

MÁQUINA DE TESTES DE FADIGA MECÂNICA POR FLEXÃO ROTATIVA

Aluno: Rodrigo de Moura Nogueira
Orientador: Marco Antonio Meggiolaro

Introdução

Os produtos com função estrutural devem manter-se íntegros durante toda a sua vida útil, isto é, devem suportar os carregamentos de teste e de trabalho, operando confiável, previsível e repetitivamente. Para atingir estes objetivos, na prática da Engenharia é indispensável efetuar periodicamente Avaliações de Integridade Estrutural (AIE) e Previsões de Vida Residual (PVR).

A maioria das falhas mecânicas súbitas que ocorrem na prática é causada por fadiga, uma falha mecânica caracterizada pela geração e/ou propagação de uma trinca, ocasionada primariamente pela aplicação repetida de carregamentos variáveis sobre a peça. A geração e a propagação da trinca são fenômenos progressivos e altamente localizados, que não provocam sintomas globais evidentes na estrutura, e que por isto podem gerar consequências catastróficas sem aviso prévio. Para se obterem resultados experimentais confiáveis no projeto que mensura a fadiga, é fundamental a utilização de máquinas de ensaios mecânicos. Como o custo de máquinas de ensaios comerciais é muito elevado, é de interesse projetar e construir sistemas similares com orçamento reduzido, para uso acadêmico e em pesquisa. Em particular, testes de flexão rotativa são essenciais para prever o comportamento dos materiais sob essas cargas repetidas durante longo tempo.

Teoria de operação:

Baseada no princípio de um eixo giratório, essa teoria utiliza um corpo de prova que funciona como uma viga simples sofrendo carregamento simétrico em dois pontos. Quando girado metade da revolução, as tensões nas fibras originalmente abaixo da linha neutra são revertidas de tração para compressão e vice-versa. Ao completar a revolução, as tensões são novamente revertidas para que, durante uma revolução, o corpo de prova passe por um ciclo completo de esforço fletor (tração e compressão).

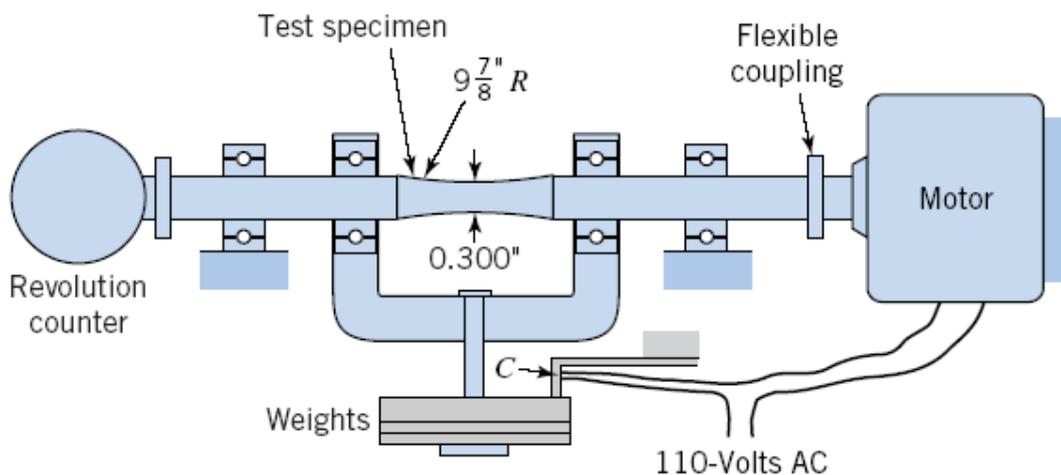


Figura 1: Esquema de funcionamento da máquina de R.R. Moore de flexão rotativa.

Após grande número de revoluções, informado por um contador, a amostra sofre ruptura em função da fadiga, sendo possível traçar uma curva de limite de fadiga em tensão de flexão rotativa em função do número de ciclos, denominada curva S-N. Os aços possuem um limite de tensão fletora abaixo do qual o número de ciclos antes da ruptura é indefinido, é muito grande, como ocorre abaixo de 300 MPa para o aço 1045. Para os alumínio não vemos tal comportamento linear, temos a curva característica abaixo:

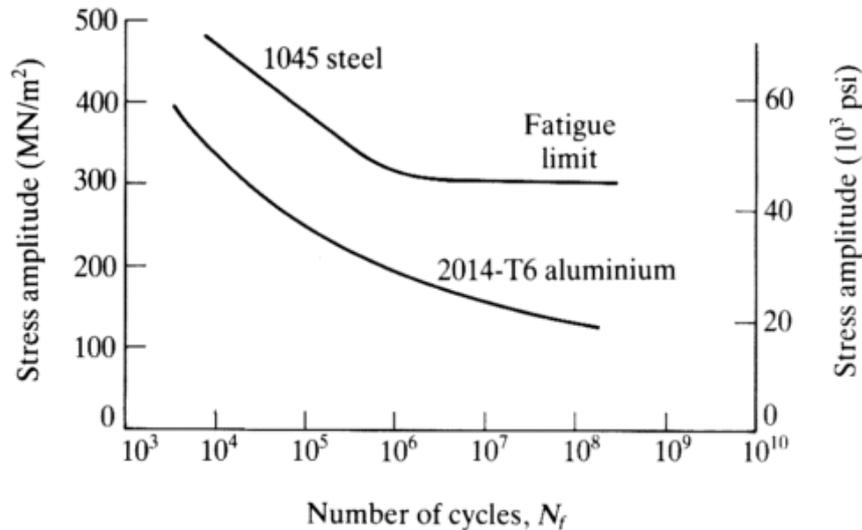


Figura 2: Curvas S-N de dois materiais distintos, aço 1045 e alumínio 2014-T6

Sistemas existentes no mercado

A máquina padrão de testes de fadiga para obtenção de curvas S-N de materiais é a R.R. Moore, modelo que segue as normas DIN 50113 e ISO 1143. Uma das empresas mais renomadas na área de ensaios mecânicos é a americana INSTRON®, que oferece a máquina da figura 3, abaixo. Especificações de teste do modelo RRM-A2:



▲ R. R. Moore rotating beam fatigue testing system

Máquina R.R.Moore INSTRON	
<i>Capacidade de momento fletor (Kg.m)</i>	0.25-2.3
<i>Incrementos de capacidade (Kg.m)</i>	0.00254
<i>Velocidade de rotação (rpm)</i>	500- 10.000
<i>Conjunto de pesos para carga (Kg)</i>	(7) 5, (2) 2, (1) 1, (1) 0.5, (1) 0.2, (2) 0.1, (2) 0.05
<i>Peso mínimo efetivo (Kg)</i>	5
<i>Peso da máquina (Kg)</i>	41
<i>Dimensões totais (mm)</i>	990 × 330 × 510
<i>Alimentação de energia</i>	100 – 120 V 50/60 Hz

Objetivos

O objetivo deste trabalho foi projetar e construir uma máquina de flexão rotativa para ensaios de alto ciclo, incluindo concepção, projeto em ferramenta de CAD, e construção. A máquina é capaz de exercer forças de flexão em um corpo de prova girando em alta rotação, até 20.000 rpm, para testar o comportamento dos materiais submetidos a cargas prolongadas de flexão rotativa. O propósito principal é poder fazer tais testes com um custo menor que o das máquinas existentes no mercado, como por exemplo a Instron®, que custa em torno de \$15.000 e, além disso, incorporando aperfeiçoamentos técnicos importantes.

Metodologia

O desenvolvimento deste trabalho foi dividido nas seguintes etapas:

1. Revisão bibliográfica da teoria de testes S-N de fadiga e das principais máquinas de teste S-N existentes, de modo a determinar as características que poderiam ser melhoradas ou simplificadas em relação aos equipamentos atuais.
2. Projeto dos componentes e peças mecânicas do sistema.
3. Especificação da eletrônica de potência e de controle da máquina.
4. Testes
5. Planejamento de melhorias futuras.

1. Características do sistema

O primeiro ponto que se decidiu mudar foi o sistema de carregamento do corpo de prova, passando de pesos em uma haste em balanço, como na máquina R.R.Moore da Instron®, para um sistema de motorreductor que exerce o esforço através de um cabo de aço enrolado em uma polia. A grande vantagem deste tipo de carregamento é a possibilidade de variação do mesmo ao longo do tempo, ao invés de esforços constantes ou variados discretamente em intervalos largos, como no sistema de pesos. Realizando um controle de torque do motor elétrico podem-se exercer carregamentos muito mais próximos de cargas reais de serviço, esforços aos quais são submetidos eixos de máquinas, aviões, trens, etc.

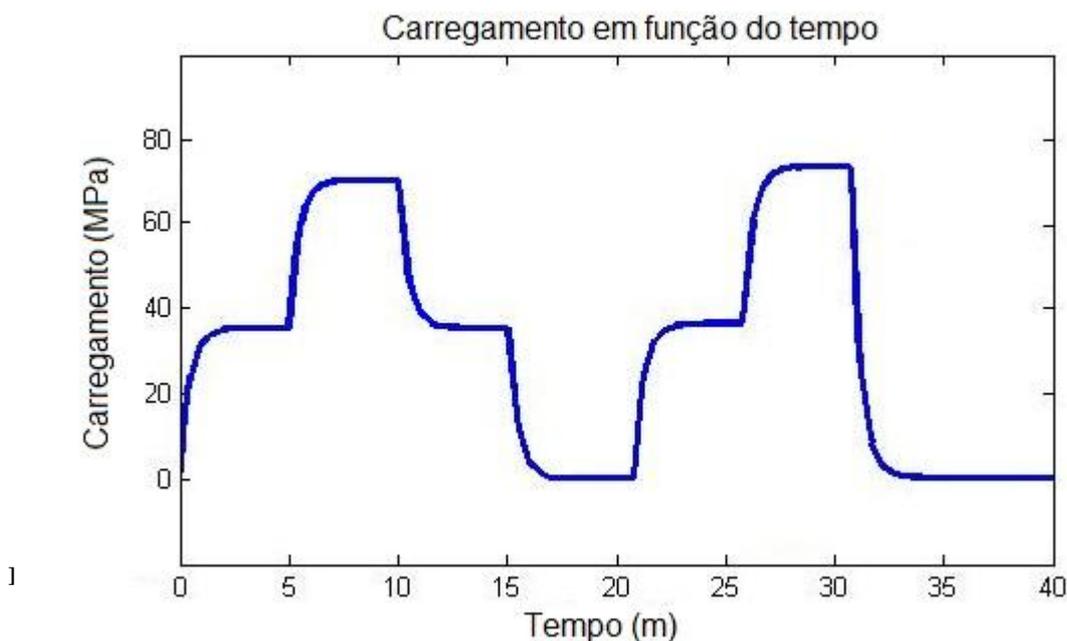


Figura 4: Exemplo de carregamento variável, mais próximo de uma aplicação real.

