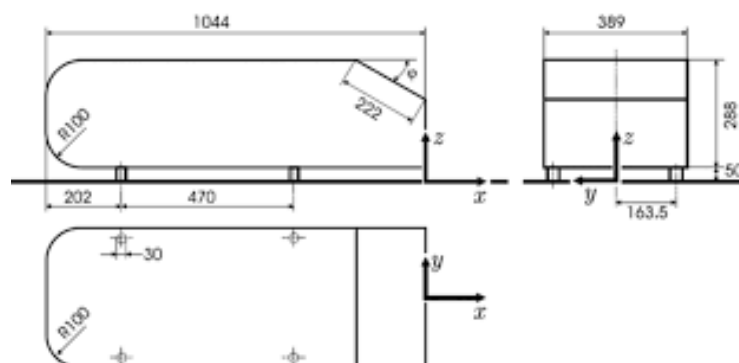
Segundo Silveira (2020), em túneis de superfície aberta, a dinâmica de geração de vórtices pode ser influenciado pelas superfícies laterais, principalmente quando há um bloqueio do escoamento gerado por algum corpo. Assim, deve-se saber qual o tamanho do corpo de prova que não influenciará nesta geração de vórtices.

A razão de bloqueio obtida por Silveira (2020) para este túnel foi de 5%, ou seja a área frontal do corpo de prova não pode ser maior que 5% da área de seção de testes para não haver influência das paredes laterais.

2.5 Corpo de Ahmed

O corpo de Ahmed é um carro simplificado para investigar a influência da topologia do escoamento em parâmetros de importância aerodinâmica, tal como o coeficiente de arrasto (GUILMINEAU, 2008). É sabido que uma das principais regiões responsáveis pelo aumento do arrasto aerodinâmico é a região traseira do veículo, local onde ocorre a separação do escoamento e onde é formada a esteira turbulenta. Na busca de avaliar a influência do ângulo de saída de uma geometria veicular e correlacioná-la com o arrasto aerodinâmico, Ahmed *et al.* (1984) estabeleceram um *benchmark* simples, conforme mostrado na Figura 6, e o ensaiou em túnel de vento, obtendo tanto imagens qualitativas da topologia do escoamento (advindas de visualização de escoamento), quanto dados quantitativos de força de arrasto, provenientes de uma balança adequadamente instalada.

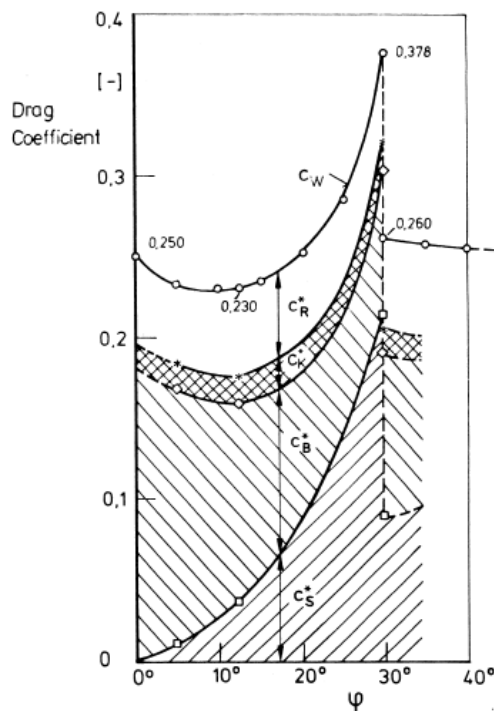
Figura 6 - Esquema do corpo de Ahmed.



Fonte: Ahmed *et al.*, 1984.

A partir disso, uma série de outros autores, tais como Lienhart, Stoots e Becker (2000), Guilmineau (2008) e Korkischko e Meneghini (2007), usaram o *benchmark* proposto por Ahmed *et al.* (1984) como referência para qualificação dos seus dados obtidos experimentalmente. No trabalho de Ahmed *et al.* (1984), obteve-se um gráfico relacionando os coeficientes de arrasto do corpo com o ângulo de inclinação da traseira, que está mostrado na Figura 7 e explicou no seu trabalho, conforme na citação.

Figura 7 - Variação do arrasto com ângulo de inclinação da traseira.



Fonte: Ahmed *et al.*, 1984.

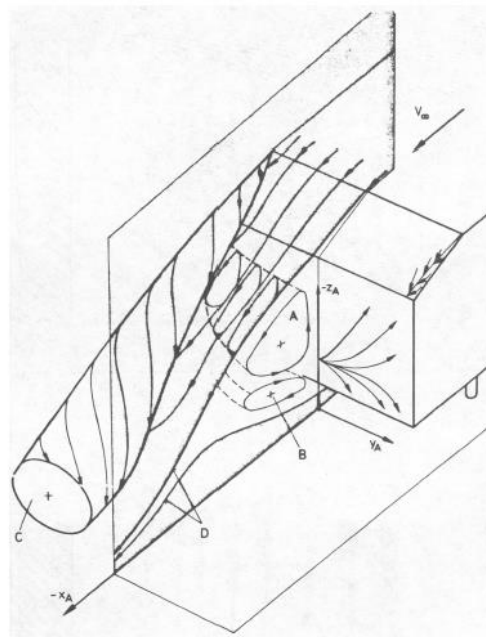
A contribuição do arrasto de pressão da parte frontal do corpo é baixa. A maior contribuição da pressão de arrasto vem do ângulo e da superfície vertical da base da traseira final. Para um ângulo de 0° , a pressão de arrasto da inclinação é completamente contribuído pela base plana. Com aumento do ângulo, a área da base vertical diminui, e a distribuição da pressão é mudada também. Com a mudança de 5° para 30° , a área da base vertical diminui de 93% para 61% da área frontal, e o valor de C_b , que é contribuição da pressão de arrasto da traseira vertical, diminui de 86% para 29% do total do arrasto. Para a mesma variação de ângulo, a projeção da área da superfície do ângulo aumenta de 7% para 38% da parte frontal, e a contribuição da pressão C_s , o qual é contribuição da pressão de arrasto da base inclinada, aumenta de 5,4% para 66,4%. Isso mostra que o arrasto do corpo considerado é principalmente gerado no ângulo e na base vertical da traseira.

