

FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ALEX ROSA DEL PIERO

CARLOS ELIÉZIO GIRO

RAFAEL VICENTE PIMASSONI

THIAGO DOS SANTOS TAVARES

**ENSAIOS AERODINÂMICOS EM UM PERFIL NACA 23015 E NACA 66(2)-215
UTILIZANDO O TÚNEL DE VENTO DAS FAACZ**

Aracruz

2018

ALEX ROSA DEL PIERO

CARLOS ELIÉZIO GIRO

RAFAEL VICENTE PIMASSONI

THIAGO DOS SANTOS TAVARES

**ENSAIOS AERODINÂMICOS EM UM PERFIL NACA 23015 E NACA 66(2)-215
UTILIZANDO O TÚNEL DE VENTO DAS FAACZ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenadoria do Curso de Engenharia Mecânica das Faculdades Integradas de Aracruz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Harerton Dourado

Aracruz

2018

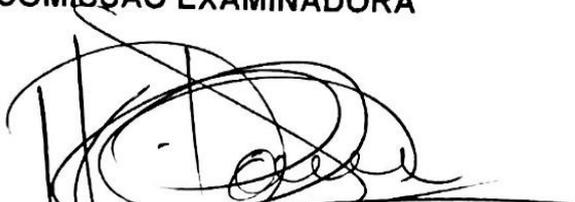
**ALEX ROSA DEL PIERO
CARLOS ELIÉZIO GIRO
RAFAEL VICENTE PIMASSONI
THIAGO DOS SANTOS TAVARES**

**ENSAIOS AERODINÂMICOS EM UM PERFIL NACA 23015 E NACA 66(2)-215
UTILIZANDO O TÚNEL DE VENTO DAS FAACZ**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à coordenadoria do curso de Engenharia Mecânica das Faculdades Integradas de Aracruz, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Aprovado em 14 de Novembro de 2018

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. D.Sc. ~~HARBERTON OLIVEIRA DOURADO~~

Faculdades Integradas de Aracruz

Orientador



Prof. Me. JOÃO PAULO CALIXTO DA SILVA

Faculdades Integradas de Aracruz

Examinador interno



Prof. Me. WARLEN ALVES MOFARDINI

Instituto Federal do Espírito Santo - IFES

Examinador externo

RESUMO

A aerodinâmica tem grande importância nos estudos frequentemente realizados por indústrias do ramo automobilístico e aeronáutico, quando estes visam a redução de combustível, maior estabilidade e o alcance da velocidade máxima através de estudos em túneis de vento. O túnel de vento é considerado por especialistas desses ramos como uma importante ferramenta de análise do escoamento em torno de corpos, como por exemplo, perfis de asa através de ensaios aerodinâmicos no interior da seção de testes. O presente trabalho, através de ensaios aerodinâmicos no túnel de vento das Faculdades Integradas de Aracruz tem como objetivo avaliar a influência do ângulo de ataque nos coeficientes de arrasto e sustentação de perfis de asa e para avaliar essa influência foi necessária a implementação de instrumentos de medição na seção de testes do túnel de vento que permitissem a medição das forças de arrasto e sustentação dos perfis estudados. O método adotado para as medições de Força de Sustentação foi a utilização de uma balança de precisão sob o perfil podendo assim avaliar a variação dos pesos do mesmo com fluxo de ar do túnel de vento ligado e desligado. Através dessa variação foi possível calcular as forças e os coeficientes de sustentação. Para a obtenção das forças de arrasto foi adotada uma análise de balanço de quantidade de movimento num volume de controle, com a realização de medições de velocidade na entrada e na saída da seção de testes utilizando um tubo de pitot e um sensor de pressão diferencial. Os dados, que foram obtidos com o auxílio de uma placa arduino, permitiram o cálculo das forças e dos coeficientes de arrasto. Com todos os dados disponíveis como resultado das medições realizadas, foram gerados gráficos e realizado um comparativo entre os dados obtidos no túnel de vento das Faacz e os dados experimentais fornecidos pela literatura usada como base para os estudos. Através desse comparativo foi obtido como resultado para ambos os perfis um aumento dos coeficientes de arrasto e sustentação à medida que se aumentou o ângulo de ataque de 0° a 45° dentro das condições existentes no túnel de vento das Faacz. Foi verificado uma sustentação menor e um arrasto maior em relação aos dados das seções originais fornecidos pela literatura estudada. Os resultados encontrados podem ter sido influenciados pelo fator de bloqueio devido às dimensões dos perfis testados.

Palavras Chave: Aerodinâmica, Força de arrasto, Força de Sustentação, Túnel de Vento, Coeficiente de Arrasto e Coeficiente de Sustentação.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Relação do Ângulo de Ataque com o Coeficiente de Sustentação	18
Figura 2: Tubo de Pitot-Prandtl utilizado para medir velocidade na seção de testes do túnel de vento.....	21
Figura 3: Dinamômetros para medição de força de Arrasto e Sustentação do perfil	22
Figura 4: Modelo 3D do Túnel de Vento.....	23
Figura 5: Túnel de Vento Montado.	24
Figura 6: Escoamento em torno do perfil de asa no Túnel de Vento das Faacz.	25
Figura 7: Esquemática do escoamento em torno de uma asa de avião.	26
Figura 8: Simulação de escoamento entre dois edifícios no Túnel de vento das Faacz.	26
Figura 9: Esquemática do escoamento entre dois edifícios.....	26
Figura 10: Esquemático do túnel de vento com os instrumentos instalados.	29
Figura 11: Esquemático dos perfis a serem fabricados.....	29
Figura 12: Disposição dos Pontos de pressão e Velocidade.	30
Figura 13: Vista Frontal do volume de controle com os Tubos de Pitot.	32
Figura 14: Vista Superior do volume de controle com os Tubos de Pitot.	32
Figura 15: Esquemático da montagem do perfil sobre a balança.....	34
Figura 16: Perfil NACA 66(2)-215 apoiado sobre a balança.	35
Figura 17: Perfil NACA 23015 apoiado sobre a balança.	35
Figura 18: Variação do ângulo de ataque do Perfil NACA 66(2)-215.....	36

Figura 19: Variação do ângulo de ataque do Perfil NACA 23015.....	36
Figura 20: Tubo de Pitot para medição das velocidades médias.	38
Figura 21: Sensor de Pressão Diferencial e Placa Arduino.....	38
Figura 22: Perfil NACA 66(2)-215.....	39
Figura 23: Perfil NACA 23015.	39
Figura 24: Tubos de Pitot na entrada e saída da seção de testes.	48

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Aumento do Coeficiente de Sustentação com a variação do ângulo de ataque	17
Gráfico 2: Aumento do Coeficiente de Arrasto com a variação do Ângulo de ataque	17
Gráfico 3: Coeficiente de Sustentação versus ângulo de ataque para o Perfil NACA 23015	19
Gráfico 4: Coeficiente de Sustentação versus ângulo de ataque para o Perfil NACA 66(2)-215.....	19
Gráfico 5: Coeficiente de Arrasto versus ângulo de ataque para o Perfil NACA 23015	20
Gráfico 6: Coeficiente de Arrasto versus ângulo de ataque para o Perfil NACA 66(2)-215	20
Gráfico 7: Comportamento da Velocidade Média do Fluxo.	40
Gráfico 8: Coeficiente de Sustentação versus ângulo de ataque NACA 23015.	44
Gráfico 9: Coeficiente de Sustentação x ângulo de ataque NACA 66(2)-215.	45
Gráfico 10: Comparativo dos dados de Sustentação Perfil NACA 23015.	46
Gráfico 11: Comparativo dos dados de Sustentação Perfil NACA 66(2)-215.....	46
Gráfico 12: Coeficiente de arrasto x ângulo de ataque NACA 23015.....	50
Gráfico 13: Coeficiente de arrasto x ângulo de ataque NACA 66(2)-215.	50
Gráfico 14: Comparativo dos dados de Arrasto Perfil NACA 23015.....	51
Gráfico 15: Comparativo dos dados de Arrasto Perfil NACA 66(2)-215.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Velocidade Média do Fluxo de ar.	40
Tabela 2: Massa do Perfil NACA 66(2)-215.	41
Tabela 3: Massa do Perfil NACA 23015.	42
Tabela 4: Massa Indicada do Perfil NACA 66(2)-215.	42
Tabela 5: Massa Indicada do Perfil NACA 23015.	43
Tabela 6: Força e Coeficiente de Sustentação Perfil NACA 23015.	43
Tabela 7: Força e Coeficiente de Sustentação Perfil NACA 66(2)-215.	44
Tabela 8: Forças e coeficientes de arrasto NACA 23015.	49
Tabela 9: Forças e coeficientes de arrasto NACA 66(2)-215.	49
Tabela 10: Fator de Bloqueio NACA 23015.	53
Tabela 11: Fator de Bloqueio NACA 66(2)-215.	54

LISTA DE SIGLAS

CONEM – Conselho Nacional de Engenharia Mecânica

FAACZ – Faculdades Integradas de Aracruz

GESTE – Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos

NACA – National Advisory Committee for Aeronautics

NASA – National Aeronautics and Space Administration

Univap – Universidade Vale do Paraíba

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{F} – Força Resultante.

F_D = Força de Arrasto.

F_L = Força de Sustentação.

C_D = Coeficiente de Arrasto.

C_L = Coeficiente de Sustentação.

V = Velocidade do escoamento

ρ = Massa Específica do fluido

μ – Viscosidade Dinâmica do fluido

P_0 – Pressão de Estagnação

P – Pressão Estática

α – Ângulo de ataque do perfil

u_1 = Velocidade na saída da seção de testes

V_∞ = Velocidade na entrada da seção de testes

P_{inicial} = Força Peso Inicial

P_{final} = Força Peso Final

M_i = Massa Inicial

M_f = Massa Final

g = Aceleração da gravidade

A = Área do perfil

w = Largura do Perfil

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	ESCOAMENTO EM TORNO DE UM AEROFÓLIO	15
3.2	INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE ATAQUE NOS VALORES DE COEFICIENTES DE ARRASTO E SUSTENTAÇÃO	16
3.3	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO EM TÚNEIS DE VENTO DIDÁTICOS	21
4	METODOLOGIA	23
4.1	TÚNEL DE VENTO DIDÁTICO DA _s FAACZ	23
4.1.1	Dimensões do Túnel de Vento da Faacz	24
4.1.2	Visualização do escoamento no Túnel de Vento	25
4.2	ESCOLHA DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	27
4.3	INSTALAÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO NA SEÇÃO DE TESTES DO TÚNEL DE VENTO	28
4.4	FABRICAÇÃO DOS PERFIS DE ASA PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES AERODINÂMICOS	29
4.5	TESTES AERODINÂMICOS NO TÚNEL DE VENTO	30
4.5.1	Medição de Velocidade	30
4.5.2	Medição de Força de Arrasto	31
4.5.3	Medição de Força de Sustentação	33
4.5.4	Cálculo dos Coeficientes de Arrasto e de Sustentação	36
4.6	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1	VELOCIDADE MÉDIA DO FLUXO	40
5.2	FORÇA E COEFICIENTE DE SUSTENTAÇÃO	41
5.3	FORÇA E COEFICIENTE DE ARRASTO	47
5.4	FATORES QUE PODEM AFETAR OS RESULTADOS	53
5.4.1	Dimensão dos Perfis	53
5.4.2	Fator de Bloqueio	53
6	CONCLUSÃO	55
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1 INTRODUÇÃO

A aerodinâmica é o estudo do movimento de fluidos gasosos, relativo às suas propriedades e características, e às forças que exercem em corpos sólidos neles imersos (Rodrigues, 2014). Seu estudo é constantemente aplicado em setores industriais como automobilístico e aeronáutico, por exemplo, visando à redução do consumo de combustível ou a otimização do desempenho por meio de análises comportamentais do escoamento em torno das superfícies externas de um automóvel ou avião. Com isso, de forma geral, somente ganhou grande importância com o surgimento destes meios de transporte que precisavam se locomover tendo o menor atrito possível com o ar buscando alcançar uma maior eficiência em seus projetos (Rodrigues, 2014). Em veículos terrestres estes estudos buscam minimizar a sustentação e o arrasto visando a estabilidade do veículo, a economia de combustível e o alcance da velocidade máxima do mesmo. Quando a análise é voltada para as asas, o objetivo é maximizar a sustentação e minimizar o arrasto buscando uma maior estabilidade da aeronave.

De acordo com Júnior (2012), um Túnel de Vento pode ser considerado como uma importante ferramenta nas pesquisas de fenômenos aerodinâmicos em corpos expostos a escoamentos, permitindo a realização de determinados tipos de ensaios aerodinâmicos que ainda não foram possíveis de serem produzidos efetivamente em simulações realizadas por computadores. Devido a essa facilidade de realização desses estudos, instituições de ensino estão adotando a utilização dessa ferramenta em seus laboratórios proporcionando aos seus alunos e professores uma melhor compreensão dos conteúdos abordados relacionados ao comportamento de fluidos em um determinado tipo de escoamento.

