

# DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO PARA ENSAIOS DE FIOS DE LIGAS NITI EM FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA<sup>1</sup>

*Tibério César Uchôa Matheus<sup>2</sup>  
Henrique de Oliveira Magalhães<sup>3</sup>  
William Marcos Muniz Menezes<sup>4</sup>  
Odair Doná Rigo<sup>5</sup>  
Carlos Sérgio da Costa Viana<sup>6</sup>  
Jorge Otubo<sup>7</sup>*

## Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um dispositivo que torne possível a realização de ensaios de fadiga em flexão rotativa em fios de liga NiTi com diâmetros mínimo de até 0,50 mm, capazes de formar um arco de 180° com um raio de curvatura de 40 a 100 mm. O sistema é automático, controlado por microcomputador em linguagem C<sup>++</sup>. O microcomputador acoplado a um dispositivo de rotação poderá controlar a velocidade, temperatura ambiente e número de voltas durante o ensaio. Desta forma, é apresentada a performance e efetividade de uma metodologia desenvolvida para avaliação de fadiga por flexão rotativa de fios.

**Palavras-chave:** Fadiga; Fios de NiTi; Flexão rotativa.

## DEVELOPMENT OF A DEVICE TO TESTING NiTi ALLOYS WIRES IN ROTARY BENDING FATIGUE

## Abstract

This work presents the development of a device that makes possible to undertake rotary bending fatigue tests in NiTi alloy wires with diameters down to 0,50 mm, capable to form an arc of 180° with a bend radius from 40 to 100 mm. The system is automatically controlled by a microcomputer with C<sup>++</sup> language. The microcomputer coupled to a rotary device controls the rotational speed, ambient temperature and number of turns during the test. Therefore, the performance and the effectiveness of the developed methodology in evaluating the rotary bending fatigue test of wires are presented.

**Key words:** Fatigue; NiTi wires; Rotary bending.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 62° Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.*

<sup>2</sup> *Doutorando em Ciência dos Materiais pelo IME/ITA.*

<sup>3</sup> *Engenheiro Elétrico pela UNESP, Prof. FATEC-EXPOENTE, S.J.C./SP.*

<sup>4</sup> *Mestre em Engenharia Mecânica-Aeronáutica pelo ITA, Prof. FATEC-EXPOENTE, S.J.C./SP.*

<sup>5</sup> *Engenheiro de Materiais pela UFSCar.*

<sup>6</sup> *Prof. Emérito do IME e Prof. Adjunto da UFF (Volta Redonda/RJ).*

<sup>7</sup> *Prof. Adjunto do ITA.*

## 1 INTRODUÇÃO

As ligas NiTi (níquel-titânio), conhecidas desde a década de 70, possuem um dos melhores desempenhos entre as ligas com efeito de memória de forma (EMF), apresentando recuperação de forma de até 7% com aplicações em inúmeras áreas incluindo a médica e a odontológica. Na área odontológica destacam-se os fios ortodônticos para a correção da arcada dentária e as limas endodônticas para tratamento do canal radicular. Nestas aplicações usa-se a propriedade superelástica da liga que é a recuperação da forma sem a necessidade de aquecimento.<sup>(1,2)</sup>

Na endodontia, os avanços científicos e tecnológicos das ligas metálicas permitiram uma melhora significativa das propriedades mecânicas de uma geração de instrumentos endodônticos. Sendo assim, tornou-se possível fabricá-los a partir de uma liga NiTi, viabilizando sua utilização na instrumentação mecanizada, proporcionando um preparo biomecânico rápido e uniforme do canal radicular. Entretanto, a maior preocupação no uso de instrumentos de NiTi acionados a motor se deve ao fato da ocorrência de fraturas inesperadas. Como usualmente não há indicação visível de que o metal foi levado à falha, uma lima pode fraturar sem sinal algum ou aviso, especialmente se for usada inapropriadamente.<sup>(3,4)</sup> Desta forma, percebe-se que o carregamento em fadiga é um ponto importante no estudo das propriedades mecânicas, ora dos instrumentos usinados ora do material empregado na sua confecção.

Atualmente a avaliação das propriedades mecânicas de materiais empregados na confecção de instrumentos endodônticos, seja como produto acabado, seja na forma de fios, pode ser realizada através de ensaios mecânicos de torção ou de fadiga em flexão, sendo que a fadiga em flexão rotativa tem surgido como um teste padrão com o objetivo de avaliar a fadiga estrutural de fios com memória de forma, os quais originam os instrumentos endodônticos, através de usinagem.

Os ensaios de fadiga em flexão rotativa podem ser conduzidos controlando-se alguns parâmetros, dentre eles: velocidade, raio de curvatura e temperatura de ensaio. Para os biomateriais, o controle térmico é muito importante, ou seja, é possível levar os ensaios à temperatura do corpo humano, aproximadamente 37°C. Assim, algumas soluções são utilizadas com essa função, como a solução salina ou de Ringer.

