



Tema: Tecnologias e aplicações avançadas: tendências

AVALIAÇÃO SUPERFICIAL E MICROESTRUTURAL DE CORDÕES DE SOLDA DE NIÓBIO TRATADOS TERMICAMENTE VIA IMPLANTAÇÃO IÔNICA POR IMERSÃO EM PLASMA*

Maria Fernanda Gonçalves de Oliveira¹

Denis Angelo da Silva²

Aline Capella de Oliveira³

Rogério Moraes Oliveira⁴

Rudimar Riva⁵

Resumo

O objetivo do trabalho é estudar a viabilidade da realização do tratamento superficial via implantação iônica por imersão em plasma (3IP) de nitrogênio de chapas de nióbio soldadas previamente com feixe de laser, para formação de camadas de nitretos sobre superfície do material base, zona termicamente afetada (ZTA) e do cordão de solda. Os resultados obtidos são discutidos levando-se em consideração a influência do tratamento nas alterações apresentadas pelo material tratado. Os resultados mostram uma significativa alteração na superfície do material, em termos de composição química, evidenciando a formação de nitretos de nióbio sobre esta superfície. Em geral, os nitretos de materiais refratários apresentam propriedades desejáveis para aplicações que envolvem temperatura elevada de trabalho como: estabilidade térmica, elevado ponto de fusão, boa resistência à oxidação; além de apresentarem elevada dureza e baixas taxas de desgaste e corrosão. Em virtude do aquecimento do substrato, durante o tratamento, observam-se mudanças microestruturais no material tratado. Tais alterações microestruturais, nas diferentes regiões analisadas, mostram-se benéficas na homogeneidade dos valores de dureza apresentados, especialmente na região do cordão de solda e material de base. A redução da dispersão dos valores de dureza entre o cordão de solda, a zona termicamente afetada (ZAC) e o material de base podem minimizar a presença de regiões com concentrações de tensões, melhorando a resistência mecânica do material quando submetidos a esforços mecânicos, como tração uniaxial.

Palavras-chave: Nióbio; 3IP; Nitreto; Solda.

SUPERFICIAL AND MICROSTRUCTURAL EVALUATION OF NIOBIUM WELD BEADS TREATED BY PLASMA BASED ION IMPLANTATION

Abstract

The present work evaluates the influence of surface treatment on niobium sheet by nitrogen plasma based ion implantation (PBII), previously welded using laser beam technology. The results have shown a significant change in the material surface after the PBII treatment with the formation of niobium nitrides on the material surface. In general, nitrides of refractory materials present properties, such as: thermal stability, high melting point, good oxidation resistance, high hardness, and low wear and corrosion rates, desirable to applications concerning high operating temperature. Due to the heating of the substrate during thermal treatment are observed microstructural changes in the material bulk. The microstructural changes observed in the bead weld, heat affected zone (HAZ) and base material cause homogenization of hardness values in these regions. This aspect can minimize the formation of local stress, improving the material mechanical strength when it is subjected to mechanical solicitation, such as tensile uniaxial tests.

Keywords: Niobium; PBII; Niobium nitrides; Laser welding.

¹ Undergraduate student, Institute of Science and Technology, Federal University of São Paulo (Unifesp), São José dos Campos, SP, Brazil.

² Undergraduate student, Institute of Science and Technology, Unifesp, São José dos Campos, SP, Brazil.

³ Assistant Professor, Institute of Science and Technology, Unifesp, São José dos Campos, São Paulo, Brazil.

⁴ Senior Researcher, National Institute of Space Researches, Plasma Associate Laboratory, São José dos Campos, SP, Brazil.

⁵ Senior Researcher, Institute for Advanced Studies, Photonic – Lasers, São José dos Campos, SP, Brazil.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil



1 INTRODUÇÃO

O nióbio (Nb) é um metal refratário com aplicações nos setores de mísseis, motores aeronáuticos e aeronaves, especialmente devido às suas propriedades como: alta condutividade elétrica, boa resistência à corrosão, maleabilidade e alta dureza [1], estudos têm sido realizados visando o aperfeiçoamento de suas características e sua utilização em diferentes áreas [2]. O Brasil detém praticamente o monopólio de nióbio (Nb), 98%, um metal cujas jazidas encontram-se em maior concentração no estado de Minas Gerais [3].

No setor aeroespacial, o nióbio vem despertando um grande interesse, especialmente devido à sua temperatura de fusão elevada, 2468°C, que possibilita seu emprego em aplicações envolvendo componentes de motores-foguetes [4]. O Laboratório de Combustão e Propulsão do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (LCP/INPE), por exemplo, tem utilizado o nióbio puro para fabricação de tubearias de motores-foguetes de múltiplos estágios, no estudo do desempenho e análises térmicas de propulsores bipolentes [5]. A utilização do nióbio puro, entretanto, ainda é pouco explorada pelo setor aeroespacial nacional.

