

INVESTIGAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL NA SOLDAGEM LASER DO AÇO BAIXO CARBONO AISI 1010 E O AÇO INOXIDÁVEL AISI 304

José Roberto Berretta, berrretta@ipen.br¹
Denilson de Camargo Mirim, dmirim@usp.br¹
Wagner de Rossi, wderossi@ipen.br¹
Nelson Batista de Lima, nblima@ipen.br¹
Rene Ramos de Oliveira, rolivier@ipen.br¹
Sergio Delijaicov, sergiode@fei.edu.br²
Diego Gomes Oliva, gomes.oliva@gmail.com²

¹Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Av. Lineu Prestes 2242, Cidade Universitária, São Paulo, SP, CEP: 05508-000

²Centro Universitário da FEI, Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972, Bairro Assunção, São Bernardo do Campo, SP, CEP 09850-901

Resumo: *Um dos mais críticos problemas encontrados na união de materiais distintos é a formação de tensões residuais, que ocorre principalmente pelo fato desses materiais possuírem coeficientes de expansão térmica e condutividades térmicas diferentes. Assim neste trabalho foi avaliada a técnica de soldagem laser entre o aço baixo carbono, AISI 1010 e o aço inoxidável AISI 304. Os materiais foram unidos por solda autógena de topo com um laser de Nd:YAG contínuo em que foram variadas a potência, a velocidade de soldagem e o foco do feixe laser. O principal objetivo do estudo foi a identificação da influência dos parâmetros de soldagem mencionados, pela análise das tensões residuais na zona termicamente afetada (ZTA). Na superfície da amostra foram realizadas medidas de tensão residual pela técnica de difração de raios-X, para estudar suas variações em função dos parâmetros investigados. Com o foco do laser posicionado a 3mm abaixo da superfície das amostras, um planejamento fatorial de dois fatores a dois níveis foi executado para investigar a combinação dos fatores potência e velocidade. Como respostas foram utilizadas as tensões residuais em diferentes profundidades da ZTA, obtidas pelo método do furo cego. Para a análise dos resultados foram utilizadas a análise de variância e a regressão estatística baseada nas diferentes influências da entrada e combinação dos fatores na tensão residual geradas nessa união. Os resultados indicam que o desenvolvimento de modelos pode prever as respostas satisfatoriamente*

Palavras-chave: *tensão residual e soldagem laser.*

1. INTRODUÇÃO

O surgimento de novas tecnologias possibilitou a obtenção de novos materiais e novos métodos de manufatura. Segundo Steen (2005), hoje em dia o uso de um feixe laser como ferramenta está entre os métodos de processamento de materiais mais avançados e modernos, ocupando uma posição de destaque na indústria, apresentando inclusive um crescimento superior em relação a outros processos. Este fato deve-se, em grande parte, à sua capacidade de oferecer soluções para projetos que requerem processos de difícil, ou mesmo, de impossível execução por métodos tradicionais, conforme Semak e Uenishi (2003).

Dentro das aplicações de laser no processamento de materiais a soldagem vem sendo o maior foco de interesse da pesquisa atual. Em especial destaca-se a soldagem entre materiais dissimilares.

Na literatura existem alguns estudos sobre esse foco de pesquisa, como a união entre titânio e alumínio para aplicações aeronáuticas, Kreimeyer (2005). Outro utiliza, no experimento, uma técnica de soldagem com laser pulsado de Nd:YAG de aços inoxidáveis e ligas de níquel, tipo de união muito utilizada na válvula de controle de combustível de propulsores de guiamento de satélite, conforme Berretta et al (2007). Mais recentemente, um trabalho apresentado na conferência Lasers em Manufatura, ocorrido em Munique 2007, teve como objetivo a união entre alumínio e aço carbono, investigados para uso na indústria naval, na construção de modernos iates. Este tipo de junta já foi pesquisado anteriormente por Chen e Kovacevik (2004), para aplicações criogênicas. Esses estudos dão uma dimensão da importância atual e global da união entre diferentes materiais. O projeto aqui apresentado, portanto, procura acrescentar

avanços nesta área propondo a investigação de tensões residuais na soldagem laser entre materiais dissimilares, visando a soldagem em componentes usados em usinas nucleares.

