

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO MOMENTO DE INÉRCIA DO PERFIL DE ASA MODELO NACA 0012

Douglas Vilela – douglascarlosvilela@gmail.com

Instituto Tecnológico Aeronáutico – ITA, Departamento de Física
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias.
12228-900 – São José dos Campos – SP

Henrique Vegini Lioi – hlioi2088@gmail.com

Universidade do Vale do Paraíba – Univap e Instituto Tecnológico Aeronáutico – ITA,
Departamento de Física

Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias.

12228-900 – São José dos Campos – SP

José Silvério Edmundo Germano – jsegermano@gmail.com

Instituto Tecnológico Aeronáutico – ITA, Departamento de Física

Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias

12228-900 – São José dos Campos – SP

Renato de Sousa Maximiano – renatomaximiano@icloud.com

Universidade do Vale do Paraíba – Univap e Instituto Tecnológico Aeronáutico – ITA,
Departamento de Física

Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 - Vila das Acácias

12228-900 – São José dos Campos – SP

Resumo: *Esse artigo visa apresentar um procedimento experimental para obter o momento de inércia do perfil de asa NACA 0012. O método consiste em adquirir resultados experimentais do momento de inércia do perfil e compará-los com os dados obtidos com o software Solidworks. A parte experimental foi realizada no laboratório de física, do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, e o corpo principal do aparato experimental teve como base uma mesa giratória. As capturas dos dados experimentais foram realizadas por dois sensores distintos: pelo acelerômetro de um smartphone e pelo sensor LabQuest acoplado ao software Logger Pro.*

Palavras-chave: *Experimento. Momento de Inércia. Perfil de asa. NACA 0012.*

1. INTRODUÇÃO

O momento de inércia é uma propriedade muito importante no estudo de flexão e torção de materiais. Quanto maior o momento de inércia, maior será a dificuldade de rotação em torno do eixo analisado.

A importância de vivenciar práticas de laboratório, no processo ensino-aprendizagem, para alunos de engenharia, é uma percepção evidente. As aulas experimentais no ambiente de laboratório podem despertar curiosidade e interesse do aluno, visto que a estrutura de interação

da prática experimental pode facilitar, entre outros fatores, a observação de fenômenos estudados em aulas teóricas, como nos traz **Borges (2002)**.

Apesar do grande desenvolvimento teórico, a ciência continua eminentemente experimental. Daí, a importância das aulas práticas. Segundo **Soares (2015)**, é necessário refletir a respeito da utilização e da aplicação de novas ferramentas em sala de aula, como análise de movimentos através de filmagens, inserção de novas tecnologias no processo como o uso do computador, como método de solução e simulação, ambos para auxiliar o momento de ensino-aprendizagem.

Tendo em vista a união das TDIC – Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação com a prática de laboratório, diversos pesquisadores têm realizado pesquisas com o uso de smartphones como aquisição de dados em experimentos (**LANZ, C. 2015; GÓMEZ-TEJEDOR et al, 2014; CASTRO-PALACIO et al, 2013**).

Neste sentido, foi calculado o momento de inércia de um perfil de asa. Esta não é uma tarefa fácil, pela sua alta complexidade geométrica e por não ter dados tabelados do mesmo. Sendo assim deve-se recorrer a softwares de engenharia ou procedimentos práticos (experimentos) para obter os resultados.

Vilela (2017) já realizou procedimento semelhante, utilizando recursos digitais como smartphones e o software *Tracker* para encontrar o momento de inércia. Isso permitiu calcular o momento de inércia de discos de diferentes formatos.

O momento de inércia é uma variável importante na engenharia, muito utilizada em cálculos estruturais, conseqüentemente aplicada na engenharia aeronáutica. Saber o momento de inércia de um perfil de asa é de extrema importância para o desenvolvimento e integridade estrutural da asa, sendo que a mesma será composta por nervuras que não darão apenas a forma aerodinâmica, mas também enrijecimento estrutural. Com isso, sabendo o momento de inércia é possível saber o quanto de carga estrutural que a asa aguentará e conseqüentemente o material a ser utilizado na fabricação para se cumprir os objetivos.

Devido ao grande número de sensores é possível aquisição de dados de diversas formas, através dos smartphones. No entanto, esse trabalho foca no uso do acelerômetro, do *LabQuest*, uma vez que o alvo de análise é um sistema dinâmico.