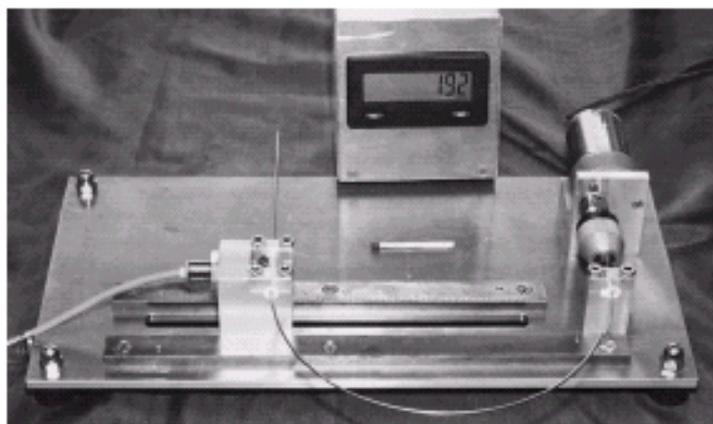
Quando se refere à avaliação da resistência mecânica de instrumentos endodônticos, muitos autores exploram os parâmetros de torque máximo e ângulo de rotação máximo em ensaios mecânicos de torção baseados na especificação nº 28 da ADA (American Dental Association), entretanto, os resultados conquistados são controversos. De acordo com Matheus et al.,<sup>(5)</sup> ao realizarem ensaios mecânicos em instrumentos endodônticos estabeleceu-se uma relação média de aumento do ângulo de torção máximo com o aumento do diâmetro nominal dos instrumentos de duas marcas comerciais. Todavia, para Camps e Pertot,<sup>(6)</sup> Canalda-Sahli et al.<sup>(7)</sup> e Seto et al.,<sup>(8)</sup> o ângulo de torção máximo na fratura, para instrumentos manuais de NiTi, diminuiu com o aumento do diâmetro nominal do instrumento endodôntico, enquanto que, Carmo et al.<sup>(9)</sup> afirmam que o ângulo de rotação não é influenciado pelo aumento do diâmetro do instrumento.

Melo et al.<sup>(10)</sup> salientam que o torque máximo e a deflexão angular máxima não refletem adequadamente o comportamento mecânico do material, porque tais parâmetros dependem das dimensões do instrumento endodôntico. Por outro lado, a resistência à fadiga está sob influência direta da tensão solicitada para o início da deformação permanente, isto é, do ponto de escoamento do material, o qual

determina a facilitação da nucleação das trincas em fadiga. Um fator importante a ser considerado é que os ensaios de fadiga em flexão rotativa ganharam terreno com o advento dos instrumentos acionados a motor, graças à cinemática desenvolvida no interior do canal radicular.

Os aparatos para realização dos ensaios de resistência à fadiga nos instrumentos endodônticos são muito semelhantes e estão de acordo com estudos clássicos. Haikel et al.,<sup>(11)</sup> Gambarine,<sup>(12)</sup> e Fife et al.,<sup>(13)</sup> utilizaram dispositivos que permitiam os instrumentos girarem livremente no interior de um canal artificial de aço inoxidável mantendo condições próximas às clínicas. Para isso, um contra-ângulo de uso específico na Endodontia era utilizado e canais artificiais que consistiam de: uma concavidade com raio em aço temperado, na qual possuía a forma em V para guia dos instrumentos, e de um cilindro convexo em aço temperado. Esse canal artificial possuía raio de curvatura de 5 mm, permitindo uma simulação reprodutível da instrumentação rotativa dentro de um canal curvo.

Para fios de uma liga NiTi, percebe-se que a literatura vem mostrando outros tipos de dispositivos para a realização dos ensaios de fadiga em flexão rotativa. Wagner et al.<sup>(14)</sup> realizaram ensaios de fadiga em flexão rotacional, na qual o fio era quase perfeitamente flexionado em forma semicircular e acionado a uma velocidade por um motor acoplado. As extremidades do fio eram mantidas estáveis através de mancais de baixa fricção. O número de ciclos em rotação pode ser contado e mostrado em um *display*. Esses autores conduziram os ensaios ao ar e em temperatura controlada através de banho em silicone, utilizando o dispositivo da figura 1. Foram apresentados resultados experimentais desses ensaios com fios de uma liga NiTi (50,9%Ni), correlacionando a temperatura da superfície dos fios, diâmetro e a velocidade rotacional.



**Figura 1:** Dispositivo para realização dos ensaios de fadiga descrito segundo Wagner et al.<sup>(14)</sup>

Com o objetivo de investigar a vida em fadiga de fios de liga NiTi com diferentes concentrações de Ni (50%Ni; 50,5%Ni e 50,85%Ni), Youngsik<sup>(15)</sup> realizou ensaios de tração e de fadiga cíclica, e esse último foi conduzido sob diferentes temperaturas. Constatou-se, principalmente, que a vida em fadiga diminui com o aumento da concentração de Ni em amplitudes de deformação distintas.

