

JOÃO PAULO PERES MUNDIM

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO AO
REDOR DE CILINDROS DE BASE QUADRADA COM
DIFERENTES RAZÕES DE ASPECTO MONTADOS
SOBRE UMA SUPERFÍCIE**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2019

JOÃO PAULO PERES MUNDIM

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO AO REDOR DE
CILINDROS DE BASE QUADRADA COM DIFERENTES RAZÕES DE
ASPECTO MONTADOS SOBRE UMA SUPERFÍCIE**

Projeto de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de BACHAREL em
ENGENHARIA AERONÁUTICA.

Tutor: Prof. Dr. Odenir de Almeida

UBERLÂNDIA – MG

2019

JOÃO PAULO PERES MUNDIM

**ESTUDO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO AO REDOR DE
CILINDROS DE BASE QUADRADA COM DIFERENTES RAZÕES DE
ASPECTO MONTADOS SOBRE UMA SUPERFÍCIE**

Projeto de conclusão de curso APROVADO pelo
Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia
Aeronáutica da Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr Odenir de Almeida

Prof. Dr Francisco José de Souza

Prof. Dr Gregório Sandro Vieira

Uberlândia, Dezembro 2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pelo dom da vida, e pela oportunidade de lutar pelos meus sonhos e objetivos.

A minha família, que sempre me apoiou e esteve comigo em todos os momentos, que fez do meu sonho o sonho deles, essa vitória é nossa.

Aos meus amigos, por toda ajuda, todo carinho e entendimento que me auxiliaram a chegar até aqui, vocês são incríveis.

Agradeço a Universidade Federal de Uberlândia (UFU), pela instituição referência que se tornou no Brasil, pela qualidade e comprometimento para com o estudante, em especial a Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) pela formação acadêmica de alto nível que me foi oferecida, permitindo assim concluir minha graduação ciente de que recebi os melhores ensinamentos.

Finalmente, sou extremamente grato ao Prof. Dr. Odenir de Almeida e ao Centro de Pesquisa em Aerodinâmica Experimental (CPAERO), pela oportunidade de trabalhar em um ambiente acolhedor, profissional e altamente moderno, proporcionando um estudo de muita qualidade.

Obrigado Prof. Dr. Odenir de Almeida por toda paciência, confiança, ajuda e conhecimento transmitido durante essa trajetória. Agradeço também ao técnico Reinaldo Tomé Paulino pelo excelente trabalho que desempenha no CPAERO, produzindo entre outras atividades, corpos de prova de alta qualidade.

A todos que de alguma forma contribuiu para essa trajetória, minha eterna gratidão.

Mundim, J. P. **Estudo experimental do escoamento ao redor de cilindros de base quadrada com diferentes razões de aspecto montados sobre uma superfície.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o estudo experimental via túnel de vento, do escoamento ao redor de cilindros de base quadrada com diferentes razões de aspecto (AR), variando AR de 1 a 4, aplicando assim metodologias para entender alguns aspectos aerodinâmicos do problema. Inicialmente características de arrasto foram determinadas e comparados entre as quatro razões de aspecto estudadas, obtendo uma tendência quadrática de crescimento da força de arrasto com o aumento da velocidade, e tendência de aumento da força de arrasto com o aumento da razão de aspecto, característica já esperada. O coeficiente de arrasto também aumentou de um corpo para o outro, mas praticamente não variou dentro da faixa de Reynolds avaliada, 5.91×10^4 a 13.01×10^4 . Posteriormente, aferiu-se o perfil de velocidade, utilizando anemômetro a fio quente, com $Re = 9,46 \times 10^4$, em uma região de interesse na parte posterior do corpo e notou-se que o aumento da razão de aspecto modificou a característica do perfil de velocidade, mudança essa observada na transição de AR 2 para AR3, sugerindo que existe uma razão de aspecto crítica, entre 2 e 3, que difere o comportamento do escoamento na região analisada. Tomadas de pressão foram realizadas nas faces dos cilindros de base quadrada, mantendo $Re = 9,46 \times 10^4$, onde mostram a interferência da região de base, quinas laterais e superfície livre. Finalmente técnicas de visualização experimental foram realizadas, evidenciando características pressupostas, e aumentando a fidelidade das análises anteriores e conclusões obtidas. Estudos futuros focados na região posterior do corpo, além de uma comparação numérica computacional, são recomendados.¹

Palavras-chave: Aerodinâmica Externa; Cilindros de base quadrada; Túnel de vento; Arrasto; Anemômetro a fio quente; Aferição de pressão; Visualização experimental.

Mundim, J. P. **Estudo experimental do escoamento ao redor de cilindros de base quadrada com diferentes razões de aspecto montados sobre uma superfície.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

The present work has as objective the experimental study using the wind tunnel, flow around the square base cylinders with different aspect ratios (AR), varies from AR to 1 to 4, applying methods to understand the aerodynamic aspects of the problem. Initially, drag characteristics were shown and compared between four aspect ratios studied, obtaining a quadratic trend of increasing drag force with increased speed, and increased drag force with increased expected aspect ratio. The drag coefficient also increased from one body to another, but practically didn't vary within the available Reynolds range, 5.91×10^4 a 13.01×10^4 . Later, velocity profile was evaluated, by using hot wire anemometer, with $Re = 9,46 \times 10^4$, in a region of interest in the back of the body and it was noted that the increased aspect ratio changed the speed profile characteristic, change observed in the transition from AR 2 to AR3, suggesting that there is a critical aspect ratio, between 2 and 3, wich differs the flow behavior in the analyzed region. Pressure distribution was performed on the square base cylinder faces, maintaining $Re = 9,46 \times 10^4$, where they showed interference from the base region, lateral corners and free-end surface. Finally, experimental visualization techniques were performed, evidencing presupposed characteristics and increasing the fidelity of previous analyzes and conclusions. Future studies focusing on the posterior region of the body, in addition to a computational numerical comparison, are recommended.²

Key-words : External aerodynamics; Square base cylinders; Wind tunnel; Drag; Hot wire anemometer; Pressure measurement; Experimental visualization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema ilustrativo de uma plataforma de extração de petróleo.....	7
Figura 2 – Turbinas de geração eólica offshore	8
Figura 3 – Pontes Tacoma Narrows – Washington	8
Figura 4 – Esquema de um escoamento direcionado a um cilindro de base retangular finito fixado na base de um túnel de vento.....	10
Figura 5 – Escoamento passando por um cilindro circular, evidenciando as esteiras de vórtice	11
Figura 6 – Escoamento ao redor de um corpo cilíndrico	12
Figura 7 – Visualização do escoamento passando por um cilindro de base retangular, evidenciando suas principais características assumidas	13
Figura 8 – Esquema ilustrativo da razão de bloqueio.....	15
Figura 9 – Esquema ilustrativo das dimensões avaliadas na razão de aspecto	16
Figura 10 – Esquema ilustrativo das dimensões avaliadas na razão de forma	16
Figura 11 – Esquema ilustrativo do ângulo de incidência	17
Figura 12 – Ilustração em escala dos corpos de prova	21
Figura 13 – Corpos de prova finalizados	22
Figura 14 – Túnel de vento TV60	23
Figura 15 – Instrumentos auxiliares, da esquerda para a direita respectivamente, tubo de Pitot, Kimo e Termômetro digital.....	23
Figura 16 – Balança aerodinâmica AA-TVAB1.....	24
Figura 17 – Módulo de pressão AA-TVCR2	25
Figura 18 – Ilustração esquema de montagem para tomada de pressão	25
Figura 19 – Esquema típico de aquisição de um anemômetro CTA Dantec	26
Figura 20 – Montagem experimental para aquisição de dados	27
Figura 21 – Sensor utilizado no procedimento experimental.....	27

Figura 22 – Gerador de fumaça AA-TVEG.....	28
Figura 23 – Ilustração procedimento experimental de medida de arrasto	29
Figura 24 – Situação real experimental para medição de arrasto	30
Figura 25 – Ilustração procedimento experimental perfil de velocidade	31
Figura 26 – Situação experimental perfil de velocidade	33
Figura 27 – Esquema cíclico de aquisição de velocidade relativo a cada posição no software do anemômetro	33
Figura 28 – Referencial adotado	34
Figura 29 – Ilustração sentido das tomadas de pressão	34
Figura 30 – Ilustração procedimento experimental tomada de pressão	35
Figura 31 – Situação experimental coleta de dados da pressão dinâmica.....	36
Figura 32 – Corpo de prova posicionado para medição de pressão na face	37
Figura 33 – Ilustração procedimento de visualização com gerador de fumaça	40
Figura 34 – Ilustração procedimento de visualização China Clay	40
Figura 35 – Comparação Força de arrasto x Velocidade – ARs	42
Figura 36 – Comparação Coeficiente de arrasto x Reynolds – ARs	43
Figura 37 – Referência de estudo experimental.....	44
Figura 38 – Comparação Velocidade x Posição (eixo x) – ARs	45
Figura 39 – Exemplo de distribuição de tomadas de pressão face frontal AR1	47
Figura 40 – Comparação distribuição horizontal, face frontal – ARs.....	48
Figura 41 – Comparação distribuição vertical, face frontal – ARs	49
Figura 42 – Exemplo de distribuição de tomadas de pressão AR1	50
Figura 43 – Comparação distribuição horizontal, face lateral direita – ARs	50
Figura 44 – Comparação distribuição vertical, face lateral direita – ARs	51
Figura 45 – Comparação distribuição horizontal, face traseira – ARs.....	52
Figura 46 – Comparação distribuição vertical, face traseira – ARs	53
Figura 47 – Escoamento a 16m/s, razão de aspecto 1	56
Figura 48 – Escoamento a 16m/s, razão de aspecto 2	56
Figura 49 – Escoamento a 16m/s, razão de aspecto 3	57
Figura 50 – Escoamento a 16m/s, razão de aspecto 4	57
Figura 51 – Escoamento a 16m/s, Posição diagonal, razão de aspecto 1	58

Figura 52 – Escoamento a 16m/s, Posição lateral, razão de aspecto 1	59
Figura 53 – Escoamento a 16m/s, Posição traseira, razão de aspecto 1.....	59
Figura 54 – Escoamento a 16m/s, Posição superior, razão de aspecto 1	60
Figura 55 – Escoamento a 16m/s, Posição diagonal, razão de aspecto 2	61
Figura 56 – Escoamento a 16m/s, Posição lateral, razão de aspecto 2	61
Figura 57 – Escoamento a 16m/s, Posição traseira, razão de aspecto 2.....	62
Figura 58 – Escoamento a 16m/s, Posição superior, razão de aspecto 2.....	62
Figura 59 – Escoamento a 16m/s, Posição diagonal, razão de aspecto 3	63
Figura 60 – Escoamento a 16m/s, Posição lateral, razão de aspecto 3.....	63
Figura 61 – Escoamento a 16m/s, Posição traseira, razão de aspecto 3.....	64
Figura 62 – Escoamento a 16m/s, Posição superior, razão de aspecto 3.....	64
Figura 63 – Escoamento a 16m/s, Posição diagonal, razão de aspecto 4	65
Figura 64 – Escoamento a 16m/s, lateral, razão de aspecto 4.....	65
Figura 65 – Escoamento a 16m/s, Posição traseira, razão de aspecto 4.....	66
Figura 66 – Escoamento a 16m/s, Posição superior, razão de aspecto 4.....	66
Figura 67 – Vórtice ferradura e região de recirculação	67
Figura 68 – Principais características observadas	68
Figura 69 – Principais características observadas – Vista traseira	69
Figura 70 – Principais características observadas – Vista Superior.....	70
Figura 71 – Corpo de prova AR1 – CAD legendado	75
Figura 72 – Corpo de prova AR2 – CAD legendado	76
Figura 73 – Corpo de prova AR3 – CAD legendado	77
Figura 74 – Corpo de prova AR4 – CAD legendado	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Definições geométricas dos corpos de provas.	21
Tabela 2 – Definições gerais, tomadas de pressão.....	35

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	6
1.1. MOTIVAÇÃO E DESAFIOS DA COMPREENSÃO DO PROBLEMA INICIAL	9
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. INTRODUÇÃO	11
2.2. PARÂMETROS GOVERNANTES DO ESCOAMENTO	14
2.3. PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NO ESCOAMENTO	15
2.4. ESTUDOS EXPERIMENTAIS	18
CAPÍTULO III - METODOLOGIA	20
3.1. CORPOS DE PROVA	20
3.1.1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	20
3.1.2. FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	21
3.2. APARATO EXPERIMENTAL	22
3.2.1. TÚNEL DE VENTO TV60	22
3.2.2. BALANÇA AERODINÂMICA AA-TVAB1	24
3.2.3. MÓDULO DE PRESSÃO	24
3.2.4. ANEMÔMETRO DE FIO QUENTE	26
3.2.5. GERADOR DE FUMAÇA AA-TVEG	28
3.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	29
3.3.1. MEDIÇÕES DE ARRASTO E SUAS CARACTERÍSTICAS	29
3.3.2. PERFIS DE VELOCIDADE E SUAS CARACTERÍSTICAS	31
3.3.3. DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NAS FACES	34
3.3.4. PROCEDIMENTO DE VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO	38
3.3.4.1. MÉTODO COM GERADOR DE FUMAÇA	38
3.3.4.2. MÉTODO CHINA CLAY	39

CAPÍTULO IV - RESULTADOS	20
4.1. MEDIÇÕES DE ARRASTO E SUAS CARACTERÍSTICAS	41
4.1.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS CORPOS DE PROVA	41
4.2. PERFIS DE VELOCIDADE E SUAS CARACTERÍSTICAS	45
4.2.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS CORPOS DE PROVA	45
4.3. DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NAS FACES	47
4.3.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS CORPOS DE PROVA	47
4.4. VISUALIZAÇÃO EXPERIMENTAL	55
4.4.1 VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO – MÉTODO COM GERADOR DE FUMAÇA	56
4.4.2. VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO – MÉTODO CHINA CLAY	58
4.4.2.1. RAZÃO DE ASPECTO 1	58
4.4.2.2. RAZÃO DE ASPECTO 2	61
4.4.2.3. RAZÃO DE ASPECTO 3	63
4.4.2.4. RAZÃO DE ASPECTO 4	65
4.4.2.5. PRINCIPAIS OBSERVAÇÕES	67
CAPÍTULO V - CONCLUSÃO	71
REFERÊNCIAS	73
APÊNDICE 1	75

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Interações entre fluidos e estruturas sempre estiveram presentes na natureza, e com a ampliação do conhecimento nas áreas de mecânica dos fluidos, estudiosos começaram a se interessar por tais fenômenos e a tentar desenvolver formulações matemáticas para representá-los.

Ao se tratar de escoamentos passando por corpos sólidos, em 1878, Vincenc Strouhal desenvolveu um importante estudo experimental, no qual analisou a formação e tendência periódica do surgimento de vórtices de um escoamento passante por um corpo sólido, seu estudo resultou no importante número adimensional denominado número de Strouhal.

Posteriormente, focando agora no regime do escoamento, em 1883, Osborne Reynolds investigou experimentalmente as mudanças de escoamento de regime laminar para turbulento, bem como variáveis que possibilitam determinar em qual regime o escoamento se encontra, definindo assim o número de Reynolds, parâmetro extremamente importante e significativo para a mecânica dos fluidos em geral.

Em 1911, Theodore von Kármán enquanto estudava o fluxo de água em torno de um cilindro, indagado do porque o fluxo se dividia em duas séries de vórtices alternados, desenvolveu seu estudo de estabilidade de vórtices e percebeu que aquela característica assumida pelo escoamento era a única estável, dando origem assim ao fenômeno conhecido como esteira de von Kármán.

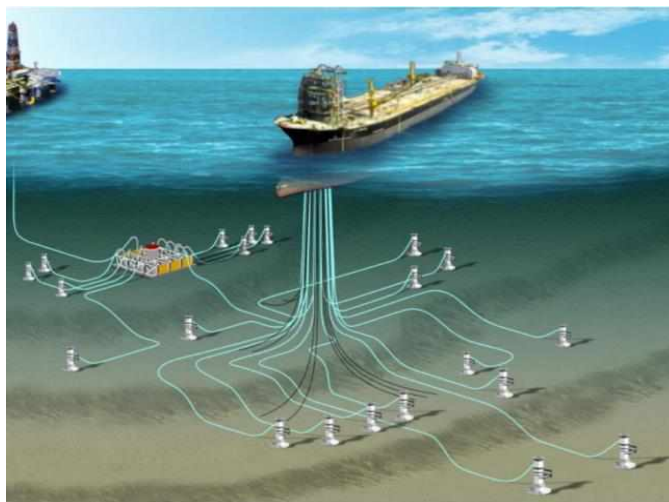
Pode-se dizer então que a aerodinâmica surgiu de forma empírica, se baseando no visual e experimental, se sustentando nos desafios de tentar explicar aquilo que ainda não tinha embasamento teórico.

Com o decorrer dos anos, a teoria aerodinâmica se desenvolveu e se desenvolve constantemente, a fim de cada vez mais conseguirmos entender e explicar de forma consistente a interação fluido-estrutura.

Quando se fala em aerodinâmica inicialmente se remete a corpos esbeltos, focados em desempenho, eficiência e mínimo arrasto possível, mas existe uma infinidade de objetos e estruturas utilizadas na engenharia, que não possuem função de projeto com ênfase nas características citadas, como tubos utilizados na extração de petróleo, plataformas de geração eólica offshore, torres de resfriamento, haste sustentadora de pontes, postes de linha de transmissão, edifícios, componentes eletrônicos em placas de circuitos, entre outros.

Compreender a interação do fluido com tais estruturas denominadas corpos rombudos se torna interessante, e pode auxiliar na solução de problemas de engenharia diversos, como distribuição de pressão, força de arrasto, força de sustentação, visualização do escoamento, estudo da camada limite, dissipação térmica, vibração, ruído, entre outras coisas, visando a segurança operacional das estruturas e alavancando uma série de estudos científicos ao longo dos anos.

