

Projeto e Construção de um Dinamômetro para Motores de Aeromodelos

Claudio Sakai Koseki

e-mail: claudio.koseki@gmail.com

Resumo. O presente trabalho apresenta o projeto e a construção de uma bancada de ensaios de motores – um dinamômetro – que será utilizado pela equipe de Aerodesign PoliActive no projeto de suas aeronaves radio-controladas. Além disso, serão apresentados os resultados de alguns ensaios realizados com esta bancada, utilizando-se um dos motores que equipa as aeronaves da PoliActive. Os ensaios consistiram na comparação de parâmetros de funcionamento do motor, utilizando-se de diferentes componentes.

Palavras chave: Dinamômetro, motores de combustão interna.

1. Introdução

A Poli-USP possui duas equipes de aerodesign: a PoliActive e a Keep Flying, que competem na SAE Brasil Aerodesign. A primeira, na categoria open e a segunda, na regular. Esta competição anual reúne equipes formadas por universitários do Brasil e América Latina, que projetam e constroem aeromodelos radio-controlados, de acordo com os critérios e regras estipuladas pela SAE Brasil. A competição no Brasil ocorre em São José dos Campos e a final, reúne as equipes para o mundial, nos EUA.

A categoria “Open” permite modificações no motor, o que abre a possibilidade de alterações ou troca de componentes do motor da aeronave. A equipe deseja modificar os componentes originais, de modo a reduzir o atrito entre as partes móveis. E para isto, necessita-se de um equipamento para, pelo menos, comparações entre o motor original, sem modificações e o motor modificado.

Assim, projetou-se e construiu-se um dinamômetro, baseado em células de carga, para efetuar estas comparações. O dinamômetro poderá avaliar o torque do motor e a tração que o grupo moto-propulsor (motor+hélice) produz. Os ensaios foram feitos medindo o torque e a tração, com dois diferentes combustíveis e dois tipos diferentes de hélices e combinando-se estes dois parâmetros, constituindo-se assim oito ensaios do motor.

2. Objetivos

O projeto e a construção de um dinamômetro para motores de aeromodelos e a realização de alguns ensaios para validar este dinamômetro. Não é o objetivo deste primeiro projeto a obtenção de valores e sim, apenas um comparativo do desempenho do motor utilizando-se diferentes combinações de combustível e hélice.

3. O motor

Trata-se de um motor fabricado pela empresa japonesa OS Engines [8], de 2 tempos, um cilindro, com cilindrada de 9,95 cm³ e que pode gerar até 1,9HP a 16000RPM. É movido por uma mistura de metanol, com nitro-metano e óleo lubrificante. Esta mistura pode variar.

A Tabela 1 mostra os dados do motor ensaiado:

Tabela 1 - Dados do motor ensaiado.

Motor OS Engines 0.61FX	
Cilindrada (cu.in)	0.607
Cilindrada (cc)	9,95
Faixa de operação (RPM)	2000-17000
Potência (HP)	1,90 @ 16000RPM
Diâmetro (mm)	24,0
Curso (mm)	22,0

Fonte: OS Engines [8].

4. As variáveis no funcionamento do motor

Para os ensaios, utilizou-se de duas hélices de madeira, com as seguintes especificações:

Hélice 1: 13” de diâmetro e 5” de passo.

Hélice 2: 13” de diâmetro e 8” de passo.

E dois combustíveis diferentes:

Combustível 1: Byron Fuels Aerogen Traditional, com 10% de Nitrometano, 74% de Metanol e 16% de lubrificante.

Combustível 2: Byron Fuels Race 2000, com 20% de Nitrometano, 68% de Metanol e 12% de lubrificante.

Combinando-se estes diferentes combustíveis e hélices, chegou-se a seguinte matriz de ensaio:

Tabela 2 - Matriz de ensaios.

Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Combustível 1	Combustível 1	Combustível 2	Combustível 2
Hélice 1	Hélice 2	Hélice 2	Hélice 1

Estes ensaios serão repetidos tanto na configuração de ensaio de torque (configuração 2) quanto no de tração gerada (configuração 3), de acordo com a Figura 1:

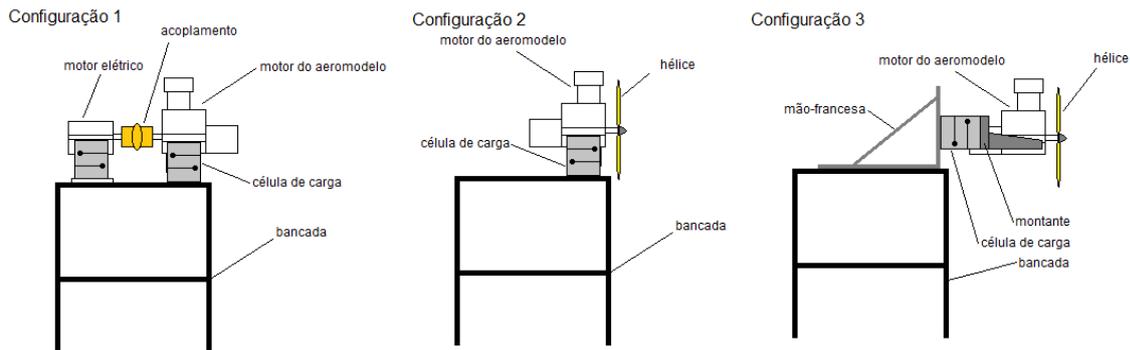


Figura 1 - Configurações da bancada

Assim, no total, teremos 8 tipos de ensaios.

5. O projeto do dinamômetro

O dinamômetro é constituído por 2 células de carga apoiadas em uma base rígida o suficiente para não sofrer os efeitos das tensões aplicadas pelo motor.

Os cálculos preliminares para determinação dos parâmetros de projeto são:

- Potências dos motor (P): 1,9HP = 1417,4 W.
- Rotação de operação (n): 15000 RPM = 39,79 rad/s
- Torque calculado do motor (T): $T=P/n = 35,63\text{Nm}$

Inicialmente, projetou-se uma célula que gerava muitos dados discrepantes e que necessitava de grande carga aplicada para que houvesse alguma medição. Iterativamente, o furo na célula era aumentado, com o objetivo de se aumentar a precisão das medidas, porém, concluiu-se que era necessário um novo projeto.

As dimensões da célula foram calculadas através do uso do software Abacus, no qual se obteve como resultado final a célula abaixo:

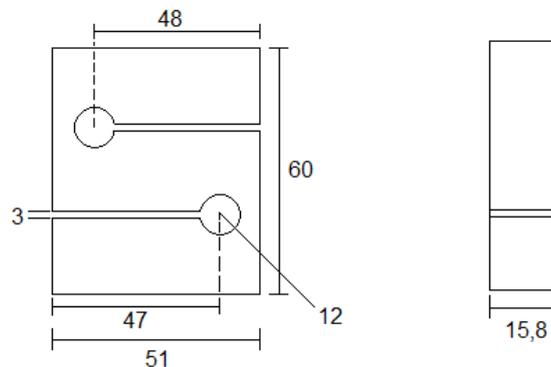


Figura 2 - Dimensões da célula de carga

Para a construção do bloco da célula de carga, utilizou-se alumínio 6063. E para constituir-se a célula de cargas, colou-se um strain-gage (extensômetro) marca Kyowa modelo KFG-5-120-C1.

A célula foi calibrada em laboratório, utilizando-se massas conhecidas e um sistema de aquisição composto de um microcomputador e um aquisitor de dados modelo ADS2000 da marca Lynx Tecnologia, dotado do módulo AD2161 conectado a um computador. Além disso, utilizou-se o software AQDados 7.0.2 para a aquisição dos sinais.

Detectou-se nestes ensaios que uma massa de 10kg não seria suficiente para deformar plasticamente a célula de cargas. Este valor, para os ensaios, está além do esperado para as forças que o motor aplica nos apoios durante o seu funcionamento.

O aspecto final do dinamômetro, na configuração 2, é mostrado na Figura 3.

6. Os ensaios

Como já mostrado na seção 4, serão ao todo, 8 tipos de ensaios no motor. 4 com o dinamômetro na configuração 2 e 4 na configuração 3.

Foi realizado um ensaio prévio, na configuração 2, no qual notou-se que ocorrem picos considerados anormais – de grande intensidade – durante os ensaios. E também, tensões residuais pós ensaio.



Figura 3 - Aspecto final do dinamômetro na configuração 2.

6.1. Primeiro ensaio (segundo os parâmetros de ensaio número 1- combustível 1 e hélice 1):

Montou-se o motor 0.61 FX na bancada. O motor foi abastecido com o combustível 10% e montado com a hélice 1. Conectou-se o sistema ao sistema aquisitor e acionou-se do modo tradicional, a frio.

A operação do motor segue alguns procedimentos, como, após a alteração de combustível e/ou hélice, deve-se afinar o motor, de modo que ele produza a maior potência possível com esta combinação. No desacionamento, deve-se acelerar o motor ao máximo e estrangular a alimentação de combustível. A aceleração máxima visa consumir todo o combustível remanescente na linha de alimentação. Estes procedimentos serão adotados em todos os ensaios.