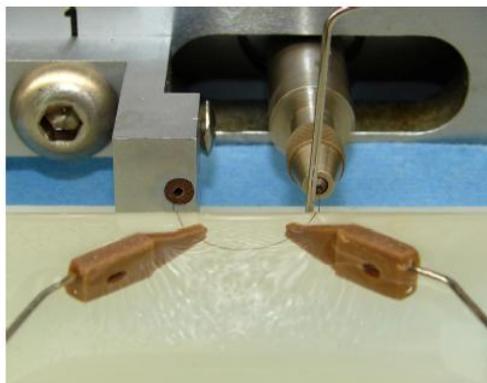
Segundo Sawaguchi et al.<sup>(16)</sup> para vários tipos de aplicações da memória de forma, as propriedades estruturais são igualmente importantes e essas particularmente para as propriedades de fadiga. As propriedades de fadiga podem ser subdivididas em fadiga funcional (diminuição do efeito memória de forma com o aumento do número de ciclos) e fadiga estrutural (acumulo de deformação e ruptura). A fadiga estrutural vem sendo uma importante área de pesquisa na Ciência

dos Materiais por muitos anos. Ainda de acordo com esses autores, ao realizarem ensaios rotativos de fadiga com fios de uma liga NiTi (50,9 Ni) com três diferentes diâmetros, avaliando-se: diâmetro do fio e número de ciclos até a ruptura, numa relação inversamente proporcional; velocidade rotacional e tempo de vida em fadiga, que também são inversamente proporcionais. Num cenário de dano no qual ocorre falha por fadiga, e onde um volume de material altamente tensionado contém uma inclusão, efeitos adicionais podem ter um papel importante em fios de calibre maior, pois um maior volume de material é exposto a elevadas tensões-deformações.

Por sua vez, Bahia<sup>(17)</sup> e Dias,<sup>(18)</sup> realizaram ensaios de deformação cíclica por dobramento rotatório em fios superelásticos de NiTi utilizando uma máquina operatriz do tipo furadeira de coluna, na qual os corpos de prova eram fixados em uma de suas extremidades pelo mandril da furadeira e a outra introduzida em um pequeno orifício com 2 mm de profundidade localizado em um aparato de aço. Sendo assim, o corpo de prova ficava encurvado com um determinado raio e ângulo de curvatura. Foram utilizados três raios de curvatura diferentes, 25, 17, 12 mm, que proporcionavam amplitudes de deformação em tração na superfície dos fios de aproximadamente 2,0, 3,0 e 4,5% respectivamente.

Corroborando com a proposta de analisar a fadiga estrutural de fios superelásticos de NiTi, Figueiredo et al.<sup>(19)</sup> utilizaram um equipamento desenvolvido no departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais), na qual consistia de um motor elétrico de corrente contínua alimentado por uma fonte de energia que controlava a velocidade de rotação. O fio a ser ensaiado era fixado ao eixo do motor por um mandril e sua outra extremidade apoiada em um pequeno rolamento. Os apoios permitiam apenas a rotação do fio em torno do seu próprio eixo. O raio de curvatura podia variar alterando a deformação máxima do fio, entretanto, foi adotado um ângulo interno de 60°, o qual impossibilitava a disposição do fio em 180°.

A construção do dispositivo utilizado por Patel,<sup>(20)</sup> apresentado na Figura 2, permite que o fio seja ensaiado variando os raios de curvatura, ainda assim dispostos em 180° formando um semicírculo. O aparato envolve um mandril acionado por motor e um mancal que permite o posicionamento da extremidade livre do espécime. O projeto permite que o eixo do mandril e o eixo da extremidade livre do fio no mancal sejam exatamente paralelos. Para prevenir a vibração dois guias suportes são posicionados no raio do espécime, por fora do vértice, de forma que não afetem a região de deformação máxima. O fio é ciclado a uma frequência constante de 3600 RPM sincronizado por um relógio eletrônico, o teste era automaticamente cessado quando ocorria a fratura.



**Figura 2:** Fio de NiTi flexionado em forma de U montado no mandril e no mancal.<sup>(20)</sup>

Através da literatura consultada percebe-se que várias informações podem ser colhidas de acordo com as metodologias propostas para os ensaios de fadiga. O objetivo é estudar as propriedades mecânicas de novas ligas metálicas, conduzindo a um aperfeiçoamento, que significa dizer maior integração da ciência dos materiais mecânicos à Endodontia, e para isso é necessário que existam dispositivos cada vez mais fieis à investigação.

Sendo assim, o objetivo desse trabalho é apresentar o desenvolvimento de um dispositivo para ensaios de fadiga em flexão rotativa de fios de ligas NiTi. O projeto baseou-se na literatura consultada, entretanto, com o controle das condições totalmente automatizado via software, visando a obtenção de dados mais fieis, como: número de rotações, velocidade e tempo na fratura.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