Figura 1 – Esquema ilustrativo de uma plataforma de extração de petróleo



Fonte: <https://www.jornalpelicano.com.br/2013/12/plataformas-e-a-exploracao-de-petroleo/>.

Acesso em 6 de agosto, 2019

Figura 2 – Turbinas de geração eólica offshore



Fonte: Getty Images

Figura 3 – Pontes Tacoma Narrows – Washington



Fonte: <https://megaengenharia.blogspot.com/2016/09/ponte-tacoma-narrows-washington.html>. Acesso em 6 de agosto, 2019

A fim de se estudar interações e fenômenos do escoamento passando pelo corpo, faz-se interessante optar por superfícies rombudas de geometrias mais simples, como cilindros de base circular e cilindros de base quadrada dado a complexidade de entendimento de tais fenômenos.

1.1. MOTIVAÇÃO E DESAFIOS DA COMPREENSÃO DO PROBLEMA INICIAL

Desde os primórdios do estudo em mecânica dos fluidos, desenvolver teorias relacionadas à interação fluido-estrutura, sempre foi uma das maiores dificuldades encontradas por estudiosos, devido a sua alta complexidade em entender e modelar todos os fenômenos que atuam e alteram as características do escoamento.

Ao longo do tempo, leis fundamentais foram bem definidas, acarretando assim em teorias sólidas gerais, contudo, em diversos casos a teoria só é aplicada a situações ideais, tornando assim inviável um estudo analítico em uma infinidade de aplicações, se tratando de condições iniciais específicas e geometrias arbitrárias.

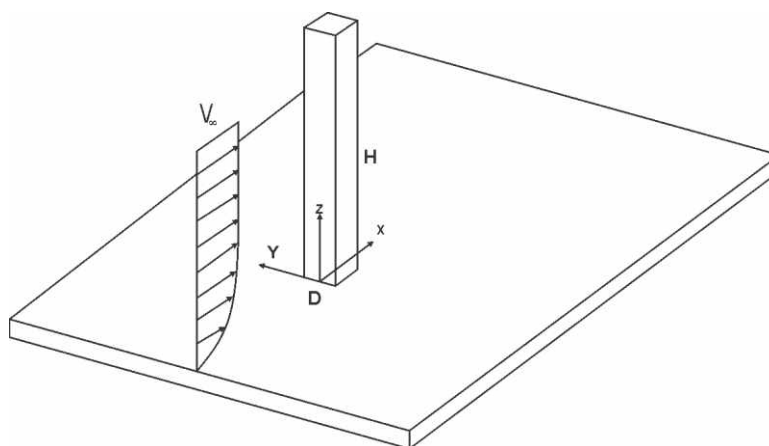
A fim de auxiliar e permitir avanços no entendimento a respeito de problemas reais, experimentos utilizando tuneis de vento/água são amplamente utilizados, permitindo a caracterização de problemas com geometrias diversas, tornando o problema real um pouco mais palpável, fundamentando-se nas teorias gerais da mecânica dos fluidos.

Com o avanço da tecnologia, softwares que permitem simulações computacionais numéricas são cada vez mais utilizados, tornando-se mais uma ferramenta que visa entender o comportamento do escoamento e suas diversas aplicações, podendo ser utilizado também em paralelo com o experimental, aumentando a fidelidade do estudo, ressaltando que ambas as abordagens (Experimentais/Numéricas) possuem erros associados que buscam ser minimizados, tornando-se uma opção viável muitas vezes, vide a falta de meios analíticos concretos.

Dentre as possibilidades apresentadas, optou-se pelo estudo experimental do escoamento ao redor de cilindros de base quadrada finitos, devido ao desafio de adentrar em uma área com poucas informações divulgadas (em comparação com cilindros circulares) e grande possibilidade de aprendizado e desenvolvimento de trabalhos científicos. A Figura 4 exemplifica uma situação experimental similar a qual o estudo pretende realizar.

Optou-se pelo estudo experimental do problema, aliado à excelência do laboratório de trabalho, possibilitando inúmeras abordagens e obtenções de resultados.

Figura 4 – Esquema de um escoamento direcionado a um cilindro de base retangular finito fixado na base de um túnel de vento



Fonte: Autor próprio

Dentre as possíveis abordagens de estudo aplicadas a cilindros de base retangular, optou-se pelo estudo experimental, adotando condições de contorno tridimensionais, variando a razão de aspecto, com ênfase nos seguintes pontos:

1. Definir características de arrasto do modelo;
2. Perfis de velocidade na região posterior do modelo;
3. Tomadas de pressão nas faces do modelo;
4. Visualização do escoamento passante pelo modelo.

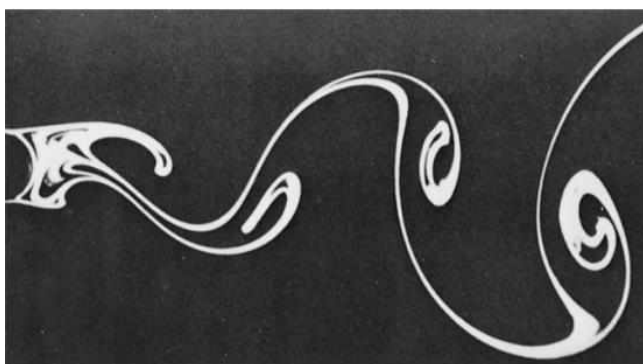
CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

A maioria dos estudos encontrados trata-se de escoamentos de ar passando por cilindros de base circular, com condições de contorno bidimensionais e tridimensionais, tendo assim uma base de resultados e observações de padrões de escoamento principalmente adquirida experimentalmente.

Figura 5 – Escoamento passando por um cilindro circular, evidenciando as esteiras de vórtice



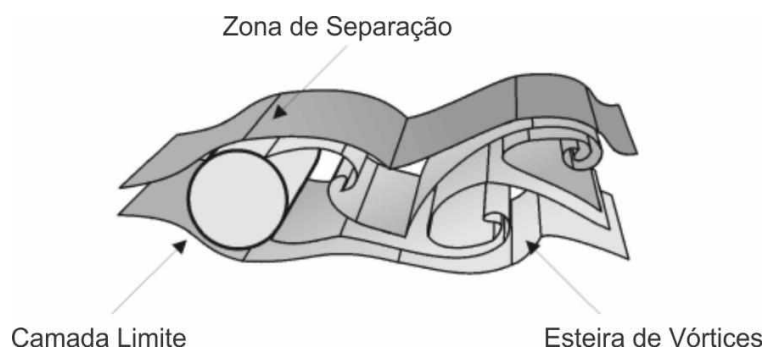
Fonte: Potter e Wiggert, 2004

Dentre as características dominantes do problema proposto, está compreender os fenômenos da dinâmica do fluido em relação ao corpo, definido pela interação coincidente de três regiões muito importantes: a camada limite, a região de separação

de vórtice e as esteiras de vórtice, que possuem características complexas ao serem avaliadas simultaneamente.

Em Almeida [2], o autor explica de forma clara e objetiva definindo: “ Em linhas gerais, um escoamento deste tipo é caracterizado pela presença de uma região de recirculação e pela existência de uma esteira de vórtices ou turbilhões, que se formam a jusante do obstáculo. O movimento relativo entre o fluido e o sólido, proporciona o aparecimento de perfis inflexionais de velocidade, gerando fenômenos altamente complicados decorrentes da interação simultânea entre três regiões de forte cisalhamento: a camada limite, a zona de separação e a esteira turbilhonar”. A Figura 6 mostra o escoamento ao redor de um corpo cilíndrico apresentado por Almeida.

Figura 6 – Escoamento ao redor de um corpo cilíndrico



Fonte: Almeida, 2001

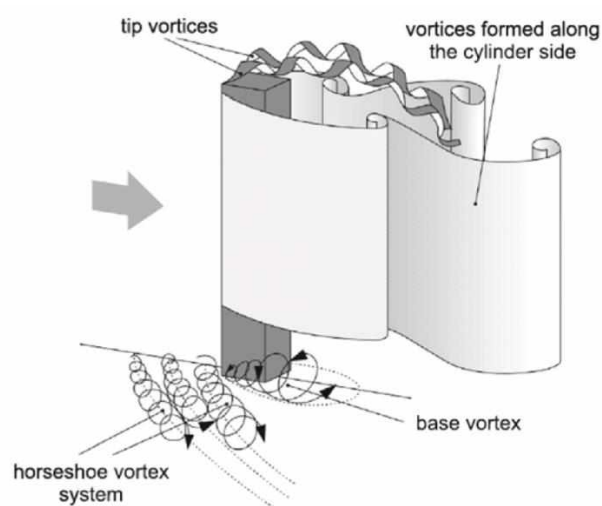
Associando para o caso de cilindros de base quadrada, o conhecimento adquirido em cilindros circulares e suas características já mencionadas, percebe-se que o fato de substituir as laterais arredondadas por aristas perpendiculares complica ainda mais o escoamento.

Ainda em Almeida [2], o autor evidencia tal característica: “No caso de cilindros de base quadrada e retangular, a presença de aristas vivas traz uma complexidade ainda maior ao escoamento, que sofre descolamento logo no bordo de ataque, com possíveis recolamentos nas faces laterais do cilindro”.

No que se trata de cilindros de base quadrada finitos, a situação ainda é mais delicada, sabe-se que entender a estrutura do fluxo tridimensional é muito complicado, e diversos estudiosos buscaram e buscam entender tais características. Wang et al. [3], apresenta uma proposta do comportamento do escoamento para este caso, que evidencia quatro principais estruturas de vórtices: os vórtices ferradura, que se desenvolvem ao redor da base frontal do cilindro, os vórtices de base, presentes na base das paredes laterais próximas ao cilindro, os vórtices laterais, que são formados durante toda a extensão lateral do cilindro e os vórtices de topo, que são formados no topo do cilindro, pois o escoamento encontra a região de topo livre e se desenvolve.

A Figura 7 exemplifica o escoamento de ar passando por um cilindro de base retangular finito proposto por Wang et al. [3], evidenciando as principais características que o escoamento assume, o presente trabalho considera a proposta bastante relevante e a usará no decorrer do estudo, sendo um dos objetivos desse trabalho evidenciar a visualização experimental de um escoamento similar, a fim de compreender tais fenômenos.

Figura 7 – Visualização do escoamento passando por um cilindro de base retangular, evidenciando suas principais características assumidas



Evidente que existem parâmetros que influenciam diretamente nessa interação e consequentemente na forma que o escoamento assume após o contato com o corpo, os chamados parâmetros governantes do escoamento e os parâmetros que influenciam o escoamento.

2.2. PARÂMETROS GOVERNANTES DO ESCOAMENTO

Dentre os parâmetros governantes está o número de Reynolds (Re) parâmetro adimensional para o cálculo do regime do escoamento, que representa o quociente das forças de inércia por forças viscosas, relacionando a velocidade da corrente livre do escoamento V_{∞} , um comprimento característico do corpo (D), neste caso o comprimento da base frontal perpendicular ao escoamento, a massa específica (ρ) e a viscosidade dinâmica do fluido (μ).

$$Re = \frac{\rho V_{\infty} D}{\mu} \quad (1.1)$$

O outro parâmetro governante é o número de Strouhal (St) que relaciona a frequência de desprendimento de vórtices (f), um comprimento característico do corpo (D) e velocidade da corrente livre do escoamento V_{∞} .

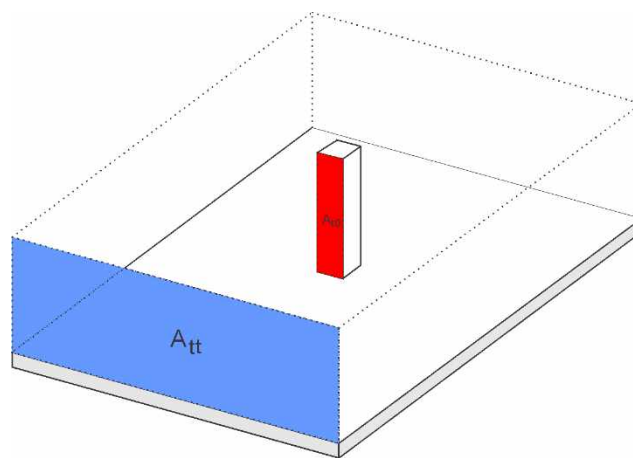
$$St = \frac{fD}{V_{\infty}} \quad (1.2)$$

2.3. PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NO ESCOAMENTO

Introduzindo os parâmetros de influência, temos a razão de bloqueio ($B_{\%}$), que é a relação em porcentagem da área transversal do objeto (A_{to}) (área frontal perpendicular ao escoamento) e a área transversal da seção de ensaio do túnel de vento (A_{tt}).

$$B_{\%} = \frac{A_{to}}{A_{tt}} * 100 \quad (1.3)$$

Figura 8 – Esquema ilustrativo da razão de bloqueio



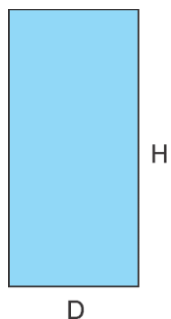
Fonte: Autor próprio

Considerou-se que em uma razão de bloqueio menor que 12%, a interferência das paredes do túnel não influi em nenhuma característica inesperada no escoamento, utilizou-se esse parâmetro restritivo para a definição dos corpos de prova.

Ainda se tratando de parâmetros de influência, define-se a razão de aspecto (Ar), que é a razão entre a altura do cilindro de base retangular (H) e o comprimento de sua base frontal na direção perpendicular do escoamento (D), como mostra a Figura 9:

$$Ar = \frac{H}{D} \quad (1.4)$$

Figura 9 – Esquema ilustrativo das dimensões avaliadas na razão de aspecto

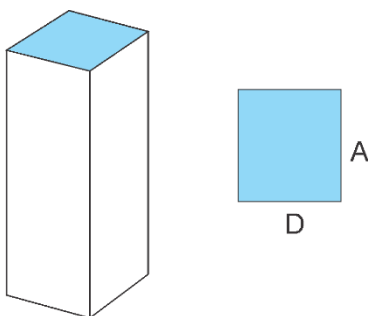


Fonte: Autor próprio

Temos também a razão de forma (ϕ), que é a razão entre o comprimento da base do cilindro de base retangular na direção do escoamento (A) e o comprimento de sua base frontal na direção perpendicular do escoamento (D).

$$\phi = \frac{A}{D} \quad (1.5)$$

Figura 10 – Esquema ilustrativo das dimensões avaliadas na razão de forma

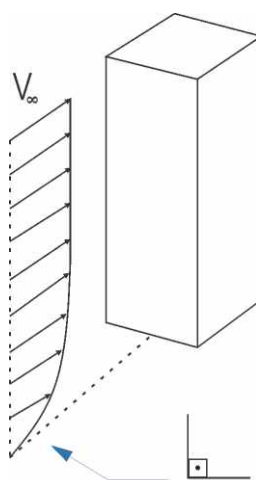


Fonte: Autor próprio

Decidiu-se trabalhar com razão de forma $\phi = 1$ constante para todos os corpos de prova, e variar a razão de aspecto de 1, 2, 3 e 4.

Outro fator que influencia o escoamento é o ângulo de incidência do escoamento no corpo, adotou-se que a face frontal do corpo está perpendicular ao escoamento.

Figura 11 – Esquema ilustrativo do ângulo de incidência



Fonte: Autor próprio

2.4. ESTUDOS EXPERIMENTAIS

Dentre os estudiosos a respeito de abordagens experimentais relacionados ao tema, se destaca Hiroshi Sakamoto, que contribuiu em diversos estudos na busca por conhecimento no que se trata de cilindros de base retangular e suas características.

Em Sakamoto et al. [3], esclarecem as relações entre o arrasto médio no tempo, e as características da camada limite turbulenta através de medições detalhadas do arrasto de pressão atuando em um cubo finito.

Já em Sakamoto e Oiwake [4], um estudo experimental é realizado para investigar o efeito da razão de aspecto e a espessura da camada limite na força flutuante, onde observou-se que a sustentação flutuante tem dependência maior na razão de aspecto, enquanto a força de arrasto flutuante apresenta uma magnitude menor em termos comparativos.

Posteriormente em Sakamoto, H. [5], foi realizado um estudo similar a [4], porém incluindo novas variáveis e abordagens, realizando uma investigação experimental a respeito das forças aerodinâmicas que atuam em um cilindro de base retangular finito, de seção transversal quadrada, colocado verticalmente em uma camada limite turbulenta, constatando assim os efeitos nas forças aerodinâmicas oriundos de variações na razão de aspecto, ângulo de ataque do escoamento e parâmetros que caracterizam a camada limite.

Castro e Robis [6], Hunt et al. [7] e Woo et al. [8] estudaram o campo de escoamento em torno de um cilindro de base retangular, com base em medições de distribuição de pressão, velocidade, padrão de escoamento e turbulência.

McClean and Sumner [9], estudaram experimentalmente em túnel de vento, o escoamento ao redor de um cilindro de base quadrada finito, variando a razão de aspecto e a incidência do escoamento, a fim de analisar sua influência, e compará-los com o caso de cilindro de base quadrada infinito. Obteve-se para todas as razões de aspecto e ângulos de incidência, um valor de coeficiente de arrasto médio menor em

comparação com o caso infinito, no entanto os valores do coeficiente de sustentação eram de proporções bem semelhantes.

Obtiveram também que a variação do coeficiente de arrasto e do número de Strouhal com a incidência, é bem menos notável em relação ao cilindro de base quadrado infinito, onde tal diferença acredita ser oriunda da forte influência do escoamento tridimensional em torno da extremidade livre.

Wang et al. [3], investigou experimentalmente a estrutura do escoamento turbulento ao redor de um cilindro de base quadrada finito de diferentes razões de aspecto em um túnel de vento de circuito fechado. Utilizou-se ferramentas como anemômetro a fio quente e PIV (Particle image velocimetry) que indicaram que a estrutura do escoamento depende da razão de aspecto e é caracterizada por interações robustas entre o vórtice de base e vórtice de ponta quando a razão de aspecto é menor ou igual a 3. Já nas razões de aspecto maiores que 3, observaram que os vórtices de base dominam a esteira próxima à base do prisma, sua força e tamanho aumentam com o aumento da razão de aspecto, devido a redução da interação entre os vórtices de ponta e os vórtices de base.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Este capítulo é dedicado para descrever os corpos de prova, o aparato experimental e a metodologia adotada nos procedimentos experimentais que serão realizados neste trabalho.

