

## AVALIAÇÃO DIMENSIONAL E INTEGRIDADE SUPERFICIAL EM PEÇAS DE NITINOL USINADAS POR ELETROEROSÃO

Boeira, A.M.G., [angelo.boeira@sc.senai.br](mailto:angelo.boeira@sc.senai.br)<sup>1</sup>  
Schlotefeldt, A.A., [alceri@sc.senai.br](mailto:alceri@sc.senai.br)<sup>1</sup>  
Kasten, F., [fernando.kasten@sc.senai.br](mailto:fernando.kasten@sc.senai.br)<sup>1</sup>  
Oliveira, H.R., [henrique@biokyra.com](mailto:henrique@biokyra.com)<sup>2</sup>  
Santos, E.C., [edson.costa@sc.senai.br](mailto:edson.costa@sc.senai.br)<sup>1</sup>  
Zanatta, A.M., [andre.zanatta@sc.senai.br](mailto:andre.zanatta@sc.senai.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Senai de Inovação em Sistemas de Manufatura, Rua Arno Waldemar Doehler 957, CEP: 89219-510, Joinville, SC, Brasil

<sup>2</sup>Biokyra Pesquisa e Desenvolvimento, Rua Lauro Linhares 2055, Sala 107, Torre MAX, CEP: 88036-003, Florianópolis, SC, Brasil

### Resumo:

A aplicação da liga intermetálica Nitinol (Ni-Ti) em dispositivos cirúrgicos e implantes ortodônticos, endovasculares, bem como na automação industrial torna-se cada vez mais frequente, devido principalmente às suas características de biocompatibilidade, memória de forma, superelasticidade, resistência à corrosão e à fadiga, fazendo com que haja aumento na demanda destes componentes, e consequentemente a expectativa de redução de custos e tempos de execução. A maior dificuldade de obtenção destes componentes utilizando processos convencionais de usinagem está relacionada ao desgaste excessivo das ferramentas de corte, causado principalmente pela alta dureza e elevada resistência mecânica do Nitinol. Outro fator que contribui para o desgaste é o alto grau de abrasividade da superfície causado pelo óxido de titânio, elevando assim os custos com ferramentas de corte. No caso da furação, a obtenção de micro-furos apresenta uma dificuldade adicional que é o aparecimento do gume postiço, tornando-a inviável para furos onde a razão comprimento da broca / diâmetro do furo (L/D) é grande. Com o objetivo de fornecer uma alternativa que viabilize a obtenção de micro-componentes em Nitinol é proposta, neste trabalho, a utilização do processo de eletroerosão a fio e de furação rápida. No caso de componentes com micro-geometrias complexas, é proposta a utilização do processo de eletroerosão a fio e no caso de micro-furos é proposta a utilização do processo de furação rápida por eletroerosão. Para avaliar a qualidade dos componentes obtidos pelo processo de eletroerosão, será fabricado um componente com uma geometria padronizada que permita realizar uma análise dimensional e da integridade superficial para diferentes parâmetros de processo. A análise dimensional tem por objetivo determinar a capacidade do processo enquanto que a análise da integridade superficial visa determinar e quantificar a camada branca e os danos superficiais causados pelo processo de eletroerosão na região usinada.

**Palavras-chave:** Nitinol, microfabricação, furação rápida por eletroero e eletroerosão a fio.

## 1 INTRODUÇÃO

Nitinol é uma liga dúctil intermetálica de Níquel-Titânio descoberta em 1959 por pesquisadores do Laboratório Naval Ordnance (*U. S. Naval Ordnance Laboratory*), nos Estados Unidos (Sanders, K., 1981; Sanders, K., 1982 e Kauffman et al, 1996; ). Esta liga normalmente é composta por 55% de Níquel e 45% de titânio, o que lhe confere uma alta resistência mecânica e uma elevada proteção contra corrosão, podendo ser utilizada em temperaturas de até 650° C. O nome NITINOL, vem da combinação *Nickel-Titanium-Naval-Ordnance-Laboratory*, e é especialmente conhecido pela sua característica de memória de forma, sendo principalmente utilizado na área médica, como por exemplo na fabricação de válvulas cardíacas (Stoeckel, D., 2000) [1].

A alta dureza e elevada resistência mecânica, características marcantes da liga NiTi, dificultam a remoção de material utilizando processos de usinagem com ferramentas de geometria definida. Estes fatores, em combinação com o alto grau de abrasividade da superfície causado pelo óxido de titânio, determinam um acentuado desgaste das ferramentas de corte. Este desgaste acentuado da ferramenta limita os processos de usinagem, tornando-o dispendioso e demorado. Outro fator determinante na piora da usinabilidade do Nitinol é o coeficiente de expansão térmica muito baixo que dificulta a dissipação do calor gerado durante a usinagem pelo cavaco (Malcolm, K. et al, 2012) [4]. Como consequência, o calor gerado pelo processo de remoção do material fica concentrado na região do gume da ferramenta de corte, ocasionando perda de propriedades mecânicas, que juntamente com a adesão acentuada de material na face da ferramenta (gume postiço), causam desgaste elevado e até mesmo lascamentos e ruptura da ferramenta (Muthukrishnan, N. et al, 2011 e Veiga, C. et al, 2013.) [5,6].