Um dos aspectos relevantes no processamento de metais refratários é sua acentuada reação ao oxigênio, especialmente em temperaturas elevadas – aspecto intrínseco ao fenômeno de combustão presente em motores-foguetes. É o caso do Nb, onde a reação com o ambiente inicia-se em temperaturas próximas a 200°C [6]. Tal aspecto pode degradar suas propriedades mecânicas, comprometendo seu desempenho nestas aplicações.

Além disso, a oxidação influencia negativamente nos diferentes processos de junção deste material: soldagem a arco, a soldagem por feixe de elétrons, a soldagem por resistência, a soldagem por pressão, a soldagem ultrassônica, a soldagem por fricção, brasagem [6] e também na soldagem a laser; tanto pela formação de defeitos na região de junção como na perda de propriedades mecânicas existentes no material de base.

Dessa maneira, a pureza e o método de fabricação de qualquer metal refratário são duas características importantes na qualidade da solda [6]. A utilização da tecnologia laser no processo de união de metais e ligas apresenta-se de modo interessante, devido a suas características únicas de versatilidade, confiabilidade, velocidade, automação e alta precisão [7]. As propriedades da coerência espacial, que permite a focalização da luz em um ponto muito pequeno, e a alta densidade de energia, que fornece uma intensidade de radiação localizada e extremamente elevada, são as bases de suas vantagens sobre métodos tradicionais de processamento de materiais [7].

Uma das soluções para minimizar o efeito da oxidação, são as camadas protetivas empregadas nas superfícies destes metais refratários [6], de forma a inibir a oxidação superficial em determinadas aplicações. Em particular, nitretos de metais refratários apresentam propriedades desejáveis como: estabilidade térmica, elevado ponto de fusão, elevada dureza e baixas taxas de desgaste e corrosão. Em contato com o ar, os nitretos de nióbio só oxidam-se em temperaturas acima de 800°C [8].

Uma das tecnologias disponíveis para formação de camadas protetivas, como nitretos em superfícies metálicas, é a implantação iônica por imersão em plasma (3IP). A técnica consiste no bombardeamento de um material sólido com átomos ionizados de média e alta energia. Essa técnica oferece a possibilidade de se implantar, ou ligar, qualquer tipo de elemento nas regiões próximas da superfície do

* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil*



material [9], modificando as características mecânicas, físicas ou químicas na região superficial do material [10]. O processo de 3IP é gerado em uma descarga, normalmente do tipo luminescente, onde átomos e/ou moléculas são ionizados, acelerados em um campo elétrico e implantados em determinado substrato. A alteração nas propriedades do substrato se deve à transferência de energia dos íons para sua superfície e à diversidade de espécies químicas presentes no plasma [11]. No 3IP, o material a ser tratado é imerso no plasma, sendo submetido a pulsos negativos de média a alta tensão (tipicamente 5 kV a 50 kV), duração de 10 μ s a 100 μ s e taxa de repetição variando entre 10 Hz a 5 kHz [12]. Resultados promissores foram obtidos, em termos de formação de nitretos de nióbio nas camadas mais superficiais do metal, promovendo melhorias em suas propriedades mecânicas e tribológicas [4].

Neste contexto, o presente projeto tem como objetivo estudar a viabilidade de realizar soldas de chapas de nióbio puro utilizando um laser de Yb:fibra de alta potência e avaliar o comportamento do conjunto soldado após ser submetido ao tratamento de 3IP. O objetivo é gerar uma camada superficial de nitretos de nióbio, gerando uma barreira protetora tanto na região soldada, quanto no material base, inibindo a oxidação da superfície em aplicações que envolvam temperaturas elevadas.

Trata-se de um projeto exploratório voltado a soldagem a laser em chapas de nióbio puro e à utilização do processo 3IP como tratamento pós-soldagem nos cordões de solda de nióbio, para aplicações futuras em componentes de motores-foguetes do setor aeroespacial.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Chapas de nióbio (Nb), com 3,0mm de espessura, foram utilizadas no estudo. A Tabela 1 apresenta os dados obtidos por espectroscopia de raios x por energia dispersiva (EDS) da amostra considerada. Embora o metal seja considerado puro, a presença de contaminantes, Si e Cu, foi identificada pela análise.

Primeiramente, as chapas foram submetidas ao processo de soldagem em geometria *bead-on-plate*, no Laboratório de Desenvolvimento e Aplicações de Lasers e Óptica (DedALO) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv-DCTA). Para isso, uma amostra com dimensão de 20 mm x 100 mm, foi fixada sobre uma mesa XYZ CNC de processo. Ensaios foram conduzidos utilizando um laser contínuo de Yb:fibra com 2 kW de potência média máxima

Utilizando uma lente com distância focal de 160 mm, o feixe foi focalizado em uma área de 100 μ m de diâmetro sobre a superfície da chapa. A cabeça de processamento do laser em um ângulo 3° em relação à superfície da amostra. Hélio, com fluxo de 45 l/min, foi utilizado como gás de proteção no processo.