2. Projeto da máquina

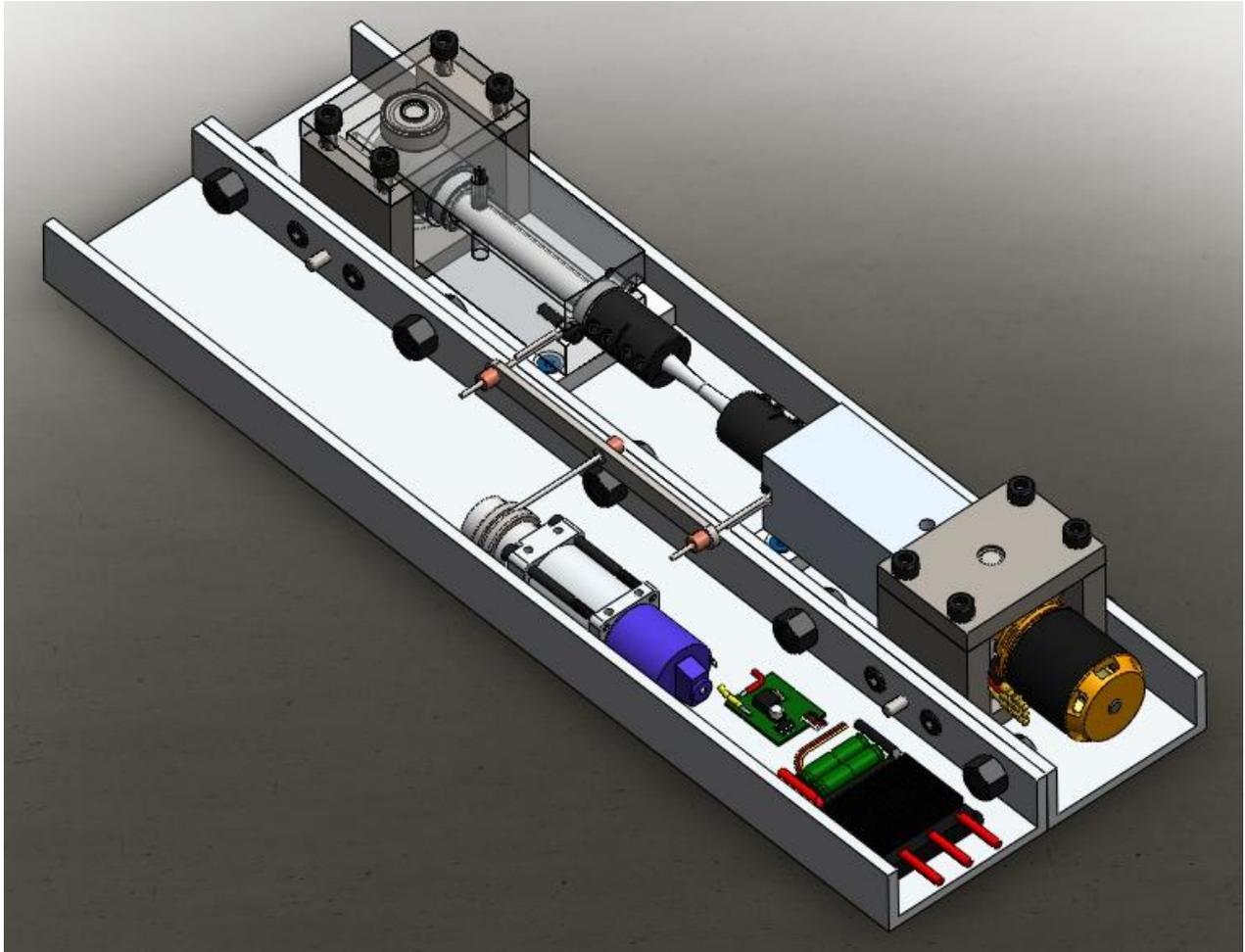


Figura 5: Projeto completo no programa de CAD DS SolidWorks.

O SolidWorks® foi uma ferramenta essencial para o planejamento da disposição dos componentes mecânicos, assim como para o projeto e geração dos desenhos de fabricação das peças as serem usinadas. Foi utilizado também para realizar simulações de esforços em componentes críticos, como o corpo de prova e a barra de tração.

A máquina é completamente modular e desmontável. Há um perfil U de alumínio 6063 que suporta os blocos rolamentados e o eixo principal, com o motor brushless acoplado, e outro perfil idêntico ao lado para o motor de tração e eletrônicas de controle.

2.1 Estrutura

A estrutura da máquina consiste essencialmente de 2 blocos de alumínio rolamentados que suportam eixos, e nestes se prende o corpo de prova por meio de colares acopladores de 1/2" para 3/8". Esse conjunto de eixos é unido diretamente a um motor brushless outrunner, responsável por girar essas peças em alta rotação, para gerar muitos ciclos completos de fadiga em pouco tempo de ensaio.

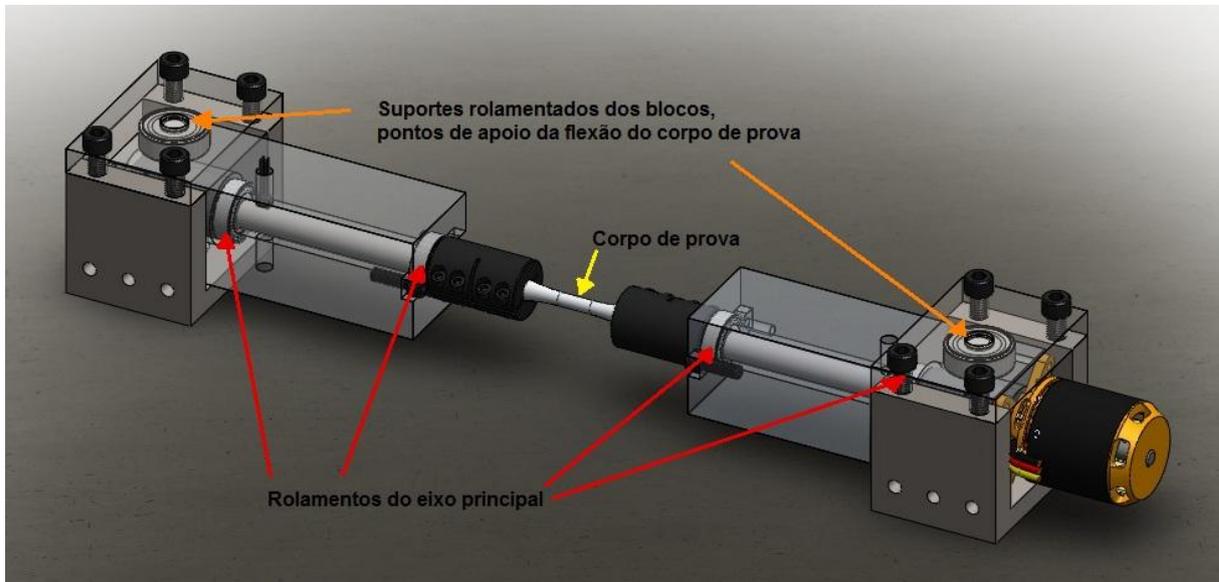


Figura 6: Componentes do corpo principal da máquina.

Os dois blocos principais são presos por pinos rolamentados na estrutura da máquina, permitindo que girem livremente em torno desses eixos perpendiculares ao eixo principal, o do corpo de prova. Aplica-se uma força lateral que provoca um momento fletor na amostra, e a cada meia volta que ela completa, os esforços na sua seção central se invertem, de tração para compressão, e vice-versa, vide figura 7.

Realizando testes de torque máximo no laboratório, concluímos que o motorreductor que traciona o corpo de prova consegue gerar um momento máximo de 0.75 N.m ou 50Kgf no cabo de aço que exerce o esforço, já que o raio da polia é de 15mm. Para testar se essa força seria suficiente para gerar fadiga no corpo de prova, utilizamos a simulação abaixo no solidworks para saber quanto este iria fletir, dado o momento fletor que lhe seria aplicado.