Um dos mais críticos problemas associados à união entre materiais distintos é a formação de tensões residuais. O estado interno de tensão é causado quando um material é submetido a processo térmico e/ou mecânico, como por exemplo, na estampagem, na laminação ou no forjamento. A tensão residual induzida termicamente, resultado de um processo de soldagem, é outro exemplo de particular interesse para esse estudo. Pois podem resultar em grandes distorções geométricas de um componente tornando-se visível a olho nu. Na engenharia é fato conhecido a influência da tensão residual na resistência à fadiga de um componente e deve-se ter uma atenção especial com ela no caso de fadiga de alto-ciclo.

O controle dos parâmetros de processo de soldagem laser pode reduzir às tensões residuais de um componente, minimizando a necessidade de procedimento adicional posterior a união. O problema de tensão residual surge devido ao calor absorvido durante o processo de soldagem. Quando se trata de união entre materiais dissimilares este problema se torna extremamente complicado devido às diferenças nos coeficientes de expansão térmica e de condutividade térmica dos materiais envolvidos no processo. Um estudo de Mochizuki (2007) publicado na revista Nuclear Engineering and Design, sobre soldagem de materiais dissimilares reporta que a distorção provocada pela tensão residual pode ser útil na estimativa de sua magnitude e direção.

A classe de aços inoxidáveis austeníticos, tem em média uma condutividade térmica de um terço da condutividade de aços carbono, além disso, o coeficiente de expansão térmica dos aços inoxidáveis é em média 50% maior que dos aços carbono. Segundo Dawes (1992), as uniões entre esses dois tipos de materiais, portanto, são propensas a expansões desiguais e distorções. Também são detectados, nesse caso, altos valores de tensão residual concentrados na zona termicamente afetada (ZTA), explicados pela expansão resultante da mudança de fase durante o resfriamento, conforme Masabuchi (1980). Observa-se ainda que a maior tensão residual ocorre na ZTA do aço inoxidável.

No estudo da influência dos parâmetros de processo serão usadas técnicas estatísticas. Dentro deste método, vários modelos são propostos na literatura por Montgomery (1997) e Bruns et al. (2001), como: regressão estatística, rede neural artificial (RNA), teoria dos conjuntos fuzzy, em conjunto com o método Taguchi, metodologia da superfície de resposta (MSR), programação matemática, entre outras. Apesar de um grande número de estudos realizados, não existe um modelo universal que correlacione a influência e as interações das variáveis (entrada/saída). Recentemente observa-se alguns trabalhos reportando o uso de técnicas estatísticas na área de soldagem, entre eles, Anawa e Olabi (2006) e (2008), aplicaram DOE e o método Taguchi para estudar o efeito dos parâmetros do processo de soldagem laser na união de materiais dissimilares. Tarng et al (2002), conduziram um estudo para identificar os principais parâmetros no processo de otimização de soldagem por arco submerso, com o uso do método Taguchi.

As técnicas estatísticas podem satisfazer as necessidades econômicas de solução de problemas e otimização de projetos de produtos ou processos na indústria de manufatura. Mas a sua aplicação requer um planejamento cuidadoso, um plano detalhado do experimento e uma análise minuciosa dos resultados. Por estes motivos, a estatística está se tornando uma ferramenta atrativa para engenheiros e cientistas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados para a investigação da união por solda laser foram: o aço inoxidável austenítico AISI 304 e o aço baixo carbono AISI 1010. Estes materiais têm a composição química apresentada na Tab.(1). As propriedades mecânicas são apresentadas na Tab.(2), enquanto as propriedades térmicas estão na Tab.(3).

Tabela 1. Composição química dos materiais em Engenering Materials eFunda (2010).

