

Soldabilidade de ligas com memória de forma níquel-titânio com aços inoxidáveis

M. J. C. de Oliveira^{1*}, R. H. F. de Melo², P. I. V. Oliveira³, T. M. Maciel⁴, C. J. de Araújo⁴

¹Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

²Unidade Acadêmica de Indústria – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IPFB

³Unidade Acadêmica de Engenharia de Petróleo – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

⁴Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

*Aprígio Veloso 882, Bodocongó, Campina Grande, PB – CEP 58429 – 900

(Recebido em 08/12/2015; revisado em 26/12/2015; aceito em 27/12/2015)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

As Ligas com Memória de Forma (LMF) foram descobertas em meados dos anos 60 e o desenvolvimento de vários sistemas (NiTi, CuAlNi, CuAlBe, CuZnAl) vem sendo explorado desde então, sendo aquelas do sistema NiTi as mais utilizadas. Devido às suas excelentes propriedades mecânicas, ótima resistência a corrosão e biocompatibilidade, além de apresentarem as melhores propriedades funcionais de efeito de memória de forma e superelasticidade, as LMF NiTi e suas variações ternárias passaram a ser objeto de estudos para várias aplicações nas mais diferentes áreas. Um dos maiores problemas das LMF NiTi ainda estão relacionados a dificuldades de conformação e usinagem. Por esse motivo, o processo de soldagem pode ser uma boa ferramenta alternativa para se conseguir obter peças de geometrias mais complexas, envolvendo a união das LMF NiTi com metais convencionais, como o aço inoxidável. O aço inoxidável é uma opção viável de união com LMF NiTi pois possui igualmente propriedades desejadas de resistência mecânica, biocompatibilidade e resistência a corrosão. A união por soldagem destas duas ligas encontra barreiras diversas, sendo a principal delas a formação de intermetálicos frágeis na junta soldada limitando sua resistência mecânica e consequente aplicação. Esse artigo traz uma revisão sobre a soldabilidade de LMF NiTi com aços inoxidáveis, abrangendo a metalurgia da soldagem e as principais técnicas utilizadas nesta união.

Palavras-chave: Ligas com memória de forma; soldagem; niti; soldabilidade; soldagem dissimilar.

Abstract:

Shape memory alloys (SMA) have been discovered in the mid-60's and the development of various systems (NiTi, CuAlNi, CuAlBe, CuZnAl) have been exploited since then, being NiTi systems the most used. Due their excellent mechanical properties, good corrosion resistance, biocompatibility, in addition having unique functional properties such as shape memory effect and superelasticity, the NiTi SMA and its ternary variations have become the subject of studies for various applications in different areas. A major problem of NiTi SMA is their poor conformability and machinability. For this reason the welding process can be a good alternative tool in order to achieve more complex geometry parts, involving the union of NiTi SMA with conventional metals, such as stainless steel. Stainless steel is a viable pair for NiTi SMA for its desired mechanical properties, biocompatibility and corrosion resistance. Their welding finds various barriers, being the formation of brittle intermetallic compounds on weld zone the main issue, which limits its mechanical resistance and thus its application. This paper provides a review of the weldability of NiTi SMA with stainless steels, including the welding metallurgy involved and the main techniques used on this union.

Keywords: Shape memory alloys; welding; niti; weldability; dissimilar welding.

1. Introdução

Ligas com Memória de Forma (LMF) ou “ligas inteligentes” foram primeiramente descobertas por Arne Olander em 1932 ao observar o efeito de superelasticidade em ligas de Au-Cd, mas o termo “memória de forma” foi primeiro utilizado por Vernon em 1941 para seus materiais poliméricos de uso dental [1-3]. Após a descoberta de Olander em 1932, Greninger e Mooradian em 1938 observaram a

formação e o desaparecimento de uma fase martensítica ao aumentar e diminuir a temperatura de uma liga de Cu-Zn. O fenômeno básico do efeito de memória de forma governado pelo comportamento termoelástico da fase martensítica começou a ser disseminado apenas uma década depois, após a Segunda Guerra Mundial, por Kurdjumov e Khandros em 1949 [2-4].

As LMF são uma classe única e especial de materiais com a capacidade de recuperar sua forma quando deformadas pseudo plasticamente e depois a recuperá-la quando

*Email: matheusjco13@gmail.com (M. J. C. de Oliveira)

temperatura é aumentada, contrariamente aos metais estruturais convencionais.

Existem diversos tipos de LMF: ligas a base de níquel-titânio (NiTi), ligas a base de cobre e ligas a base de ferro [2,5]. No entanto os sistemas de ligas de NiTi que exibem transformação martensítica termoelástica reversível são os mais comumente estudados e utilizados devido a excelente resistência a corrosão e fadiga, além de apresentarem faixas de temperatura de transformação mais amplas (-100 °C a +200 °C), que permitem aplicações em temperaturas diversas. Essa transformação de fase martensítica pode ser induzida em condições específicas tanto por rotas térmicas quanto mecânicas [2-5].

Praticamente LMF podem existir em duas fases distintas com três estruturas (martensita maclada, martensita orientada e austenita), resultando num total de 6 transformações [6,7]. É importante ressaltar que a martensita é uma fase com baixo grau de simetria, com todos os eixos cristalográficos de tamanhos distintos ($a \neq b \neq c$), assim podem ocorrer orientações espaciais diversas no reticulado, chamadas de variantes da martensita [8].

Conforme se observa na Figura 1, desde a década de 90 as publicações sobre LMF vem aumentando em áreas diversas. Contudo a maior parte destas publicações se concentra em engenharia e ciência dos materiais, correspondendo a mais da metade da divulgação científica e tecnológica global [1].

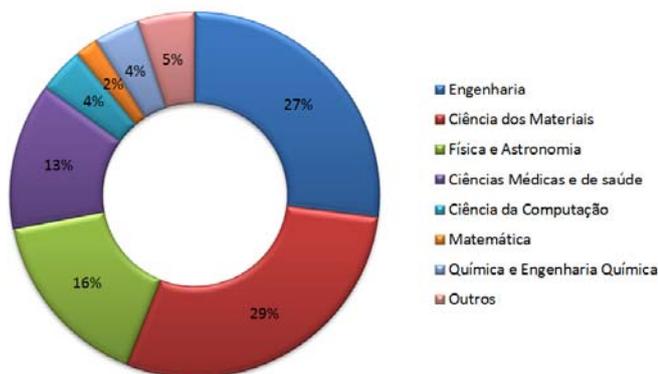


Figura 1. Publicações sobre Ligas de Memória de Forma por área, de Janeiro de 1990 até Setembro de 2013 (Fonte: Jani *et al.*, 2014 [1])

Após a década de 90 muitos pesquisadores vem analisando de forma experimental como melhorar as propriedades das LMF, alterando a composição das ligas (modificando assim as temperaturas de transformação de fase da LMF) para obter uma maior possibilidade de temperaturas de operação e melhor estabilidade do material, bem como melhorar a resposta do material com um design mais satisfatório e o uso de diferentes técnicas de processamento [3-7].