(AHMED *et al.*, 1984, p.479)

Ahmed *et al.* (1984) constatou que cerca de 85% do arrasto gerado em veículos é o arrasto de pressão e apenas 15% vem do arrasto de atrito, para um ângulo de 30° na inclinação traseira. Além disso, o local onde se tem mais arrasto em veículos é na sua inclinação traseira. Por isso, ele decidiu estudar o arrasto para cada ângulo de inclinação. Percebe-se na Figura 7 que 30° é o ângulo crítico, onde o corpo gera mais arrasto. Com um ângulo de 15° é o oposto, com essa inclinação o corpo gera o menor arrasto possível e aumenta conforme aumenta o ângulo.

Embora a esteira de um corpo rombudo é basicamente turbulento, o escoamento exibe uma macroestrutura que parece governar o arrasto de pressão criado na traseira. Na Figura 8 são mostradas as características do escoamento obtidas por Ahmed *et al.* (1984).

Figura 8 - Esquema da macroestrutura dos vórtices obtido por Ahmed *et al.* (1984)



Fonte: Ahmed *et al.*, 1984.

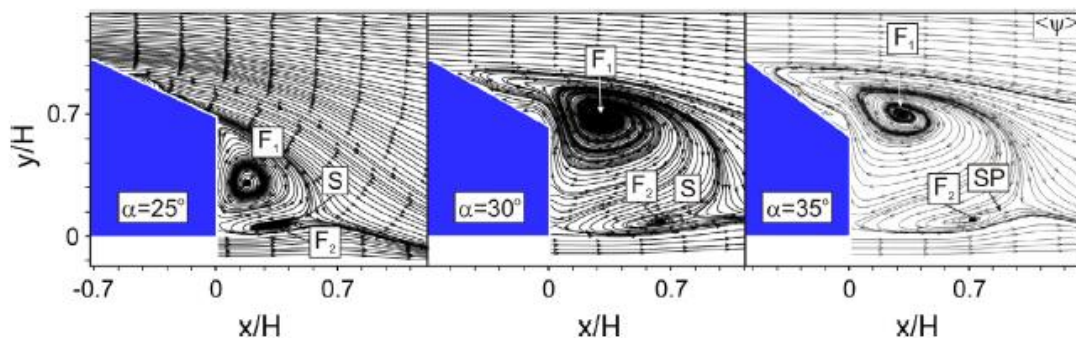
De acordo com Ahmed *et al.* (1984), a camada de cisalhamento que se forma na borda lateral da inclinação gira em torno de um vórtice longitudinal. No topo e na parte inferior da base vertical, a camada de cisalhamento se enrola em duas regiões recirculatórias, uma acima da outra. O escoamento na superfície da base não indica que as regiões de fluxo terminam na superfície da base. Consequentemente, os fluxos recirculatórios A e B podem ser vistos como sendo gerados pelos dois vórtices em formato de pata de cavalo, posicionados um acima do outro na região de separação indicada por D na Figura 8. O limite dessas regiões é aproximadamente paralelo à base da superfície. A parte posterior do vórtice se junta ao fluxo

inicial e emerge com o vórtice C, saindo da borda da inclinação. A separação da camada de cisalhamento nas bordas laterais verticais da base parece dividir-se, parte disso se direciona para cima em direção à parte posterior do vórtice A e para o vórtice C. Parte disso provavelmente vai para a parte posterior do vórtice B.

Como o escoamento na superfície inclinada é influenciada pelo vórtice C saindo das bordas laterais, a força do vórtice A depende da força do vórtice C. Enquanto o escoamento permanece colado na superfície inclinada, a força do vórtice C depende do ângulo de inclinação. A força do vórtice B depende, em primeiro lugar, das condições do escoamento no vão entre o chão e o corpo. Não é diretamente ligado ao ângulo da inclinação.

Tunay, Sahin e Ozbolat (2014) estudaram a formação de vórtice para ângulos de 25° , 30° e 35° para um número de Reynolds de $1,48 \cdot 10^4$. Na Figura 9 são mostrados os resultados obtidos por eles.

Figura 9 - Comportamento dos vórtices obtidos por Tunay, Sahin e Ozbolat (2014).



Fonte: Tunay; Sahin; Ozbolat, 2014.