%	Ni	Cr	Fe	C	Si	Mn	P
AISI 304	8 – 10,5	18 - 20	bal.	0,08	1	2	0,045 (max)
AISI 1010	-	-	bal.	0,08 – 0,13	-	0,3 – 0,6	0,05 (max)

Tabela 2. Propriedades mecânicas dos materiais em Engenering Materials eFunda (2010).

Material	σ_{rup} (Mpa)	σ_{esc} (Mpa)	Alongamento %	Mod. de elasticidade (Gpa)	coeficiente. de Poisson
AISI 1010	343	127	20	210	0,29
AISI 304	617	235	40	193	0,29

Tabela 3. Propriedades térmicas dos materiais em Engineering Materials eFundu (2010).

Material	Expansão térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	Condutividade térmica (W/m - K)	calor específico (J/Kg - K)
AISI 1010	15	65,2	450
AISI 304	17,2	16,2	500

As amostras foram preparadas partindo-se de chapas de 3 mm de espessura nas dimensões de 200 mm x 80 mm para cada um dos materiais. Em seguida, elas foram montadas em um dispositivo, para posicionar e fixar as amostras em conformidade com os requisitos de tolerância, tanto de alinhamento entre as peças como também da folga na junta. A união entre eles foi feita por solda autógena de topo ao longo da aresta de 200 mm.

As soldas foram realizadas em um equipamento modelo TruLaser 5020 de 3,3kW Nd:YAG contínuo acoplado a fibra óptica de 600 μm e comprimento de 20m, acoplado a um robô kuka, modelo KR 30/HA. O planejamento do experimento é apresentado na Tab.(4), com uma réplica para cada condição de soldagem. O foco do feixe laser incidente foi posicionado em relação à superfície da amostra a uma profundidade de 0,5mm e 3mm, para as combinações apresentadas na Tab.(4).

Tabela 4. Planejamento utilizado no experimento de soldagem.

Potência (KW)	Velocidade (m/min)
2	1
3	1
2	3
3	3

As medidas de tensão residual foram feitas utilizando um método não destrutivo de difração de raios-X, para posição focal 0,5mm e 3mm abaixo da superfície da amostra, realizadas no difratômetro do IPEN, do Fabricante Rigaku, Modelo Rint 2000 Anodo de Cromo k alfa 2,29100 angstroms, que teve como objetivo medir a tensão na superfície da amostra e verificar a extensão da ZTA. Foram realizadas as medidas de tensão residual sobre o cordão, a 2, 4 e 6 mm da sua borda para ambos os lados em sua direção perpendicular. Além disto, foi medida a tensão residual a uma distância de 50 mm da borda para se verificar a condição do material de base. Para as amostras com a posição focal 3mm abaixo da sua superfície, foi utilizada a técnica do furo cego (*hole drilling strain gage method*), que permite medir o gradiente de tensão ao longo da profundidade do material. A Tabela (5) apresenta as diversas profundidades em que foram feitas as medidas de tensão residual com esta técnica.

Tabela 5. Profundidades das medidas de tensão residual no método do furo cego.

Tensões	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7	σ_8	σ_9	σ_{10}
Profundidade nas amostras (mm)	0,02	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

No método do furo cego os strain gages são colados na superfície da amostra, para medir as microdeformações durante a furação, Fig. (1) e Fig. (2). Segundo Scharger (1981), a precisão deste método está diretamente relacionada com a precisão que se executa a furação no centro do strain gage.

Os strain gages utilizados foram do tipo CEA-062-UM-120, que foi escolhido pela necessidade medir a tensão o mais próximo possível do cordão de solda. O strain gage foi colado a cerca de 1mm da borda do cordão e foram feitos os furos até a profundidade de 1mm. O aparelho usado para executar as furações, foi o equipamento de furação RS-200 / Vishay com uma broca de 1,6 mm de diâmetro e o programa H-Drill usado para coletar os dados de tensão residual nas direções de interesse (paralela e perpendicular ao cordão) e calcular as tensões principais, assim como para fazer a representação gráfica das tensões ao longo da profundidade de ambos os materiais da união.