Ainda segundo Jani, *et al.* (2014) [1], pesquisas reportaram que o mercado global para os materiais inteligentes, classe em que as LMF se enquadram, atingiu cerca de \$19,6 bilhões em 2010 e tem previsão de ultrapassar

os \$40 bilhões em 2016 com uma taxa anual de crescimento de 12,8% de 2011 para 2016.

2. Ligas de Níquel-Titânio

As ligas de níquel-titânio (NiTi) foram desenvolvidas pela primeira vez no *Naval Ordnance Laboratory*, nos Estados Unidos, e então comercializadas sob o nome comercial de NiTiNOL (acrônimo para *Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory*) [8].

Uma liga como o Nitinol, com uma memória mecânica, tem como requisitos características atômicas e estruturais básicas. O primeiro requisito é uma fase sólida cristalograficamente ordenada, classicamente chamada de austenita (semelhantemente ao caso dos aços), que existe no regime de temperatura mais elevada. Em segundo lugar, a uma temperatura inferior, após resfriamento a partir da austenita, os átomos da fase austenita ordenada devem ser capazes de certo “rearranjo” sólido-sólido adifusional em um complexo e novo arranjo atômico, ou fase, chamada de martensita (semelhantemente aos aços, em homenagem ao metalúrgico alemão Adolf Martens) [3,4,6,8].

As fases martensita e austenita são as duas fases comumente presentes nas LMF em geral. A martensita, diferentemente da martensita dos aços, é maleável e estável a temperaturas mais baixas. A austenita é uma estrutura mais rígida e estável a temperaturas mais altas [9-11].

Devido a propriedades únicas das LMF NiTi, o uso dessas ligas vem aumentando frequentemente, especialmente em dispositivos específicos. O NiTi possui boa biocompatibilidade o que o torna excepcional para implantes médicos. Além disso, pode permitir procedimentos menos evasivos por causa de seus efeitos de superelasticidade e memória de forma. Como exemplos de dispositivos médicos em LMF NiTi têm-se os *stents*, filtros de veia cava, sistemas de oclusão, fios-guia de cateteres, implantes ortopédicos, dentre outros [1]. Obviamente, implantes médicos não precisam ser feitos de um único material, o que significa que técnicas de união de LMF NiTi com outras ligas metálicas devem ser exploradas. Um par comum é unir NiTi com aço inoxidável (SS), usando o aço em regiões ou partes em que o NiTi não seja necessário, originando uma peça ou componente composto (NiTi+SS). Em lugares onde os efeitos de superelasticidade e memória de forma não sejam requeridos, a união do NiTi com SS pode ajudar tanto a reduzir o custo como explorar propriedades do aço inoxidável, se desejável [12].

Os aços inoxidáveis (SS) austeníticos, principalmente 304, 304L, 316 e 316L, que possuem excelentes propriedades de biocompatibilidade e resistência a corrosão, além de fazer parte de uma classe de aços facilmente soldáveis entre si, são os mais explorados para união com LMF NiTi. Por esses fatores, a união destes materiais é interessante e caracteriza um campo promissor devido às dificuldades inerentes a soldagem destas ligas metálicas distintas [13-17].

A união direta NiTi-SS resulta em uma estrutura frágil com propriedades mecânicas indesejáveis. A utilização de um metal de adição durante a união por soldagem tem como

objetivo principal a diminuição da formação de elementos fragilizantes e a validação de resistência mecânica satisfatória da junta, garantindo a excelência das propriedades do aço e da LMF NiTi [9,15].

Com a crescente aplicação de LMF, a questão de “conectar” um componente inteligente com ele mesmo ou com material diferente é um desafio importante que pode culminar na limitação de seu uso [9]. Pesquisadores nas últimas duas décadas têm focado no uso de técnicas tradicionais de união como soldagem e brasagem [9]. Devido a maior utilização do NiTi dentre todas as LMF comerciais disponíveis, esta vem sendo o foco das atenções da união similar e dissimilar. As principais técnicas de união por soldagem incluem a soldagem a laser Nd:YAG (LBW), soldagem a plasma (PAW), e soldagem TIG (GTAW), que podem garantir a integridade mecânica da junta após soldagem [9,10].

3. Soldagem dissimilar NiTi-SS: aspectos gerais

A aplicação de qualquer material inovador não depende somente de suas características intrínsecas, mas depende também da capacidade de subverter problemas e desenvolver tecnologias aliadas de processamento. Como resultado, o uso de um material pode estar restringido a condições específicas, a menos que a união desse material a si mesmo ou a outros materiais seja facilitada. A possibilidade de juntar de modo eficaz os materiais abre um leque de possibilidades a serem exploradas [18].

No entanto, segundo a literatura, unir LMF NiTi tem sido um trabalho árduo devido a sua alta sensibilidade a tratamentos termomecânicos e a deterioração dos efeitos de superelasticidade e memória de forma na região de solda quando comparado ao metal de base, devido as mudanças metalúrgicas existentes [18-21].

Existem dois tipos de dissimilaridades envolvidos em soldagem de metais distintos que tem importantes consequências na formação da microestrutura da solda. Primeiro, dissimilaridade em termos de propriedades termo-físicas como condutividade térmica (k) e coeficiente de temperatura da tensão superficial (dy/dT): enquanto as diferentes condutividades dos metais de base controlam indiretamente a composição da poça de fusão através de transporte de calor assimétrico (o que leva a fusão assimétrica), a diferença no dy/dT influencia a tensão superficial no escoamento do fluido fundido (o que governa a mistura). O segundo tipo de dissimilaridade é a origem metalúrgica (química) que se manifesta através da formação de fases de estruturas de cristais diferentes oriundos da fusão heterogênea [19].

No que consiste esta soldagem dissimilar, a motivação no desenvolvimento de técnicas de soldagem entre materiais diferentes vem crescendo continuamente. O NiTi e os aços inoxidáveis possuem características diferentes. A rigidez de LMF NiTi é baixa quando comparada a do aço inoxidável. Assim, quando se produzem fios e arcos ortodônticos monolíticos de NiTi de baixa rigidez ocorre perda de ancoragem.

