

PROJETO, FABRICAÇÃO E QUALIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTO PARA FLEXÃO ROTATIVA DE FIOS SUPERELÁSTICOS DE NITI EM ENSAIOS DE FADIGA*

William Marcos Muniz Menezes¹
Tibério César Uchôa Matheus²
Jorge Otubo³

Resumo

Neste trabalho foi desenvolvido um equipamento de flexão rotativa para ensaios de fadiga de fios de NiTi superelásticos, e de outros materiais com elevada elasticidade. Avaliou-se o seu desempenho, a robustez, a operacionalidade, e a confiabilidade mediante ensaios de fios de aço inox, com diâmetro aproximado de 1 mm. Este dispositivo é montado em uma estrutura de aço, e possui controle semiautomático de velocidade de rotação, tempo de ensaio e temperatura de banho para imersão da amostra. Os ensaios de qualificação do equipamento foram realizados com controle dos seguintes parâmetros: deformação do fio, nível de potência e temperatura ambiente. Os resultados indicaram baixas discrepâncias para os seguintes parâmetros avaliados: número de ciclos de vida em fadiga, velocidade de rotação, temperatura do meio fluido e ângulo do arco de ruptura. Além da confiabilidade, a robustez e a operacionalidade do equipamento também atendem aos propósitos da pesquisa conforme ficou evidenciado pelo pequeno número de falhas ocorridas nos ensaios de qualificação e calibração.

Palavras-chave: NiTi; Fadiga por flexão rotativa; Superelasticidade.

PROJECT, MANUFACTURING AND QUALIFICATION OF MACHINE TO ROTARY BENDING OF NITI SUPERELASTIC WIRES IN FATIGUE TESTS

Abstract

In this work it was developed a rotating bending apparatus for fatigue tests of superelastic NiTi wires, and other materials with high elasticity. It was evaluated the performance, robustness, operability, and reliability through testing of 1 mm thick stainless steel wires. This device is mounted on a steel frame and features semiautomatic rotation speed control, time and testing bath temperature for sample immersion. The equipment qualification tests were performed controlling the following parameters: deformation of the wire, power level and ambient temperature. The results indicated lower discrepancies for the following parameters evaluated: number of cycles in fatigue life, rotation speed, the bath temperature and arc angle of rupture. Besides the reliability, the robustness and operability of the equipment also meet the purpose of the research as evidenced by the small number of failures in the qualification tests and calibration.

Keywords: NiTi; Rotary bending fatigue; Superelasticity.

*Dedicado à Memória do Prof. Carlos de Moura Neto

¹Doutor em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Engenheiro Metalurgista, Professor, Faculdade de Tecnologia – FATEC, São José dos Campos, SP, Brasil. E-mail: w3m Engenharia@yahoo.com

²Doutor em Ciência dos Materiais, Mestre em Odontologia, Especialista em Endodontia, Centro de Ciências da Saúde, Departamento de Prótese e Cirurgia Bucofacial, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife, PE, Brasil. E-mail: tcmatheus@yahoo.com.br

³Professor Adjunto do ITA, Divisão de Engenharia Mecânica, São José dos Campos, SP, Brasil. E-mail: jotubo@ita.br

I INTRODUÇÃO

As ligas NiTi (níquel-titânio), desenvolvidas desde a década de 1970, fazem parte de um grupo especial de ligas metálicas que são a dos materiais com EMF (Efeito Memória de Forma). Associada a essa característica está a sua elevada recuperação de forma, da ordem de 7%. Esse nível de recuperação de forma é conhecido como superelasticidade, quando não requerer aquecimento para que ocorra. Considerando inúmeras aplicações, que se estendem da área aeroespacial à médica e odontológica, em função de suas propriedades, pesquisas tem sido feitas para plena compreensão de seus limites funcionais [1].