Na análise estatística das tensões residuais utilizou-se o software MINITAB 15. Nesta análise investigou-se a variância das tensões para os parâmetros de potência e velocidade, em ambos os lados da união nas diversas profundidades. Com a análise de regressão estatística relacionou-se a tensão residual com os parâmetros de processo em estudo, no intuito de se obter um modelo matemático que estime a tensão residual resultante em ambos os materiais.

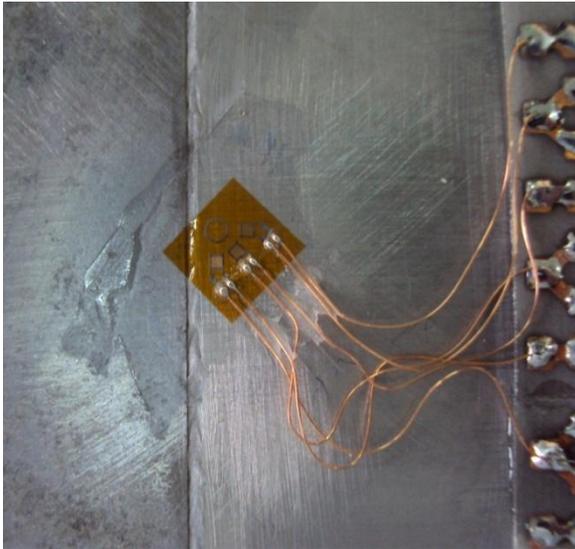


Figura 1. Método do furo cego – colagem do strain gage.

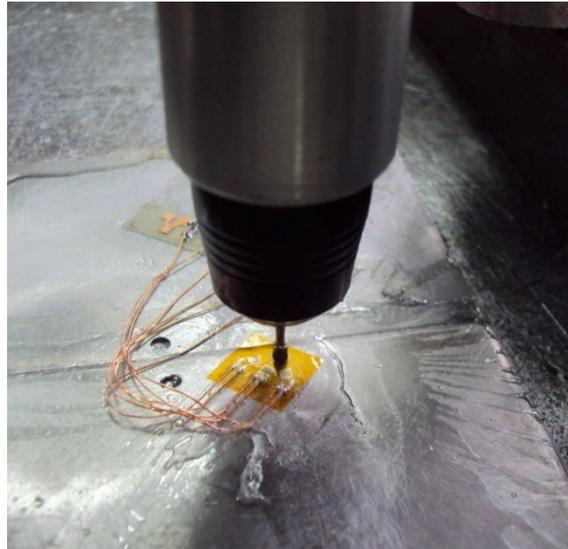


Figura 2. Método do furo cego – furação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na difração de raios-X, obteve-se resultados de tensão residual na superfície das amostras com comportamentos apresentados nos gráficos Fig.(3) e Fig.(4).

