



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA - PROPES**

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO PERFIL DE PRESSÕES E  
VELOCIDADES AO REDOR DE UM AEROFÓLIO EMPREGANDO  
MEDIDAS DE PRESSÃO E ANEMOMETRIA POR FILME QUENTE**

**Aluna: Giovanna Volponi de Oliveira**

**RA: 21039915**

**Orientador: César Monzu Freire**

**São Bernardo do Campo**

**Setembro de 2018**

# Sumário

---

Resumo	3
Introdução	3
Objetivos	8
Metodologia	9
Resultados	11
Discussão	21
Conclusão	23
Referências	24

# Resumo

---

O estudo do escoamento ao redor de aerofólios é fundamental para entender suas características aerodinâmicas. Dentre estas características estão o perfil de velocidades que se desenvolve ao redor do aerofólio e também a distribuição de pressão ao longo de sua superfície. Este projeto de Iniciação Científica tem por objetivo desenvolver um trabalho experimental no túnel de vento da UFABC e determinar o campo de pressão ao redor de um aerofólio através de pequenos orifícios presentes na geometria deste aerofólio e conectados via pequenos tubos a um sistema de vasos comunicantes. Além de medir o campo de pressão ao redor do aerofólio para diferentes condições de velocidade do escoamento e ângulo de ataque do perfil aerodinâmico, será medido o campo de velocidades do escoamento ao redor deste perfil usando um equipamento de medição de velocidades denominado anemômetro de filme quente. O anemômetro será usado não só para estudar o escoamento ao redor do aerofólio como também para estudar as características do escoamento no interior da seção de testes do próprio túnel de vento, tais como seu perfil de velocidades, as características de camada limite e também o nível de turbulência do escoamento.

## Introdução

---

Após cinco anos do primeiro voo realizado pelos irmãos Wright, foi iniciado a construção de aeronaves por pessoas autônomas e por empresas. A Europa foi a pioneira na produção com a França e a Alemanha que ganharam destaque no período da Primeira Guerra Mundial. Após a guerra, laboratórios de pesquisa e universidades aeronáutica foram criados e as indústrias voltaram-se mais para o desenvolvimento do design do que para a produção em grande quantidade. A partir de 1930, devido a Segunda Guerra Mundial, as indústrias aeronáuticas voltaram-se novamente para a geração e construção em massa de aeronaves militares e a elaboração de táticas para obter maior eficiência durante processo de produção e de voo. Este foi o período em que houve o maior desenvolvimento na área e por esse motivo passaram acreditar no poder da indústria aeronáutica e planejaram a sua disseminação ao redor do mundo. No período da Guerra Fria, as empresas voltaram-se para a pesquisa e a construção de laboratório na área de estruturas de aeronaves e consequentemente na de materiais, eletrônica, segurança, entre outras. Porém começou a ser desenvolvida uma política de aeronaves ao organizar um programa de defesa que padronizou as suas estruturas provocando um aumento no custo de produção e causando a diminuição na quantidade de unidades construídas, mas que se conservasse durante mais tempo. Com o fim da Guerra Fria, houveram mudanças na indústria aeronáutica: o setor aeronáutico civil começou a prevalecer sobre o militar e os investimentos, o número de empregados e cientistas na área diminuíram.

Desde o surgimento da indústria aeronáutica houve estímulo a pesquisa e a inovação em diversas áreas e este setor tinha sido considerado como o principal devido a criação de novas tecnologias. A análise de escoamento em volta de um objeto é um estudo que pode ser aplicado a diversos objetos sob quaisquer fluidos para observar os seus comportamentos e o que deve ser alterado neles. Neste caso, utilizando um aerofólio como objeto e o ar como o fluido é possível obter o comportamento durante o

voo e a partir disto otimizar as suas características aerodinâmicas para que seja obtido melhores resultados e menores custos de produção também.

Para este estudo, pode ser utilizado um túnel de vento. Ele proporciona o escoamento de um fluido em torno de um objeto e que passa por ele por meio de uma sucção gerada por um ventilador. No setor aeroespacial, dois parâmetros são importantes para o estudo do escoamento: o número de Mach, que está relacionada à velocidade da aeronave em função da razão entre a sua velocidade verdadeira ( $v$ ) e a velocidade do som ( $c$ ) representada pela equação 1, e o número de Reynolds em função das forças de inércia e de viscosidade representada pela equação 2, onde  $V$  é a velocidade do escoamento do fluido (m/s),  $l$  é um comprimento característico (m),  $\rho$  é a densidade do fluido ( $\text{kg/m}^3$ ) e  $\mu$  é a viscosidade do fluido (Pa.s) [1].

$$Ma = \frac{v}{c} \quad (1)$$

$$Re = \frac{Vl\rho}{\mu} \quad (2)$$

Outro fator importante para a utilização deste instrumento seria a calibração, ou seja, a medição do perfil de velocidade e suas variações na sua seção de teste. Essas variações randômicas são denominadas turbulência e é uma condição irregular de um movimento em que tanto a velocidade quanto a pressão variam no tempo e no espaço [7]. Isso pode ser influenciado devido, por exemplo, ao seu tamanho e o ambiente onde o túnel de vento está localizado. Com esses dados, é possível obter a precisão das medições realizadas.

O instrumento que está disponível na UFABC é o Túnel de Vento Subsônico AF100 da *Tecquipment Academia* (figura 1) cujas características são o ventilador do tipo axial, a velocidade do ar varia de 0 a 36m/s e a seção de ensaio possui 305 mm x 305 mm x 600 mm [2]. Esta dimensão é considerada pequena para o estudo da maioria dos objetos, entretanto é possível realizá-lo a partir de um modelo com escala reduzida. Contudo, este tipo de teste gera como resultado um número de Reynolds diferente daquele com o objeto em tamanhos reais devido à sua dependência aos valores de densidade do ar, velocidade e também tamanho do objeto. A partir da equação 2 é possível observar que isso pode ser corrigido aumentando adequadamente a velocidade do fluido no túnel de vento.



Figura 1: Túnel de Vento Subsônico AF100.

Da mesma forma, nesta atividade será utilizada um modelo de asa de uma aeronave em tamanhos menores, o aerofólio NACA 0012 o qual é bastante utilizado em pesquisas. Segundo a descrição dada pela NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*), este aerofólio pertence a série 4 e seus dois primeiros dígitos indicam que seu arqueamento é nulo, possuindo simetria, e os dois últimos dígitos indicam que sua espessura pode corresponder até 12% do comprimento da corda [3].

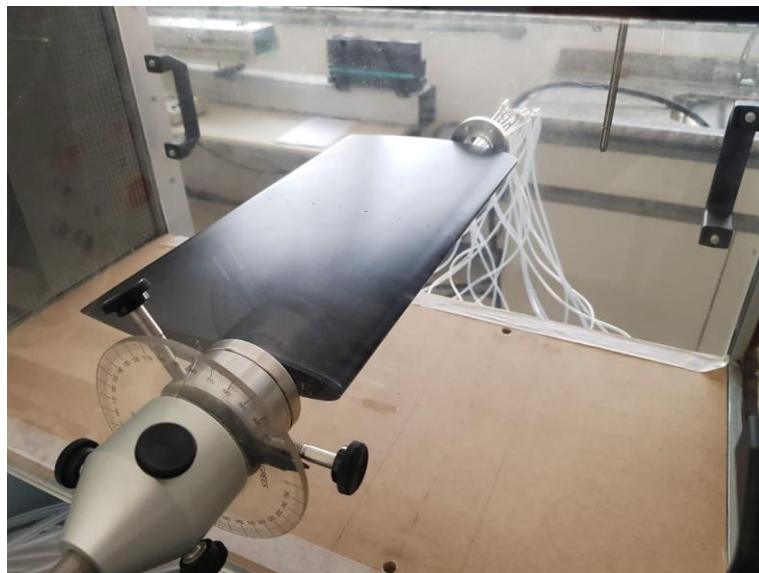


Figura 2: Aerofólio NACA 0012.