O projeto e fabricação de um dispositivo nacional adequado para submeter ligas NiTi a um processo de fadiga mecânica por flexão rotativa, é de fundamental importância para o estudo e desenvolvimento desse material. A possibilidade de inferir parâmetros, e obter resposta quantitativa aos esforços de fadiga nesse processo, apresenta-se como indispensável caminho à pesquisa aplicada das potencialidades dessa liga. Sawaguchi *et al.* [2] destacou a resistência à fadiga como uma das mais importantes propriedades mecânicas das ligas com memória de forma, dado o vasto campo de aplicação desse material, também apresentado por Otubo *et al.* [3], em componentes que

serão submetidos à esforços e deformações repetitivas. Dentre as inúmeras possíveis aplicações tecnológicas de tais ligas, podem ser citadas ferramentas endodônticas do tipo limas para tratamento de canal radicular (Figura 1a), arcos ortodônticos (Figura 1b), sensores e atuadores industriais, já utilizados nos dias atuais [4,5].

Diversos pesquisadores desenvolveram dispositivos mecânicos para tal tipo de ensaio, entre os quais podemos citar Wagner *et al.* [6], Patel [7], Figueiredo [8], Figueiredo *et al.* [9], Britto [10], e Matheus *et al.* [11,12].

O dispositivo de ensaio de Wagner *et al.* [6], (Figura 2), consiste na deformação do fio a ser ensaiado por seu arqueamento em uma semi circunferência, por meio de dois mancais com baixo coeficiente de atrito. Uma das extremidades do fio está fixada a um mandril conectado a um sistema motorizado. O dispositivo permite submergir a amostra em um banho termo-controlado.

Patel [7] desenvolveu um dispositivo (Figura 3) que flexiona a amostra do fio na geometria de um arco a 180°, ou seja, em forma de “U”, de maneira similar a Wagner *et al.* [6]. Tanto os dispositivos de Wagner *et al.* [6] quanto de Patel [7] permitem variação do raio de curvatura do fio.

Britto [10] utilizou um dispositivo de raio fixo (Figura 4), destinado a ensaios de limas endodônticas,

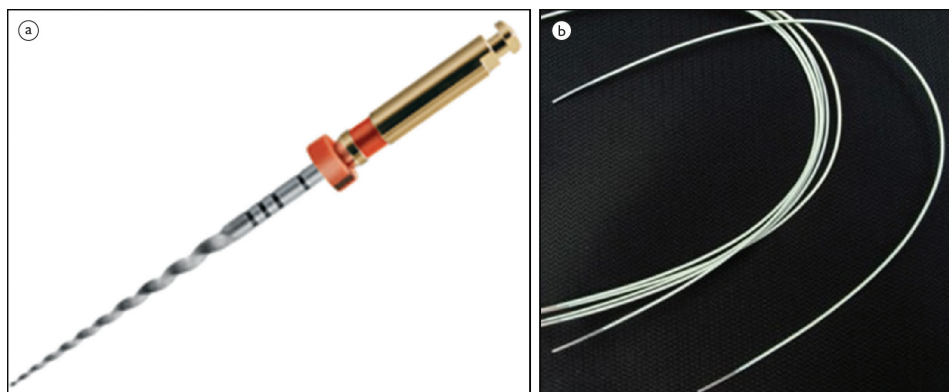


Figura 1. (a) Lima endodôntica para tratamento de canal radicular produzida pela Dentsply [4]; (b) Arcos ortodônticos fornecidos pela Frifit [5].

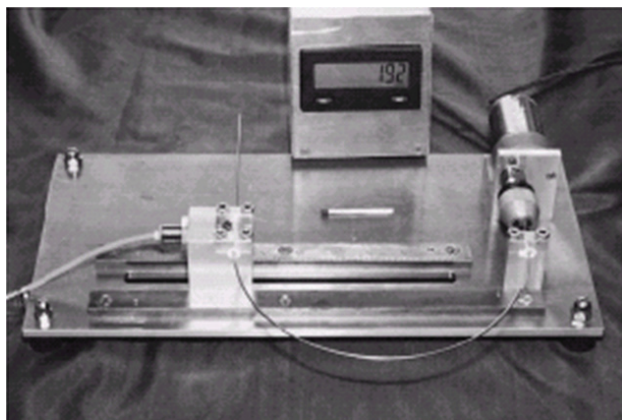


Figura 2. Dispositivo de ensaio de fios desenvolvido por Wagner *et al.* [6].