3.1. CORPOS DE PROVA

Esta seção é destinada a detalhar as definições geométricas e conceituais dos corpos de prova, tal como seu processo de fabricação.

3.1.1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Considerou-se como parâmetros de trabalho a confecção de 4 modelos cilíndricos de base quadrada, variando a razão de aspecto (AR) em uma unidade de 1, 2, 3 e 4, respectivamente, com o comprimento da base frontal perpendicular ao escoamento (D) constante e igual a 0,1 m, razão de forma (ϕ) constante igual a 1, e razão de bloqueio ($B_{\%}$) menor ou igual a 12%.

A fim de respeitar as considerações definidas, obteve-se as seguintes características geométricas:

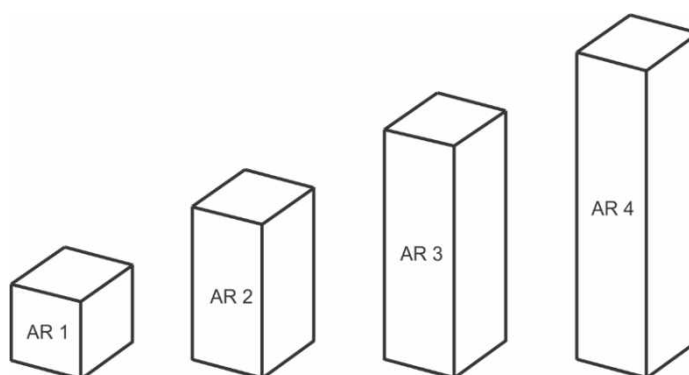
Tabela 1 – Definições geométricas dos corpos de provas.

Modelo	D (m)	H (m)	Ar	ϕ	$B_{\%}$
1	0,1	0,1	1	1	2,78
2	0,1	0,2	2	1	5,55
3	0,1	0,3	3	1	8,33
4	0,1	0,4	4	1	11,11

Fonte: Autor próprio

A Figura 12, mostra a representação esquemática dos corpos de prova em escala.

Figura 12 – Ilustração em escala dos corpos de prova



Fonte: Autor próprio

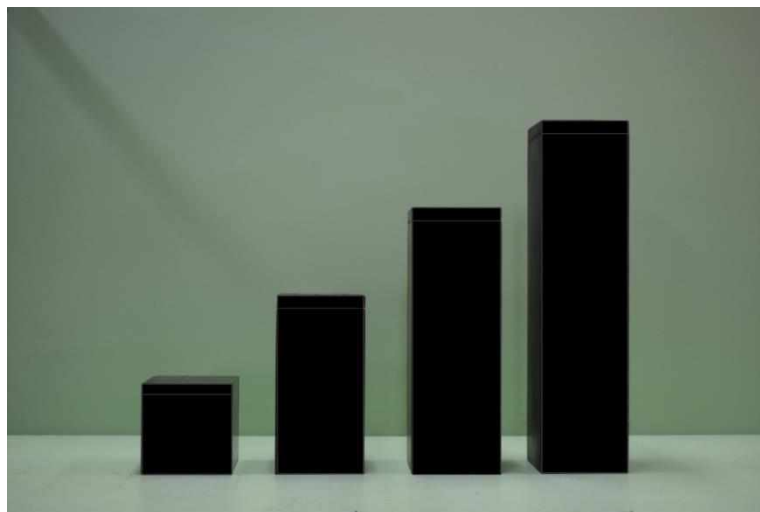
3.1.2. FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram confeccionados em MDF (Placa de fibra de média densidade) de altíssima qualidade.

As placas foram cortadas de acordo com as necessidades de montagem do projeto, montadas e acabadas a fim de que as superfícies externas dos cilindros ficassem extremamente uniformes, finalizadas com pintura especial automotiva.

A Figura 13, mostra os corpos de prova construídos finalizados em escala.

Figura 13 – Corpos de prova finalizados



Fonte: Autor próprio

Na face inferior de cada cilindro de base quadrada, efetuou-se um corte circular e internamente a esse corte fixou-se uma porca, criando assim um mecanismo de fixação, onde um parafuso passante por um furo na seção de testes do túnel de vento, acoplava na porca, engastando o corpo na parede inferior do túnel, na posição desejada.

3.2. APARATO EXPERIMENTAL

Esta seção é destinada a apresentar o aparato experimental utilizado neste trabalho.

3.2.1. TÚNEL DE VENTO TV60

O túnel de vento TV60 é um túnel de vento subsônico de seção aberta, acionado por um motor elétrico de 25 HP que fornece energia para movimentar um rotor composto por 12 pás, que geram o escoamento, com seção de teste de 0,6 x 0,6 x 1 m.

A velocidade do escoamento de ar é acionada por um inversor elétrico de saída variável de 0 a 60 Hz, representando uma faixa de velocidade de escoamento de 0 a 28 m/s.

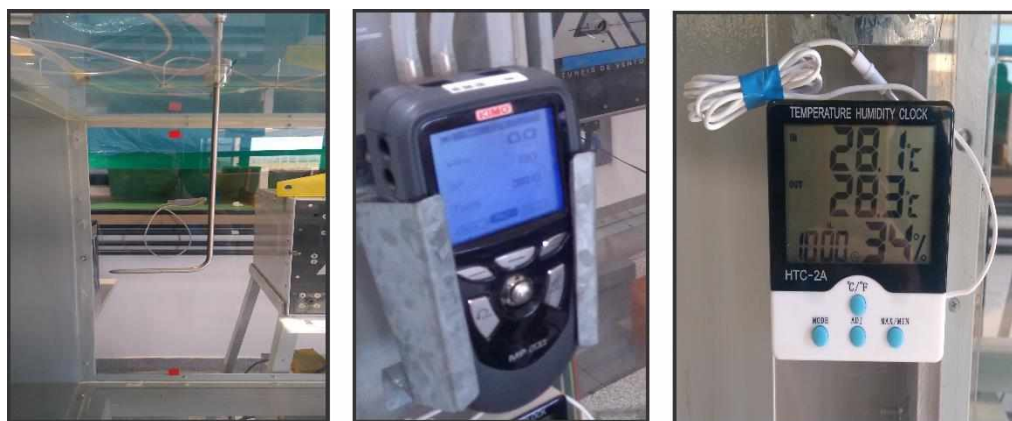
Figura 14 – Túnel de vento TV60



Fonte: Autor próprio

O mesmo é equipado com um tubo de Pitot na seção de teste conectado a um instrumento denominado Kimo que indica a velocidade do escoamento, a partir da pressão captada pelo tubo de Pitot, a temperatura ambiente é captada por um termômetro e insere-se seu valor manualmente no Kimo, servindo assim como temperatura de referência, além de um manômetro analógico.

Figura 15 – Instrumentos auxiliares, da esquerda para a direita respectivamente, tubo de Pitot, Kimo e Termômetro digital



Fonte: Autor próprio

3.2.2. BALANÇA AERODINÂMICA AA-TVAB1

A balança externa de três componentes AA-TVAB1 é uma balança aerodinâmica de extrema qualidade desenvolvida para medições da força normal (sustentação), força axial (arrasto), e momento de arfagem, equipada com células de carga de alta sensibilidade, permitindo a comunicação em tempo real da balança com seu sistema de controle e aquisição de dados AA-DAS, que além de monitorar as variáveis em tempo real, gera gráficos, tabelas e permite exportar os resultados.

Figura 16 – Balança aerodinâmica AA-TVAB1



Fonte: Autor próprio

Fonte: Manual de operação – Balança externa de três componentes AA-TVAB1 – Aeroalcoll Tecnologia – REV07-fev/2018.

3.2.3. MÓDULO DE PRESSÃO

A fim de mapear a distribuição de pressão nas faces dos cilindros de base quadrada, utilizou-se um módulo de pressão AA-TVCR2 desenvolvido pela Aeroalcoll Tecnologia, de 64 canais, permitindo então 64 tomadas de pressão simultâneas, que em conjunto com seu software particular, permite configurar a taxa de aquisição das tomadas de pressão, garantindo que o usuário monte seu banco de dados de acordo com sua necessidade.

Para cada tomada de pressão o módulo oferece dois canais, o denominado por ele tomada alta e tomada baixa, no qual a tomada alta se refere a pressão a ser medida e a tomada baixa a pressão de referência.

Figura 17 – Módulo de pressão AA-TVCR2



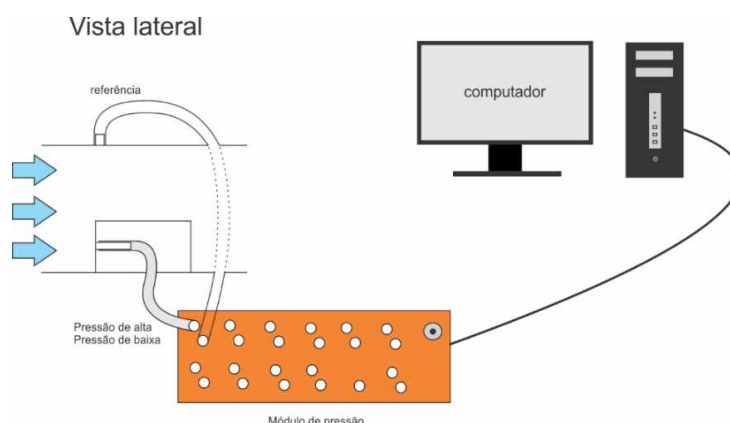
Fonte: Adaptação da figura contida em: <http://www.aeroalcool.com.br/index.php/acessorios/32-gallery/acessorios/128-aa-tvcr2>. Acesso em 6 de agosto, 2019

A quantidade de tomadas de pressão em cada cilindro de base quadrada, variou proporcionalmente de acordo com sua razão de aspecto, sendo assim corpos maiores demandam mais tomadas de pressão, a fim de mapear de forma sistêmica todos os corpos.

Uma tomada de pressão, consiste em um tubo cilíndrico conectado a uma mangueira e conectada ao módulo de pressão na tomada alta sendo o módulo conectado a um computador, já a pressão de referência é conectada a outra mangueira e conectada a tomada baixa do módulo de pressão.

A Figura 18 exemplifica a montagem completa experimental similar ao método adotado nas tomadas de pressão.

Figura 18 – Ilustração esquema de montagem para tomada de pressão



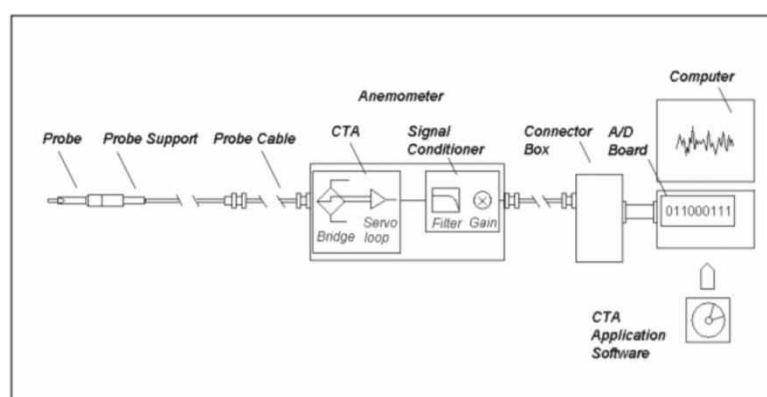
Fonte: Autor próprio

3.2.4. ANEMÔMETRO DE FIO QUENTE

O anemômetro de fio quente CTA (anemômetro de temperatura constante) desenvolvido pela Dantec Dynamics, é um equipamento de medição da velocidade do escoamento de gases, extremamente sensível a variações de velocidade, permitindo assim um mapeamento consistente do perfil de velocidade na região escolhida.

O anemômetro consiste de um sensor, um fio eletricamente aquecido contido em uma sonda, controlado por um sistema eletrônico, com comunicação em tempo real via software.

Figura 19 – Esquema típico de aquisição de um anemômetro CTA Dantec

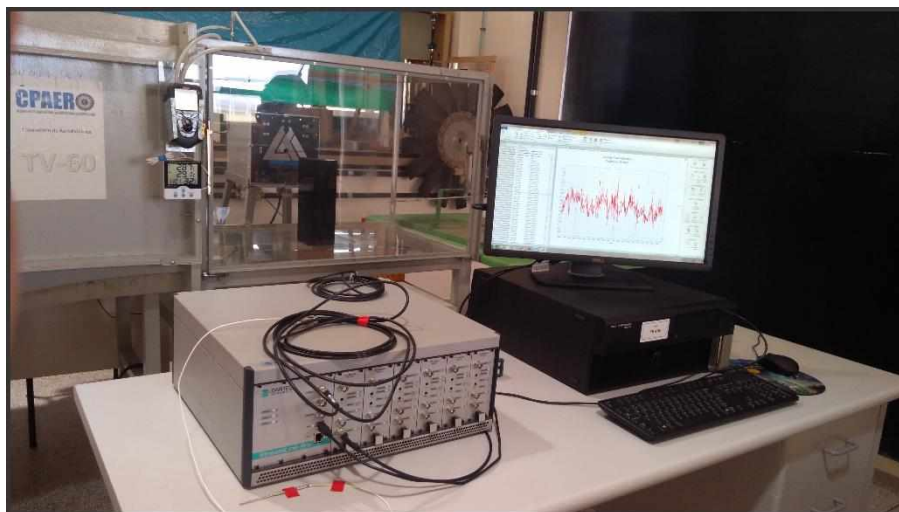


Fonte: Dantec Dynamics A/S, 2004

Seu princípio de funcionamento se baseia na troca de calor entre o sensor aquecido e o fluido ambiente, onde o sistema eletrônico trabalha para manter a temperatura do fio constante, fazendo com que essa transferência de calor convectiva se relacione com a velocidade do escoamento.

Quanto maior a velocidade do escoamento, maior a tendência de resfriar o fio quente, consequentemente o sistema eletrônico atua com mais intensidade para manter a temperatura do fio constante, relacionando essa transferência de calor a uma determinada velocidade, visto que o fio é calibrado para uma faixa de velocidades, e é extremamente sensível a mudanças, garantindo uma informação precisa a cada posição adotada pelo sensor.

Figura 20 – Montagem experimental para aquisição de dados



Fonte: Autor próprio

Figura 21 – Sensor utilizado no procedimento experimental



Fonte: Silveira, 2017

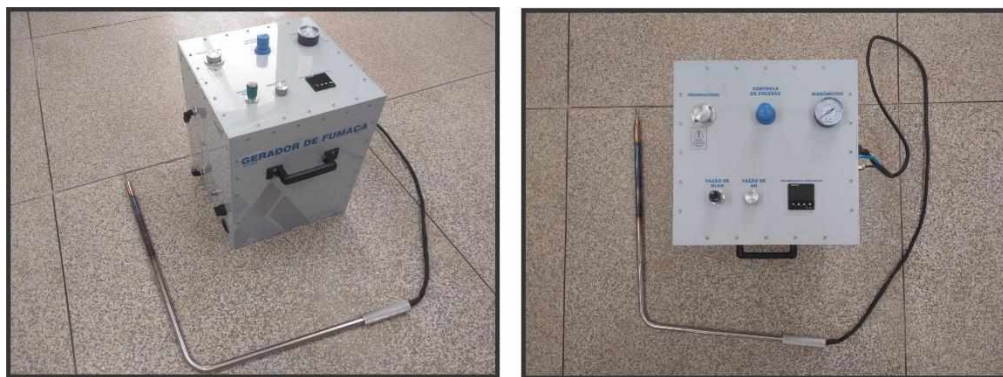
3.2.5. GERADOR DE FUMAÇA AA-TVEG

O gerador de fumaça AA-TVEG desenvolvido pela Aeroalcool Tecnologia, é um equipamento de geração de fumaça de forma controlada, e expelida através de uma haste, permitindo o direcionamento em locais específicos diretamente sobre o corpo de prova.

A fumaça é gerada a partir da vaporização de Polietileno Glicol, o resultado é uma fumaça densa atóxica e de fácil limpeza, e sua quantidade pode ser ajustada mediante o controlador de temperatura e vazão de óleo em função do experimento a realizar.

Seu princípio de funcionamento se baseia na condução por ar comprimido do Polietileno Glicol armazenado em um reservatório através de um capilar de cobre sobre uma resistência elétrica, aquecendo-o até sua vaporização, gerando assim a fumaça desejada.

Figura 22 – Gerador de fumaça AA-TVEG



Fonte: Autor próprio

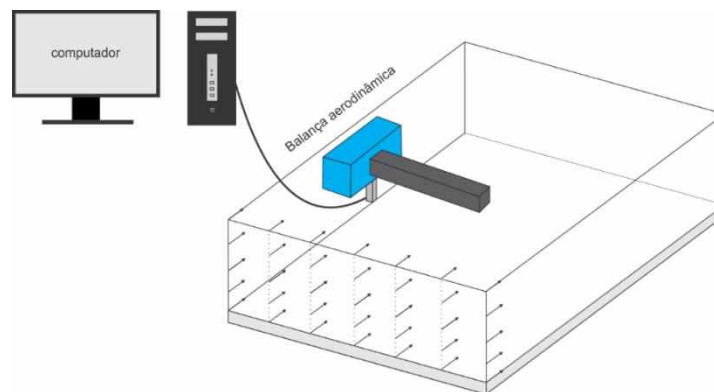
3.3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Esta seção é destinada a apresentar o aparato experimental utilizado neste trabalho.

3.3.1. MEDIÇÕES DE ARRASTO E SUAS CARACTERÍSTICAS

A fim de medir e caracterizar o arrasto sobre os corpos de prova utilizou-se a balança aerodinâmica conectada ao túnel de vento, efetuou-se a calibração da balança anteriormente ao início dos experimentos, a fim de que os dados por ela fornecidos possam ser fidedignos e o pós processamento possa fornecer resultados adequados.