Como alternativa aos processos de usinagem convencionais utilizando ferramentas de corte com geometria definida (brocas, fresas e pastilhas de torneamento), é proposto neste trabalho a utilização do processo de eletroerosão. A

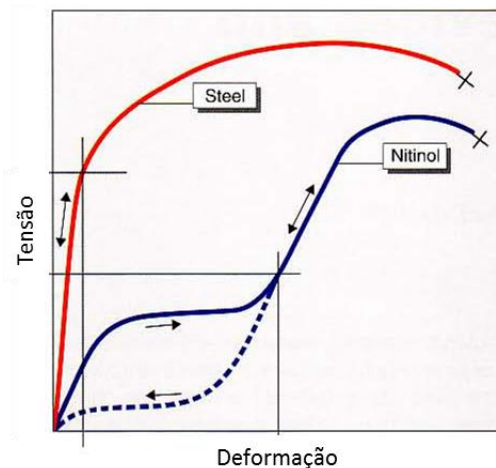
principal vantagem do processo de eletroerosão é a possibilidade de trabalhar qualquer material, desde que o mesmo seja condutor elétrico, independente de sua dureza ou propriedades mecânicas. Os processos de eletroerosão podem ser por penetração, a fio ou de furação rápida.

## 2 CARACTERÍSTICAS ESPECIAIS DO NITINOL

O Nitinol é um material que tem como principais propriedades a extrema elasticidade e memória de forma. Além destas características, o Nitinol apresenta outras propriedades que ampliam a sua gama de aplicação (Stoeckel, D., 2000 e Elahinia, M. H. et al, 2012) [1, 2]. Dentre elas podemos destacar:

- Memória térmica de forma;
- Superelasticidade;
- Resistência ao dobramento;
- Tensão constante;
- Tensão com histerese;
- Dependência da tensão com temperatura.

A Figura (1) mostra o comparativo das propriedades do Nitinol em relação ao aço. As principais características como elevada elasticidade, tensão constante e tensão com histerese estão exemplificadas nesta figura (Stoeckel, D., 2000 e Elahinia, M. H. et al, 2012) [1, 2].



**Figura 1 – Comparativo entre aço e Nitinol (Stoeckel, D., 2000 e Elahinia, M. H. et al, 2012) [1,2].**

A tabela (1) apresenta um comparativo das propriedades físicas e mecânicas de um aço inoxidável e da liga Nitinol (Elahinia, M. H. et al, 2012) [2].

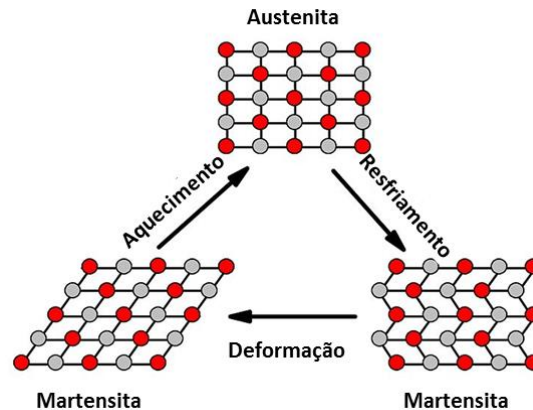
A propriedade de memória de forma é a característica mais marcante do Nitinol. O efeito de memória de forma é uma propriedade que alguns materiais apresentam de retornar a sua forma original após passar por um processo de aquecimento. O aquecimento da peça faz com a transformação cristalina seja totalmente reversível, ou seja, os átomos se deslocam ao mesmo tempo formando uma nova estrutura cristalina. Para diferentes temperaturas o material assume diferentes estruturas (Stoeckel, D., 2000; Elahinia, M. H. et al, 2012 e Pelton, A.R. et al, 2000) [1,2,3].

**Tabela 1 - Propriedades físicas e mecânicas do Nitinol e do aço inoxidável (Elahinia, M. H. et al, 2012) [2]**

Propriedade	Nitinol	Aço inoxidável
Deformação Elástica	8,0%	0,8%
Resistência à tração [Mpa]	1240	760
Modulo Elasticidade [Gpa]	48	193
Coefficiente de expansão térmica [cm/cm/°C]		
Martensita	6,6x10-6	17,3x10-6
Austenita	11,0x10-6	

No caso do Nitinol, em altas temperaturas o material assume a estrutura cristalina da austenita, enquanto que em baixas temperaturas o Nitinol assume espontaneamente a estrutura mais complexa da martensita, como mostra a Figura

(2). O efeito da superelasticidade ocorre na fase martensítica do Nitinol (Stoeckel, D., 2000; Elahinia, M. H. et al, 2012 e Pelton, A.R. et al, 2000) [1,2,3].