Para o estudo do perfil de pressões ao redor do aerofólio, é utilizado o coeficiente de pressão como parâmetro. Este coeficiente caracteriza a distribuição de pressão causada por um fluxo de fluidos ao redor de um objeto. Pode ser obtido a partir da equação 5 onde  $p$  é a pressão no ponto em questão (Pa),  $p_0$  é uma pressão de referência (Pa),  $\rho$  é a densidade do fluido ( $\text{kg/m}^3$ ),  $V$  é a sua velocidade do escoamento em uma região não perturbada pela presença do aerofólio (m/s). A densidade do fluido

pode ser dada pela equação 3 onde  $P$  é a pressão atmosférica (Pa),  $R$  é a constante dos gases (J/kgK) e  $T$  a temperatura local (K). O coeficiente varia de acordo com a região onde está sendo medido, a direção do fluido e o tamanho e formato do objeto.

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (3)$$

$$\Delta p = P_2 - P_1 = \rho gh \quad (4)$$

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (5)$$

Para determinar este parâmetro pode ser utilizado um instrumento denominado manômetro com múltiplos tubos conectados através de cabos flexíveis aos orifícios os quais são distribuídos sobre a superfície do aerofólio e perpendiculares a ela. Esse manômetro é do tipo coluna e possui um líquido azul em seu interior cuja densidade é conhecida, como representado pela figura 3. Desta forma, a medição ocorre pelo equilíbrio da coluna líquida com a pressão aplicada sobre ela, isto é, ela permanece em equilíbrio enquanto estiver apenas sob pressão atmosférica e a tomada de pressão de cada região do aerofólio onde o orifício está localizado altera a altura da coluna. Por meio desta altura em função do deslocamento do líquido visualizado em uma escala graduada no instrumento é obtido a variação de pressão e, conseqüentemente, o coeficiente de pressão. A relação fundamental para o deslocamento do líquido e a pressão aplicada é dada pela equação 4, onde  $\Delta p$  é a variação da pressão,  $P_1$  e  $P_2$  são as pressões da coluna respectivamente sem e com pressão sobre (Pa),  $\rho$  é a densidade do líquido (kg/m<sup>3</sup>),  $g$  é a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>) e  $h$  é a diferença da altura da coluna causada pelo deslocamento do líquido (m) [4].

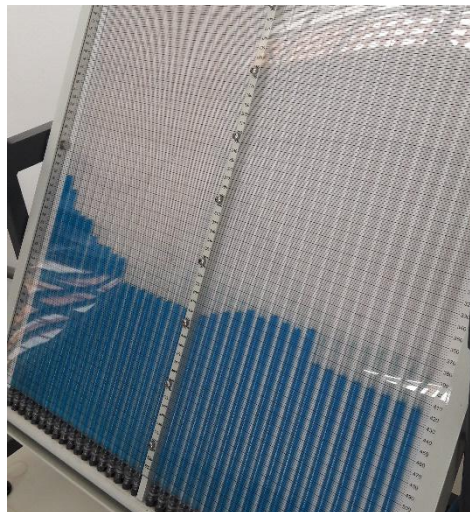


Figura 3: Manômetro com múltiplos tubos.

E para o estudo da velocidade pode ser utilizado o anemômetro de filme quente, constituído por um resistor em formato de um fino filamento localizado em sua extremidade, e de uma Ponte Wheatstone na qual o fio é um dos seus componentes. Por esse filamento passa uma corrente elétrica causando um aquecimento, e ao ser inserido em uma posição da seção de ensaio sob escoamento de fluido ocorre troca de calor entre

ambos, havendo uma mudança de sua resistência e da tensão no circuito e causando um desequilíbrio. Em função deste desequilíbrio, as outras resistências irão balancear para manter a resistência do circuito ou a temperatura do instrumento para que a medição continue a ocorrer adequadamente. Essa alta taxa de aquisição do anemômetro permite com que as medições sejam realizadas rapidamente e, desta forma, sejam medidas as turbulências no escoamento do fluido, no caso, no túnel de vento.

A partir de modelagens matemáticas é possível obter a velocidade local instantânea do fluido. A equação 6 é uma relação entre o calor introduzido e o dissipado no sensor onde  $R_w$  é a resistência elétrica do fio,  $I_w$  é a corrente elétrica que passa pelo fio,  $T_w$  e  $T_a$  são respectivamente a temperatura do fio e do ambiente e  $\phi(U)$  é o efeito da convecção forçada e depende da velocidade de escoamento.

$$R_w I_w^2 = (T_w - T_a) \phi(U) \quad (6)$$

Diversos problemas podem acontecer como, por exemplo, a resposta da variação da temperatura no filamento ocorrer rapidamente devido a pequena dimensão do filamento podendo incluir turbulências em seus resultados. Portanto, para que sejam realizados estudos com tal instrumento deve-se haver uma calibração. O instrumento está calibrado quando ele indica velocidade nula quando o seu sensor se locomove na linha de centro da seção de teste do túnel de vento, para não haver a influência do efeito de parede sobre o sensor, e possui uma velocidade igual ao do escoamento do ar. Este método pode ser realizado quando a voltagem do anemômetro ( $U$ ) varia em função da velocidade do escoamento do ar ( $v$ ) como representada pela equação 7. Além disso, o valor mínimo deve ocorrer em  $v = 0$  e devem responder às mudanças no escoamento do ar se for adicionada uma componente senoidal com uma determinada frequência ao escoamento uniforme.

$$U = f(v) \quad (7)$$

A calibração do anemômetro pode ser realizada por dois métodos: o método do segundo harmônico e o método mínimo. No teste do primeiro método, o sensor do anemômetro pode se movimentar no mesmo sentido ou contrário ao escoamento do ar o qual pode ser uniforme ou com uma influência da senóide. Além disso, podem ser inseridos no sistema o filtro passa-baixa para diminuir a interferência devido as variações da velocidade, e o filtro Bessel de segunda ordem e com frequência limite igual ao da componente senoidal. No método mínimo, o escoamento será uniforme, ou seja, a componente senoidal não é inserida, e o teste é realizado com o sensor movimentando-se alternadamente entre os sentidos a favor e contra o escoamento com uma velocidade constante. Neste caso, também pode ser inserido um filtro passa-baixa e filtro Bessel de segunda ordem com um limite de frequência. O uso de um osciloscópio pode auxiliar nestas análises.

Devido ao primeiro método utilizar o segundo harmônico, é necessário com que o sensor percorra uma determinada distância e alcance uma velocidade para que haja um numero de períodos completos da senóide a ponto de haver apenas a manifestação do segundo harmônico no escoamento e não mais do primeiro harmônico. Isso causa um maior caminho percorrido e um maior tempo de análise, podendo ser considerado como uma limitação do primeiro. Desta forma, as oscilações demoram mais para aparecer no osciloscópio enquanto que no segundo método, os níveis mais baixos da curva de oscilação do sinal de saída são mostrados continuamente [8].

O anemômetro de filme quente disponibilizado na UFABC é o *Miniature wire probe, straight* da *Dantec Dynamics* cujas características são: a sonda possui 5 µm de diâmetro; o sensor é composto por tungstênio e possui 1,25 mm de comprimento e uma resistência entre 3,2 e 3,6Ω; o suporte da sonda é banhado a ouro e possui 1,9 mm de diâmetro; e possui frequência (*Bandwidth*) de 10kHz. Ele foi desenvolvido para o estudo do escoamento sob apenas uma direção e também da turbulência (quando esta possuir pequena grandeza) [6].



Figura 4: Ponteira do anemômetro *Miniature wire probe straight*.