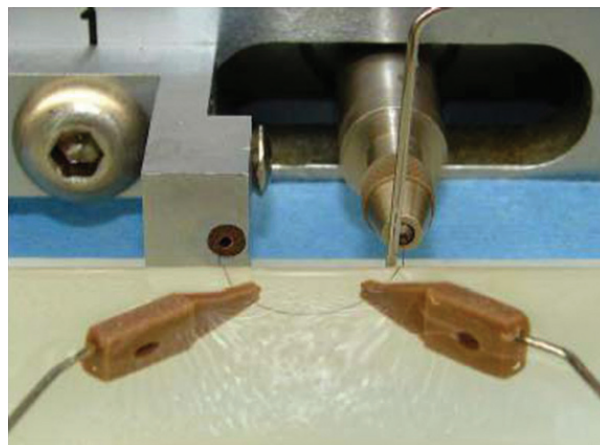


Figura 3. Dispositivo de ensaio de fios em flexão rotativa, de Patel [7].

enquanto Figueiredo [8] utilizou um dispositivo para ensaios de fadiga em fios de NiTi com diâmetro de 1,0 mm, apresentado na Figura 5.

O dispositivo de ensaios projetado e construído por Matheus *et al.* [11] possuía um conjunto operatriz com um robusto sistema de fixação e flexão de fios de elevada flexibilidade. Também era equipado com um interruptor magnético tipo *reed switch* para tomada de sinais dos ciclos, e registro do número de ciclos era feito por um computador.

Com um software de controle e registro de dados, programado em linguagem *Visual Basic*, fez-se o controle do motor de rotação, por meio de um *driver*, por sua vez conectado ao processador por intermédio de um cabo e porta paralela. O sistema utilizou o *clock* do processador como sistema para a totalização dos tempos de ensaios. O conjunto mecânico do dispositivo de Matheus *et al.* [12]



Figura 4. Dispositivo de ensaio em flexão rotativa utilizado por Britto [10].

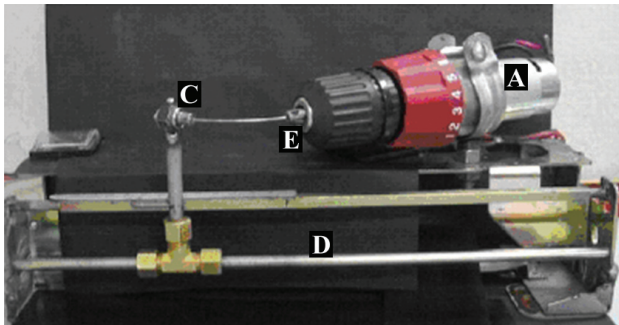


Figura 5. Dispositivo de ensaio em flexão rotativa utilizado por Figueiredo [8].

era similar ao de Wagner *et al.* [6]. O equipamento desenvolvido por Matheus *et al.* [12] é apresentado na Figura 6.

No presente trabalho, desenvolveu-se um novo dispositivo, cujo esquema é apresentado na Figura 7.