**Figura 2 – Transformação cristalina do Nitinol. Efeito de memória de forma (Stoeckel, D., 2000 e Elahinia, M. H. et al, 2012) [1,2].**

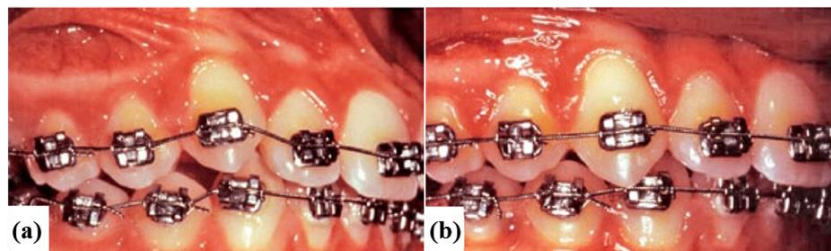
### 3 APLICAÇÕES DO NITINOL

As excelentes propriedades mecânicas do Nitinol, visto que esse material tem qualidades iguais ou superiores ao aço inoxidável ABNT 316L e à liga de titânio ASTM F 136, aliadas a biocompatibilidade, a boa resistência à corrosão e à fadiga justificam a ampla e crescente aplicação deste material. Assim, exemplos de aplicação do Nitinol podem ser encontrados em diversas áreas, tais como (Stoeckel, D., 2000; Elahinia, M. H. et al, 2012 e Cederstrom, J. et al, 1995) [1, 2, 7]:

- Na área da ortodontia, com fios e arcos ortodônticos, onde teve sua primeira aplicação médica do Nitinol, durante os anos 70;
- Na área médica endovascular, com *stents*, guias endovasculares, endopróteses para o tratamento de aneurismas e filtros de veia cava;
- Na área médica ortopédica, com sistema de correção de escoliose, tecidos porosos superplásticos para a reconstituição de ligamentos, fixadores para ossos fraturados e instrumentais cirúrgicos;
- Na área de automação, com válvula para compensar a variação de viscosidade com a temperatura em transmissões automotivas da Daimler-Benz e micro atuadores para espelhos de scanners.

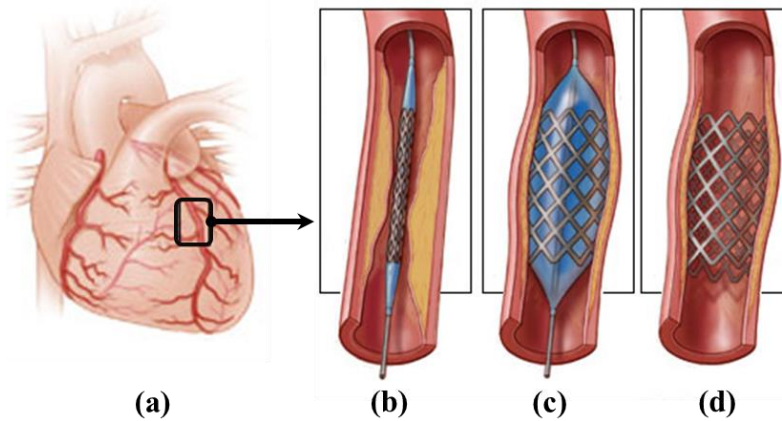
As aplicações do Nitinol na área médica estão relacionadas mais com os dispositivos médicos empregados na odontologia e em procedimentos cirúrgicos minimamente invasivos, nos quais o cirurgião busca minimizar a exposição e o contato da região interna do paciente com o ambiente externo.

Na odontologia, pode-se citar a utilização de Nitinol para a fabricação de fios ortodônticos, pois essa liga proporciona forças mais leves e constantes (quando comparadas aos aços inoxidáveis) durante o tratamento ortodôntico, evitando assim danos ao tecido periodontal do paciente e, conseqüentemente, proporcionando períodos mais curtos de tratamento e um melhor conforto para o paciente, como ilustrado na Figura (3). Além disso, o amplo patamar de deformação elástica das ligas de Ni-Ti permitem maior segurança e liberdade ao ortodontista durante a manipulação do arame para ajustá-lo ao paciente, praticamente garantindo que não ocorrerão deformações plásticas (definitivas) durante o procedimento de ajuste ao paciente (Quintão, C.C., 2000)[8].



**Figura 3 – Exemplo de aplicação do fio de nitinol na ortodontia no início (a) e ao final (b) do tratamento de alinhamento do arco dentário [8].**

Um exemplo de aplicação do Nitinol na área de médica endovascular pode ser encontrado nos *stents*, estruturas tubulares expansíveis radialmente que são utilizadas em vasos com restrições de fluxo. Esses têm o objetivo de reconstituir o fluxo no vaso por meio da expansão da seção transversal do vaso. Também existem *stents* farmacológicos, os quais têm na sua superfície a adição de um fármaco que é liberado localmente junto ao fluxo sanguíneo. A Figura (4) exemplifica três dos passos do procedimento de implantação de um *stent* coronário: navegação até o local onde será implantado (4b), expansão do *stent* por balão (4c) e após a retirada do sistema de entrega com o *stent* implantado (4d) [9].