As análises realizadas com o intuito de reduzir o atrito entre a superfície e o ar podem ser desenvolvidas por meio de testes aerodinâmicos em túneis de vento ou por meio de simulações numéricas, sendo que as utilizações de Túneis de Vento são as mais adotadas devido à possibilidade de uma visualização real do comportamento do escoamento ao redor das estruturas, por exemplo, em torno de aerofólios ou perfis aerodinâmicos. Estas análises provocaram um grande salto nos estudos da aerodinâmica (RODRIGUES, 2014).

Em um estudo realizado em veículos de carga rodoviários através de simulações numéricas em um túnel de vento mostra que foi possível obter uma redução no consumo de combustível entre 30,2% e 34,7%, a depender da carga total do veículo e a velocidade de tráfego do mesmo. Foi possível obter estes resultados através de estudos da aerodinâmica na parte superior da cabine destes veículos podendo comprovar a eficácia dessa análise quando se visa economia de combustível (OLIVEIRA et al, 2016).

No ano de 2017, por meio de uma Iniciação Científica construiu-se um Túnel de Vento Didático que passou a fazer parte do Laboratório de Fluidos das Faculdades Integradas de Aracruz. O projeto analisado teve como objetivo a construção de um túnel de vento de baixo custo para equipar o laboratório da Faacz e auxiliar alunos e professores (SARTORI, 2017). No entanto, o Túnel de Vento foi projetado somente para a visualização do escoamento em torno de uma superfície sem a possibilidade de obtenção de algumas propriedades relacionadas ao mesmo.

Devido ao Túnel de Vento Didático das Faculdades Integradas de Aracruz não fornecer condições de obtenção desses valores, uma das propostas do presente trabalho é implementar Instrumentos de Medição em sua Seção de Teste possibilitando a mensuração de determinadas propriedades importantes referentes ao escoamento por meio de ensaios aerodinâmicos, permitindo assim aos alunos uma melhor avaliação e entendimento de seu comportamento através da interpretação dos resultados provenientes destes ensaios.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência do ângulo de ataque nos coeficientes de arrasto e sustentação de um perfil NACA 23015 e NACA 66(2)-215 através de ensaios aerodinâmicos no túnel de vento das Faacz.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar instrumentos de medição na seção de testes do túnel de vento das Faacz.
- Realizar medições de força de arrasto e sustentação dos perfis NACA 23015 E NACA 66(2)-215 variando o ângulo de ataque.
- Determinar os coeficientes de arrasto e de sustentação dos perfis estudados e comparar com os resultados encontrados na literatura.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ESCOAMENTO EM TORNO DE UM AEROFÓLIO

O escoamento incompressível de um gás, como é o caso do escoamento do ar sobre uma asa de avião, pode ser estudado através da equação de Bernoulli. Esta equação diz que a pressão total do escoamento (desconsiderando perdas de atrito) é constante sendo a pressão total a soma da pressão estática e da pressão dinâmica. Se a pressão dinâmica acima da asa (velocidade maior) for menor que a de baixo (velocidade menor) temos a formação da força de sustentação permitindo que o avião permaneça no ar.

A velocidade do ar na parte superior da asa, ou aerofólio, é maior devido as partículas percorrerem uma distância maior no mesmo intervalo de tempo quando comparadas com a superfície inferior da asa, logo, a pressão é menor criando uma força de sustentação de baixo para cima (RODRIGUES, 2014).

Segundo Peixoto (2004) a importância de estudos de um perfil isolado em um Túnel de Vento é dada pela permissão de determinar os coeficientes aerodinâmicos e desta forma o seu desempenho, visto que estão diretamente relacionados. De acordo com o mesmo autor a indústria aeronáutica investe nestes estudos com o intuito de obter um melhor perfil de asa que garanta uma maior força de sustentação e uma menor força de arraste. Para se avaliar geometrias aerodinâmicas em duas dimensões, utiliza-se de formatos que representam a seção de determinada asa, chamadas de perfil de asa ou aerofólio e na avaliação desses comportamentos aerodinâmicos são utilizados modelos convencionais ou padronizados de aerofólios conhecidos como modelos NACA (the *National Advisory Committee for Aeronautics*), o predecessor da NASA (Silva, 2016). De acordo com a metodologia deste presente trabalho também serão usados esses perfis padronizados nos estudos.

3.2 INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE ATAQUE NOS VALORES DE COEFICIENTES DE ARRASTO E SUSTENTAÇÃO

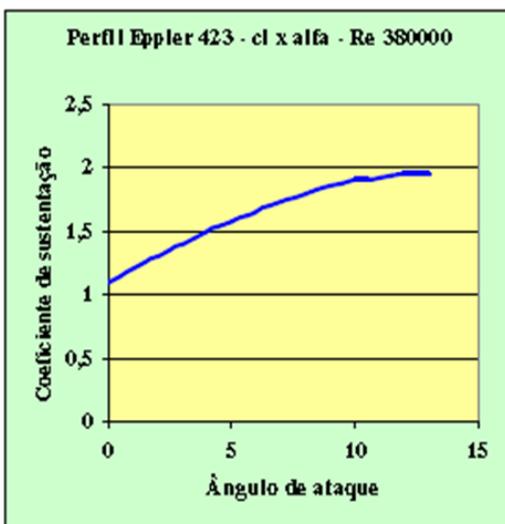
Um bom dimensionamento da aeronave é crucial para a segurança e desempenho da mesma. Para isso, diversas variáveis devem ser levadas em consideração tais como, vento, perfil da asa, dentre outras. Contudo, avaliar tais parâmetros em escala real é inviável devido ao seu alto custo e, para isso, utilizam-se modelos em escala reduzida a fim de obter semelhanças geométrica, cinemática e/ou dinâmica. A semelhança é expressa pelos números adimensionais chamados de coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto. Esses coeficientes relacionam as forças de sustentação e arrasto com a pressão dinâmica no objeto em estudo.

Quanto menor o coeficiente, menores as forças de sustentação e de arrasto. No caso de aeronaves, o coeficiente de sustentação representa um importante parâmetro no cálculo da força de sustentação, esta responsável por manter a aeronave em voo. Os dois coeficientes são parâmetros adimensionais, ou seja, não possuem dimensões. No estudo de perfis aerodinâmicos, ambos os apresentam sua importância e, dessa forma, é possível calcular as forças atuantes nos perfis com diferentes tamanhos, mas que respeitem os critérios de similaridade geométrica e dinâmica entre os mesmos.

O coeficiente de arrasto pode variar de acordo com o ângulo de ataque de um aerofólio, se o ângulo de ataque é pequeno a camada limite permanece “colada” ao aerofólio e o arrasto é relativamente pequeno, quando para ângulos maiores o arrasto aumenta de modo significativo (ARNOLDI, 2011). Segundo o mesmo autor a maior parte das informações relacionadas ao arrasto em objetos é resultado de numerosos experimentos realizados em túneis de vento dentre outros dispositivos.

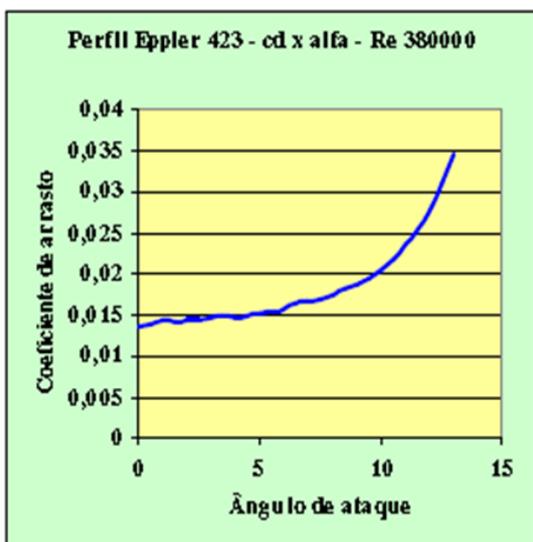
O ângulo de ataque representa um parâmetro que influi decisivamente na capacidade de sustentação do perfil (RODRIGUES, 2014). Os gráficos 1 e 2 mostram os resultados de um experimento realizado utilizando um perfil de asa EPPLER 423, onde se variou seu ângulo de ataque entre 0° e 15° e se pode comprovar um aumento nos coeficientes de arrasto e sustentação.

Gráfico 1: Aumento do Coeficiente de Sustentação com a variação do ângulo de ataque



Fonte: Rodrigues, 2014

Gráfico 2: Aumento do Coeficiente de Arrasto com a variação do Ângulo de ataque

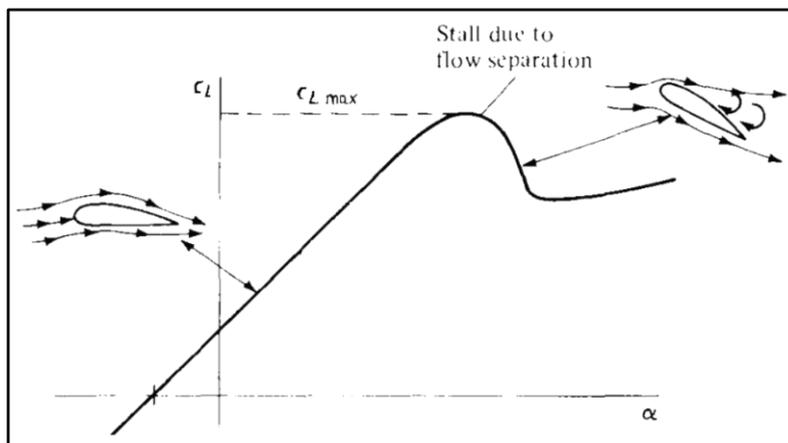


Fonte: Rodrigues, 2014

Segundo Freitas *et al* (2015) há um aumento linear do coeficiente de sustentação a medida que aumenta o ângulo de ataque. De acordo com o mesmo autor os coeficientes de arrasto e sustentação são facilmente determinados se estiverem perante um ambiente controlado (túnel de vento), onde possa manipular todas as variáveis e calcular valores das Forças de Sustentação e Arrasto. Na Figura 1 o autor

mostra o comportamento do coeficiente de sustentação a medida que variamos o ângulo de ataque de um perfil de asa.

Figura 1: Relação do Ângulo de Ataque com o Coeficiente de Sustentação

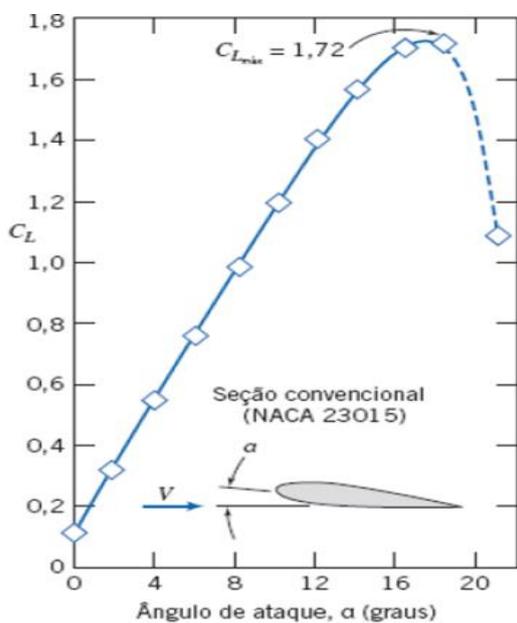


Fonte: Freitas, 2015

Os coeficientes de Arrasto e de Sustentação para um aerofólio são funções do ângulo de ataque, a medida que se aumenta este ângulo os coeficientes aumentam. O coeficiente de Sustentação aumenta gradativamente até um certo ponto, a partir deste ele diminui bruscamente, este ponto é chamado de estol. O estol do aerofólio acontece quando a separação do escoamento ocorre sobre a maior porção do extradorso do aerofólio (FOX, MCDONALD E PRITCHARD, 2016).

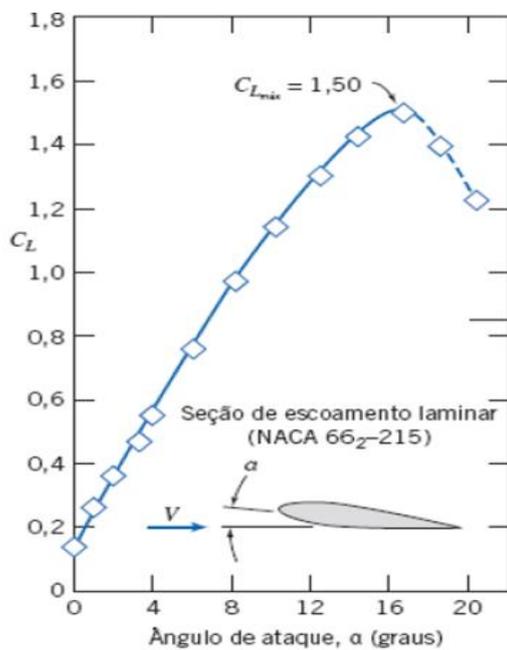
Testes realizados utilizando os perfis NACA 23015 e NACA 66(2)-215 comprovam que aumentando o ângulo de ataque há um aumento nos coeficientes de arrasto e sustentação (FOX, MCDONALD E PRITCHARD, 2016 apud ABBOTT E VON DOENHOFF, 1959). Os gráficos 3 e 4 relacionam o aumento do Coeficiente de Sustentação com o aumento do ângulo de ataque e os Gráficos 5 e 6 relacionam o aumento do Coeficiente de Arrasto com o aumento do ângulo de ataque.