Em relação ao dispositivo de Matheus *et al.* [12], o novo equipamento recebeu as seguintes melhorias:

- Sistema de elevada potência para controle da temperatura de banho para imersão da amostra, com comando elétrico em padrão industrial;
- Reservatório com isolamento térmico para líquido do banho termo-controlado;
- Sensor de ciclos com interruptor *reed switch* com padrão industrial;
- Sensor eletromecânico de ruptura do fio (amostra), com modo *reset*;
- Comando dedicado para o sistema de motorização da rotação do fio;

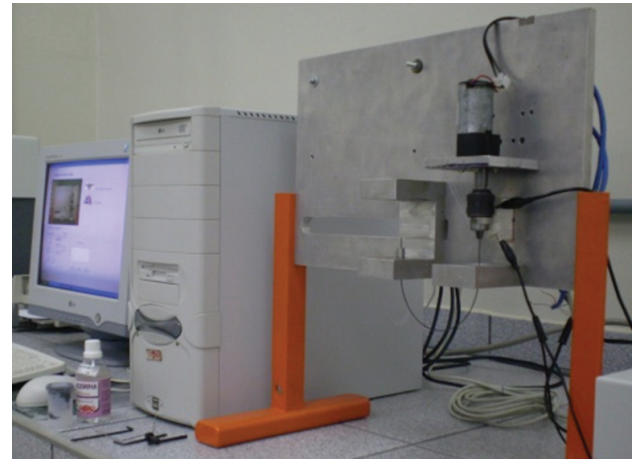


Figura 6. Dispositivo para ensaio de fadiga de fios em flexão rotativa, desenvolvido por Matheus *et al.* [12].

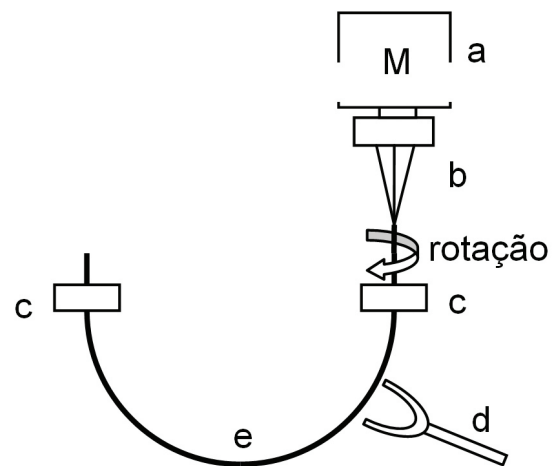


Figura 7. Desenho esquemático da máquina de flexão rotativa indicando o motor (a), o mandril para fixação da amostra (b), os mancais de apoio da amostra (c), o apalpador que identifica a ruptura da amostra (d), e a amostra de fio posicionada em flexão (e).

- Totalizador eletrônico de ciclos com padrão industrial;
- Totalizador eletrônico de tempo de ensaio com padrão industrial; e
- Estrutura em perfilado de aço para integração de subconjuntos.

Os dados do equipamento de ensaio de fadiga são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Os elementos estruturais, mecânicos e elétricos que compõem o equipamento ora desenvolvido para ensaio de fadiga, são apresentados na Figura 8.

É importante ressaltar que o desenvolvimento do equipamento requereu duas etapas distintas, relativas ao projeto e fabricação de subconjuntos, e integração elétrica, eletrônica e mecânica. A necessidade de desenvolvimento de alguns subconjuntos deveu-se à especificidade do equipamento.

1.1 Subconjuntos do Equipamento

O equipamento é constituído por três subconjuntos dados a seguir:

Tabela 1. Características do sistema de acionamento e controle de rotação

Tensão de alimentação		12 V _{CC}
Potência (em vazio), P	Nível 1 (baixa)	1,66 W
	Nível 2 (alta)	2,29 W
Potência máxima (carga), P _{max}		14,4 W
Tensão no motor, U	Nível 1 (baixa)	8,3 V
	Nível 2 (alta)	10,4 V
Corrente elétrica máxima (carga), I _{max}	Máxima	1,2 A
Velocidade de rotação em vazio, n	Nível 1 (baixa)	635 rpm
	Nível 2 (alta)	486 rpm
Fusível		1,2 A
Totalizador de tempo, resolução		0,01h
Diâmetro de fio, Ø	Ø mínimo	0,5 mm
	Ø máximo	4,0 mm
Raio de curvatura em flexão, R	R mínimo	40 mm
	R máximo	85 mm
Dimensões	Largura	880 mm
	Altura	600 mm
	Profundidade	310 mm
Massa do conjunto		13 kg