Sendo conhecidos a distância entre o apoio rolamentado do bloco suporte do eixo até o ponto de aplicação da força, e o valor desta, podemos calcular o momento fletor que atua sobre o corpo de prova: $M = r \times F = 0.13m \times 245.25 = 31.88 \text{ N.m}$

Utilizando esse dado foi criada uma simulação no SolidWorks com dois momentos de 32 N.m, um em cada lado do corpo de prova, que o fletiram mais de 2.5mm em relação ao centro. Com isso tivemos boas indicações de que a força do motor seria suficiente para a carga desejada. Ao montarmos a máquina na prática, realizamos o teste de exercer a força máxima com a a rotação principal desligada, e conseguimos deformar plasticamente (fletir mais de 60°) um corpo de prova de 3/8" de aço inox 304, muito mais resistente que os que serão testados normalmente, cuja seção menor será sempre de 1/4". Como a deformação elástica é suficiente para testes de fadiga, nossa especificação de motor provou-se correta.

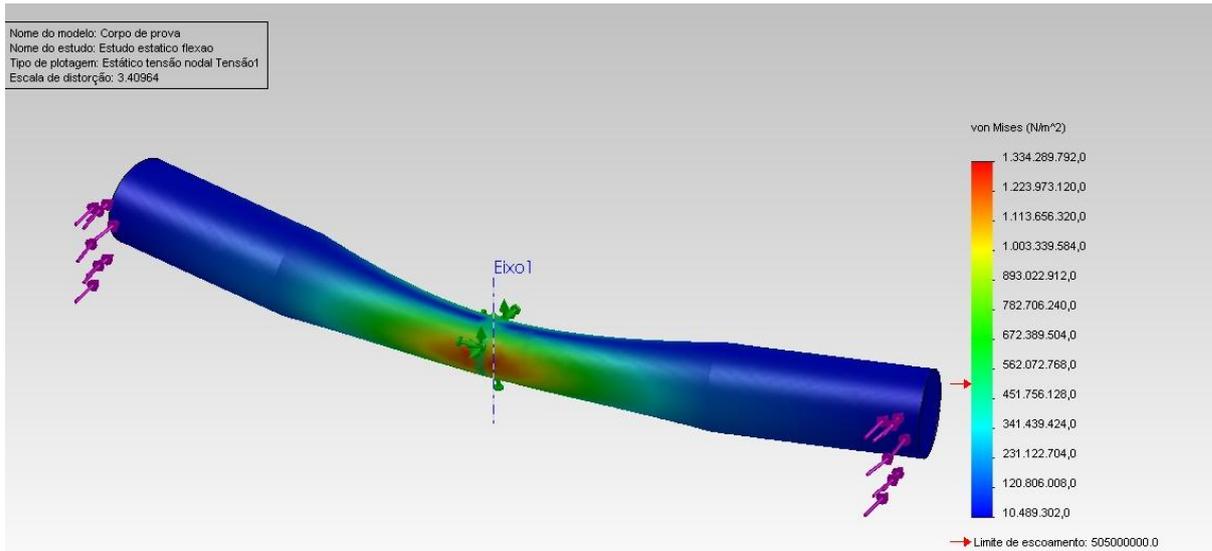


Figura 7: Simulação representativa da flexão do corpo de prova, com a região de maior tensão no centro da seção de análise, em vermelho e amarelo.

A força lateral que gera a flexão é feita por um motorreductor composto de um motor DC Integy Matrix Pro Lathe 55T e uma caixa de redução P60 256:1 planetária de 4 estágios, como vemos na figura 8. Como o kv do motor é de 2.000 rpm/V e a tensão máxima aplicada nele é 12V, sua velocidade máxima será 24.000 rpm. O eixo de saída da redução gira, portanto, a 93.75 rpm no máximo, ou 1.56 rps, velocidade grande o suficiente para mudanças bruscas no carregamento aplicado, caso sejam necessárias.

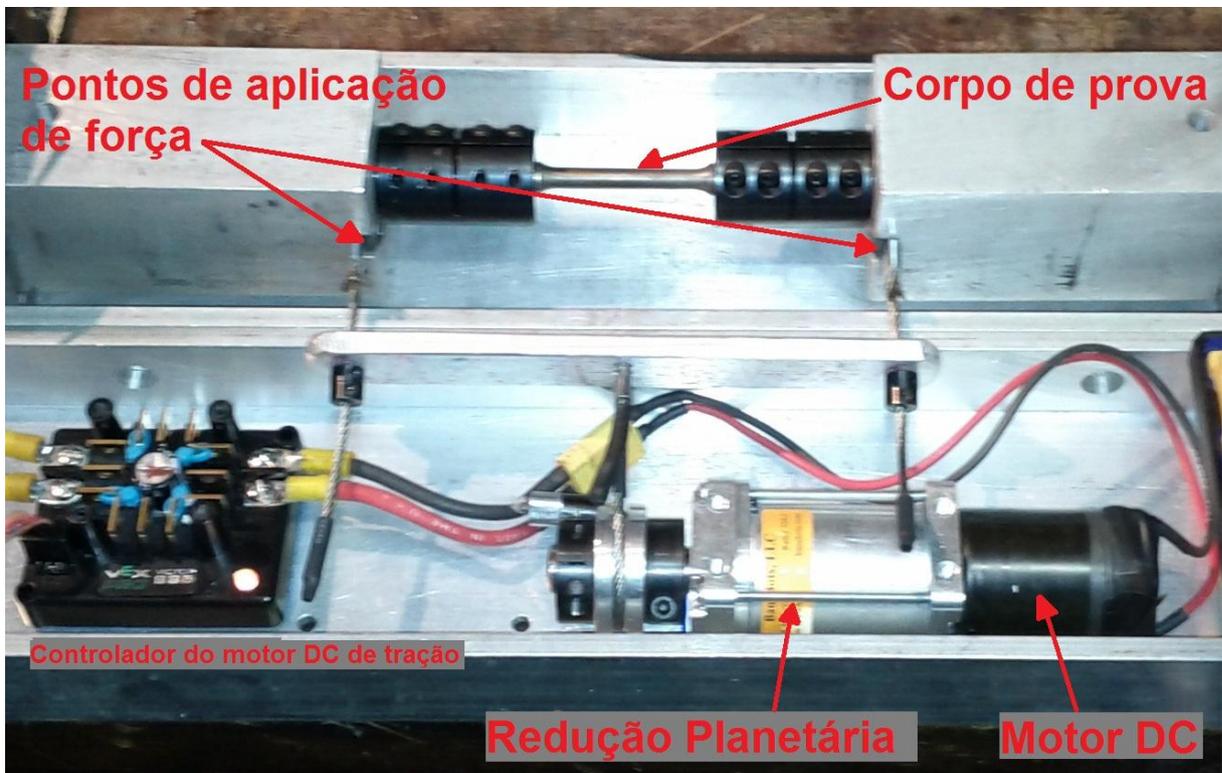


Figura 8: Motorreductor, composto do motor Integy 55T e redução planetária P60 256:1, acoplados por meio de cabos de aço, uma barra de tração e uma polia de forma a exercer o momento fletor no corpo de prova. Ao lado vemos o controlador do motor, o IFI Victor 884.