Gráfico 3: Coeficiente de Sustentação versus ângulo de ataque para o Perfil NACA 23015



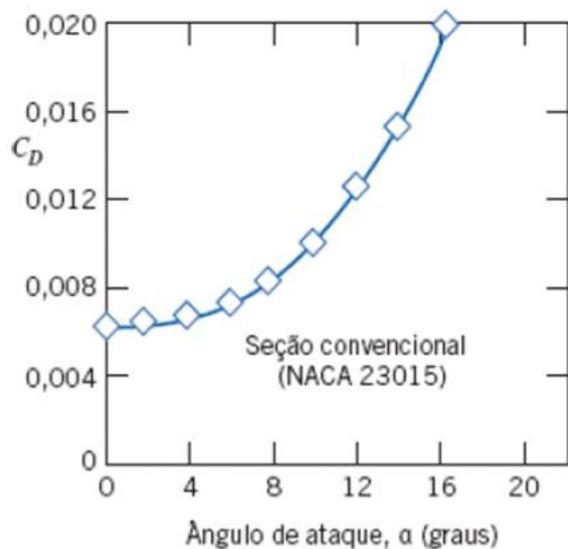
Fonte: Fox, Mcdonald e Pritchard, 2016

Gráfico 4: Coeficiente de Sustentação versus ângulo de ataque para o Perfil NACA 66(2)-215



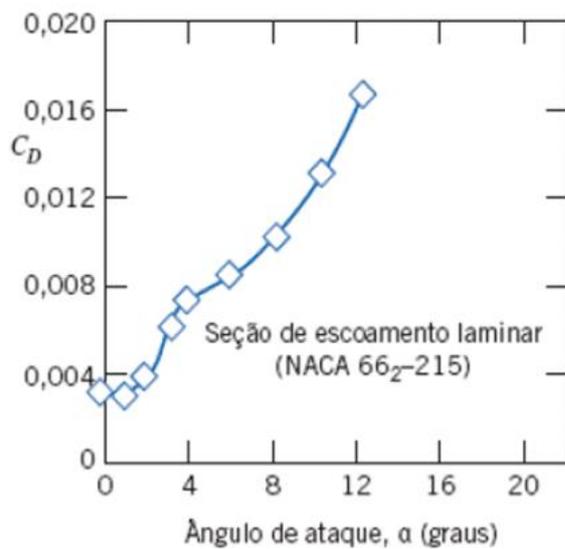
Fonte: Fox, Mcdonald e Pritchard, 2016

Gráfico 5: Coeficiente de Arrasto versus ângulo de ataque para o Perfil NACA 23015



Fonte: Fox, Mcdonald e Pritchard, 2016

Gráfico 6: Coeficiente de Arrasto versus ângulo de ataque para o Perfil NACA 66(2)-215



Fonte: Fox, Mcdonald e Pritchard, 2016

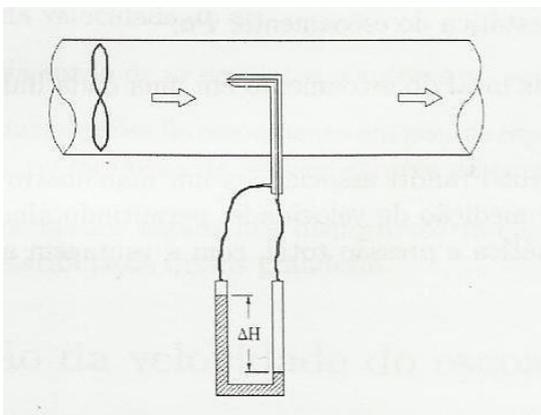
3.3 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO EM TÚNEIS DE VENTO DIDÁTICOS

Segundo, JUNIOR (2009), apud GORECKI (1988), um Túnel de Vento é um equipamento com o objetivo de produzir uma corrente de ar controlada e verificar o efeito do escoamento sobre estruturas, automóveis, etc, podendo avaliar condições reais de trabalho. Esse equipamento favorece o movimento do ar ao redor dos modelos reduzidos inseridos dentro dele, o que não seria possível realizar em uma situação normal, e verificar qualitativamente o comportamento do vento sobre as formas geométricas por meio dos coeficientes aerodinâmicos (ALMEIDA, 2014).

Para a determinação dos parâmetros que permitem a avaliação quantitativa das forças de sustentação e arrasto, são necessários no interior do Túnel de Vento instrumentos de medição que obtenham dados de determinadas propriedades, como por exemplo, a velocidade relativa ao escoamento e valores das forças (Arrasto e Sustentação).

Segundo Almeida (2014), é possível determinar a velocidade do fluxo de ar colocando um Anemômetro na entrada de ar e na câmara de ensaios, ou seção de testes do Túnel de Vento. Outra alternativa seria medir valores de velocidade utilizando um dispositivo chamado de Tubo de Pitot-Prandtl associado a um manômetro de coluna (ARNOLDI, 2011).

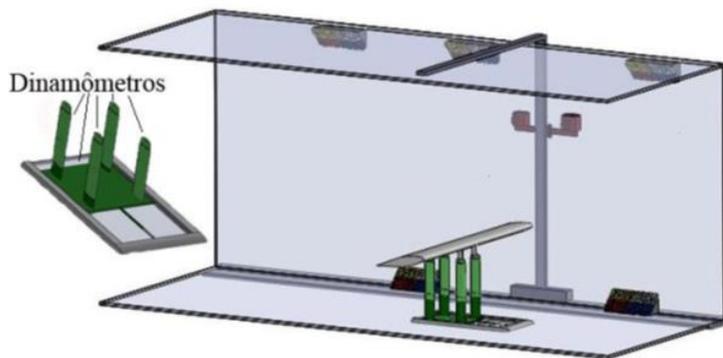
Figura 2: Tubo de Pitot-Prandtl utilizado para medir velocidade na seção de testes do túnel de vento.



Fonte: Arnoldi, 2011

Pode-se determinar valores de Forças de Arrasto e de Sustentação de um perfil de asa no interior da Seção de Testes de um Túnel de Vento Didático, apoiando o perfil sobre Dinamômetros (FERREIRA, 2012).

Figura 3: Dinamômetros para medição de força de Arrasto e Sustentação do perfil



Fonte: Ferreira, 2012

De acordo com Selig e McGranahan (2003) é possível medir força de arrasto de um perfil aerodinâmico através da análise de um volume de controle no interior da seção de testes de um Túnel de Vento levando em consideração a diferença de velocidade do fluxo de ar entre a entrada e saída do mesmo.

Para realizar medições de força de sustentação Oliveira (2011) utilizou uma balança como instrumento analisando a variação das massas dos perfis ao estarem sob a ação do fluxo de ar. Colocando uma massa apoiada sobre a balança, posicionada abaixo do túnel de vento, e a asa fixada na seção de testes e ligada a balança por um fio de cobre pode-se notar que quando a asa ganha sustentação há a variação da resultante das forças que agem sobre ela sendo indicada pela balança.

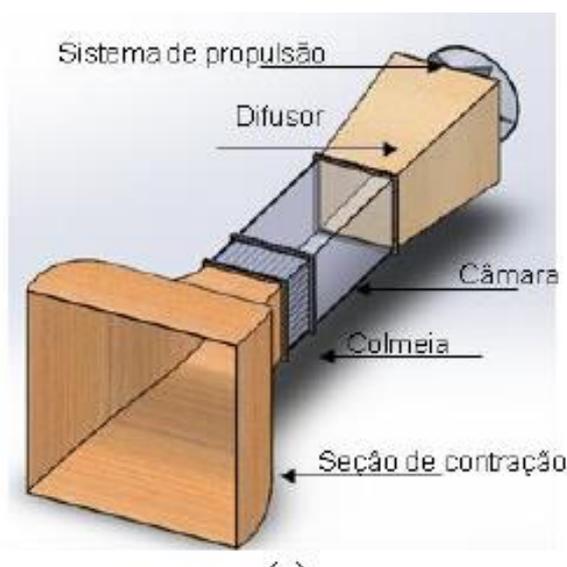
4 METODOLOGIA

A parte experimental do trabalho foi realizada no Laboratório das FAACZ, onde está localizado o Túnel de Vento Didático possibilitando a instalação dos Instrumentos de Medição e as análises necessárias para o cumprimento de todas as fases listadas no início do estudo que foi finalizado com a obtenção e discussão dos resultados.

4.1 TÚNEL DE VENTO DIDÁTICO DAS FAACZ

O Túnel de Vento adotado para os estudos possui o sistema de circuito aberto e é constituído por uma seção de contração, responsável por acelerar o fluxo de ar, uma colmeia ou favo de mel, para estabilizar o escoamento permitindo que o mesmo chegue até a seção de testes com um comportamento mais laminar e possibilitando que a sua visualização seja uniforme. Possui uma câmara de testes ou seção de testes, onde os modelos são estudados, um difusor que liga o sistema ao equipamento de propulsão tendo como objetivo reduzir a velocidade na saída e por fim, o sistema de propulsão para gerar uma diferença de pressão dando início ao escoamento. O circuito adotado está demonstrado pela figura 4.

Figura 4: Modelo 3D do Túnel de Vento.



Fonte: Sartori, 2017

4.1.1 Dimensões do Túnel de Vento da Faacz

O Túnel possui comprimento total de 2,3 metros e seus componentes construídos para permitir a realização de ensaios aerodinâmicos, o mesmo é montado sobre uma bancada móvel permitindo a realização de atividades fora do laboratório das Faacz conforme mostrado na figura 5.

Figura 5: Túnel de Vento Montado.



Fonte: Sartori, 2017.

O sistema de propulsão do Túnel de Vento corresponde a um exaustor de 40 x 23,4 x 41 cm da venti delta, com as seguintes características:

- Rotação: 1600 RPM;
- Vazão: 4200 m³/h;
- Peso bruto: 5,735 kg.

A seção de testes é constituída de material acrílico com um comprimento de 600 mm e seção quadrada com arestas de 300 mm.

O bocal de contração que é responsável por acelerar o fluido devido a uma redução de área tem 525 mm de comprimento, sua entrada é de seção quadrada com arestas de 300 mm e sua saída de seção quadrada com arestas de 670 mm.

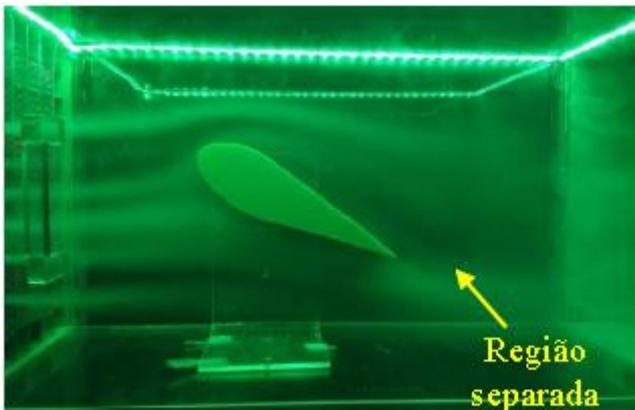
A colmeia, responsável por estabilizar o escoamento é composta por 225 tubos de 5/8" de diâmetro e tem uma seção de 175 mm x 175 mm e 130 mm de comprimento.

O difusor possui a entrada composta por uma seção quadrada de 300 mm x 300 mm e a seção de saída com 440 mm x 440 mm onde está acoplado o exaustor, no entanto, por este possuir uma seção circular, está conectado por um acoplamento com 400 mm de diâmetro.

4.1.2 Visualização do escoamento no Túnel de Vento

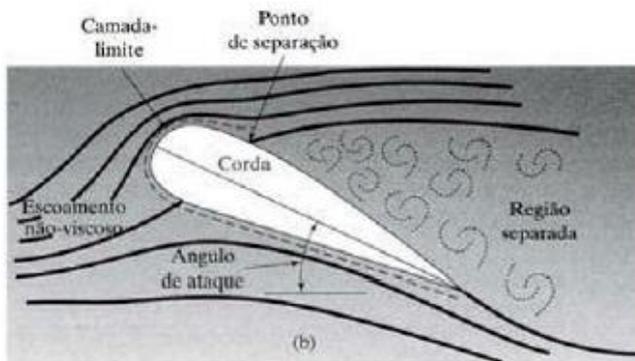
A visualização do escoamento se deu através da injeção de linhas de fumaça por meio de um sistema composto por uma máquina de fumaça posicionada na entrada do bocal de contração. A medida que as linhas de fumaça são injetadas pela máquina, as mesmas são direcionadas para a seção de testes pelos tubos da colmeia permitindo assim a visualização do escoamento através das superfícies estudadas conforme mostrada pelas figuras 6,7,8 e 9.