Tabela 2. Características do sistema de controle da temperatura do banho

Tensão de alimentação		220 V _{CA}
Potência, P		2.200 W
Potência do motor de agitação, P _{mot}		4 W
Velocidade de rotação em vazio, n		2,5/3 rpm
Fusível do motor		0,2 A
Fusível do aquecedor		10 A
Chave contatora	Telemecanique LC1K 06	15 A
Controle de temperatura	FULL GAUGE TIC-I7RGTi	-50°C a 105°C

- Pórtico ou suporte de aço – o pórtico foi desenvolvido com a finalidade de integrar todos os subconjuntos numa montagem mecânica. Trata-se de uma estrutura em aço com geometria e acessórios destinados ao encaixe de outros subconjuntos e fixação de elementos de instrumentação e controle;
- Chassi – embora esse subconjunto seja originário da máquina desenvolvida por Matheus *et al.* [12] recebeu algumas modificações como a ajustagem da extremidade da guia do mancal deslizante, para permitir menores raios de flexão da amostra, passando de 50 para 40 mm, e o polimento do chassi e dos mancais; e
- Comando elétrico – esse dispositivo foi desenvolvido em padrão industrial, capaz de acionar o motorreductor e também efetuar a instrumentação e controle do processo.

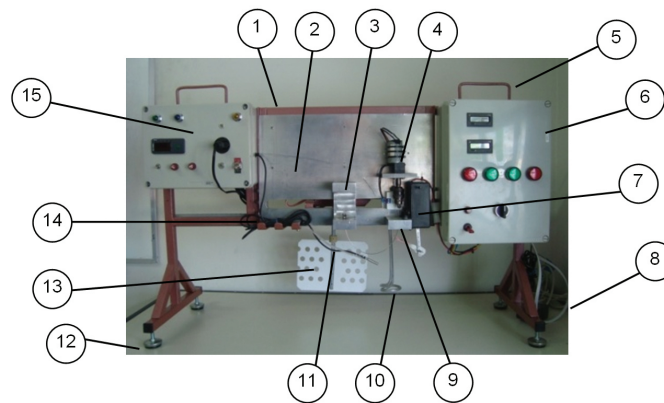
A Figura 9 apresenta a caixa de comando do sistema de rotação de fios após sua montagem final.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O uso de aço inoxidável nos ensaios de qualificação foi em função de sua flexibilidade, uma vez que arames de aço recozido e galvanizado, utilizados em testes preliminares, fraturaram por torção antes mesmo que sofressem falha por fadiga; por outro lado, os fios de NiTi apresentam vida em fadiga superior aos fios de aço inoxidável, numa ordem de 10 a 100 vezes segundo Matheus [13].

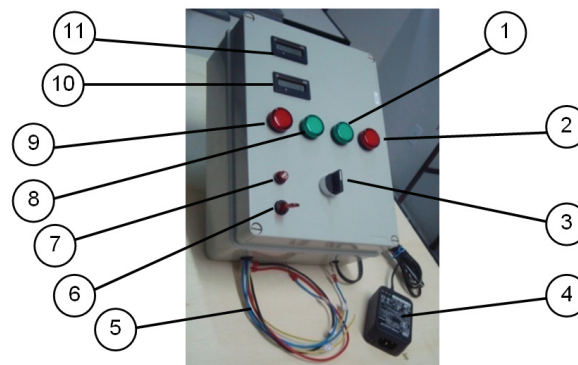
Os corpos de prova foram preparados e ensaiados segundo a sequência:

- Limpeza do rolo de fio;
- Medição do comprimento da amostra e corte com alicate universal 8 pol;
- Medição com micrômetro do diâmetro da amostra;
- Montagem da amostra nos mancais do dispositivo de ensaio, ajustando-se o arco de flexão do fio com raio de 60 mm por meio de um calibrador em PVC;
- Ensaio de flexão rotativa;
- Medição, após ruptura, do comprimento da semi-haste fixada ao mandril; e
- Aplicação de etiqueta para identificação da amostra.