**Figura 4 – Exemplo de três dos passos do procedimento de implante de um *stent* coronário [9].**

Conforme apresentado no exemplo do filtro de veia cava, quanto menor for o diâmetro no qual o dispositivo consiga navegar dentro do corpo, menores serão os riscos do procedimento e os danos e exposição do paciente. Assim, o mercado de dispositivos médicos minimamente invasivos vem no decorrer do tempo desenvolvendo soluções e produtos cada vez menores, o que acaba por impactar diretamente no desenvolvimento de processos de manufatura cada vez mais precisos e em uma escala menor. Desta forma, amplia-se ainda mais a dificuldade de manufaturar um material que possui suas propriedades mecânicas e sua estrutura cristalina muito sensíveis a temperatura e as deformações, aumentando assim, a quantidade de parâmetros a serem controlados e a complexidade do processo de fabricação [9].

## 4 PROCESSOS DE MANUFATURA

De modo geral, os componentes em Nitinol podem ser obtidos utilizando os processos convencionais de manufatura com torneamento, fresamento, furação e retificação. Contudo, estes mesmos componentes podem ser obtidos por processos de manufatura não convencionais como eletroerosão, sendo em muitos casos a única forma econômica de obtenção dos mesmos.

Neste trabalho é apresentado um estudo para obtenção de componentes em Nitinol para aplicação medicinal utilizando os processos de eletroerosão, sendo o de furação rápida para obtenção de furos e a eletroerosão à fio para confecção de rasgos e contornos.

### 4.1 Componente

Para este estudo, o grupo de pesquisa em usinagem do Instituto SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura (ISI-SM) desenvolveu uma peça padrão em Nitinol com 3,0 mm de diâmetro e 3,0 mm de comprimento que inclui operações de furação profunda e obtenção de rasgos, como mostra a Figura (5). A tolerância geral do diâmetro dos furos, do raio dos rasgos e de posicionamento é de 0,15 mm.

O objetivo de utilizar esta peça padrão é possibilitar a avaliação do diâmetro e do posicionamento dos furos obtidos pelo processo de furação rápida, bem como do diâmetro e do posicionamento dos rasgos obtidos pelo processo de corte a fio.

## 5 EQUIPAMENTOS

### 5.1 Eletroerosão à Fio

A máquina de eletroerosão à fio utilizada para obtenção dos componentes em Nitinol é da marca AgieChramilles, modelo CUT 20 P. O curso total dos eixos XYZ é de 350/250/250 mm, respectivamente. O diâmetro do fio varia de 0,15 a 0,3 mm, podendo ser inclinado em até 25°. O equipamento permite obter rugosidade de 0,25 µm com um erro de

posicionamento de  $\pm 0,1 \mu\text{m}$ . A capacidade máxima de carga é de 400 kg com área útil de trabalho de 900/680/250 mm, respectivamente para os eixos XYZ.

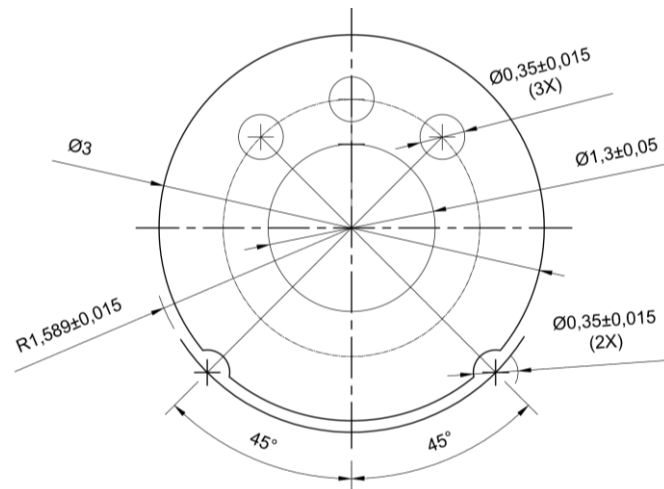


Figura 5 – Peça padrão.

## 5.2 Furação Rápida por Eletroerosão

O equipamento de furação rápida por eletroerosão disponível para fabricação dos componentes é da marca AgieChramilles, modelo Drill 20. O curso da máquina é de 400/300/200 mm para os eixos XYZ, respectivamente. A capacidade de furação varia de 0,3 a 3,0 mm, com incrementos de 0,1 mm no diâmetro. O avanço rápido em XYZ é de 800 mm/min, com avanço incremental de  $1 \mu\text{m}$  e erro de posicionamento de  $\pm 0,3 \mu\text{m}$ .

Normalmente o processo de furação rápida é utilizado para preparar furos para inserção do fio de componentes que serão fabricados pelo processo de eletroerosão a fio. Neste trabalho estamos propondo a utilização do processo de furação rápida para fabricação efetiva de peças, mais especificamente a obtenção de furos profundos que apresentam dificuldades de serem fabricados por processos convencionais de usinagem.

## 6 FABRICAÇÃO DOS COMPONENTES

Para a fabricação dos componentes utilizando os dois processos de eletroerosão, à fio e de furação rápida, desenvolvido da, foi a fixação da peça nas duas máquinas foi feita utilizando um dispositivo especial que possibilita a operação de furação dos diâmetros de 0,35 e 1,30 mm e a passagem do fio para usinar o rasgo de 0,175 mm de raio, como mostra a Figura (6). Como o mesmo dispositivo é utilizado nas duas máquinas, o referenciamento é feito utilizando uma superfície para alinhar e um furo para posicionamento da peça em relação à máquina.