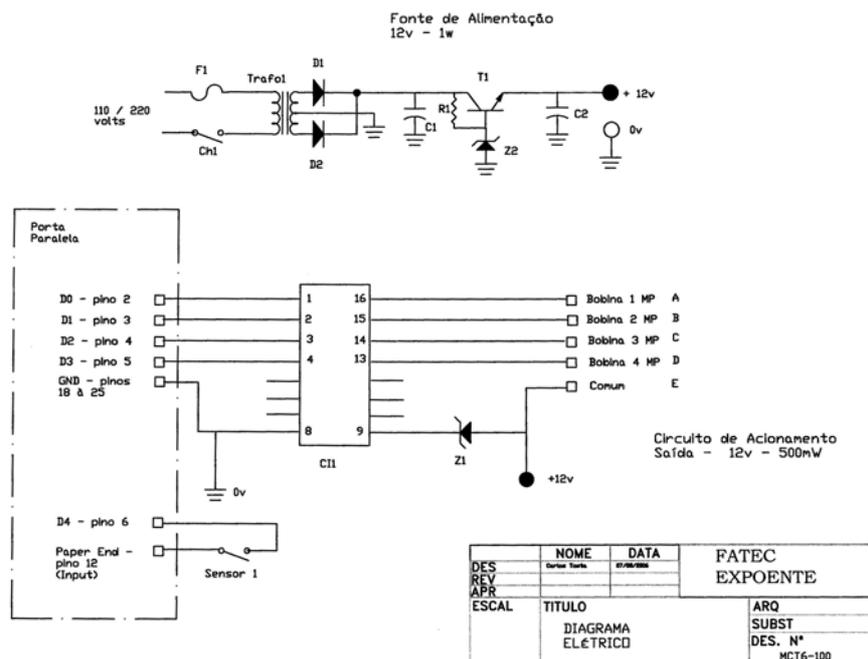
O dispositivo foi concebido através do trabalho de Wagner et al.,<sup>(14)</sup> estabelecendo-se uma parceria entre a Faculdade de Tecnologia Expoente e o ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. O desenvolvimento do aparato em si foi dividido nas seguintes etapas: (i) concepção do dispositivo, considerando-se parâmetros de geometria da flexão, torção e atrito em mancais, velocidade controlada de rotação, possibilidade de controle de temperatura do corpo de prova, e controle mecatrônico das condições de ensaio; (ii) dimensionamento mecânico, eletrônico e computacional; (iii) projeto mecânico em CAD; (iv) usinagem, soldagem e montagem mecânica do dispositivo; (v) manufatura de circuito eletrônico de controle (*driver*); (vi) programação do controle e interface gráfica em C++ para ambiente WINDOWS® em microcomputador tipo PC. O desenvolvimento dessa metodologia viabiliza a realização de ensaios de fadiga em flexão rotativa em fios de liga NiTi com diâmetro mínimo de até 0,50 mm, capazes de formar um arco de 180° com um raio de curvatura variável de 40 a 100 mm.

O dispositivo foi desenvolvido com os seguintes parâmetros iniciais: rotação do corpo de prova de 200 a 450 RPM; diâmetro do corpo de prova de 0,5 a 1,2 mm; comprimento do fio do corpo de prova de 120 a 250 mm; tensão de alimentação de 110 ou 220V (via computador); driver de controle com fonte 12V – 1W.

A configuração mecânica do dispositivo de ensaio compreende uma base vertical usinada em alumínio, de dimensões 400 mm x 255 mm x 1/2 in., à qual se acoplam 15 elementos: motor de passo, base motora, acoplamento, rolamento, base do rolamento, mandril, suporte fixo, suporte da base (2 peças), bucha passante (2 peças), trava do suporte, suporte móvel, bucha de fim de curso (*stop*), circuito do *driver*. Cada elemento é detalhado a seguir:

- **Motor de passo:** alimentação 12V – 500mW
- **Base motora MCT6-102:** em alumínio 5150, para fixação do motor de passo.
- **Acoplamento MCT6-120:** em aço 1020, com encaixe cônico para mandril padrão (RÖHM).
- **Rolamento:** SKF 6001 2Z.
- **Base do rolamento MCT6-121:** em alumínio 5150, para mancal do acoplamento MCT6-120.
- **Mandril RÖHM:** para fixação do corpo de prova.
- **Suporte fixo MCT6-122:** em alumínio 5150, para alinhamento do corpo de prova com o mandril, evitando danos ao fio por deflexão junto às castanhas do mandril.
- **Suporte da base MCT6-110:** em aço 1020, com peças soldadas.

- **Bucha passante MCT6-123:** em nylon, de baixo coeficiente de atrito (em torno de 0,42 segundo), com boa resistência ao desgaste e a abrasão.
- **Trava do suporte MCT6-131:** em alumínio 5150, para fixação do suporte móvel.
- **Suporte móvel MCT6-103:** em alumínio 5150, que determina o raio de curvatura em flexão do corpo de prova.
- **Bucha MCT6-130:** em nylon, de baixo coeficiente de atrito, para fim de curso (*stop*) na montagem do fio corpo de prova, destinada a assegurar a dimensão do raio de flexão do corpo de prova.
- **Circuito do driver:** para acionamento e controle do motor de passo, seguindo o diagrama da Figura 3.