Além de conseguir o perfil de velocidade a partir do anemômetro de filme quente, é também possível a partir do perfil de pressões ao redor do aerofólio medido pelo manômetro de coluna d'água baseando-se no Teorema de Bernoulli. Ele define que a energia do fluido ideal em escoamento incompressível de linha corrente se conserva, entretanto pode ser convertida entre as energias cinéticas, piezométricas e gravitacional, como representado pela equação de Bernoulli onde  $\rho$  é a massa específica ( $\text{kg/m}^3$ ),  $g$  a aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ ),  $V_0$  e  $V$  são as velocidades ( $\text{m/s}$ ),  $P_0$  e  $P$  são as pressões e  $h_0$  e  $h$  são as alturas ( $\text{m}$ ) do estado inicial e final respectivamente.

$$\frac{V_0^2}{2} + \frac{P_0}{\rho} + gh_0 = \frac{V^2}{2} + \frac{P}{\rho} + gh \quad (8)$$

A velocidade também pode ser obtida pelo tubo de Pitot. Este instrumento possui dois tubos concêntricos geralmente no formato “L”. O tubo externo possui furos laterais permitindo com que obtenha a pressão total do escoamento enquanto que o interno possui abertura direto no sentido de escoamento obtendo a pressão estática. A partir variação destas duas pressões é possível determinar a velocidade na região estudada. [8]

## Objetivos

Este trabalho de iniciação científica possui objetivos de diferentes naturezas. A primeira é familiarizar a aluna candidato ao trabalho de investigação experimental, tendo que lidar com equipamentos de medição de diferentes tipos, com princípios físicos, limitações e vantagens distintas. Com dados obtidos em diferentes técnicas de



medição a aluna deve comparar os resultados e deles extrair conclusões sobre as características do escoamento ao redor de um aerofólio. Além disso, este trabalho de iniciação científica auxilia a aluna a aprofundar os conhecimentos em disciplinas relacionadas ao curso de seu interesse, no caso Engenharia Aeroespacial, pois promove o estudo mais aprofundado de mecânica dos fluidos, dinâmica de voo, sensores e circuitos. Um objetivo direto deste trabalho é desenvolver uma metodologia para medição do campo de pressão e de velocidades do escoamento ao redor de uma dada geometria, no caso um aerofólio NACA0012. Um objetivo secundário é usar a medição de velocidades do anemômetro de filme quente para estudar o perfil de velocidades do escoamento na seção de teste do túnel de vento e, assim, determinar seu nível de turbulência.

## Metodologia

---

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica para aprofundar os conceitos de mecânica dos fluidos, sensores e técnicas experimentais. Neste estudo foram obtidos conhecimentos sobre o funcionamento e a calibração dos instrumentos para manuseá-los corretamente, no caso o túnel de vento, o anemômetro de filme quente, o manômetro e o tubo de Pitot, e sobre a aerodinâmica do escoamento de ar ao redor de um aerofólio. Desta forma, foram estudados conceitos como o de pressão hidrostática, filtros de sinais, velocidade, sustentação, pressão entre outros.

Após ter se familiarizado com os assuntos abordados nesta pesquisa, foi iniciada a parte experimental com os equipamentos já disponibilizados pela UFABC. Nesta etapa primeiramente haveria a calibração do túnel de vento realizada a partir do anemômetro de filme quente submetido ao escoamento de ar na seção de teste sem o objeto de estudo, no caso o aerofólio. Assim, inicialmente seria realizada a tomada de velocidades ao longo do centro da seção de teste para diversas velocidades, ou seja, diversas rotações por minuto (RPM) do motor do túnel de vento, e para cada uma delas a medição também seria realizada pelo tubo de Pitot para realizar comparações entre os dados obtidos. Entretanto, o tubo de Pitot mede a velocidade apenas em um ponto enquanto o anemômetro desloca-se na seção de teste. Além disso, a partir dos dados obtidos pelo anemômetro é possível medir o grau de dispersão das velocidades, indicando o grau de turbulência no escoamento, a partir do desvio padrão. Essa medida pode ser obtida pela equação 9 onde  $x_i$  seria os valores obtidos pelo instrumento,  $\bar{x}$  a média aritmética desses valores e  $n$  a quantidade desses valores.

$$DP = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad 9)$$

Analisando os dados medidos anteriormente, também é possível determinar se a hipótese do regime permanente é válida, ou seja, se o perfil de escoamento do fluido é uniforme. Porém este perfil frontal da seção de teste do túnel de vento e a sua influência de parede podem ser determinados realizando a tomada de velocidade ao variar a posição do sensor do anemômetro em uma velocidade constante para aproximadamente três situações com velocidades diferentes.

E ao final são adquiridos os dados de pressão e velocidade ao redor do aerofólio utilizando o túnel de vento e os equipamentos juntos a ele, o manômetro e o tubo de Pitot. O aerofólio a ser obtido o perfil de velocidade e pressão é um NACA 0012. Ele faz parte do material do próprio túnel de vento e possui diversos pontos, do bordo de ataque ao bordo de fuga, conectados ao manômetro por meio de tubos flexíveis (figura 5). Assim, de acordo com a velocidade de escoamento, a pressão nas regiões próximas aos furos é diferente o que faz mudar o nível da coluna d'água do manômetro e, consequentemente, obter a tomada de pressão ao redor do aerofólio. Além disso, o aerofólio está fixo no centro da seção de teste por meio de parafusos, os quais quando afrouxados permitem com que o seu ângulo de ataque seja alterado.

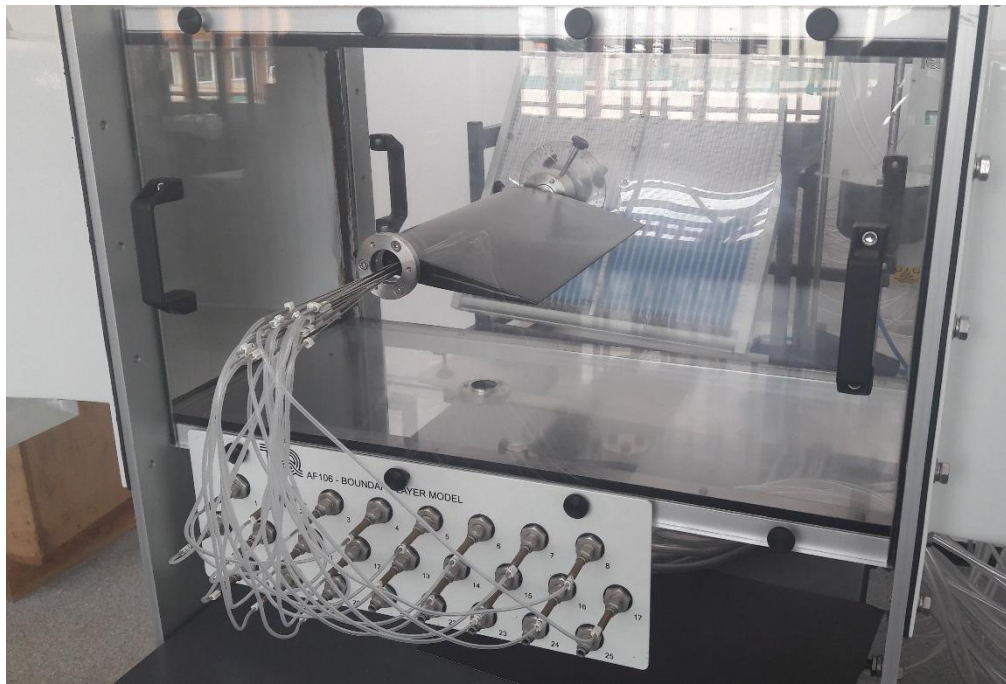


Figura 5: Modelo do aerofólio NACA 0012 conectado ao manômetro através de cabos e localizado no interior da seção de ensaio do túnel de vento.