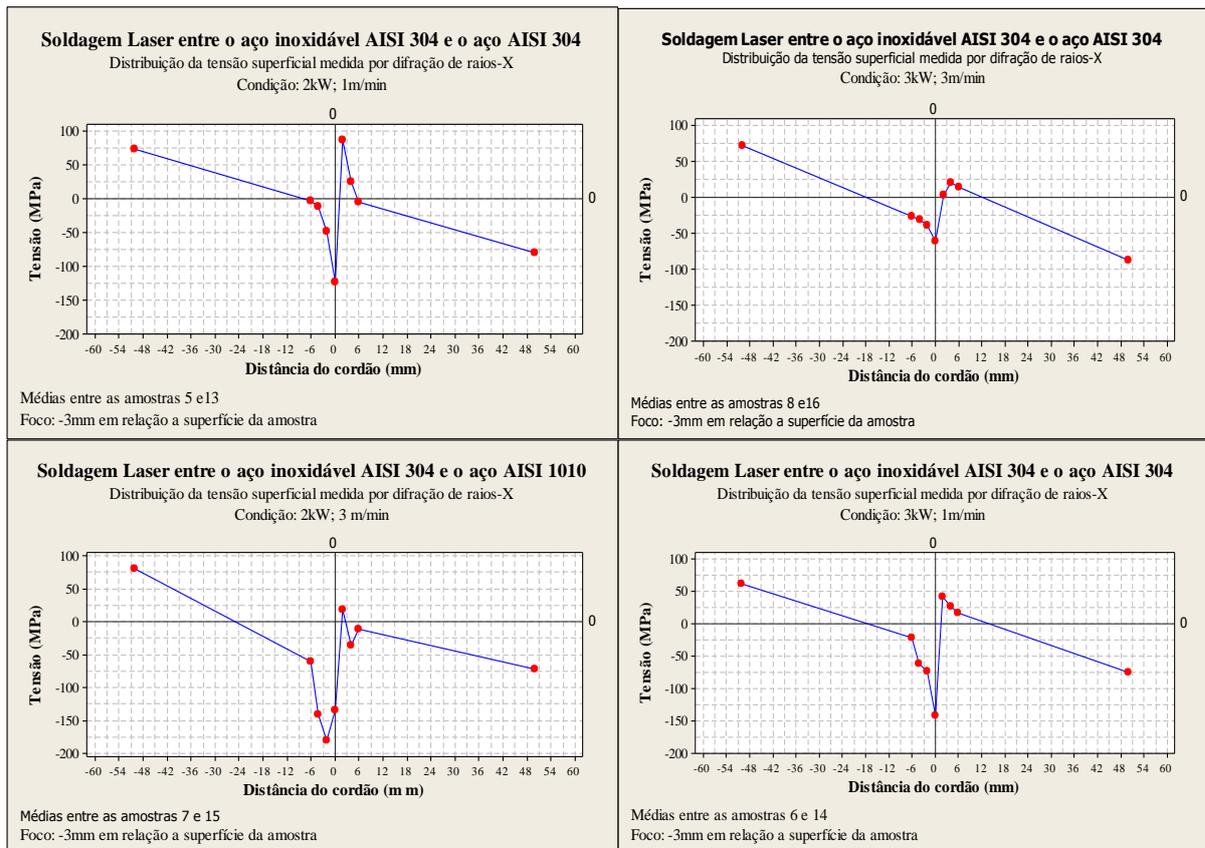


Figura 3. Distribuição da tensão residual na superfície obtida pela análise de difração de raios-X, (lado esquerdo aço inoxidável e lado direito aço carbono).

Em todas as condições de soldagem investigadas os cordões de solda apresentaram tensões residuais compressivas. Em todas as amostras, no aço inoxidável tensões residuais compressivas foram observadas na ZTA, atingindo um valor máximo de 180 MPa a 2 mm do cordão para condição de 2kW de potência (P) e velocidade (V) de 3m/min. A medida

que se afasta do cordão a tensão residual tende ao valor do material base. No aço carbono a ZTA de todas as amostras apresentaram baixas tensões residuais de tração, atingindo um valor máximo de 87 MPa a 2 mm da borda do cordão para condição de $P = 2 \text{ kW}$ e $V = 1 \text{ m/min}$, e como no caso anterior, tendendo a tensão do material base à medida que afasta-se do cordão.