O motor rodou por cerca de 10 segundos em baixa rotação e posteriormente aumentou-se a aceleração do motor, até a máxima possível. Verificou-se que a bancada tinha tendência de se mover, não só pelo empuxo, mas também por possivelmente pela excitação de alguma frequência natural de vibração, já que verificou-se vibrações mais intensas em determinadas faixas de operação.

O gráfico de forças do ensaio 1 foi o seguinte:

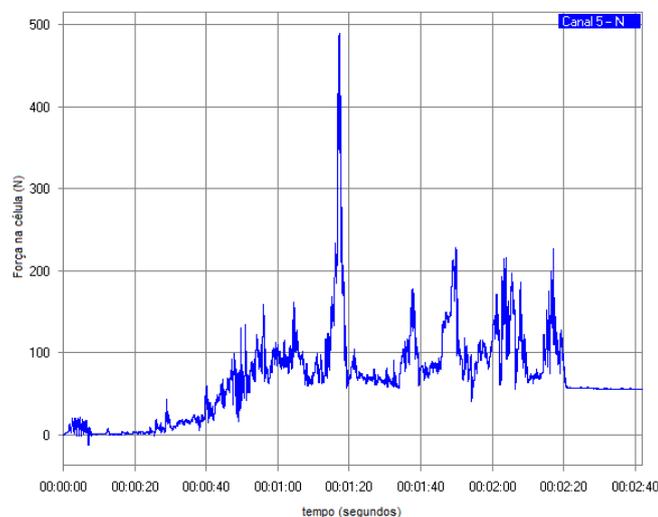


Gráfico 1 - Primeira série de ensaios.

Observa-se que por volta dos 1min15 o início de um grande pico de força, da ordem de 30N. Além disso, observa-se que após o desacionamento do motor houve uma tensão residual que no ensaio foi por volta de 5,6N.

De início, imaginou-se que houve deformação plástica na célula de carga. Medindo-se com um paquímetro a abertura das células, verificou-se que não houve deformações a ponto de serem detectadas pelo paquímetro – ou seja, da ordem de centésimos de milímetros.

Assim, cogita-se que o pico de força danificou o strain gage e as medidas ficaram prejudicadas.

6.2. Segunda série de ensaios

As células de cargas foram aferidas novamente, através da colocação de massas conhecidas, percebeu-se que as células perderam acurácia e a calibragem inicial, mas julgou-se possível prosseguir com os ensaios.

Foi feita a filmagem destes ensaios, com uma câmera Canon S3-IS e captura em 30 fps (frames per second). Foi possível verificar uma grande deformação das células, especialmente nos momentos de variação da aceleração do motor.

Decidiu-se por não zerar a medição das células, por possíveis mudanças nas medições posteriores.

Todos os motores foram levados a sua máxima aceleração durante pelo menos 10 segundos. Foi uma das condições impostas nos ensaios. Assim, considera-se que as medições com maior força na célula e que tenham duração superior a 5 segundos são as medições do motor em condição de máxima aceleração e em regime.

A seguir, os resultados e comentários dos ensaios:

6.2.1. Ensaio 1 - Hélice 1, Combustível 1

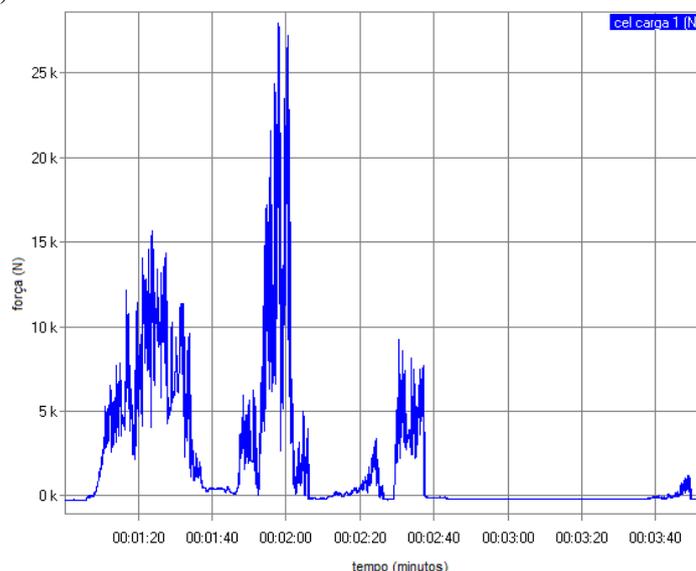


Gráfico 2 - Ensaio nº 1, na configuração 2, hélice 1 e combustível 1.

Percebe-se um grande pico de força aos 2 minutos e que tem duração de 5 segundos. Assim, não foi considerado como força em regime. No vídeo, observa-se, neste momento, uma grande deformação na célula e a bancada vibrando a ponto de se deslocar. Neste momento, chegamos a conclusão que foi excitada uma frequência de vibração do sistema.