Baseando-se neste funcionamento, o estudo foi realizado a partir de duas velocidades e dois ângulos de ataque para cada uma delas. Mediram-se as pressões em cada ponto de tomada de pressão do aerofólio, tanto no extradorso quanto no intradorso. Para isso foi utilizado o manômetro de coluna d'água e a sua variação quando sob escoamento pode ser convertida pela equação 4 para medir a variação de pressão do momento onde não há escoamento para quando há com uma determinada velocidade. O tubo de Pitot é conectado por meio de cabos flexíveis a uma coluna de líquido e quando houver um escoamento com uma determinada velocidade, da mesma forma que o manômetro, a altura do líquido varia e obtém-se a velocidade deste escoamento a partir da equação de conversão 10 onde  $\Delta P$  é a pressão hidrostática da coluna de líquido (m) e  $\gamma$  a sua densidade ( $\text{kg/m}^3$ ).

$$V = \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho_{ar}}} \quad (10)$$

A partir dos dados anteriores, é possível obter os coeficientes de pressão pela equação 5. Plotando esses valores em dois gráficos de dispersão, um representando a região extradorso e a outra intradorso, em função da localização dos pontos de tomada de pressão para cada velocidade e ângulo de ataque é possível realizar a integração numérica e obter os coeficiente de sustentação para cada caso, e assim plotar um gráfico deste em função do ângulo de ataque.

Outra análise que pode ser realizada após a tomada de pressão pelo manômetro seria a obtenção das velocidades em cada ponto e para cada caso com uma velocidade e ângulo de ataque específicos, e sua comparação com o valor obtido pelo tubo de Pitot. Baseando-se na equação de Bernoulli e desprezando a variação de energia gravitacional, a velocidade pode ser calculada a partir da equação 11 onde  $U_T$  corresponde a velocidade medida pelo tubo de Pitot (m/s).

$$U_L = \sqrt{U_T^2 + \frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (11)$$

## Resultados

---

Seguindo a metodologia elaborada anteriormente, a primeira etapa seria a calibração do sistema. Primeiramente o anemômetro de filme quente que estava na UFABC, campus de Santo André deveria ser transportado para o de São Bernardo do Campo. Entretanto, este processo foi demorado devido aos trâmites necessários para o transporte. Após isso, como o equipamento nunca tinha sido usado na Universidade para realizar as medições, foi necessário instalar e calibrá-lo e para isso foi necessário solicitar um técnico especializado no equipamento. Porém, como não foi possível finalizar o processo de montagem de equipamento, os dados para calibração do túnel de vento e sua comparação com os do tubo de Pitot assim como a determinação do perfil de velocidade frontal da seção de teste não puderam ser obtidos. Apesar deste empecilho, o perfil de velocidade e pressão também pode ser obtidos pelos instrumentos juntos ao túnel de vento como o manômetro e o tubo de Pitot.

Foram definidas duas velocidades e dois ângulos de ataque pelo qual foram realizados os testes. A velocidade pode ser medida pelo tubo de Pitot a qual está conectado a uma coluna de líquido cuja densidade é  $\rho=886,9\text{kg/m}^3$ . No primeiro caso, a coluna do líquido variou 20mm e, com a conversão utilizando a equação 10, isso corresponde a um escoamento com velocidade igual a 16,77m/s. No segundo caso, a coluna do líquido variou 40mm e, da mesma forma que no caso anterior, corresponde a velocidade 23,72m/s.

Para realizar a tomada de pressão, o manômetro possui 20 colunas d'água numeradas, onde as ímpares indicam a tomada de pressão no extradorso e os pares no intradorso. A tabela 1 apresenta as alturas das colunas para as diversas situações e quando não houver escoamento ( $h_0$ ).

Tabela 1: Altura da coluna d'água para as velocidades de escoamento do ar e ângulo de ataque do aerofólio consideradas e dado em metros.

	0m/s	16,77m/s	16,77m/s	23,72m/s	23,72m/s
	0°	3°	6°	3°	6°
Tomada de pressão	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1	0,398	0,360	0,352	0,342	0,312
2	0,402	0,410	0,412	0,418	0,422
3	0,400	0,366	0,360	0,350	0,326
4	0,404	0,404	0,406	0,404	0,412
5	0,398	0,376	0,378	0,360	0,348
6	0,404	0,400	0,404	0,396	0,408
7	0,398	0,382	0,376	0,364	0,354
8	0,404	0,398	0,402	0,390	0,400
9	0,398	0,382	0,376	0,364	0,356
10	0,402	0,392	0,396	0,382	0,390
11	0,398	0,390	0,386	0,380	0,378
12	0,404	0,394	0,398	0,388	0,394
13	0,396	0,394	0,390	0,388	0,386
14	0,398	0,390	0,392	0,380	0,386
15	0,398	0,392	0,390	0,386	0,386
16	0,400	0,392	0,394	0,388	0,390
17	0,496	0,392	0,392	0,388	0,390
18	0,496	0,394	0,394	0,390	0,392
19	0,496	0,392	0,392	0,388	0,390
20	0,496	0,390	0,392	0,384	0,486

Para realizar a análise do coeficiente de pressão e de sustentação, esses valores devem ser convertidos para o sistema internacional de unidades (SI). E a partir da variação de pressão quando não há escoamento para quando há com uma determinada velocidade (tabela 2), obtém-se os coeficientes de pressão em cada ponto com cada velocidade e ângulo de ataque utilizando a equação 5, como indicado na tabela 3.

Tabela 2: Variação da pressão em cada ponto para as velocidades de escoamento e ângulo de ataque do aerofólio considerados em Pascal.

Tomada de pressão	16,77m/s	16,77m/s	23,72m/s	23,72m/s
	3°	6°	3°	6°
	(Pa)	(Pa)	(Pa)	(Pa)
1	371,66	449,91	547,71	841,13
2	-78,24	-97,81	-156,49	-195,61
3	332,54	391,22	489,03	723,76
4	0,00	-19,56	0,00	-78,24
5	215,17	195,61	371,66	489,03
6	39,12	0,00	78,24	-39,12
7	156,49	215,17	332,54	430,35
8	58,68	19,56	136,93	39,12
9	156,49	215,17	332,54	410,78
10	97,81	58,68	195,61	117,37
11	78,24	117,37	176,05	195,61
12	97,81	58,68	156,49	97,81
13	19,56	58,68	78,24	97,81
14	78,24	58,68	176,05	117,37
15	58,68	78,24	117,37	117,37
16	78,24	58,68	117,37	97,81
17	1017,18	1017,18	1056,30	1036,74
18	997,62	997,62	1036,74	1017,18
19	1017,18	1017,18	1056,30	1036,74
20	1036,74	1017,18	1095,42	97,81

Tabela 3: Coeficientes de pressão para cada ponto para as velocidades de escoamento do ar e ângulo de ataque do aerofólio considerados.

	16,77m/s 3°	16,77m/s 6°	23,72m/s 3°	23,72m/s 6°
Tomada de pressão				
1	2,18	2,64	1,60	2,46
2	-0,46	-0,57	-0,46	-0,57
3	1,95	2,29	1,43	2,12
4	0,00	-0,11	0,00	-0,23
5	1,26	1,15	1,09	1,43
6	0,23	0,00	0,23	-0,11
7	0,92	1,26	0,97	1,26
8	0,34	0,11	0,40	0,11
9	0,92	1,26	0,97	1,20
10	0,57	0,34	0,57	0,34
11	0,46	0,69	0,52	0,57
12	0,57	0,34	0,46	0,29
13	0,11	0,34	0,23	0,29
14	0,46	0,34	0,52	0,34
15	0,34	0,46	0,34	0,34
16	0,46	0,34	0,34	0,29
17	5,96	5,96	3,09	3,04
18	5,84	5,84	3,04	2,98
19	5,96	5,96	3,09	3,04
20	6,07	5,96	3,21	0,29

Com esses dados plota-se os gráficos de 1 a 4 de dispersão do coeficiente de pressão em função da razão  $\frac{x}{c}$ , onde  $x$  é a distância do bordo de ataque até o ponto de tomada de pressão, dada pela tabela 4, e  $c$  a corda do aerofólio no caso igual a 0,15m, localizado no intradorso e no extradorso para cada caso de velocidade e ângulo de ataque. Como os valores de coeficiente de pressão para os pontos de tomada 19 e 20 tem uma diferença considerável com relação ao coeficiente dos outros pontos, baseando-se na bibliografia para plotar este gráfico foram considerados o coeficiente de pressão do ponto 19 semelhante ao do 17 e do ponto 20 semelhante ao do 18. Realizando isso no *Microsoft Office Excel*, é possível adicionar uma linha de tendência nos pontos de dispersão plotados, de forma com que fique coerente com o mesmo caso específico analisado no programa *Xfoil*, gerando uma equação característica. Integrando esta equação entre 0 e 1 (valores máximo e mínimo da razão  $\frac{x}{c}$ ) e somando os valores gerados pelo gráfico que representa o intradorso e o extradorso do aerofólio em um caso específico, obtém-se o coeficiente de sustentação (tabela 5).