As variações da potência média do laser e das velocidades de processo estão descritas na Tabela 2, a partir das condições de processo otimizadas, ensaios adicionais de soldagem foram realizados para posterior tratamento via 3IP, mantendo-se fixos parâmetros de soldagem de 1500 W e 100 mm/s.

Tabela 1: Potências e velocidades utilizadas.

Potência (W)	1000			1500			800		
Velocidade (mm/s)	100	50	75	50	75	100	50	75	100

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil

Tabela 2: EDS de amostra padrão do nióbio.

Elemento	% Peso
Nióbio (Nb)	91,9
Silício (Si)	4,48
Cobre (Cu)	3,63

Para a análise microestrutural e para o levantamento das características dimensionais da seção transversal do cordão, as seções transversais do conjunto soldado foram embutidas em baquelite e lixadas com material de SiC de granulação de 240, 400, 600 e 1200, respectivamente. Em seguida foram polidas em solução de alumina de 1 μm . Para revelação da microestrutura do material, as amostras foram submetidas a ataque eletrolítico, com solução de 60 mL de ácido fluorídrico e 20 mL de ácido nítrico, aplicando uma tensão de 4 V por aproximadamente 5 segundos. Análises metalográficas das regiões: zona de fusão (ZF), zona termicamente afetada pelo calor (ZAC) e material de base, foram feitas utilizando um microscópio óptico (Zeiss, modelo Axiolmager A2m).

Amostras soldadas também foram cortadas em dimensões de 20 mm x 25 mm e limpas em álcool etílico. Em seguida foram submetidas ao tratamento de implantação iônica por imersão em plasma (3IP), realizado no LAP-INPE. No ensaio, a amostra foi inserida em uma câmara de vácuo. A fim de assegurar a limpeza superficial do metal, um bombardeamento prévio sobre a amostra com íons de argônio (Ar), utilizando uma tensão de 5kV durante 10 minutos, foi realizado. Ensaios de 3IP de nitrogênio foram conduzidos em pressão de trabalho entre 3,0 mbar e 4,0 mbar. As condições experimentais estão descritas na Tabela 2. Devido ao aquecimento do substrato, o porta-amostra foi polarizado positivamente (50 a 100 V), durante o intervalo de tempo em que o pulso de alta tensão permanece desligado, como o objetivo de atrair elétrons, termionicamente emitidos por um catodo óxido, em direção à amostra para seu respectivo aquecimento (Figura 1).

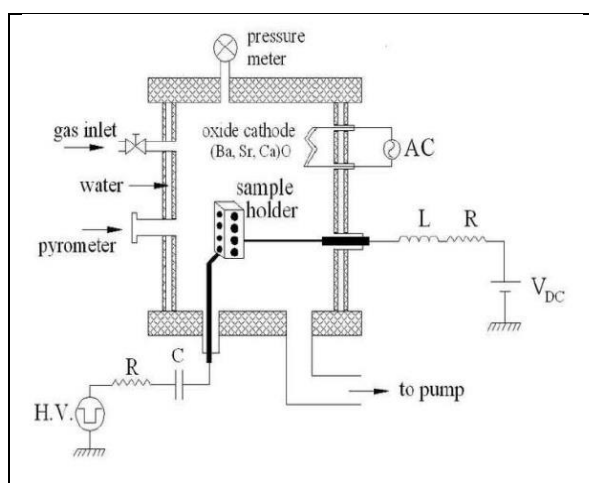


Figura 1- Esquema do aparato experimental utilizado para tratamento 3IP em temperatura controlada.

* Contribuição técnica ao 69^o Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14^o ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil



Tabela 3: Condições experimentais consideradas no processo 3IP

Amostra	Dados do pulso negativo			Temperatura do substrato	Tempo de tratamento
	Frequência	Largura	Tensão		
1T	400 Hz	30 μ s	9 kV	1000° C	1 hora
2T	500 Hz	30 μ s	8 kV	1200° C	1 hora

Para o levantamento das fases e da composição química da superfície em amostras não tratadas e tratadas por 3IP, caracterizações superficiais foram realizadas por meio de difratometria de raios X (DRX Panalytical – modelo x' Pert Powder), considerando uma varredura entre ângulos (2θ) de 20° a 120°. Após a obtenção do espectro, análises dos picos foram feitas por meio do *software* PANalytical, a partir da comparação entre cartas espectrais padrões.