Eles concluíram que para ângulo de 25° , o escoamento é quase grudado a superfície inclinada na simetria vertical no plano $z = 0$. Nesse ângulo, o escoamento acima da superfície da traseira é altamente tridimensional. Há dois fortes vórtices anti-horário na transversal do plano YZ saindo da lateral da superfície inclinada. Quando aumenta para 30° , o escoamento acima da inclinação separa depois de uma pequena distância da borda de entrada da superfície, dimensões geométricas do vórtice no plano de simetria se tornam maiores e o efeito da contra rotação na transversal do plano YZ fica menor. Como resultado, as localizações dos pontos críticos se movem para frete consideravelmente na vertical e na axial. Isso significa que o escoamento acima da superfície se torna completamente descolado e o efeito do escoamento vindo de cima do corpo começa a ser dominante na esteira, invés dos vórtices de contra rotação vindos da lateral da superfície.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização deste trabalho, em primeiro lugar, confeccionaram-se os três modelos utilizados nos ensaios, os quais tinham um ângulo de inclinação traseira de 15°, 25° e 30°. Para cada corpo foi designado uma nomenclatura, como mostrado na Tabela 1.

Em seguida, foi necessário verificar a razão de bloqueio do túnel em operação. Para isso, usou-se a Equação 1.

$$\beta = \frac{A_{cp}}{A_{st}} \cdot 100\% \quad (1)$$

onde A_{cp} é a área frontal do corpo de prova, A_{st} é a área de seção transversal do túnel.

Conforme já explicado, Silveira (2020) encontrou uma razão de bloqueio de 5% para o túnel horizontal. Para este trabalho, usaram-se corpos com dimensões de 100 mm de comprimento, 49,8 mm de largura e 36,9 mm de altura, com uma razão de bloqueio de 3%.

Após feito esta análise, modelou-se o corpo em um software de modelagem 3D e importou-se para o programa da impressora 3D. Neste programa, configuraram-se os parâmetros de impressão, a fim de obter um melhor acabamento superficial possível. Estes parâmetros estão mostrados na Figura 8. Para este trabalho não houve necessidade de um corpo muito robusto, pois não estaria sujeito a forças muito intensas. Assim, priorizou-se a economia de material e tempo para a impressão, com uma espessura da camada de impressão de 0,2 mm e uma densidade de preenchimento do interior do modelo de apenas de 4%.

Tabela 1 - Características de cada corpo.

Corpo	Ângulo (°)	Comprimento Característico (mm)
Corpo 15	15	99
Corpo 25	25	99
Corpo 30	30	99

Fonte: o Autor, 2023.

Em seguida, imprimiram-se os corpos e os pés na impressora 3D do laboratório, conforme mostrado na Figura 10, e colaram-se os pés nos modelos usando supercola.

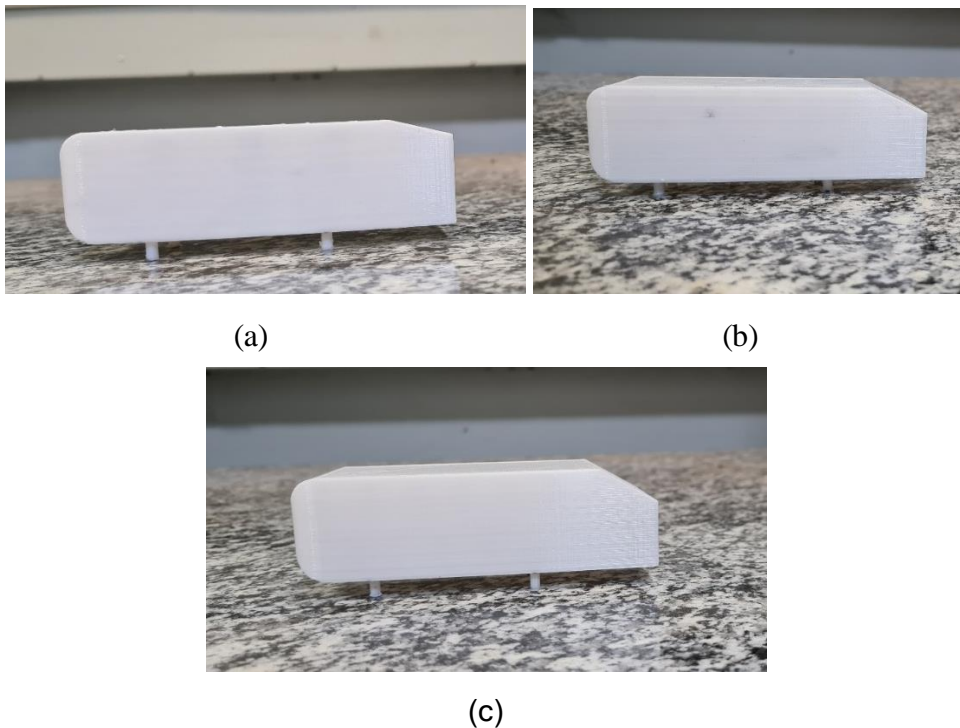
Figura 10 - Impressora 3D.



Fonte: Acronsoft, 2023.

Os corpos de 15°, 25° e 30° são mostrados nas Figura 11, onde Figura 11 (a) é Corpo 15, Figura 11 (b) é o Corpo 25 e Figura 11 (c) é o Corpo 30.

Figura 11 – Corpos impressos.



Fonte: o Autor, 2023.

Para a visualização do escoamento, usou-se corante líquido colorido. Para prepará-lo, teve-se que deixá-lo com a mesma massa específica da água, para não haver influência no escoamento. A fim de aferir a massa específica do corante, foi utilizado uma balança de precisão

e um picnômetro de 10 ml. Colocou-se uma amostra de corante no picnômetro e mediu-se a massa com a balança. Com a massa e o volume da amostra, encontrou-se a massa específica do corante. Para ajustar a massa específica, colocou-se etanol na mistura até que fosse igual da água do túnel. Estes aparatos estão mostrados na Figura 12.