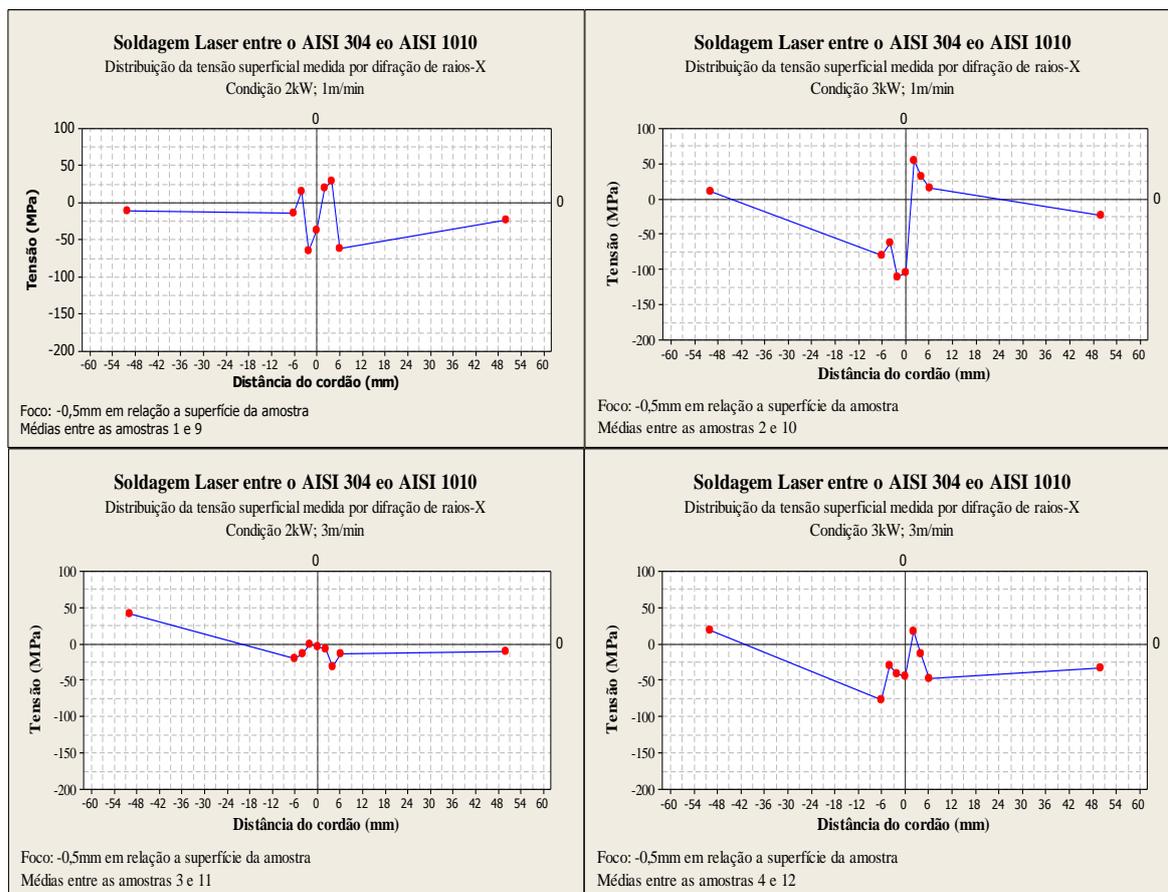


Figura 4. Distribuição da tensão residual na superfície obtida pela análise de difração de raio-x com o foco 0,5mm abaixo da superfície da amostra (lado esquerdo aço inoxidável e lado direito aço carbono).

Nas condições de soldagem com o foco a 0,5 mm abaixo da superfície das amostras, os cordões de solda também apresentaram tensões residuais compressivas, porém com valores menores, que não ultrapassaram 105 MPa. No aço inoxidável em todas as amostras foram observados baixos valores de tensões residuais compressivas na ZTA, atingindo um valor máximo de 112 MPa a 2 mm do cordão para a condição de $P = 3 \text{ kW}$ e $V = 1 \text{ m/min}$. Em relação a condição anterior, com o foco 3mm abaixo da superfície da amostra, a tensão residual, embora mais baixa, apresenta oscilações a medida que se afasta do cordão. No aço carbono a ZTA das amostras apresentaram baixas tensões residuais que oscilam entre valores de tração e de compressão, atingindo um valor máximo de tração de 55 MPa a 2 mm da borda do cordão para condição de $P = 3 \text{ kW}$ e $V = 1 \text{ m/min}$, e um valor máximo de compressão de 60 MPa a 6mm do cordão para a condição de $P = 2 \text{ kW}$ e $V = 1 \text{ m/min}$, porém como no caso anterior, tendendo a tensão do material base à medida que afasta-se do cordão.

