

DISPOSITIVO PARA FLEXÃO ROTATIVA DE FIOS NiTi EM ENSAIO DE FADIGA

Tibério César Uchôa Matheus¹
 Henrique de Oliveira Magalhães²
 William Marcos Muniz Menezes³
 Odair Doná Rigo⁴
 Carlos Sérgio da Costa Viana⁵
 Jorge Otubo⁶

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 diâmetro mínimo de até 0,50 mm, capazes de formar um arco de 180° com um raio de curvatura de 50 mm a 100 mm. O sistema é automático, controlado por microcomputador em linguagem C++. O microcomputador acoplado a um dispositivo de rotação poderá controlar a velocidade, temperatura ambiente e número de voltas durante o ensaio.

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

DEVICE TO ROTARY BENDING OF NiTi WIRES IN FATIGUE TESTS

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 50 to 100 mm. The system is automatically controlled by a microcomputer with C++ language. The microcomputer coupled to a rotary device controls the rotational speed, ambient temperature and number of turns during the test.

Key words: Fatigue; NiTi wires; Rotary bending.

1 INTRODUÇÃO

As ligas NiTi (níquel-titânio), conhecidas desde a década de 70, possuem um dos melhores desempenhos quanto à recuperação de forma, de até 7%, quando comparadas as demais ligas com efeito de memória de forma (EMF). Suas aplicações estendem-se da área aeroespacial à médica e odontológica, sendo que nesta última destacam-se os fios ortodônticos para a correção da arcada dentária e as limas endodônticas para tratamento do canal radicular. Nestas aplicações utiliza-se a propriedade superelástica da liga, que é a recuperação da forma sem necessidade de aquecimento.^(1,2)

Na Endodontia, a maior preocupação no uso de instrumentos de NiTi acionados a motor se deve ao fato da ocorrência inesperada de fraturas do instrumento, sem sinal algum ou prévio aviso, especialmente se usada inapropriadamente.^(3,4) Desta forma, percebe-se que o carregamento em fadiga é um ponto importante no estudo das propriedades mecânicas, tanto dos instrumentos usinados quanto do material empregado na sua confecção. A flexão rotativa tem surgido como um teste padrão com o objetivo de avaliar a fadiga estrutural de fios com memória de forma,

¹Doutor em Ciência dos Materiais pelo IME/ITA. End. para correspondência: Rua Sá e Souza, nº 845, apto 1006, Boa Viagem, Recife/PE, CEP: 51030-065. E-mail: tcmatheus@yahoo.com.br.

²Engenheiro Elétrico pela UNESP Prof. FATEC-EXPOENTE, S.J.C./SP. End. para correspondência: Rua Vilaça nº 575, Centro, São José dos Campos/SP, CEP: 12210-000. E-mail: oliveira_magalhaes@yahoo.com.br.

³Mestre em Engenharia Mecânica-Aeronáutica pelo ITA, Prof. FATEC-EXPOENTE, S.J.C./SP. End. para correspondência: Rua Vilaça nº 575, Centro, São José dos Campos/SP, CEP: 12210-000. E-mail: william.menezes@ibest.com.br.

⁴Engenheiro de Materiais pela UFSCar. End. para correspondência: Pça Mal. Eduardo Gomes, nº 50, Vila das Acácias, Divisão de Engenharia Mecânica, São José dos Campos/SP, CEP: 12228-900. E-mail: odair@ctmsp.mar.mil.br.

⁵Prof. Emérito do IME e Prof. Adjunto da UFF (Volta Redonda/RJ). End. para correspondência: Pça Gen. Tibúrcio, nº 80, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, CEP: 22290-270. E-mail: cdcv@oi.com.br.

⁶Prof. Adjunto do ITA. End. para correspondência: Pça Mal. Eduardo Gomes, nº 50, Vila das Acácias, Divisão de Engenharia Mecânica, São José dos Campos/SP, CEP: 12228-900. E-mail: jotubo@ita.br.

os quais originam os instrumentos endodônticos, através de usinagem. Os ensaios de fios por fadiga em flexão rotativa podem ser conduzidos controlando-se alguns parâmetros, dentre eles: velocidade, curvatura e temperatura de ensaio.

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, entretanto, os resultados conquistados são controversos. De acordo com Matheus et al.⁽⁵⁾ 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 Campos e Pertot,⁽⁶⁾ Canalda-Sahli, Brau-Aguadé e Berastegui-Jimeno⁽⁷⁾ e Seto, Nicholls e Harrington,⁽⁸⁾ o ângulo de torção máximo na fratura, para instrumentos manuais de NiTi, diminui com o aumento do diâmetro nominal do instrumento endodôntico, enquanto que, Carmo et al.⁽⁹⁾ afirmam que o ângulo de rotação não é influenciado pelo aumento do diâmetro do instrumento.