Figura 6 – Dispositivo de fixação.

### 6.1 Parâmetros de processo

Os parâmetros de processo utilizados para fabricação dos componentes serão descritos a seguir.

### 6.1.1 Processo 1: Furo de diâmetro 1,30 mm e 0,35 mm

Para o furo de 1,30 mm foi utilizado um eletrodo de cobre com diâmetro de 1,2 mm e comprimento de 300 mm. A Tabela (2) mostra os parâmetros utilizados no processo de furação rápida.

**Tabela 2 – Parâmetros de processo para o eletrodo de 1,2 mm de diâmetro.**

Ø [mm]	Folga [mm]	Altura [mm]	Pressão [MPa]	Tensão [V]	Corrente [A]	Desgaste [%]	Tempo [s]
1,2	1.0	2,0	8	25 ~30	4	275	42

Para fabricação do furo de 1,3 mm foi utilizado o seguinte procedimento:

- Alinhar e referenciar o dispositivo de fixação na máquina;
- Fixar a peça na máquina utilizando o dispositivo de fixação;
- Montar o eletrodo de 1,2 mm na máquina;
- Determinar a altura do eletrodo de 1,2 mm;
- Centrar o eletrodo em relação a peça utilizando o furo de referência;
- Posicionamento do eletrodo via programa CAD;
- Execução do furo de 1,3 mm utilizando os parâmetros da Tabela (2).

Para o furo de 0,35 mm foi utilizado um eletrodo de cobre com diâmetro de 0,3 e comprimento de 400 mm. Os parâmetros de processo estão apresentados na Tabela (3).

**Tabela 3 – Parâmetros para o eletrodo de 0,35 mm de diâmetro**

Ø [mm]	Folga [mm]	Altura [mm]	Pressão [MPa]	Tensão [V]	Corrente [A]	Desgaste [%]	Tempo [s]
0,3	1.0	2,0	6	25 ~30	4	154	30

Para fabricação do furo de 0,35 mm foi utilizado o seguinte procedimento:

- Manter a mesma fixação da peça;
- Trocar o eletrodo para o diâmetro de 0,3 mm;
- Determinar a altura do eletrodo de 0,3 mm;
- Centrar o eletrodo em relação a peça utilizando o furo de referência
- Programação da posição dos 3 furos;
- Execução dos furos de 0,35 mm utilizando os parâmetros da Tabela (3).

### 6.1.2 Processo 2: Rasgos de raio 0,175 mm

Os rasgos de 0,175 mm de raio foram fabricados pelo processo de eletroerosão a fio, utilizando um fio de latão de 0,25 mm de diâmetro. Os parâmetros aplicados ao processo de eletroerosão a fio estão apresentados na Tabela (4). Os valores de corrente (I) e largura do pulso (t on) são programados diretamente no CNC da máquina, conforme tabela de parâmetros do fabricante.

**Tabela 4 – Parâmetros de processo para o fio de 0,25 mm de diâmetro**

Ø [mm]	Corrente I [ ]	t on [ ]	Freq. pulso [Hz]	Tensão fio [N]	Veloc. fio [mm/s]	Avanço fio [mm/min]	Pressão [bar]
0,25	17	26	52	17	135	2,35	8

A fabricação dos rasgos de 0,35 mm de diâmetro seguiu o seguinte procedimento:

- Manter a peça fixo no sistema de fixação;
- Alinhar e referenciar o dispositivo de fixação na máquina;
- Centrar o fio de 0,25 mm em relação a peça utilizando o furo de referência
- Programação da posição dos 2 rasgos;
- Execução dos rasgos de 0,35 mm de diâmetro utilizando os parâmetros da Tabela (4).

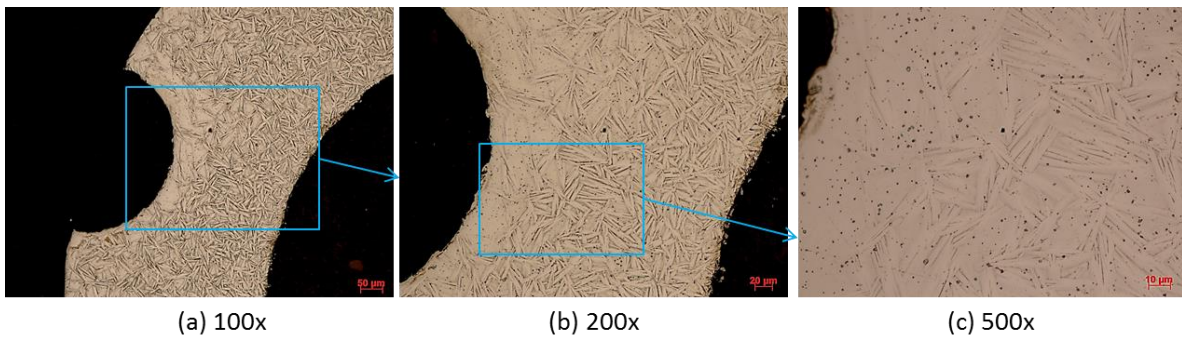
**7 RESULTADOS OBTIDOS**

Os resultados obtidos na fabricação de componentes em Nitinol utilizando os processos de eletroerosão de furação rápida e corte a fio estão apresentados na forma de análise dimensional e danos superficiais. A Figura (7) mostra o exemplo de uma peça montada no dispositivo de fixação após passar por estes dois processos em avaliação no estereoscópio.. Para esta avaliação foram fabricados 5 peças.