Figura 6: Escoamento em torno do perfil de asa no Túnel de Vento das Faacz.



Fonte: Sartori, 2017

Figura 7: Esquematização do escoamento em torno de uma asa de avião.



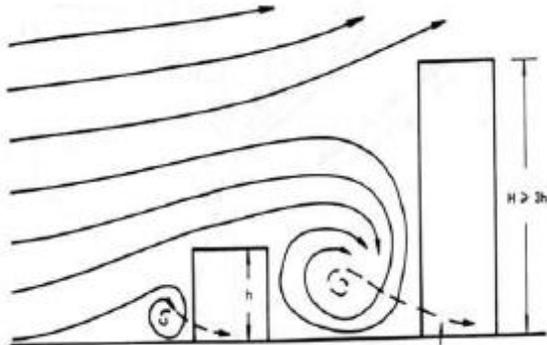
Fonte: Potter e Wiggert, 2013

Figura 8: Simulação de escoamento entre dois edifícios no Túnel de vento das Faacz.



Fonte: Sartori, 2017

Figura 9: Esquematização do escoamento entre dois edifícios.



Fonte: Blessmann, 1990.

4.2 ESCOLHA DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

De acordo com Fox, McDonald e Pritchard (2016) sempre que existir movimento relativo entre um corpo sólido e o fluido viscoso que o circunda, o corpo experimentará uma força resultante \vec{F} que pode ser decomposta em força de arrasto, FD e força de sustentação, FL .

Para avaliar a influência do ângulo de ataque no coeficiente de sustentação e de arrasto de um perfil aerodinâmico é necessária a medição de Força de Arrasto e de Sustentação para cada ângulo.

Então serão medidos valores dessas forças de perfis de asa que serão fabricados. Para a medição da Força de Arrasto foi usado como referência o método empregado por Selig e McGranahan (2003) medindo valores de velocidade na entrada e saída de um volume de controle com o auxílio de um Tubo de Pitot JMT Ardupilot Arduplane e um sensor de pressão diferencial modelo Freescale_NXP_Automalabs MPX5010DP. A captação de dados foi por meio de uma placa arduino ligada ao computador.

Para a medição de força de sustentação foi usada uma balança de precisão conforme método empregado por Oliveira (2011).

O módulo dessas forças depende certamente da velocidade relativa ao escoamento V , mas também da forma e do tamanho do corpo que foi estudado, e das propriedades do fluido, como massa específica, que nesse estudo foi o ar. Para medição da velocidade média do fluxo de ar na seção de testes também foram utilizados um Tubo de Pitot JMT Ardupilot Arduplane e um sensor de pressão diferencial modelo Freescale_NXP_Automalabs MPX5010DP.

Os corpos analisados no estudo foram perfis de asa padronizados pela NACA conforme dados fornecidos pelo Fox, McDonald e Pritchard (2016).

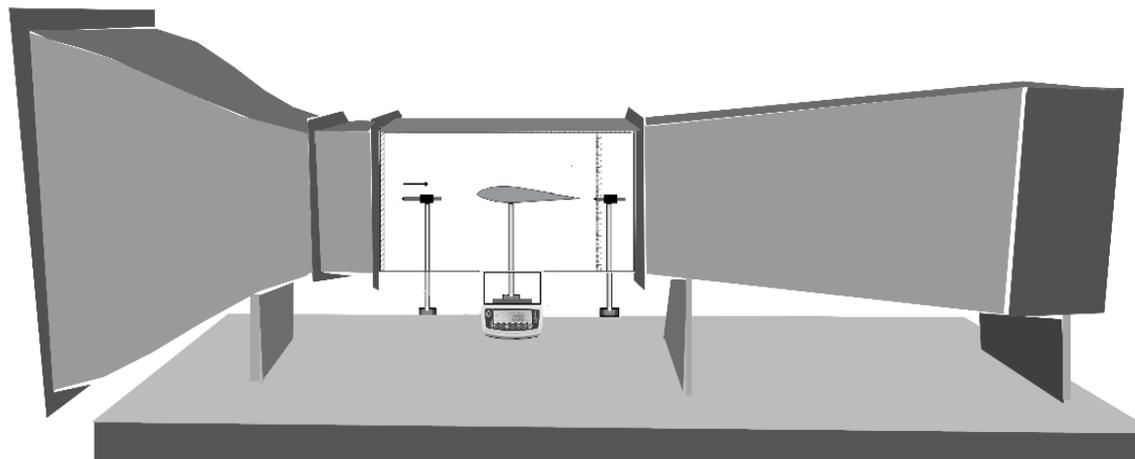
4.3 INSTALAÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO NA SEÇÃO DE TESTES DO TÚNEL DE VENTO

Conforme a seção anterior para que fosse realizada a medição de força de arrasto foi utilizado um tubo de Pitot modelo JMT Ardupilot Arduplane ligado a um sensor de pressão diferencial, sendo montado na entrada e na saída da seção de testes. O tubo de pitot foi fixado a uma haste metálica que permitiu o seu deslocamento vertical para as medições de velocidade. Os dados de pressão captados pelo sensor foram enviados ao computador por intermédio de uma placa arduino permitindo a visualização e o armazenamento dos mesmos. O funcionamento da placa e a respectiva leitura dos dados foram dados por uma lógica de programação direto na plataforma arduino.

Para a medição de força de sustentação foi utilizada uma balança de precisão fixada fora do túnel de vento na sua parte inferior. O perfil foi apoiado sobre a balança fixado por uma haste metálica permitindo que haja um deslocamento vertical a medida que esteve em contato com o fluxo de ar, devido a isso foi fornecida pelo instrumento uma variação de peso do perfil podendo ser calculado o valor de força.

Para a medição de velocidade média do fluxo de ar do túnel de vento também foi utilizado um Tubo de Pitot ligado a um sensor, mas nessa situação este foi posicionado em único local da seção de testes medindo valores médios de velocidade. A figura 10 mostra como os instrumentos de medição foram instalados na seção de testes conforme proposto acima possibilitando os testes.

Figura 10: Esquemático do túnel de vento com os instrumentos instalados.

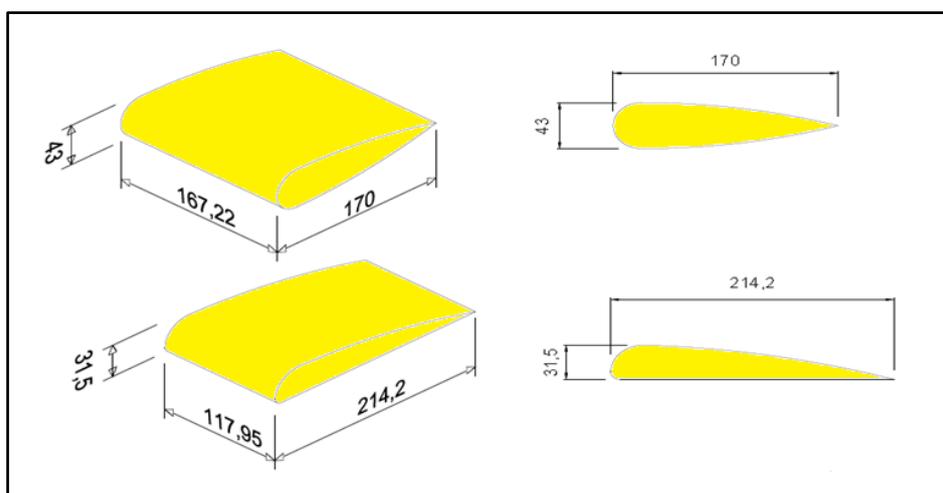


Fonte: O Autor, 2018

4.4 FABRICAÇÃO DOS PERFIS DE ASA PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES AERODINÂMICOS

Os perfis de Asa para a realização dos testes foram fabricados de uma espuma de poliuretano com dimensões conforme mostradas na figura 11. Os perfis fabricados foram o NACA 23015 e NACA 66(2)-215, sendo um simétrico e outro assimétrico respectivamente.

Figura 11: Esquemático dos perfis a serem fabricados.



Fonte: O Autor, 2018.

4.5 TESTES AERODINÂMICOS NO TÚNEL DE VENTO

Após a fabricação dos perfis e montagem dos instrumentos de medição nas suas respectivas posições foram iniciados os testes.

4.5.1 Medição de Velocidade

A primeira medição realizada foi a velocidade média do fluxo de ar utilizando o tubo de pitot e o sensor, assim sendo obtido valores de pressão diferencial possibilitando o cálculo da velocidade por meio da equação 1. A figura 12 exemplifica a disposição dos pontos de pressão e a relação com a velocidade.

$$V = \sqrt{\frac{2(P_0 - P)}{\rho}} \quad (1)$$

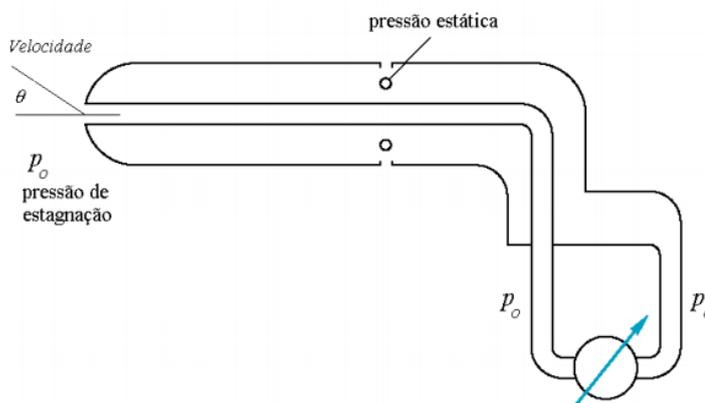
Onde:

V = Velocidade do escoamento na seção de testes do túnel de vento (m/s).

$P_0 - P$ = Diferencial de Pressão fornecido pelo sensor (Pa).

ρ = Massa específica do fluido, para esse estudo o ar (kg/m^3).

Figura 12: Disposição dos Pontos de pressão e Velocidade.



Fonte: Schneider, 2011

4.5.2 Medição de Força de Arrasto

Para a obtenção da Força de Arrasto foi definido como volume de controle a seção de testes do túnel de vento e foi realizada a medição da velocidade na entrada do volume de controle, antes do perfil de asa, e na saída do volume de controle localizada após o perfil. Para essas medições será utilizado o tubo de pitot em cada extremidade e os perfis de asa serão posicionados no meio da seção de testes possibilitando a medição de dois valores distintos conforme mostrado nas figuras 13 e 14.

A velocidade de entrada da seção de testes foi adotada como constante mantendo um perfil uniforme na entrada, já a velocidade após o perfil de asa foi medida em pontos diferentes ao longo da altura da seção de testes. Essa altura e os pontos medidos foram definidos por meio de uma escala milimetrada adotando uma distância padrão entre cada ponto medido. Após a obtenção dos valores de velocidade foi possível calcular a Força de Arrasto através da equação 2.

$$F_D = w\rho \int_{-\infty}^{\infty} u_1 (V_{\infty} - u_1) dy \quad (2)$$

Onde:

F_D = Força de Arrasto (N).

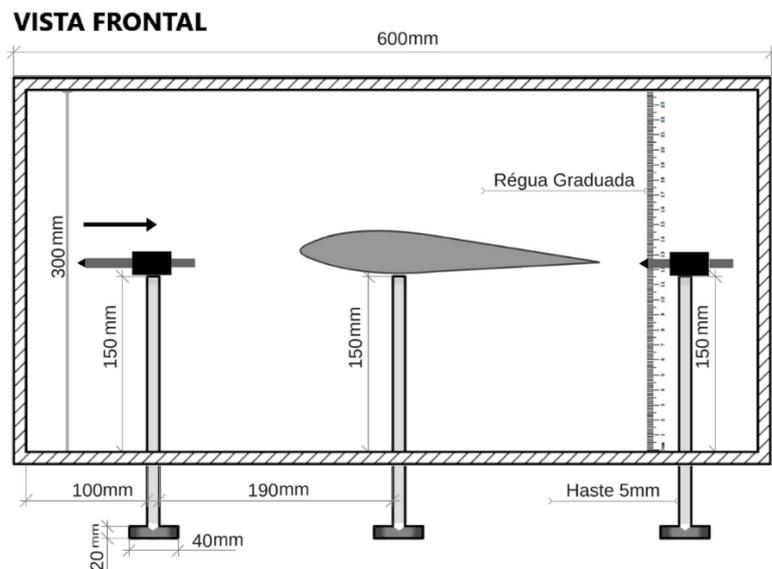
ρ = Massa Específica do fluido, para estudo o ar (kg/m^3).

u_1 = Velocidade na saída do Volume de Controle, ou seja, da seção de testes (m/s).