Melo, Bahia e Buono⁽¹⁰⁾ 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.

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.,⁽¹¹⁾ Gambarine⁽¹²⁾ e Fife, Gambarine e Britto⁽¹³⁾ utilizaram dispositivos que permitiam aos instrumentos girarem livremente no interior de um canal artificial de aço inoxidável mantendo condições próximas às clínicas

Para fios de uma liga NiTi, percebe-se que a literatura tem mostrado outros tipos de dispositivos para a realização dos ensaios de fadiga em flexão rotativa. Wagner et al.⁽¹⁴⁾ realizaram ensaios de fadiga em flexão rotacional, na qual o fio era quase perfeitamente flexionado na forma semicircular, e acionado em velocidade controlada por um motor acoplado. As extremidades do fio eram mantidas estáveis através de mancais de baixo coeficiente de atrito. 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.

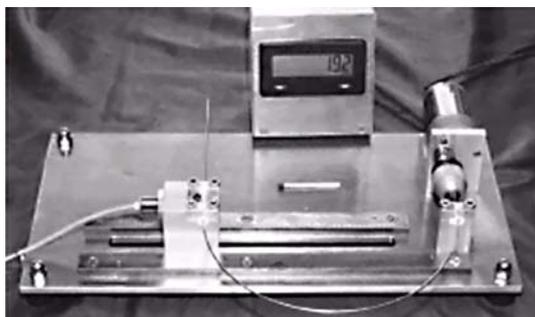


Figura 1. Dispositivo para realização dos ensaios de fadiga descrito segundo Wagner et al.⁽¹⁴⁾

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⁽¹⁵⁾ 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.⁽¹⁶⁾ para vários tipos de aplicações da memória de forma, as propriedades estruturais são igualmente importantes, particularmente a resistência a fadiga

Por sua vez, Bahia⁽¹⁷⁾ e Dias,⁽¹⁸⁾ 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.

Corroborando com a proposta de analisar a fadiga estrutural de fios superelásticos de NiTi, Figueiredo, Mondonesi e Buono⁽¹⁹⁾ utilizaram um equipamento desenvolvido no departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais), constituído por um motor elétrico de corrente contínua alimentado por uma fonte de energia, controladora da 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 poderia variar alterando a deformação máxima do fio; entretanto foi adotado um ângulo interno de 60°.

A construção do dispositivo utilizado por Patel,⁽²⁰⁾ 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 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 exatidão na obtenção de dados.

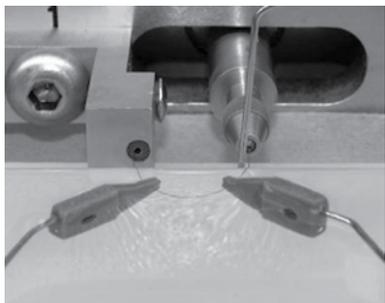


Figura 2. Fio de NiTi flexionado em forma de U montado no mandril e no mancal.⁽²⁰⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O dispositivo foi concebido através de 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, controle da velocidade 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 desse dispositivo possibilita 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 50 mm a 100 mm.

O dispositivo foi desenvolvido com os seguintes parâmetros iniciais: rotação do corpo de prova de 200 RPM a 450 RPM; diâmetro do corpo de prova de 0,5 mm a 1,4 mm; comprimento do corpo de prova no mínimo de 30 mm; tensão de alimentação de 110 V ou 220 V (via computador); driver de controle com fonte 12 V – 1 W.

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 elementos indicados a seguir:

- Motor elétrico de corrente contínua: alimentação 12 V – 500 mW;
- 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;
- Rolamento: SKF 6001 2Z;
- Base do rolamento MCT6-121: em alumínio 5150;
- Mandril RÖHM: para fixação do corpo de prova;
- Suporte fixo MCT6-122: em alumínio 5150;
- Suporte da base MCT6-110: em aço 1020;
- Bucha passante MCT6-123: em nylon;
- 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; e
- Driver: para acionamento e controle do motor elétrico.

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 não ser aquelas geradas pela própria curvatura do fio.

A Figura 3 apresenta o conjunto de elementos que compõem o dispositivo de ensaio.