Porém, as maiores forças – i.e. a máxima aceleração em um intervalo de tempo maior que 7 segundos acusam forças, em média, de 11kN.

No pico, há a medição de uma força de 28,0k.

6.2.2. Ensaio 2 - Hélice 2, Combustível 1

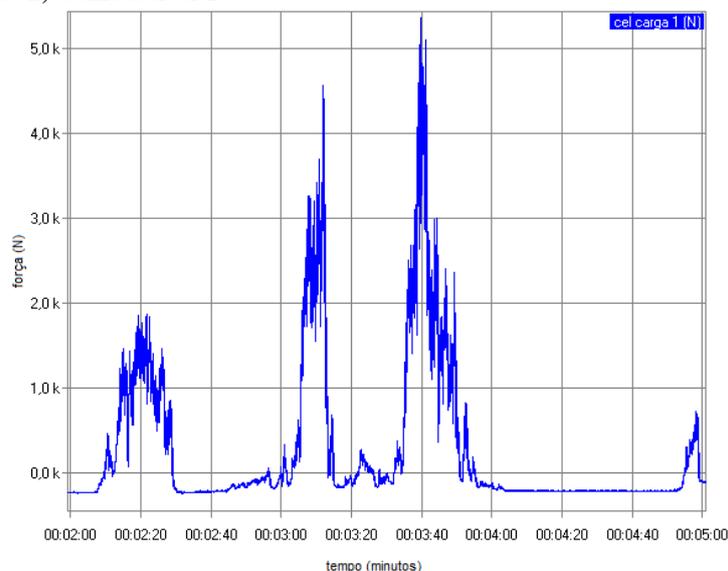


Gráfico 3 – Ensaio nº 2, na configuração 2, hélice 2 e combustível 1

O gráfico mostra também outro perfil com picos de força, porém de menor intensidade. Durante o ensaio, notou-se que o motor possuía maior vibração e que a tração produzida pelo grupo moto-propulsor era menor.

A força nas células foi, no primeiro pico, de 1,5kN e no segundo (por volta de 3:10) de 3kN. No terceiro, temos por volta de 2,5kN, com um pico de 5,3kN – que foi a máxima força.

Logo, percebe-se a hélice 2 produz uma menor tração em relação a hélice 1.

6.2.3. Ensaio 3 – Hélice 2, Combustível 2

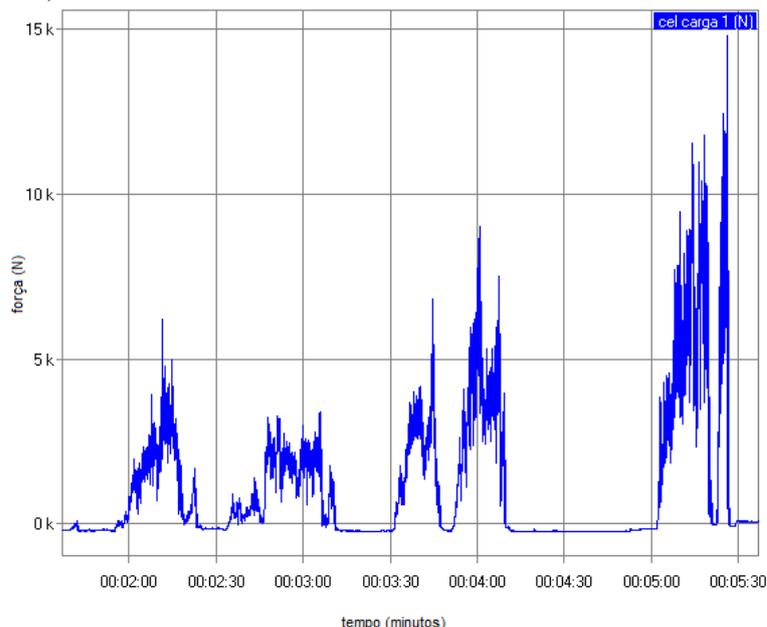


Gráfico 4 - Ensaio n°3, na configuração 2, hélice 2 e combustível 2.

Variando-se o combustível, a célula conseguiu capturar variação no funcionamento do motor. Os resultados são superiores aos do segundo ensaio, comprovando que uma menor quantidade de lubrificante e maior quantidade de nitro-metano no combustível promove um melhor funcionamento do motor, gerando maior potência.