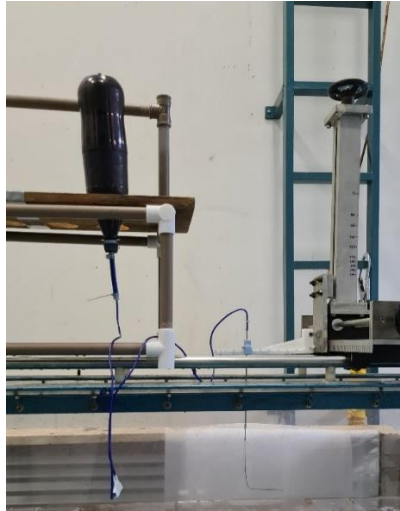
Figura 12 - Balança e picnômetro.



Fonte: o Autor, 2023.

Colocou-se o corante em uma garrafa PET com uma válvula de controle de saída, mostrado na Figura 13, pressurizou-se-a e posicionou-se-a no aparato do túnel.

Figura 13 - Posicionamento da garrafa no túnel.

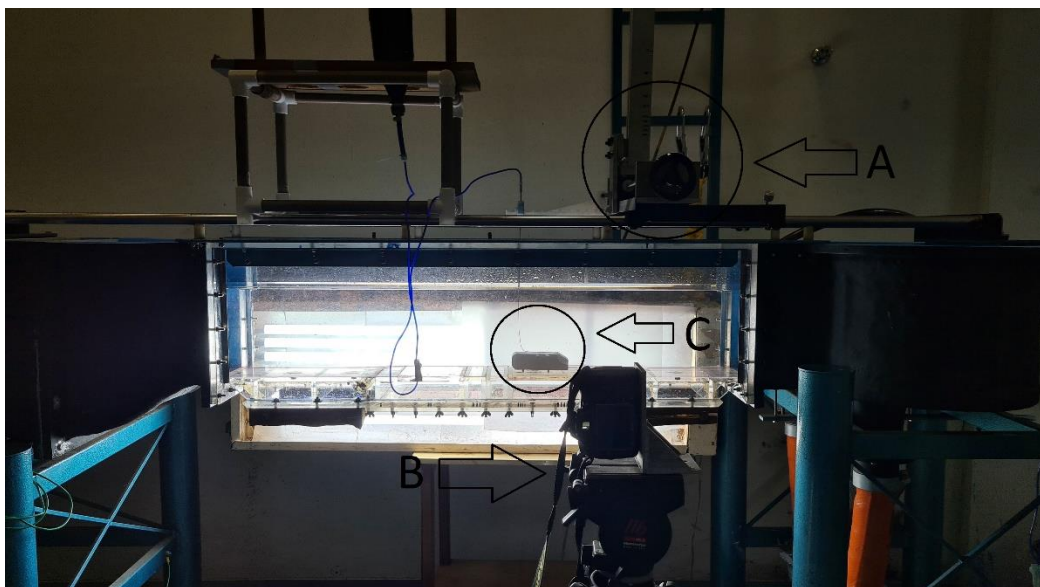


Fonte: o Autor, 2023.

Por fim, foi utilizado uma câmera fotográfica Nikon D300 para gerar as imagens. Foi ajustada para focar no corpo de prova e no escoamento à jusante, utilizando um tripé. Essa configuração está mostrada na Figura 14, onde temos os seguintes itens:

- A – Regulagem da posição do injetor na seção de teste;
- B – Tripé com câmera fotográfica Nikon D300;
- C – Corpo de prova com injetor.

Figura 14 - Configuração do aparato de ensaio.



Fonte: o Autor, 2023.

2.1 Ensaio

Os corpos de prova foram posicionados no túnel em um local onde o escoamento é totalmente desenvolvido a fim de evitar interferências no estudo do objeto.

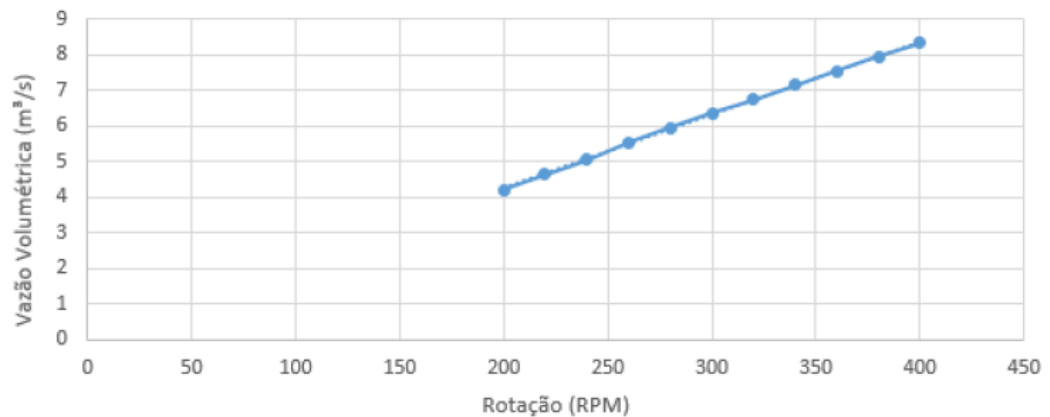
Para cada corpo com ângulo de inclinação diferente (15°, 25° e 30°) foram realizados testes com 3 diferentes números de Reynolds, conforme mostrado na Tabela 2. Silveira (2020) também concluiu que o maior Re para que o escoamento neste túnel seja laminar é de $2,51 \cdot 10^3$, a partir deste valor o escoamento começa a ficar turbulento e, para este estudo, prejudica a visualização. Por isso, os ensaios foram executados com números de Reynolds próximos e abaixo desse valor.