V_{∞} = Velocidade na entrada do Volume de Controle, ou seja, da seção de testes (m/s).

w = Largura do Perfil

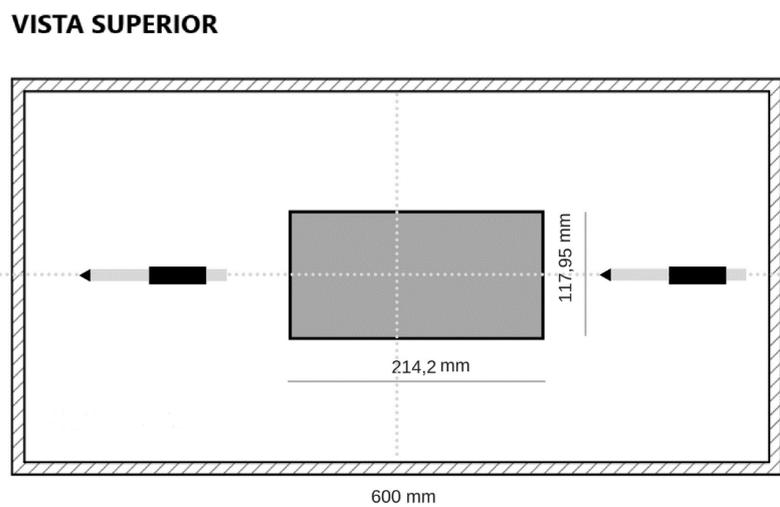
Figura 13: Vista Frontal do volume de controle com os Tubos de Pitot.



Fonte: O Autor, 2018

Os tubos de pitot e os perfis foram fixados por meio de uma haste metálica e uma peça circular de teflon colada na base do túnel de vento. Os perfis foram apoiados na haste metálica por meio de uma junta regulável que permitiu a variação do ângulo de ataque nas medições realizadas.

Figura 14: Vista Superior do volume de controle com os Tubos de Pitot.



Fonte: O Autor, 2018

4.5.3 Medição de Força de Sustentação

Para a medição de força de sustentação, conforme falado na seção 4.2, foi utilizada uma balança de precisão. A fixação do perfil sobre a balança foi por meio de uma haste metálica apoiada sobre a balança que permitiu o seu deslocamento dando assim a sustentação ao perfil conforme mostrado na figura 15.

Após a fixação do perfil sobre a balança foi medido um valor de massa com o fluxo de ar desligado, assim foi anotado um valor de massa do perfil sem sustentação onde foi possível obter um valor de Força Peso inicial através da equação 3. Após essa medição foi ligado o túnel de vento e realizada uma nova indicação da massa, já com o perfil sendo afetado pelo fluxo que está sendo submetido, sendo assim analisada a sua influência na massa do perfil em relação ao quanto variou a indicação da balança após o contato com o fluxo obtendo um novo valor para Força Peso através da equação 4.

$$P_{\text{inicial}} = M_i \times g \quad (3)$$

Onde:

P_{inicial} = Força Peso Inicial – Fluxo de ar desligado (N)

M_i = Massa Inicial – Fluxo de ar desligado (kg).

g = Aceleração da gravidade (m/s²)

$$P_{\text{final}} = M_f \times g \quad (4)$$

Onde:

P_{final} = Força Peso Final – Fluxo de ar ligado (N)

M_f = Massa Final – Fluxo de ar ligado (kg).

g = Aceleração da gravidade (m/s²)

A Força de Sustentação foi dada pela diferença entre a Força Peso Inicial e a Força Peso Final, então após a obtenção dos valores de ambas as Forças Peso foi possível o cálculo da Força de Sustentação através da equação 5.

$$F_L = P_{\text{Inicial}} - P_{\text{final}} \quad (5)$$

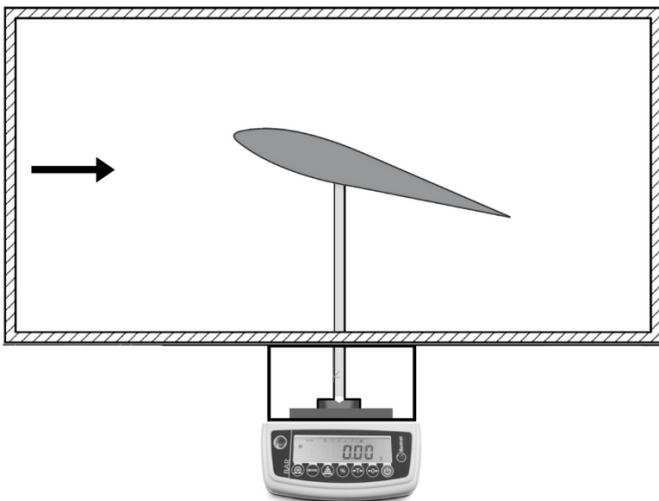
Onde:

F_L = Força de Sustentação (N).

P_{Inicial} = Força Peso Inicial (N).

P_{final} = Força Peso Final (N).

Figura 15: Esquemático da montagem do perfil sobre a balança.



Fonte: O Autor, 2018

Foram montados os perfis apoiados sobre a balança de precisão conforme mostrado nas figuras 16 e 17, permitindo o deslocamento vertical ao ser submetido ao fluxo de ar do Túnel de Vento e devido a esta haste possuir em sua ponta uma junta regulável foi possível variar o ângulo de ataque dos perfis. Essa variação de ângulo é mostrada nas figuras 18 e 19, sendo uma demonstrando o perfil NACA 66(2)-215 e outra para o perfil NACA 23015, respectivamente.

Figura 16: Perfil NACA 66(2)-215 apoiado sobre a balança.



Fonte: O Autor, 2018

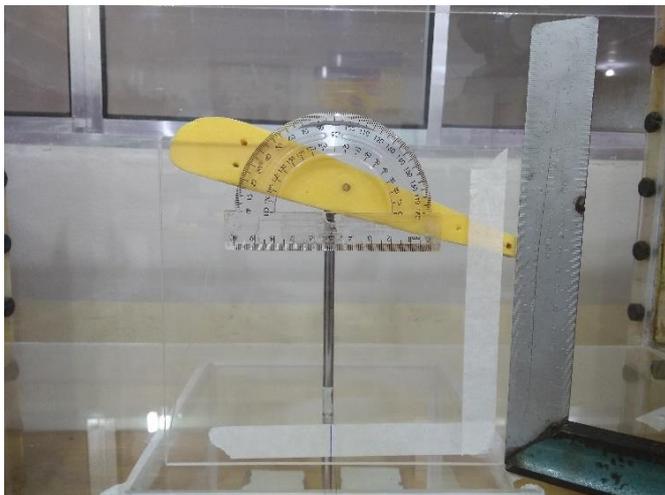
Figura 17: Perfil NACA 23015 apoiado sobre a balança.



Fonte: O Autor, 2018

Assim foram variados o ângulo de ataque por meio de um transferidor levando como base a linha correspondente a corda dos perfis.

Figura 18: Variação do ângulo de ataque do Perfil NACA 66(2)-215.



Fonte: O Autor, 2018

Figura 19: Variação do ângulo de ataque do Perfil NACA 23015.



Fonte: O Autor, 2018

4.5.4 Cálculo dos Coeficientes de Arrasto e de Sustentação

Segundo Fox, Mcdonald e Pritchard (2016) é possível obter diferentes valores de Coeficiente de Arrasto e Coeficiente de Sustentação a medida que há uma variação no ângulo de ataque do aerofólio. Então após a medição das forças de arrasto e sustentação foi possível calcular o coeficiente de arrasto através da equação 6 e o coeficiente de sustentação através da equação 7

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (6)$$

Onde:

C_D = Coeficiente de Arrasto.

F_D = Força de Arrasto (N).

ρ = Massa Específica do fluido, para estudo o ar (kg/m^3).

V = Velocidade do escoamento na seção de testes do túnel de vento (m/s).

A = Área do perfil (m^2).

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (7)$$

Onde:

C_L = Coeficiente de Sustentação.

F_L = Força de Sustentação.

ρ = Massa Específica do fluido, para estudo o ar (kg/m^3).

V = Velocidade do escoamento na seção de testes do túnel de vento (m/s).

A = Área do perfil (m^2).

Variando o ângulo de ataque do aerofólio houve uma variação na área fazendo com que a força varie, assim foi possível obter os novos valores de coeficiente.

4.6 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Com os resultados obtidos foi gerado um gráfico **Coeficiente de Arrasto x Ângulo de Ataque** e outro gráfico **Coeficiente de Sustentação x Ângulo de Ataque** e realizada a discussão dos resultados comparando com os gráficos contidos na literatura estudada (FOX, MCDONALD e PRITCHARD, 2016).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a escolha dos instrumentos de medição para a realização dos testes, foi efetuada a montagem na seção de testes para se realizar a medição de velocidade média do fluxo de ar conforme mostrado na figura 20.

Segundo a abordagem dada na metodologia a captação de dados foi por meio de Sensor de Pressão Diferencial e uma placa arduino conforme mostrado na figura 21.

Figura 20: Tubo de Pitot para medição das velocidades médias.



Fonte: O Autor, 2018

Figura 21: Sensor de Pressão Diferencial e Placa Arduino.



Fonte: O Autor, 2018

Após a montagem do Tubo de Pitot na seção de testes e realizada as medições de velocidade média do fluxo de ar foram fabricados os perfis a serem estudados. O perfil NACA 66(2)-215 com um comprimento de corda de 214,2 mm mostrado na figura 22 e o perfil NACA 23015 com um comprimento de corda de 170 mm mostrado na figura 23.

Figura 22: Perfil NACA 66(2)-215.



Fonte: O Autor, 2018

Figura 23: Perfil NACA 23015.



Fonte: O Autor, 2018

5.1 VELOCIDADE MÉDIA DO FLUXO

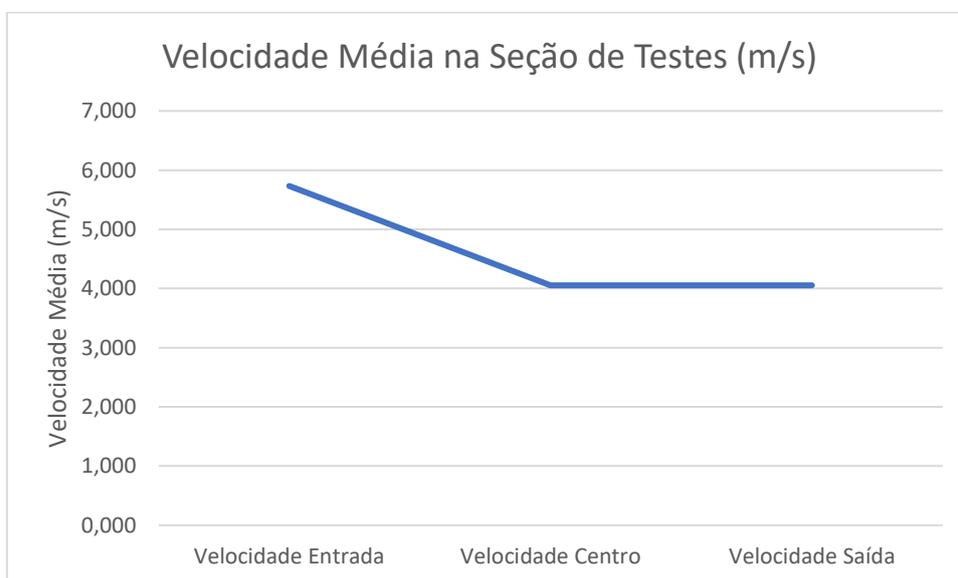
Realizada a montagem do Tubo de Pitot e a fabricação dos perfis a serem estudados foram iniciadas as medições de velocidade e obtidos os seguintes valores conforme mostra a tabela 1 e expressado seu respectivo comportamento no decorrer das medições pelo gráfico 7.

Tabela 1: Velocidade Média do Fluxo de ar.

Velocidade Média do Fluxo de ar			
	Velocidade Média (m/s)	Desvio Padrão (m/s)	Velocidade Média (m/s) ± Desvio Padrão (m/s)
Velocidade Entrada	5,732	0,287	5,732 m/s ±0,287
Velocidade Centro	4,053	0,203	4,053 m/s ±0,203
Velocidade Saída	4,053	0,203	4,053 m/s ±0,203
Velocidade Média	4,613	0,231	4,613 m/s ±0,231

Fonte: O Autor, 2018

Gráfico 7: Comportamento da Velocidade Média do Fluxo.



Fonte: O Autor, 2018

A variação nos valores pode ser explicada pela influência das paredes do túnel no perfil de velocidades, uma vez que é esperado um aumento da turbulência a medida que o fluxo de ar percorre a seção de teste do túnel, o que tende a tornar o perfil de velocidade mais uniforme a medida que se avança pela seção de teste do túnel.

5.2 FORÇA E COEFICIENTE DE SUSTENTAÇÃO

Após a medição de velocidade foi realizada a medição dos valores de massa dos perfis estudados para o cálculo da Força de Sustentação.

Com posicionamento dos perfis e a variação do ângulo de ataque foi possível a realização das medições de massa do perfil para ângulos entre 0° e 45° em ambos perfis, estando o Túnel de Vento desligado foram obtidos os seguintes valores conforme mostrado nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2: Massa do Perfil NACA 66(2)-215.