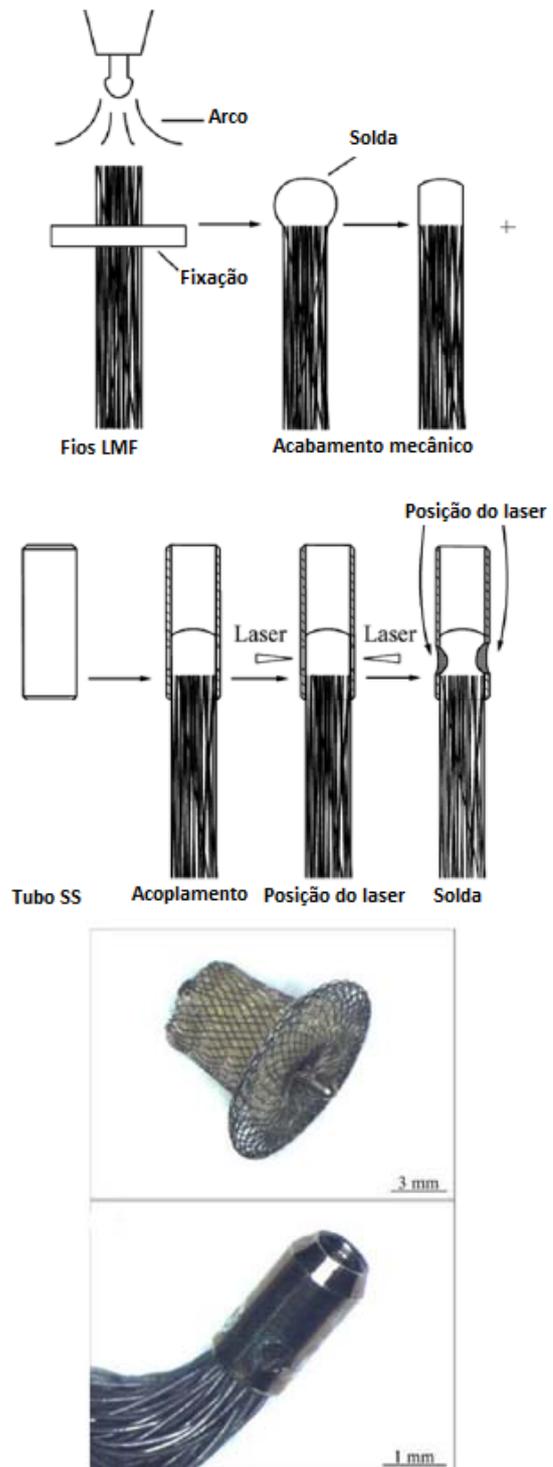


Figura 2. Produção de um oclisor médico por soldagem dissimilar entre NiTi e SS (Fonte: Lu *et al.*, 2013 [24])

Em contraste, o uso de fios rígidos de aço inoxidável causa tensão ortodôntica excessiva, impedindo que os dentes tratados se movam, devido à absorção alveolar do osso. Ao serem utilizados fios unidos de NiTi e SS em tratamentos

ortodônticos, o aço inoxidável e o NiTi promoveriam ancoragem e tratamento, respectivamente, o que reduziria o desconforto, diminuiria em elevado grau o tempo de tratamento dentário e aprimoraria a qualidade do tratamento. A mesma situação pode ser expandida no caso de cabos guia, onde se tornam necessárias partes manipuláveis e extremidades rígidas, de aço rígido e NiTi elástico, respectivamente [22,23].

Lu *et al.* (2013) [24] realizaram uma combinação de solda TIG e a laser para unir fios de NiTi com um tubo de aço inoxidável para a construção de um oclisor médico. Na Figura 2 está representado o experimento realizado por estes autores, bem como o dispositivo construído

Outro exemplo de aplicação comercial na soldagem dissimilar de NiTi pode ser visto na Figura 3. Um marcador radiopaco, como um marcador de tântalo pode ser unido com *stents* de NiTi pelo processo de soldagem a laser. Devido a massa elevada desses marcadores a visibilidade aos raios X desses *stents* se torna excelente. Contudo, nesta união forma-se uma interface frágil entre os materiais [25].

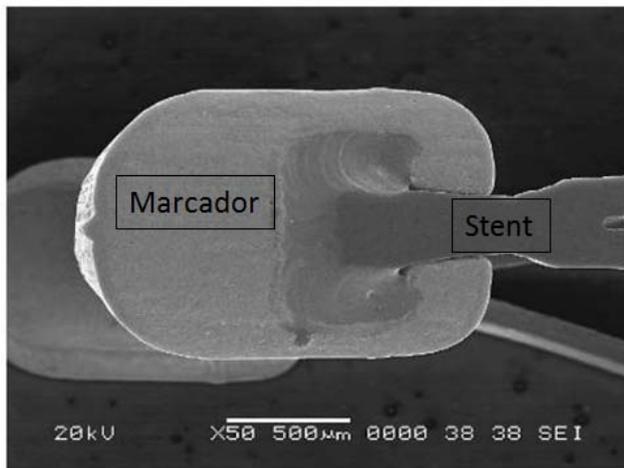


Figura 3. Imagem em microscopia eletrônica de varredura de um componente biomédico obtido por soldagem a laser entre *stents* de NiTi e marcador de tântalo (Fonte: Ghodssi e Lin, 2011 [25])

Essa interface pode ser supostamente minimizada ao se fazer uso de camadas de materiais com propriedades intermediárias entre aqueles que são unidos por soldagem.

4. Soldagem dissimilar NiTi-SS: estado da arte

Nos últimos anos tem-se dado grande atenção para a influência do processamento de soldagem na microestrutura e propriedades de juntas soldadas similares de NiTi. Por outro lado, juntas de NiTi com outras ligas metálicas não tem sido devidamente consideradas. Nesse contexto, aços inoxidáveis (SS) são largamente utilizados em diferentes aplicações, conforme discutido na seção anterior. Logo, juntas obtidas da união de NiTi com SS são desejáveis. É importante observar que criar juntas dissimilares entre esses dois materiais é um

processo complicado devido a grande diferença em suas propriedades físicas e químicas. Já tem sido reportado na literatura que a formação de compostos intermetálicos frágeis, como o $TiFe_2$, promovem uma junta altamente frágil [9,18-21]

Na Figura 4 é possível visualizar o diagrama ternário para o ferro, níquel e titânio, indicando a formação de compostos intermetálicos em 1273K (1000°C), temperatura próxima àquela observada durante a solidificação após soldagem. O cromo foi negligenciado para fins de simplificação, uma vez que este está presente em menor quantidade que os outros elementos e a sua influência é semelhante àquela do titânio [12]. A maior parte dos intermetálicos leva à fratura frágil, tendo pouca tolerância à formação de trinca; as estruturas complexas desses compostos possuem grandes vetores de Burger, logo requerem menos energia para fratura do que para deslocamento durante deformação.