Tabela 2 - Número de Reynolds para cada vazão volumétrica.

Ensaio	Rotação (rpm)	Vazão Volumétrica (m ³ /s)	Velocidade (m/s)	Número de Reynolds
1	140	$8 \cdot 10^{-4}$	0,0133	1646
2	160	$9,5 \cdot 10^{-4}$	0,0158	1955
3	180	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,0183	2265

Fonte: o Autor, 2023.

Cada número de Reynolds corresponde a uma vazão volumétrica diferente, a qual foi controlada usando um inversor de frequência, que fornecia a rotação em RPM da bomba. Para determinar a vazão volumétrica e conseqüentemente a velocidade da água, foram utilizados dados obtidos por Silveira (2020), o qual traçou um gráfico de Rotação X Vazão Volumétrica (Figura 15) e determinou a equação que relaciona ambas variáveis. Usando a Equação 2 obtiveram-se as vazões volumétricas para cada rotação e usando a equação da continuidade encontrou-se a velocidade da água.

Figura 15 - Curva experimental Rotação x Vazão Volumétrica.

Fonte: Silveira, 2020.

A equação da reta obtida na curva foi:

$$Q = 0,021v - 0,022 \quad (2)$$

onde Q é a vazão volumétrica e v a velocidade em rotações por minuto.

Assim, usando a Equação 3 determinaram-se os números de Reynolds para cada vazão. Para isso foi necessário aferir a temperatura da água com um termômetro de bulbo no momento dos ensaios para obter a viscosidade cinemática do fluido naquele instante. A temperatura medida foi de 30° C para todos ensaios, o que representa uma viscosidade cinemática de $8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. O número de Reynolds é definida por:

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (3)$$

em que ν é a viscosidade cinemática do fluido, V é a velocidade do escoamento e L o comprimento característico, que neste caso é o comprimento da superfície superior do corpo de prova.

Para realizar o ensaio propriamente dito, primeiramente, fecharam-se as válvulas de saída da água do túnel e encheu-o com água, até que a área da seção preenchida fosse igual a utilizada para calcular a razão de bloqueio fornecido por Silveira (2020). Após isto, posicionou-se o injetor de corante próximo à inclinação traseira do corpo de prova e ajustou-o no centro da seção transversal da superfície superior. Ligou-se a bomba e ajustou-a para a rotação desejada. Para que o escoamento fique menos turbulento e todo o fluido do túnel fique na mesma velocidade, teve-se que aguardar um tempo para iniciar a injeção de corante. Assim, abriu-se a

válvula na saída da garrafa e realizaram-se as fotografias do escoamento gerado. Foram realizados estes passos para cada corpo em cada rotação diferente.

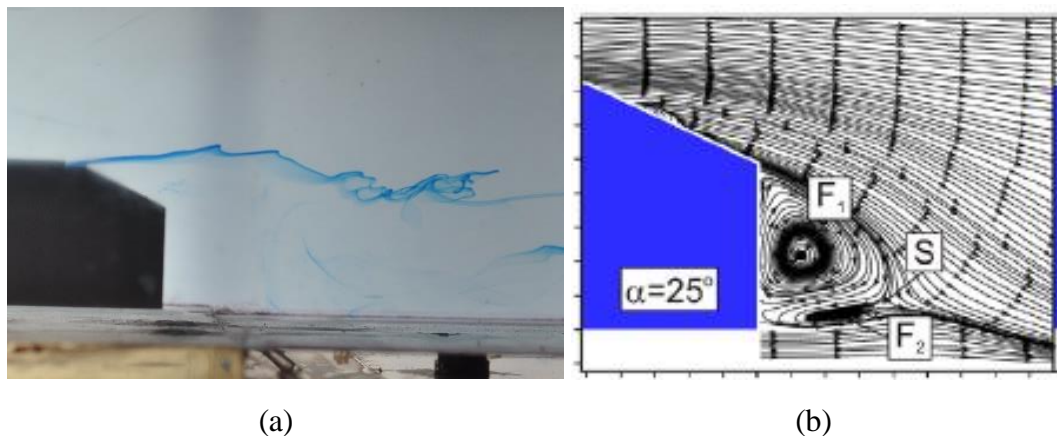
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comparou-se a morfologia dos vórtices gerados nos resultados com dois estudos anteriores. O primeiro foi Ahmed *et al.* (1984) e o segundo foi Tunay, Sahin e Ozbolat (2014). Com a complexidade das formações de vórtices, ambos constataram diferentes formações no escoamento.

3.1 Comparação com Tunay, Sahin e Ozbalt (2014)

Verifica-se na Figura 16 o resultado obtido para o Corpo 25 com número de Reynolds de 1955 comparado com o resultado obtido por Tunay, Sahin e Ozbolat (2014).

Figura 16 - Corpo 25 para Reynolds de 1955 comparado com Tunay, Sahin e Ozbolat (2014).