Tabela 4: Localização absoluta dos pontos de tomada de pressão com relação ao bordo de ataque e em metros.

Tomada de pressão	Localização (m)
1	0,001
2	0,002
3	0,004
4	0,008
5	0,011
6	0,015
7	0,019
8	0,023
9	0,038
10	0,041
11	0,062
12	0,059
13	0,081
14	0,078
15	0,101
16	0,114
17	0,122
18	0,130
19	0,137
20	0,150

Gráfico 1: Coeficiente de pressão em função da razão  $\frac{x}{c}$  do extradorso (curva azul) e do intradorso (curva vermelha) do aerofólio a  $3^\circ$  e sob o escoamento de ar com velocidade 16,77m/s.

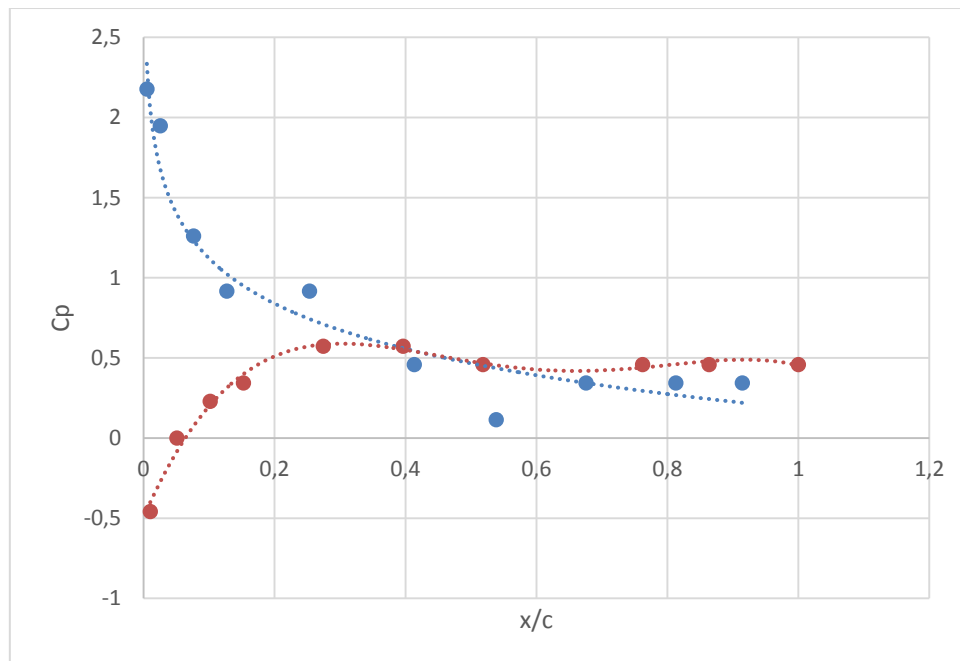


Gráfico 2: Coeficiente de pressão em função da razão  $\frac{x}{c}$  do extradorso (curva azul) e do intradorso (curva vermelha) do aerofólio a  $6^\circ$  e sob o escoamento de ar com velocidade 16,77m/s.

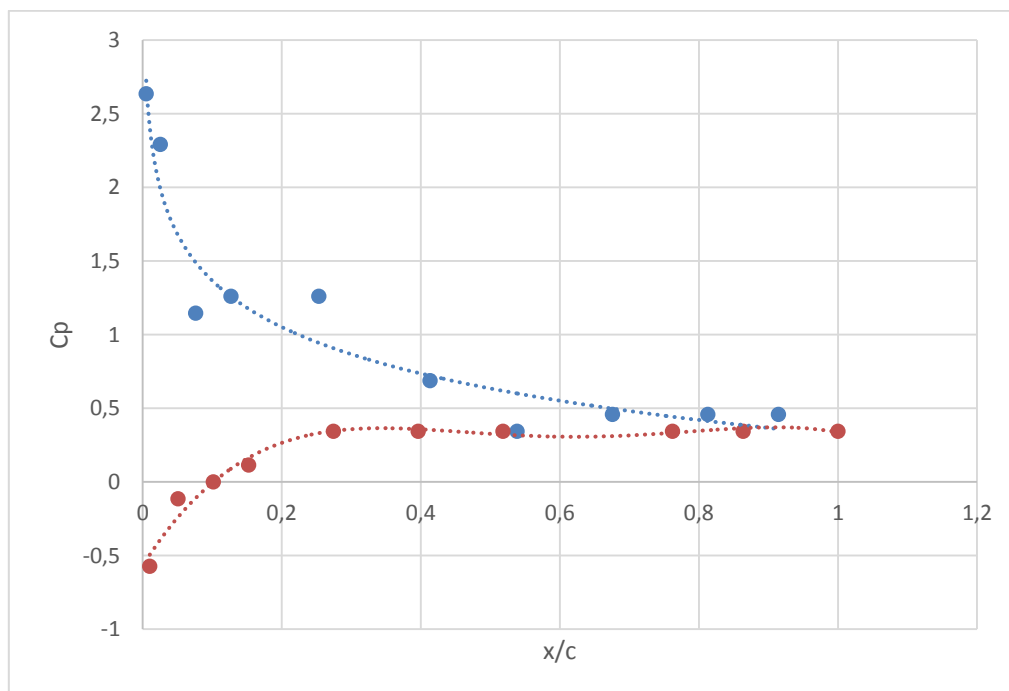




Gráfico 3: Coeficiente de pressão em função da razão  $\frac{x}{c}$  do extradorso (curva azul) e do intradorso (curva vermelha) do aerofólio a 3° e sob o escoamento de ar com velocidade 23,72/s.