A maior força capturada foi de 14,8kN, sendo a ,média de força em regime de máxima aceleração, de 8kN

6.2.4. Ensaio 4 – Hélice 1, Combustível 2

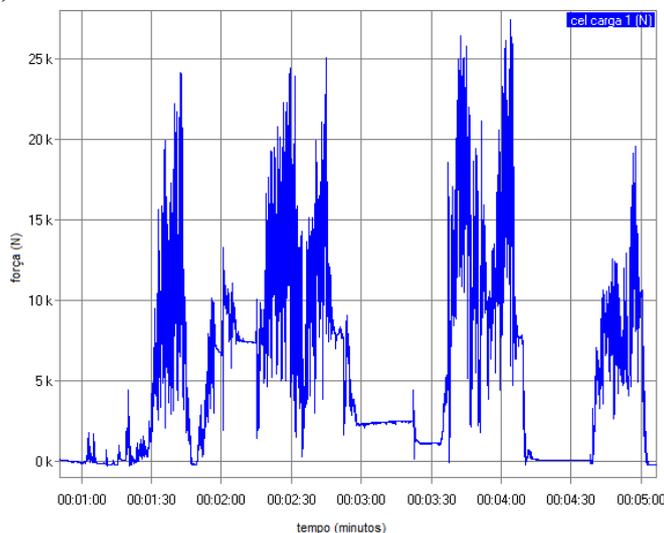


Gráfico 5 – Ensaio n°4, na configuração 2, hélice 1 e combustível 2.

No ensaio com a hélice 1 e o combustível 2, combina-se a maior força medida com a maior média de força na célula.

A maior força medida é de 27,4kN e a maior média, considerando-se os critérios previamente definidos, foi da ordem de 17,5kN, observadas em 2min30s e 3min30s.

6.2.5. Análise e comentários da segunda série de ensaios

Percebeu-se que as células conseguiram capturar mudanças nas medições, ao se variar as hélices e o combustível, porém, julgou-se que os valores não são confiáveis, dados os resultados bastante discrepantes em relação ao primeiro ensaio – no qual testou-se o mesmo motor com a hélice e combustível 1.

O ensaio 1 forneceu a maior força, individual, porém, o ensaio 4 forneceu o maior valor de força de tração em regime. Os dois resultados foram obtidos com a hélice 1, o que mostra que esta hélice faz o conjunto moto-propulsor ter mais torque. E em relação ao combustível, o combustível 2 mostrou-se mais adequado, por fazer o motor ter o maior torque entre os 4 ensaios.

Após o último ensaio desta série, durante a desmontagem da hélice, com apenas uma pequena força, as células deformaram-se plasticamente. Assim, tornaram-se inutilizáveis.

Uma das hipóteses para tal ocorrência é fadiga cíclica, já que as deformações eram bastante grandes. A outra hipótese é a de encruamento do alumínio, o que o fragilizou.

Pela possível repetição deste fenômeno, decidiu-se então alterar o ensaio, passando a medir a tração do conjunto moto-propulsor.

A síntese deste ensaio, é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 - Síntese dos resultados da segunda série de ensaios.

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Maior força (pico)	28kN	5,3kN	14,8kN	27,4kN
Maior força (média)	11kN	2,5kN	8kN	17,5kN
Descalibração	0kN	-0,210kN	-0,150kN	0,115kN

A ordem de grandeza da descálbiação é 10 vezes menor que a ordem de grandeza dos valores obtidos, assim, estes resultados ainda podem ser considerados como válidos.

6.3. Terceira série de ensaios

Para a terceira série de ensaios, foi necessária uma alteração na bancada. As células, antes fixadas diretamente na bancada, agora são fixadas através de mãos-francesas. Além disso, agora elas sustentam o motor, pelo montante do motor – que é o mesmo utilizado pela aeronave. A configuração da bancada é apresentada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Assim, a bancada passará a medir as cargas de tração que o conjunto moto-propulsor aplica.

6.3.1. Calibração das células

Para a nova série de ensaios, realizou-se uma nova calibração. Em relação aos ensaios anteriores, a calibração do aquisitor era 1,6 vezes menores que o real. Para esta calibração, tracionou-se a célula, com ela na posição vertical, aplicando-se massas conhecidas, como mostrado na Figura 5.

Porém, percebeu-se que a calibração estava errada após a execução dos ensaios. Logo, os valores dos gráficos nesta série de ensaios não foram corrigidos, porém os valores apresentados nas análises já estarão multiplicados por este fator 1,6.