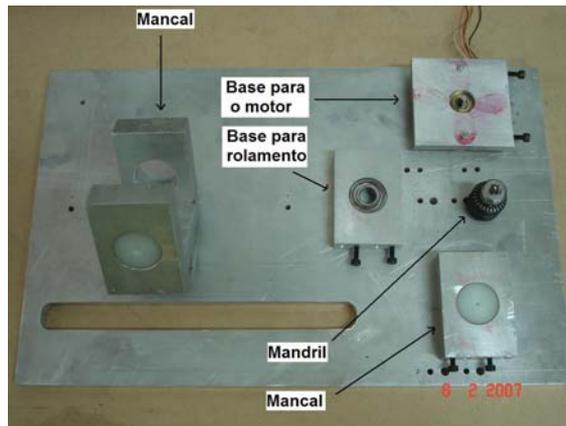
**Figura 3:** Circuito do driver do motor de passo.

O uso de microcomputador tipo PC, com alimentação e controle através de uma porta paralela deu-se pelo baixo custo aliado à confiabilidade do sistema.

O dimensionamento mecânico foi orientado para proporcionar ajuste variável do raio de flexão do corpo de prova, com geometria de semi-circunferência com ângulo 180°, mínimo atrito entre o corpo de prova e os mancais de escorregamento, e fixação precisa sem geração de tensões ou deformações sobre a região de trabalho do material em ciclo de fadiga a ser avaliado.

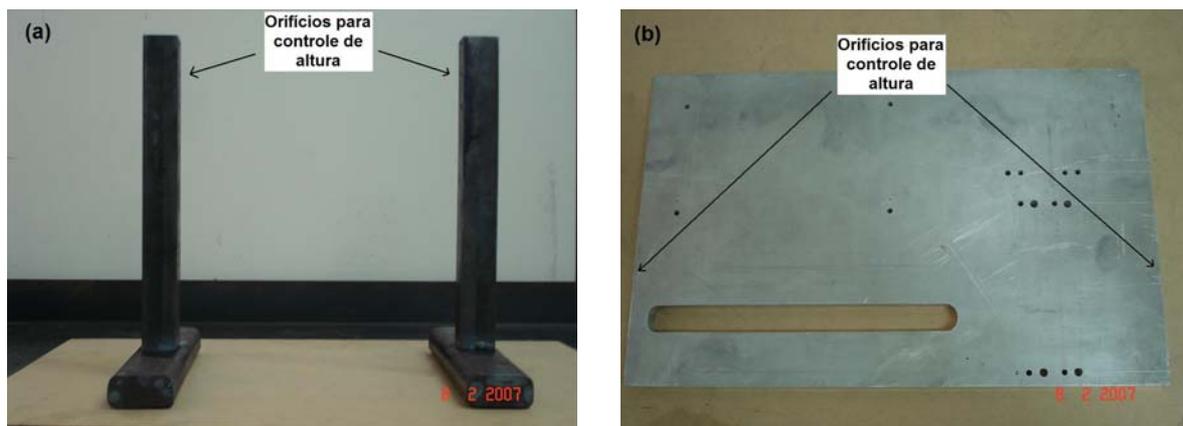
A usinagem das peças foi realizada nos Laboratórios de Mecânica do ITA e da Faculdade de Tecnologia Expoente.

A Figura 4 apresenta o conjunto de elementos que compõem o dispositivo de ensaio.



**Figura 4:** Conjunto de peças para montagem do dispositivo de ensaios de fadiga por flexão alternada.

O dispositivo foi idealizado de forma que o ensaio possa ser realizado também em temperatura controlada através da imersão do fio em fluido termo-controlado durante seu acionamento. Para isso, os suportes da base possuem orifícios laterais com o objetivo de ajustar a altura da base vertical, na qual estão todos os elementos do dispositivo montados e onde estará disposto o corpo de prova, de acordo com o raio de curvatura do fio, proporcionando a imersão do material na cuba que conterá o fluido. A figura 5 apresenta tais recursos de montagem do dispositivo.

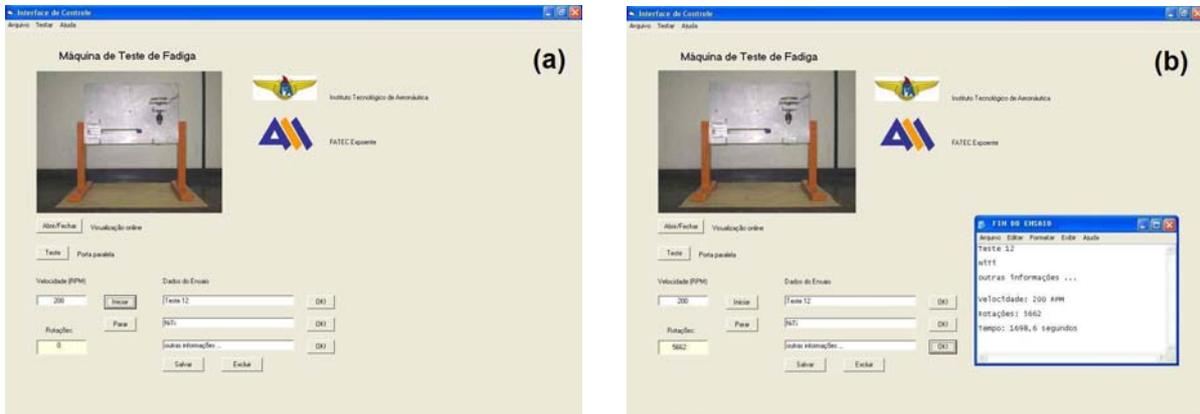


**Figura 5:** Suportes da base em (a) com os orifícios para controle da altura e em (b) base vertical com os respectivos orifícios para regulação da altura nos suportes.