Figura 23 – Ilustração procedimento experimental de medida de arrasto



Fonte: Autor próprio

Para cada um dos quatro corpos de prova ensaiados (AR variável de 1,2,3 e 4) adotou-se o seguinte procedimento experimental:

1. Anotar os valores de pressão e temperatura ambiente;
2. Introduzir o eixo na balança aerodinâmica;
3. Travar o eixo na balança;
4. Fixar o corpo de prova no eixo;
5. Alinhar o corpo para que sua face frontal fique perpendicular ao escoamento;
6. Destruar a balança;
7. Conferir o posicionamento do tubo de Pitot, para que sua face de tomada de pressão fique perpendicular ao escoamento;

8. Fechar a seção lateral do túnel;
9. Ligar e ajustar a velocidade pretendida no túnel de vento, modificando a frequência no túnel e observando a correspondente indicação de velocidade do Kimo;
10. Velocidade ajustada, desligar o túnel, zerar a balança, e ligar o túnel novamente;
11. Aquisição dos dados da balança.

Adotou-se para esse estudo trabalhar com velocidades pares de 10 a 22 m/s, totalizando sete velocidades diferentes, conseqüentemente sete aquisições de dados na balança, para cada um dos corpos de prova.

Considerou-se o comprimento da base do cilindro como referência para o cálculo do Reynolds, resultando assim em uma faixa de operação de 5.91×10^4 a 13.01×10^4 , vide equação 1.1.

A balança mede a força em grama que o escoamento faz ao objeto, força essa que não é constante, por isso utilizando seu mostrador de força digital, selecionou-se 10 medidas de força, a fim de obter um valor médio da mesma para os cálculos posteriores.

Figura 24 – Situação real experimental para medição de arrasto



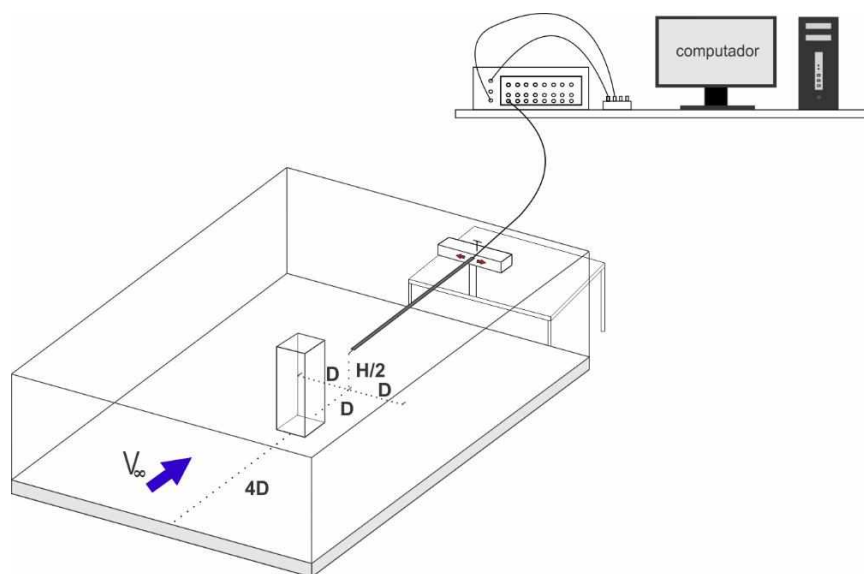
Fonte: Autor próprio

3.3.2. PERFIS DE VELOCIDADE E SUAS CARACTERÍSTICAS

A fim de medir e caracterizar a velocidade do escoamento passando sobre os corpos de prova, utilizou-se o anemômetro de fio quente, efetuou-se a calibração do anemômetro anteriormente ao início dos experimentos, a fim de que os dados por ele fornecidos possam ser fidedignos e o pós processamento possa fornecer resultados adequados.

Adotou-se para esse estudo trabalhar com a velocidade de 16m/s, Reynolds equivalente $Re = 9.46 \times 10^4$, posicionar o anemômetro fixado em $H/2$ na vertical, com 1 D de distância após o término do corpo no eixo x e deslocar a haste com o anemômetro na horizontal partindo de $D/2$, aferindo cada medida de 5 em 5 mm até a distância final de D, totalizando 41 pontos de medição diferentes de velocidade, esquema esse representado na figura abaixo.

Figura 25 – Ilustração procedimento experimental perfil de velocidade



Fonte: Autor próprio

Para cada um dos quatro corpos de prova ensaiados (AR variável de 1,2,3 e 4) adotou-se o seguinte procedimento experimental:

1. Anotar os valores de pressão e temperatura ambiente;
2. Conectar e organizar todo aparato computacional utilizado;

3. Ajustar a bancada onde se encontra a haste que contém o anemômetro na posição adequada, centralizado na posição medial do corpo de prova;
4. Fixar o corpo de prova no túnel de vento;
5. Alinhar o corpo para que sua face frontal fique perpendicular ao escoamento;
6. Colocar a sonda na ponta da haste e conferir seu posicionamento;
7. Conferir todas as conexões e aparatos computacionais, vide software, onde o mesmo informa se as conexões físicas estão de acordo, autorizando o prosseguimento;
8. Com tudo montado e pronto para uso, fazer uma medida teste na posição central, para aferir a coerência do valor medido;
9. Começar a medição oficial, ligar o túnel de vento, esperar estabilizar a velocidade desejada, começar coleta de dados via software, após a indicação de término no software desligar o túnel de vento e ajustar a nova posição para tomada de velocidade;
10. Repetir o procedimento anterior para todas as posições desejadas;
11. Coletado todos os dados de velocidade para cada posição, determinar e anotar o valor médio de velocidade de cada posição, ressaltando que para cada posição a quantidade de dados a serem coletados é configurado via software;
12. Desabilitar o anemômetro via software;
13. Retirar e guardar a sonda;
14. Pós processamento dos dados obtidos.

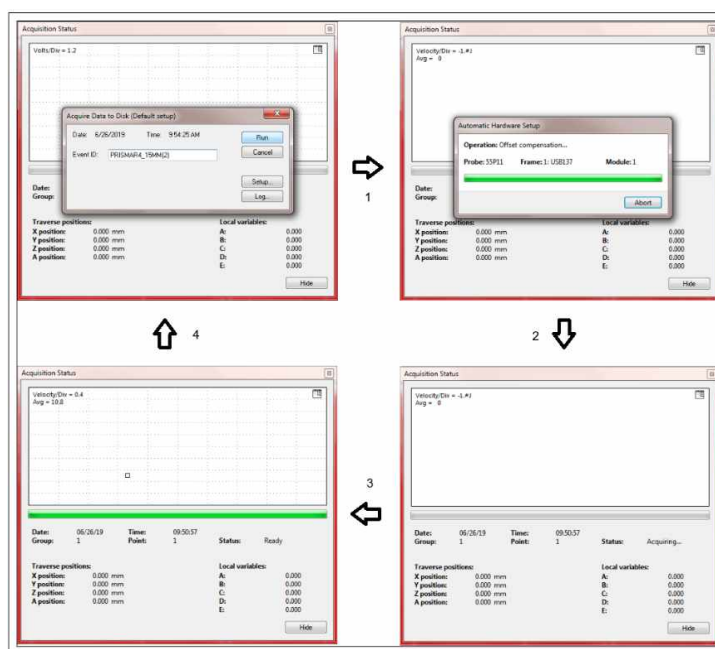
A Figura 26 demonstra a montagem experimental para um dos corpos de prova, já a Figura 27 mostra o processo via software para a aquisição de dados.

Figura 26 – Situação experimental perfil de velocidade



Fonte: Autor próprio

Figura 27 – Esquema cíclico de aquisição de velocidade relativo a cada posição no software do anemômetro



Fonte: Autor próprio

3.3.3. DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NAS FACES

A fim de medir e caracterizar a distribuição de pressão sobre as faces dos corpos de prova, utilizou-se o módulo de pressão conectado ao corpo de prova, comentado anteriormente, adotando o referencial fixo na face frontal ao escoamento e as tomadas de pressão igualmente espaçadas em forma de cruz na face, tal configuração de tomadas foi considerada ideal avaliando o referencial teórico e os equipamentos laboratoriais disponíveis.

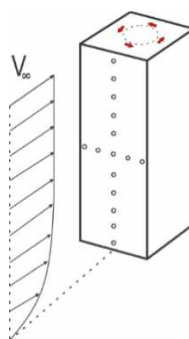
Figura 28 – Referencial adotado



Fonte: Autor próprio

Ressaltando que a fim de mapear todas as faces, realizou os experimentos individualmente em cada face, girando a face que contém as tomadas de pressão para cada posição desejada, sendo elas: face frontal, face lateral direita, face traseira e face lateral esquerda.

Figura 29 – Ilustração sentido das tomadas de pressão



Fonte: Autor próprio

Adotou-se para esse estudo trabalhar com a velocidade de 16m/s, Reynolds equivalente $Re = 9.46 \times 10^4$, o cilindro de base quadrada com razão de aspecto 1 serviu como referência para se determinar a quantidade de tomadas de pressão dos demais, aumentando proporcionalmente.

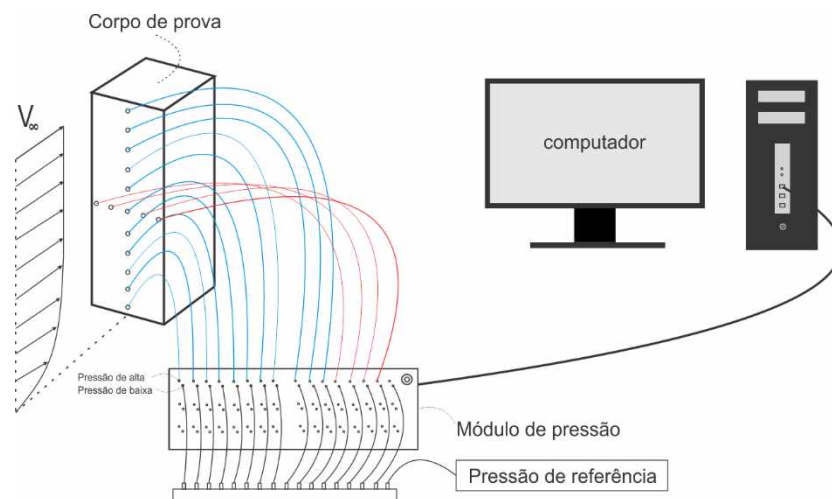
Para AR 1, adotou-se 9 tomadas de pressão igualmente espaçadas na horizontal e 9 tomadas de pressão igualmente espaçadas na vertical, considerando que o ponto central é coincidente aos dois eixos, a Tabela 3 informa a quantidade exata de tomadas de pressão para cada AR, adotada no estudo.

Tabela 2 – Definições gerais, tomadas de pressão.

Referencias do estudo	AR 1	AR 2	AR 3	AR 4
Tomadas de pressão horizontais	9	9	9	9
Tomadas de pressão verticais	9	17	25	33
Total de tomadas	17	25	33	41

Fonte: Autor próprio

Figura 30 – Ilustração procedimento experimental tomada de pressão



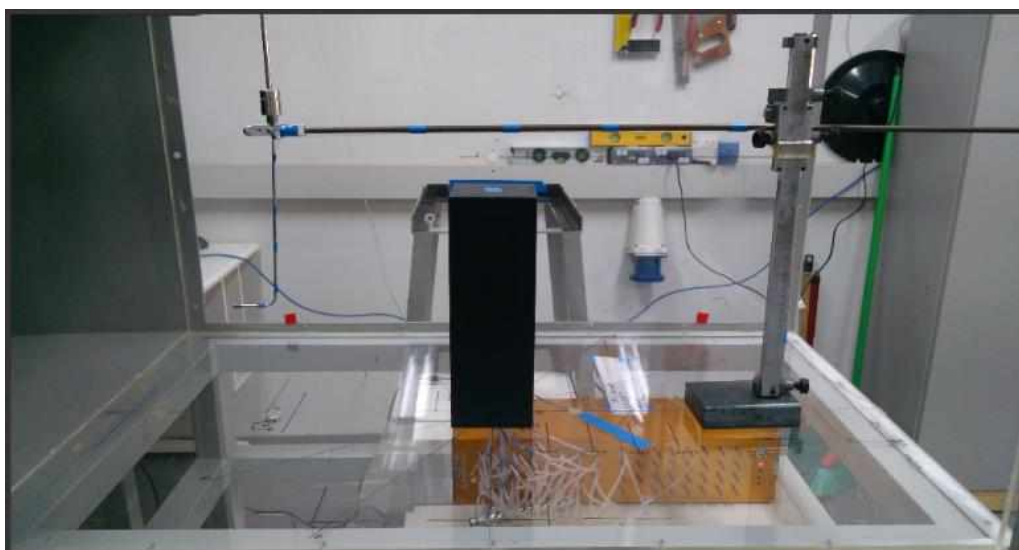
Fonte: Autor próprio

Para cada um dos quatro corpos de prova ensaiados (AR variável de 1,2,3 e 4) adotou-se o seguinte procedimento experimental:

1. Posicionar o tubo de Pitot, realizar uma medição na velocidade pretendida para comparar o valor indicado no módulo de pressão e o Kimo, validando se as conexões estão corretas;
2. Coletar os dados de pressão dinâmica;
3. Posicionar o cilindro de base quadrada e fixa-lo no túnel de vento;
4. Conectar cada mangueira relacionada a uma tomada de pressão no seu respectivo canal no módulo de pressão;
5. Conferir as conexões individualmente, e habilitar os módulos que serão utilizados no software;
6. Ligar o Túnel e assim realizar as medições de pressão na face.

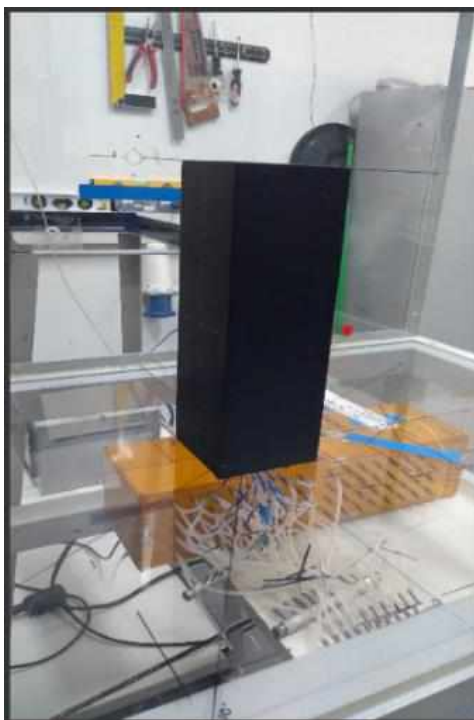
A Figura 31 demonstra a montagem experimental para coleta da pressão dinâmica, já a Figura 32 mostra a situação experimental de um corpo de prova posicionado para coleta de dados.

Figura 31 – Situação experimental coleta de dados da pressão dinâmica



Fonte: Autor próprio

Figura 32 – Corpo de prova posicionado para medição de pressão na face



Fonte: Autor próprio

3.3.4. PROCEDIMENTO DE VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO

Esta seção é destinada a apresentar os métodos experimentais de visualização do escoamento ao redor dos corpos utilizados nesse trabalho.

3.3.4.1. MÉTODO COM GERADOR DE FUMAÇA

A fim de visualizar o escoamento passante pelos corpos de prova, utilizou-se o gerador de fumaça AA-TVEG, comentado anteriormente, posicionado no início da seção de testes do túnel de vento, uma bancada para a fixação dos corpos de prova, de modo que a face frontal do modelo fique perpendicular ao escoamento, e uma câmera fotográfica externa para registrar o experimento.

Adotou-se para esse estudo trabalhar com a velocidade de 16m/s, velocidade padrão de nossa análise, experimentou-se os quatro modelos disponíveis.

Para cada um dos quatro corpos de prova ensaiados (AR variável de 1,2,3 e 4) adotou-se o seguinte procedimento experimental:

1. Posicionar o cilindro de base quadrada e fixa-lo na bancada;
2. Preparar o gerador de fumaça e seus equipamentos;
3. Conecta-lo a uma rede elétrica 220 VAC;
4. Plugar a fonte de ar comprimido no local indicado;
5. Abastecer o reservatório com Polietileno Glicol AA-PGF4;
6. Posicionar a haste de saída da fumaça;
7. Pressurizar o sistema de óleo mantendo o ar fechado de tal forma a que inicie um pequeno gotejamento de óleo;
8. Iniciar o aquecimento da resistência;
9. Após início da geração de fumaça abrir a vazão de ar lentamente;
10. A partir deste momento equalizar lentamente entre fluxo de óleo e fluxo de ar a quantidade de fumaça gerada;
11. Ligar o Túnel na velocidade desejada, e visualizar o escoamento.

3.3.4.2. MÉTODO CHINA CLAY

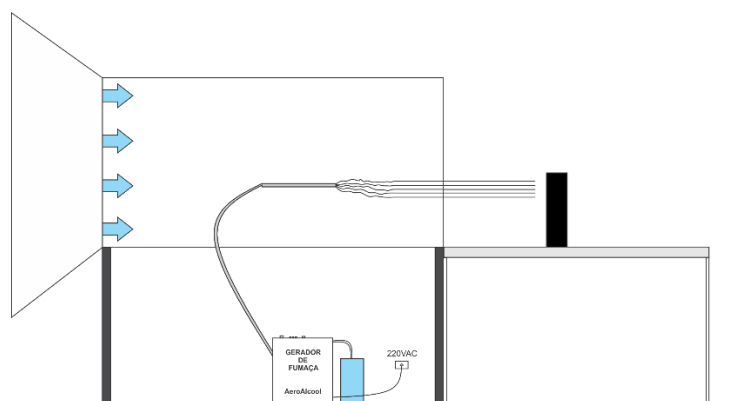
Com o intuito de evidenciar alguns parâmetros do escoamento passante pelos corpos de prova, que não são bem definidos utilizando o gerador de fumaça, utilizou-se o método China Clay, um método bastante simples, onde uma mistura de pó de Al_2O_3 e querosene, em suas devidas proporções, forma um líquido similar a uma tinta, que é aplicada no corpo de prova a ser analisado, posicionado dentro da seção de testes do túnel de vento e uma câmera fotográfica externa para registrar o experimento.