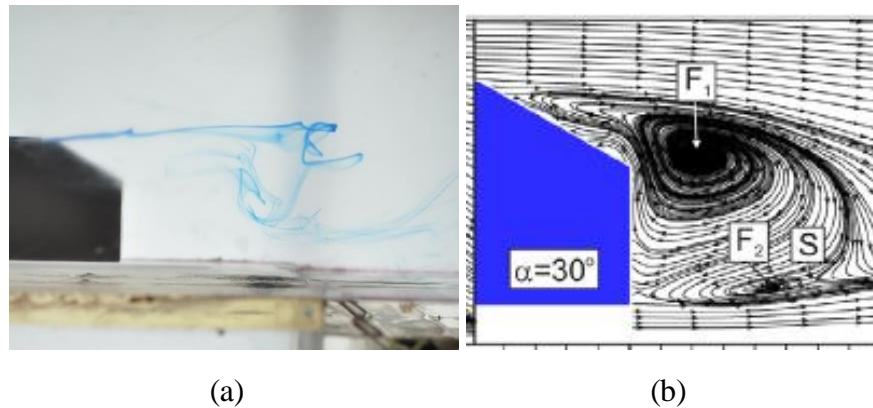


Fonte: o Autor, 2023.

Analisando a Figura 16 (a), observa-se que a ocorrência de vórtices próximos da traseira reta do corpo é mais acentuada. Segundo Tunay, Sahin e Ozbolat (2014), isso ocorre pois para este ângulo o escoamento é quase grudado na superfície inclinada, fazendo com que o escoamento não descole do corpo e quando atinge a superfície reta, tende a ficar neste local, conforme mostra a Figura 16 (b). Pela Figura 16 (a), observa-se que a linha de corrente não está grudado com a superfície. Isso pode ser explicado pelo nível de turbulência do túnel, que é alta. Além do próprio número de Reynolds utilizado para o experimento ser menor que o do autor citado. Mesmo assim, nota-se que há ocorrência de vórtices próximos da traseira.

Para o Corpo 30, com um número de Reynolds de 1955, foi obtido o seguinte resultado, mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Corpo 30 com Reynolds de 1955 comparado com Tunay, Sahin e Ozbolat (2014).



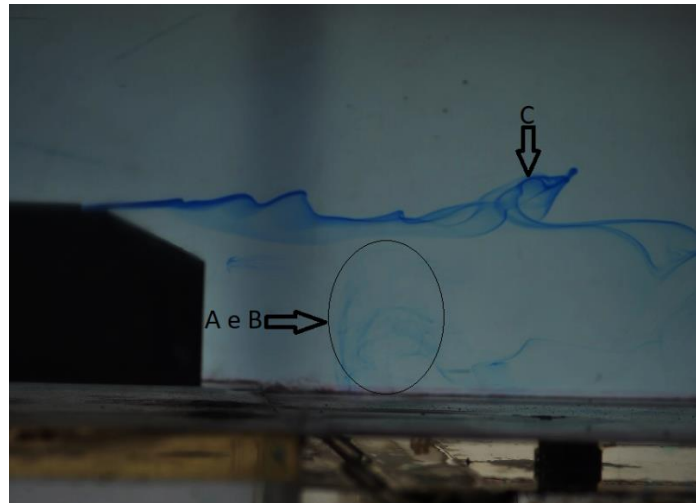
Fonte: o Autor, 2023.

Para este ângulo, observa-se que os vórtices foram deslocados para mais à frente na esteira, não ficando tão próximos do corpo. Também segundo Tunay, Sahin e Ozbolat (2014), neste caso o escoamento separa após uma pequena distancia da borda de entrada da inclinação. Nota-se que os vórtices ficam maiores e estão um pouco mais a cima em relação ao ângulo de 25° . Isso significa que o escoamento acima da superfície se torna completamente descolado e o efeito do escoamento vindo de cima do Corpo 30 começa a ser dominante na esteira invés dos vórtices de contra rotação vindos da lateral da superfície (TUNAY; SAHIN; OZBOLAT, 2014).

3.2 Análise da morfologia do escoamento obtida por Ahmed

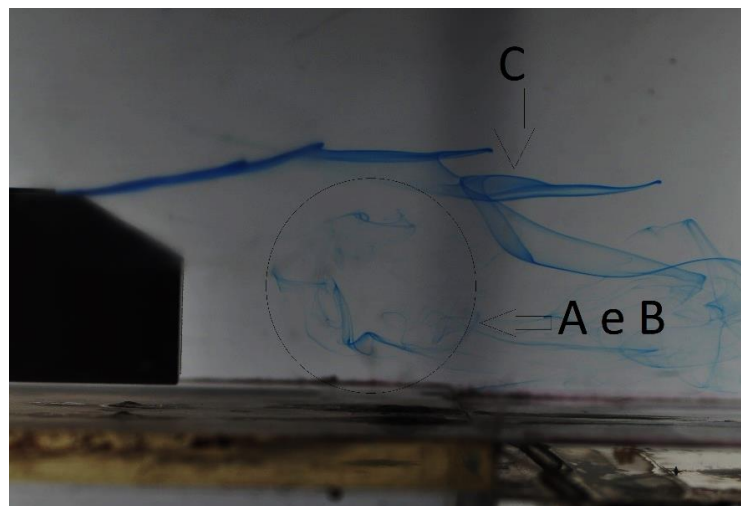
Nas Figuras 18 e 19 são indicados por setas cada vórtice assim como encontrado por Ahmed *et al.* (1984) no corpo de 25° e 30° respectivamente. Nota-se que ao comparar os vórtices C gerados pelo Corpo 25 com Corpo 30, é possível certificar que neste último eles são mais intensos, corroborando com o fato de que neste ângulo o arrasto de pressão na traseira é maior. Nota-se também que o vórtice A, também é influenciado pelo vórtice C, sendo que ambos vórtices são maiores para o corpo de 30° , assim como descrito por Ahmed *et al.* (1984).