Item	Descrição	Item	Descrição
1	Pórtico ou suporte de aço	9	Mancal fixo
2	Chassis de alumínio	10	Resistência para aquecimento do banho
3	Mancal deslizante	11	Suporte móvel para sensor de temperatura
4	Moto redutor	12	Sapata de nivelamento
5	Alça para transporte	13	Pá de agitação do banho
6	Comando do sistema de rotação da amostra	14	Suporte do cabo elétrico do sensor de temperatura
7	Sensor de ruptura da amostra	15	Comando do aquecimento e agitação do banho
8	Cabos de alimentação		

Figura 8. Elementos em vista frontal da máquina de ensaio de fadiga.



1	Sinalizador de rotação em nível 2 (alto).
2	Sinalizador de apalpador em posição de quebra de fio.
3	Chave comutadora giratório para seleção do nível de rotação.
4	Fonte com entrada 110V/220V _{CA} - 600mA; saída 12V _{CC} - 1250mA.
5	Chicote de cabos de potência, instrumentação e controle.
6	Chave comutadora tic-tac para energização do comando.
7	Fusível de proteção elétrica de 1,2 A.
8	Sinalizador de rotação em nível 1 (baixo)
9	Sinalizador de energização do painel.
10	Totalizador de ciclos E520-COEL, por contato seco.
11	Totalizador de tempo E520-COEL, por pulso de tensão.

Figura 9. Caixa de comando do sistema de rotação de fios em flexão.

3 DISCUSSÃO

A qualificação do dispositivo de ensaio é aqui entendida como sua capacidade de gerar medidas de elevada aderência ao comportamento real do material; para tanto, os fatores robustez e operacionalidade foram avaliados de forma atributiva, enquanto que a confiabilidade foi avaliada quantitativamente.

3.1 Robustez do Equipamento

Os itens avaliados nesta qualificação são apresentados na Tabela 3.

As condições de falhas, presentes nos testes preliminares, foram solucionadas e não reincidiram nos ensaios de qualificação do equipamento. O apalpador, a única peça que apresentou quebra, trata-se de uma haste que quando

tocada pelo fio fraturado no ensaio de fadiga, interrompe o funcionamento do motor.

avaliados, referentes às condições de operacionalidade do equipamento de ensaio de fadiga.

3.2 Operacionalidade

As condições de operação e controle do equipamento mostraram-se mais relevantes à medida que aumentaram a quantidade de ensaios, e o tempo de duração de cada um. A Tabela 4 apresenta os itens

3.3 Confiabilidade das Medidas

A discrepância das medidas foi avaliada por análise comparativa de valores obtidos por instrumentos distintos. Os parâmetros fornecidos pelos ensaios e as especificações dos instrumentos utilizados nas medidas são apresentados nas Tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 3. Avaliação de itens de robustez do equipamento

Item avaliado	Comentário	Propósito atendido? (Sim/Não)
Aquecimento ou queima de motores elétricos, circuitos eletro-eletrônicos, sinalizadores e cabos elétricos.	Nenhum aquecimento ou queima foi observado.	Sim
Falha de chaves comutadoras.	Não ocorreu falha de chaves comutadoras em suas operações.	Sim
Falha do sistema sensor de ciclos (<i>reed switch</i> e bloco sensor).	Não ocorreu falha do sensor.	Sim
Falha do bloco sensor de ciclos.	Não ocorreu falha do bloco sensor.	Sim
Falha do apalpador do sensor de ruptura do fio.	O apalpador sofreu ruptura ainda nos ensaios preliminares e foi substituído por outro fabricado em PVC que operou sem falhas.	Não
Falha da caixa comutadora do sensor de quebra de fio.	A caixa comutadora necessitou de reparos de alinhamento da haste principal, de lubrificação dos mancais das hastes secundárias, e modificação da haste de reset, que sofria travamento de seu movimento.	Sim
Variação da velocidade de rotação do eixo-mandril.	O desvio padrão médio dos valores de rotação para cada amostra foi de 5,57 rpm, ou seja, cerca de 1,15% do valor médio das rotações.	Sim
Falha de fusíveis de proteção elétrica.	Não ocorreram falhas de fusíveis.	Sim
Nível de ruído e vibração	Operação com baixo nível de ruído e vibração.	Sim