O procedimento de montagem do corpo de prova no dispositivo consiste nas etapas: (1) ajuste da posição do suporte móvel de acordo com o raio de curvatura desejado, aumentando-se ou diminuindo-se a deformação desejada do material, (2) introdução do fio ou corpo de prova através dos orifícios das duas buchas de nylon, já formando a semi-circunferência, (3) fixação de uma extremidade pelo mandril enquanto a outra extremidade é posicionada na bucha de fim de curso (*stop*), (4) aplicar lubrificante (vaselina líquida) nos orifícios das buchas para minimizar o atrito, (5) parametrizar e acionar o sistema pelo computador.

A interface de controle do dispositivo e o gráfico do sistema, desenvolvidos pela equipe de Mecatrônica da Faculdade de Tecnologia Expoente, constitui-se em um *software* programado em linguagem C++ em ambiente visual. Sua apresentação é na forma de um aplicativo do Windows®. Em sua tela de controle da interface, figura 6, há um campo de entrada para se inserir o valor da velocidade em que se deseja realizar o ensaio, e também um campo no qual os dados de identificação do ensaio

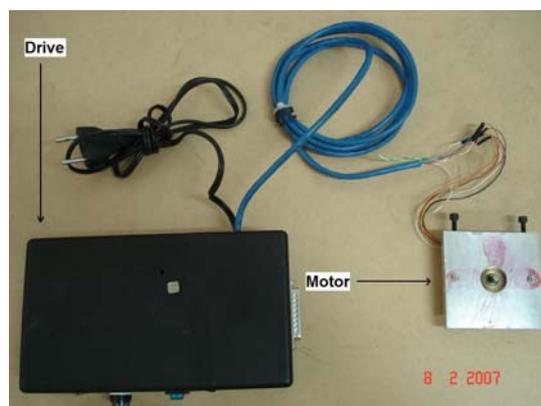
são inseridos. Estas informações são armazenadas em um arquivo tipo texto junto com os valores de velocidade e do número de rotações em que o fio em teste foi submetido até o seu rompimento, valores estes indicados por um sistema eletrônico de contagem de voltas, e um sensor de continuidade elétrica do corpo de prova.



**Figura 6:** Tela de início do ensaio de fadiga (a), com campos de parametrização do processo e em (b) tela de fim do ensaio de fadiga, com campos de resultados.

A velocidade do motor, inserida no campo de velocidade, pode variar de 1 a 600 RPM (rotações por minuto). Esse valor é convertido em pulsos elétricos que são enviados via porta paralela ao *driver* de potência do motor de passo. Este subconjunto é apresentado na Figura 7. O número de rotações é obtido pela quantidade de pulsos enviados ao motor. Quando o fio é rompido, um sensor do tipo micro-chave é acionado enviando a informação, também via porta paralela, para a finalização do ensaio e fechamento do arquivo.

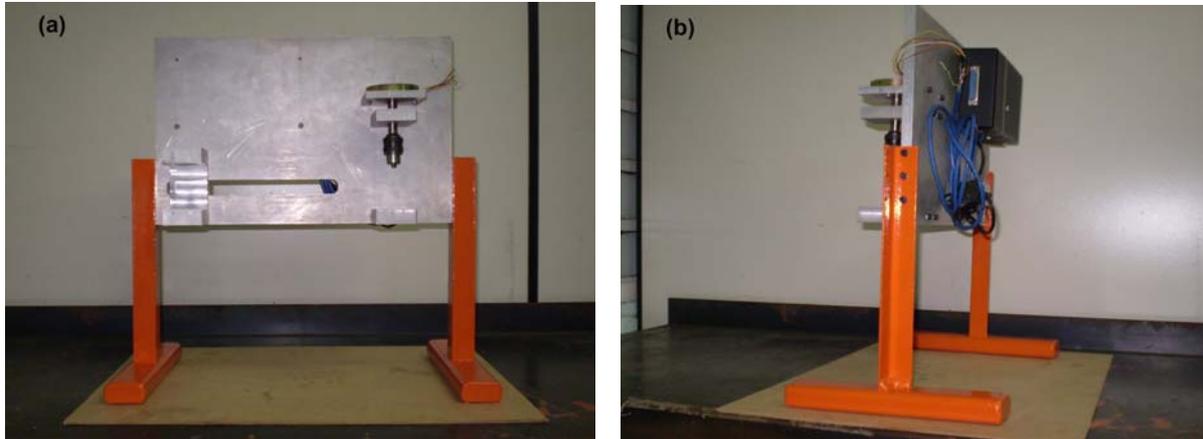
Na interface temos ainda um menu “Arquivo” que possibilita a edição dos arquivos gerados utilizando um link para o editor de textos não sendo necessário sair da interface ou interromper o ensaio para a geração do relatório. No menu “Ajuda” tem-se uma explicação detalhada sobre o procedimento para a realização do ensaio. No campo “Visualização on-line” é possível acompanhar a realização do ensaio na tela através da imagem obtida por uma câmera tipo WebCam.