Figura 17 - Vórtices para corpo de 25° com Reynolds de 1955 indicando cada vórtice gerado.



Fonte: o Autor, 2023.

Figura 18 - Vórtices para corpo de 30° com Reynolds de 1955 indicando cada vórtice gerado.



Fonte: o Autor, 2023.

3.3 Análises qualitativas gerais do escoamento

3.3.3 Resultados obtidos para Corpo 15 (15°)

As Figuras 19 e 20 mostram os resultados para o Corpo 15, para o ensaio 1 e 2, respectivamente. Os ensaios para este corpo foram realizados apenas para com intuito de analisar o arrasto gerado nesta região, por isso foram feitos apenas os ensaios 1 e 2, já que são menos turbulentos, facilitando a comparação com os outros corpos.

Figura 19 - Resultado obtido para Corpo 15 com Reynolds de 1646.



Fonte: o Autor, 2023.

Figura 20 - Resultado obtido para Corpo 15 com Reynolds de 1955.



Fonte: o Autor, 2023.

3.3.1 Resultados obtidos para Corpo 25 (25°)

As Figuras 21, 22 e 23 são os resultados para o Corpo 25, nos ensaios 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 21 - Resultado obtido para o Corpo 25 com Reynolds de 1646.



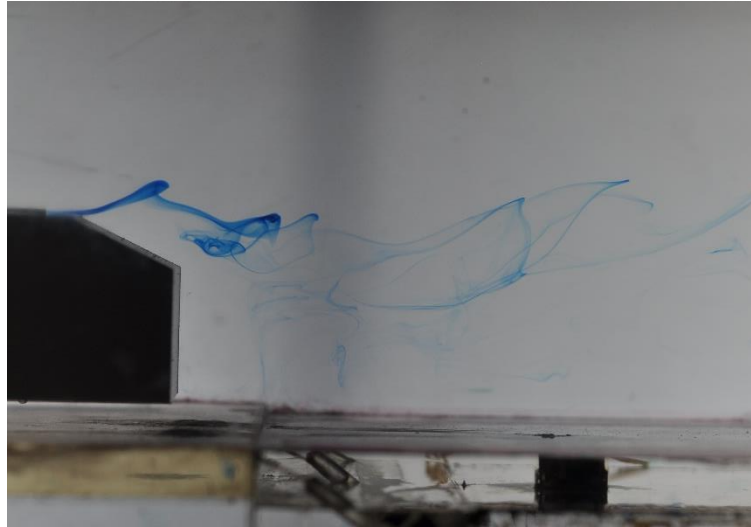
Fonte: o Autor, 2023.

Figura 22 - Resultado obtido para o Corpo 25 com Reynolds de 1955.



Fonte: o Autor, 2023.

Figura 23 - Resultado obtido para Corpo 25 com Reynolds de 2265.



Fonte: o Autor, 2023.

Nota-se que para Reynolds menores, os vórtices possuem uma menor intensidade e são mais suaves. Conforme já citado, percebe-se na Figura 22, para o ensaio 2, as características do escoamento são mais próximas ao encontrado por Tunay, Sahin e Ozbolat (2014). Isso se deve ao fato que para esse túnel, para Reynolds próximos de $2,51 \cdot 10^3$ o escoamento passa a ser turbulento, influenciando na observação dos vórtices. Isso é perceptível na Figura 23, onde os vórtices começam a se formar bem próximos da base vertical da traseira do corpo e passam a ser mais aleatórios, já que o Reynolds para esse ensaio é de 2265.

3.3.2 Resultados obtidos para Corpo 30 (30°)

Para o Corpo 30, os resultados dos ensaios 1, 2 e 3 estão nas Figuras 24, 25 e 26, respectivamente.

Figura 24 - Resultado obtido para Corpo 30 com Reynolds de 1646.



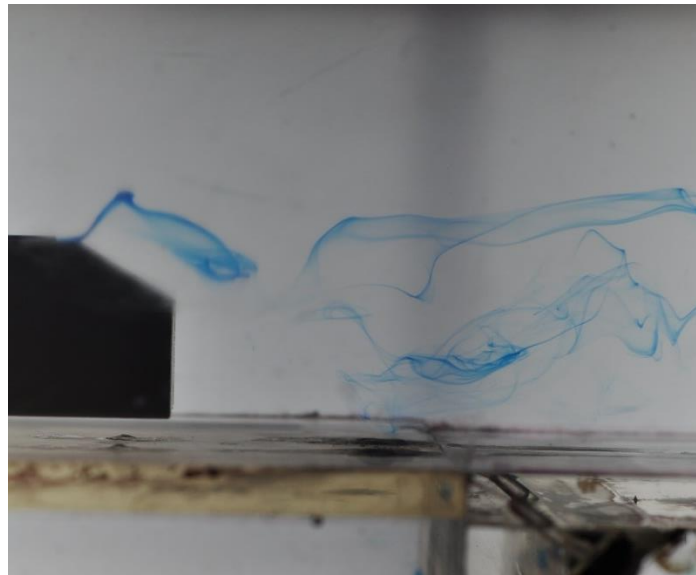
Fonte: o Autor, 2023.

Figura 25 - Resultado obtido para o Corpo 30 com Reynolds de 1955.