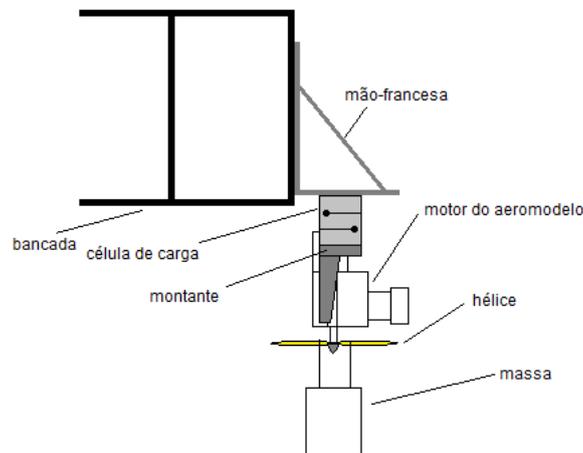


Figura 5 - Esquema da calibração das células para a terceira série de ensaios

6.3.2. Ensaio

Os ensaios desta série seguiram os mesmos parâmetros dos demais ensaios, ou seja, variando-se as mesmas hélices e combustíveis.

Efetua-se os 4 ensaios propostos, na configuração 3, seguindo-se o seguinte roteiro:

- Ajusta-se o motor, para o combustível e a hélice ensaiados.
- Coloca-se o motor em ponto morto.
- A cada 20 segundos, aproximadamente, aumenta-se a aceleração em 25%.
- Atingido-se o máximo, a aceleração é reduzida em 25%.
- Ao final, varia-se a aceleração de "idle" ou marcha-lenta para a máxima em pequenos intervalos.
- Para o corte do motor, acelera-se ao máximo e estrangula-se a tubulação de combustível, de modo a consumir o combustível remanescente na linha de alimentação.



Figura 4 - Dinamômetro na configuração 3.

6.3.2.1. Ensaio 1 - Hélice 1, Combustível 1

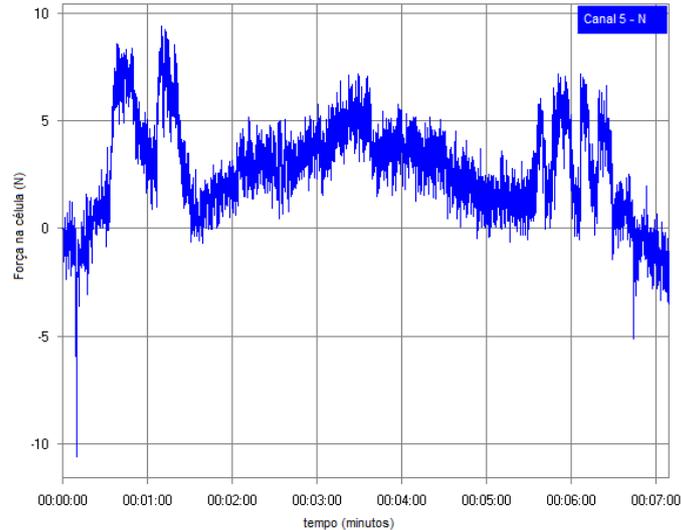


Gráfico 6 - Resultado de ensaio motor 0.61FX, hélice 1, combustível 1.

De início, percebe-se que os valores das forças são bastante diferentes em relação aos da segunda série de ensaios. Percebem-se dois picos iniciais, da afinação do motor. Como força máxima, atinge-se 17,01N de empuxo. Durante a afinação, a média das forças, foi de 11,78N no primeiro pico e 10,78N no segundo pico.

Força na célula, com a carga plena do motor: 8,24N em média – por volta dos 3min30s.

6.3.2.2. Ensaio 2 - Hélice 2, Combustível 1

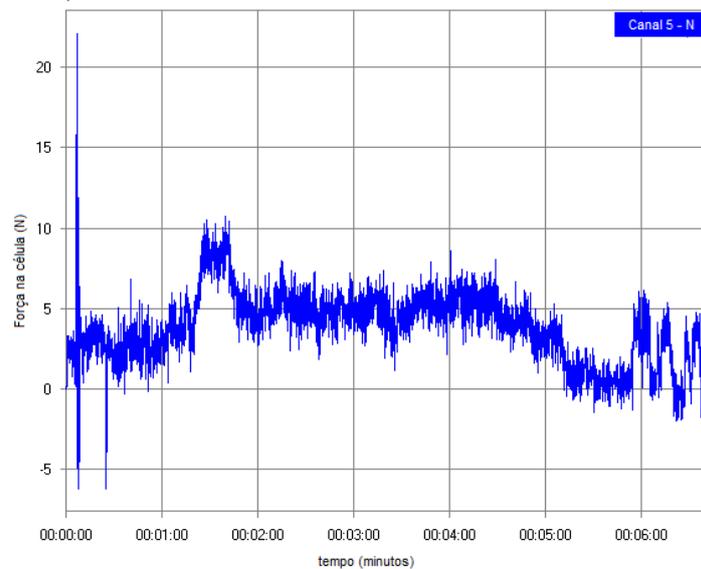


Gráfico 7 - Resultado de ensaio motor 0.61FX, hélice 2, combustível 1.