**Figura 7:** Subconjunto eletrônico do dispositivo, composto por circuito de controle de potência (driver), cabo de controle e motor de passo.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O dispositivo desenvolvido neste trabalho é apresentado na figura 8, e dispõe de configuração adequada aos ensaios de fios NiTi para aplicações endodônticas, compatível aos dispositivos desenvolvidos por Wagner et al.<sup>(14)</sup> e Patel<sup>(20)</sup>, 2005.



**Figura 8:** Vista frontal do dispositivo montado em (a) e o perfil mostrando o controle eletrônico do aparato em (b).

As dimensões das buchas e mandril de fixação, assim como a potência do motor de passo, possibilita a realização de ensaios em fios de liga NiTi com diâmetro mínimo de até 0,50 mm, capaz de formar um arco de 180° com um raio de curvatura de 40 a 100 mm. Da mesma forma, o fio estará disposto na forma de semi-círculo montado na plataforma de ensaios, a qual estará verticalmente posicionada afim de possibilitar também a realização dos ensaios de fadiga em temperatura controlada, com uso de uma cuba contendo fluidos controlados termicamente. O propósito é banhar a porção do fio que se encontra formando o arco. O suporte de uma das extremidades onde deve ser posicionado o fio contém uma bucha de nylon com furo cego para servir de “stop”, ou seja, reter o fio numa dada posição para garantir-lhe o formato de semi-circunferência. É possível substituir esta bucha por outra de furo passante, o que permitiria uma certa mobilidade axial do corpo de prova num comportamento de auto ajuste da geometria do fio. O uso de um determinado tipo de bucha fica a cargo do pesquisador, que deverá considerá-lo nas condições de ensaio. Uma vez definidos tais parâmetros, decorre a modelagem do sistema nas condições determinadas.

A escolha do PC como controlador do dispositivo, se deu entre outras duas opções – CLP (Controlador Lógico Programável) e microcontrolador – e o resultado mostrou-se prático, robusto e confiável. A disponibilidade de microcomputadores e a versatilidade técnica da linguagem C++ garantiram um resultado satisfatório para o programa de controle. A possibilidade de desenvolver relatórios de ensaio no próprio sistema de controle adicionou ao sistema um nível profissional interessante.

O controle de rotação por pulsos elétricos, e a parada instantânea na fratura do fio através de sensor tipo micro-chave asseguram precisão no levantamento de dados.

## 4 CONCLUSÕES

O dispositivo desenvolvido ao ensaio de fadiga por flexão rotativa para investigação das propriedades mecânicas de fios de ligas NiTi, com diâmetros e composições distintas apresenta um controle das variáveis de ensaios totalmente automatizado. Esse controle é realizado através de uma interface constituída por um *software* programado em linguagem C++ em ambiente visual. Sua apresentação é na forma de um aplicativo do Windows®. A metodologia desenvolvida assegura reprodutibilidade e repetibilidade de procedimentos, assim como exatidão de resultados, adequados a avaliação de materiais em termos de pesquisa. Isto deve proporcionar melhoramento das propriedades das ligas NiTi com fins de aplicação na área biomédica.

## Agradecimentos

A FAPERJ pela bolsa de estudos ao curso de Doutorado (processo E-26/100.130/06-DSC 10); a FAPESP (processo 00/09730-1), FINEP (processo 01.04.0255.00 – CT INFRA 03/2003; PROINFRA 01/05, Protocolo 153) pelo suporte financeiro a pesquisa.

Aos alunos do curso técnico em Mecânica; Gilson Reginaldo Eduardo de Castilhos, Genecy Macedo Clemente, Graziano de Lima Oliveira, Frederik Goulart Coutinho da Silva, Rosemara Maria Siqueira, Alex Sandro de Almeida Selis, Paulo César de Moraes, Roberval Neves de Oliveira, do Centro Educacional Técnico Expoente pela contribuição com o projeto mecânico do dispositivo proposto.

Aos alunos do curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial, Carlos Eduardo Tosta Rocha, João Carlos Gregório, Robinson André Santos, Elizandro Prado da Cunha, da Faculdade de Tecnologia Expoente pela contribuição com o projeto mecânico, eletrônico e mecatrônico do dispositivo proposto.

Aos técnicos mecânicos de laboratório, Lucas Monteiro Cotta e Marco Antônio dos Santos, pela usinagem, montagem e ajustagem do dispositivo de ensaio.