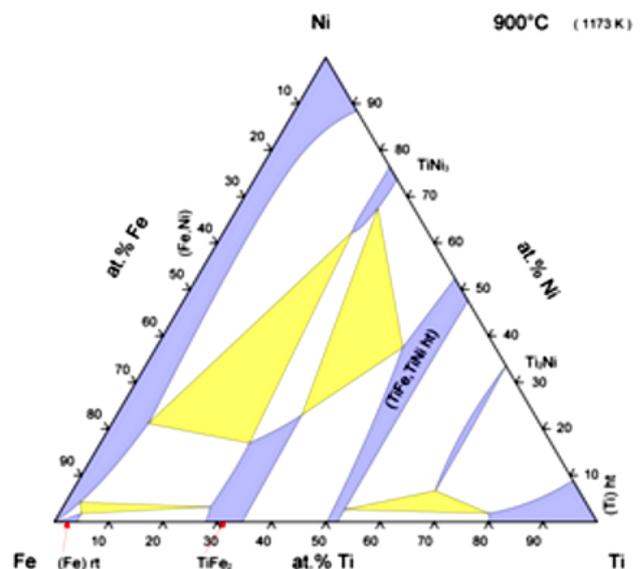


Figura 4. Diagrama de fase ternário Fe-Ti-Ni (Fonte: Gupta, 1990 [26])

O diagrama mostra que uma liga com maior concentração de ferro e níquel tende a se solidificar com fases majoritárias de γ -(Fe,Ni), mais dúcteis. As fases ricas em ferro e titânio são altamente prejudiciais para a junta soldada uma vez que a fase Fe_2Ti formada possui estrutura hexagonal frágil; e a fase $FeTi$ reduz drasticamente a resistência mecânica da junta [27-30].

Um estudo comparativo da soldagem a laser pelo processo Nd:YAG de fios de NiTi com NiTi e NiTi com SS foi realizado por Gugel *et al.* (2008) e (2009) [31,32]. Os resultados da microestrutura formada podem ser observados na Figura 5. A junta similar de NiTi/NiTi apresentou grãos grosseiros com tamanhos de aproximadamente $50\mu m$ na região central da zona de fusão e grãos menores com estrutura colunar nas regiões adjacentes. O detalhe da Figura 5(a) revela uma cristalização epitaxial a linha de fusão e um

crescimento na direção do maior gradiente de temperatura. Na zona termicamente afetada (ZTA), além da linha de fusão são observadas grãos equiaxiais. Ao passo que na junta dissimilar (Fig.5b), são observados grãos similares na região do lado do NiTi e não se observa formação de grãos grosseiros na zona de fusão.

Observa-se ainda que o perfil não-uniforme de dureza na junta dissimilar sugere ainda a formação de outros elementos, responsáveis pela fragilidade da junta.

Foi estudado também o comportamento mecânico dos fios pelos mesmos pesquisadores [31]. A comparação foi feita com os fios íntegros (NiTi e aço), e com solda similar (NiTi-NiTi) e dissimilar (NiTi-SS). O resultado pode ser observado na Figura 6. É possível concluir que a soldagem similar apresentou comportamento próximo ao do fio de NiTi sem solda, com uma tensão de ruptura em aproximadamente 70% da tensão deste. No caso dos fios com juntas de NiTi-SS, o comportamento mecânico é intermediário e inferior ao dos fios de NiTi ou do aço puro. Uma das causas desta fratura prematura é a formação de carbeto de titânio (TiC) precipitado na junta, cuja dureza e fragilidade elevadas comprometem as propriedades mecânicas [31].

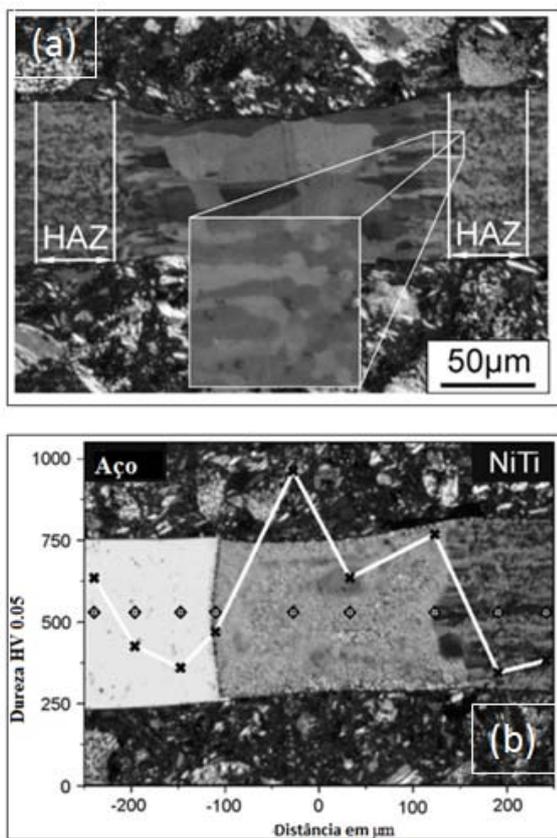


Figura 5. Micrografias comparando a solidificação de ligas de NiTi após soldagem: (a) similar e (b) dissimilar NiTi-SS (Fonte: Gugel *et al.*, 2008 [31])

Outro estudo comparando a eficiência da soldagem de fios de NiTi, similar e dissimilar, foi realizado por Mirshekari *et al.* (2013) [18] também pelo processo laser Nd:YAG. Estes autores concluíram que a fratura observada nos fios NiTi-NiTi apresentou característica dúctil com presença de *dimples* enquanto os fios NiTi-SS apresentaram comportamento frágil com presença de clivagem transgranular (Figura 7).