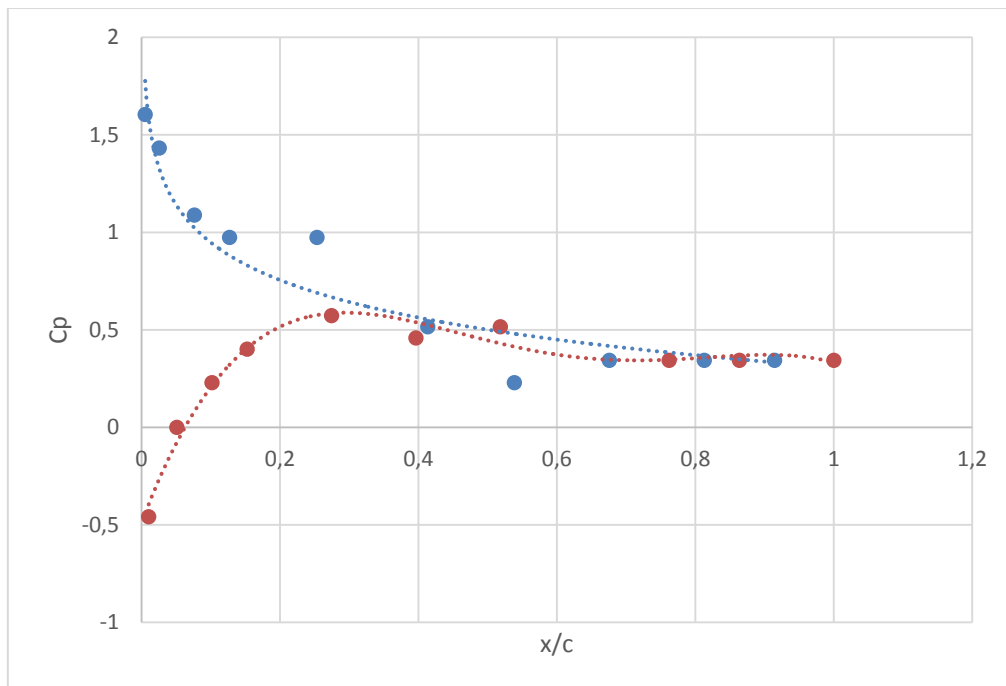
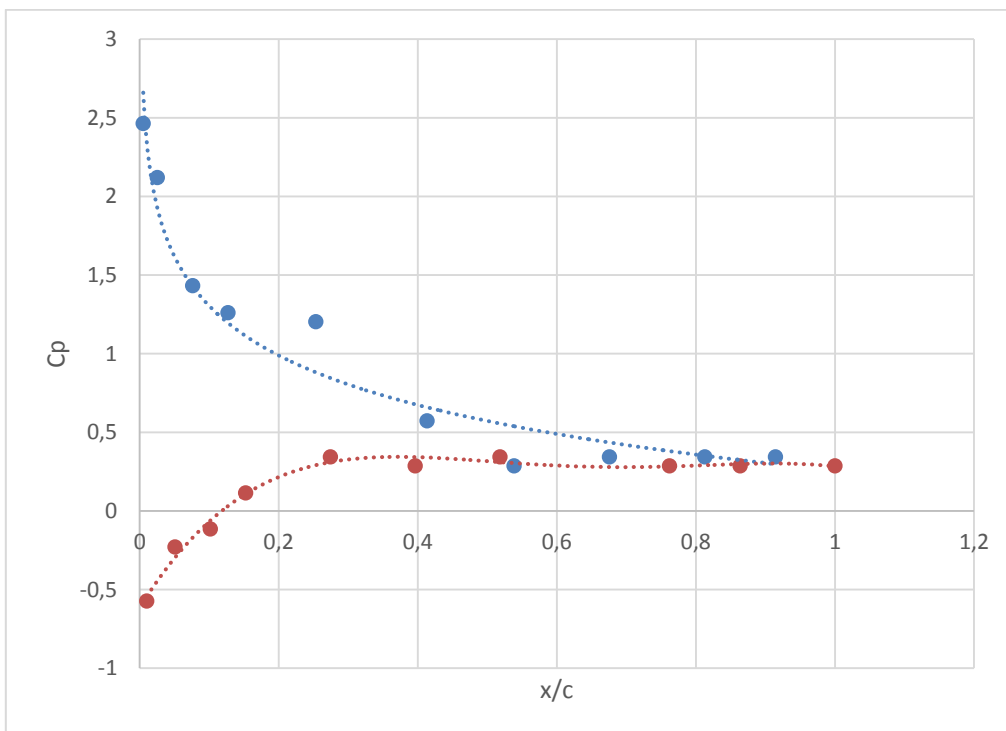


Gráfico 1: Coeficiente de pressão em função da razão  $\frac{x}{c}$  do extradorso (curva azul) e do intradorso (curva vermelha) do aerofólio a 6° e sob o escoamento de ar com velocidade 23,72m/s.



-Tabela 5: Coeficiente de sustentação para velocidade e ângulo de ataque considerados.

Velocidade(m/s)	Ângulo de ataque	Coeficiente de sustentação
16,77	3°	0,57
16,77	6°	2,96
23,72	3°	1,07
23,72	6°	2,98

Outro dado que pode ser obtido foi a velocidade em cada ponto de tomada de pressão a partir da variação de pressão e da velocidade medida pelo tubo de Pitot utilizando a equação de Bernoulli (equação 8). A tabela 6 indica os valores da velocidade para cada ponto de tomada de pressão. A partir destes valores foram plotados os gráficos de 5 a 8 do perfil de velocidade ao redor do aerofólio estudado, sendo ele da velocidade em função da razão  $\frac{x}{c}$  para cada velocidade e ângulo de ataque e realizado separadamente o perfil do intradorso e do extradorso.

Tabela 6: Velocidades para cada ponto de tomada de pressão para velocidades e ângulo de ataque do aerofólio considerados em m/s.

Tomada de pressão	16,77m/s	16,77m/s	23,72m/s	23,72m/s
	3°	6°	3°	6°
	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)
1	16,80	16,80	23,75	23,76
2	16,77	16,77	23,72	23,71
3	16,79	16,80	23,74	23,75
4	16,77	16,77	23,72	23,72
5	16,79	16,79	23,74	23,74
6	16,78	16,77	23,73	23,72
7	16,78	16,79	23,74	23,74
8	16,78	16,78	23,73	23,72
9	16,78	16,79	23,74	23,74
10	16,78	16,78	23,73	23,73
11	16,78	16,78	23,73	23,73
12	16,78	16,78	23,73	23,73
13	16,78	16,78	23,73	23,73
14	16,78	16,78	23,73	23,73
15	16,78	16,78	23,73	23,73
16	16,78	16,78	23,73	23,73
17	16,84	16,84	23,77	23,77
18	16,83	16,83	23,77	23,77
19	16,84	16,84	23,77	23,77
20	16,84	16,84	23,77	23,73

Gráfico 5: Velocidade do ponto de tomada de pressão em m/s em função da razão  $\frac{x}{c}$  do extradorso (curva em azul) e do intradorso (curva em vermelho) do aerofólio a 3° e sob o escoamento de ar com velocidade 16,77m/s.

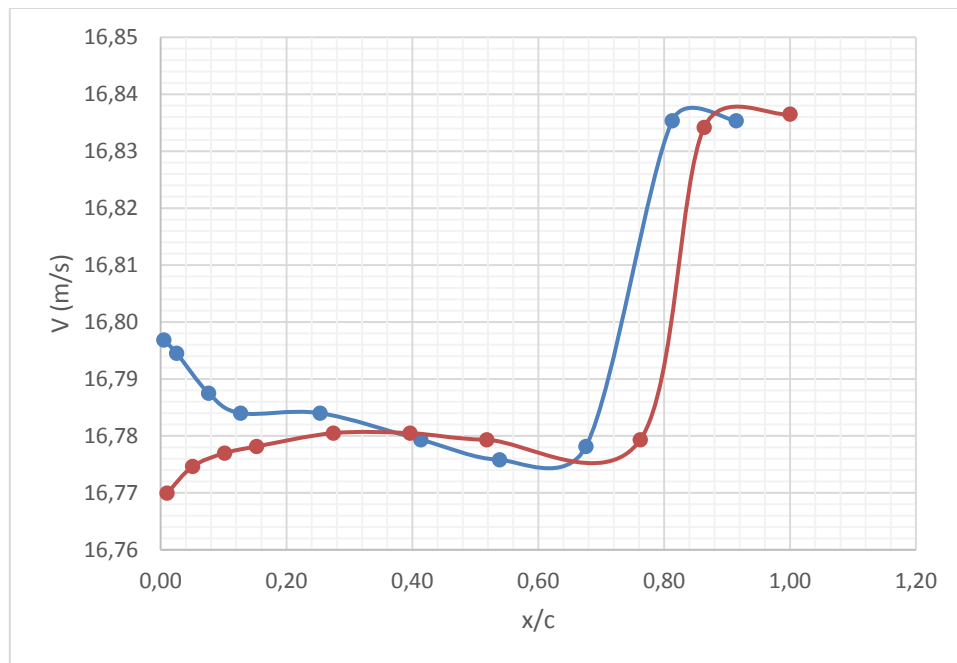


Gráfico 6: Velocidade do ponto de tomada de pressão em m/s em função da razão  $\frac{x}{c}$  do extradorso (curva em azul) e do intradorso (curva em vermelho) do aerofólio a 6° e sob o escoamento de ar com velocidade 16,77m/s.