Verifica-se que o ensaio partiu com a célula acusando uma força de 4N.

Apesar de seguir o roteiro proposto, a menos do pico de força aos 1min30s e aos 6min00s, não houve grandes picos de empuxo do grupo moto-propulsor. Considerou-se um pico de aceleração aos 4min00s com duração de cerca de 30 segundos

Assim, analisando-se o pico dos 1min30s, tem-se uma força máxima de 16,48N e em média 13,15N.

Já no pico dos 4min00s – 4min30s observa-se um máximo de 12,80N e uma média de 8,64N,

6.3.2.3. Ensaio 3 - Hélice 2, Combustível 2

A célula partiu acusando uma tensão de 12,8N.

A média da carga em máxima aceleração foi de 23,84N, em 5min10s. Porém, a maior força medida foi de 43,84N, logo no início da medição.

Em plena carga (máxima aceleração do motor, mantida constante), de 3min05s a 3,min25s, a força foi de 24N.

Todos estes valores não foram subtraídos da força inicialmente apontada.

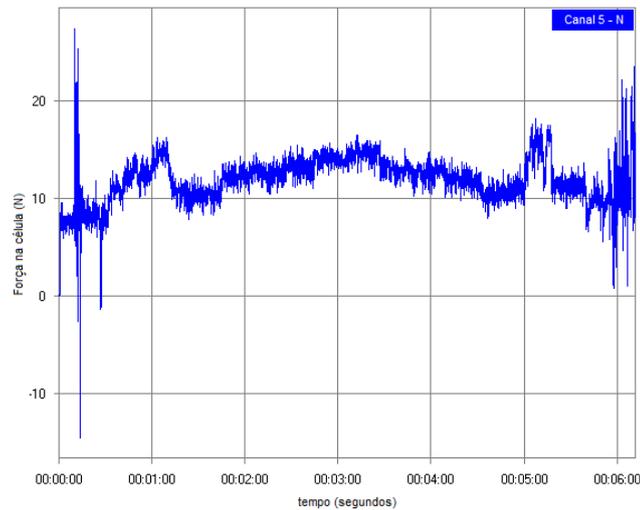


Gráfico 8 - Resultado de ensaio motor 0.61FX, hélice 2, combustível 2.

6.3.2.4. Ensaio 4 - Hélice 1, Combustível 2

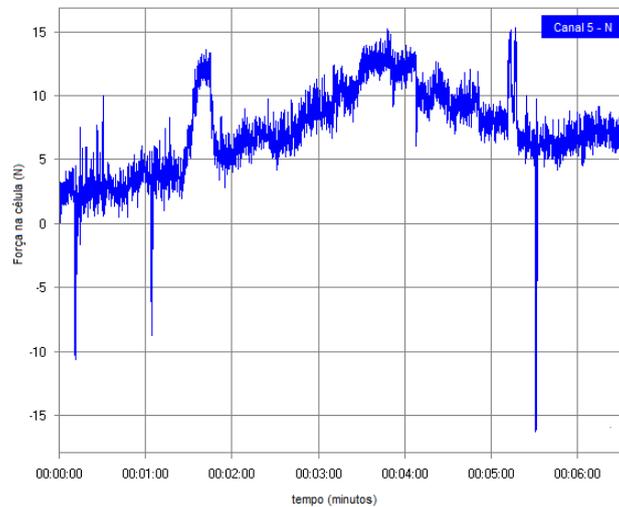


Gráfico 9 - Resultado de ensaio motor 0.61FX, hélice 1, combustível 2

A célula não partiu do zero, partindo-se com carga de aproximadamente 4N.

Pico de máxima aceleração em regime do motor atingido aos 3min35s, com intensidade de aproximadamente 20,4N. A máxima força medida foi de 26,16N.

Após o corte do motor, houve uma tensão residual de aproximadamente 11,2N.

Este foi o ensaio com maior força de tração média, mantendo-se o motor em máxima aceleração.

Análises e comentários da terceira série de ensaios:

Tabela 4 - Síntese dos resultados da terceira série de ensaios.

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Máxima força (pico)	17,01N	16,48N	43,84N	26,08N
Máxima força (média)	8,24N	13,15N	23,84N	20,43N
Descalibragem	0N	4N	12,8N	4,8N

Como citado no início desta seção, foi necessária uma nova calibração. Esta foi feita pendurando-se massas conhecidas de forma a se tracionar a célula. Verificou-se que a calibração até então utilizada estava com um erro de 1,6 em relação aos valores reais. Assim, todos os valores nesta série de ensaios, foram corrigidos.