Ensaio de microdureza Vickers foram realizados nas amostras soldadas com e sem tratamento de 3IP, considerando a ZF, ZAC e material de ZAC, ZF e material de base, utilizando um Microdurômetro (Shimadzu, modelo HMV-2), disponibilizado pelo Instituto de Estudos Avançados (IEAv/DCTA). Toda análise realizada considerou uma carga constante 25gf.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a realização do procedimento experimental, as características dimensionais do cordão foram analisadas em função da variação dos parâmetros de processo, e estão apresentadas nas Figuras 2 e 3. Observa-se que os cordões de solda apresentam maiores valores de profundidade de penetração seja com a redução da velocidade de processo, considerando uma potência média constante, ou com o aumento da potência média aplicada, em velocidade fixa. Este aspecto está associado à quantidade de intensidade de energia, entregue em função da variação dos parâmetros, que é efetivamente absorvida pelo material durante o processo de soldagem.

Além disso, é possível observar um comportamento similar em relação à largura no topo do cordão de solda, com redução do seu valor com o aumento da velocidade de processo ou diminuição da potência média aplicada, embora a variação da largura do cordão nas regiões central e na raiz aproxime-se de um valor aproximadamente constante com a variação dos parâmetros de processo. Essa característica está de acordo com sua proporcionalidade com o comprimento de difusão térmica do material, onde a medida independe da potência do laser, sendo uma função apenas da condutividade (ou da difusividade) térmica do material e da velocidade de soldagem [13].

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil

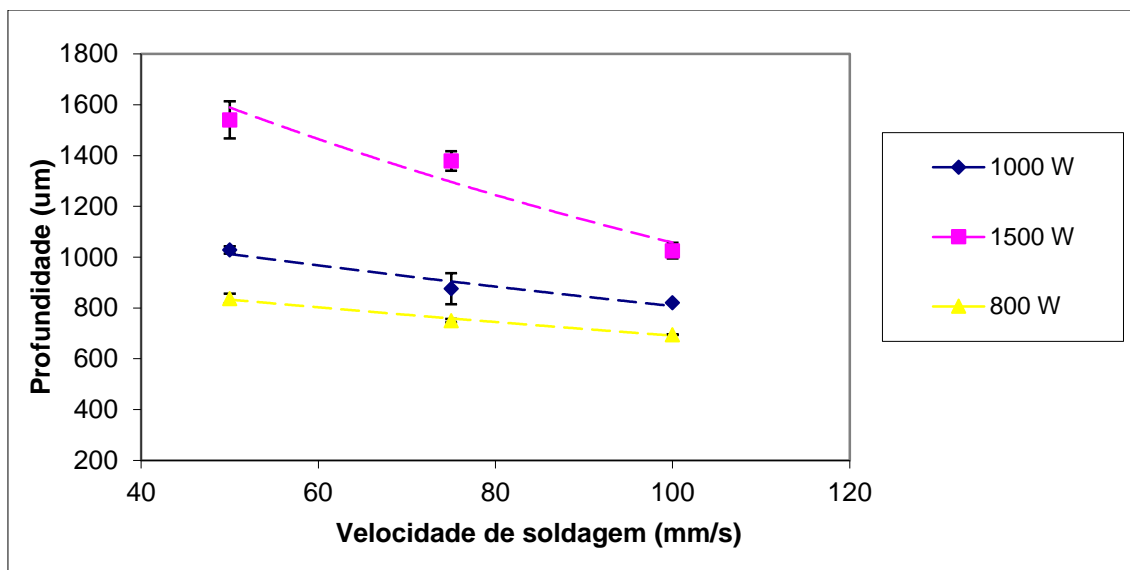


Figura 2: Profundidade de penetração do cordão de solda de Nb em função da velocidade de processo.

As dimensões do cordão de solda e da ZAC são funções da potência média e velocidade consideradas. Observam-se maiores valores de profundidade de penetração seja com a redução da velocidade de processo, para dada potência média, ou com o aumento da potência média aplicada, em velocidade fixa. Este aspecto está associado à quantidade de intensidade de energia, entregue em função da variação dos parâmetros, que é efetivamente absorvida pelo material durante o processo de soldagem. Comportamento similar é observado em relação à largura no topo do cordão de solda, embora as dimensões da largura do cordão na região central e raiz aproximem-se de um valor aproximadamente constante. Essa característica está relacionada ao comprimento de difusão térmica do material, onde a medida independe da potência do laser, sendo uma função apenas de sua condutividade (ou da difusividade) térmica e da velocidade de soldagem [13].