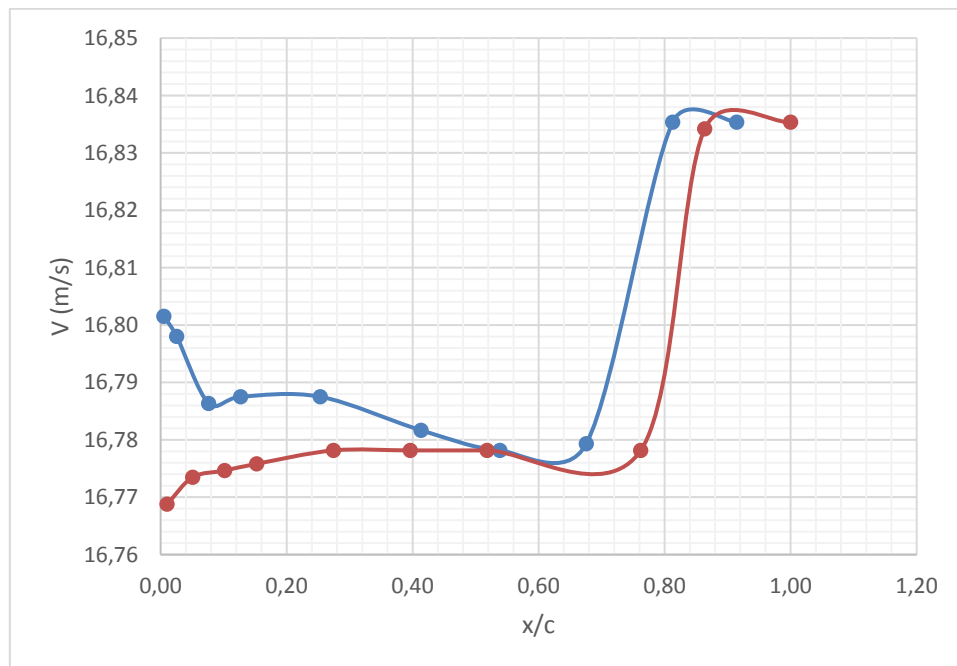


Gráfico 7: Velocidade do ponto de tomada de pressão em m/s em função da razão  $\frac{x}{c}$  do extradorso (curva em azul) e do intradorso (curva em vermelho) do aerofólio a 3° e sob o escoamento de ar com velocidade 23,72m/s.

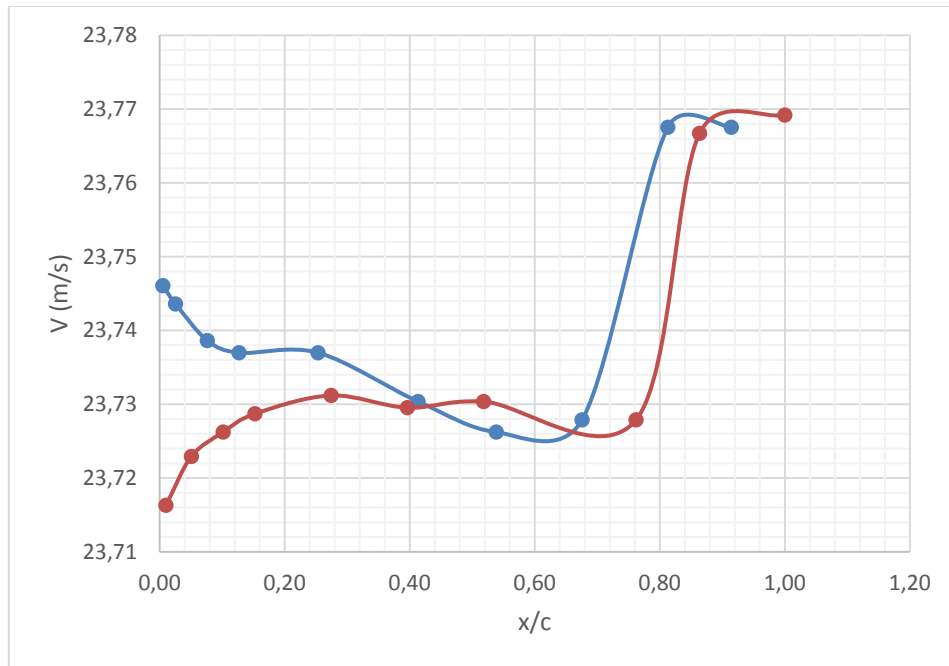
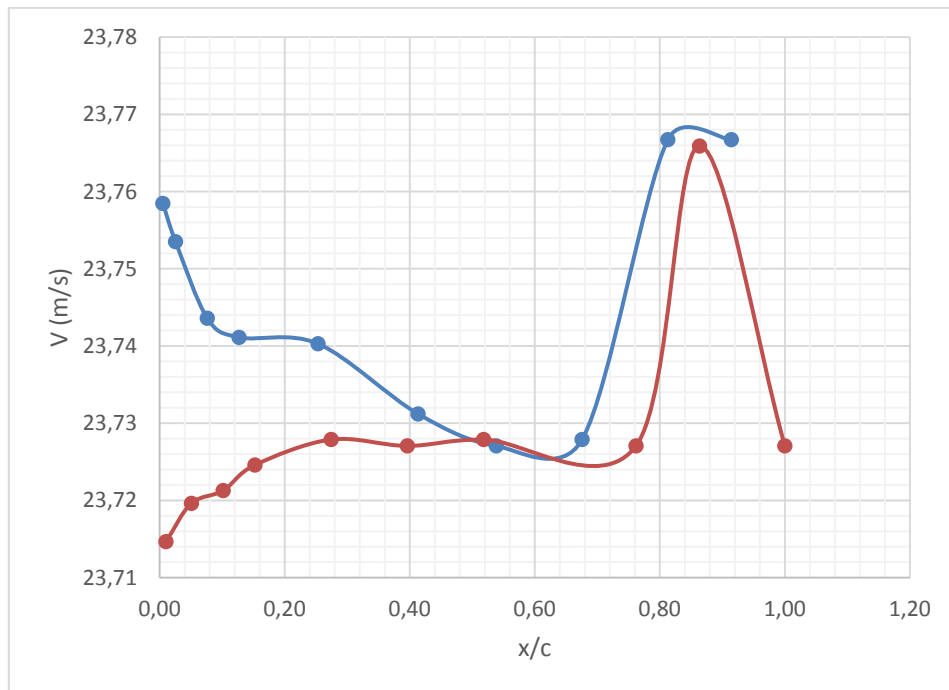


Gráfico 8: Velocidade do ponto de tomada de pressão em m/s em função da razão  $\frac{x}{c}$  do extradorso (curva em azul) e do intradorso (curva em vermelho) do aerofólio a 6° e sob o escoamento de ar com velocidade 23,72m/s.



# Discussão

---

Por causa das dificuldades ocasionadas para a utilização do anemômetro de filme quente, não foi possível realizar a parte experimental inicial planejada para este projeto de Iniciação Científica, a qual seria obter os dados para calibração do sistema e para a determinação do perfil de velocidades frontal do túnel de vento. Porém, devido a este projeto foi possível iniciar a montagem e a calibração do instrumento que nunca tinha sido utilizado na universidade e, assim, para que seja utilizado para realizar medições em futuras experiências. Quando ele estiver pronto para ser usado, os testes que não puderam ser realizados poderão ser feitos posteriormente e também outros projetos para melhorar as experiências realizadas no laboratório, como: a determinação do perfil de velocidade da seção do túnel de vento para poder ser aplicado em simulações computacionais; a influência de mecanismos de uniformização do escoamento; a influência de objetos posicionados próximo ao bocal de entrada do túnel de vento, entre outros.

Além disso, podem ser planejadas alterações na seção de teste do túnel de vento para realizar a anemometria nele, como criar um suporte fixo para a haste a qual o sensor do anemômetro está preso de forma com que ele fique paralelo ao escoamento para obter melhores medições, e também realizar outras furações tanto na parte superior quanto na lateral da seção de teste para que haja maior liberdade para a tomada de pressão ao longo da seção.