Adotou-se para esse estudo trabalhar com a velocidade de 16m/s, velocidade padrão de nossa análise, experimentou-se os quatro modelos disponíveis.

Para cada um dos quatro corpos de prova ensaiados (AR variável de 1,2,3 e 4) adotou-se o seguinte procedimento experimental:

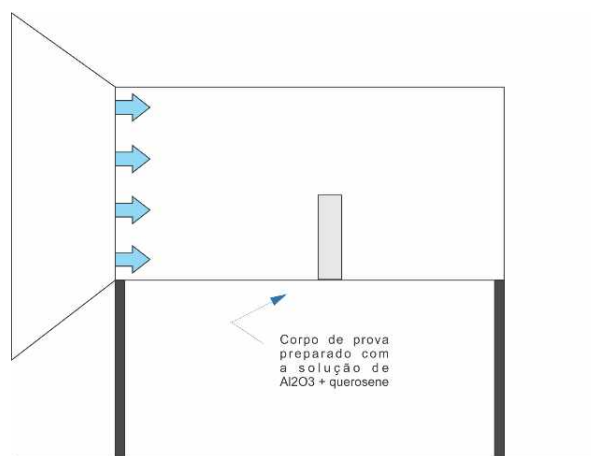
1. Prepare a solução de pó de Al_2O_3 e querosene, existe uma proporção adequada, mas as quantidades podem variar, de acordo com a experiência do pesquisador em trabalhar com a técnica, sendo necessário testar no corpo de prova até encontrar a solução ideal;
2. Posicione o corpo de prova no túnel de vento;
3. Inspecione a seção de testes a fim de retirar qualquer objeto ou sujeira que pode interferir no experimento;
4. Aplique a solução no corpo de prova, de modo homogêneo sobre toda a estrutura;
5. Ligue o túnel de vento na velocidade desejada logo após aplicar a solução no corpo.
6. Aguarde cerca de 5 minutos com o túnel de vento ligado;
7. Desligue o túnel e aguarde para ter certeza de que todo o querosene evaporou, visando uma melhor visualização;
8. Fotografe de posições fixadas, para manter o padrão da fotografia para fins comparativos.
9. Caso a visualização não fique evidente, deve-se alterar a consistência da solução e repetir todo o procedimento.

Figura 33 – Ilustração procedimento de visualização com gerador de fumaça



Fonte: Autor próprio

Figura 34 – Ilustração procedimento de visualização China Clay



Fonte: Autor próprio

As Figuras 33 e 34 representam esquematicamente as duas formas de visualização experimental utilizadas, como já dito anteriormente, o método China Clay é bem mais simples e não requer nada além do citado no procedimento experimental, onde os métodos foram usados de maneira a complementar a qualidade da visualização experimental, aproveitando os prós e contras de cada método.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

Este capítulo é destinado a apresentar todos os resultados obtidos experimentalmente, escolheu-se apresentar os resultados separados por corpo de prova, AR 1,2,3 e 4 respectivamente.

4.1. MEDIÇÕES DE ARRASTO E SUAS CARACTERÍSTICAS

Nesta seção será apresentada os resultados experimentais e análises gráficas, referentes as medições de arrasto realizadas com a balança aerodinâmica.

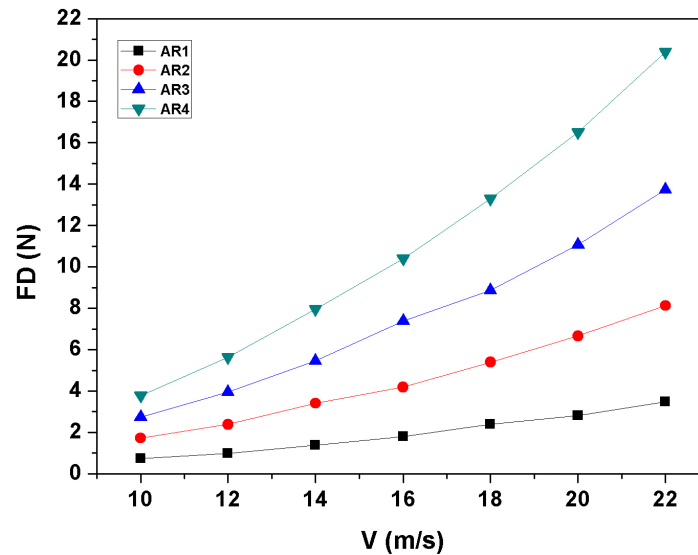
Seguiu-se a mesma metodologia de aquisição, tratamento de dados, cálculos posteriores e análises gráficas para cada razão de aspecto.

4.1.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS CORPOS DE PROVA

Alterando a razão de aspecto dos corpos de prova percebeu-se tendências similares nos gráficos analisados, sendo um dos objetivos dessa seção comparar as quatro razões de aspecto em gráficos coincidentes, a fim de perceber em detalhes a real influência da razão de aspecto nesses parâmetros.

Iniciou-se avaliando a variação da força de arrasto em função da velocidade, adotando uma escala global contendo os quatro corpos estudados, demonstrada graficamente na Figura 35:

Figura 35 – Comparação Força de arrasto x Velocidade – ARs



Fonte: Autor próprio

Percebe-se ao avaliar a Figura 35 que a variação da força de arrasto com a velocidade para todas as razões de aspecto, apresenta uma característica crescente de comportamento quadrático.

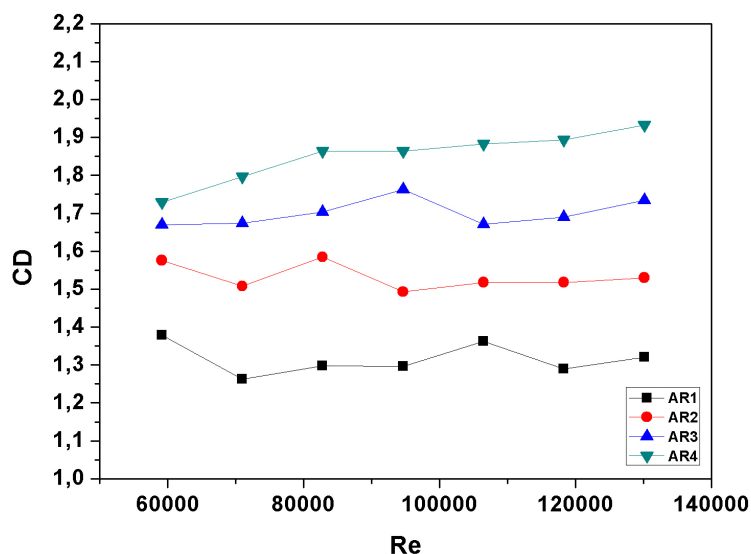
Aumentar a razão de aspecto, influi diretamente no aumento da área frontal do objeto, aquela que está perpendicular ao escoamento, que claramente aumenta a força de arrasto para qualquer velocidade do escoamento. O mais interessante, e que pode ser observado na figura 35, é a sensibilidade da força de arrasto com o aumento da velocidade do escoamento.

Percebe-se que para as velocidades menores estudadas, a diferença nos valores da força de arrasto entre o menor corpo (AR1) e o maior (AR4) é significativa, mas com um intervalo muito menor do que se compararmos com as velocidades maiores estudadas.

Conclui-se então, que a velocidade do escoamento, é um parâmetro de grande influência quando se deseja determinar a força de arrasto sobre um objeto, e que para cilindros de base quadrada esse crescimento segue uma tendência quadrática.

Avaliou-se também a variação do coeficiente de arrasto em função do número de Reynolds, também adotando uma escala global contendo os quatro corpos estudados, demonstrada graficamente na Figura 36:

Figura 36 – Comparação Coeficiente de arrasto x Reynolds – ARs



Fonte: Autor próprio

Observa-se que o aumento da velocidade, consequentemente resultando no aumento do número de Reynolds, alterou o coeficiente de arrasto para as quatro razões de aspecto estudadas.

Vemos também que o valor obtido do coeficiente de arrasto, para qualquer um dos corpos, segue uma tendência não linear, mas nota-se que os valores são muito próximos, podendo assim aferir que o coeficiente de arrasto não é muito sensível a mudanças no número de Reynolds, dentro da faixa de Reynolds que estamos trabalhando, como sugere a literatura, e que as pequenas alterações encontradas se devem principalmente ao procedimento experimental, coleta e tratamento de dados, e demais fatores que a abordagem experimental está sujeita.

Os resultados obtidos são considerados coerentes pelo autor, e análises de situações experimentais semelhantes considerando variáveis coincidentes não foram encontradas, mas alguns estudos a respeito do tema estão contidos na Figura 37, servindo de parâmetro comparativo que serão analisados a seguir.

Figura 37 – Referência de estudo experimental

Estudo	C. B. Q. infinito	C. B. Q. finito	C. B. Q. finito	C. B. Q. finito
Autor	Yen and Yang (2011)	McClean and Sumner (2012)	Presente trabalho	Presente trabalho
AR	∞	3	3	4
Re	$3,6 \times 10^4$	$7,2 \times 10^4$	$7,1 \times 10^4$	$7,1 \times 10^4$
$B_{\%}$	4	0,3	8,33	11,11
CD	2,02	1,33	1,67	1,8

Fonte: Autor próprio

Nota-se vide Figura 37, que o estudo de McClean and Sumner (2012), é o que mais se assemelha à situação experimental proposta pelo presente trabalho, mas observa-se que os valores obtidos de CD foram diferentes.

Percebe-se porém, que a razão de bloqueio ($B_{\%}$) utilizada em ambos os trabalhos são bem diferentes, mesmo que as razões de aspecto sejam as mesmas, representando uma diferença de escala significativa entre os corpos de prova.

O presente trabalho fixou o comprimento da base e aumentou a altura do prisma de acordo com o aumento da razão de aspecto, sendo este comprimento da base muito maior que o utilizado no trabalho de McClean and Sumner (2012), fazendo assim nossa altura ser bem maior para o mesmo AR do referido trabalho.

De posse dessas observações, conclui-se que para o presente trabalho devido às escolhas de escala, que o aumento progressivo da razão de aspecto, tende mais rapidamente a um cilindro de base quadrada infinito, por exemplo, o corpo de prova de AR 4 tem 0,4m de altura, visto que a seção de testes tem 0,6m de altura (altura essa caso o prisma fosse considerado “infinito”), o que o autor considera um parâmetro determinante nos valores maiores encontrados de CD para os corpos de prova.

Visto o aumento progressivo de CD obtido com a crescente dos corpos, acredita-se que caso experimentássemos um cilindro de base quadrada infinito, mantendo a nossa escala seria um possível AR 6, os valores obtidos se aproximariam de CD igual a 2, como o obtido por Yen and Yang (2011). Tal observação é colocada como um dos possíveis trabalhos futuros que o autor pretende desenvolver.

4.2. PERFIS DE VELOCIDADE E SUAS CARACTERÍSTICAS

Nesta seção será apresentada os resultados experimentais e análises gráficas, referentes as medições de velocidade realizadas com o anemômetro de fio quente.

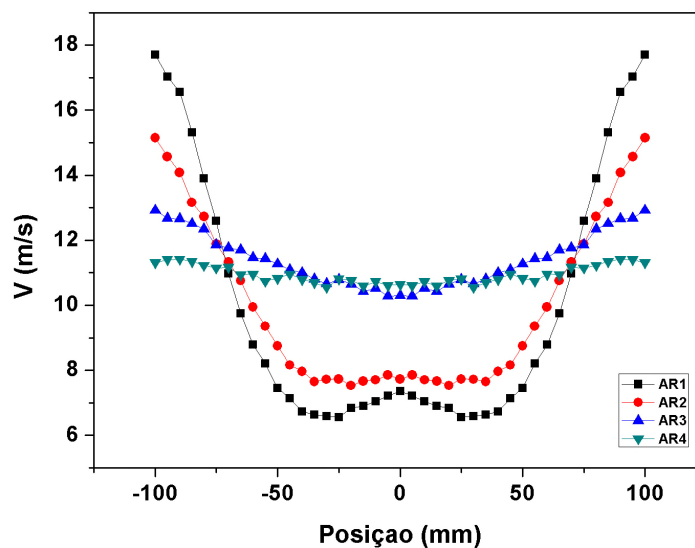
Seguiu-se a mesma metodologia de aquisição, tratamento de dados, cálculos posteriores e análises gráficas para cada razão de aspecto.

4.2.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS CORPOS DE PROVA

Alterando a razão de aspecto dos corpos de prova percebeu-se tendências e características peculiares nos gráficos analisados, sendo o objetivo dessa seção comparar as quatro razões de aspecto em gráficos coincidentes, a fim de perceber em detalhes a real influência da razão de aspecto nesses parâmetros.

Iniciou-se a velocidade em função da posição, adotando uma escala global contendo os quatro corpos estudados, demonstrada graficamente na Figura 38:

Figura 38 – Comparação Velocidade x Posição (eixo x) – ARs



Fonte: Autor próprio

Percebe-se dois comportamentos bem definidos, o primeiro foi observado de forma similar para os corpos de razão de aspecto 1 e 2, já o segundo para os corpos de razão de aspecto 3 e 4.

A primeira característica, forma similar a um w, sugere que na região central do corpo em uma extensão aproximada entre -50mm e +50mm da referência do eixo x, há uma região de fluxo mais estável, que rapidamente após essa extensão assume outra característica, a de aumento progressivo da velocidade medida, com a mudança na posição horizontal. Sugerindo a presença de um campo de fluxo mais ativo e complexo nessa região.

Já para os corpos maiores, se destaca a segunda característica, a de velocidades seguindo uma tendência constante ou de pequeno crescimento, para toda a extensão horizontal medida.

Tal característica sugere que o aumento da razão de aspecto, consequentemente o aumento da altura do nosso prisma, fez com que a influência dos vórtices de ponta e vórtices de base, não fossem sentidas na posição que as tomadas de velocidade foram posicionadas, observação similar à contida em Wang et al. [3] já comentada.

Tomadas de pressão ao longo das faces dos cilindros serão realizadas posteriormente, juntamente com métodos de visualização experimental, a fim de auxiliar na compreensão de indagações como essas.

Seguindo esse raciocínio, em relação à utilização do anemômetro, diferentes posicionamentos mapeando melhor esses perfis de velocidade em relação aos outros eixos de referência, se fazem necessário e trabalhos futuros complementares serão realizados.

4.3. DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NAS FACES

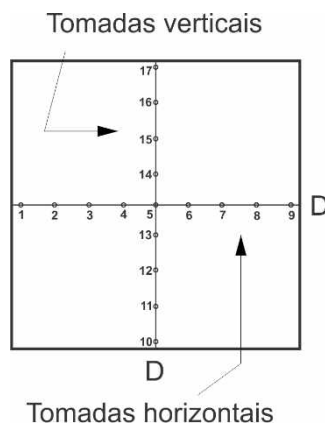
Nesta seção será apresentada os resultados experimentais e análises gráficas, referentes as medições das tomadas de pressão, realizadas com o módulo de pressão.

Seguiu-se a mesma metodologia de aquisição, tratamento de dados, cálculos posteriores e análises gráficas para cada razão de aspecto.

4.3.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS CORPOS DE PROVA

Realizou-se medições de pressão em pontos horizontais e pontos verticais, para cada face de cada cilindro de base quadrada, os resultados estão divididos e comparados por face.

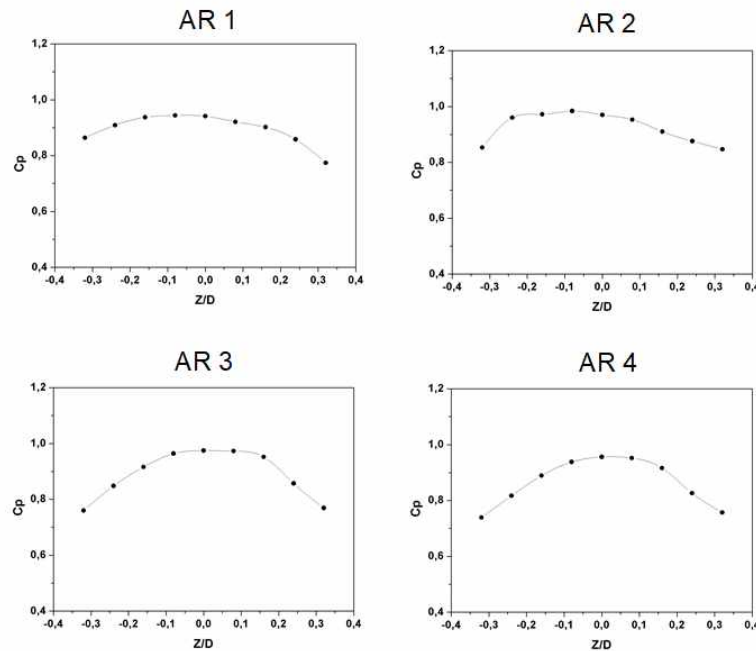
Figura 39 – Exemplo de distribuição de tomadas de pressão face frontal AR1



Fonte: Autor próprio

A Figura 40 compara a distribuição de C_p dos pontos horizontais da face frontal para todas as razões de aspecto.