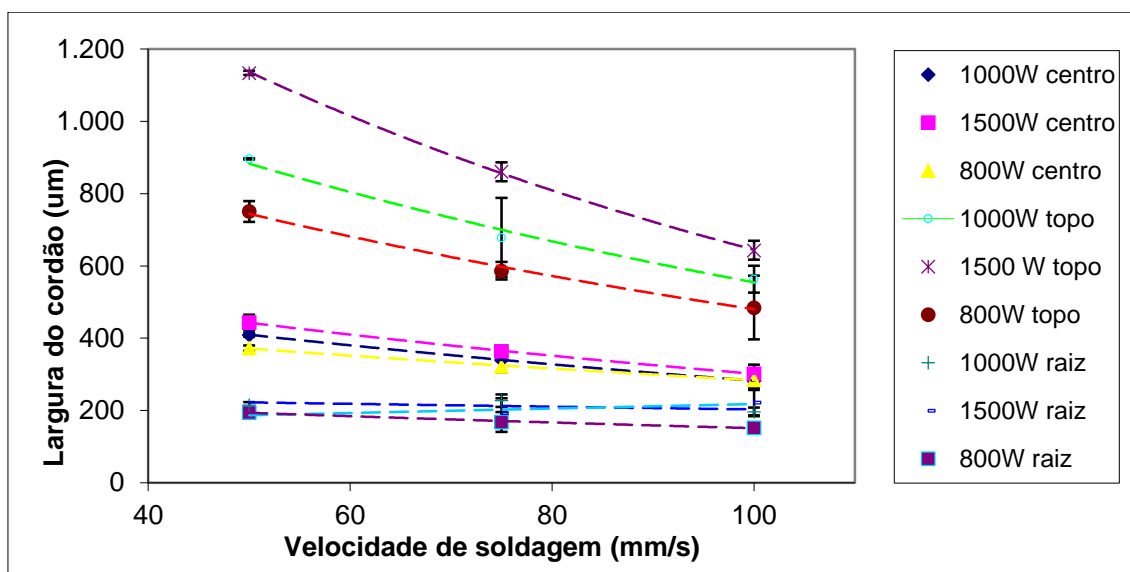


Figura 3: Largura do cordão de solda de Nb em função da velocidade de processo.



As Figuras 4(a), 4(b) e 4(c) comparam o (a) espectro obtido da superfície de amostra soldada sem tratamento (padrão), com os (b) espectros obtidos das superfícies do Nb soldado e submetido posteriormente ao tratamento de 3IP, em diferentes temperaturas (Tabela 2). Após a realização do tratamento 3IP, constata-se, por meio dos espectros de DRX, a formação de nitretos de nióbio na superfície do material soldado e posteriormente tratado via 3IP. Observa-se uma maior incidência de nitretos do tipo Nb_2N , embora nitretos do tipo Nb_4N_5 também estejam presentes.

Na Figura 4(a) observam-se picos de nióbio puro e de óxido (cartas padrões 00-035-0789 e 01-084-0455, respectivamente). Ao realizar o tratamento 3IP nas diferentes condições experimentais pode-se constatar a formação de nitretos na superfície das amostras. Na primeira condição (1T, Tabela 2) nota-se uma grande quantidade de picos nitretos do tipo Nb_2N (cartão padrão 00-020-0802), contendo também picos de nitretos do tipo Nb_4N_5 (carta padrão 01-074-0606). No segundo tratamento (2T, Tabela 2) a formação de picos de nitretos, do tipo Nb_2N e Nb_4N_5 , embora suas intensidades sejam comparativamente menor em relação à primeira condição experimental. Tal diferença pode estar associada tanto à maior temperatura, quanto à maior tensão do pulso, considerados no primeiro tratamento de 3IP. Como mencionado, o aumento da temperatura do substrato proporciona o aumento da espessura da camada tratada na implantação. Além disso, o aumento da tensão pode aumentar o número de íons implantados na superfície do material, levando assim à uma formação mais intensa de nitretos nesta região.

As imagens da seção transversal do cordão de solda, obtidas por meio de *microscopia óptica*, são mostradas nas Figuras 5(a), 5(b) e 5(c), considerando uma amostra sem tratamento e amostras submetidas ao tratamento de 3IP, nas diferentes condições experimentais. Observa-se na amostra soldada sem tratamento uma significativa variação na microestrutura do material comparando a região de fusão (ZF), a zona afetada pelo calor (ZAC) e a região do material de base. Tanto na ZF quanto na ZAC, a recristalização do material é obtida após a interação do feixe de laser com o material. Já na região do material de base, a metalografia apresenta riscos característicos da laminação a frio do material, característicos do seu processo de fabricação, o qual pode dar origem ao encruamento do metal.