Tabela 4. Avaliação da operacionalidade do equipamento de ensaio de fadiga

Elemento de controle e acompanhamento do procedimento de ensaio.	Comentário	Atendimento do propósito (Sim/Não)
Montagem da amostra de fio no dispositivo	Arqueamento manual do fio (amostra) e montagem nos mancais e mandril.	Sim
Acionamento das chaves comutadoras do motorredutor, do controle de temperatura e agitação do banho.	Modelo <i>tic-tac</i> de fácil operação.	Sim
Acionamento da chave comutadora do nível de velocidade de rotação.	Modelo rotativo 1-0-2 de fácil operação.	Sim
Sinalização de energização do comando motorredutor, de aquecimento e agitação do banho.	Sinalizadores de Ø22mm com luzes vermelhas e verdes tipo LED, e de Ø1/2" com luz amarela, azul e verde, de fácil visualização.	Sim
Medição do tempo e do número de ciclos, com reset manual.	Indicação de ciclos por totalizador digital COEL E520.	Sim
Medição da temperatura de banho ou ambiente, com programação de <i>set point</i> , para acionamento automático do aquecimento e agitação.	Indicação de temperatura por controlador digital FULL GAUGE TIC-17RGTi, com display em LED vermelho de fácil visualização, e sensor de temperatura tipo NTC.	Sim
Ajuste de posicionamentos diversos (curvatura do fio, sensores, resistência de aquecimento do banho, arqueamento da amostra).	Uso de hastes de suporte, guias deslizantes, fixação com parafusos e calibrador de arco em PVC.	Sim

Tabela 5. Avaliação de itens de confiabilidade de medidas

Item	Comentário	Discrepância (%)	Atendimento do propósito (Sim/Não)
Número de ciclos	O totalizador da máquina indicou média de 866,8 ciclos para cada ensaio, enquanto o tacômetro óptico e o cronômetro apontaram uma média de 870,5 ciclos de vida em fadiga.	0,42%	Sim
Tempo de ciclagem	A faixa média de tempo medida pelo totalizador foi de 0,02 a 0,03 h, enquanto que o tempo médio obtido pelo cronômetro foi de 1,80 min.	18,3%	Não para baixos tempos de ciclagem.
Velocidade de rotação	Valor médio de 498,2 rpm obtido pelo totalizador de ciclos e totalizador de tempo, e valor médio de rotação obtido pelo tacômetro óptico de 483,6 rpm.	2,93%	Sim
Temperatura do meio fluido	Temperatura indicada pelo controlador do equipamento, de 29°C, e valor indicado pelo pirômetro de 28°C.	3,45%	Sim
Ângulo do arco de ruptura (α)	Valor médio de $\pm 4,7^\circ$ do ponto médio do arco em fadiga máxima de $\pm 20^\circ$	Não há	Sim

Tabela 6. Instrumentos para tomada de medidas dos ensaios de fadiga por flexão e rotação de fios

Forma de uso	Tipo	Fabricante/Modelo
Instrumentos de painel de controle, do equipamento de ensaio fadiga (referência)	Totalizador de ciclos	COEL / E520
	Totalizador de tempo	COEL / E520
	Controlador de temperatura	FULL GAUGE / TIC-17RGTi
Instrumento portátil (comparativo)	Tacômetro	MINIPA / MDT-2244B
	Cronômetro	KADIO / KD-1069
	Pirômetro	MINIPA / ET-1400

4 CONCLUSÃO

O equipamento para ensaio de flexão rotativa de fios de elevada elasticidade, atende aos propósitos de pesquisa de comportamento em fadiga de ligas NiTi superelásticas. O equipamento mostrou ser robusto e a operacionalidade mostrou-se altamente satisfatória.