Massa do Perfil NACA 66(2) -215 (kg)	
Medições	Valor (kg)
1	0,050654
2	0,050422
3	0,050237
4	0,050105
5	0,050960
6	0,050916
7	0,050970
8	0,050845
9	0,050704
10	0,050595
11	0,050472
12	0,050368
13	0,050262
14	0,050219
15	0,050171
Média	0,050527
Valor Final	0,05053kg ± 0,0003

Fonte: O Autor, 2018

Tabela 3: Massa do Perfil NACA 23015.

Massa do Perfil NACA 23015 (kg)	
Medições	Valor (kg)
1	0,063148
2	0,063171
3	0,063200
4	0,063231
5	0,063255
6	0,063254
7	0,063256
8	0,063287
9	0,063272
10	0,063330
11	0,063305
12	0,063267
13	0,063312
14	0,063333
15	0,063426
Média (kg)	0,063270
Valor Final	0,06327 kg ± 0,00007

Fonte: O Autor, 2018

Assim que foram medidas as massas dos perfis foi ligado o Túnel de Vento, foram coletadas as massas dos perfis indicadas pela balança após a estabilização do fluxo de ar e encontrados os seguintes valores conforme mostrado nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4: Massa Indicada do Perfil NACA 66(2)-215.

Massa Indicada NACA 23015 (kg)	
Ângulo de Ataque	Valor
0°	0,06179 kg ± 0,00006
5°	0,05477 kg ± 0,0001
10°	0,05113 kg ± 0,00046
15°	0,04421 kg ± 0,00047
20°	0,03532 kg ± 0,0004
25°	0,02923 kg ± 0,00073
30°	0,02216 kg ± 0,00058
35°	0,02809 kg ± 0,00096
40°	0,0281 kg ± 0,00082
45°	0,02908 kg ± 0,00064

Fonte: O Autor, 2018

Tabela 5: Massa Indicada do Perfil NACA 23015.

Massa Indicada NACA 66(2)-215 (kg)	
Ângulo de Ataque	Valor (kg)
0°	0,04771 kg ± 0,00005
5°	0,04441 kg ± 0,00006
10°	0,0405 kg ± 0,00016
15°	0,03365 kg ± 0,00021
20°	0,0278 kg ± 0,00027
25°	0,02253 kg ± 0,00028
30°	0,01753 kg ± 0,00027
35°	0,01285 kg ± 0,00025
40°	0,00878 kg ± 0,00038
45°	0,00817 kg ± 0,00049

Fonte: O Autor, 2018

Com esses valores de massa inicial e final foram calculadas as Forças Peso necessárias para o cálculo de Força de Sustentação. Após o cálculo das Forças foram obtidos os coeficientes de sustentação dos perfis estudados conforme mostrado na tabela 6 referente ao perfil NACA 23015 e na Tabela 7 referente ao perfil NACA 66(2)-215.

Tabela 6: Força e Coeficiente de Sustentação Perfil NACA 23015.

NACA 23015				
Ângulo	Força de Sustentação (N)	Desvio Padrão (N)	Coeficiente de Sustentação	Desvio Padrão
0°	0,015	0,000202703	0,041594908	0,006449569
5°	0,083	0,000292941	0,230158493	0,033389689
10°	0,119	0,000980231	0,329986273	0,049425479
15°	0,187	0,000196222	0,518549857	0,073941318
20°	0,274	0,000980322	0,759800325	0,110262979
25°	0,334	0,001668038	0,926179958	0,135719913
30°	0,403	0,001372415	1,117516537	0,161982541
35°	0,345	0,002059409	0,956682891	0,141122664
40°	0,345	0,001863804	0,956682891	0,140580255
45°	0,335	0,001469728	0,928952952	0,135562500

Fonte: O Autor, 2018.

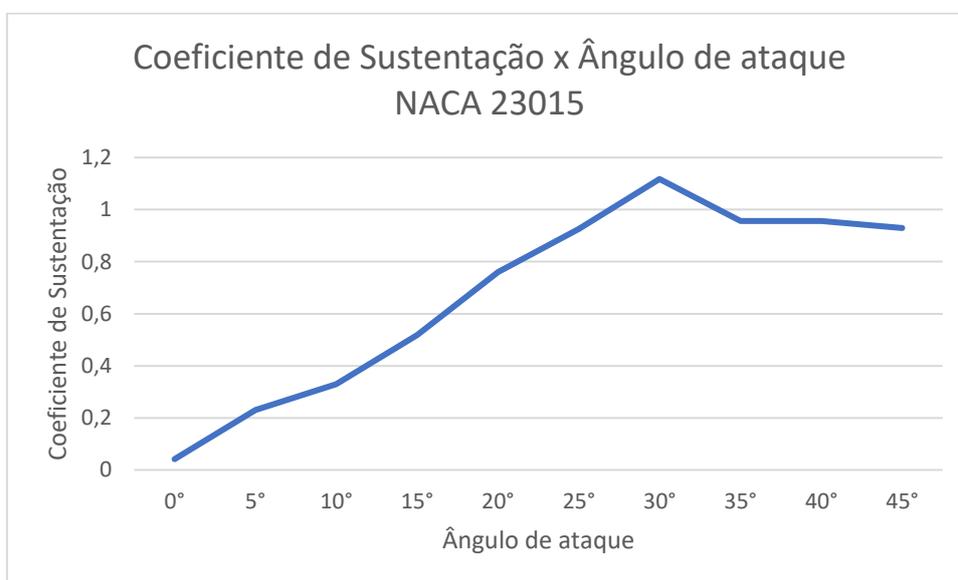
Tabela 7: Força e Coeficiente de Sustentação Perfil NACA 66(2)-215.

NACA 66(2) -215				
Ângulo	Força de Sustentação (N)	Desvio Padrão (N)	Coeficiente de Sustentação	Desvio Padrão
0°	0,028	0,000795172	0,077643829	0,013194962
5°	0,06	0,000784698	0,166379633	0,025725866
10°	0,098	0,000977361	0,271753401	0,041175056
15°	0,166	0,001081946	0,460316985	0,068154958
20°	0,223	0,001177454	0,618377637	0,090792209
25°	0,275	0,001375147	0,762573319	0,111750326
30°	0,324	0,00127648	0,89845002	0,130709141
35°	0,37	0,001178438	1,026007738	0,148492196
40°	0,41	0,00147316	1,136927494	0,165009393
45°	0,416	0,001669618	1,153565457	0,16790916

Fonte: O Autor, 2018.

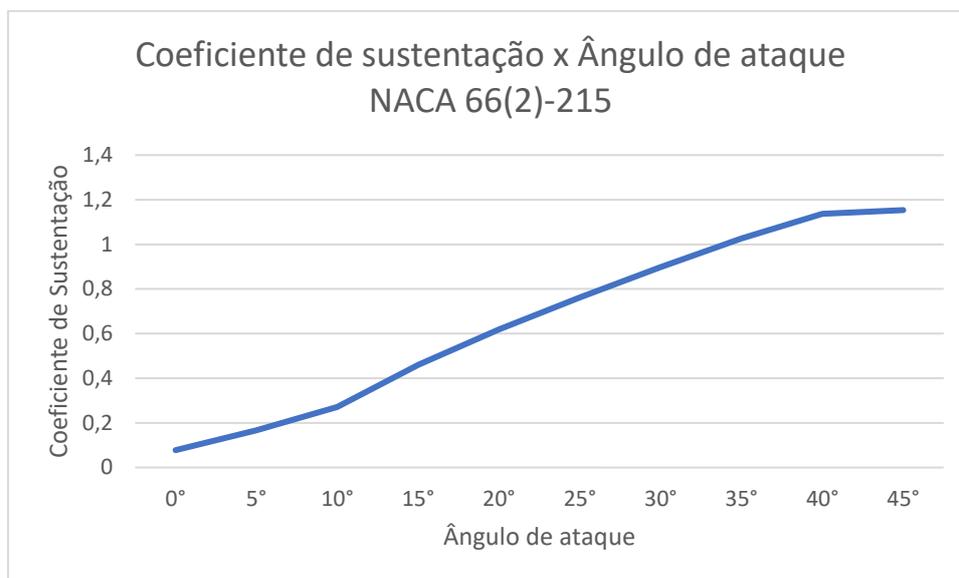
Por fim, com a obtenção dos valores de coeficiente de sustentação foi possível gerar gráficos **coeficiente de sustentação x ângulo de ataque** de acordo com o proposto na metodologia deste presente trabalho conforme mostrado pelos gráficos 8 e 9.

Gráfico 8: Coeficiente de Sustentação versus ângulo de ataque NACA 23015.



Fonte: O Autor, 2018.

Gráfico 9: Coeficiente de Sustentação x ângulo de ataque NACA 66(2)-215.



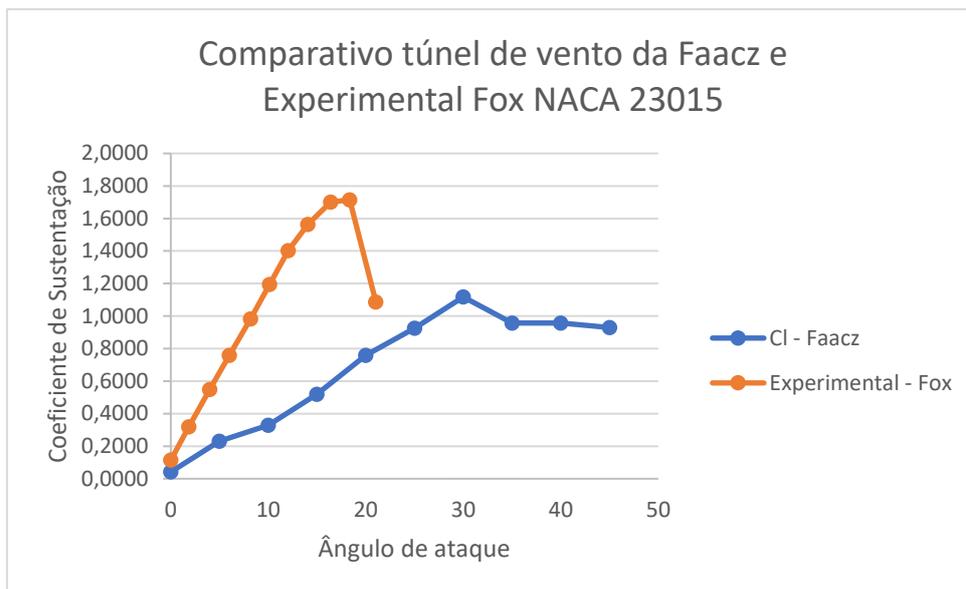
Fonte: O Autor, 2018.

Analisando os resultados referentes a sustentação dos perfis foi possível verificar e comprovar que a medida que há o aumento do ângulo de ataque há também o aumento do coeficiente de sustentação.

Para o perfil NACA 23015 verificou-se um aumento linear do coeficiente de sustentação até o ângulo de 30° e após esse houve um declínio no coeficiente demonstrando uma perda de sustentação a partir deste ângulo de ataque. Com isso foi constatado que o Perfil NACA 23015 atinge seu ponto de estol no ângulo de 30° para as condições existentes no Túnel de vento das FAACZ. Para o perfil NACA 66(2)-215 também foi constatado um aumento linear em todos os ângulos estudados não encontrando um ponto de estol para este perfil nas condições estudadas dentro do Túnel de Vento, condições estas referentes a velocidade do fluxo e tamanho dos perfis.

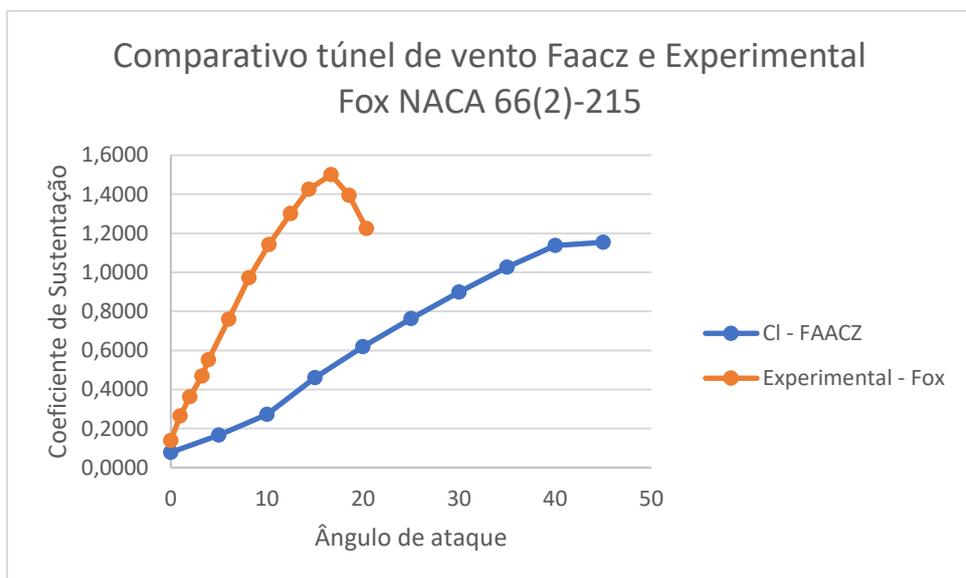
Os gráficos 10 e 11 abaixo mostram um comparativo entre os resultados obtidos com os ensaios aerodinâmicos no túnel de vento das Faacz e os dados experimentais fornecidos por Fox, Mcdonald e Pritchard (2016) para ambos os perfis estudados.