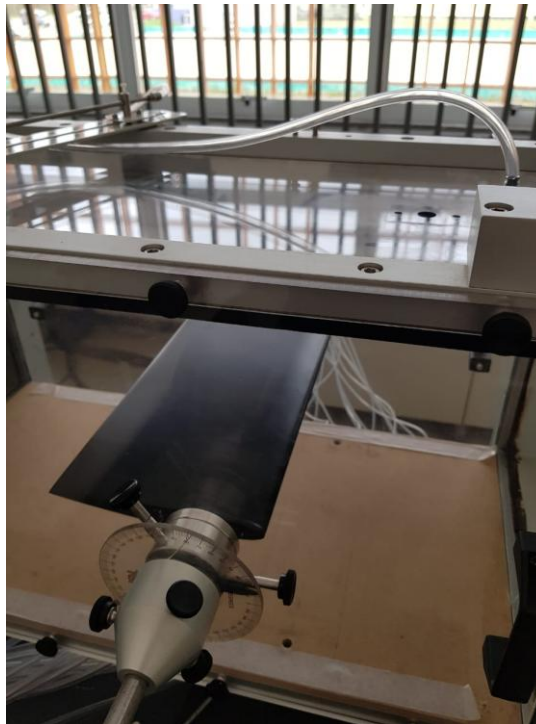


Figura 6: Parte superior e lateral da seção de teste que pode ser alterada para a anemometria.

E com os dados obtidos pelo manômetro e o tubo de Pitot e suas conversões utilizando as equações indicadas anteriormente é possível observar a variação de pressão ( $\Delta P$ ), coeficiente de pressão ( $C_p$ ), coeficiente de sustentação ( $C_l$ ) e da velocidade no ponto de tomada de pressão ( $V$ ) em função da velocidade dado pelo tudo

de Pitot e do ângulo de ataque do aerofólio na região do extradorso e no intradorso. As variações podem não ser uniformes e completamente de acordo com as suas respectivas equações devido aos distúrbios gerados pela calibração dos instrumentos, a turbulências no escoamento, as variações da coluna d'água enquanto as medições estão sendo realizadas, entre outros. Um destes distúrbios causados por um erro experimental pode ser observado pela curva em vermelho no gráfico 8 (distribuição de velocidade no intradorso do aerofólio quando o escoamento está a 23,72m/s e o ângulo de ataque do aerofólio  $6^\circ$ ) pois o pico da curva indica uma velocidade muito acima das demais.

No caso do coeficiente de sustentação, enquanto seus valores deveriam ser maiores com o aumento do ângulo para cada velocidade, no segundo caso, quando o escoamento está a 23,72m/s, o coeficiente para  $6^\circ$  é menor devido a ter atingido a região de estol nesta situação, havendo queda na sustentação do aerofólio.

Pode-se observar também que a velocidade em cada ponto de tomada de pressão varia discretamente entre os pontos e entre o intradorso e o extradorso. A média de velocidade no extradorso é maior do que no intradorso. Como o aerofólio utilizado é simétrico, o trecho percorrido pelo escoamento de ar em ambas as regiões é igual. Assim é possível comprovar que uma partícula no escoamento de ar leva mais tempo para percorrer o aerofólio quando ela estiver passando pelo seu intradorso do que pelo seu extradorso.

Como os valores da velocidade são menores e a variação de pressão maiores no intradorso comparado ao extradorso, é possível concluir que os dados medidos estão de acordo com a aerodinâmica da asa de uma aeronave, onde o escoamento de ar no extradorso deve possuir baixa pressão para gerar sustentação e consequentemente possuirá maior velocidade, assim como representado pelo teorema de Bernoulli.

# Conclusão

---

Neste projeto de Iniciação Científica, a aluna pode se familiarizar com os conceitos da área de Engenharia Aeroespacial, curso o qual pretende cursar na UFABC. Dentre esses conceitos houve o estudo sobre: os instrumentos como sensores, filtros, calibração e técnicas experimentais; e mecânica dos fluidos como a aerodinâmica de escoamento do ar ao redor de um aerofólio a partir do perfil de pressão e velocidade ao redor dele e, assim, a pressão hidrostática, o coeficiente de pressão e de sustentação; entre outros.

A parte experimental elaborada para este projeto envolve o uso de instrumentos disponíveis na UFABC como o túnel de vento, anemômetro de filme quente, manômetro e tubo de Pitot. Na etapa inicial foi planejado realizar a calibração do sistema utilizando o anemômetro de filme quente sob o escoamento de ar na seção de teste do túnel de vento sem o aerofólio. Primeiramente foi planejado realizar medições ao longo da linha de centro da seção e analisar esses valores comparando com o tubo de Pitot. Além disso, iria variar a posição do sensor na seção para velocidades específicas e determinar o perfil frontal de escoamento da seção de teste. Entretanto, esta etapa não pode ser realizada devido aos trâmites para a transferência entre os campi e a instalação e calibração do anemômetro, o qual não tinha sido utilizado anteriormente, sendo necessário um técnico especializado. Apesar disso, projetos que empregam o anemômetro de fio quente estão sendo elaborados para que melhore os testes realizados em trabalhos futuros, como alterações nas placas laterais e superior da seção de teste, e o estudo da influência de objetos localizados próximos ao bocal de entrada de ar do túnel de vento.

Para o estudo do escoamento foi utilizado um aerofólio NACA 0012 o qual, assim como o manômetro e o tubo de Pitot, é um instrumento didático do túnel de vento. Ele possui furações do seu bordo de ataque ao bordo de fuga as quais são conectadas diretamente às colunas d'água do manômetro. Desta forma, foi possível obter o perfil de pressões tanto no seu intradorso quanto no seu extradorso para duas velocidades de escoamento (16,77m/s e 23,72m/s) e dois ângulos de ataque no aerofólio (3° e 6°). A partir desses dados foram medidos os valores do coeficiente de pressão e consequentemente o coeficiente de sustentação, e a velocidade de escoamento para cada ponto de tomada de pressão. Esses valores podem não estar completamente uniformes devido as incertezas geradas pelos instrumentos utilizados e pelas medições. Entretanto, pode-se realizar algumas observações: quando sob estol, o valor da sustentação da asa diminui; uma partícula do escoamento leva mais tempo para percorrer o intradorso do que o extradorso do aerofólio; e os dados obtidos neste projeto estão de acordo com os princípios de aerodinâmica da asa de uma aeronave.

# Referências

---

- [1] TUNEIS DE VENTO. Engenharia aeronáutica. Disponível em: <http://engenhariaaeronautica.com.br/tuneis-de-vento/>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2017
- [2] TUNEL DE VENTO SUBSONICO. Nova Didacta. Disponível em: [http://www.novadidacta.com.br/produtos-categoria-produto.php?id\\_cate=11&id\\_sub=38&id\\_prod=281](http://www.novadidacta.com.br/produtos-categoria-produto.php?id_cate=11&id_sub=38&id_prod=281). Acesso em: 23 de fevereiro de 2017
- [3] ABBOTT, IRA H. Et al. Summary of Airfoil Data. Virginia, Estados Unidos da América: National Advisory Committee for Aeronautics, 1945
- [4] *MANOMETER BASICS. Sensors.* Disponível em: <https://www.sensormag.com/components/manometer-basics>. Acessado em: 23 de fevereiro 2017.
- [5] <http://www.dept.aoe.vt.edu/~simpson/aoe4154/hotwirelab.pdf>
- [6] *SINGLE-SENSOR MINIATURE WIRE PROBES. Dantec Dynamics.* Disponível em: <https://www.dantecdynamics.com/products-and-services/single-sensor-miniature-wire-probes>. Acessado em: 23 de fevereiro de 2018
- [7] MANSHADI, Mojtaba Dehghan. The Importance of Turbulence in Assessment of Wind Tunnel Flow Quality. University of Technology, Irã.
- [8] KRACH, Andrzej; KRUCZKOWSKI, Janusz. Calibration of a system for measuring low air flow velocity in a wind tunnel. Metrologia, 2016.
- [9] KLOPFENSTEIN JR, Rex. Air velocity and flow measurement using a Pitot tube. ISA transactions, 1998.