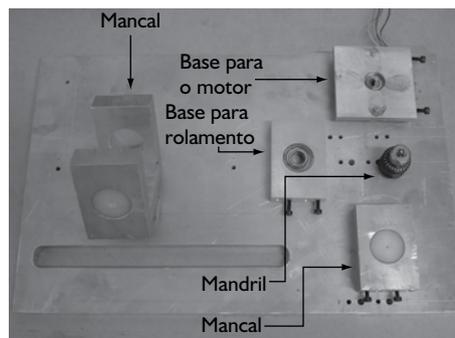
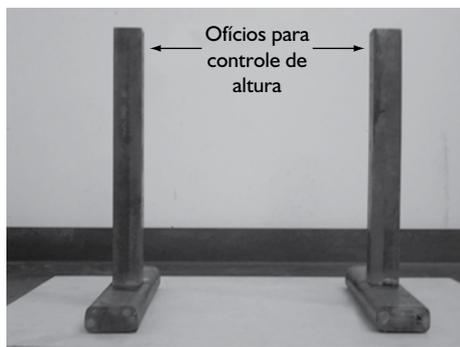


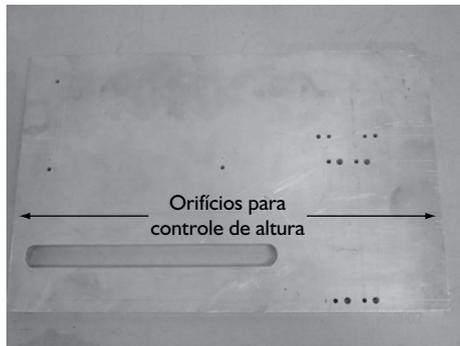
Figura 3. Conjunto de peças para montagem do dispositivo de ensaios de fadiga por flexão alternada.

O dispositivo foi idealizado de forma que os ensaios pudessem ser realizados também em temperatura controlada através da imersão do fio em fluido termo-controlado. Para isso, os suportes da base possuem orifícios laterais com o objetivo de ajustar a altura da base vertical, onde ocorre a fixação do corpo de prova, proporcionando a imersão do material em uma cuba com fluido. A Figura 4 apresenta tais recursos de montagem do dispositivo.

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 5, 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.

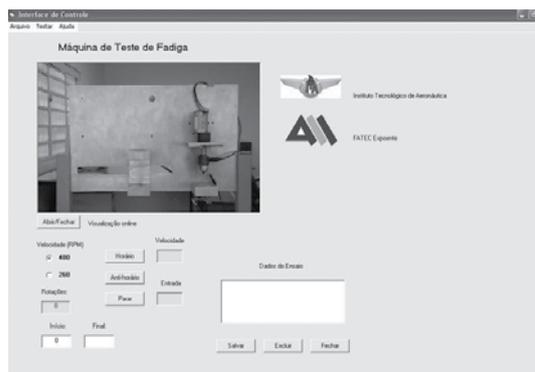


(a)

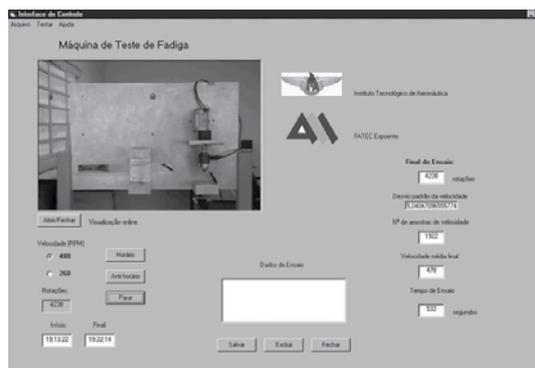


(b)

Figura 4. Suportes da base em a) com os orifícios para controle da altura; e em b) base vertical com os respectivos orifícios para regulagem da altura nos suportes.



(a)



(b)

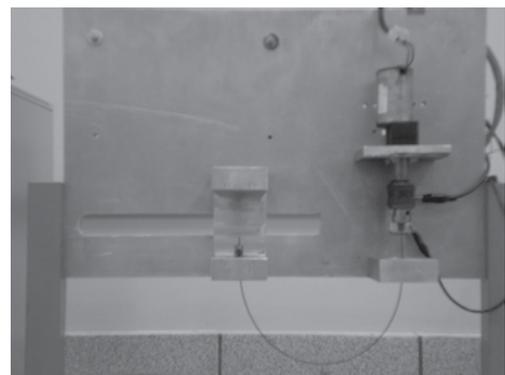
Figura 5. Tela de início do ensaio de fadiga a) com campos de parametrização do processo; e em b) tela de fim do ensaio de fadiga, com campos de resultados.