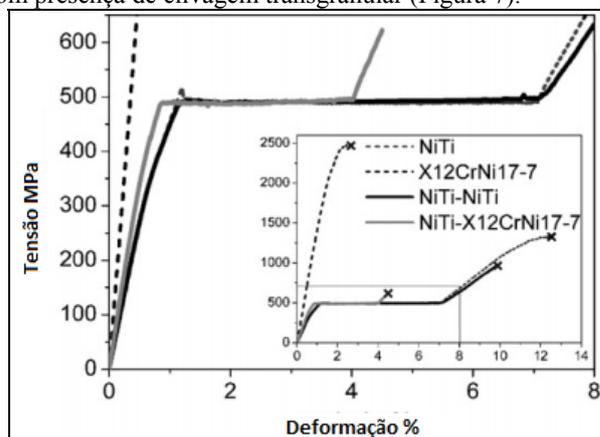


Figura 6. Comportamento mecânico de juntas soldadas similares (10% de deformação) e dissimilares (4% de deformação) de ligas de NiTi (Fonte: Gugel *et al.*, 2008 [31])

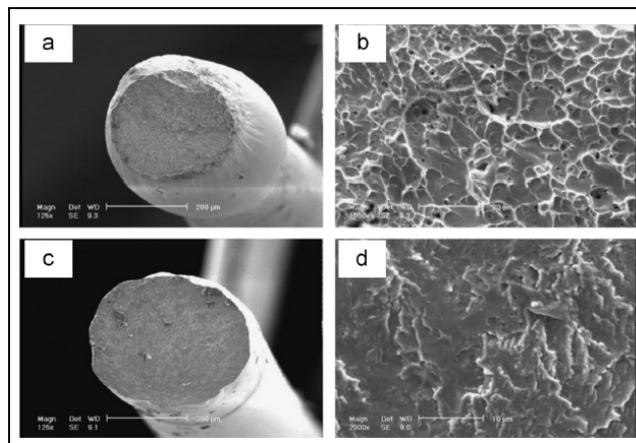


Figura 7. Comparação da superfície de fratura de fios soldados NiTi-NiTi (a e b) e NiTi-SS (c e d) (Fonte: Mirshekari *et al.*, 2013 [18])

Em estudos mais aprofundados, Vannod *et al.* (2011) [33,34] estudaram o aparecimento de fissuras em fios soldados a laser de NiTi com SS e observaram que a principal origem dos defeitos se dava pela concentração de tensões na região de solda perto do perímetro da interface. Segundo os autores, a nucleação das fissuras começava na periferia da região soldada, perto da interface NiTi; a fissura inicialmente se propagava de maneira frágil por todo o fio na região superelástica, e ao final desse patamar ocorreu a ruptura dúctil pela propagação das fissuras no fio de NiTi. Foi mostrado que esse comportamento teve origem em três mecanismos

concomitantes: a forma geométrica da solda que foi maior na superfície e mais estreita no meio do fio; a maior rigidez da região de solda quando comparada ao fio de NiTi; a contração radial do fio de NiTi associada a transformação isovolumétrica da martensita.

A união direta em micro soldas de NiTi com aços inoxidáveis devido a formação de compostos intermetálicos frágeis e aparecimento de trincas é o principal motivo pelo qual usam-se camadas intermediárias de um metal próprio, a fim de mitigar esses efeitos e conferir propriedades e resistência desejadas nas juntas [28-30]. Li *et al.* (2013) [28] utilizaram camadas de cobalto entre os fios de NiTi e SS durante a soldagem a laser. O cobalto, tendo coeficiente linear de expansão intermediário aos dois metais de base, atua aliviando as tensões na junta, e reduzindo a formação de fases indesejáveis. Os mesmos pesquisadores, em outro trabalho [29], também avaliaram a influência da espessura de uma camada intermediária de cobre durante a união de NiTi com SS e concluíram que a adição controlada desse elemento melhora as propriedades de dobramento dos fios soldados e impacta diretamente as propriedades mecânicas, uma vez que menos compostos fragilizantes são formados. As Figuras 8 e 9 permitem avaliar alguns dos resultados obtidos por estes pesquisadores. Verifica-se que o aumento da espessura da camada interfacial de cobre entre 20 e 80 μm tem um efeito extremamente positivo no aumento da resistência mecânica e deformação da junta dissimilar NiTi-SS.

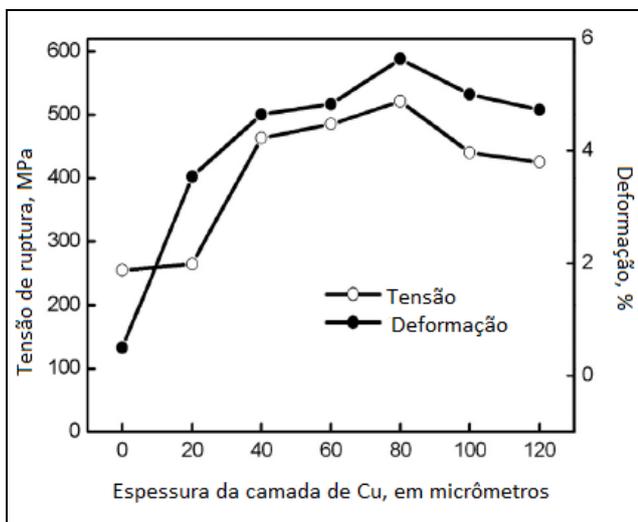


Figura 8. Influência da espessura de camadas intermediárias de Cu no comportamento mecânico da união entre NiTi e aço inoxidável
(Fonte: Li *et al.*, 2013 [29])

Este comportamento está associado ao fato de que um aumento da espessura da camada interfacial de cobre promove uma mudança microestrutural na região de fusão. Quando a espessura foi de 40 μm Fig. 9(a) a poça de fusão teve características de grãos finos e exibiu estrutura dendrítica equiaxial. Quando a espessura foi aumentada observou-se a formação de glóbulos de diferentes tamanhos, e uma análise

de EDS revelou que estes glóbulos são fases de soluções sólidas de cobre. Em estudo posterior, Zhang *et al.* (2014) [35] avaliaram a resistência a corrosão desses fios em ambiente contendo fluoretos (aplicações ortodônticas) e concluíram que estes estão em possível acordo com os requerimentos estabelecidos para usos clínicos.