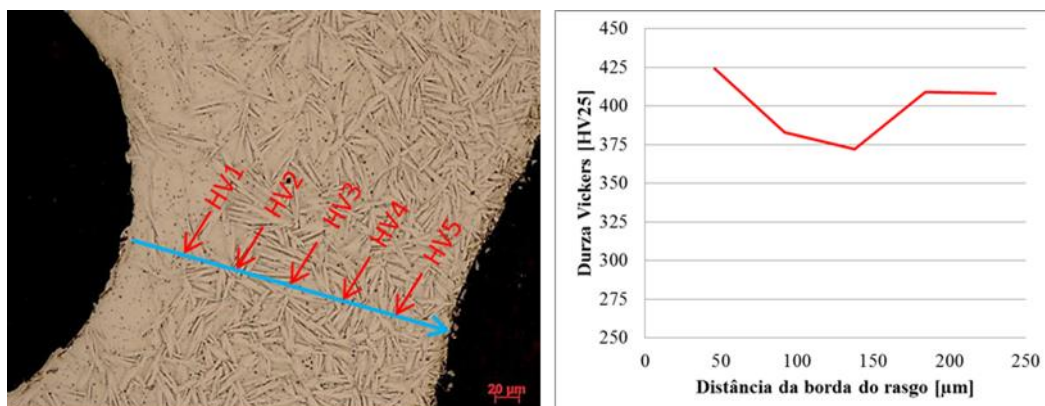
**Figura 7 – Peça padrão em Nitinol.**

As amostras foram preparadas metalograficamente até sílica coloidal de 0.12um, com posterior revelação da estrutura com solução química composta de 30ml Acido Acético Glacial, 2 ml de Acido Fluorídrico e 5ml de acido Nitríco. A avaliação metalográfica das peças fabricadas em Nitinol observada em Microscópio Óptico mostra uma microestrutura cristalina martensítica. A Figura (8) mostra esta estrutura com ampliações de 100x, 200x e 500x. É possível observar um refino da microestrutura na borda do furo e do rasgo proveniente do aquecimento localizado causado pelo processo de eletroerosão. A ataque químico met



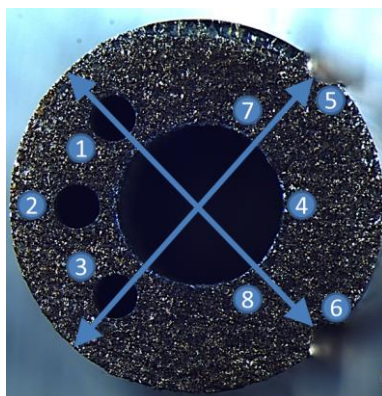
**Figura 8 – Microestrutura martensítica do Nitinol.**

A medição de microdureza Vickers revela que os processos de eletroerosão de furação rápida e de corte a fio não provocaram uma grande variação na microdureza, como mostra a Figura (9).



**Figura 9 – Medição de microdureza.**

A avaliação dimensional dos componentes obtidos em Nitinol foi feita a partir da medição dos diâmetros e posicionamentos conforme mostra a Figura (10).



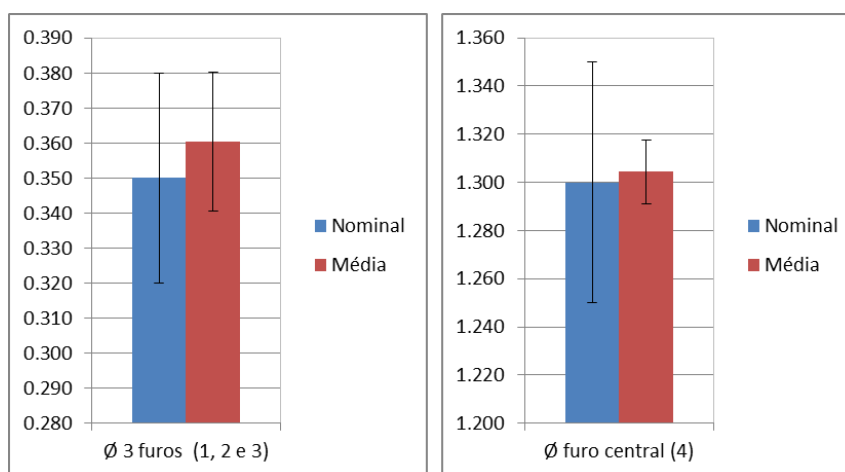
**Figura 10 – Sequencia de medição dos componentes em Nitinol.**

A Tabela (5) mostra os resultados obtidos a partir da fabricação de 5 componentes (peça padrão), medidos em ambos os lados. No total foram 30 medidas para o furo de 0,35 mm de diâmetro e 10 medidas para as demais dimensões.

**Tabela 5 – Avaliação dimensional dos componentes**

	Teórico		Usinado	
	Nominal	Tolerância	Média	DP
Ø 3 furos (1, 2 e 3)	0,350	0,030	0,361	0,020
Ø furo central (4)	1,300	0,050	1,305	0,013
Ø rasgo1 (5)	0,350	0,030	0,320	0,014
Ø rasgo2 (6)	0,350	0,030	0,333	0,027
posição rasgo1 (7)	2,914	0,030	2,859	0,029
posição rasgo2 (8)	2,914	0,030	2,856	0,028

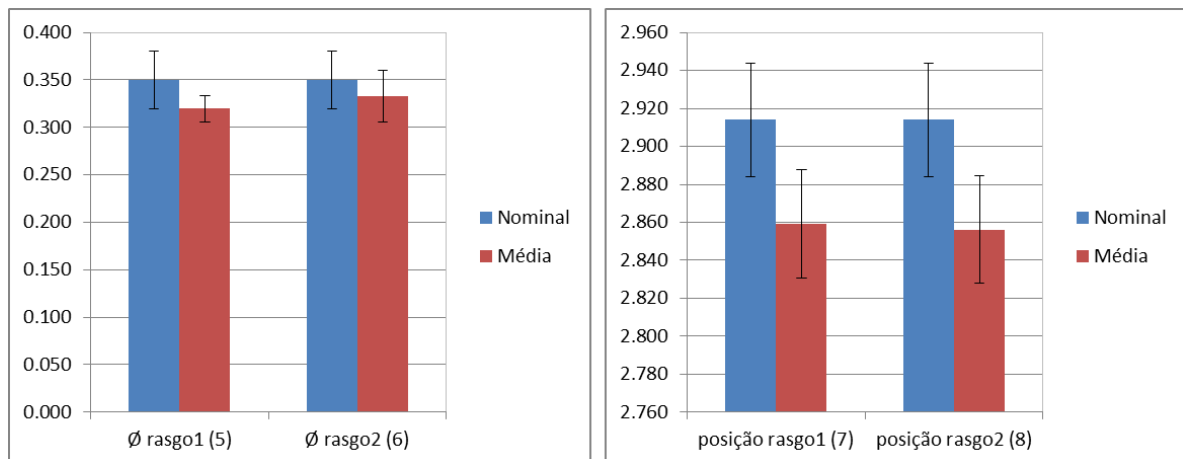
A Figura (11) mostra os resultados obtidos para os diâmetros de 0,35 mm e 1,30 mm, fabricados pelo processo de eletroerosão de furação rápida.



**Figura 11 – Furos fabricados pelo processo de eletroerosão de furação rápida.**



Os resultados obtidos para os rasgos fabricados pelo processo de eletroerosão a fio estão mostrados na Figura (12).



**Figura 12 – Rasgos obtidos pelo processo de eletroerosão a fio.**

## 8 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na furação rápida por eletroerosão do Nitinol para o diâmetro de 0,35 mm foram altamente satisfatórios, mostrando a capacidade de remoção de material pelo processo. Esta operação de furação rápida preenche uma lacuna de grande dificuldade na obtenção de furos na ordem de décimos de milímetro utilizando o processo de furação com broca helicoidal, onde a relação L/D é grande, como no caso deste componente que é de 8,6 vezes.

A fabricação dos rasgos laterais utilizando o processo de eletroerosão a fio também apresentou resultados promissores com relação ao dimensional dos rasgos e ao posicionamento. O posicionamento apresentou um resultado muito estável para os dois rasgos, apesar do desvio apresentado em relação à dimensão nominal. Este desvio está ligado aos parâmetros do processo, que se reflete também no diâmetro.

A análise metalográfica apresentou um refinamento da microestrutura na região usinada pelo processo de eletroerosão, o que representou um pequeno aumento na dureza. A metalografia também revelou que não houve formação de camada termicamente afetada e nem a presença de microtrincas nas bordas dos furos e dos rasgos.

A variação dimensional está diretamente relacionada aos parâmetros do processo de eletroerosão, permitindo um estudo mais aprofundado no sentido de obter resultados mais estáveis e com melhor precisão dimensional. O domínio do processo e a geração de conhecimento tende a melhorar a qualidade dos furos obtidos e sua precisão dimensional.

A utilização deste processo, em conjunto com o desenvolvimento de estratégias de usinagem adequadas, torna a obtenção de peças em Nitinol uma realidade, aumentando imensamente as possibilidades de aplicação deste material em projetos e aplicações inovadoras. Outro atrativo para utilização da tecnologia de eletroerosão na usinagem de Nitinol está relacionada ao custo do processo e dos consumíveis, que são menores se comparados aos processos convencionais.

## 9 AGRADECIMENTOS (TIMES NEW ROMAN, NEGRITO, TAMANHO 10)

Esta seção, se houver, deve ser colocada antes da lista de referências.

## 10 BIBLIOGRAFIA

- Sanders, K., 1981, "Miracle Metal", Magazine Science Digest, pp. 93-96.
- Sanders, K., 1982, "Grassroots Genius", Magazine Science Digest, pp. 26-28.
- Kauffman, G.B., Mayo, I., 1996, "The Story of Nitinol: The Serendipitous Discovery of the Memory Metal and Its Applications", The Chemical Educator, Vol. 2, No. 2, Springer-Verlag New York, New York, USA, 21p.
- Stoeckel, D., 2000, "Nitinol Medical Devices and Implants", Min Invas Ther & Allied Technol, Vol. 9, No. 2, pp. 81-88.
- Malcolm, K. Stanford, M.K., 2012, "Thermophysical Properties of 60-NITINOL for Mechanical Component Applications", NASA/TM, Report 216056, 6p.
- Muthukrishnan, N., Davim, J.P., 2011, "Influence of Coolant in Machinability of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V)", Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology, Vol. 1, pp. 9-14.
- Veiga, C., Davim, J.P., Loureiro, A.J.R., 2013, "Review on Machinability of Titanium Alloys: The Process Perspective", Review Advantage Material Science, Vol. 34, pp. 148-164.
- Elahinia, M. H., Hashemi, M., Tabesh, M., Bhaduri, S.B., 2012, "Manufacturing and Processing of NiTi Implants: A Review", Progress in Materials Science, Vol. 57, pp. 911-946.

Pelton, A.R., DiCello, J. and Miyazaki, S., 2000, "Optimisation of Processing and Properties of Medical Grade Nitinol Wire", *Min Invas Ther & Allied Technol*, Vol. 9, No. 1, pp. 107-118.

Cederstrom, J., J. Van Humbeeck, J., 1995, "Relationship Between Shape Memory Material Properties and Applications", *Journal de Physique IV (Colloque C2, supplément au Journal de Physique III)*, Vol. 5, pp. 335-341.

Quintão, C.C., 2000, "Fios Ortodônticos Utilizados em Fase Inicial de Tratamento: Propriedades Mecânicas e Desempenho Clínico. Ph.D. thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

WEBMD. Coronary Stent. Disponível em: <http://www.webmd.com/heart-disease/coronary-stent>. Acesso em 08 out. 2014.

## 11 DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.

### DIMENSIONAL ANALYSIS AND SURFACE INTEGRITY IN NITINOL COMPONENTS FABRICATED BY EDM

Boeira, A.M.G., [angelo.boeira@sc.senai.br](mailto:angelo.boeira@sc.senai.br)<sup>1</sup>

Schlotefeldt, A.A., [alceri@sc.senai.br](mailto:alceri@sc.senai.br)<sup>1</sup>

Kasten, F., [fernando.kasten@sc.senai.br](mailto:fernando.kasten@sc.senai.br)<sup>1</sup>

Oliveira, H.R., [henrique@biokyra.com](mailto:henrique@biokyra.com)<sup>2</sup>

Santos, E.C., [edson.costa@sc.senai.br](mailto:edson.costa@sc.senai.br)<sup>1</sup>

Zanatta, A.M., [andre.zanatta@sc.senai.br](mailto:andre.zanatta@sc.senai.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Senai de Inovação em Sistemas de Manufatura, Rua Arno Waldemar Doehler 957, CEP: 89219-510, Joinville, SC, Brazil

<sup>2</sup>Biokyra Pesquisa e Desenvolvimento, Rua Lauro Linhares 2055, Sala 107, Torre MAX, CEP: 88036-003, Florianópolis, SC, Brazil

#### **Abstract:**

The application of the intermetallic Nitinol alloy (Ni-Ti) in orthodontic devices, endovascular surgical implants, as well as in industrial automation becomes increasingly common in the future, mainly due to its biocompatibility, shape memory, superelastic, corrosion resistance and fatigue resistance. For these excellent properties, there is an expectation of increase in demand of these components, as well as a reducing costs and lead times. The difficulty in obtaining these components using conventional machining processes relates to excessive wear of cutting tools, primarily caused by the high hardness and high mechanical strength of Nitinol. Another factor that contributes to wear is the high degree of surface abrasion caused by the titanium oxide, thereby raising the cost of cutting tools. In the case of drilling, obtaining micro-holes presents an additional problem which is the appearance of the false edge, making it impractical for holes where the ratio of length/hole diameter (L/D) is larger than five. In order to provide an alternative that enables obtaining micro-components in Nitinol is proposed in this paper, the use of EDM process on end and fast drilling. In the case of micro-components with complex geometries, we propose the use of the wire EDM process and in the case of micro-holes is proposed to use the EDM fast hole drilling process. To assess the quality of the components obtained by EDM process, a component with a standard geometry which allows performing a dimensional analysis and surface integrity to different process parameters is made. The dimensional analysis aims to determine process capability while the analysis of surface integrity is to determine and quantify the formation of recast layer (also called white layer) and surface damage caused by EDM process.

**Keywords:** *Nitinol, micro manufacturing, fast hole drilling and wire EDM.*