Fonte: o Autor, 2023.

Figura 26 - Resultado obtido para Corpo 30 com Reynolds de 2265.



Fonte: o Autor, 2023.

Percebe-se que o mesmo fenômeno ocorre para este corpo. Para Reynolds menores, os vórtices são menos intensos, como já esperado. Nota-se na Figura 25, para o ensaio 2, que os vórtices podem ser melhores observados, sendo mais semelhantes ao encontrado em outras literaturas, como Ahmed *et al.* (1984) e Tunay, Sahin e Ozbolat (2014). Já para o ensaio 3 (Figura 26), o escoamento já está muito perturbado devido ao alto número de Reynolds.

3.4 Análise qualitativa do arrasto

Para a análise qualitativa do arrasto de pressão gerado pela inclinação traseira foi utilizado o ensaio 2. Foram analisadas as Figuras 20, 22 e 25. Como já explicado acima, é notório que para o Corpo 30 os vórtices são mais frequentes e a esteira formada é mais intensa. Isso demonstra que para esse ângulo há uma região de baixa pressão maior na traseira do corpo, conseqüentemente o arrasto de pressão será maior. Da mesma forma, no Corpo 25 os vórtices não são tão intensos quanto no de 30°, mostrando que o arrasto é menor para a inclinação de 25°.

No Corpo 15, as formações são bem menos intensas, comprovando que o arrasto de pressão é bem menor que nos outros dois casos.

Ao analisar o mesmo corpo para diferentes números de Reynolds, pode-se afirmar que o arrasto aumenta conforme aumenta a velocidade do escoamento, pois os vórtices também ficam mais frequentes e intensos.

4 CONCLUSÃO

Com base na análise experimental do escoamento ao redor do corpo de Ahmed, comparando os resultados obtidos com os de outros autores, conclui-se que os resultados foram considerados satisfatórios, considerando as condições do experimento. Os vórtices observados no ensaio apresentaram uma macroestrutura próxima daquela encontrada na literatura, o que indica uma boa concordância com os estudos anteriores.

Ao investigar o arrasto gerado pelo escoamento em três diferentes ângulos de inclinação traseira, verificou-se uma maior formação de esteira para o ângulo de 30° , indicando um maior arrasto de pressão para este ângulo. Essa observação está em conformidade com a literatura, reforçando a importância da formação de uma esteira para o aumento do arrasto.

Esses resultados são relevantes para o estudo do comportamento do escoamento ao redor do corpo de Ahmed, contribuindo para uma melhor compreensão dos fenômenos fluidodinâmicos envolvidos, já que não há muitos estudos para números de Reynolds da ordem de grandeza deste trabalho para este corpo. Além disso, os achados do experimento corroboram qualitativamente com as informações encontradas na literatura, fortalecendo a confiabilidade dos resultados obtidos.

Esse trabalho fornece uma base para futuros estudos e aplicações relacionadas ao escoamento ao redor do corpo de Ahmed, destacando a importância de considerar diferentes ângulos de inclinação para compreender o comportamento do arrasto. Essas informações podem ser aplicadas em diversas áreas, como engenharia de veículos, aerodinâmica e otimização de projetos para redução do arrasto.

REFERÊNCIAS

- ACRONSOFT. Impressora 3D Makerbot Replicator, 2023. Disponível em: <https://www.acronsoft.com.br/produto/impressora-3d-makerbot-replicator>. Acesso em: 28 mar. 2023.
- AHMED, Syed R.; RAMM, G.; FALTIN, Gunter. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. **SAE transactions**, p. 473-503, 1984.
- FOX, Robert W. et al. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8ª ed. Grupo Editorial Nacional, 2010.
- GUILMINEAU, Emmanuel. Computational study of flow around a simplified car body. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, v. 96, n. 6-7, p. 1207-1217, 2008.
- KORKISCHKO, Ivan; MENEGHINI, Julio Romano. Experimental investigation and numerical simulation of the flow around an automotive model: Ahmed body. In: **Proceedings of COBEM**. 2007.
- LIENHART, H.; STROOTS, C.; BECKER, S. Flow and turbulence structures in the wake of a simplified car model (ahmed modell). In: **New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics III: Contributions to the 12th STAB/DGLR Symposium Stuttgart, Germany 2000**. Springer Berlin Heidelberg, 2002. p. 323-330.
- PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica básica**. 4ª ed. São Carlos : EESC-USP, 2006.
- SILVEIRA, Carlos Henrique da. **Visualização de escoamento ao redor de corpo de Ahmed em um túnel hidrodinâmico horizontal** (Projeto de Iniciação Científica). Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira: 2020.
- STRÖHER, Gylles Ricardo. **Introdução à Modelagem do Escoamento Turbulento**. Universidade Estadual de Londrina, 22 dez. 2020. Disponível em: http://www.uel.br/pos/pgmac/webinarios_conteudo/W6_Gylles/apresentacao.pdf. Acesso em: 28 mar. 2023.
- TUNAY, Tural; SAHIN, Besir; OZBOLAT, Veli. Effects of rear slant angles on the flow characteristics of Ahmed body. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 57, p. 165-176, 2014.
- VIEIRA, Edson Del Rio; MANSUR, Sérgio Said. Visualização experimental de escoamentos. **Turbulência IV–Coleção Cadernos de Turbulência (SV Möller & JH Silvestrini, editores): Associação Brasileira de Ciências e Engenharia Mecânicas-ABCM, Porto Alegre**, v. 4, p. 33-71, 2004.