2.2 Detalhes do projeto mecânico

- Quando ocorre a mudança do ângulo dos blocos que suportam o eixo devido à aplicação do momento fletor, a distância entre os acopladores aumenta ligeiramente, gerando um esforço parasita de tração no corpo de prova, que poderia alterar os resultados desejados. Esse problema foi resolvido com uma folga de 1 a 2mm entre o colar interno ao bloco que não possui motor e a parede do mesmo, permitindo assim um deslizamento axial do conjunto (colar - eixo - colar - corpo de prova), neutralizando essa carga não pertencente ao objetivo e mantendo inalterado o momento aplicado.

- Foram utilizados rolamentos auto-compensadores nos pinos de apoio para neutralizar qualquer força cisalhante gerada por um desalinhamento dos eixos, proveniente da tolerância da usinagem das peças.



- Outra vantagem da aplicação de força ser feita por um motor e não por massas calibradas é que não há necessidade de uma mesa furada para passagem da haste que suporta esses pesos, bastando prender a máquina na mesa com grampos C ou parafusos.

- A barra de tração, onde a força do motor se divide em dois esforços simétricos aplicados sobre os blocos rolamentados de alumínio, será ao mesmo tempo o sensor de força da máquina. Serão colados nela dois *strain-gauges* que medirão sua deformação, a partir da qual um microcontrolador calculará a força aplicada. Por isso esta barra deve ter uma alta resiliência, ou seja, suportar grande esforço de flexão antes de se deformar plasticamente, o que, caso acontecesse, iria interferir na medição e danificá-la permanentemente. Assim, materiais possíveis são aço-mola 5160, titânio grau 5 (6Al-4V), ou alumínio aeronáutico 7075, que possui módulo de elasticidade bem mais baixo, mas boa resiliência, bastando assim utilizarmos uma barra mais espessa, resolvendo o problema com um material mais barato e de muito mais fácil usinagem.

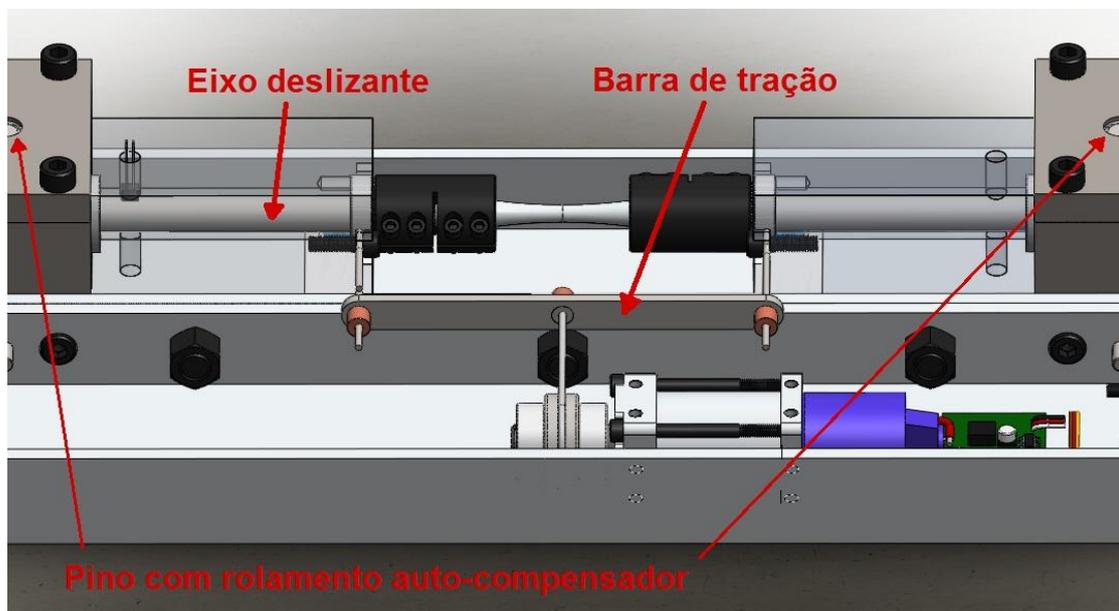


Figura 9: Esquema ilustrativo das observações citadas acima.

3. Motores, eletrônica de potência e de controle

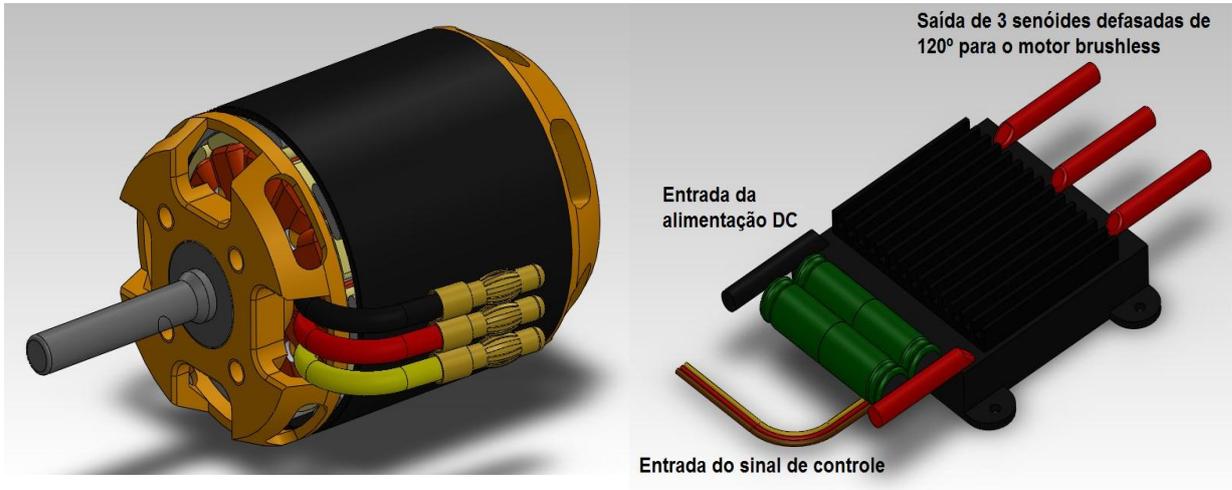
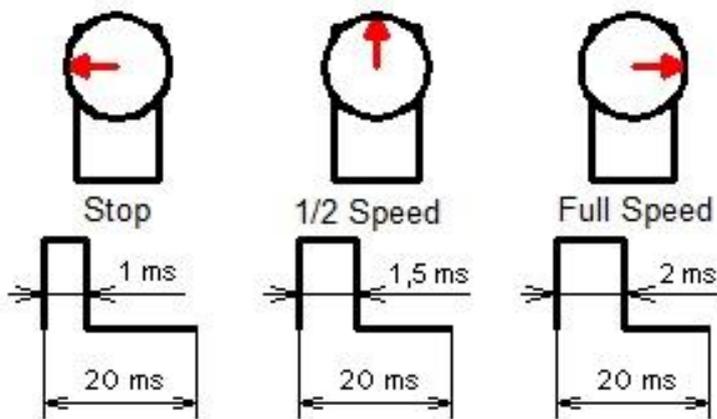