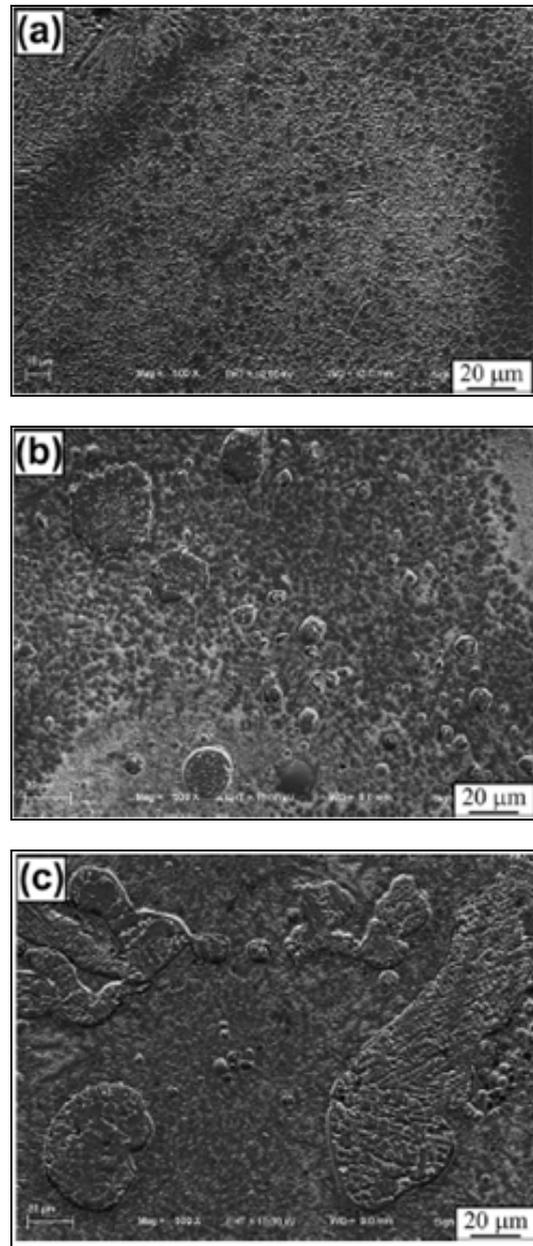


Figura 9. Influência da espessura de camadas intermediárias de Cu na microestrutura da zona de fusão. Espessuras de: (a) 40 μm . (b) 80 μm . (c) 120 μm
(Fonte: Li *et al.*, 2013 [29])

Além das camadas intermediárias de Cu e Co, Pouquet *et al.* (2012) [36] avaliaram a influência de uma camada intermediária de níquel na soldagem de chapas finas de NiTi

com SS e concluíram que a fragilidade da junta depende majoritariamente da composição da poça de fusão; a adição de níquel na junta diminui a formação de intermetálicos frágeis como Fe_2Ti uma vez que a solidificação ocorre primeiramente entre as fases $FeNi$ e Ni_3Ti . Resultado semelhante foi observado por Li *et al.* (2012) [30] que ao realizar uma soldagem a laser de fios de NiTi com SS usando uma camada intermediária com espessura variável de níquel, notaram que a poça de fusão é não-uniforme devido ao rápido aquecimento e resfriamento da técnica; e que a adição de Ni aumenta a formação de $\gamma-Fe$ (fase mais dúctil) e reduz a formação de intermetálicos frágeis ($TiFe_2$ e $TiCr_2$) melhorando, assim, as propriedades mecânicas da junta soldada.

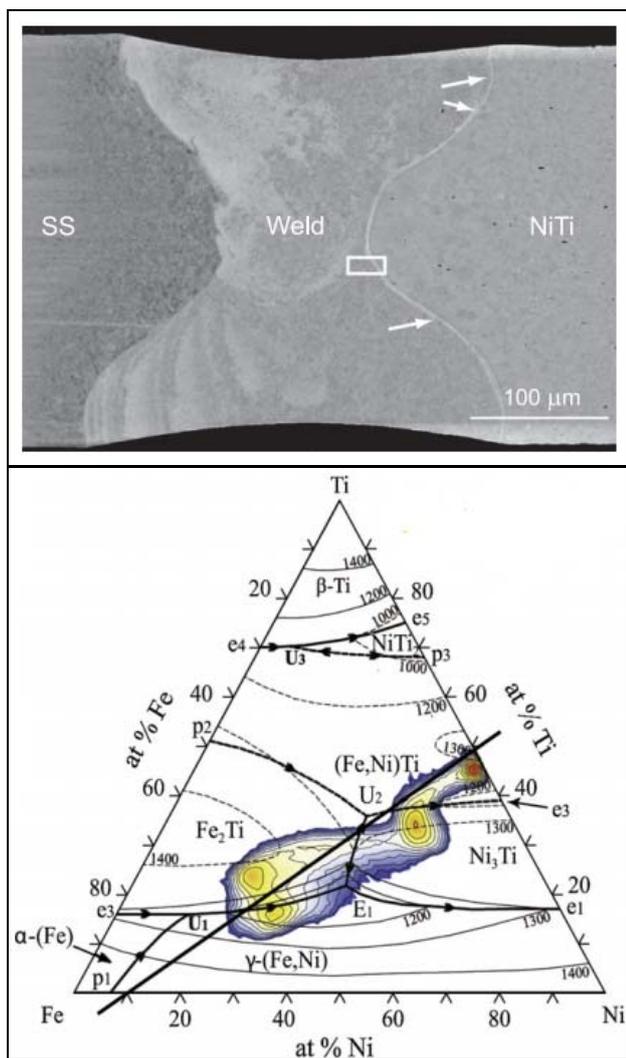


Figura 10. Imagem e análise feita na interface entre o metal de base de NiTi com a poça de fusão na união dissimilar com aço inoxidável (Fonte: Burdet *et al.* 2013 [37])

Um estudo avançado da composição química e metalúrgica da região de solda em uma junta soldada entre NiTi e SS pelo processo de soldagem a laser Nd:YAG foi

realizado por Burdet *et al.* (2013) [37]. Em sua análise os pesquisadores fizeram uso de técnicas simultâneas de feixe de íons localizados (FIB) combinado com microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria por dispersão de energia (EDS) para obter um mapeamento químico de um volume da junta e identificar as fases formadas após solidificação da união. A região analisada está esquematizada na Figura 10, assim como o diagrama ternário avaliado pelos autores

A região assinalada pela linha branca próxima da interface da região do metal NiTi foi escolhida pelos autores por concentrar a maior formação de compostos intermetálicos, que mediante ensaio mecânico a fratura, conforme explicado por Vannod *et al.* (2011) [33], ocorre prioritariamente nesta região. A região da análise se encontra no retângulo branco e pode ser extrapolada para a junta como um todo. O resultado desta análise feita por EDS se encontra na Figura 11.

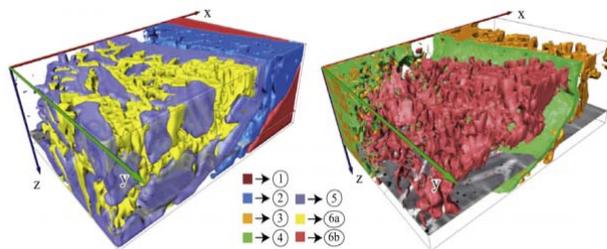


Figura 11. Mapeamento utilizando a técnica 3D EDS para determinação de elementos intermetálicos formados entre a poça de fusão e o NiTi (Fonte: Burdet *et al.*, 2013 [37])

Os pesquisadores concluíram o estudo ao observarem seis regiões principais com formação de fases distintas. A região 1, em vermelho, representa o fio de NiTi não fundido. A região 2, em azul, mostra uma formação de dendritas de $(Fe,Ni)Ti$. Na região 3, em laranja, é formada a fase Ni_3Ti , pelo ponto eutético. A região 4, em verde, é uma região delgada com uma possível mistura de fases correspondendo ao ponto eutético ternário E1 no diagrama da Figura 10. A região 5, em roxo, corresponde a formação de dendritas de Fe_2Ti . A região 6 é uma mistura do eutético do $\gamma-(Fe,Ni)$, em amarelo, e do Fe_2Ti , em rosa [37].