Tal aspecto, entretanto, não é observado nas metalografias do metal soldado e submetidos posteriormente ao tratamento de 3IP (Figuras 5(b) e 5(c)). Nestes casos, observa-se também a presença de grãos finos equiaxiais, tornando a microestrutura nas diferentes regiões: ZF, ZAC e do material base, mais homogênea, dificultando inclusive a identificação das fronteiras entre estas regiões. Este comportamento está diretamente relacionado ao aquecimento do substrato durante o processo de implantação iônica, onde as temperaturas de aquecimento alcançaram entre 1000° e 1200° C, muito próximas temperatura de recristalização do nióbio, da ordem 1050° C [14]. É importante ressaltar que se o substrato não fosse aquecido durante o tratamento de 3IP (processo 3IP convencional), a recristalização do material de base não seria observado.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil

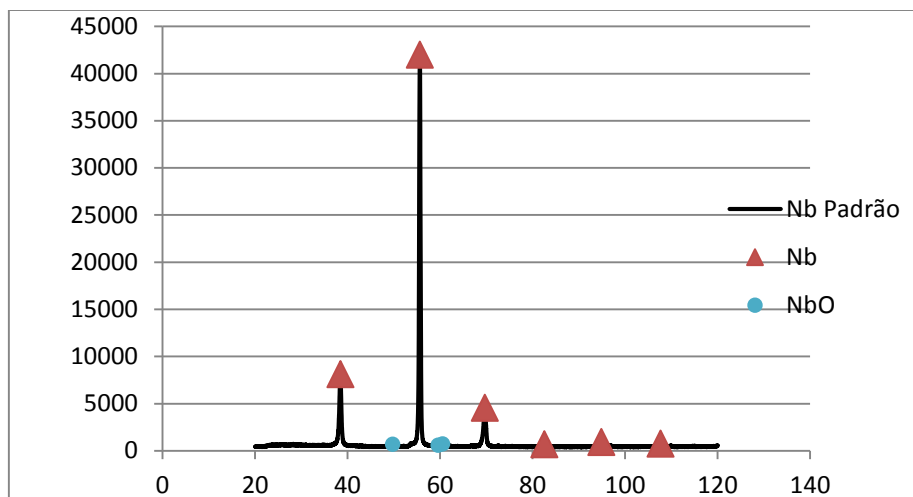


Figura 4 (a)- Espectro de DRX da superfície de uma amostra de nióbio soldada.

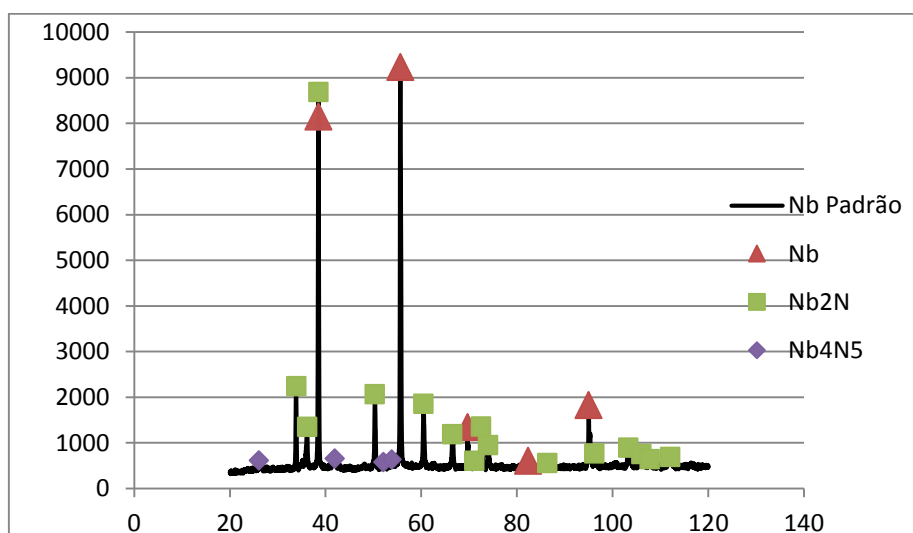


Figura 4 (b)- Espectro de DRX da superfície da amostra soldada e submetida posteriormente ao 3IP a 1000° C.

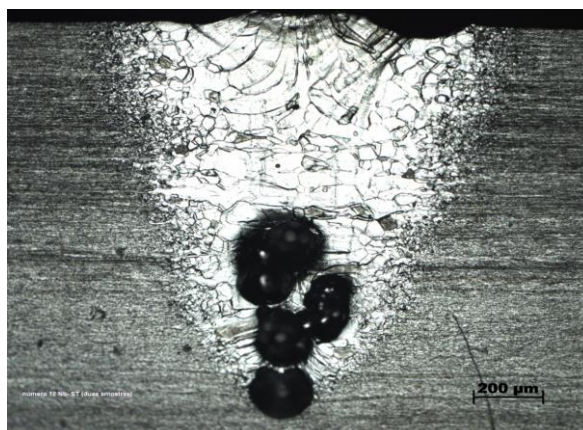


Figura 5(a)- Microestrutura da seção transversal de uma amostra soldada sem tratamento.



Figura 5(b)- Microestrutura da seção transversal de uma amostra soldada e posteriormente tratada via 3IP a 1000° C.