Figura 40 – Comparação distribuição horizontal, face frontal – ARs

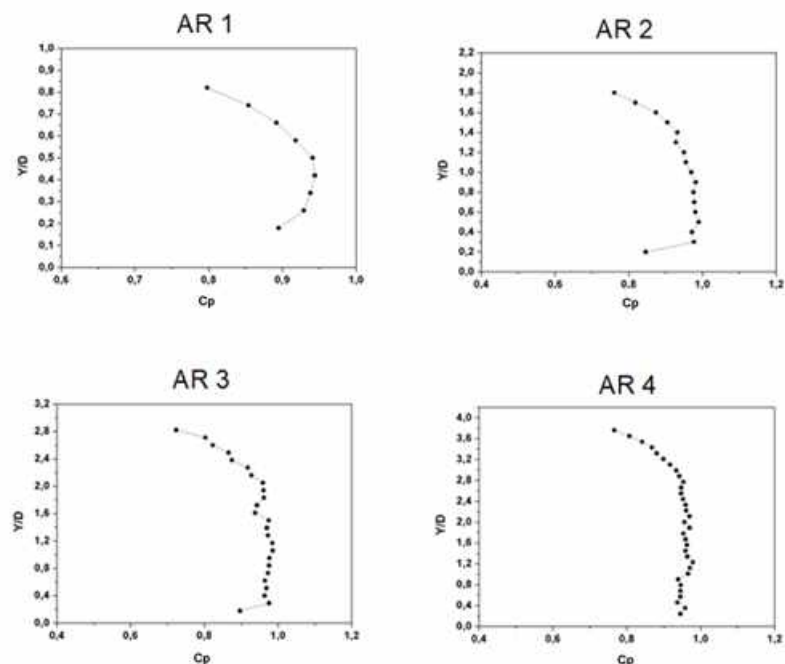


Fonte: Autor próprio

Avaliando globalmente percebe-se como esperado que os valores de C_p obtidos ao longo da extensão horizontal para a face frontal de todos os corpos de prova são positivos, em outras palavras, representa que o fluxo de ar encontra o obstáculo e aplica uma pressão sobre ele, os valores mais altos de C_p realmente são nas regiões centrais onde está contida a região de estagnação e o fluido é obrigado a contornar o obstáculo à sua frente, caminhando para as laterais, diminuindo um pouco o C_p devido a presença das regiões de quina livre, que tende a acelerar o fluido, diminuindo assim o C_p .

A Figura 41 compara a distribuição de C_p dos pontos verticais da face frontal para todas as razões de aspecto.

Figura 41 – Comparação distribuição vertical, face frontal – ARs



Fonte: Autor próprio

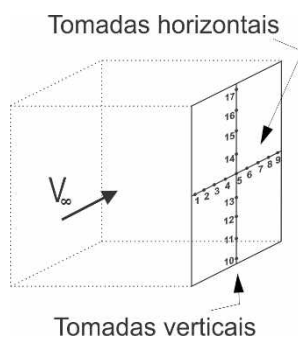
Neste caso, para os pontos verticais da face frontal a tendência é a mesma obtida para os pontos horizontais, a espessura da camada limite é muito pequena, praticamente não interfere nos pontos mais baixos, como percebemos visualmente nos gráficos.

Com o aumento da razão de aspecto naturalmente teremos mais pontos avaliados na vertical, percebe-se que o ponto mais baixo de cada razão de aspecto, sofre uma pequena interferência do efeito de base diminuindo um pouco o C_p , já a partir do segundo ponto e durante grande parte da área frontal do prisma os valores de C_p seguem uma tendência muito parecida, voltando a diminuir um pouco nos pontos que se aproximam da extremidade livre superior.

Conclui-se de acordo com os dados obtidos, que a face frontal apresenta valores de C_p positivos durante toda sua face, sofrendo efeitos principalmente das regiões de base, laterais e extremidade livre, que tende a diminuir um pouco o C_p .

Em relação as laterais dos cilindros, considerou-se que o escoamento é simétrico, avaliando assim a distribuição na lateral direita e adotando seus resultados também para a lateral esquerda em todos os casos estudados.

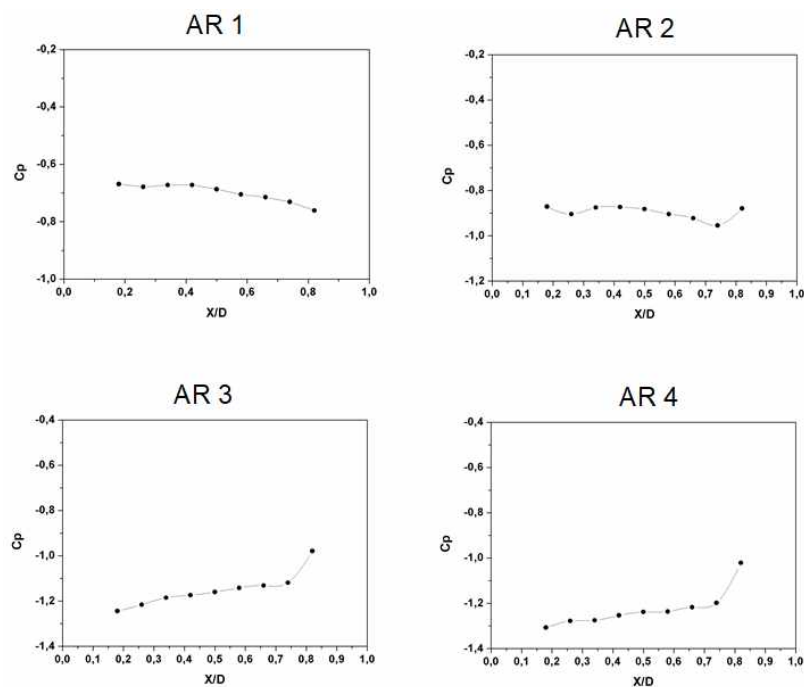
Figura 42 – Exemplo de distribuição de tomadas de pressão AR1



Fonte: Autor próprio

A Figura 43 compara a distribuição de C_p dos pontos horizontais da face lateral direita para todas as razões de aspecto.

Figura 43 – Comparação distribuição horizontal, face lateral direita – ARs

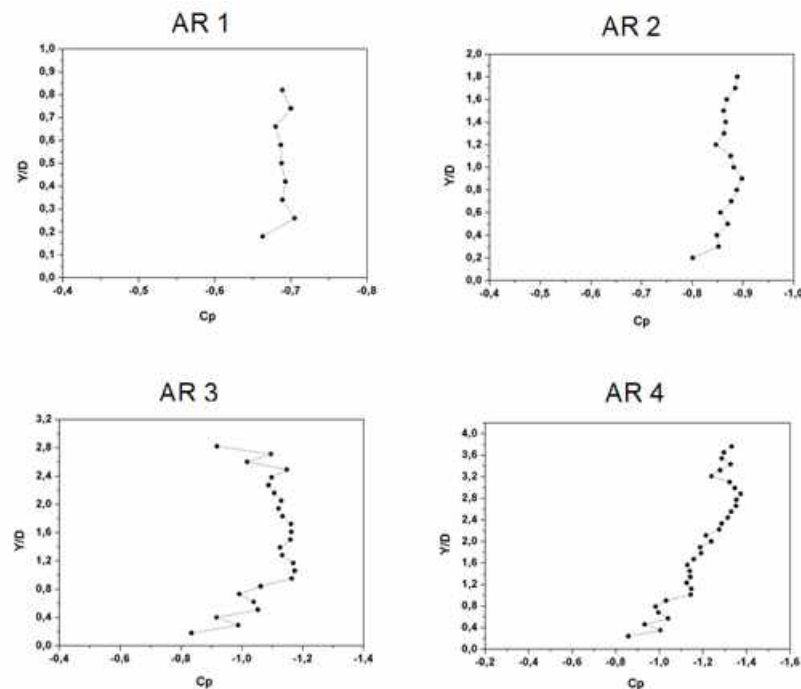


Fonte: Autor próprio

O escoamento ao encontrar os cantos vivos laterais da face frontal, tende a aumentar sua velocidade, descolando da parede, criando na face lateral do cilindro uma região de baixa pressão de espessura não conhecida, fazendo com que o C_p nas faces laterais dos cilindros se tornem negativos.

Demais características dessa região de desprendimento e região de baixa pressão, são de natureza bastante complexa, e foge do objetivo desse trabalho, técnicas de visualização experimentais foram realizadas e serão mostradas posteriormente no decorrer desse trabalho.

Figura 44 – Comparação distribuição vertical, face lateral direita – ARs



Fonte: Autor próprio

Neste caso, para os pontos verticais da face lateral direita a tendência é similar a obtida para os pontos horizontais, como uma diferença principal que não interfere nos pontos centrais, a influência dos vórtices de base.

A teoria proposta em Wang et al. [3], nos diz que existe a presença de uma região de vórtice denominada de vórtices de base, oriundos como o nome sugere, da região do cilindro que está em contato com o solo, onde os vórtices se desprendem na

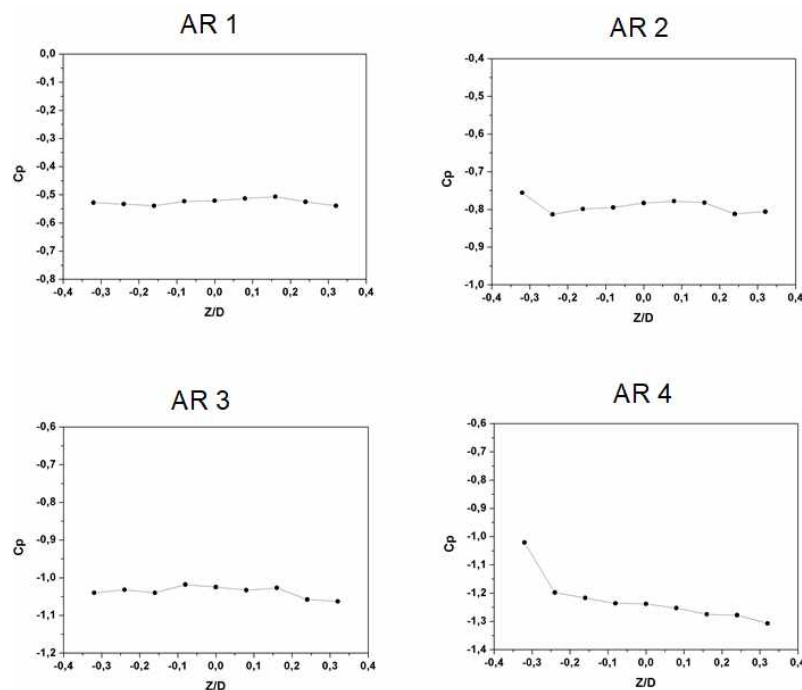
lateral e formam uma região de recirculação bem na região inferior das laterais dos cilindros.

Analisando a Figura 44, que mostra a distribuição de pressão dos pontos verticais da face lateral do cilindro, percebe-se que como esperado e já explicado para os pontos horizontais que os valores são negativos, mas que a região dos pontos mais baixos segue uma tendência mais dispersa e desordenada, principalmente para os corpos de maior razão de aspecto, sugerindo que os vórtices de base podem estar influenciando nossas estruturas como proposto por Wang et al. [3].

Técnicas de visualização experimental serão realizadas para tentar definir a existência dessa região e entender melhor o comportamento o escoamento.

Em relação as faces traseiras dos cilindros, a Figura 45 compara a distribuição de C_p dos pontos horizontais para todas as razões de aspecto.

Figura 45 – Comparação distribuição horizontal, face traseira – ARs



Fonte: Autor próprio

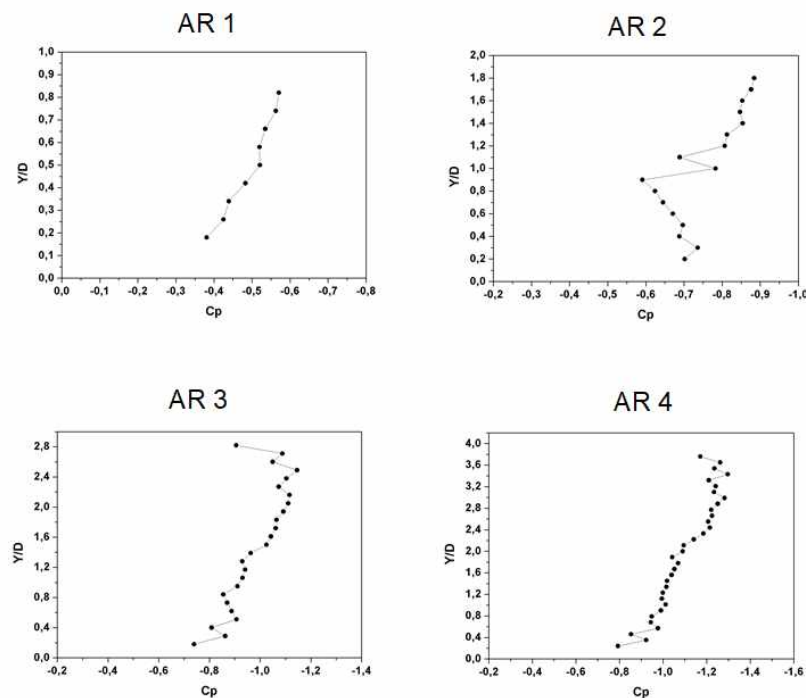
Observa-se que como sugere a teoria, a parte posterior do corpo se encontra em uma região de baixa pressão, onde o escoamento se desenvolve de maneira turbulenta, justificando os valores de C_p negativos encontrados.

Nota-se que o aumento da razão de aspecto, faz com que o C_p fique cada vez mais negativo, na região padrão de medição.

A medição sugere que na região central onde foi realizado as medições horizontais, o escoamento apresenta um comportamento “padrão” visto que as tomadas de pressão ao longo do comprimento seguem uma tendência quase linear, exceto no cilindro de AR 4 onde tivemos uma tendência não tão continua. O uso de “padrão” sugere que experimentalmente pode se deduzir tal afirmação, exigindo assim um estudo mais aprofundado para aferir com propriedade.

Já a Figura 46 compara a distribuição de C_p dos pontos verticais nas faces traseiras dos cilindros, para todas as razões de aspecto.

Figura 46 – Comparação distribuição vertical, face traseira – ARs



Fonte: Autor próprio

Os pontos verticais seguem a tendência de C_p negativo, como já explicado, mas observa-se que os pontos seguem uma certa tendência, mas alguns se dispersam sem obedecer um padrão, como pode ser observado com mais clareza no cilindro de AR 2, podendo ou não ser o efeito de um vórtice turbulento.

Conclui-se que na região posterior do corpo o escoamento se desenvolve de maneira turbulenta e de difícil previsão, a não ser utilizando técnicas avançadas de visualização, na seção que tratamos a respeito dos perfis de velocidade nessa região, discutimos a importância de um estudo mais aprofundado específico na região posterior do corpo.

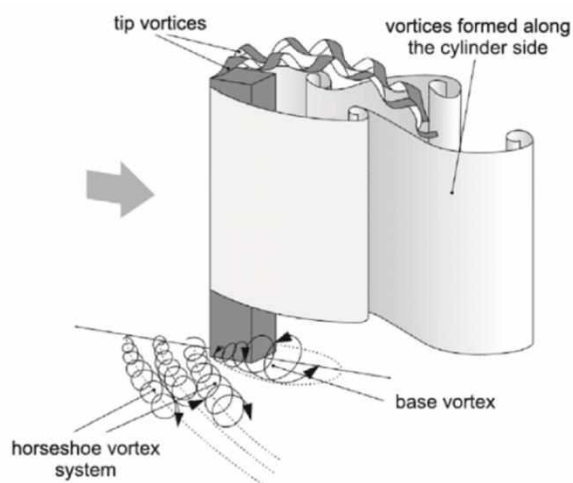
4.4. VISUALIZAÇÃO EXPERIMENTAL

Nesta seção será apresentada os resultados experimentais, referentes aos métodos de visualização do escoamento, utilizados neste trabalho.

A fim de comparar os resultados visuais para ambas as razões de aspecto, seguiu-se a mesma metodologia de preparo do corpo de prova, posicionamento de câmera, e tratamento das fotos.

Recorre-se novamente à Figura 7, onde a proposta de Wang et al. [3] nos mostra as quatro principais regiões que o escoamento assume, onde nessa seção experimentos foram realizados a fim de visualizar o comportamento do escoamento, e compara-los com a proposta de Wang et al. [3], sustentando ou não sua teoria.

Figura 7 – Visualização do escoamento passando por um cilindro de base retangular, evidenciando suas principais características assumidas



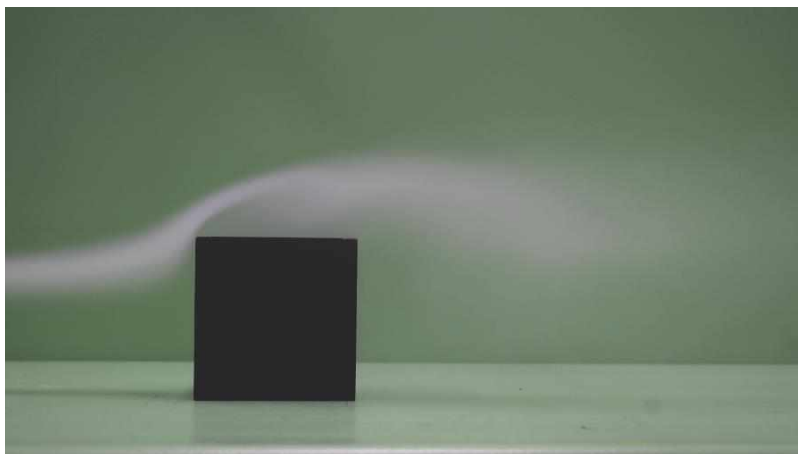
Fonte: Wang, 2004

4.4.1 VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO – MÉTODO COM GERADOR DE FUMAÇA

Utilizou-se o método de visualização de escoamento com gerador de fumaça, que dentro de suas limitações permitiu em seu melhor ângulo uma visão de perfil (2D) dos cilindros de base quadrada, evidenciando o desprendimento de vórtice na região de extremidade livre, se assemelhando bastante ao chamado vórtice de ponta, idealizado em Wang et al. [3].