Figura 10: Motor Scorpion HK-4035-530kv

Figura 11: BESC HET 100A-HV

3.1 Motor da rotação principal

O motor Scorpion HK-4035-530kv é capaz de girar o conjunto em velocidade angular estável entre 250 e 20.000 rpm, sendo necessários 25A a 42V DC (>1KW) de alimentação para tal. O controle de velocidade do motor é feito através de um BESC (Brushless Electronic Speed Control), que transforma a corrente contínua de uma fonte DC em 3 tensões senoidais defasadas de 120°, que alimentam o motor brushless. Um testador de servo Turnigy é utilizado para mandar o sinal de controle para o BESC, um PWM de período 20ms e largura de pulso variável de 1 a 2ms. Quando o pulso é de 1ms, o motor está parado. Aumentando-se essa largura, o motor parte e começa a acelerar até a velocidade máxima de mais de 20.000 rpm, quando o pulso chega a 2ms. Essa regulação é feita manualmente através do potenciômetro do testador de servo, mas pode ser feita automaticamente por um microcontrolador, como será descrito mais à frente.

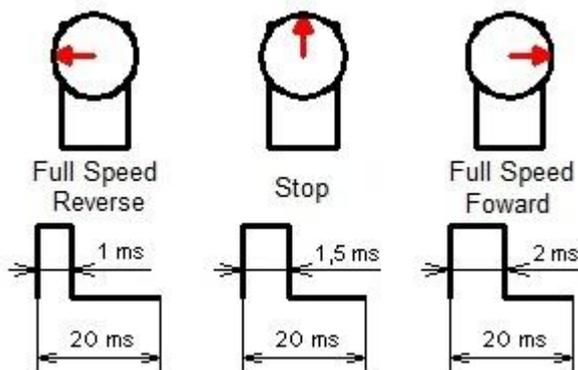


Figuras 12 e 13: Sinal de controle PWM sentido único, gerado pelo testador de servo Turnigy.

3.2 Motor de tração

Para o controle do motor de tração foi utilizado outro tipo de ESC, já que o motor é *brushed*, possui escovas, portanto funciona com corrente contínua. O motor Integy Matrix Pro Lathe 55T é controlado por um IFI Victor 884 speed controller, que aguenta 60A contínuos e 24V, valores muito acima dos que são utilizados, por segurança.

O controlador Victor é reversível, podendo girar o motor para os dois lados, aumentando ou diminuindo o esforço aplicado sobre o corpo de prova. Outro testador de servo, idêntico ao que controla a rotação principal é utilizado para o controle da força, mas os valores do PWM são diferentes para este *Speed Controller*. Quando ele recebe 1.5ms, o motor fica parado. Acima de 1.5 até 2.0ms o motor gira para frente, aumentando a força aplicada até o máximo, quando entra em stall, condição que não é necessária pois gera deformação plástica no corpo de prova. Abaixo de 1.5 até 1.0ms o motor gira no sentido contrário, diminuindo a força até soltar o cabo de aço de tração.



Figuras 14 e 15: Sinal de PWM gerado pelo testador de servo, enviado para o controlador de velocidade IFI Victor 884, reversível.

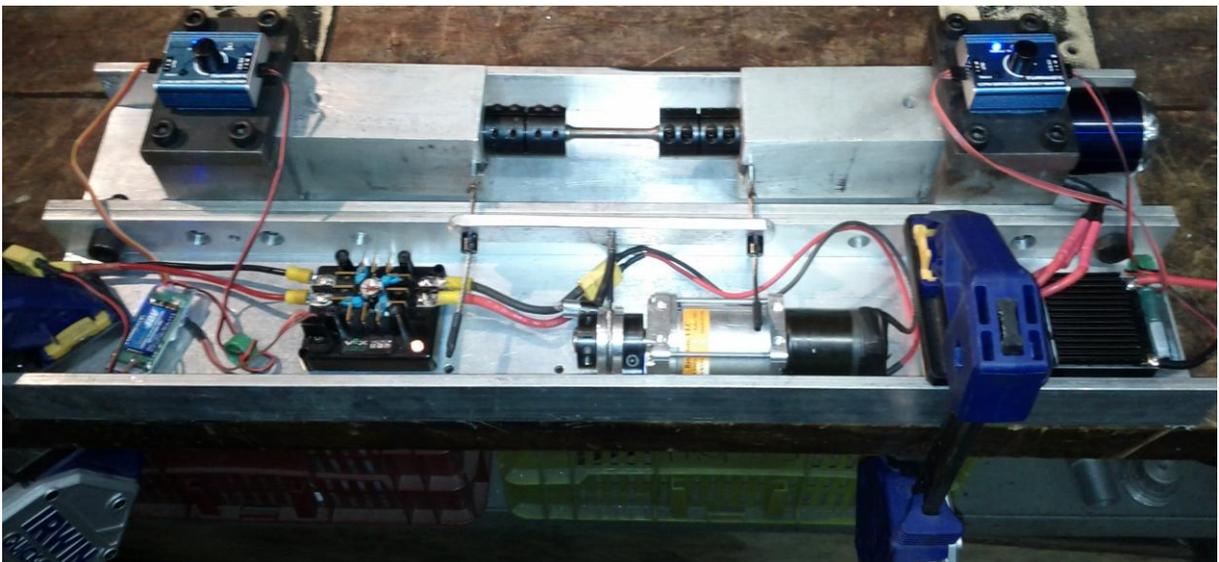


Figura 16: Máquina completa, com toda a eletrônica de potência e de controle.