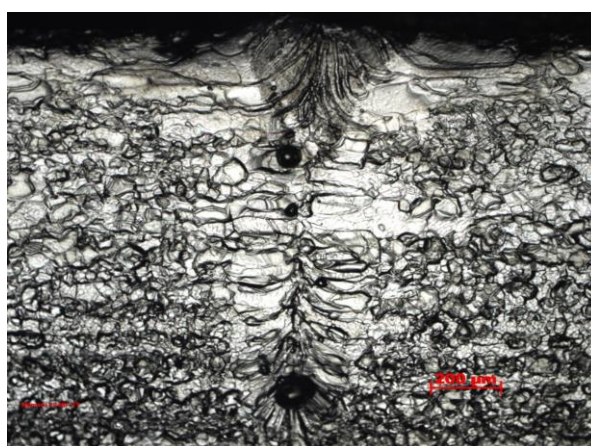


Figura 5(c)- Microestrutura da seção transversal de uma amostra soldada e posteriormente tratada via 3IP a 1200° C.

A partir da homogeneidade do material, obtida após o tratamento de 3IP, os efeitos da variação de dureza foram avaliados, nas diferentes regiões do cordão de solda e material de base. A Figura 6 compara os valores de microdureza Vickers entre a amostra soldada sem tratamento com os resultados obtidos de amostras soldadas e posteriormente tratadas via 3IP.

Nota-se que, comparado a amostra soldada sem tratamento, as amostras tratadas via 3IP apresentaram valores de dureza mais homogêneos nas diferentes regiões: ZF, ZAC e material de base, entre 100 e 150 Hv. É possível observar ainda, a diminuição da dureza na região de base em amostras submetidas ao tratamento de 3IP, comparado ao material de base sem o tratamento. Isso ocorre devido à recristalização do material nesta região, que se mostrou encruado em seu estado original. Observa-se que a região da ZF de amostras sem tratamento apresenta aumento nos valores de dureza quando comparados à dureza média do material de base. Esta característica pode ser devido ao processo de fusão e posterior solidificação da região, com a formação de uma região de microestrutura diferente à observada no material base, em termos, por exemplo, do tamanho de grão gerado nesta região ou devido à presença de impurezas durante o processo. Valores de dureza mais homogêneos podem ser benéficos na resistência mecânica do conjunto soldado quando este é submetido a esforços de tração uniaxial, por exemplo. Neste

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil

aspecto, ensaios posteriores serão realizados na segunda etapa do projeto, de modo a avaliar tal comportamento.

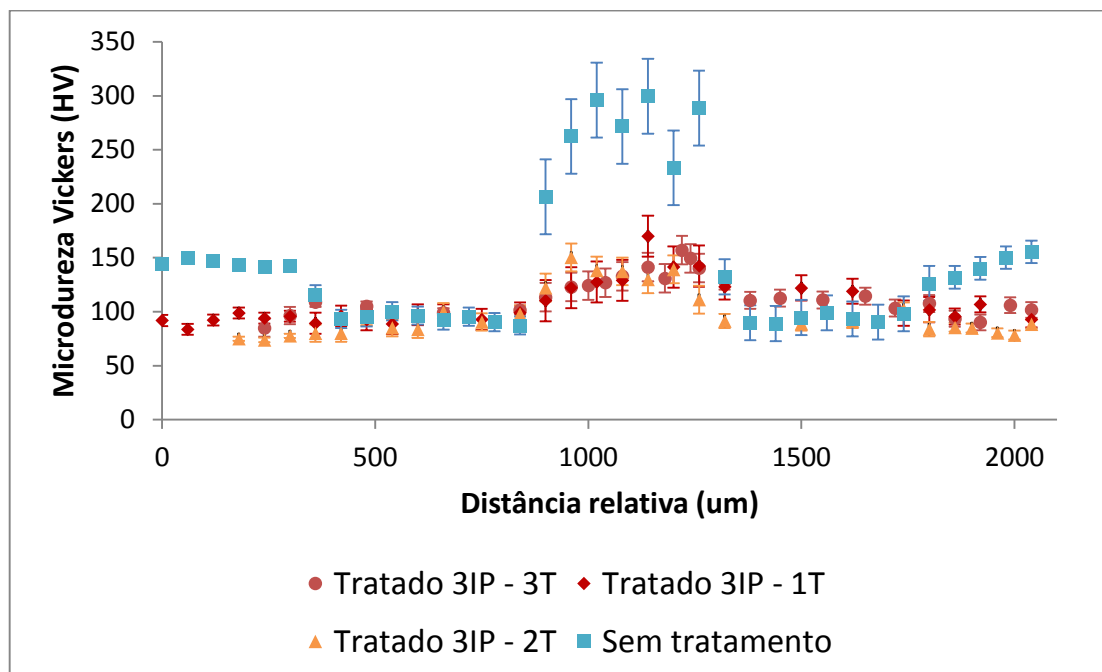


Figura 6- Microdureza Vickers de amostras soldadas com e sem tratamento térmico de 3IP.