Os valores apresentados na

Tabela 4 não foram modificados em decorrência das descalibrações e das tensões residuais. Abaixo seguem os valores corrigidos, descontando-se a descalibragem inicial.

Tabela 5 - Resultados corrigidos da terceira série de ensaios

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Máxima força (pico)	17,01N	12,48N	31,04N	21,28
Máxima força (média)	8,24N	9,15N	11,04N	15,63N
Descalibragem considerada	0N	4N	12,8N	4,8N

Assim, é possível observar que o conjunto hélice 1 e combustível 2 é o que produz os melhores resultados com relação ao empuxo gerado pelo grupo moto-propulsor.

E pode-se observar que também nesta série de ensaios o dinamômetro capturou diferenças nos parâmetros de funcionamento do motor, quando rodando com hélices e combustíveis diferentes.

7. Conclusão

De início, avaliou-se com grande erro a avaliação das deformações na célula. A carga imposta na célula original sequer foi detectada pelo aquisitor, significando que a deformação causada era muito pequena. Através de processos iterativos, chegou-se a conclusão que as deformações eram muito pequenas, mesmo aumentando-se o furo na célula, o que levou ao re-projeto da célula e a confecção de uma menos robusta que a originalmente projetada.

Com o novo projeto, as deformações produzidas foram grandes o suficiente para serem detectadas pelo aquisitor, o que permitiu inclusive uma melhor calibragem, obtendo-se resultados bastante próximos da realidade. Assim, viabilizou-se o projeto do dinamômetro.

Da experiência de se fazer a célula de carga nas oficinas, valeu pela aquisição de conhecimentos de fabricação mecânica, porém, os prazos para construção foram muito altos.

A primeira medição do dinamômetro não foi satisfatória, pelo fato de haver uma tensão residual após o ensaio. Apesar disto, prosseguiu-se com o ensaio e verificou-se que o dinamômetro é capaz de medir variações no funcionamento do motor, ao se alterar algum componente de funcionamento do grupo moto-propulsor, no caso do projeto, o combustível e a hélice.

Sendo possível esta medição com os presentes equipamentos, conclui-se que o projeto atende aos requisitos da equipe, sendo possível a avaliação de alterações de componentes e mesmo, comparação entre os diferentes tipos de combustíveis e de hélices. E permite ainda uma comparação entre os motores disponíveis.

Resultado final, na tabela 6, lembrando que os valores são apenas para referência de comparação e não valores reais.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios

Ensaio de Torque				
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Maior força (pico)	28kN	5,3kN	14,8kN	27,4kN
Maior força (média)	11kN	2,5kN	8kN	17,5kN
Descalibração	0kN	-0,210kN	-0,150kN	0,115kN
Ensaio de Tração				
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Máxima força (pico)	15,68N	13,87N	27,41N	22,16N
Máxima força (média)	8,35N	9,70N	14,4N	16,4N
Descalibragem considerada	0N	4N	14,4N	4N

8. Referências

- [1] ETSION, I.; HALPERIN, G. Analytical and Experimental Investigation of Laser-Textured Mechanical Seal Faces. 1999. 6 páginas. ASME/SLTE Tribology Conference, Toronto, Canadá.
- [2] GARCIA, O. & BRUNETTI, F., Motores de Combustão Interna, 1989.
- [3] RONEN A., ETSION, I. KLIGERMAN, Y. Friction-Reducing Surface-Texturing in Reciprocating automotive Components. 2001, 8 páginas. 56th Annual Meeting. Orlando, FL, Estados Unidos da América
- [4] RYK, G. KLIGERMAN, Y. ETSION, I. Experimental Investigation of Laser Surface Texturing for Reciprocating Automotive Components, 2002, 6 páginas. 57th annual meeting, Houston, TX, Estados Unidos da América.
- [5] Handbook of Thin Film Deposition – Processes and Technologies – 2^a Edição – Noyes Publications, 2002, Norwich, EUA.
- [6] Byron Fuels – The world leader <<http://www.byronfuels.com/pages/products.html> - acesso em 31/05/2010>.
- [7] Magna Pro – Nitrometano - <<http://www.nitrometano.com.br/>> - acessado em 23/04/2010.
- [8] OS Engines – Home Page.<www.osengines.com>. Acesso em 25/03/2010.

9. Bibliografia

- SONNTAG, R.E., BORGNACKE, C., VAN WYLEN, G.J. Fundamentos da Termodinâmica, 6^a, Edgar Blucher, SP, 2003.576 p.
- TAYLOR, CHARLES F. “Análise dos motores de combustão interna”, volumes 1 e 2, tradução de Mauro Ormeu Cardoso Amorelli, Editora Edgard Blucher, São Paulo, 1976.