Um estudo cristalográfico feito por Chien e Liou (1985) [38] revelou que a estrutura cristalina do composto intermetálico $FeTi$ é aquela do cloreto de césio, conforme ilustrado na Figura 12, ocorrendo a dupla interpentração de ferro e titânio na estrutura cúbica. Cada átomo de ferro é cercado de oito átomos de titânio e vice-versa. No entanto, para o composto Fe_2Ti observa-se uma estrutura hexagonal do tipo $MgZn_2$ (C14, P63/mmc). Segundo Wu *et al.* (2013) [39], a estrutura desse cristal pode ser visualizada como uma estrutura compacta de átomos de titânio onde metade dos sítios tetraédricos estão ocupados por átomos de ferro e outra metade por átomos de titânio (Fig. 12b).

Elementos intermetálicos quando presentes promovem desordenamento atômico em longa distância. Os reticulados ordenados diminuem a mobilidade das discordâncias e

processos de difusão atômica (em altas temperaturas) gerando tensões internas na estrutura e aumentando sua fragilidade. A natureza de sua formação é complexa e ocorre devido a maiores forças de ligação entre os átomos dissimilares em detrimento dos semelhantes [39].

Diversas técnicas são adotadas para minimizar a fragilização nas juntas NiTi-SS, sendo uma delas a utilização de camadas intermediárias metálicas que minimizam a formação de compostos frágeis e promovem um aumento de ductilidade na junta.

Apesar de avanços no estudo da soldabilidade de ligas de NiTi com aços inoxidáveis, muitos estudos ainda são necessários para melhorar o comportamento mecânico da junta e possibilitar futuras aplicações tecnológicas.

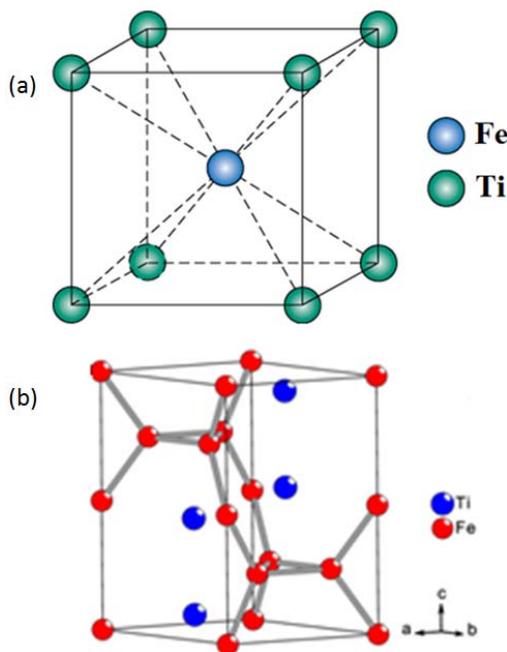


Figura 12. Estruturas cristalinas dos compostos intermetálicos fragilizantes: (a) FeTi. (b) Fe₂Ti
(Fonte: Callister, 2002, adaptado [39] e Wu *et al.*, 2013 [40])

5. Considerações Finais

A união por soldagem de ligas de memória de forma de níquel-titânio (NiTi) com aços inoxidáveis (SS) ainda é um desafio científico e tecnológico atual, necessitando ainda ser bastante estudado. A metalurgia da soldagem envolvida torna-se complexa devido a formação de diferentes compostos intermetálicos durante a soldagem, a solidificação distinta entre os metais dissimilares, culminando com a fragilização da junta que limita fortemente o desenvolvimento de aplicações tecnológicas de componentes mecânicos envolvendo estas juntas NiTi-SS.

A literatura atual indica que o uso de camadas finas de metais como cobre, cobalto e níquel como interfaces entre o NiTi e o SS pode ser um caminho para melhorar o

desempenho mecânico da união entre essas ligas metálicas dissimilares. Contudo, estudos mais avançados em metalurgia da soldagem podem ajudar a compreender os fenômenos metalúrgicos envolvidos e assim permitir buscar soluções eficientes para contornar a atual dificuldade que consiste em unir NiTi com aços inoxidáveis e permitir atingir um nível de resistência mecânica satisfatório.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento dos seguintes projetos: INCT de Estruturas Inteligentes em Engenharia (Processo no 574001/2008-5), Casadinho UFCG-UFRJ-ITA (Processo no 552199/2011-7), Universal 14/2012 (Processo no 474524/2012-4), CT-Aeroespacial 22/2013 (Processo no 402082/2013-3) e PQ 1D (Processo no 304658/2014-6).

Referências

- [1] Jani, J. M., Leary, M., Subic, A., Gibson, M. A. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials and Design*, 56, 1078-1113, 2014.
- [2] Lagoudas, D. C. *Shape memory alloys: modeling and engineering applications*. Texas: Springer, 2008.
- [3] Otsuka, K., Wayman, C. M. *Shape memory materials*. Otsuka, K., Wayman, C. M. Cambridge: Cambridge University Press; 1998.
- [4] Otsuka, K., Ren, X. *Physical metallurgy of Ti-Ni based shape memory alloys*. *Progress in Materials Science*, 50, 511-678, 2005.
- [5] Fernandes, F. M. B. *Shape memory alloys – processing, characterizations and applications*, InTech, Croatia, 2013.
- [6] Oliveira, J. P., Miranda, R. M., Braz Fernandes, F. M. High Strain and long duration Cycling behavior of laser welded NiTi sheets. *International Journal of Fatigue*, 2015.
- [7] Vieira, L. M. A. *Laser welding of shape memory alloys [master dissertation]*. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa; 2010.
- [8] Kauffman, G. B., Mayo, I. The story of Nitinol: The serendipitous discovery of the memory metal and its applications. *The Chemical Educator*, 2, 1-21, 1997.
- [9] Rao, A., Srinivasa, A. R., Reddy, J. N. *Design of Shape Memory Alloys (SMA) Actuators*, Springer, 2015.
- [10] Falvo, A., Furguele, F. M., Maletta, C. Laser welding of a NiTi alloy: Mechanical and shape memory behavior. *Materials Science and Engineering A*, 412, 235-240, 2005.
- [11] Sun, L., Huang, W. M. Nature of Multistage transformation in shape memory alloys upon heating. *Metal Science and Heat Treatment*, 51, 7-12, 2009.
- [12] Brandal, G., Satoh, G., Yao, Y. L., Naveed, S. Beneficial interface geometry for laser joining of NiTi to stainless steel wires. *Journal of Manufacturing*