O fator confiabilidade completa essa tripla avaliação para qualificação do equipamento de ensaio, uma vez que as medidas de variáveis essenciais, como número de ciclos e velocidade de rotação, apresentaram discrepân-

cias máximas da ordem de 3,45%. No caso das ligas de NiTi, a discrepância do tempo de ciclagem deverá reduzir-se sensivelmente dada sua elevada vida em fadiga quando comparada ao aço inoxidável.

Agradecimentos

Ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA – pela oportunidade de pesquisa e pela disponibilização de seus recursos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

REFERÊNCIAS

- 1 Dias RF. Efeito da deformação cíclica nas propriedades mecânicas de uma liga níquel-titânio superelástica [tese]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2005.
- 2 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. 2003;34A(12):2847-60.
- 3 Otubo J, Mei PR, Koshimizu S. Materiais com efeito de memória de forma, características principais e possíveis aplicações. In: Anais do 14º Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica; 8-12 de dezembro de 1997; Bauru, Brasil. Bauru: COBEM 97; 1997. p.1-8. [CD-ROM].
- 4 Dentsply [imagem da internet]. 2013 [acesso em 15 abr. 2013]. York: Dentsply. Disponível em: <http://www.dentsply.com.br>.
- 5 Frifit [imagem da internet]. 2013. Shenzhen: Shenzhen Frifit Development Co., limited [acesso em 15 abr. 2013]. Disponível em: <http://www.frifit.com>.

- 6 Wagner M, Sawaguchi T, Kausträter G, Höffken D, Eggeler G. Structural fatigue of pseudoelastic NiTi shape memory wires. *Materials Science and Engineering A*. 2004;378(1-2):105-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2003.11.058>
- 7 Patel MM. Characterizing fatigue and fracture response of medical grade nickel-titanium alloys by rotary beam testing. *Fort Wayne Metals*. 2005 [acesso em 23 fev. 2006]. Disponível em: <http://www.fwmetals.com>.
- 8 Figueiredo AMG. Caracterização da fadiga mecânica de baixo ciclo em ligas superelásticas de NiTi [tese]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2006.
- 9 Figueiredo AMG, Modenesi PJ, Buono VTL. Curvas de vida em fadiga de baixo ciclo de ligas superelásticas de NiTi. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. 2006;3(2):55-59. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.00302011>
- 10 Britto, IMO. Ensaio de flexão rotativa estático e dinâmico: influência no número de ciclos para ocorrer a fratura do instrumento endodôntico [tese]. Rio de Janeiro: Universidade Estácio de Sá; 2009.
- 11 Matheus TCU, Magalhães HO, Menezes WMM, Rigo OD, Viana SC, Otubo J. Desenvolvimento de um dispositivo para ensaios de fios de ligas NiTi em fadiga por flexão rotativa. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Anais do 62º Congresso ABM International; 23-27 de julho de 2007; Vitória, Brasil. São Paulo: ABM; 2007. p. 1333-43.
- 12 Matheus TCU, Magalhães HO, Menezes WMM, Rigo OD, Viana CSC, Otubo J. Dispositivo para flexão rotativa de fios NiTi em ensaio de fadiga. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. 2008;4(4):47-52. <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.00404009>
- 13 Matheus TCU. Efeito do teor de carbono e da qualidade superficial na vida em fadiga de fios de NiTi visando aplicações endodônticas [tese]. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia; 2008.

Recebido em: 30/09/2013

Aceito em: 29/01/2014