A velocidade do motor, inserida no campo de velocidade, pode variar de 1 RPM 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. 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.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O dispositivo desenvolvido neste trabalho é apresentado na Figura 6, e dispõe de configuração adequada aos ensaios de fios NiTi em flexão rotativa, compatível aos dispositivos desenvolvidos por Wagner et al.⁽¹⁴⁾ e Patel.⁽²⁰⁾

Na condição de pré-testes foram realizados ensaios em fios de aço inox, diâmetro de 1,0 mm, com o objetivo de economizar amostras de fios de NiTi a serem ensaiadas posteriormente. A seguir, fios de NiTi com diâmetro de 1,4 mm também foram utilizados para os ensaios prévios. Observou-se perda de rotação em relação ao *set point* do sistema. Isso se deveu à baixa potência do motor elétrico, que foi substituído por um outro modelo de corrente contínua; entretanto



(a)



(b)

Figura 6. a) Vista frontal do dispositivo montado; e b) o conjunto aparato e microcomputador.

o valor real da velocidade de rotação foi corretamente indicado pelo sistema, juntamente com o valor médio e o desvio padrão. A lubrificação das buchas com vaselina líquida foi substituída por bissulfeto de molibdênio durante os pré-testes. O dispositivo pode operar ininterruptamente por horas, sem ter seu comportamento alterado. A bucha de nylon com furo cego foi substituída por uma de furo passante para evitar a geração de tração no fio, que não fosse proveniente de sua própria curvatura.

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 robusto e confiável. A disponibilidade de microcomputadores e a versatilidade técnica da linguagem C++ garantiram um resultado satisfatório para o programa de controle. 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®. O desenvolvimento desta metodologia deve proporcionar melhoria do desenvolvimento das propriedades das ligas NiTi com fins de aplicação na área biomédica.

Agradecimentos

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

Ao Centro Educacional Técnico Expoente e Faculdade de Tecnologia Expoente pela contribuição com o projeto e montagem do dispositivo proposto.

Aos técnicos mecânicos de laboratório, Lucas Monteiro Cotta (FATEC-EXPOENTE) e Marco Antônio dos Santos (ITA).

REFERÊNCIAS

- 1 OTUBO, J.; MEI, P.R.; KOSHIMIZU, S. Materiais com efeito memória de forma, características principais e possíveis aplicações. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA (COBEM 97), 14., 1997, Bauru, SP. **Anais...** [S.n.t.] 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**, v. 1, 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, K3 Endo e ProFile. **Revista Brasileira de Odontologia**, v. 60, n. 3, p. 202-4, maio-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.; BERAESTEGUI-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, maio/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, p. 765-9, Nov. 2002.
- 11 HAÏKEL, Y.; SERFATY, R.; BATEMAN, G.; SENGHER, B.; ALLEMAN, C. Dynamic and cyclic fatigue of engine-driven rotary nickel-titanium endodontic instruments. **Journal of Endodontics**. v. 25, n. 6, p. 434-40, Jun. 1999.
- 12 GAMBARINI, G. Cyclic fatigue of ProFile rotary instruments after prolonged clinical use. **International Endodontic Journal**. v. 34, n. 5, p. 386-9, 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, n. 2, p. 251-6, Feb. 2004.
- 14 WAGNER, M.; SAWAGUCHI, T.; KAUSRÄTER, G.; HÖFFKEN, D.; EGGELER, G. Structural fatigue of pseudoelastic NiTi shape memory wires. **Materials Science and Engineering A**. v. 378, n. 1-2, p. 105-9, July 2004.
- 15 YOUNGSIK, K. Fatigue properties of the Ti-Ni base shape memory alloy wire. **Materials Transactions**. v. 43, n. 7, p. 1703-6, 2002.
- 16 SAWAGUCHI, T.; KAUSRÄTER, 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, n. 12, p. 2847-60, Dec. 2003.
- 17 BAHIA, M. G. A. **Resistência a fadiga e comportamento em torção de instrumentos endodônticos de NiTi ProFile**. 2004. 212 p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2004.
- 18 DIAS, R. F. **Efeito da deformação cíclica nas propriedades mecânicas de uma liga níquel-titânio superelástica**. 2005. 158 p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte: UFMG, 2005.
- 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: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 61., 2006, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** São Paulo: ABM, 2006. 1 CD.
- 20 PATEL, M.M. Characterizing fatigue and fracture response of medical grade nickel-titanium alloys by rotary beam testing. Disponível em: <http://www.fwmetals.com/resources_whitepapers/Niti_Wire_Fatigue.pdf>. Acesso em: 23 fev 2006.

Recebido em: 22/11/07

Aceito em: 09/04/08

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 62., 2007, Vitória, ES. São Paulo: ABM, 2007.