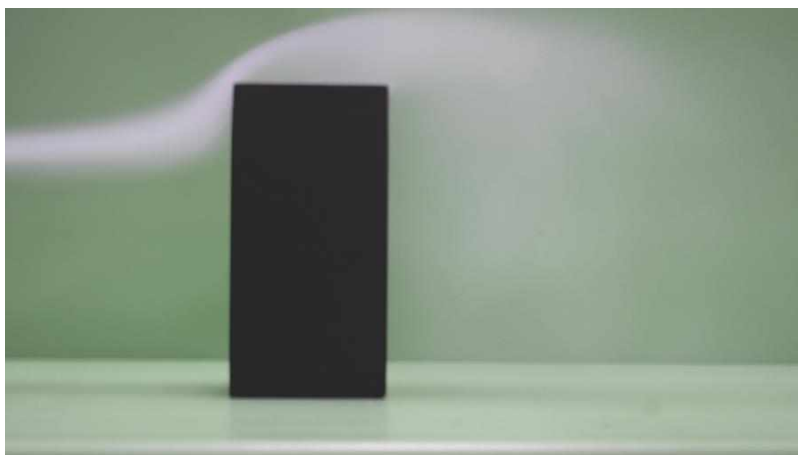
Imagens do escoamento tridimensional da parte turbulenta que se desenvolve na parte posterior do corpo, que evidenciam detalhes do mesmo não foram obtidos pelo método apresentado.

Figura 47 – Escoamento a 16m/s, razão de aspecto 1



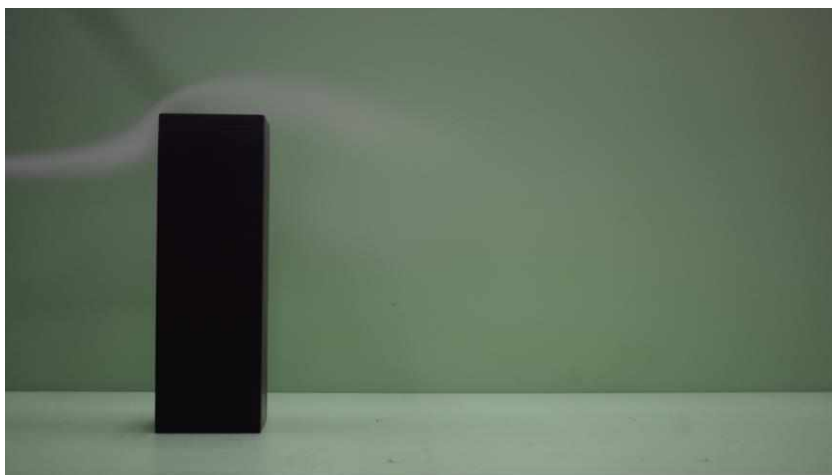
Fonte: Autor próprio

Figura 48 – Escoamento a 16m/s, razão de aspecto 2



Fonte: Autor próprio

Figura 49 – Escoamento a 16m/s, razão de aspecto 3



Fonte: Autor próprio

Figura 50 – Escoamento a 16m/s, razão de aspecto 4



Fonte: Autor próprio

Percebe-se que o quanto maior a razão de aspecto, menos o vórtice de ponta parece interagir nas regiões próximas a base, onde domina o vórtice de base e os laterais. Já por exemplo, no corpo de razão de aspecto 1 e 2, os recolamentos e recirculações oriundos do vórtice de ponta estão mais evidentes e parecem se combinar com os demais, deixando a região turbulenta ainda mais complicada.

4.4.2. VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO – MÉTODO CHINA CLAY

Como método complementar a visualização experimental com gerador de fumaça, utilizou-se o método China Clay, que dentro de suas limitações permitiu uma boa visualização dos efeitos dos vórtices ferradura, vórtices de base e laterais.

Efetou-se quatro fotos de posições idênticas para cada razão de aspecto estudada, como o cilindro tende a crescer muito com o aumento da razão de aspecto, algumas fotos podem não ter ficado com o melhor enquadramento dependendo da razão de aspecto, mas o padrão utilizado para o corpo de razão de aspecto 1, precisou ser utilizado para todos, a fim de uma comparação igualitária.

Nas seções subsequentes 4.4.2.1 a 4.4.2.4 serão apresentadas as imagens obtidas da visualização, enquanto a seção 4.4.2.5 discutirá as principais observações que podem ser aferidas.

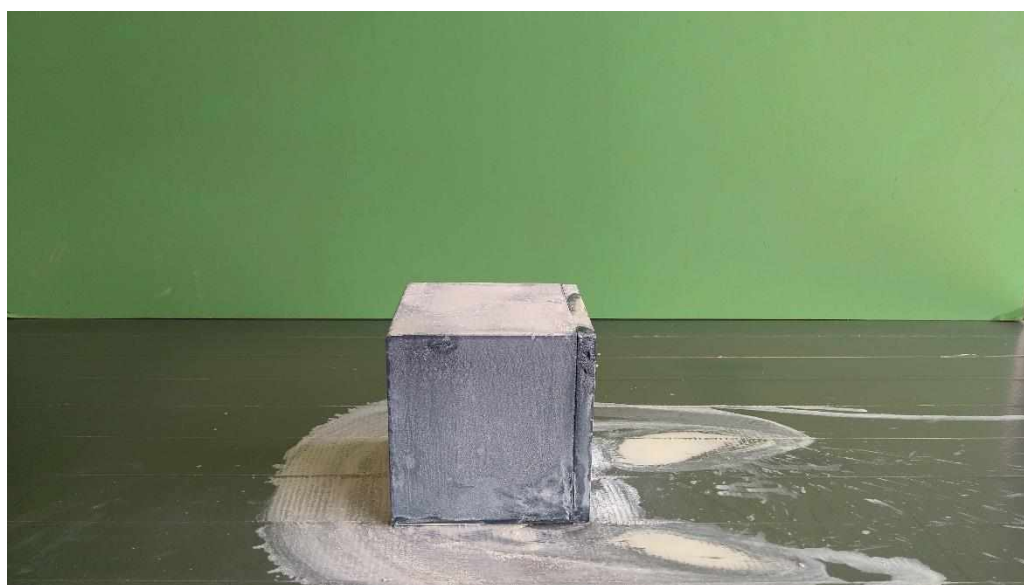
4.4.2.1. RAZÃO DE ASPECTO 1

Figura 51 – escoamento a 16m/s, Posição diagonal, razão de aspecto 1



Fonte: Autor próprio

Figura 52 – Escoamento a 16m/s, Posição lateral, razão de aspecto 1



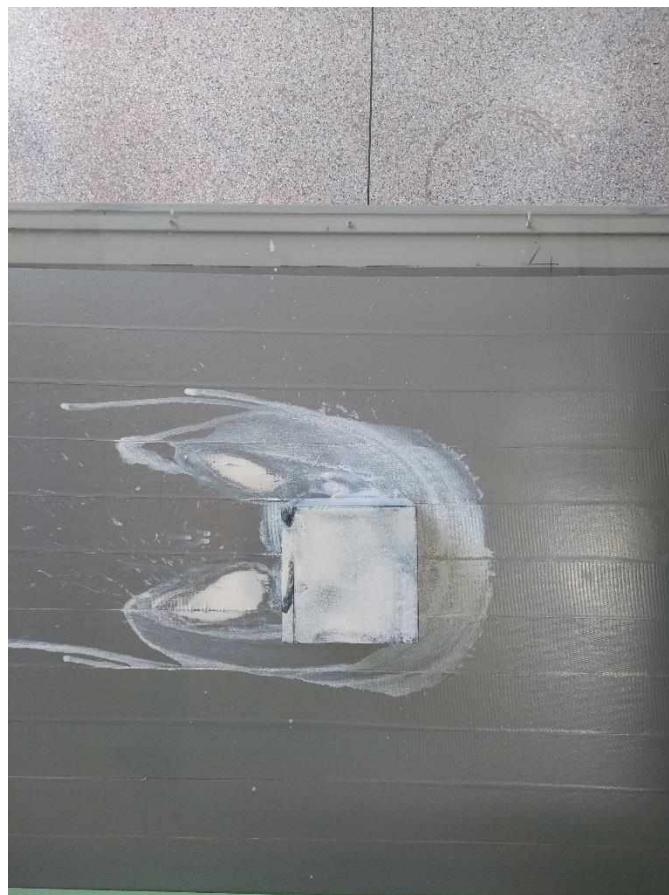
Fonte: Autor próprio

Figura 53 – Escoamento a 16m/s, Posição traseira, razão de aspecto 1



Fonte: Autor próprio

Figura 54 – Escoamento a 16m/s, Posição superior, razão de aspecto 1



Fonte: Autor próprio

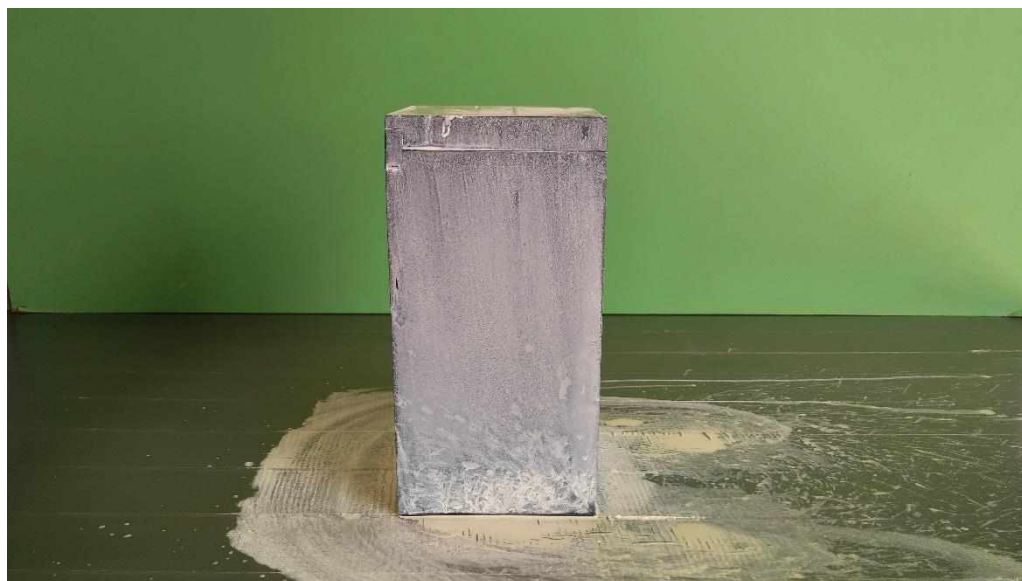
4.4.2.2. RAZÃO DE ASPECTO 2

Figura 55 – Escoamento a 16m/s, Posição diagonal, razão de aspecto 2



Fonte: Autor próprio

Figura 56 – Escoamento a 16m/s, Posição lateral, razão de aspecto 2



Fonte: Autor próprio

Figura 57 – Escoamento a 16m/s, Posição traseira, razão de aspecto 2



Fonte: Autor próprio

Figura 58 – Escoamento a 16m/s, Posição superior, razão de aspecto 2



Fonte: Autor próprio

4.4.2.3. RAZÃO DE ASPECTO 3

Figura 59 – Escoamento a 16m/s, Posição diagonal, razão de aspecto 3



Fonte: Autor próprio

Figura 60 – Escoamento a 16m/s, Posição lateral, razão de aspecto 3



Fonte: Autor próprio

Figura 61 – Escoamento a 16m/s, Posição traseira, razão de aspecto 3



Fonte: Autor próprio

Figura 62 – Escoamento a 16m/s, Posição superior, razão de aspecto 3



Fonte: Autor próprio

4.4.2.4. RAZÃO DE ASPECTO 4

Figura 63 – Escoamento a 16m/s, Posição diagonal, razão de aspecto 4



Fonte: Autor próprio

Figura 64 – Escoamento a 16m/s, lateral, razão de aspecto 4



Fonte: Autor próprio

Figura 65 – Escoamento a 16m/s, Posição traseira, razão de aspecto 4



Fonte: Autor próprio

Figura 66 – Escoamento a 16m/s, Posição superior, razão de aspecto 4



Fonte: Autor próprio

4.4.2.5. PRINCIPAIS OBSERVAÇÕES

Observa-se claramente algumas características comuns entre os corpos de prova de diferentes razões de aspecto, e dentro das limitações do método utilizado, recorrendo novamente à Figura 7, na proposta de Wang et al. [3] obtivemos informações interessantes.

Para todas as razões de aspecto observou-se claramente a influência e presença do chamado vórtice ferradura e seus desdobramentos auxiliando na formação das esteiras de vórtices.

A Figura 67 ampliou a Figura 54 mostradas anteriormente, que evidencia a marcação do vórtice ferradura e de uma região de recirculação na parte posterior do corpo.

Figura 67 – Vórtice ferradura e região de recirculação



Fonte: Autor próprio

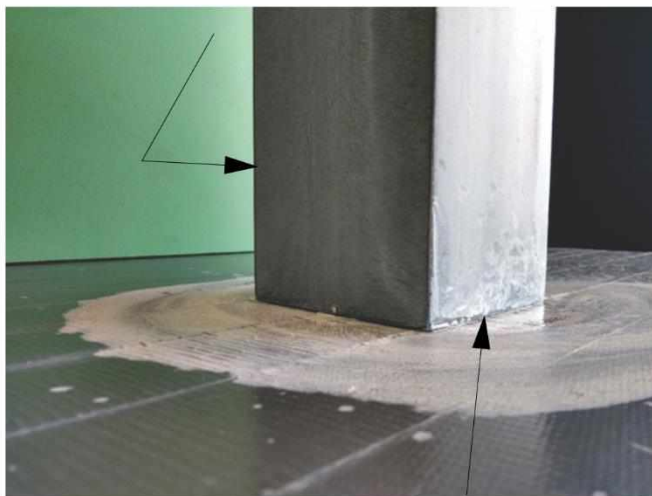
Na parte frontal e lateral vemos também uma característica comum entre as razões de aspecto, na frontal vemos indícios do fluido em contato com o obstáculo e caminhando para as laterais livres, já na lateral percebe-se a influência do vórtice de base e sua recirculação dando de encontro com a base inferior lateral dos cilindros.

Já os vórtices laterais aparentemente não se recolaram na região da face lateral, não interagindo assim com a face da estrutura, acredita-se que devido ao Reynolds alto após a região de descolamento, a esteira de vórtice se desenvolveu mais a posterior do corpo.

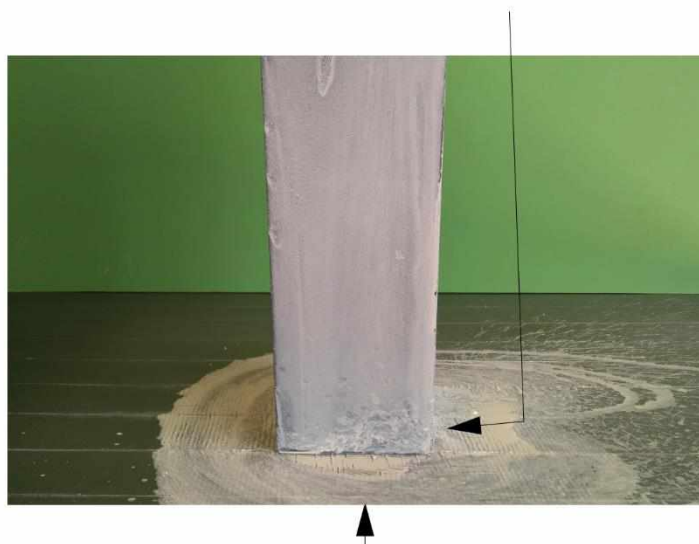
A Figura 68 ampliou a Figura 59 e 60 mostradas anteriormente, que evidencia a marcação da face frontal e do vórtice de base.

Figura 68 – Principais características observadas

Escoamento marcado no centro da face frontal, caminhando para as laterais



Região afetada pelo vórtice de base



Bolha de recirculação

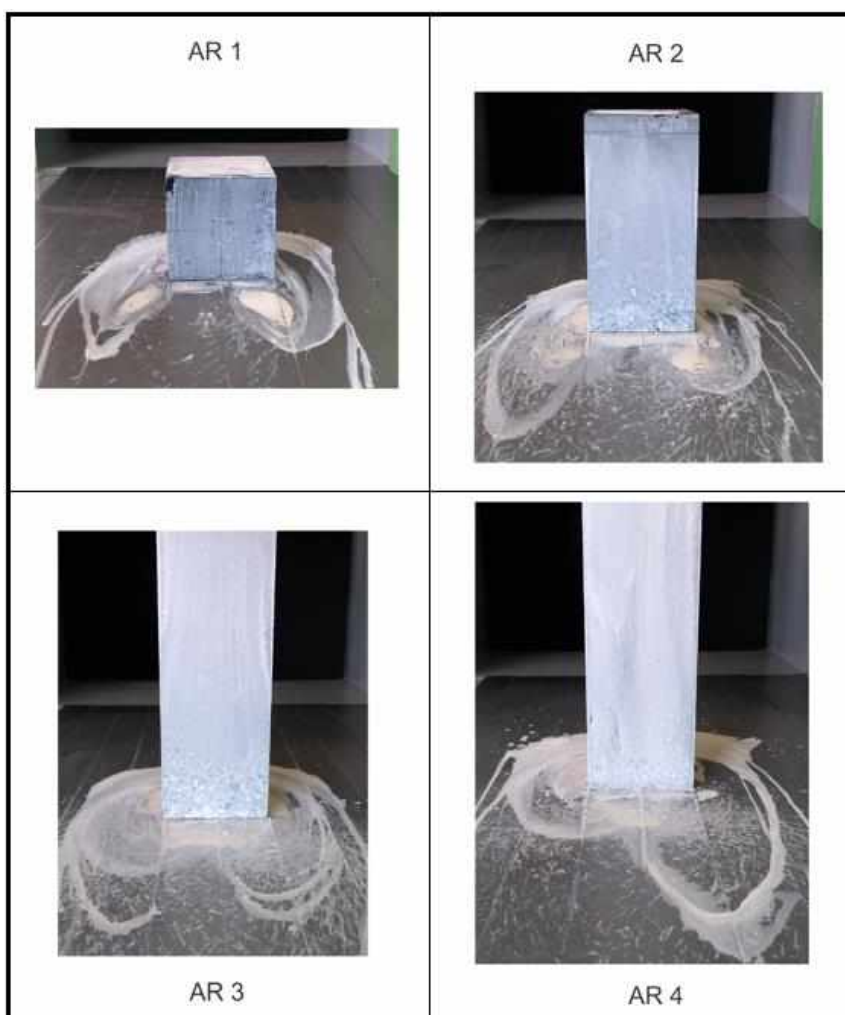
Fonte: Autor próprio

Na face traseira observa-se também uma característica comum entre as razões de aspecto, na região de contato entre a estrutura e o solo, vemos a marcação de uma bolha de recirculação, que interagiu com a estrutura marcando-a significativamente.