No método do furo cego, obteve-se resultados de tensão residual ao longo da profundidade das amostras. Em todas as condições de soldagem investigadas, os materiais apresentaram comportamento parecido. Isto é, na direção perpendicular ao cordão (direção x) foram verificadas tensões residuais de compressão e na direção paralela ao cordão (direção y) foram verificadas tensões residuais de tração ou de tensões próximas a zero.

A figura 4 apresenta o gráfico da tensão residual ao longo da profundidade para a condição de soldagem de $P = 3 \text{ kW}$ e $V = 3 \text{ m/min}$. Observa-se na direção x baixas tensões residuais compressivas da ordem de 100 MPa até aproximadamente 0,6 mm de profundidade. Para maiores profundidades as tensões residuais caminham para os valores dos materiais de base. Na direção y foram verificadas tensões residuais de tração da ordem de 100 MPa até aproximadamente 0,6 mm de profundidade no aço carbono. E no aço inoxidável observam-se tensões residuais próximas a zero aumentando para valores de tensão residual de tração da ordem de 100 MPa até aproximadamente 0,6mm de profundidade e permanecendo constante para maiores profundidades. Assim considerando-se os resultados obtidos pelo método do furo cego esta foi considerada a melhor condição de soldagem.

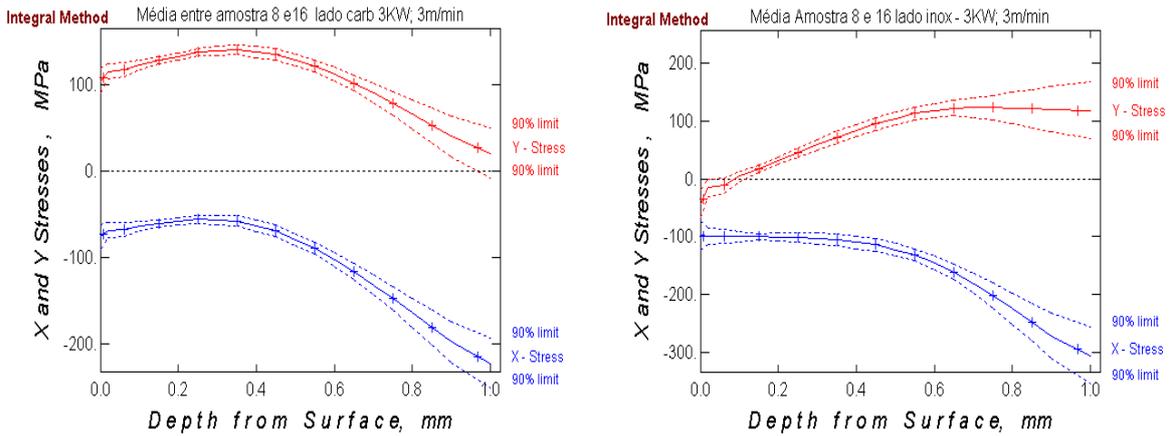


Figura 4. Distribuição da tensão residual obtida pelo método do furo cego nas direções x e y ao longo da profundidade dos materiais a aproximadamente 1mm da borda do cordão de solda (direção x perpendicular ao cordão e direção y paralela ao cordão).

A análise da variância das tensões residuais para os parâmetros de potência e velocidade são apresentados na Fig. 5. Nesta análise foram considerados os valores de tensões residuais obtidos pelo método do furo cego em ambos os lados da união nas diversas profundidades.