Neste trabalho foi analisado a medida do momento de inércia de um disco sólido e do Perfil NACA 0012. Esses foram obtidos diante de formas distintas: o acelerômetro, a do software *SolidWorks* e do *LabQuest*. As medidas no smartphone, foram realizadas por meio do software gratuito *Accelerometer Meter*, instalado em um aparelho eletrônico *Samsung Galaxy S4*.

Posteriormente, foi realizado o experimento com o uso do sensor *LabQuest*, analisado no software *Logger Pro*. E por fim, foram comparados e discutidos os resultados experimentais obtidos com os adquiridos no software *Solidworks*.

2. O PERFIL NACA 0012 E MOMENTO DE INÉRCIA

2.1. Perfil de asa NACA 0012

O perfil é um plano de geometria complexa perpendicular a asa, no que gera a geometria e o formato da asa para os aviões sendo ele simétrico ou assimétrico. O perfil simétrico, é considerado o que a linha de corda divide o aerofólio em duas partes iguais. Esse tem a vantagem de produzir a mesma sustentação em ângulos de ataque positivo e negativo, um dos motivos pelo qual é comumente utilizado em aeronaves acrobáticas. Já o perfil assimétrico, o que a linha da corda divide o aerofólio em duas partes diferentes, por serem mais eficientes em gerar sustentação, é mais utilizado nas asas das aeronaves.

O perfil NACA 0012 é um perfil simétrico, muito utilizado na aeronáutica em aviões acrobáticos e em superfícies de comando, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Perfil NACA 0012



Fonte: O Autor

2.2. Momento de Inércia

O momento de inércia é uma grandeza física, que visa a dificuldade de alterar seu estado do movimento de um corpo de rotação. Lembrando que, um corpo tem a tendência de permanecer em seu estado inicial de movimento com uma velocidade constante, que pode ser zero no caso dos somatórios das forças que atuam sobre o corpo. Há uma resistência a mudança no movimento rotacional, sendo que esta resistência tem ligação a mudança da velocidade angular, que é conhecida como momento de inércia do respectivo corpo.

Devido a distribuição contínua de massa do disco, sendo que o elemento de massa é dm ao longo do corpo x , como segue.

$$I = \int x^2 dm \quad (1)$$

Para um disco que gira em torno de um eixo que passa pelo seu centro de massa, o elemento de massa será por:

$$dm = \frac{m}{\pi \cdot R^2} \cdot 2\pi x dx \quad (2)$$

Substituindo e aplicando os limites de integração, é obtida a seguinte equação:

$$I = \int_0^R x^2 \frac{m}{\pi R^2} 2\pi x dx \quad (3)$$

Com isso, é possível chegar ao momento de inércia do disco, por:

$$I = \frac{1}{2} m R^2 \quad (4)$$

Para determinar a força do disco, é utilizada a seguinte equação. Sendo que “m” é a massa do disco e “a” é a aceleração da gravidade.

$$F = m \cdot a \quad (5)$$

Portanto, foi determinado o momento de inércia através da seguinte fórmula, a qual depende da aceleração angular do experimento, da força aplicada e do raio de giração da mesa.

$$I = \frac{F r}{a} \quad (6)$$

Para ser analisado o momento de inércia através dos dados do sensor acelerômetro, onde depende da força (F), do raio de giração (r), aceleração (a) e da distância do celular até o corpo (r'), é preciso seguir a equação abaixo:

$$I = \frac{F r}{\frac{a}{r'}} \quad (7)$$

2.3. Momento de Inércia do Perfil de asa NACA e o problema

O momento de inércia tem sua importância no estudo de torção, flexão e sistemas estruturais da asa e fuselagem do avião. Com isso, se tem em vigor a extrema integridade e suma importância de calcular o momento de inércia do perfil.

No entanto, o perfil tem uma geometria simples, mas complexa de calcular e de determinar a equação teórica a fim de obter o momento de inércia. Desse modo, foi utilizado o software de elementos finitos para conseguir determinar essas medidas e comparar com os experimentos feitos no laboratório de física, utilizando sensores.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

A montagem para determinar os parâmetros e obter o momento de inércia consistiu em materiais, para obtenção dos dados a fim de comparar os resultados práticos com o teórico, dessa forma foram utilizados no experimento: barbante, tesoura, paquímetro, micrômetro,

sensores para leitura dos dados o *Logger Pro*, sensor para adquirir os dados o *LabQuest*, sensor Rotary Motion, trena, roldana, uma mesa de alumínio de 108 gramas para suporte e um peso de 100 gramas. Como ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Materiais utilizados para aquisição de dados



Fonte: O Autor

Foi utilizado para o desenvolvimento do perfil NACA 0012 a impressora 3D, sendo que o perfil tem as seguintes dimensões de 12,5 cm de comprimento, 0,05 cm de espessura e a largura máxima de 1,5 cm.

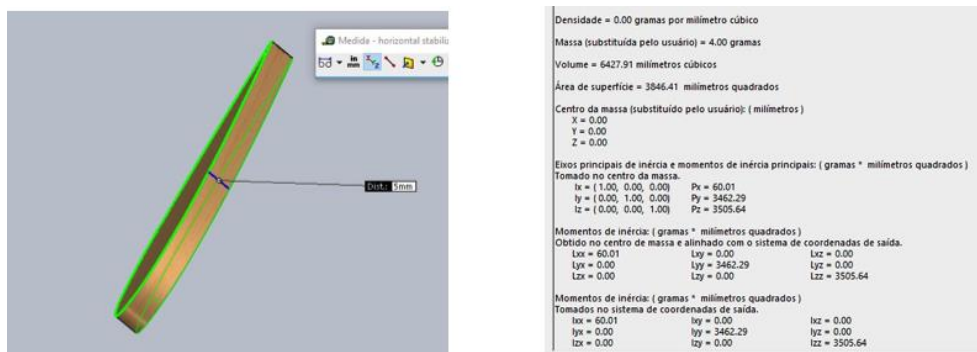
Para a aquisição de dados do experimento, por meio do acelerômetro, foi utilizado o smartphone *Samsung Galaxy S4* e instalado um software *Accelerometer Meter*, para obter e ler os dados registrados.

3.2. Metodologia

Primeira etapa: Análise através do software *Solidworks*.

Foi desenvolvido um perfil NACA 0012, no software *Solidworks*, com peso e dimensões iguais ao corpo de prova, Figura 3 (A), e através do mesmo foi encontrado os momentos de inercia em relação ao baricentro do perfil, Figura 3 (B). Esta etapa foi realizada para validar os procedimentos experimentais.

Figura 3 – (A): Perfil NACA 0012 desenvolvido no *Solidworks* conforme. (B): Resultados obtidos pelo software.



Fonte: O Autor

Segunda etapa: Análise através de um procedimento experimental, com o uso do acelerômetro de um smartphone.

O experimento foi realizado no laboratório de física do ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica e se resume em uma mesa giratória como base dos testes. Na montagem experimental, mostrada na Figura 4 (A), foi deslocado o smartphone do centro da mesa para uma posição com distância de 15 centímetros do centro da mesa, com o perfil no eixo Z e posteriormente no eixo Y, Figura 4 (B). Assim, foram coletados dados no acelerômetro. Essa montagem foi realizada para o cálculo do momento de inércia do sistema mesa com perfil NACA 0012.

Figura 4 – (A): Experimento utilizando o acelerômetro. (B): Perfil durante o experimento.

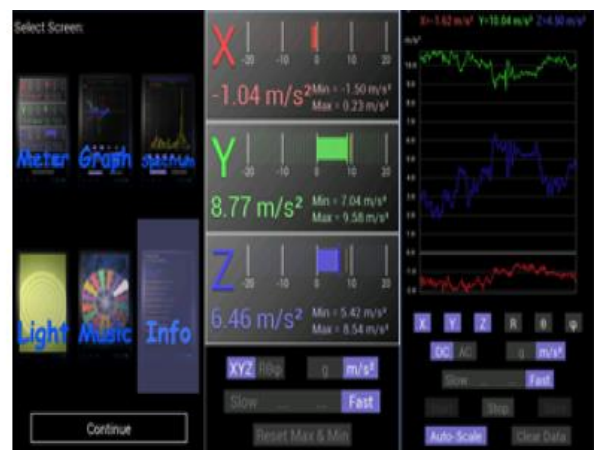


Fonte: O Autor

Ao realizar o procedimento experimental como mostra na Figura 4 (A), foi possível utilizar os valores obtidos pelo acelerômetro do smartphone, demonstrados na Figura 5 (A) e exportados pelo software *Accelerometer Meter*, como o trecho, mostrado pela Figura 5 (B).

Figura 5 – (A): Tabela com os resultados obtidos pelo acelerômetro. (B): Aplicativo *Accelerometer Meter*.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Keuwl Accelerometer Data File						
2	2017-03-26 15-54-28						
3							
4	Time (s)	X (m/s ²)	Y (m/s ²)	Z (m/s ²)	R (m/s ²)	Theta (de Phi (deg)	
5	0.000000	-0.133477	0.113725	9.746.197	9.747.774	1.030786	139.568.405
6	0.0097660	-0.195726	0.116717	9.719.262	9.721.933	1.343192	149.191.101
7	0.0198370	-0.191536	0.107739	9.761.160	9.763.634	1.289830	150.642.242
8	0.0307620	-0.187346	0.096965	9.782.109	9.784.384	1.235431	152.635.178
9	0.0402220	-0.161010	0.104746	9.688.736	9.690.639	1.135739	146.953.674
10	0.0497740	-0.082600	0.116717	9.648.633	9.649.693	0.849037	125.286.751
11	0.0609740	-0.064045	0.115520	9.637.859	9.638.764	0.785093	119.004.166
12	0.0705570	-0.132878	0.106542	9.681.553	9.683.051	1.007942	141.277.298
13	0.0798650	-0.165200	0.137667	9.731.233	9.733.608	1.265941	140.194.427
14	0.0922240	-0.175375	0.139462	9.763.555	9.766.126	1.314773	141.507.507
15	0.1002500	-0.169390	0.092775	9.725.247	9.727.165	1.137804	151.290.344
16	0.1111150	-0.116717	0.079607	9.708.488	9.709.516	0.833687	145.704.010
17	0.1202700	-0.098761	0.079607	9.706.693	9.707.521	0.748604	141.129.089
18	0.1312870	-0.108936	0.086191	9.710.283	9.711.277	0.819722	141.648.651
19	0.1402280	-0.141258	0.090980	9.745.598	9.747.046	0.987744	147.215.714



Fonte: O Autor

O aplicativo retorna o valor da aceleração linear nos três eixos (X, Y e Z) e o tempo t, em segundos. Foi escolhido um dos eixos (Y destacado) como o de giração do celular. As medidas da massa do objeto em queda e do raio de giração da mesa de prova foram obtidas através de fita métrica, paquímetro e balança como mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores das grandezas dos objetos utilizados no experimento em SI.

Objeto	Grandeza	Valor obtido
Perfil	Massa	0,004 Kg
Mesa	Raio de Giração	0,0175 m
Perfil/Mesa	Perfil Centro de Mesa	0,1500 m

Fonte: O Autor

Para o acelerômetro, é calculado o momento de inércia através da Equação 7.

Para calcular o momento de inércia do perfil, primeiramente, é preciso calcular o momento de inércia da mesa + perfil e, posteriormente, apenas o momento de inércia da mesa. Por fim, subtrai os valores para obter o valor do momento de inércia do perfil.

Terceira etapa: Análise através de um procedimento experimental, com o uso do *LabQuest*, analisado no software *Logger Pro*.

Para a montagem experimental mostrada, como ilustra a Figura 6 (A), foi utilizado uma mesa giratória composta por um disco, que rotacionava através de uma força exercida por uma massa em queda livre. As informações necessárias obtidas, através do uso do *LabQuest*, foram anexadas para análises *Logger Pro*. Após os dados da mesa giratória serem adquiridos, foi utilizada a aceleração angular média para a realização do cálculo do momento de inércia. Esses cálculos foram realizados através da Equação 6, onde I é o momento de inércia, F é a força atuando sob a mesa de giração, a é a aceleração média angular e r é o raio de giração da mesa.

Para calcular o momento de inércia do perfil, primeiramente, é necessário calcular o momento de inércia da mesa. Desse modo, é calculado apenas o momento de inércia da mesa + perfil, como mostra a Figura 6 (B). Por fim, é realizada a subtração dos valores para obter o valor do momento de inércia do perfil.

Figura 6 – (A): Experimento mesa giratória. (B): Perfil NACA 0012 + mesa



Fonte: O Autor

4. RESULTADOS

Com base no experimento desenvolvido, de momento de inércia do perfil NACA 0012, no laboratório de Física do ITA. Esse, que foi desenvolvido através dos métodos analíticos e com a utilização do software *Solidworks*. Desse modo, foi determinado o momento de inércia do perfil NACA 0012 nos eixos X, Y e Z. Para isso, foi realizada a comparação de três fontes de captura de dados, através do sensor de um acelerômetro de smartphone, chamado *LabQuest*, e do software *Solidworks*, com o objetivo de validar e comprovar os métodos experimentais do momento de inércia. Esse experimento determinou as acelerações angulares médias dos corpos citados na Tabela 2, para fins de cálculos do momento de inércia.

Tabela 2 – Aceleração média angular obtidos através do sensor LabQuest da mesa, disco, perfil NACA 0012 nos eixos Z e Y.

Mesa	Disco	Perfil Z	Perfil Y
71,17981	45,23312	69,93996	70,04113

Fonte: O Autor

Determinou-se o momento de inércia dos corpos utilizando a Equação 4 e as acelerações da Tabela 1 para validar o método de análise do sensor *LabQuest*.

É possível observar que os valores estão bem próximos, com isso foi obtido o valor do momento de inércia da mesa, $I_{Mesa} = 1,99635 \times 10^{-4} kg.m^2$ calibrando o experimento.

O momento de inércia teórico do disco é de $I_{Disco} = 1,094 * 10^{-4} kg.m^2$, e o experimental $I_{Disco} = 1,14515 \times 10^{-4} kg.m^2$.

Desta forma pode-se calcular o momento de inércia do perfil NACA 0012, sendo $I_{NACA0012} = 3,53926 \times 10^{-6} kg.m^2$ no eixo z e $I_{NACA0012} = 3,24579 \times 10^{-6} kg.m^2$ no eixo Y.

Ao realizar o procedimento experimental, utilizando o acelerômetro do smartphone, foi determinada a aceleração linear. O aplicativo *Accelerometer Meter* retorna o valor da aceleração linear nos três eixos (X, Y e Z) e o tempo t, em segundos. Assim, foi escolhido um dos eixos (Y destacado em cinza e verde, na Figura 5 (A)) como aceleração de rotação do celular.

Após realizar o experimento, foi encontrado o valor da aceleração linear média conforme mostra a Tabela 3. Com os valores obtidos foi possível calcular o momento de inércia utilizando a Equação 7.

Tabela 3 – Aceleração linear média obtida através do acelerômetro

Corpo	Y (m/s ²)
Mesa	0,14211
Mesa + perfil Z	0,142084
Mesa + perfil Y	0,14088

Fonte: O Autor

Obtendo os valores de aceleração linear média através dos dados do acelerômetro, foram determinados os valores experimentais dos momentos de inércia sendo da mesa $I_{Mesa} = 1,8102 \times 10^{-2} kg.m^2$, do perfil NACA 0012 $I_{NACA\ 0012} = 3,4869 \times 10^{-6} kg.m^2$ no eixo Z e $I_{NACA\ 0012} = 2,9772 \times 10^{-6} kg.m^2$ no eixo Y.

Portanto, para validar os métodos dos experimentos que foram realizados no laboratório de física foi utilizado o software *Solidworks* para obter os valores teóricos dos momentos de inércia do perfil NACA 0012 nos três eixos de rotação X, Y e Z. Dessa forma, os valores dos momentos de inércia teóricos são $I_{NACA\ 0012} = 6,0010 \times 10^{-7} kg.m^2$ no eixo X, $I_{NACA\ 0012} = 3,4622 \times 10^{-6} kg.m^2$ no eixo Y e $I_{NACA\ 0012} = 3,5056 \times 10^{-6} kg.m^2$ no eixo Z.

No entanto, com a utilização do software *Solidworks* foi possível obter o momento de inércia do perfil. Com isso, foi viável comprovar que os métodos experimentais, utilizando os sensores *LabQuest* e o acelerômetro, estão dentro do esperado.

Com a utilização de sensores diferentes foi verificado que os valores entre um experimento e o outro tiveram uma pequena variação. Desse modo, foi admissível comparar os momentos de inércia gerados pelos sensores e pelo Software *Solidworks*, comparando a taxa de erro das medidas para validar e certificar que o experimento teve pequenas variações. Como é possível avaliar com os dados da Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação dos momentos e eventual taxa de erro.

Análise por:	Método:	Inercia $kg.m^2$ (Eixo y)	Inércia $kg.m^2$ (Eixo z)	Erro % (Eixo y)	Erro % (Eixo z)
Solidworks	Software teórico	$3,4622 \times 10^{-6}$	$3,5056 \times 10^{-6}$	0%	0%
Acelerometro	Experimental	$2,9772 \times 10^{-6}$	$3,4869 \times 10^{-6}$	14,01%	0,53%
Labquest	Experimental	$3,2457 \times 10^{-6}$	$3,5392 \times 10^{-6}$	6,25%	0,97%

Fonte: O Autor

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta inicial de medir o momento de inércia do perfil de asa NACA 0012 se mostrou viável. Essa proposta foi realizada por meio de uma montagem experimental relativamente simples e acoplado a um sistema de aquisição de dados (smartphone) de fácil acesso.

Os resultados apresentam erros relativamente baixos, que podem ser melhorados com um cuidado maior na captura dos dados e levando em consideração os atritos dissipativos que não foram considerados nos modelos teóricos utilizados. Com os resultados obtidos, foi possível utilizar essa técnica para determinar o momento de inércia de geometrias complexas, por exemplo, a asa de um avião que é a base para determinar alguns parâmetros da aeronave.

Agradecimentos

Henrique Vegini Lioi e Renato de Sousa Maximiano agradecem ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA por nos proporcionar ótimos laboratórios para fins experimentais.

REFERÊNCIAS

- BEZERRA-JR, A. LENZ, J.A. **Videoanálise Com O Software Livre Tracker No Laboratório Didático De Física: Movimento Parabólico E Segunda Lei De Newton.** Cad. Bras. Ens. Fís., v. 29, n. Especial 1: p. 469-490, set. 2012.
- BORGES, A.T. **Novos Rumos Para O Laboratório Escolar De Ciências.** Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v.19, n. 3, p. 291-313, dez. 2002.
- BROWN, D; COX, A. J. **Innovative Uses Of Video Analysis.** The Physics Teacher, v. 47, p. 145-150, 2009.
- CASTRO-PALACIO, J. C, VELAZQUEZ-ABAD, L. GIMENEZ, F. A **Quantitative Analysis Of Coupled Oscillations Using Mobile Accelerometer Sensors.** European Journal of Physics, v. 34, p. 737-744, 2013.
- GÓMEZ-TEJEDOR, J.A, CASTRO-PALACIO, J.C, MONSORIU, J.A, **Direct Measurement Of The Speed Of Sound By Using A Microphone And A Speaker.** Physics Education. 49 (3):310-313. doi:10.1088/0031-9120/49/3/310.
- LANZ, C.B. **The Educational Impact of Smartphone Implementation in Introductory Mechanics Laboratory Classes,** Phd Thesis, NCSU, p. 1-463, 2015.
- VILELA, D.C, FREITAS-LEMES, P. GERMANO, J.E. **Estudo Comparativo Do Cálculo Do Momento De Inércia De Um Disco Sólido Entre Dados Obtidos Por Um Smartphone E Pelo Software Tracker®, XXII SNEF – 2017.**

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE INACTIVITY MOMENT OF PROFILE NACA 0012

Abstract: *This paper aims to show an experimental procedure to obtain the moment of inertia of the NACA 0012 profile. The method consists of acquiring experimental results and comparing them with the data obtained with the use of Solidworks software. The experiment was carried out in the physics laboratory of the ITA –Technological Institute of Aeronautics and is summarized in a turntable as the basis of the tests. The capture of the results of the experiment was obtained through the accelerometer of a smartphone and the use of the Labquest sensor, analyzed in the software Logger Pro.*

Key-words: *Experiment. Moment of Inertia. Wing Profile. Naca 0012.*