Gráfico 10: Comparativo dos dados de Sustentação Perfil NACA 23015.



Fonte: O Autor, 2018.

Gráfico 11: Comparativo dos dados de Sustentação Perfil NACA 66(2)-215.



Fonte: O Autor, 2018.

Analisando o comparativo dos dados no gráfico 10 referente ao Perfil NACA 23015 é possível verificar o aumento do coeficiente de sustentação quando se aumenta o ângulo de ataque em ambos os dados, mas os dados obtidos pelos ensaios no túnel

de vento das Faacz mostram um aumento menor entre os ângulos e um valor menor de sustentação em relação aos dados experimentais observados na literatura.

Verifica-se também no gráfico 10 que no túnel de vento das Faacz a redução da sustentação se deu a partir do ângulo de 30° e ocorreu de forma gradativa diferente do comportamento mostrado nos dados experimentais fornecidos por Fox, Mcdonald e Pritchard (2016) onde se obteve a redução da sustentação em torno de 20° e uma redução mais brusca, indicando que o perfil atingiu o ponto de estol.

No gráfico 11, referente ao Perfil NACA 66(2)-215, também pode-se observar o aumento dos coeficientes de sustentação com o aumento do ângulo de ataque analisando ambos os dados, mas diferente do Perfil NACA 23015, aparentemente o ponto de estol, quando era esperada uma redução da sustentação, não foi atingido.

A partir desses dados pode-se afirmar que com os ensaios aerodinâmicos realizados no túnel de vento das Faacz obteve-se coeficientes de sustentação menores e conseqüentemente uma menor sustentação quando comparados com os dados experimentais obtidos da literatura. A seção 5.4 analisa algumas hipóteses para as discrepâncias observadas entre os dados medidos e os dados da literatura.

5.3 FORÇA E COEFICIENTE DE ARRASTO

Para a medição de força de arrasto foi necessário a medição de velocidades na entrada e saída da seção de testes do túnel de vento. A metodologia deste trabalho mostra que é possível obter força de arrasto pela diferença de velocidade na entrada e saída de um volume de controle analisado, assim para este estudo foi escolhido a seção de testes do túnel de vento com o sendo este volume de controle.

Após a escolha do volume de controle para os testes foram montados os tubos de pitot na entrada e saída do mesmo permitindo a medição das velocidades referentes a esses pontos e o cálculo da força de arrasto conforme mostrado na figura 24.

Figura 24: Tubos de Pitot na entrada e saída da seção de testes.



Fonte: O Autor, 2018.

Após a montagem dos Tubos de Pitot foram realizadas as medições das velocidades nos pontos estudados. A velocidade na entrada da seção de testes foi adotada como constante sendo medida em um único ponto e as velocidades na saída seção de testes foram medidas em diferentes pontos ao longo do sentido vertical da seção. A seção de testes possui 300 mm de altura e os pontos de medição foram divididos entre as alturas de 25 mm e 275mm, sendo variados a cada 10 mm totalizando 26 medições de velocidade para cada ângulo de ataque.

Realizadas todas as medições de velocidade foram possíveis os cálculos de força de arrasto e coeficientes de arrasto e obtido os respectivos resultados conforme mostrado nas tabelas 8 e 9.

Tabela 8: Forças e coeficientes de arrasto NACA 23015.

NACA 23015				
Ângulo	Força de Arrasto (N)	Desvio Padrão (N)	Coeficiente de Arrasto	Desvio Padrão
0°	0,0115705979	0,0005412930	0,0320851973	0,0060424429
5°	0,0123677158	0,0004947056	0,0342956004	0,0062261238
10°	0,0136328370	0,0006140437	0,0378037737	0,0070536057
15°	0,0134994836	0,0006074367	0,0374339854	0,0069829436
20°	0,0144969989	0,0006437664	0,0402000892	0,0074752087
25°	0,0140462381	0,0006268460	0,0389501325	0,0072513655
30°	0,0145892616	0,0007844003	0,0404559333	0,0079013985
35°	0,0177933562	0,0007628990	0,0493408681	0,0090993776
40°	0,0145901670	0,0006503044	0,0404584438	0,0075299067
45°	0,0136759067	0,0006129474	0,0379232057	0,0070674704

Fonte: O Autor, 2018.

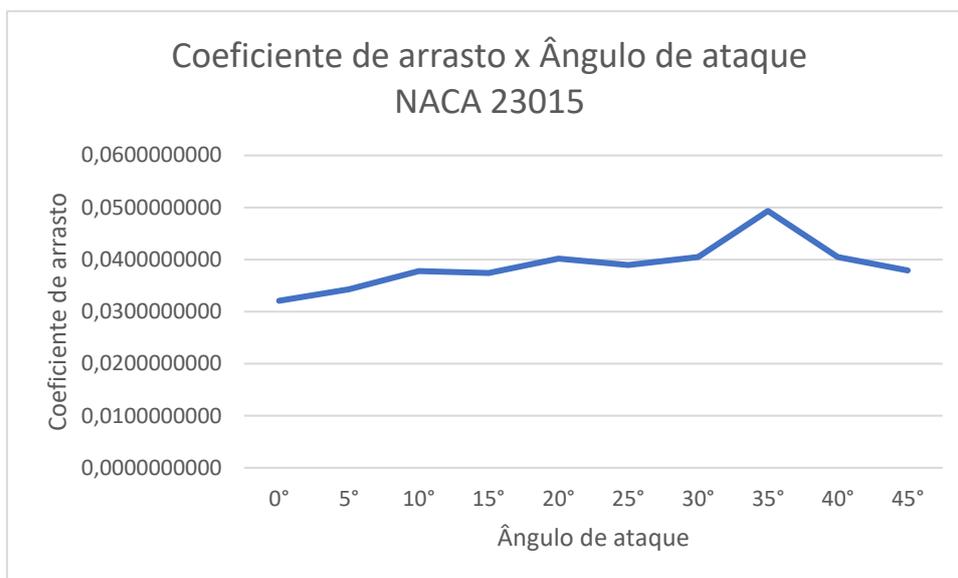
Tabela 9: Forças e coeficientes de arrasto NACA 66(2)-215.

NACA 66(2) -215				
Ângulo	Força de Arrasto (N)	Desvio Padrão (N)	Coeficiente de Arrasto	Desvio Padrão
0°	0,038749679	0,001067607	0,1211365489	0,020440708
5°	0,041703424	0,00119469	0,1303703432	0,022141701
10°	0,041896336	0,00120299	0,1309734117	0,022252794
15°	0,044046019	0,000888296	0,1376935989	0,022217843
20°	0,046032548	0,000950705	0,1439037470	0,023289749
25°	0,060963251	0,001672589	0,1905790717	0,032136526
30°	0,068392643	0,001641493	0,2138043208	0,035318482
35°	0,048699086	0,000664944	0,1522396934	0,023573373
40°	0,054723786	0,001228771	0,1710736934	0,027995136
45°	0,058948465	0,000732116	0,1842805903	0,028307204

Fonte: O Autor, 2018.

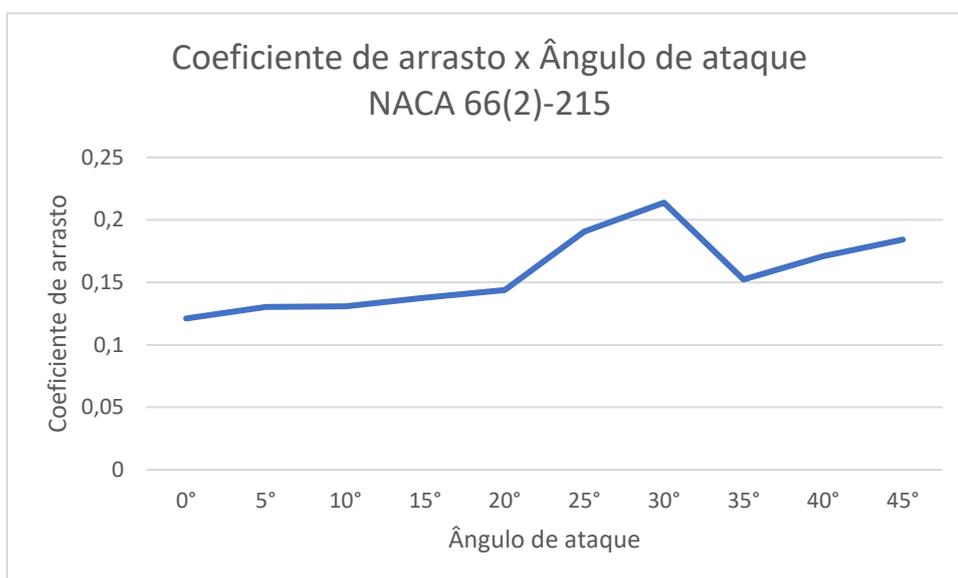
Com a obtenção dos dados de força e coeficiente de arrasto foram gerados os gráficos **coeficiente de arrasto x ângulo de ataque** para cada perfil conforme mostrado nos gráficos 12 e 13.

Gráfico 12: Coeficiente de arrasto x ângulo de ataque NACA 23015.



Fonte: O Autor, 2018.

Gráfico 13: Coeficiente de arrasto x ângulo de ataque NACA 66(2)-215.



Fonte: O Autor, 2018.

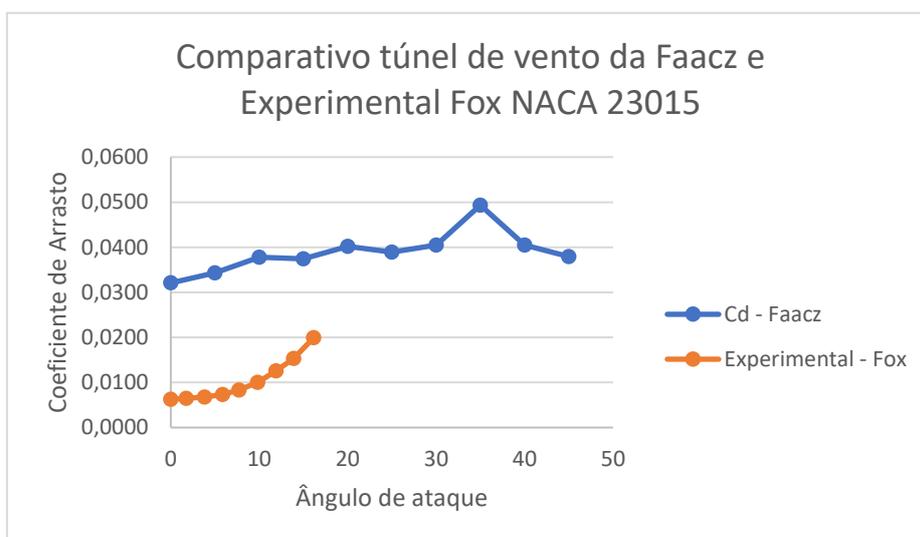
Quando se faz uma análise do gráfico 12 onde mostra dados do perfil NACA 23015 verifica-se que há uma alternância entre aumento e redução do coeficiente de arrasto e analisando o gráfico 13 onde mostra dados do perfil NACA 66(2)-215 é possível verificar um aumento do coeficiente de arrasto até o ângulo de 30°, até esse ponto foi possível comprovar que a medida que aumenta-se o ângulo de ataque obtém-se um

aumento no coeficiente de arrasto mesmo sendo pequeno como é percebido nos gráficos 11 e 12. No ângulo de 35° houve uma redução no coeficiente e do ângulo de 40° até 45° novamente houve um aumento podendo concluir que no decorrer das medições realizadas houve uma imprecisão nos dados fornecidos pelos instrumentos utilizados resultado no alcance parcial dos resultados esperados.

Mesmo com o fato dos resultados terem apresentados uma discrepância foi possível comprovar que em uma determinada faixa de medição o aumento do coeficiente de arrasto com o aumento do ângulo de ataque nas condições existentes no túnel de vento das Faacz.