O testador de servo da esquerda regula a força aplicada; o da direita, a rotação principal, como descrito anteriormente. Podemos ver os dois speed controllers, DC e Brushless, e o BEC (Battery Elimination Circuit), um regulador chaveado de 8-40V para 5V DC que alimentam os servo-testers e a parte de sinal dos controladores.

4. Teste e comparação

Foram realizados testes para determinar as correntes máximas requeridas pelos motores nas condições mais extremas possíveis, como a quebra de um corpo de prova de 3/8" na velocidade máxima (20.000rpm) e força máxima (50Kgf).

Características	Máquina SN PUC-RIO	Instron R.R. Moore
<i>Capacidade de momento fletor (Kg.m)</i>	0 – 6.5	0.25-2.3
<i>Incrementos de capacidade (Kg.m)</i>	0.0001	0.00254
<i>Velocidade de rotação (rpm)</i>	250 - 20.000	500- 10.000
<i>Força mínima efetiva (Kgf)</i>	0.1	5
<i>Peso da máquina (Kg)</i>	10.5	41
<i>Dimensões totais (mm)</i>	600 × 203 × 91	990 × 330 × 510
<i>Alimentação de energia</i>	12 – 48V DC 100A	100 – 120 V 50/60 Hz

Corpos de prova de aço 1045 do tamanho padrão (haste de 3/8" e seção de área reduzida de 1/4") foram levados a falha por fadiga com a máquina girando em alta rotação em pouco tempo, cerca de três minutos, o equivalente a cerca de 60.000 ciclos, um número relativamente baixo, devido ao esforço alto aplicado.



Figura 17: Corpo de prova de aço 1045 de 1/4" após 3 minutos rodando a 20.000 rpm com momento fletor considerável aplicado sobre ele. Como a seção de menor área estava muito longa nessa amostra, a ruptura não foi no centro, foi perto de um dos filetes laterais, onde houve concentração de tensões.

5. Trabalhos futuros

5.1 Instalação do sensor de força na barra de tração. Esse sensor será composto por um strain gauge e uma eletrônica que fará a leitura do mesmo. O strain gauge é um sensor que se baseia na mudança da resistência elétrica de um condutor colado na peça cuja deformação se deseja medir. Essa resistência é então medida pela eletrônica, aplicando-se uma tensão de entrada (5-12V) e medindo-se a saída (milivolts). A partir disso, conhecendo-se as características do strain-gauge, é possível medir a deformação da peça em análise em tempo real e, com essa deformação, calcula-se facilmente a força aplicada na peça, geradora do momento fletor, formando assim a célula de carga.

5.2 Implementação de um conta-giros (numero de ciclos) que são necessários até a ruptura do corpo de prova. Esta medição é feita por um sensor de infra-vermelho que emite o raio na direção do eixo da máquina, que possui uma faixa reflexiva e outra escura, criando um pulso na saída do sensor a cada volta do eixo. A eletrônica deve reconhecer o pulso de tensão mais alta e contar uma revolução, mostrando esse número em um painel de LED com um mínimo de 8 casas, já que 10^8 ciclos de fadiga é um número plausível para tais testes. No momento em que houver a ruptura, um sensor de fim de curso (*switch*) instalado no local em que o bloco de alumínio bate quando há a quebra da amostra, irá fechar um circuito da placa de controle, levando ao desligamento dos dois motores e parada da contagem. Pode ser utilizada uma bateria para alimentar esse circuito por segurança, para que não haja perda de dados no caso de queda de energia.

5.3 Integração do controle de velocidade, número de giros e força aplicada em uma interface gerada por um microcontrolador como o ATmega328 em uma plataforma *open-source* Arduino UNO de desenvolvimento de protótipos.

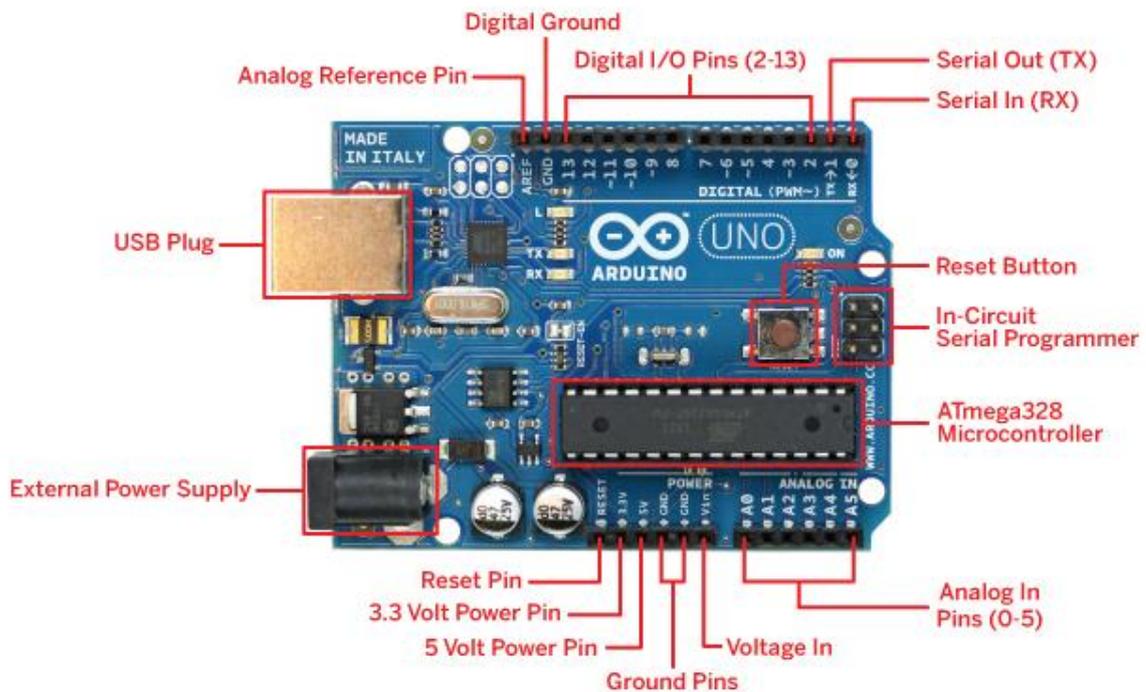


Figura 18: ARDUINO UNO, Plataforma de desenvolvimento de projetos eletrônicos *open-source*

A plataforma Arduino, que custa em torno de \$30, baseada nos microcontroladores AVR da ATmel, oferece uma larga gama de funções prontas e facilidade de programação em sua linguagem, muito próxima a C++.