- Science and Engineering, 135, 1006-1 – 1006-10, 2013.
- [13] Cheng, F. T., Lo, K. H., Man, H. C. A preliminary study of laser cladding of AISI 316 stainless steel using preplaced NiTi wires. *Materials Science and Engineering A*, 380, 20-29, 2004.
- [14] Wohlschlogel, M., Glabel, G., Sanchez, D., Schubler, A., Dillenz, A., Saal, D., Mayr, P. Characterization of nitinol laser-welded joints by nondestructive testing. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24, 4991-4996, 2015.
- [15] Ng, C. H., Mok, E. S. H., Man, H. C. Effect of Ta interlayer on laser welding of NiTi to AISI 316L stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 226, 69-77, 2015.
- [16] Zoeram, A. S., Mousavi, A. A., Mohsenifar, F. Effect of welding speed on mechanical and fracture behavior of nitinol laser-joints. *Welding in the World*, 1-9, 2015.
- [17] Belyaev, S., Rubanik, V., Resnina, N., Rubanik, V., Rubanik, O., Borisov, V., Lomakin, I. Functional properties of bimetal composite os “stainless steel – TiNi alloy” produced by explosion welding. *Physics Procedia*, 10, 52-57, 2010.
- [18] Mirshekari, G. R., Saatchi, A., Kermanpur, A., Sandrnezhaad, S. K. Laser welding of NiTi shape memory alloy: Comparison of the similar and dissimilar joints to AISI 304 stainless steel. *Optics & Laser Technology*, 54, 151-158, 2013.
- [19] Chatterjee, S., Abinandanan, T. A., Chattopadhyay, K. Phase formation in Ti/Ni dissimilar welds. *Materials Science and Engineering A*, 490, 7-15, 2008.
- [20] Quintino, L., Miranda, R. M. Welding shape memory alloys with NdYAG lasers. *Soldagem & Inspeção São Paulo*, 17, 210-217, 2012.
- [21] Voundrous, P., Kolarik, L., Kolarikova, M. Plasma arc welding of NiTi and 304 steel. *Anais do 23rd International DAAAMS Symposium*, 23, 1, 2012.
- [22] Zhou, Y. N. *Microjoining and Nanojoining*. Publicado por Woodhead Limited, Inglaterra, 2008.
- [23] Zhang, C., Zhao, S., Sun, X., Sun, D., Sun, X. Corrosion of layer-welded NiTi shape memory alloy and stainless steel composite wires with a copper interlayer upon exposure to fluoride and mechanical stress. *Corrosion Science*, 82, 404-409, 2014.
- [24] Lu, S. X., Yang, Z. L., Dong, H. G. Welding of shape memory alloy to stainless steel for medical occluder. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23, 156-160, 2013.
- [25] Ghodssi, R., Lin, P. *MEMS Materials and Processes Handbook*. New York: Springer Science & Business Media, LLC; 2011.
- [26] Gupta, K. P. *The Fe-Ni-Ti (iron-nickel-titanium) system*. Indian Institute Metals, 1990.
- [27] Tam, B. *Micro-Welding of Nitinol Shape Memory Alloy* [master dissertation]. Ontário: Universidade de Waterloo; 2010.
- [28] Li, H., Sun, D., Cai, X., Dong, P., Gu, X. Laser welding of TiNi shape memory alloy and stainless steel using Co filler metal. *Optics & Laser Technology*, 45, 453-460, 2013.
- [29] Li, H., Sun, D. S., Gu, X., Dong, P., Lu, Z. Effects of the thickness of Cu filler metal on the microstructure and properties of laser-welded TiNi alloy and stainless steel joint. *Materials and Design*, 50, 342-350, 2013.
- [30] Li, H. M., Sun, D. Q., Cai, X. L., Dong, P., Wang, W. Q. Laser welding of TiNi shape memory alloy and stainless steel using Ni interlayer. *Materials and Design*, 39, 285-293, 2012.
- [31] Gugel, H., Schuermann, A., Theisen, W. Laser welding of NiTi wires. *Materials Science and Engineering A*, 481-482, 668-671, 2008.
- [32] Gugel, H., Theisen, W. Microstructural investigations of laser welded dissimilar Nickel-Titanium-steel joints. *ESOMAT 2009*, 05009-1 – 05009-6, 2009.
- [33] Vannod, J., Bornert, M., Bidaux, J. E., Bataillard, L., Karimi, A., Drezet, J. M., Rappaz, M., Hessler-Wyser, A. Mechanical and microstructural integrity of nickel-titanium and stainless steel laser joined wires. *Acta Materialia*, 59, 6538-6546, 2011.
- [34] Vannod, J. *Laser Welding of Nickel-Titanium and Stainless Steel Wires: Processing, Metallurgy and Properties* [doctorate thesis]. Lausana: École Polytechnique Fédérale de Lausanne; 2011.
- [35] Zhang, C., Zhao, S., Sun, X., Sun, D., Sun, X. Corrosion of layer-welded NiTi shape memory alloy and stainless steel composite wires with a copper interlayer upon exposure to fluoride and mechanical stress. *Corrosion Science*, 82, 404-409, 2014.
- [36] Pouquet, J., Miranda, R. M., Quintino, L., Williams, S. Dissimilar laser welding of NiTi to stainless steel. *Internations Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61, 205-212, 2012.
- [37] Burdet, P., Vannod, J., Wyser, A. H., Rappaz, M., Cantoni, M. Three-dimensional chemical analysis of laser-welded NiTi-stainless steel wires using a dual-beam FIB. *Acta Materialia*, 61, 3090-3098, 2013.
- [38] Chien, C. L., Liou, H. Crystalline and amorphous FeTi and Fe₂Ti. *Research Papers in Physics and Astronomy*, 31, 8238-8241, 1985.
- [39] Wu, Y., Wu, X., Qin, S., Yang, K. Compressibility and phase transition of intermetallic compound Fe₂Ti. *Journal of Alloy and Compounds*, 558, 160-163, 2013.
- [40] Callister, W. D. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. New York: John Wiley & Sons, Inc; 2002.