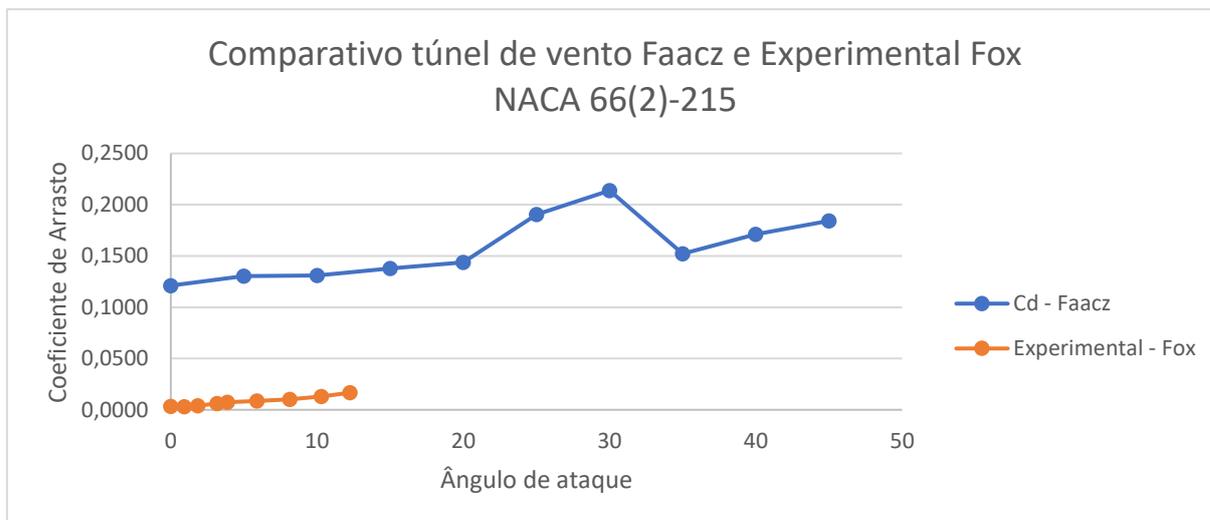
Os gráficos 14 e 15 mostram um comparativo dos dados obtidos com os ensaios aerodinâmicos realizados no túnel de vento das Faacz e os dados experimentais fornecidos por Fox, Mcdonald e Pritchard (2016) para ambos os perfis estudados.

Gráfico 14: Comparativo dos dados de Arrasto Perfil NACA 23015.



Fonte: O Autor 2018.

Gráfico 15: Comparativo dos dados de Arrasto Perfil NACA 66(2)-215.



Fonte: O Autor, 2018.

Analisando o comparativo mostrado no gráfico 14 referente ao Perfil NACA 23015 observa-se, nos dados obtidos no túnel de vento das Faacz, um comportamento diferente em relação ao aumento do arrasto apresentado nos dados experimentais fornecidos por Fox, Mcdonald e Pritchard (2016), pois há uma oscilação entre aumento e redução do arrasto ao longo das medições realizadas enquanto a literatura mostra um aumento exponencial no arrasto.

Analisando o comparativo mostrado no gráfico 15 referente ao Perfil NACA 66(2)-215 observa-se uma semelhança no comportamento entre os dados até o ângulo de aproximadamente 13° onde têm-se o limite dos dados fornecidos por Fox, Mcdonald e Pritchard (2016), mas quando continua a análise nos demais valores obtidos no túnel de vento verifica-se uma oscilação entre aumento e redução no arrasto. Em ambos os perfis estudados foi verificado essa oscilação podendo ser explicado pela turbulência no fluxo gerada na seção de testes a medida que se aumenta o ângulo de ataque podendo causar discrepância nas medições nesses pontos de oscilação mostrados nos gráficos 14 e 15.

Quando comparados os dados, pôde-se verificar valores de coeficiente de arrasto maiores e conseqüentemente um arrasto maior gerado pelos perfis estudados no túnel de vento das Faacz em relação aos dados experimentais fornecidos por Fox, Mcdonald e Pritchard (2016).

5.4 FATORES QUE PODEM AFETAR OS RESULTADOS

5.4.1 Dimensão dos Perfis

Outra análise que pode ser levada em consideração é a dimensão dos perfis, onde têm-se perfis curtos de grande espessura, sendo estes de seção finita. Fox, McDonald e Pritchard (2016) apresenta dados de estudos realizados em seções infinitas onde apresentam maior sustentação e menor arrasto conforme mostrado nos seus gráficos. Também diz que quando se estuda perfis de asa reais com envergadura muito curta e espessura grossa, possuem menor sustentação e maior arrasto. A partir dessa análise e avaliando os resultados obtidos neste trabalho nota-se esse comportamento, devido as dimensões dos perfis utilizados nos testes apresentarem as características acima citadas referentes a seções finitas.

5.4.2 Fator de Bloqueio

O fator de bloqueio consiste na relação entre a área frontal do modelo estudado e a área frontal da seção de testes, relação essa que deve ser inferior a 0,1 (BARLOW, RAE E POPE, 1999 p. 713).

Assim avaliando os resultados obtidos foram calculados os fatores de bloqueio para cada perfil em seus diferentes ângulos de ataque conforme mostrado nas tabelas 10 e 11.

Tabela 10: Fator de Bloqueio NACA 23015.

PERFIL NACA 23015		
Ângulo de ataque (graus)	Área frontal (m ²)	Fator de bloqueio
0	0,004	0,05
5	0,007	0,07
10	0,009	0,10
15	0,011	0,13
20	0,014	0,15
25	0,016	0,18
30	0,018	0,20
35	0,020	0,22
40	0,022	0,24
45	0,023	0,26

Fonte: O Autor, 2018.

Tabela 11: Fator de Bloqueio NACA 66(2)-215.

PERFIL NACA 66(2)-215		
Ângulo de ataque (graus)	Área frontal (m ²)	Fator de bloqueio
0	0,004	0,04
5	0,006	0,07
10	0,008	0,09
15	0,010	0,11
20	0,012	0,14
25	0,014	0,16
30	0,016	0,18
35	0,018	0,20
40	0,019	0,21
45	0,021	0,23

Fonte: O Autor, 2018.

Com esses fatores de bloqueio encontrados pode-se dizer que em ambos perfis a partir de 10° já se ultrapassa o máximo permitido de 0,1 conforme recomendado pela literatura citada, podendo constatar que os perfis estudados possuem dimensões muito grandes para a seção de testes existente. Esse parâmetro mostra o quanto o perfil estudado ocupa de espaço na seção de testes, pois quanto maior a área frontal do perfil maior será o fator de bloqueio e maior será a sua influência no resultado.

Segundo Haque *et al* (2016), a presença do objeto físico na seção de testes afeta o escoamento do ar, provocando um aumento na pressão dinâmica e, conseqüentemente, alterando as forças e momentos exercidos sobre o modelo em teste. Assim quanto maior forem as dimensões deste objeto maior será a pressão dinâmica e maior serão as alterações nas forças exercidas podendo chegar a discrepâncias como as encontradas nos resultados obtidos neste trabalho.

6 CONCLUSÃO

Os estudos realizados no túnel de vento das Faacz através de ensaios aerodinâmicos em perfis de asa permitiram verificar a influência do ângulo de ataque nos coeficientes de arrasto e sustentação conforme objetivo geral proposto neste trabalho. A Instalação dos instrumentos permitiu a obtenção de dados de força de arrasto e sustentação para a determinação dos respectivos coeficientes, possibilitando a avaliação de seus comportamentos com a variação dos ângulos de ataque.

Os resultados obtidos mostraram a tendência esperada de aumento dos coeficientes de arrasto e sustentação à medida em que se aumenta o ângulo de ataque, até o ponto de estol. Ressalta-se que, para as medições realizadas no perfil NACA 66(2)-215, o ponto de estol não foi atingido com o máximo valor de ângulo de ataque testado. Em termos quantitativos, os resultados obtidos para os perfis testados diferiram dos valores apontados na literatura. De modo geral, os valores de sustentação obtidos foram inferiores e os de arrasto, superiores, indicando uma menor eficiência aerodinâmica em relação ao esperado.

As discrepâncias observadas podem ter sido influenciadas por dois fatores, a saber: (1) os dados da literatura utilizados eram relativos à perfis infinitos, ao passo que os perfis testados no presente trabalho foram finitos; (2) as dimensões dos perfis testados, quando avaliadas em função do fator de bloqueio, estavam acima do recomendado por alguns autores.

Mesmo com os resultados obtidos, ainda é possível afirmar a validade da contribuição apresentada pelo presente trabalho no sentido de proporcionar a instrumentação do túnel de vento da FAACZ e possibilitar o desenvolvimento de trabalhos futuros.

A partir dessa análise, apresenta-se como proposta para trabalhos futuros o redimensionamento dos perfis utilizados a fim de adequar o fator de bloqueio e a realização de novos ensaios visando o alcance de valores mais próximos aos da literatura. Uma outra proposta é a realização dos ensaios através de simulações numéricas no túnel de vento realizando uma comparação com os ensaios realizados na prática, visando assim um enriquecimento dos estudos referentes ao escoamento em torno de perfis aerodinâmicos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, I. H.; VON DOENHOFF, A. E.; **Theory of wing suction, Including a Summary of airfoil data**. New York; Dover, 1959.

ALMEIDA, A. M.; SILVA, V. R.; CAMPELO, G. P. C.; **Túnel de Vento: Um Produto Educacional Acessível**. Universidade Federal do Pernambuco, 2014.

ARNOLDI, P. H. C.; **Estudo de Parâmetros Aerodinâmicos de Perfis em Túnel de Vento**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Panambi, 2011.

BARLOW, J.W.; RAE, W.H.; POPE A. **Low-Speed Wind Tunnel Testing**. 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc.: 1999. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/221788571/Wind-Tunnel-Testing-Barlow-Rae-Pope>>. Acesso em: 25 out 2018.

BLESSMAN, J. **Aerodinâmica das Construções**. 2a Edição. Porto Alegre: Sagra. 1990.

FERREIRA, G. G.; JUNIOR, D. P.; LETA, F. R.; **Desenvolvimento de um Túnel de Vento Compacto para Simulações Didáticas de Projetos de Engenharia Mecânica**. CONEM 2012. São Luís: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2012.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J.; **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

FREITAS *et al.* **Aerodinâmica Básica**. Seminário Aeroespacial II do Mestrado Integrado em Engenharia Aeroespacial do Instituto Superior Técnico de Lisboa. 18p. Lisboa, 2015.

GOECKI, J. P. **Túneis aerodinâmicos: passado, presente e futuro**. Encit 88 – II Encontro Nacional de Ciências Térmicas. Águas de Lindóia – SP, 1988.

LOPES, A. L.; SAKANE, K. K.; KORZENOWSKI, H.; **Estudo Experimental Preliminar Sobre um Aerofólio NACA 6412**. Universidade Vale do Paraíba. São Paulo: Univap. 2016.

MOREIRA JUNIOR, O; ANTUNIASSI, U. R. **Construção e validação de um túnel de vento para ensaios de estimativa da deriva em pulverizações agrícolas**. Revista Energia na Agricultura, v. 25, n. 3, 2010. Disponível em: <<http://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/71>>. Acesso em 22 de junho de 2017.

OLIVEIRA, G. G. **Sustentação Aerodinâmica Bernoulli x Newton**. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. Departamento de Química e Exatas. Jequié, Bahia, 2011. Disponível em: <<http://www2.uesb.br/matematicajq/images/projeto.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2018.

OLIVEIRA, T.D. *et al.* **Redução de Consumo de combustível em Veículos de Carga Rodoviários: Uma Abordagem Numérica e Analítica**. Revista Virtual de Química, Rio de Janeiro, v.8, n.4, p. 1204-1219, ago.2016. Disponível em: <<http://rvq.sbq.org.br/imagebank/pdf/v8n4a14.pdf>> Acesso em 15 mar 2018.

POOTER, M. C; WIGGERT, D. C. **Mecânica dos Fluidos**. 3ª Edição. São Paulo. Cengage Learning. 2013.

PEIXOTO, A. L.; NETO, J. T. M.; ALVES, E. C.; **Estudo do escoamento em Torno de um Perfil Naca 0012**. Instituto Politécnico, Nova Friburgo: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2004.

RODRIGUES, L. E. M. J. **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica com Aplicações ao Projeto SAE-AeroDesign: Aerodinâmica e Desempenho**. 1. ed. 320p. São Paulo, 2014. Disponível em <<http://www.engbrasil.eng.br>> Acesso em: 11 out 2017.

SCHNEIDER, S. P. **Medição de Velocidade e Vazão de Fluidos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Geste. Porto Alegre, 2011.

SILVA, L. J; COSTA, F. P. **Análise numérica de escoamento sobre perfil de asa: estudo de modelo NACA 64A00.29**. Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada. Universidade Federal do Oeste da Bahia, Bahia, 2016. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbfta>>. Acesso em: 11 out 2017.

SELIG, M. S.; MCGRANAHAN, B. D. **Wind Tunnel Aerodynamic tests of Six Airfoils for Use on Small Wind Turbines**. University of Illinois. Urbana – Champaign.2003. Disponível em: <<http://m-selig.ae.illinois.edu/pubs/SeligMcgranahan-2004-NREL-SR-500-34515-SixNRLAirfoils.pdf>>. Acesso em: 7 maio 2018.

HAQUE *et al.* **Comparison of data correction methods for blockage effects in semi-span wing model testing**. International Islamic University Malaysia. Kuala Lumpur – Malaysia. EPJ Web of Conferences, 2016. Disponível em: <https://www.epjconferences.org/articles/epjconf/pdf/2016/09/epjconf_efm2016_021pdf>. Acesso em: 25 out 2018.