Já a grande maioria da extensão da face traseira não foi muito afetada, os corpos de menor razão de aspecto AR 1 e AR 2 até apresentam algumas marcações de interação fluido estrutura, já os maiores AR 3 e AR 4 estão bem uniformes na região mediana, sugerindo que os vórtices de ponta interagiram com mais intensidade na face traseira dos menores corpos, já para os maiores o vórtice provavelmente se desprendeu e foi recolocar em uma região aleatória que não conseguimos visualizar, mas que não afetou na região traseira do cilindro.

A Figura 69 ampliou e agrupou as regiões traseiras dos corpos mostradas anteriormente, evidenciando a marcação da face traseira, regiões de recirculação e desprendimento de vórtices.

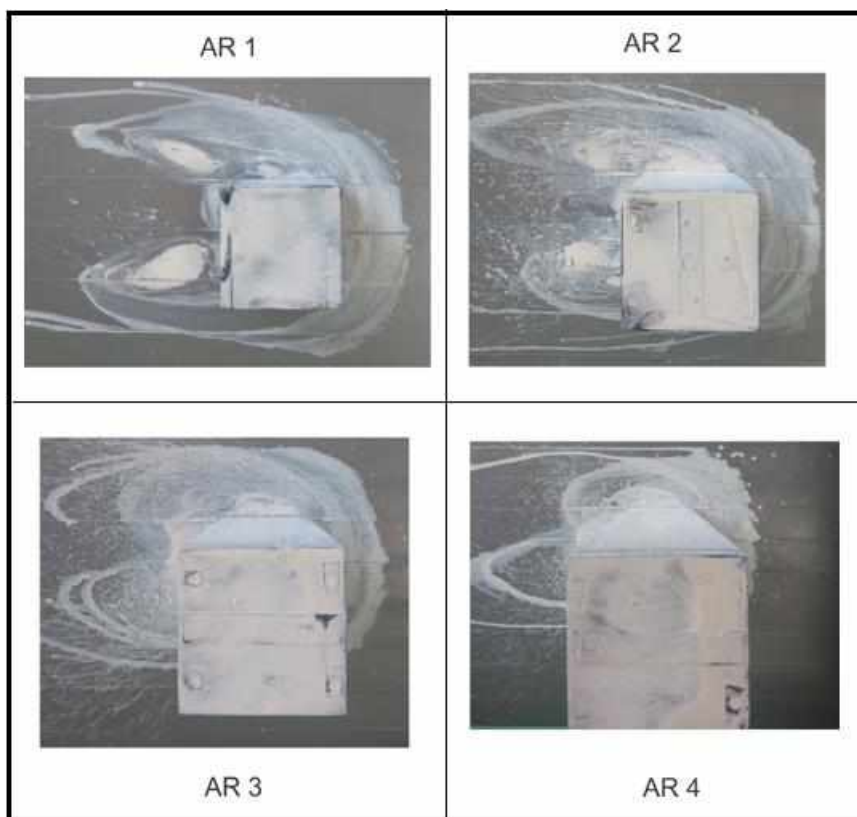
Figura 69 – Principais características observadas – Vista traseira



A Figura 70 auxilia na hipótese dada anteriormente: Já os vórtices laterais aparentemente não se recolaram na região da face lateral, não interagindo assim com a face da estrutura, acredita-se que devido ao Reynolds alto após a região de descolamento, a esteira de vórtice se desenvolveu mais a posterior do corpo. Onde observa-se a característica que o vórtice assume.

Nela também se observa a face superior e como ela foi afetada, as fotos não mostram características muito similares entre as razões de aspecto estudadas, e como não houve medição de C_p na região superior dos corpos, só a visualização experimental não foi suficiente para outras conclusões.

Figura 70 – Principais características observadas – Vista Superior



Fonte: Autor próprio

CAPÍTULO V

Conclusão

Um estudo experimental conduzido em túnel de vento, do escoamento passando por um cilindro de base quadrada finito foi realizado, variou-se a razão de aspecto em 1,2,3, e 4 para termos comparativos e obteve-se resultados qualitativos (visualizações experimentais) e quantitativos (características de arrasto, perfil de velocidade e distribuição de pressão).

Vimos que o perfil de velocidade na região posterior do corpo, para o posicionamento adotado, apresentou duas características distintas. Para as razões de aspecto 1 e 2 a característica apresentada sugere que existe na região, uma influência significativa dos vórtices de base e de ponta, característica essa não observada para os corpos de razão de aspecto 3 e 4.

O método de visualização experimental China Clay juntamente com os valores obtidos na distribuição de pressão na face traseira, fortifica o indício de que existe o enfraquecimento da influência da interação dos vórtices de base e de ponta para os cilindros de base quadrada de razão de aspecto 3 e 4.

Concluindo que existe uma razão de aspecto limite, conhecida como $AR_{crítico}$, em que essa tendência é notada, que para o nosso estudo se encontra em uma razão de aspecto entre $2 < AR_c \leq 3$.

Em relação a visualização do escoamento, observou-se com mais clareza a formação do vórtice de ponta, vórtice lateral, vórtice de base e vórtice ferradura, como proposto por Wang et al. [3], contribuindo com a teoria de que a contribuição desses

vórtices são os mais marcantes observados quando se trata de cilindros de base quadrada finitos.

Nota-se também que o estudo do escoamento passante por cilindros de base quadrada finitos, fornece uma grande extensão de abordagens a serem realizadas, onde o presente trabalho se dedicou a algumas delas, trabalhos futuros poderão ser realizados, voltando o enfoque principalmente a região de esteira turbulenta (pós contato com o corpo), região essa de caráter extremamente complexo e variável.

Uma abordagem numérica mantendo os mesmos parâmetros adotados neste trabalho é sugerido, contribuindo para a validação dos resultados e demais propostas que possam ser desenvolvidas posteriormente.

Conclui-se que em termos do que foi proposto como objetivo do trabalho, os resultados foram excelentes e de grande contribuição para a literatura a respeito do tema.

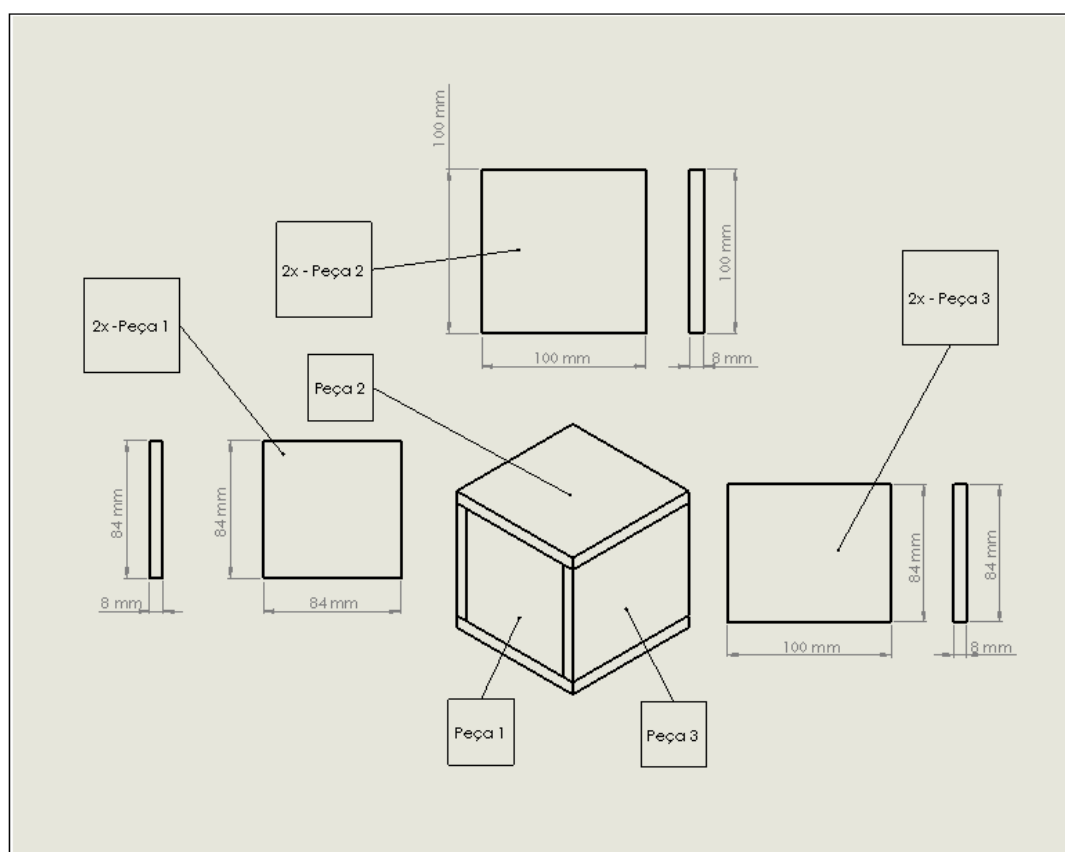
REFERÊNCIAS

1. Potter, M. C., Wiggert, D. C., "Mecânica dos Fluidos", Thomson, 2004.
2. Almeida, O.; 2001. Simulação numérica de grandes escalas do escoamento transicional ao redor de cilindros de base quadrada e retangular. Dissertação de Mestrado. UNESP – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira –SP, Brasil, 9 p.
3. Wang, H.F., 2004. Flow structure around a finite-length square prism. In: The 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, Australia, University of Sydney, September.
4. Sakamoto, H., Moriya, M., Taniguchi, S., and Arie, M., 1982. The form drag of three-dimensional bluff bodies immersed in turbulent boundary layers," ASME J. Fluids Eng., 104, pp. 326–334.
5. Sakamoto, H., and Oiwake, S., 1984. Fluctuating Forces on a rectangular prism and a circular cylinder placed vertically in a turbulent boundary layer, ASME J. Fluids Eng., 106, pp. 160-166.
6. Sakamoto, H., 1985. Aerodynamic forces acting on a rectangular prism placed vertically in a turbulent boundary layer. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 18(2), 131–151.
7. Castro, IP., Robins, AG., 1977. The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams. J Fluid Mech; 79, Part 2:307–335.
8. Hunt, J.C.; Abell, C.J.; Peterka, J.A.; and Woo, H.; 1978. Kinematical studies of the flow around free or surface-mounted obstacles: applying topology to flow visualization, J. Fluid Mech., 86, , Part 1:179–200.
9. MccClean, J.F., Sumner, D., 2012. Aerodynamic forces and vortex shedding for surface-mounted finite square prisms and the effects of aspect ratio and incidence angle. In: Proceedings of the ASME 2012 Fluids Engineering Division Summer Meeting (FEDSM2012), Puerto Rico, USA, Paper No. FEDSM2012- 72005.

10. Woo, H.G.C.; Peterka J.A.; and Cermak, J.E.; 1977. Wind tunnel measurements in the wakes of structures, NASA CR-2806.
11. DANTEC DYNAMICS A/S. *MiniCTA Anemometer Package How to get started - a quick Guide*. 2004.
12. Yen, S. C., & Yang, C. W. (2011). Flow patterns and vortex shedding behavior behind a square cylinder. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(8), 868–878.

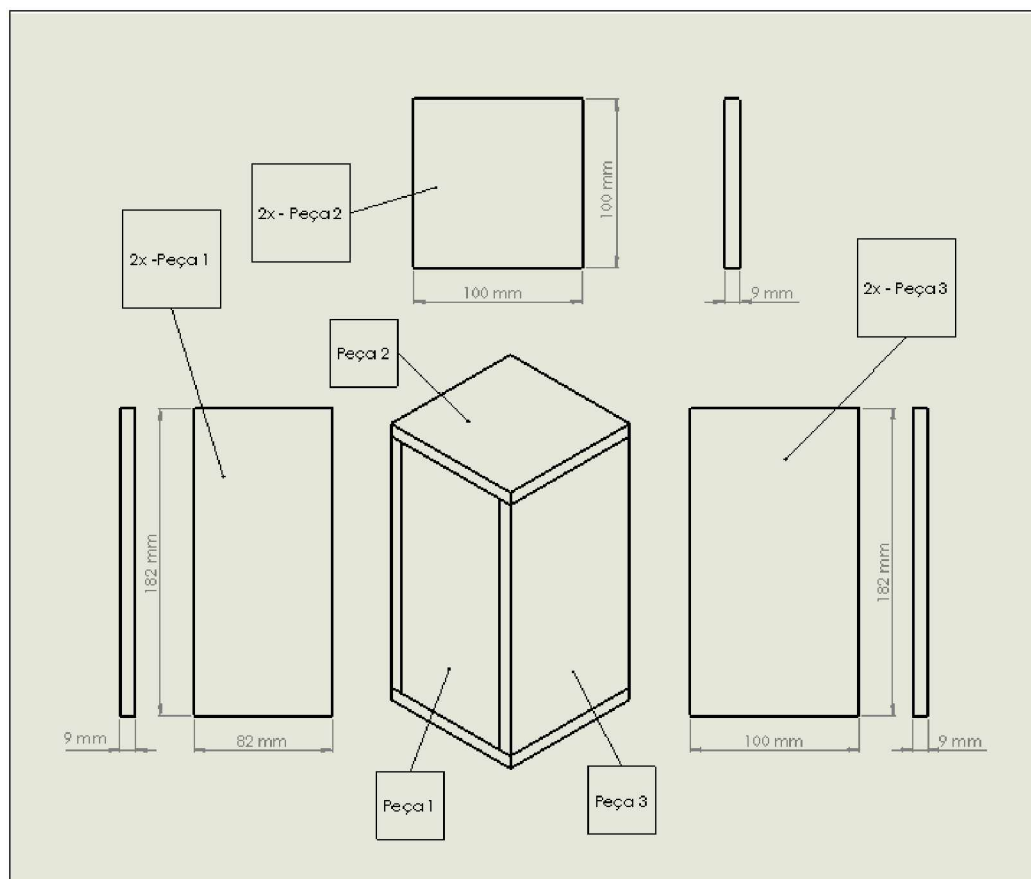
APÊNDICE 1

Figura 71 – Corpo de prova AR1 – CAD legendado



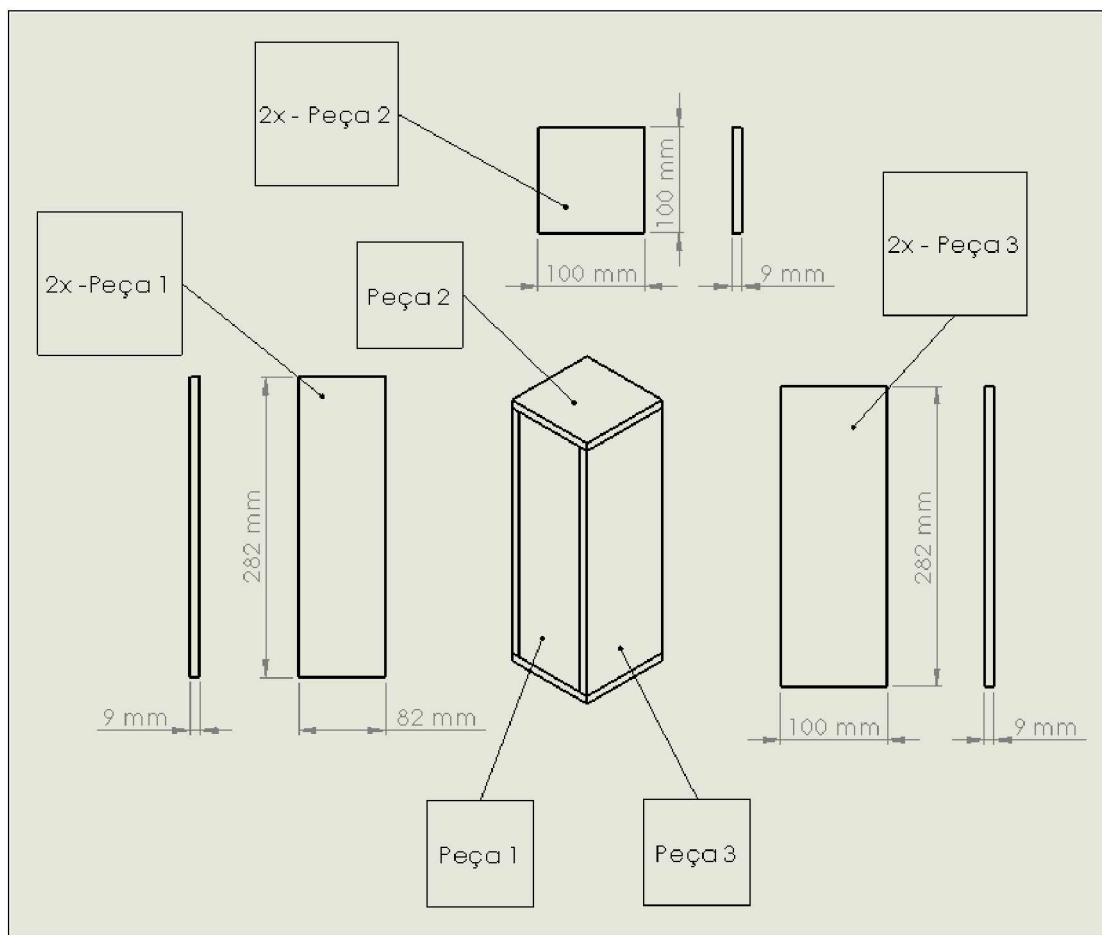
Fonte: Autor próprio

Figura 72 – Corpo de prova AR2 – CAD legendado



Fonte: Autor próprio

Figura 73 – Corpo de prova AR3 – CAD legendado



Fonte: Autor próprio

Figura 74 – Corpo de prova AR4 – CAD legendado