Com processador de 16MHz, 14 pinos de entrada/saída digitais, 6 pinos de entrada analógica e uma conexão USB, o Arduino UNO pode ser utilizado para esse projeto, permitindo a interação entre as eletrônicas de potência, como por exemplo um controle de força do motor de tração baseado na leitura da célula de carga, ou seja, com realimentação de informação, ou seja, um controle em malha fechada.

Foi escrito um código de exemplo na linguagem do Arduino para gerar o sinal PWM de controle das eletrônicas de potência, recebendo como entrada o valor de um potenciômetro ligado entre o *ground* e 5V, e a saída variável ligada no pino de entrada analógica A3.

Segue o código abaixo:

```
// ARDUINO SERVO-TESTER
// Analog read:
// 0V -> 0
// 5V -> 1023

#define ulong unsigned long
#define POTMIN 0.0
#define POTMAX 1023.0

// Declaração de Variáveis:
int PinOUT = 13;
int analogPin = 3;
int ValPot = 256;
int Ton = 1.5;
int Toff = 18.5;

// Funções:
ulong interval(ulong st, ulong fin) {
    ulong dur;

    if (st<=fin) dur=fin-st;
    else dur=(0xffffffff-st)+fin;

    return dur;
}

void wait(ulong t) {
    ulong elapsedMcr=0,
        stMcr=micros(),
        currMcr;

    while (elapsedMcr<t) {
        currMcr=micros();
        elapsedMcr=interval(stMcr,currMcr);
    }
}
```

```

void setup () {
  // initialize the digital pin as an output:
  pinMode(PinOUT, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
}
void loop () {
  ValPot = analogRead(analogPin); // le a tensao do pot
  if (ValPot > POTMAX) ValPot = POTMAX;
  else if (ValPot < POTMIN) ValPot = POTMIN;
  Serial.println(ValPot);

  Ton = 1000*((ValPot-POTMIN)/(POTMAX-POTMIN)+1.0);
  Toff = 20000.0 - Ton;

  digitalWrite(PinOUT, HIGH); // sets the LED on
  wait(Ton);
  digitalWrite(PinOUT, LOW); // sets the LED off
  wait(Toff);
}

```

O código utiliza a interface serial/USB para imprimir na tela do computador em tempo real o valor do potenciômetro, de forma a mostrar se a leitura está correta. Foi testado com um servo comum de aeromodelismo e com um BESC e funcionou nos dois casos da mesma forma que o testador de servo. A vantagem desse código é que a função *delay* não é utilizada, permitindo que outros códigos, como por exemplo a leitura do sensor IR (conta-giros) e o controle da tração com a leitura da célula de carga não sejam afetados por ele, já que não há interrupções no programa.

Existem plataformas complementares ao Arduino chamadas de Arduino Shields com painéis de LED ou numéricos, mini-protoboards e vários outros tipos, podendo assim termos uma leitura em tempo real dos valores de velocidade angular, força ou momento fletor aplicado, numero de ciclos completos e outras grandezas de interesse. Uma interface com botões pode ser utilizada para aumentar ou diminuir a velocidade e o esforço, ou então utiliza-se a conexão USB para a programação de um esforço variável como o da figura 4.

Custo total da máquina em \$ dólares americanos:

Motor Brushless Scorpion HK 4035-530kv	\$209.99
Motor Integy Matrix Pro Lathe 55T	\$21.99
BESC HET 100A HV	\$119,00
IFI VEX Pro Victor 884	\$89.99
Turnigy Servo Tester	\$12.00
Redução Planetária P60 256:1	\$67.05
Componentes mecânicos (acopladores, eixos, rolamentos, etc.)	\$100
Alumínio e aço (perfis e barras)	\$100
Usinagem	\$600
Total	\$1321

Conclusões

A máquina atende aos requisitos do projeto, já que consegue provocar fadiga em corpos de prova de variados materiais sem que seus motores realizem esforços excessivos, e seus componentes suportam as vibrações. Devido a essa flexibilidade de materiais de teste, a máquina pode simular desgastes a longo prazo em eixos de diversos equipamentos, submetidos a variados carregamentos, com ampla aplicação em análise de fadiga mecânica para prevenção de propagação de trincas.

Possui indiscutível vantagem de preço (\$1321,00) em relação à máquina padrão do mercado, a R.R.Moore da INSTRON®, no mínimo cinco vezes mais cara.

Futuramente serão desenvolvidos os sistemas descritos acima, como o controle de esforço de flexão com realimentação a partir da leitura da célula de carga, interface simplificada para programação de um esforço variado aplicado automaticamente no corpo de prova, contador de ciclos com painel de LEDs, entre outros.

Referências bibliográficas:

1 - MEGGIOLARO, Marco Antonio e CASTRO, Jaime T. P. **Fadiga - Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço: Volume II - Propagação de Trincas, Efeitos Térmicos e Estocásticos**, v.2, p. 1-280, set. 2009.

2 - MEGGIOLARO, Marco Antonio, **RioBotz Combat Robot Tutorial**, v2.0, agosto de 2009.

3 - SEDRA / SMITH, Adel Sedra / Kenneth Smith. **Microeletrônica** – 5^a Edição 2007. Editora: Prentice Hall - Br.

4 – Durán, Jorge A. R., **Notas de Aula de Projeto em Fadiga**.

<http://www.professores.uff.br/duran/disciplinas/Notas%20de%20aula%20de%20projeto%20em%20Fadiga.pdf>

5 – **Arduino Language Reference**.

<http://arduino.cc/en/Reference/HomePage>

6 - INSTRON® website:

<http://www.instron.com.br/wa/product/RR-Moore-Rotating-Beam-Fatigue-Testing-System.aspx>

Agradecimentos:

Gostaríamos de expressar nosso reconhecimento aos que participaram do esforço requerido para a realização desse trabalho, seja através do provimento de recursos financeiros necessários, seja pelo inestimável aconselhamento técnico ou pela ajuda na confecção de peças essenciais e software.

O Laboratório de Fadiga da PUC-Rio forneceu os materiais e mão-de-obra necessários para a usinagem das peças que não puderam ser fabricadas na PUC-Rio.

O Laboratório de Robótica foi utilizado para o projeto, montagem e elaboração das peças da máquina, assim como para seus testes.

Foram nossos colaboradores:

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

Prof. Marco Antonio Meggiolaro

Prof. Jaime Tupiassú Pinho de Castro

Prof. Mauro Schwanke da Silva

Técnico Edson do ITUC

Luiza Silva

Gabriel Cordeiro