## REFERÊNCIAS

- 1 OTUBO, J.; MEI, P. R.; KOSHIMIZU, S. Materiais com efeito memória de forma, características principais e possíveis aplicações. In: XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – Bauru-SP. **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM 97)**. 1997, 1 CD.
- 2 OTUBO, J.; MEI, P. R.; KOSHIMIZU, S.; MARTINEZ, L. G. NiTi shape memory alloys produced by electron beam melting: preliminary results. **The Minerals Metals e Materials Society**. p. 1063-68, 1998.
- 3 SATTAPAN, B.; NERVO, G. J.; PALAMARA, J. E. A.; MESSER, H. H. Defects in rotary nickel-titanium files after clinical use. **Journal of Endodontics**. v. 26, n. 3, p. 161-5, Mar. 2000.
- 4 LOPES, H. P.; ELIAS, C. N.; SIQUEIRA JÚNIOR, J. F.; ARAÚJO FILHO, W. R. Fratura por torção de limas endodônticas de aço inoxidável e de níquel-titânio. **Revista Paulista de Odontologia**, v. 23, n. 2, p. 8-12, Mar-Abr. 2001.
- 5 MATHEUS, T. C. U.; ALBUQUERQUE, D. S.; LOPES, H. P.; ELIAS, C. N.; CARMO, A. M. R.; MOREIRA, E. J. L. Fratura por torção de instrumentos de

- níquel-titânio, K<sup>3</sup> Endo e ProFile. **Revista Brasileira de Odontologia**. v. 60, n. 3, Mai-Jun. 2003.
- 6 CAMPS, J. J.; PERTOT, W. J. torsional and stiffness properties of nickel-titanium K-files. **International Endodontic Journal**, v. 28, n. 5, p. 239-43, Sep. 1995.
  - 7 CANALDA-SAHLI, C.; BRAU-AGUADÉ, E.; BERASTEGUI-JIMENO, E. A comparison of bending and torsional properties of K-files manufactured with different metallic alloys. **International Endodontic Journal**, v. 29, n. 3, p. 185-9, May, 1996.
  - 8 SETO, B. G. NICHOLLS, J. I.; HARRINGTON, G. W. Torsional properties of twisted and machined endodontic files. **Journal of Endodontics**, v. 16, n. 8, p. 355-60, Aug. 1990.
  - 9 CARMO, A. M. R.; VALERA, M. C.; LOPES, H. P.; ELIAS, C. N. Fratura por torção de instrumentos endodônticos de níquel-titânio acionados a motor. **Revista Brasileira de Odontologia**. v. 59, n. 3, p. 197-99. Mai/Jun. 2002.
  - 10 MELO, M. C. C.; BAHIA, M. G. A.; BUONO, V. T. L. Fatigue resistance of engine-driven rotary nickel-titanium endodontic instruments. **Journal of Endodontics**. v. 28, n. 11, Nov. 2002.
  - 11 HAÏKEL, Y.; SERFATY, R.; BATEMAN, G.; SENGER, B.; ALLEMAN, C. Dynamic and cyclic fatigue of engine-driven rotary nickel-titanium endodontic instruments. **Journal of Endodontics**. v. 25, n. 6, Jun. 1999.
  - 12 GAMBARINI G. Cyclic fatigue of ProFile rotary instruments after prolonged clinical use. **International Endodontic Journal**. v. 34, p. 386-389, Jul. 2001.
  - 13 FIFE, D.; GAMBARINI, G.; BRITTO, L. R. Cyclic fatigue testing of ProTaper NiTi rotary instruments after clinical use. **Oral Surgery Oral Medicine Oral Pathology Oral Radiology and Endodontics**. v. 97, p. 251-256, Feb. 2004.
  - 14 WAGNER, M.; SAWAGUCHI, T.; KAUSTRÄTER, G.; HÖFFKEN, D.; EGGELER, G. Structural fatigue of pseudoelastic NiTi shape memory wires. **Materials Science and Engineering A**. v. 378, p. 105-109, 2004.
  - 15 YOUNGSIK, K. Fatigue properties of the Ti-Ni base shape memory alloy wire. **Materials Transactions**. v. 43, n. 7, p. 1703-06, 2002.
  - 16 SAWAGUCHI, T.; KAUSTRÄTER, G.; YAWNY, A.; WAGNER, M.; EGGELER, G. Crack initiation and propagation in 50.9 at pct NiTi pseudoelastic shape memory wires in bending rotation fatigue. **Metallurgical and Materials Transactions A**. v. 34A, p. 2847-60, Dec. 2003.
  - 17 BAHIA, M. G. A. **Resistência a fadiga e comportamento em torção de instrumentos endodônticos de NiTi ProFile**. 212 p, 2004 (Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG – Belo Horizonte/MG.
  - 18 DIAS, R. F. **Efeito da deformação cíclica nas propriedades mecânicas de uma liga níquel-titânio superelástica**. 158 p, 2005 (Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG – Belo Horizonte/MG.
  - 19 FIGUEIREDO, A. M. G.; MONDENESI, P. J.; BUONO, V. T. L. Caracterização da fadiga de ligas superelásticas de NiTi em ensaios de flexão rotativa. In: 61º Congresso Anual da ABM, 2006, Rio de Janeiro. **Anais do 61º Congresso Anual da ABM**. 2006, 1 CD.
  - 20 PATEL, M. M. Characterizing fatigue and fracture response of medical grade nickel-titanium alloys by rotary beam testing. <http://www.fwmetals.com>. p. 1-12, 2005.