4 CONCLUSÕES

Comprovou-se a eficácia do tratamento 3IP na formação de nitretos de nióbio superficiais. Após o tratamento do substrato, em temperatura elevada, as regiões do cordão de solda, ZF e ZAC, e o material de base apresentam uma microestrutura mais homogênea. Tal comportamento pode influenciar na melhoria das propriedades de resistência mecânica do conjunto soldado.

Verificou-se também, mudanças significativas nos valores de dureza nos cordões de solda submetidos ao tratamento de 3IP, em virtude da recristalização do material de base e da homogeneização das diferentes regiões analisadas.

Maiores profundidades de penetração do cordão de solda foram obtidas tanto com o decréscimo da velocidade de processo, considerando uma potência média constante, como com o aumento da potência média aplicada, em velocidade fixa, chegando a profundidade da ordem de até 1553 μm na condição de 1500 W a 50 mm/s. Já a largura do cordão aproxima-se de um valor constante da ordem 0,4 mm nas condições analisadas, que é diretamente relacionado ao comprimento de difusão térmica do material.

Embora o baixo nível de porosidade apresentado, o espectro de DRX da amostra utilizada no experimento evidencia a presença de óxido na superfície do material, sendo necessário o melhor preparo da superfície para posterior aplicação no processo de soldagem a laser.

Agradecimentos

Nosso agradecimento ao CNPq pelo auxílio financeiro que possibilitou a realização deste trabalho (PIBIC-INPE n° 129710/2013-0e PIBIC-IEAv n° 134972/2013-9).

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil



REFERÊNCIAS

- 1 Santos LR. Nióbio. [acesso em 22 jan. 2014]. Disponível em: <http://www.infoescola.com/elementos-quimicos/niobio/>
- 2 Informações da agência USP- 18/02/2013. [Acessado em 30 de janeiro de 2014]. Disponível em: <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=superligas-de-niobio&id=020160130218>
- 3 Branco PM. O Nióbio Brasileiro. [Acesso em 22 jan.2014]. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=2616&sid=129>
- 4 Oliveira RM, Oliveira AC, Carreri FC, Gomesa GF, Ueda M, Silva MMNF, et al. Detailed surface analyses and improved mechanical and tribological properties of niobium treated by high temperature nitrogen plasmabased ion implantation. 2013.
- 5 Salles CER. Desempenho e análise térmica de um propulsor bipropelente de 200 N de empuxo. CONEM, V, 2008, Salvador. [Acesso em 5 mar. 2014]. Disponível em: <http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18%4080/2008/12.19.13.10/doc/medidas.pdf>.
- 6 Scott MH, Knowlson PM. British Welding Research Association, Abington Hall, Cambridge (Great Britain). The welding and brazing of the refractory metals niobium, tantalum, molybdenum and tungsten. J. Less Common Metals. 1963;5:205-244.
- 7 Cao X, Jahazi M, Immarigeon JP, Wallace W. A review of laser welding techniques for magnesium alloys. Journal of Materials Processing Technology. 2006;171:188-204.
- 8 Borcz C. Estudo do Processo de Nitretação por Plasma de Nióbio. [Acesso em 2 fev. 2014]. Disponível em: http://www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao_113_claudio_borcz.pdf
- 9 Anders A. Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, CA 94720, Usa from Plasma Immersion Ion Implantation to Deposition: A Historical Perspective on Principles and Trends, Surface and Coatings Technology. 2002;156:3-12.
- 10 Silva Junior AR, Ueda M, Silva G. Melhoramentos em Processamento 3IP com Pulsos de Baixa Energia Para Ligas de Alumínio e Aço Inox. São José dos Campos: INPE-LAS e ITA.
- 11 Pinto AEA, Tabacniks, M.H. Implantação Iônica, Relatório Técnico – Instituto de Física da USP – Laboratório de Materiais e Feixes Iônicos (2002).
- 12 Lima MSF, Riva R, Oliveira AC, Riva R, Siqueira GR. Laser beam welding aerospace aluminum using fiber lasers. Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, v. 7131, p. 12-18, 2009
- 13 Lima MSF, Riva R, Oliveira AC, Riva R, Siqueira GR. Laser beam welding aerospace aluminum using fiber lasers. In: Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering. 2009; v. 7131. p.12-18.
- 14 Tamura HM, Vurobi Junior S, Cintho OM, Sandim HRZ, Leite GS. Preliminary Study of Sintering of Metallic Niobium Processed for Mechanical Milling. [acesso em 4 fev. 2014]. Disponível em: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/056/42056354.pdf.

* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil*