

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MARCOS ALMEIDA CYPRIANO
ROBERTO MAKIO MARTINS IMANISHI

ESTUDO DAS FORÇAS GERADAS POR UM HÉLICE

VITÓRIA
2014

MARCOS ALMEIDA CYPRIANO
ROBERTO MAKIO MARTINS IMANISHI

ESTUDO DAS FORÇAS GERADAS POR UM HÉLICE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Juan Sergio Romero Saenz.

Co-orientador: Prof. Dr. José Denti Filho.

VITÓRIA
2014

MARCOS ALMEIDA CYPRIANO
ROBERTO MAKIO MARTINS IMANISHI

ESTUDO DAS FORÇAS GERADAS POR UM HÉLICE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovada em 14 de dezembro de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Juan Sergio Romero Saenz
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. José Denti Filho
Universidade Federal do Espírito Santo
Co-orientador

Prof. Dr. Antônio Bento Filho
Universidade Federal do Espírito Santo

AGRADECIMENTOS

Após mais uma etapa concluída em nossas vidas, gostaríamos de agradecer às pessoas que fizeram parte de alguma forma na conclusão desta importante conquista em nossas vidas acadêmicas.

Aos nossos familiares o total agradecimento por sempre nos fornecer o suporte para que tenhamos a coragem de continuar dando os próximos passos, dando-nos apoio incondicional.

Aos amigos, por estarem sempre presentes tanto nas conquistas quanto nos tropeços e ter feito este período passar de forma muito prazerosa e de forma muito mais fácil.

Aos mestres, pelo conhecimento transmitido que nos deram a capacitação para que este projeto fosse concebido e que continuaremos usando em nossa vida profissional.

E principalmente a Deus, que nos dá saúde e força para seguirmos superando obstáculos e conquistando nossos objetivos.

“Eu não falhei, encontrei 10 mil soluções que não davam certo.”

Thomas Alva Edison

RESUMO

Este projeto tem a intenção de estudar as forças envolvidas no sistema de propulsão de um veículo aéreo não tripulado (VANT), afim de descobrir qual o melhor hélice a ser utilizada em aeromodelos de médio porte.

Os dados adquiridos da mesa, através dos ensaios de tração e torção, serão validados pelos cálculos do sistema de forças e velocidades no elemento de pá de hélice, e posteriormente compará-los com os dados fornecidos pelo fabricante.

A Teoria do Elemento de Pá, ou Teoria de Glauert, desenvolve as forças atuantes em uma seção da pá como um perfil bidimensional em um escoamento. As forças geradas pela pá são obtidas pelo somatório das componentes de cada elemento da mesma.

Palavras-chave: VANT, hélice, Teoria do Elemento de Pá, Teoria de Glauert, sistema de propulsão, aeromodelismo, ensaios de tração e torção.

ABSTRACT

This project intends to study the forces involved in the propulsion of an unmanned air vehicle system (UAV) in order to find out what the best propeller for use in medium-sized model aircraft.

The data acquired from the table, using the tensile and torsion tests shall be validated by the calculations of forces and speeds system propeller blade element, and then compare them with the data provided by the manufacturer.

Glauert Theory develops the forces acting on a blade section as a two-dimensional profile in a flow. The forces generated by the blade are obtained by summation of the components of each element.

Hotkeys: UAV, propeller, Glauert Theory, propulsion system,
model airplanes, tensile and torsion.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. MOTIVAÇÃO	9
1.2. OBJETIVOS E ALCANCES DO TRABALHO	9
1.3. METODOLOGIA	10
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	11
2.1. HÉLICE	11
2.1.1. <i>Perfil aerodinâmico</i>	12
2.2. TEORIA DO ELEMENTO DE PÁ.....	13
2.3. TENSÕES E DEFORMAÇÕES	15
2.3.1. <i>Conceito de Tensão</i>	15
2.3.2. <i>Conceito de Deformação</i>	16
2.4. COEFICIENTE DE POISSON	16
2.5. LEI DE HOOKE	17
2.6. MEDIÇÃO DAS FORÇAS NO SUPORTE	18
3. APLICAÇÃO DAS FORMULAS	20
3.1. CÁLCULOS DAS FORÇAS DO HÉLICE	20
3.2. EQUACIONAMENTO ESTRUTURAL PARA TRAÇÃO	25
3.3. EQUACIONAMENTO ESTRUTURAL PARA A TORÇÃO	27
4. ESTUDO DE CASO.....	31
4.1. CARACTERÍSTICAS DO OBJETO DE ESTUDO	31
4.2. TARUGO MACIÇO	31
4.3. MOTOR ELÉTRICO AXI2826/8 GOLD LINE.....	32
4.4. HÉLICE APC 12,25x3,75.....	33
4.5. EXTENSÔMETRO.....	33
4.6. PLACA DE AMPLIFICAÇÃO	34
4.7. MÉTODOS PARA COMPARAÇÃO	35
4.7.1. <i>Dados fornecidos pelos fabricantes</i>	36
4.7.2. <i>Formulação</i>	36
4.7.3. <i>Mesa de testes</i>	36
5. RESULTADOS E COMPARAÇÕES.....	38
5.1. RESULTADOS DOS MÉTODOS TEÓRICOS	38
5.2. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS TEÓRICOS	40
5.2.1. <i>Comparação entre as Trações Teóricas</i>	40
5.2.2. <i>Comparação entre os Torques Teóricos</i>	41
5.3. RESULTADOS DA MESA DE TESTES	42
6. REFERÊNCIAS.....	45
7. BIBLIOGRAFIAS.....	45
ANEXO 1.....	46

1. INTRODUÇÃO

No presente trabalho foi feito um estudo para projetar e construir uma bancada de teste que possibilitasse a medição da tração e torção produzidas por hélices para aeromodelos médios.

As medições das forças foram feitas através de extensômetros que, auxiliados a um equacionamento de resistência dos materiais, são obtidos os valores das forças que atuam no sistema. Foram também feitos cálculos para projetar os valores das forças que o hélice deveria exercer e, enfim compará-los com os dados do fabricante e com as medições da bancada. Para isso foi escolhida um modelo de hélice, 12,25 x 3,75 do fabricante APC Propellers.

1.1. MOTIVAÇÃO

Com os avanços tecnológicos na aeronáutica, e com as melhorias nas técnicas de fabricação, cresce a cada dia a competitividade em campeonatos de aeromodelismo. Uma das formas de obter um maior desempenho do aeromodelo é uma análise mais aprofundada dos hélices.

Projetar e construir uma mesa de testes de hélices é mais um passo para conseguir um veículo mais eficiente. O ensaio de diferentes modelos de hélices possibilita uma comparação entre os desempenhos dos hélices e o requerido pelo projeto de um VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), podendo chegar a melhor combinação e assim, obter o desempenho ótimo do sistema de propulsão.

1.2. OBJETIVOS E ALCANCES DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é fazer um estudo preliminar das forças exercidas pelo hélice escolhido, utilizando-se do Método do Elemento de Pás, e também projetar e construir uma bancada de teste para medir essas forças e então compará-las entre si e com dados fornecidos pelo fabricante.

Como resultado pretende-se validar a formulação desenvolvida e obter uma mesa de testes aferida e pronta para receber outros tipos de hélices e fazer medições confiáveis para estas.

1.3. METODOLOGIA

A metodologia adotada para a realização deste projeto consiste em calcular os valores das forças, geradas pelo trabalho do hélice, utilizando um programa criado pelos alunos, autores deste projeto, no software Matlab. Este programa se utiliza da Teoria do Elemento de Pá para fazer os cálculos e tem como entrada dados geométricos do hélice e, como saída, os valores do Torque e do Empuxo para diferentes valores de rotações.

Primeiramente, foi realizado um levantamento dos dados geométricos do hélice, se utilizando de uma máquina de medição de por coordenadas 3D (MMC 3D) do Laboratório de Metrologia da UFES. Também foi preciso o contato com o fabricante para ter o conhecimento de qual perfil aerodinâmico tem o hélice estudado.

Para a medição das forças geradas pelo hélice, utiliza-se mesa um cilindro maciço de aço 1045 na vertical, com 60cm de comprimento e 58mm de diâmetro, preso por uma morsa na extremidade inferior, e com o motor e o hélice na extremidade superior. As medições são feitas por 8 extensômetros, 4 para o Empuxo e outros 4 para o Torque.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Visando atingir esses objetivos, apresentar e descrever a metodologia e os resultados, surge a necessidade de mostrar, primeiramente, fundamentos teóricos para um maior entendimento do projeto realizado.

2.1. HÉLICE

O hélice é o aparato mais comum dos sistemas propulsivos existentes, e em geral, o mais eficiente. Ele deve ser corretamente projetada de maneira que traga a maior eficiência possível ao sistema propulsivo.

Existem vários modelos de hélices que variam no formato, nos perfis aerodinâmicos usados, no número de pás, etc. Acoplados ao motor são o sistema que produz o empuxo necessário para mover o avião, ao movimentá-lo uma corrente de ar passa pelas asas do mesmo, gerando as forças necessárias para sustentá-lo.

Os hélices possuem pás que podem ou não serem torcidas, mudando o ângulo entre o ponto de contato do perfil da pá e o vento, influenciando a força gerada no processo. É conhecido que a região da pá mais próxima ao eixo de rotação não produz grandes quantidades de forças, uma das causas é por não obterem grandes velocidades devido à rotação, no caso de sistemas propulsores, e não produzem grande torque pela proximidade com o eixo, no caso de geração de energia. Por isso em alguns casos, quando se vê necessidade, essa região da pá não possui um perfil aerodinâmico bem definido e se dá mais importância à sua necessidade estrutural de aguentar as forças produzidas no funcionamento do equipamento.

Ao se comercializar hélices propulsores para VANTs alguns dados são importantes para o cliente, como o diâmetro do hélice e o seu passo. Uma pá torcida cria um formato similar ao de um parafuso, portanto possui também um passo, que é o quanto ela se move na direção do eixo ao completar uma volta.

O hélice utilizado neste projeto é o modelo 12,25 x 3,75 do fabricante APC Propellers, suas medidas são correspondentes ao diâmetro e ao passo medidos em polegadas. Este hélice possui como base o perfil aerodinâmico Clark-Y e 2 pás.

2.1.1. Perfil aerodinâmico

Perfil aerodinâmico, ou aerofólio, é uma secção bidimensional desenvolvida para provocar variação na direção e na velocidade de um fluido. Essa variação na direção e na velocidade produz uma diferença nos valores das pressões acima e abaixo do perfil obedecendo ao Princípio de Bernoulli, gerando uma força conhecida como resultante aerodinâmica.

O perfil aerodinâmico de um hélice se assemelha ao de uma asa, gerando um valor de arrasto e sustentação, forças decompostas da resultante aerodinâmica. No caso de hélices propulsores o que se quer é o empuxo que ela produzirá, este é proveniente de uma combinação das forças geradas pelo perfil da mesma. Nos hélices geradores, utilizados na geração de energia, utilizam o torque gerado pela rotação do hélice, quanto maior este torque maior a energia produzida. Este é o motivo dos hélices eólicas terem pás muito grandes porém girarem a baixas velocidades, com o objetivo de aumentar o torque gerado há esse aumento do tamanho das pás que não necessitam de girarem a grandes velocidades. Já em hélices propulsores quanto maior a velocidade de rotação maior será o empuxo produzido, porém quando a ponta de uma pá alcança velocidades supersônicas, há uma modificação no escoamento, forma-se uma onda de choque ruidosa, ao redor da ponta criando um arrasto maior, diminuindo bastante sua eficiência, motivo desses hélices possuírem pás mais curtas.



Fig. 2.1 – Forças geradas num perfil aerodinâmico.

Essas forças geradas são funções de coeficientes que cada perfil possui, coeficiente de sustentação e arraste, que são diretamente influenciadas pelo ângulo de ataque e pelo formato do perfil. Para identificar este ângulo é preciso conhecer a corda do perfil, que é uma reta que passa pelo bordo de ataque (ponto mais à frente do perfil) e o bordo de fuga (ponto mais ao fim do perfil). O ângulo de ataque é formado pela corda do aerofólio e a direção do seu movimento relativo ao ar.

2.2. TEORIA DO ELEMENTO DE PÁ

A Teoria do Elemento de Pá, ou Teoria de Glauert, analisa as forças atuantes em faixas transversais de comprimento infinitesimal em cada pá, para então somá-las, obtendo a força total em cada pá. Uma outra teoria que também calcula os valores das forças geradas pelo hélice é a Teoria do Disco Atuador que concentra suas hipóteses e cálculos no escoamento do fluido durante o funcionamento do sistema.

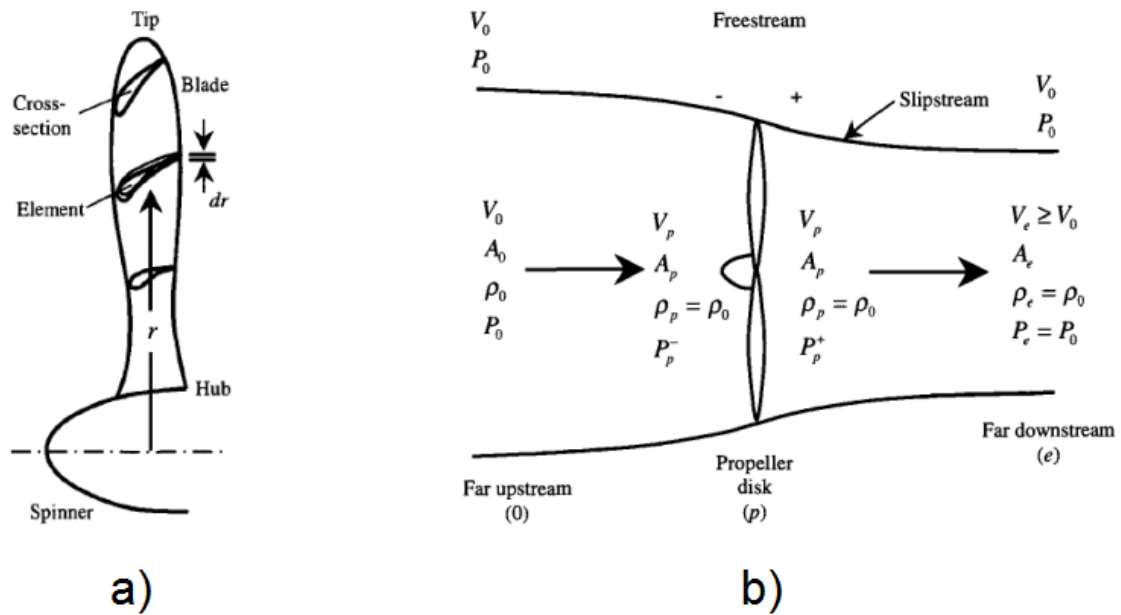


Fig. 2.2 – a) Teoria do Elemento de Pá; b) Teoria do Disco Atuador.

A escolha pela Teoria do Elemento de Pá foi devido ao projeto da mesa de testes, não foi pensado em se medir os parâmetros do fluido ao longo do escoamento, o que necessitaria de um local com maior controle do ambiente e uma maior quantidade de equipamentos de medição. A teoria escolhida necessita de medições geométricas do hélice e o valor da rotação, para calcular as forças.

O caminho percorrido por um elemento de pá num hélice em operação é helicoidal, de tal forma que seu ângulo de ataque depende da velocidade da aeronave assim como a velocidade de rotação do hélice e do ângulo de incidência da mesma no elemento em estudo. No caso deste trabalho não possuímos o movimento correspondente à aeronave, o fato da mesa se manter imóvel durante os ensaios é motivo para considerar uma velocidade axial nula, então a velocidade é função apenas do movimento giratório do elemento.

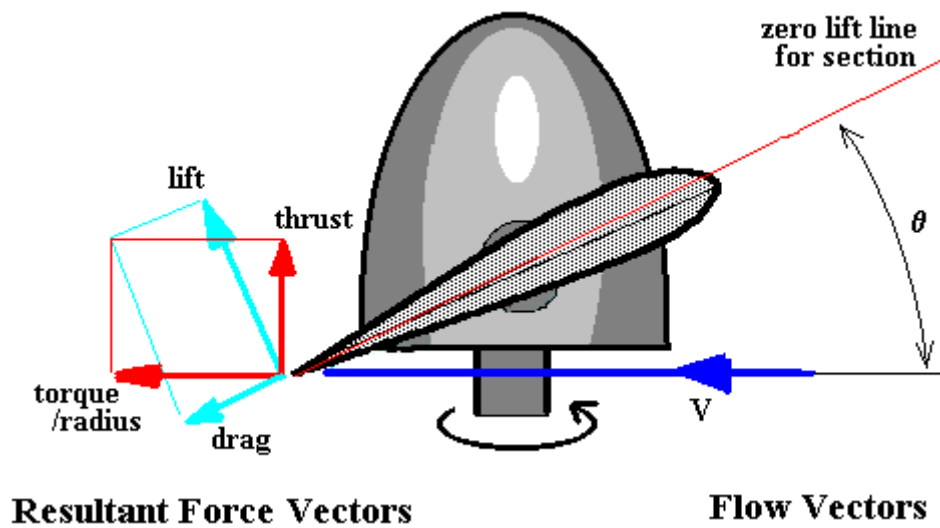


Fig. 2.3 – Forças derivadas do movimento do hélice.

Segundo a Teoria do Elemento de Pá a sustentação é calculada pela equação:

$$dT = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot c \cdot (C_s \cos(\theta) - C_a \sin(\theta)) \cdot dr \quad (2.1)$$

Sendo θ o ângulo de ataque, c a corda do perfil, V a velocidade, ρ a densidade do ar, C_s o coeficiente de sustentação e C_a o coeficiente de arrasto.

Da mesma forma se consegue calcular o torque gerado pelo hélice, com pequenas mudanças, tanto trigonométricas quanto na adição do raio (r) à equação:

$$dQ = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot c \cdot (C_s \sin(\theta) + C_a \cos(\theta)) \cdot r \cdot dr \quad (2.2)$$

As forças finais geradas pelo hélice são obtidas pela integral das equações 2.1 e 2.2 ao longo do raio, resultando na força gerada por apenas uma pá.

2.3. TENSÕES E DEFORMAÇÕES

2.3.1. Conceito de Tensão

Tensão é a grandeza física definida pela força atuante em uma superfície e a área dessa superfície. É chamada Tensão Normal o resultado da aplicação de uma força axial na seção transversal de um material^[2], podendo ser calculada por:

$$\sigma_{média} = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

Onde F é a força axial que atua no material e A é o valor da área transversal do material.

2.3.2. Conceito de Deformação

Deformação é a mudança na forma e tamanho de um corpo quando uma força é aplicada no mesmo, podendo ser perceptível ou não. Quando uma força axial é aplicada, ocorre a deformação normal, que é o alongamento ou contração de um corpo por unidade de comprimento. A deformação específica ε de certo corpo é a razão entre a deformação (δ) e o comprimento (l) original do corpo:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l} \quad (2.5)$$

A Deformação por Cisalhamento é a mudança de ângulo ocorrida entre dois segmentos de retas originalmente perpendiculares entre si. O ângulo é denotado por γ e é medido em radianos.

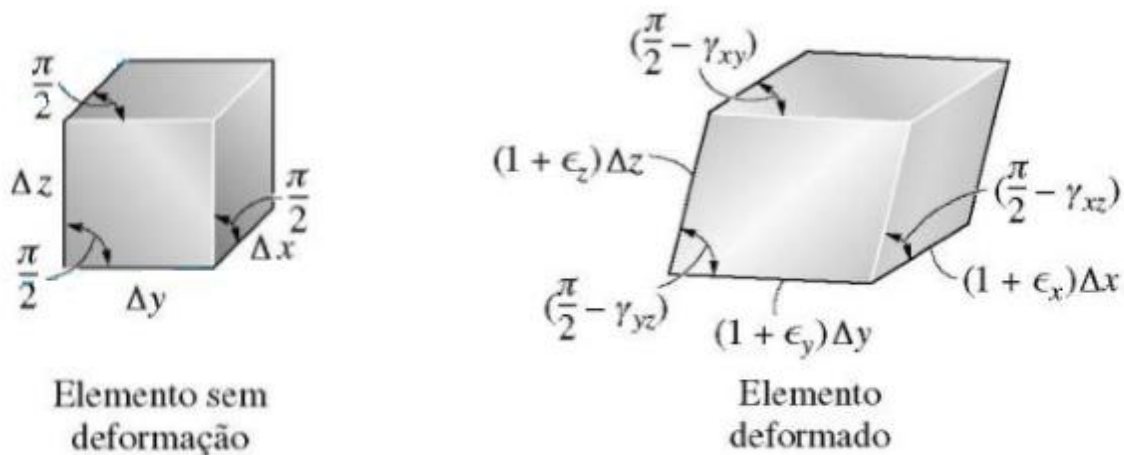


Fig. 2.4 – Estado de deformações tridimensional em um cubo infinitesimal: a) Elemento infinitesimal sem deformação, b) elemento infinitesimal deformado.

2.4. COEFICIENTE DE POISSON

O Coeficiente de Poisson^[2] relaciona a deformação específica transversal proveniente de uma carga longitudinal e a própria deformação longitudinal. Por

exemplo, caso uma barra seja submetida a um carregamento axial no eixo x, sabe-se que as tensões normais em y e z serão nulas:

$$\sigma_x = \frac{F}{A}; \sigma_y = 0; \sigma_z = 0 \quad (2.6)$$

Porém haverá deformação nas direções y e z, calculadas pelas seguintes equações:

$$\varepsilon_y = -\nu \cdot \varepsilon_x \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_z = -\nu \cdot \varepsilon_x \quad (2.8)$$

Onde ε são as deformações nas devidas direções e ν o Coeficiente de Poisson.

2.5. LEI DE HOOKE

A Lei de Hooke^[2] é a lei da física relacionada à elasticidade dos corpos, ela calcula a deformação causada pela força exercida sobre um corpo:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.9)$$

Onde σ é a tensão normal no material, E é o módulo de elasticidade e ε é a deformação específica.

A Lei de Hooke aplicada às tensões e deformações por cisalhamento é análoga ao que foi descrito anteriormente, sendo descrita pela seguinte expressão:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (2.10)$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento, G é módulo de elasticidade transversal do material e γ é a deformação por cisalhamento.

No caso das tensões superarem a tensão de escoamento do material, o comportamento da estrutura deixa de ser elástico e passa para um regime plástico, onde deixa de existir a relação linear entre as tensões e deformações. Neste novo estado as deformações sofridas pelo material serão permanentes, ao contrário da situação elástica.

Generalizando a Lei de Hooke para um carregamento multiaxial, deve-se primeiramente apresentar a definição do Princípio da Superposição. Este princípio

afirma que os efeitos de um carregamento combinado atuando sobre uma estrutura pode ser considerado como a combinação do efeito de cada carregamento sobre esta estrutura, analisado independentemente. Para que este princípio seja satisfeito é preciso que o material esteja no regime elástico e que o efeito de um dos carregamentos não influencie nas condições de aplicação dos demais carregamentos.

2.6. MEDIÇÃO DAS FORÇAS NO SUPORTE

Strain gages ou extensômetros são transdutores posicionados na superfície do corpo para obter medidas de deformações. Esses medidores são constituídos de uma resistência projetada para que quando for deformada tenha sua resistência modificada de uma forma previsível. Devido à forma em que esta resistência está disposta, ela possui uma direção preferencial em que a mudança na sua resistência ocorrerá.

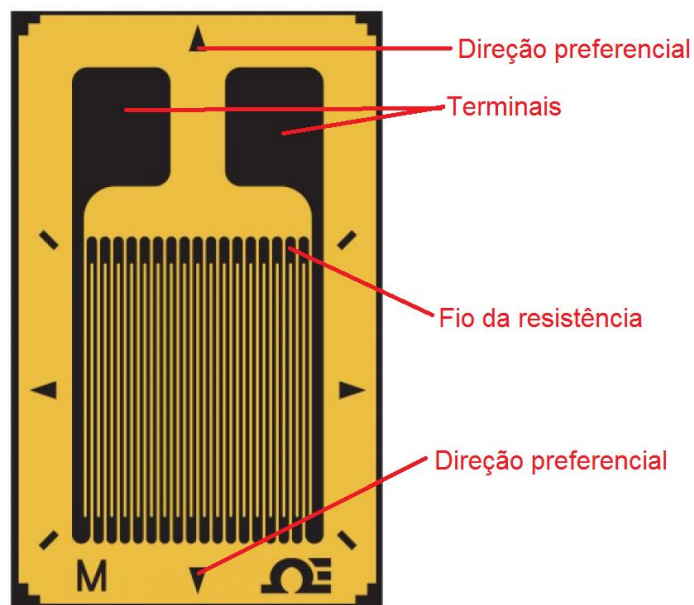


Fig. 2.5 – Extensômetro.

A mudança no valor da sua resistência segue uma relação entre o comprimento e a área do fio e a variação da resistividade do material, chamada efeito piezoresistivo,

que é influenciado pelo estresse mecânico aplicado a ele, e é este efeito que tem a maior responsabilidade na mudança no valor resistência dos extensômetros:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (2.11)$$

Onde ρ é a resistividade, l o comprimento e A a área do fio.

Outra característica importante do extensômetro é o Fator Gage, é este valor que possibilita a transformação do valor medido em volts para um valor de deformação. Esse fator é como uma propriedade do sensor e deve ser fornecido pelo fabricante. A equação do Fator Gage de um sensor é a seguinte:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (2.12)$$

Onde GF é o Fator Gage, R é a resistência elétrica do extensômetro em repouso, ΔR a variação da mesma, e ε a deformação sofrida pelo sensor.

A escolha deste meio de medição foi devido à alta precisão destes sensores. A leitura é feita em volts, a variação na resistência provoca uma variação na voltagem do sistema e, esta então, é medida. Por ser uma variação pequena é necessário se utilizar de condicionadores de sinal para a percepção desta mudança. Os sensores são dispostos numa Ponte de Wheatstone equilibrada, enquanto os sensores não estão excitados.

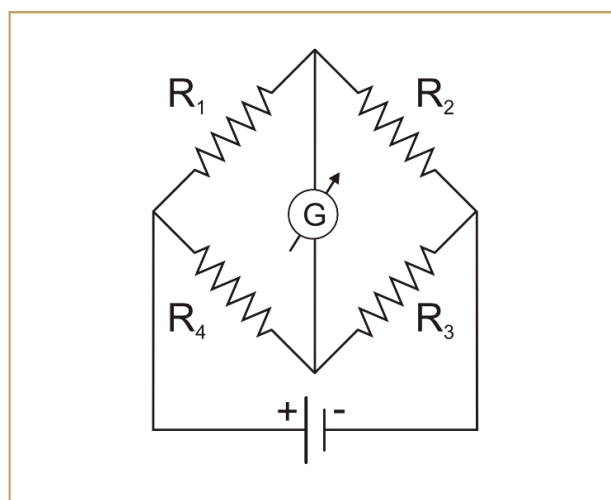


Fig. 2.6 – Ponte de Wheatstone.

O sinal de saída de uma ponte, neste caso o valor de G , possui uma relação com os valores das resistências do circuito:

$$G = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_1} \right) \cdot V \quad (2.13)$$

Uma ponte equilibrada significa que sua saída é equivalente a 0, assim qualquer mudança na resistência dos sensores muda essa saída sendo mais fácil a detecção desta mudança.

Outra técnica necessária foi a utilização de um sistema de amplificação para o sinal de saída da ponte. Mesmo utilizando a ponte, é necessário a utilização de um circuito de amplificação desse sinal para que haja uma leitura mais confiável.

3. APLICAÇÃO DAS FORMULAS

3.1. CÁLCULOS DAS FORÇAS DO HÉLICE

Com base na Teoria do Elemento de Pá as formulas que calculam as forças geradas por uma pá são:

$$dT = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot c \cdot (C_s \cos(\theta) - C_a \sin(\theta)) \cdot dr \quad (3.1)$$

$$dQ = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot c \cdot (C_s \sin(\theta) + C_a \cos(\theta)) \cdot r \cdot dr \quad (3.2)$$

Onde T é o empuxo gerado e Q o torque.

As forças finais geradas pelo hélice são obtidas pela integral das equações 3.1 e 3.2 ao longo do raio, porém o valor deste cálculo é referente a apenas uma pá e, como neste trabalho o hélice é constituído por duas pás, estes valores devem então serem multiplicados por 2.

Analisando os parâmetros necessários para calcular as forças criadas pelo hélice, percebe-se que todas elas dependem do raio, diretamente ou não. Isso significa que todos os parâmetros podem ser modificados por funções cuja incógnita seja apenas r , facilitando a resolução da integral dessas equações.

O equacionamento para que esses valores se tornem funções diretas do raio segue a seguinte lógica:

- Como foi falado anteriormente a velocidade (V) considerada neste estudo é apenas a provida pela rotação, velocidade tangencial do ponto, logo ela é calculada pela equação:

$$V = \omega \cdot r \quad (3.3)$$

- A densidade do ar (ρ) é um valor constante e foi considerado o valor nas Condições Normais de Temperatura e Pressão, a uma pressão de 1atm (nível do mar) e temperatura de 15°C. O valor utilizado foi 1,225kg/m³.
- A corda varia ao longo do raio por causa da própria geometria da pá. Para achar uma equação que revelasse essa variação foram feitas medidas em vários pontos do hélice com a ajuda da máquina MMC 3D. Após isto foram plotados os valores da corda em relação aos pontos do raio onde foram medidos:

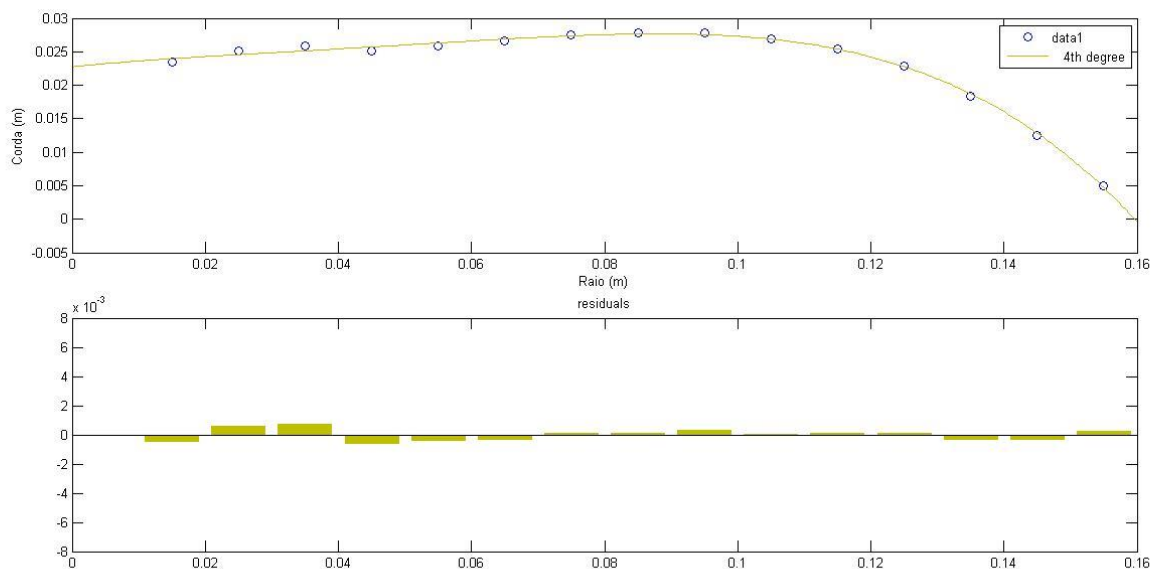


Fig. 3.1 – Gráfico Corda (m) x Raio (m).

Com a ajuda do software Matlab, obtém-se uma equação polinomial para os pontos plotados no gráfico, corda em função do raio:

$$c = -176,85r^4 + 29,63r^3 - 1,7436r^2 + 0,10045r + 0,022753 \quad (3.4)$$

A escolha da equação de quarto grau foi devido ao estudo dos erros de cada equação, a partir da equação de quarto grau os erros não variaram muito o que possibilitou a escolha deste polinômio.

- A variação do ângulo de ataque (α) ao longo do raio foi outro parâmetro que necessitou de medição. Utilizando a mesma máquina de medição usada para medir a corda, foi medido o ângulo de ataque. Utilizando da mesma ferramenta, Matlab, para plotar os pontos medidos e gerar uma equação polinomial que represente estes pontos com fidelidade:

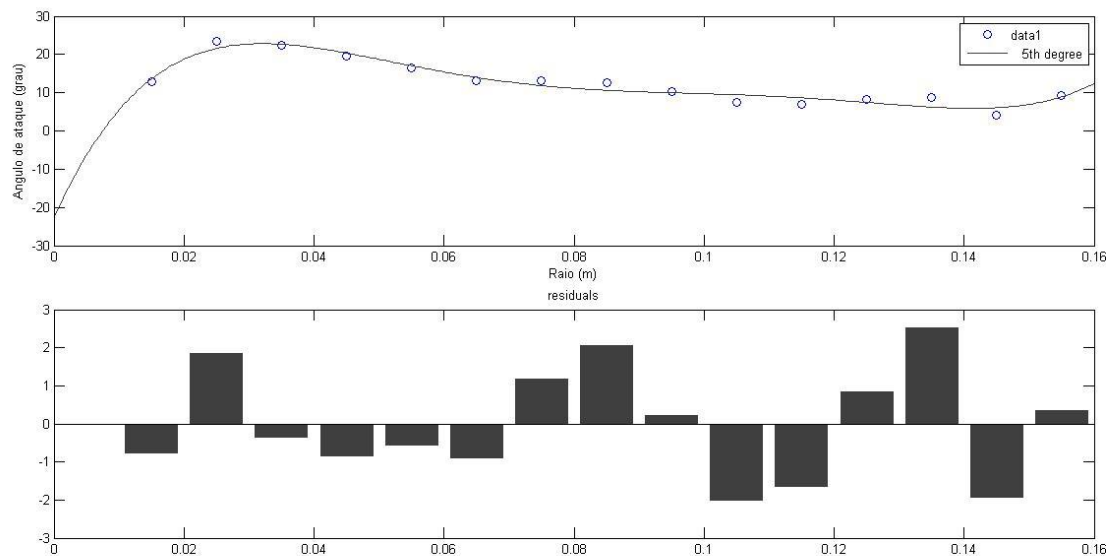


Fig. 3.2 – Gráfico α (graus) x raio (m).

A equação gerada foi:

$$\alpha = 1,755 \cdot 10^7 \cdot r^5 - 8,0429 \cdot 10^6 \cdot r^4 + 1,3913 \cdot 10^6 \cdot r^3 - 1,1092 \cdot 10^5 \cdot r^2 + 3790,5 \cdot r - 22,636 \quad (3.5)$$

A escolha de um polinômio de quinto grau foi novamente devido aos resíduos das equações geradas. O valor dos erros, a partir desta equação, reduziam suavemente e não se mostravam de grande importância para alterar o resultado final.

- O coeficiente de sustentação (C_i) é função do ângulo de ataque e do perfil. Neste estudo o perfil é considerado constante em toda extensão do hélice, logo o coeficiente de sustentação varia de acordo com o ângulo de ataque.

Primeiro foi calculado um Reynolds médio para o estudo. O Reynolds para um escoamento externo em um perfil é calculado^[1] por:

$$Re = \frac{V \cdot c}{\nu} \quad (3.6)$$

Onde V é a velocidade, c a corda e ν é a viscosidade cinemática do fluido.

O valor médio de Reynolds calculado foi de aproximadamente 10^5 . O coeficiente de sustentação é relacionado ao ângulo de ataque^[3] de acordo com o gráfico a seguir:

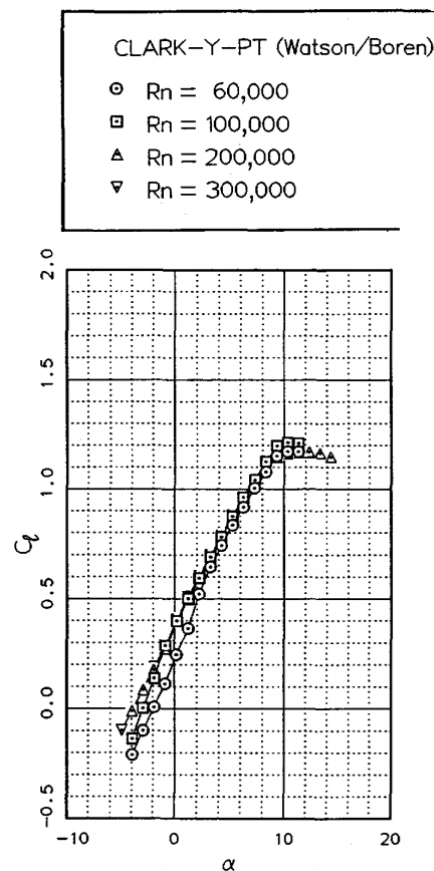


Fig. 3.3 – Gráfico C_L x α (Ângulo de Ataque).

Utilizando os dados para o valor de Reynolds compatível, novamente com a ajuda do software Matlab, foram plotados vários pontos retirados da Fig. 3.3. Percebe-se que a variação do coeficiente é até certo ponto muito parecido com uma reta, portanto a equação escolhida foi um polinômio de primeiro grau:

$$C_L = 0,091071\alpha + 0,28071 \quad (3.7)$$

Esta equação foi utilizada para valores de ângulo de ataque de 0 até valores próximos a 12 graus. Olhando a Fig.3.2 nota-se que os valores do ângulo superam este limite superior na região mais próxima ao eixo de giração. Para essas regiões onde o ângulo de ataque supera os 12 graus foi utilizado um valor constante para o coeficiente de sustentação. Foi pesquisado na literatura e a partir dos vários valores encontrados foi aproximado para um valor de 0,65.

- Para o coeficiente de arrasto, utilizou-se o gráfico^[3] que o relaciona diretamente com o coeficiente de sustentação:

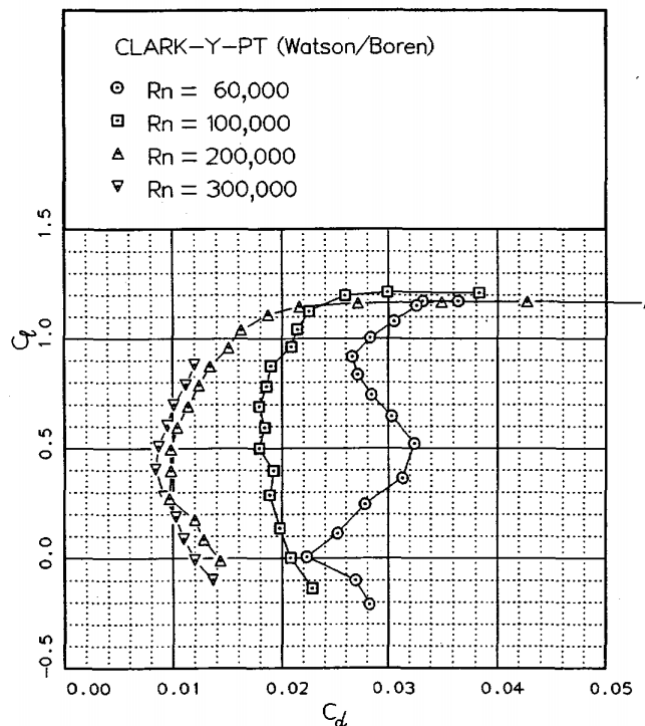


Fig. 3.4 – Gráfico $C_l \times C_d$.

Plotando pontos retirados da Fig.3.4 no Matlab, foi aproximado uma equação:

$$C_d = 0,06408 \cdot C_l^3 - 0,12055 \cdot C_l^2 + 0,062974 \cdot C_l + 0,014138 \quad (3.8)$$

Esta equação foi escolhida pela pouca variação dos erros em relação aos pontos plotados em polinômios de maior grau.

A inserção dessas equações nas equações 3.1 e 3.2 resulta em polinômios de alto grau, o artifício utilizado para a resolução da integral foi utilizar o cálculo conceitual da mesma:

$$\int_a^b f(x)dx = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \sum_i^n f(x_i) \cdot \Delta x \quad (3.9)$$

Este método foi escolhido para que se tenha, também, resultados da geração das forças ao longo do raio da pá.

Após a integral, para chegar ao valor final, o resultado deve ser multiplicado ainda pelo número de pás que o hélice possui, neste caso duas pás.

3.2. EQUACIONAMENTO ESTRUTURAL PARA TRAÇÃO

O equacionamento para transformar a leitura dos sensores em força começa pelo posicionamento dos sensores, tanto na peça como na ponte de Wheatstone. Dois sensores (R1 e R3) foram posicionados com uma diferença de 180° um do outro, visto que a peça suporte é um cilindro maciço de aço, e para a medição da deformação positiva na direção de ação da força. Outros dois sensores (R2 e R4) foram posicionados também a 180° um do outro, intercalados com os sensores anteriores, porém, perpendiculares à direção da força atuante para medirem a deformação devido a constrição da área gerada pela força. Este posicionamento é conhecido para maximizar o sinal de saída da ponte.

O posicionamento na ponte também gera uma diferença na saída do sinal, logo o posicionamento foi, de acordo com a nomeação já descrita anteriormente, o seguinte:

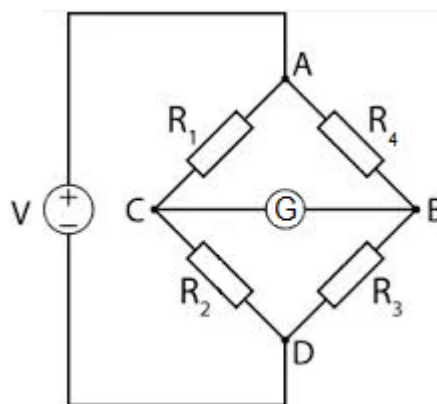


Fig. 3.5 – Posicionamento dos sensores na Ponte de Wheatstone.

Sabe-se que a equação de saída da ponte é:

$$G = \left(\frac{R_3}{R_3+R_4} - \frac{R_2}{R_2+R_1} \right) \cdot V \quad (3.10)$$

A deformação sofrida pela dupla de sensores posicionados na direção da força atuante (ΔR_x) e a sofrida pela outra dupla posicionada perpendicularmente a esta direção (ΔR_y) será diferente. O Coeficiente de Poisson permite que essas deformações sejam relacionadas a partir da equação^[2]:

$$\varepsilon_y = -\nu \cdot \varepsilon_x \quad (3.11)$$

O Fator Gage é dado pela seguinte equação:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (3.12)$$

Utilizando as equações 3.11 e 3.12 relaciona-se a variação de resistência elétrica dos sensores na direção perpendicular à da força com a deformação positiva causada pela força. Obtém-se então as seguintes equações:

$$\Delta R_x = R \cdot (\varepsilon_x \cdot GF) \quad (3.13)$$

$$\Delta R_y = R \cdot (-\nu \cdot \varepsilon_x \cdot GF) \quad (3.14)$$

Somando as variações das resistências na equação 3.10 e utilizando as equações 3.13 e 3.14 resulta na equação final de saída da ponte, relacionando a voltagem de saída com a deformação positiva resultante da força trativa atuante na peça.

$$\frac{G}{V} = \frac{\varepsilon_x \cdot GF \cdot (1-\nu)}{2 + \varepsilon_x \cdot GF \cdot (1+\nu)} \quad (3.15)$$

O que se quer medir é a força e não a deformação sofrida pela peça de suporte, isso se torna possível com a utilização da Lei de Hooke, que associa a deformação de um corpo com a tensão sofrida pelo mesmo:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.16)$$

Onde σ é a tensão, E o Módulo de Young e ε é a deformação.

Obtendo a tensão é possível saber a força pela simples formula de tensão:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.17)$$

Onde F é a força atuante e A a área da peça.

Unindo as equações 3.16 e 3.17 obtém-se a equação que relaciona diretamente a deformação sofrida pelo suporte e a força exercida no mesmo:

$$F = A \cdot E \cdot \varepsilon \quad (3.18)$$

Através das equações 3.15 e 3.18 é possível transformar a medição direta de voltagem saída dos sensores para a força exercida pelo hélice na peça suporte.

3.3. EQUACIONAMENTO ESTRUTURAL PARA A TORÇÃO

O equacionamento utilizado para o torque segue uma sequência similar ao utilizado para a tração, começando pelo posicionamento dos sensores no corpo da peça. O posicionamento utilizado foram dois sensores a 45° da direção da força trativa e afastados por um ângulo de 180° . Outros dois sensores foram posicionados intercalados com os extensômetros anteriores porém, com uma angulação de 45° invertidos equiparados aos anteriores. O motivo de haver dois sensores a uma angulação de 45° sentido horário e outros dois a 45° anti-horário é devido à forma que a peça se deformará perante o torque aplicado. O estado de cisalhamento puro na superfície de uma barra é equivalente a tensões iguais de compressão e tração agindo num elemento orientado num ângulo de 45° [2], como mostra a Fig. 3.6:

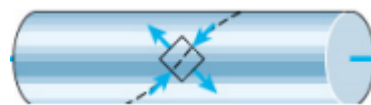


Fig. 3.6 – Tensões de compressão e tração agindo em um elemento de tensão orientado a 45° do eixo longitudinal.

O posicionamento de dois sensores a 45° horário e dois a 45° anti-horário faz com que uma dupla sofra uma deformação devido à compressão e a outra uma deformação devido à tração. Posicionando esses sensores em braços diferentes na Ponte de Wheatstone, de forma a obter maior sinal de saída, obtém-se a seguinte saída:

$$G = \frac{\Delta R}{R} \cdot V \quad (3.19)$$

Onde G é a tensão de saída da ponte, V a tensão da fonte, R a resistência do sensor e ΔR a variação de resistência do extensômetro devido à deformação sofrida por ele.

Com as equações 3.12 e 3.19 é possível obter uma equação relacionando a deformação e a voltagem de saída:

$$G = \varepsilon \cdot GF \cdot V \quad (3.20)$$

Onde GF é o Fator Gage e ε é a deformação linear causada pelo torque.

Para encontrar essa deformação linear é necessário todo um conhecimento de resistência dos materiais.

As relações entre as tensões de cisalhamento máximas e mínimas ($\tau_{\max,\min}$) e as tensões normais principais, para o estado de cisalhamento puro, são dadas pelas seguintes equações^[2]:

$$\tau_{\max,\min} = \pm \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (3.21)$$

$$\tau_{\max} = \sigma_{\max} = -\sigma_{\min} \quad (3.22)$$

Onde τ é a tensão de cisalhamento e σ_{\max} e σ_{\min} são tensões normais máxima e mínima na direção principal.

Com o auxílio do Círculo de Mohr podemos visualizar as relações entre as tensões normais e cisalhantes num plano de 45° .

$$\alpha = 45^\circ \quad (3.26)$$

Neste caso, a relação entre a deformação linear e a deformação por cisalhamento é dada por:

$$\varepsilon_{max} = \frac{\gamma_{xy}}{2} \quad (3.27)$$

Após obter essa relação entre as deformações linear e angular, é possível calcular o valor do torque referente à saída da Ponte de Wheatstone formada pelos sensores.

A seguinte formula relaciona o torque (Q) aplicado ao eixo, a tensão de cisalhamento (τ) e o ângulo de torção da seção transversal:

$$\frac{Q}{J} = \frac{\tau}{\left(\frac{D}{2}\right)} = \frac{G \cdot \theta}{L} \quad (3.28)$$

Onde Q é torque aplicado na peça, J o momento polar de inércia, D o diâmetro, τ a tensão de cisalhamento, G o Módulo de Elasticidade Transversal, θ o ângulo de torção e L o comprimento do eixo.

O Módulo de Elasticidade Transversal (G) pode ser calculado através do valor do Módulo de Young e o Coeficiente de Poisson, utilizando a seguinte expressão:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (3.29)$$

Onde E é o Módulo de Young e ν é o Coeficiente de Poisson.

O momento polar de inércia é dado pela seguinte equação:

$$J = \frac{\pi \cdot D^4}{32} \quad (3.30)$$

Pela equação 3.28 podemos retirar uma relação para o valor da tensão de cisalhamento:

$$\tau = \frac{Q \cdot D}{2 \cdot J} \quad (3.31)$$

Pela mesma Lei de Hooke, utilizada no equacionamento para a tração, é possível obter a tensão necessária para causar tal deformação:

$$\tau = \gamma \cdot G \quad (3.32)$$

Onde τ é a tensão e G o Módulo de Elasticidade Transversal do material.

Com as equações 3.31 e 3.32 é possível transformar a tensão de cisalhamento sofrida pela peça, no valor do torque que lhe foi aplicado.

4. ESTUDO DE CASO

4.1. CARACTERÍSTICAS DO OBJETO DE ESTUDO

Este trabalho tem como objetivo o estudo, aquisição de resultados e comparação das Tensões de Tração e Torção do eixo propulsor de um Aeromodelo. Para isso, foi projetado um sistema constituído por um tarugo maciço de Aço 1045 engastado em uma morsa de bancada situada em uma mesa de inércia para reduzir possíveis interferências do meio, um motor elétrico AXI 2826/8 Gold Line, um hélice APC 12,25 x 3,75, extensômetros Excel, placas de amplificação projetadas pela equipe de aeromodelismo da Universidade Federal do Espírito Santo.

A seguir serão descritas as dimensões e especificações dos equipamentos utilizados neste projeto.

4.2. TARUGO MACIÇO

O tarugo maciço de aço 1045 foi dimensionado de forma que o seu comprimento fosse maior que duas vezes maior do que o diâmetro do hélice, para que o escoamento gerado pelo hélice não seja perturbado por algum anteparo, e o seu diâmetro para que fosse capaz de parafusar o motor elétrico em sua extremidade.

Abaixo as dimensões e propriedades deste material:

Tabela 4.1. – Tabela das propriedades do aço.

Comprimento	60	cm
Diâmetro	58	mm
Módulo de Young	200	GPa
Coeficiente de Poisson	0,3	

4.3. MOTOR ELÉTRICO AXI2826/8 GOLD LINE

É um motor brushless de alto torque com tambor rotativo e ímãs de neodímio de alta potência adequados para aeromodelos de até 1800 gramas e modelos acrobáticos de até 2600 gramas. Os motores brushless são fabricados com as tecnologias mais avançadas e os melhores materiais. Constituído de uma haste de aço temperado apoiado por três esferas de rolamento e fabricação robusta porém leve, garantem longa vida útil. O design exclusivo dos motores dá torque extremamente alto o que permite rotacionar hélices de grande diâmetro e altura sem necessidade de uma caixa de engrenagens.

Specification	
No. of cells	8 - 12 2 - 3 Li-Poly
RPM/V	1130 RMP/V
Max. efficiency	83%
Max. efficiency current	25 - 37 A (>75%)
No load current / 10 V	2,9 A
Current capacity	55 A/30 s
Internal Resistance	30 mohm
Dimensions (diameter. x lenght)	35x54 mm
Shaft diameter	5 mm
Weight with cables	181 g

Fig. 4.1. – Especificações do motor AXI2826/8.

4.4. HÉLICE APC 12,25x3,75

O hélice usada para propulsão é um hélice para esporte, fabricado pela APC Propellers, com dimensões de 12,25" de diâmetro e 3,75" de passo do hélice, que é um dos modelos utilizados pelo Aero da Universidade Federal do Espírito Santo.



Fig. 4.2. – Hélice APC 12,25x3,75.

4.5. EXTENSÔMETRO

Os extensômetros utilizados foram o modelo PA-06-125AA-120L da marca Excel Sensores que é o ideal para corpos de prova de aço.

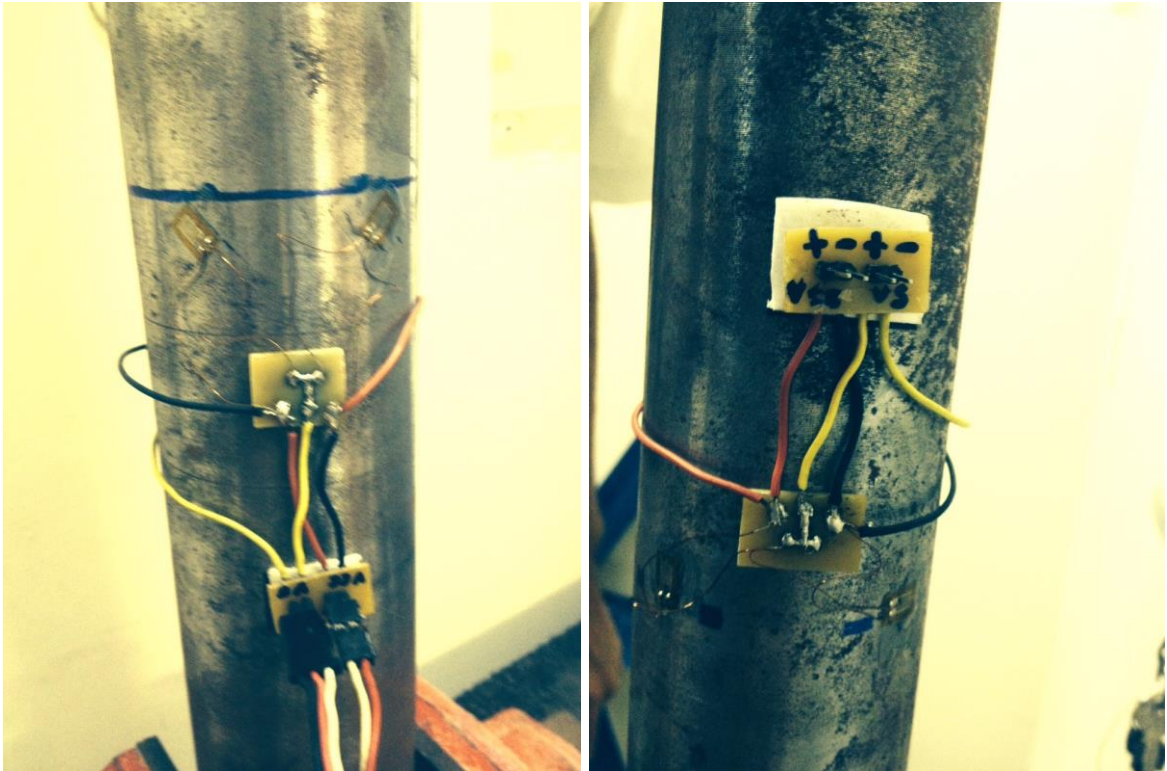


Fig. 4.3 – Extensômetros aplicados no eixo: a) Medição de torque, b) Medição de tração

4.6. PLACA DE AMPLIFICAÇÃO

A placa foi projetada e produzida em conjunto com a equipe da área da elétrica do time de aeromodelismo da UFES.

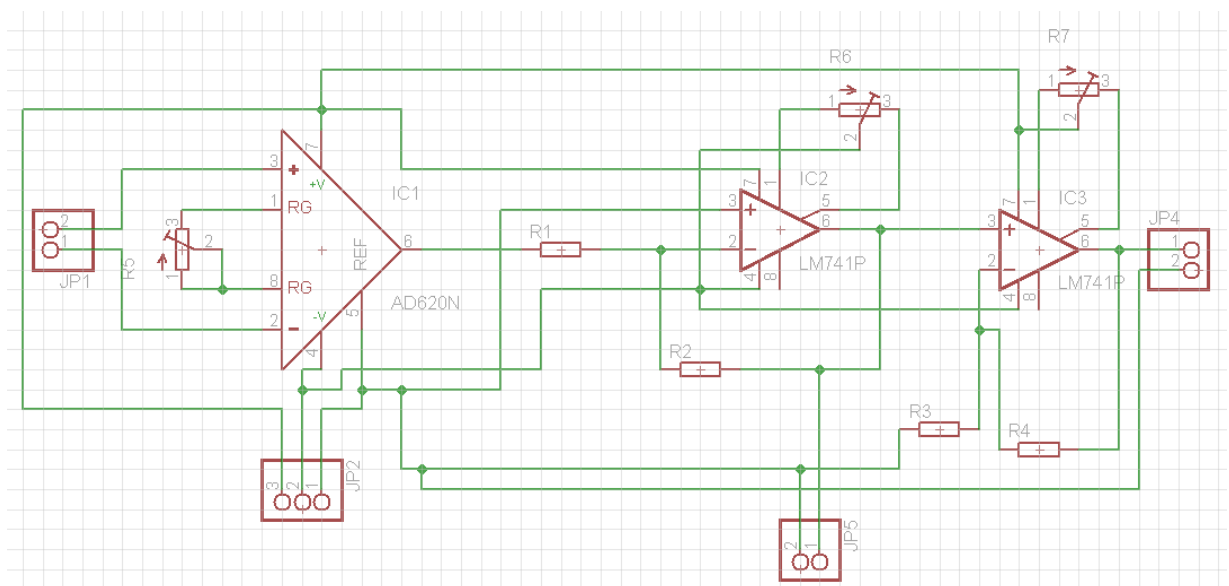


Fig. 4.4. – Circuito de amplificação.

O circuito é formado por 3 estágios de amplificação.

No primeiro estágio utiliza-se o amplificador de instrumentação AD620 com ganho de 1000, para que isso ocorra, foi fixado o potenciômetro que está ligado entre o pino 1 e 8 no valor de 50 ohms. Os pinos 1 e 2 são as entradas do amplificador, a qual está ligada na saída da ponte dos extensômetros. O pino 7 está ligado em +vcc e o pino 4 está ligado em -vcc. O pino 5 está ligado no comum da fonte simétrica, e o pino 6 é a saída do amplificador AD620.

No segundo estágio de amplificação foi usado o amplificador UA741 com ganho de 100. O pino 2 do 741 recebe a entrada do pino 6 do AD620. O pino 3 está ligado no comum da fonte simétrica, o pino 7 está ligado em +vcc e o pino 4 está ligado em -vcc. Esse amplificador possui uma tensão significativa de offset (aproximadamente 1 volt), para eliminar esse offset foi posto entre os pinos 5 e 1 um potenciômetro, assim, ajustamos o potenciômetro para que quando a entrada do 741 (pino 2) for zero, a saída também seja zero. O terminal central do potenciômetro está ligado no pino 4. O pino 6 é a saída.

No terceiro e último estágio temos também um amplificador UA741, porém na configuração não inversora. O pino 7 está ligado em +vcc e o 4 em -vcc, o pino 3 é a entrada do sinal que vem do pino 6 do amplificador anterior. O pino 2 está ligado em uma resistência e ao comum do circuito. Nesse estágio foi feita uma utilização da tensão de offset com o objetivo de deslocar a nossa tensão de referência do zero pra 2.5, assim foi posto um potenciômetro entre os pinos 1 e 5 com sua perna central ligada ao +vcc (pino 7). Ajustando o potenciômetro para que quando a entrada do amplificador for zero tenhamos na saída 2.5 volts. Assim, para entradas negativas lá no início do circuito, obtém-se valores de saída de 0 a 2.5 volts e para valores positivos obtém-se valores de saída de 2.5 a 5 volts. O ganho desse último estágio é de 2.

4.7. MÉTODOS PARA COMPARAÇÃO

O empuxo e o torque do sistema neste trabalho serão estudados e comparados a partir de três modos. O primeiro modo, são os dados fornecidos pelo fabricante dos hélices nas determinadas rotações. O segundo modo, serão os resultados obtidos através da mesa de testes em que se recolherá os valores das tensões de tração e

torção. O terceiro modo, serão os resultados obtidos através da formulação pelo Método das Pás explicada anteriormente.

4.7.1. Dados fornecidos pelos fabricantes

O fabricante do hélice, APC Propellers, fornece aos usuários uma tabela de dados em que apresenta qual as expectativas das forças geradas a partir de seus hélices em determinadas RPM. O fabricante se utiliza de métodos numéricos para obter seus valores de forças. Estes dados serão utilizados como uma das formas de aferição da mesa de testes que foi projetada por nós como será explicado mais a frente neste documento.

O objetivo deste método é ser uma referência para os dados que forem obtidos através dos testes em laboratório da mesa e dos valores calculados.

4.7.2. Formulação

Este método, apresentado no capítulo 2, tem como objetivo estimar os esforços produzidos pelo hélice, sem que seja necessário a realização dos testes na mesa. Para que seja possível um planejamento prévio da mesa tendo uma estimativa das forças que a mesa precisa medir.

É a partir dele também, que pode-se gerar um gráfico com as forças produzidas ao longo de uma pá do hélice.

4.7.3. Mesa de testes

O objetivo deste teste é obter valores reais e de uma forma rápida e prática das forças de tração e torção exercidas pelo hélice no conjunto. Afim de que ao atingir certa precisão, possa-se fazer o teste para diferentes tipos de hélices e obter o valor real aproximado destas forças, podendo assim avaliar se para o caso necessitado o hélice consegue ou não suprir a demanda esperada.

A mesa de teste é constituída dos equipamentos supracitados no início deste capítulo. Para realizar a medição utilizou-se 8 extensômetros, sendo 4 destes para a medição da deformação devido à tração. Destes 4, 2 destinados à medição da deformação radial posicionados na horizontal e 2 destinados à deformação axial posicionados na vertical. Os outros 4 serão utilizados para a medição da deformação causada pelo torque, 2 posicionados com uma angulação de 45 graus e 2 posicionados com angulação de 135 graus.

A instalação da mesa pode ser observada na figura:



Fig. 4.5 – Mesa de teste

Uma vez em que os valores recebidos da mesa apresentem resultados parecidos com os 2 métodos anteriores, ela será considerada aferida e poderá ser utilizada para testes de outros hélices.

5. RESULTADOS E COMPARAÇÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados e comparações entre os valores teóricos e os obtidos através da medição.

5.1. RESULTADOS DOS MÉTODOS TEÓRICOS

A seguir, serão apresentados os resultados de Tração e Torque para os Métodos Teóricos.

Os resultados de tração e torque esperados, fornecidos pelo fabricante do hélice, pela formulação desenvolvida neste projeto e o seu respectivo erro:

Tabela 5.1 – Resultados de Tração

RPM	T fabricante (N)	T formulação (N)	Erro (%)
1000	0.2001	0.2197	9.80
2000	0.7962	0.8787	10.36
3000	1.7962	1.9771	10.07
4000	3.1849	3.5148	10.36
5000	4.9731	5.4919	10.43
6000	7.1705	7.9084	10.29
7000	9.7816	10.7641	10.04
8000	12.8153	14.0593	9.71

Tabela 5.2 – Resultados de Torque

RPM	Q fabricante (N.m)	Q formulação (N.m)	Erro (%)
1000	0.00576	0.0044	-23.61
2000	0.0229	0.0177	-22.71
3000	0.0513	0.0398	-22.42
4000	0.0854	0.0707	-17.21
5000	0.1268	0.1105	-12.85
6000	0.1783	0.1591	-10.77
7000	0.2379	0.2165	-9.00
8000	0.306	0.2828	-7.58

O resultado obtido através da Formulação apresentada no capítulo 3 para a distribuição ponto a ponto de Tração e Torque ao longo do hélice.

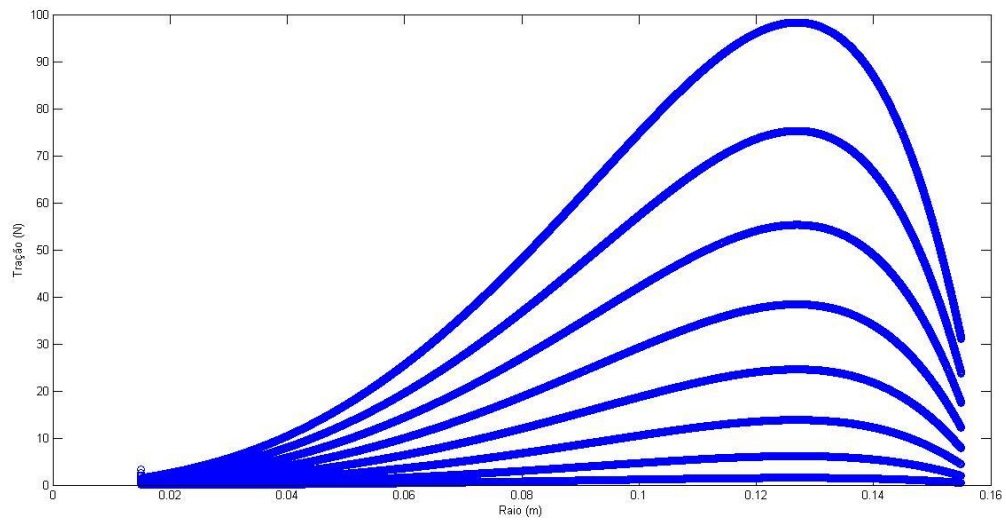


Fig. 5.1 – Gráfico Tração x Raio

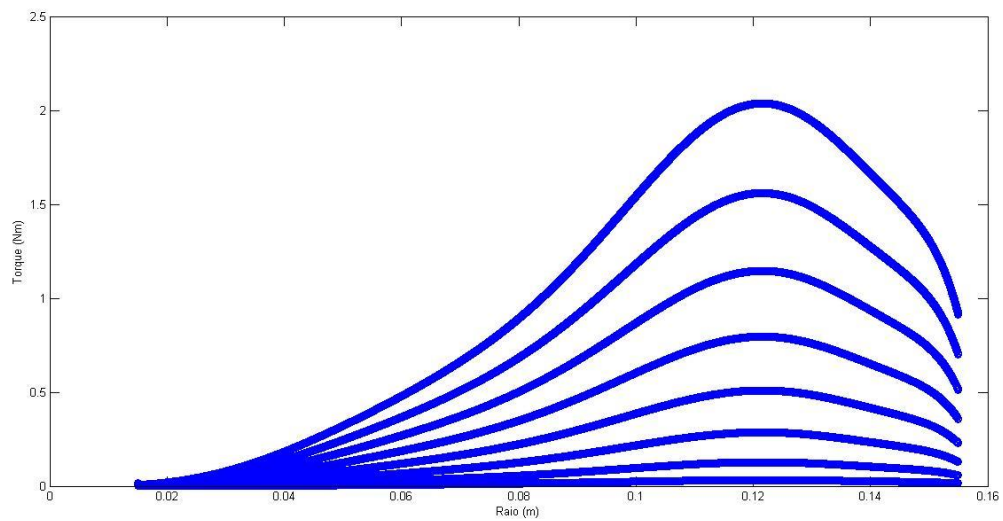


Fig. 5.2 – Gráfico Torque x Raio

As figuras 5.1 e 5.2 possuem, respectivamente, a distribuição da Tração e do Torque ao longo do hélice. As linhas destes gráficos variam de 1000 a 8000 RPM sendo a linha inferior referente a 1000 RPM crescendo progressivamente até a linha superior referente a 8000 RPM.

Estes gráficos confirmam a premissa de que a região de maior geração de força está entre a região central e a final. Confirmando o que está na literatura, de que a região mais próxima ao rotor gera pouca força devido à baixa velocidade tangencial

(tração) e a proximidade ao eixo de giro (torque). Já na região final, os hélices tem seus perfis aerodinâmicos afilados e seus ângulos de ataque diminuídos para uma diminuição do arrasto, consequentemente afetando na perda de geração de empuxo. Isso se deve a alta velocidade tangencial na sua região final, que caso não haja tais modificações em seus perfis, o grande arrasto produzido prejudicaria a propulsão, necessitando de uma maior potência do motor, e a geração, diminuindo o torque final transferido ao eixo.

5.2. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS TEÓRICOS

5.2.1. Comparação entre as Trações Teóricas

A tabela 5.1 mostra os resultados da Tração entre os dados do fabricante e os resultados obtidos pela formulação.

Como observado na tabela 5.1, os resultados de Tração obtidos a partir da formulação realizada neste projeto se assemelha muito aos dados fornecidos pelo fabricante, que utiliza métodos numéricos para obter os valores esperados do hélice.

O que confirma um acerto da formulação apresentada neste trabalho é de que a semelhança dos valores se dá tanto quantitativamente, com erros aproximados a 10%, quanto qualitativamente, como apresentado na figura 5.3, onde os perfis das trações são muito similares.

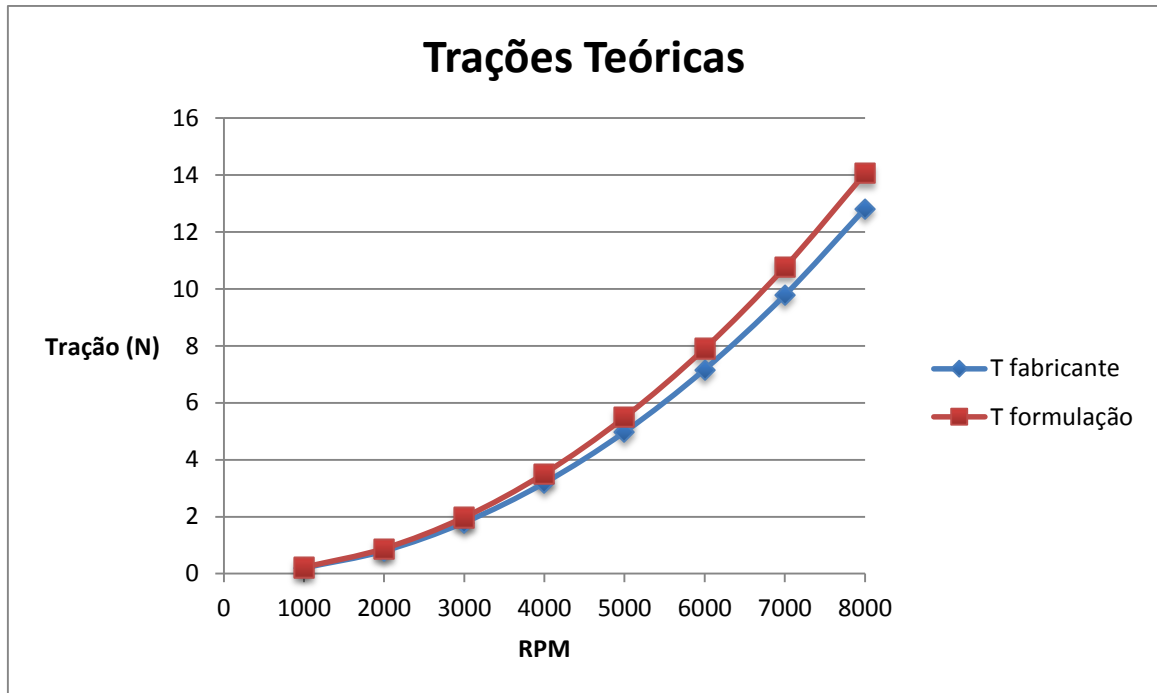


Fig. 5.3 – Gráfico comparativo dos resultados de Tração

5.2.2. Comparação entre os Torques Teóricos

A tabela 5.2 mostra os resultados do Torque entre os dados do fabricante e os resultados obtidos pela formulação.

Os valores de Torque obtidos pela formulação diferem mais do que o da Tração. É possível notar que o erro diminui ao passo que a rotação aumenta, isso ocorre devido a simplificação dos coeficientes de arrasto e sustentação na região mais próxima ao rotor, como explicado no capítulo 3. Pois como visto na figura 5.2, a baixas rotações a região mais próxima ao rotor tem uma interferência maior no torque total, à medida que a rotação aumenta esta região perde cada vez mais sua significância no valor total, diminuindo o erro gerado pela simplificação.

Este decréscimo do erro à medida que a rotação aumenta não é notada na Tração, pois no Torque, ao multiplicar pelo raio, diminui ainda mais a significância da região próxima ao rotor.

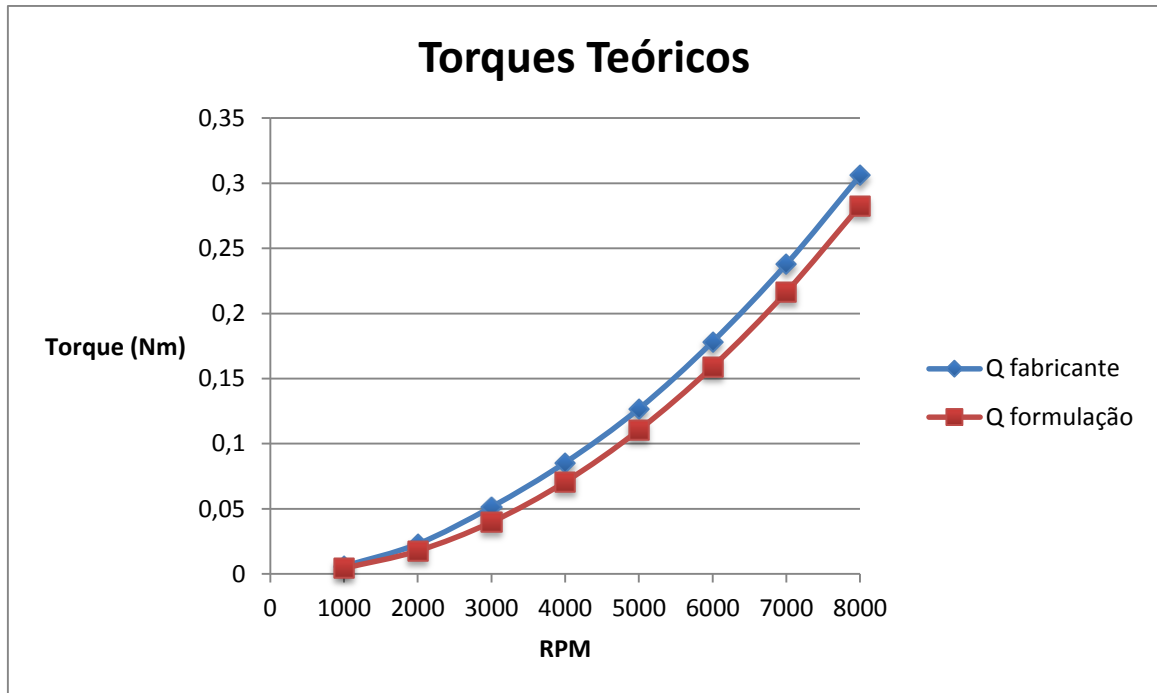


Fig. 5.4 - Gráfico comparativo dos resultados de Torque

Pode-se notar que na figura 5.4, as linhas seguem tendências parecidas, afirmando o alcance qualitativo dos cálculos feitos, apesar de uma pequena defasagem a variação do erro explicada anteriormente.

5.3. RESULTADOS DA MESA DE TESTES

Primeiramente foram analisados os componentes da mesa, e com isso, foi possível constatar uma deficiência na questão da placa de amplificação do sinal provido pelos sensores. A placa, como foi dito anteriormente, possui uma razão de amplificação de aproximadamente $2 \cdot 10^5$ que se mostrou insuficiente para o sinal esperado pela mesa. Ao serem analisadas mais a fundo as forças geradas pelo hélice, foram feitos cálculos, segundo a formulação descrita no capítulo 3 deste texto, e foram constatados que o sinal de saída da ponte dos sensores estaria numa ordem de grandeza entre 10^{-9} e 10^{-7} volts. Outra consequência foi a impossibilidade de serem feitos os testes com o sistema de propulsão estudado pois sendo o sinal dos sensores não amplificados o bastante, o equipamento de medição da saída, multímetro, não consegue medir a variação da d.d.p. (diferença de potencial) referente às forças provocadas pelo hélice.

Foram feitos testes para verificar se a premissa estava correta. A mesa foi montada no laboratório do professor Rafael, utilizando uma morsa presa à mesa de inércia e engastando a extremidade livre do cilindro de aço na morsa. A seguir foi conectada a saída da ponte de Wheatstone, feita com os sensores destinados a medição da tração, com a placa de amplificação. A alimentação da placa de amplificação tanto como da ponte foi feita por uma fonte de 3 canais, todos eles fixados em 5V. A medição da saída do sistema foi feita através de um multímetro.

Com a mesa preparada foi testada se a saída estava de acordo, como dito no capítulo 4 na sessão da placa de amplificação a placa foi projetada para que se a entrada fosse zero, sem alterações nos extensômetros, a saída do sistema seria 2,5V. Com a mesa em repouso, sem nenhuma força incidindo sobre o cilindro, a saída lida no multímetro foi de 1,7V para o sistema que mede a tração, um resultado não coerente. Foi então testada a placa de amplificação separadamente e constatado que nessas condições de entrada, sua saída era de 2,5V. A seguir foi testado apenas as pontes dos sensores, tanto para tração quanto para torção, alimentando-as com 5V. A ponte referente à tração teve na sua saída 2,5V, o que não condiz com uma Ponte de Wheatstone balanceada, onde sua saída deveria ser 0V. Foram verificadas as condições da ponte, os sensores no posicionamento correto e fios que poderiam estar soltos ou em conexões erradas, o que não foram constatados. Os motivos, então, para o erro provavelmente vêm do processo de colagem dos sensores, podendo haver falta de cola ou uma pré-tensão na colagem. O circuito que mede o torque, por sua vez, possui uma saída de 0V, o que confirma que a ponte está balanceada corretamente.

Com esses resultados a única possibilidade de obter valores consistentes deste sistema é para a medição de torque, porém não foi possível realizar estes testes pois, com a amplificação disponível, o valor de força necessária para gerar um sinal grande o bastante para ser lido era um valor inviável para os equipamentos disponíveis.

O principal motivo para o não funcionamento da mesa foi apontado como sendo a falha na colagem dos sensores, para a medição de tração, e a deficiência na amplificação. A deficiência na amplificação comprometeu todos os testes planejados para o torque, impossibilitando a aferição correta do sistema, que consiste em

aplicar forças conhecidas e compara-las ao sinal de saída, além de criar um padrão para ajustar possíveis desvios no sinal provenientes do sistema, quanto descobrir outros possíveis erros de diferentes partes.

Portanto, para que a mesa de teste se torne funcional, seriam necessários alguns reparos. Uma nova placa de amplificação mais potente se torna necessária, para que a variação dos extensômetros seja sentida deve-se haver uma maior amplificação do sinal, tendo cuidado na sequência de posicionamento dos amplificadores para que diminuía ao máximo os possíveis ruídos do sistema. Uma nova colagem dos extensômetros posicionados para a medição da tração como explicado anteriormente, antecedida de um novo polimento e limpeza do eixo, para que, desta forma, esteja certificada a colagem correta dos sensores. Seguido disto, uma aferição correta para corrigir possíveis desvios e ruídos provindos do sistema.

6. REFERÊNCIAS

- 1 P. B. S. Lissaman (1983). "Low-Reynolds-Number Airfoils," *Ann. Rev. Fluid Mech*
- 2 R. C. Hibbeler - **Resistência dos Materiais** - 7ª edição
- 3 Christopher A. Lyon, Andy P. Broeren, Philippe Giguère, Ashok Gopalarathnam, and Michael S. Selig - **Summary of Low-Speed Airfoil Data** – 3º volume

7. BIBLIOGRAFIAS

- 1 Abhinav Shukla¹, Sanjay Tanwar², Mohit Sorout³, Jayanta Sinha: **Design of Experimental Set-Up for Propeller Test Rig and Thrust Calculation at Different RPM**
- 2 Miroslav Petrov, Lic. of Eng. Division of Heat and Power, Department of Energy Technology, KTH: **Lecture within the course Fluid Machinery (4A1629)**

ANEXO 1

Programa para cálculo das forças geradas pelo Sistema Propulsor.

```
%% Programa do calculo da sustentacao e torque da helice 12,25x3,75

% Intervalos de integracao devido ao estol em certas seccoes da helice:
% De 0.085 > r < 0.155 utilizar eq. de Cl e Cd
% de 0.015 > r < 0.085 utilizar Cl2 e Cd2

% Constantes
dr = 0.00001 ; % Variacao do raio em metros
ro = 1.225 ; % kg/m^3
Cl2 = 0.65 ;
Cd2 = 0.022 ;
vr = zeros(15500,1); % Criando os vetores
vdq = zeros(15500,1); % Criando os vetores
vdt = zeros(15500,1); % Criando os vetores
vT = zeros(8,1); % Criando os vetores
vQ = zeros(8,1); % Criando os vetores
vrpm = zeros(8,1); % Criando os vetores

% Calculos do programa
i=1 ;
j=1 ;
for rpm = 1000:1000:8000 ;
    % Zerando parametros calculados
    Q=0 ;
    T=0 ;
    for r = 0.015:dr:0.155 ;
        % Equacoes necessarias
        w = (2*pi*rpm)/60 ; % Rad/s
        v = w*r ; % m/s
        alf = (1.755e7*r^5)-(8.0429e6*r^4)+(1.3913e6*r^3)-
(1.1092e5*r^2)+3790.5*r-22.636 ;
        c = (-176.85*r^4)+(29.63*r^3)-(1.7436*r^2)+0.10045*r+0.022753 ;
        Cl = 0.091071*alf+0.28071 ;
        Cd = 0.06408*Cl^3-0.12055*Cl^2+0.062974*Cl+0.014138 ;

        % Calculo do torque e tracao
        if 0.015>=r<0.085 ;
            dq = ro*v^2*c*(Cl2*sind(alf)+Cd2*cosd(alf))*r ; % torque
            dt = ro*v^2*c*(Cl2*cosd(alf)-Cd2*sind(alf)) ; % tracao
        else
            dq = ro*v^2*c*(Cl*sind(alf)+Cd*cosd(alf))*r ; % torque
            dt = ro*v^2*c*(Cl*cosd(alf)-Cd*sind(alf)) ; % tracao
        end

        vr(i)= r ; % armazenando os valores
        vdq(i)= dq/2 ; % armazenando os valores
        vdt(i)= dt/2 ; % armazenando os valores
        i = i+1 ;
        Q = Q+dq*dr ;
        T = T+dt*dr ;
    end
end
```

```
    vT(j)= T ; % armazenando os valores
    vQ(j)= Q ; % armazenando os valores
    vrpm(j)= rpm ; % armazenando os valores
    j = j+1 ;
end

plot (vrpm,vT,'b-')
hold on
plot (vrpm,vQ,'r-')
hold off
```