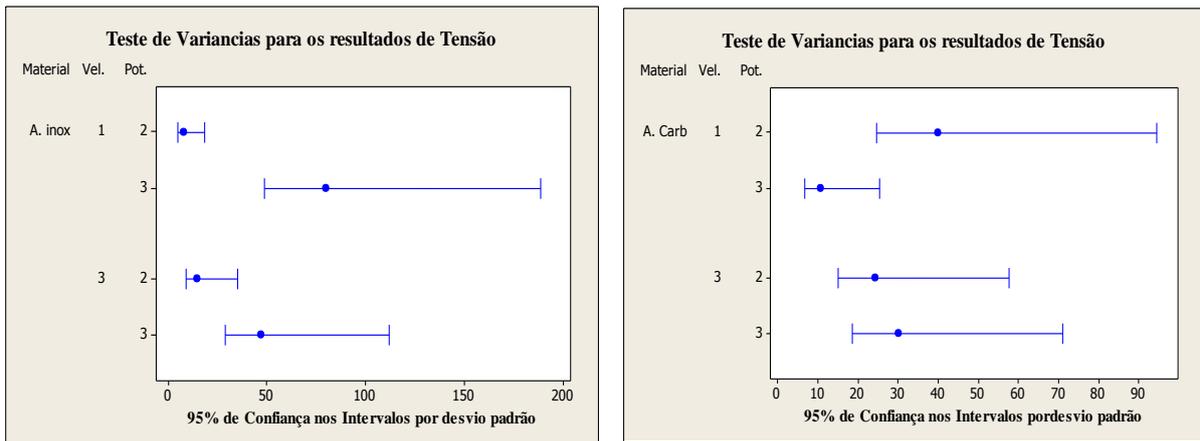


Figura 5. Variâncias da tensão residual nas quatro condições investigadas na soldagem laser.

As menores variâncias na tensão residual no aço inoxidável ocorrem na condição de menor potência, isto é, de P = 2 kW, sendo mínima quando combinada com V = 1 m/min. As maiores variâncias na tensão residual no aço inoxidável ocorrem na condição de maior potência, isto é, de P= 3 kW, sendo máxima quando combinada com V = 1 m/min.

A menor variância na tensão residual no aço carbono ocorre na condição de P = 3 KW e V = 1m/min, sendo máxima na condição de P = 2 KW e V = 1m/min, porém com valores que não superam 100 MPa.

A análise de regressão estatística relacionou parâmetros de velocidade e potência, associando-os com os valores de tensão residual nas diversas profundidades de ambos materiais para a obtenção de um modelo matemático que pudesse prever seus possíveis valores. A equação de regressão para o aço carbono é mostrada na Eq. (1):

$$\text{Tensão} = 62,0 - 86,4 \text{ Prof.} - 48,2 \text{ Vel.} + 77,3 \text{ Pot.} \tag{1}$$

Com os seguintes coeficientes:

$$S = 16,1056 \quad R\text{-Sq} = 94,9\% \quad R\text{-Sq(aj)} = 94,4\%, \text{ onde:}$$

S é o desvio padrão dos resíduos

R-Sq é o coeficiente de determinação

e R-Sq(adj) é o coeficiente de determinação ajustado, que indica que a variabilidade da tensão depende 94,4% dos fatores profundidade, velocidade e potencia, com 95% de confiança nos resultados.

Nessa equação os valores de profundidade devem ser utilizados em mm, a velocidade em m/min e a potência em kW.

Na análise do aço inoxidável a equação de regressão obtida é mostrada na Eq.(2):

$$\text{Tensão} = -180 + 130 \text{ Prof.} - 0,44 \text{ Vel.} + 68,1 \text{ Pot.}$$

(2)

Com os seguintes coeficientes: $S = 32,2920$ $R\text{-Sq} = 70,9\%$ $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 68,2\%$

Também foram construídos gráficos de contorno, utilizando o MINITAB 15, com os resultados das tensões residuais obtidas pelo método do furo cego, mostrados na figuras 5, nos quais também é possível estimar os valores de tensão residual na soldagem laser.

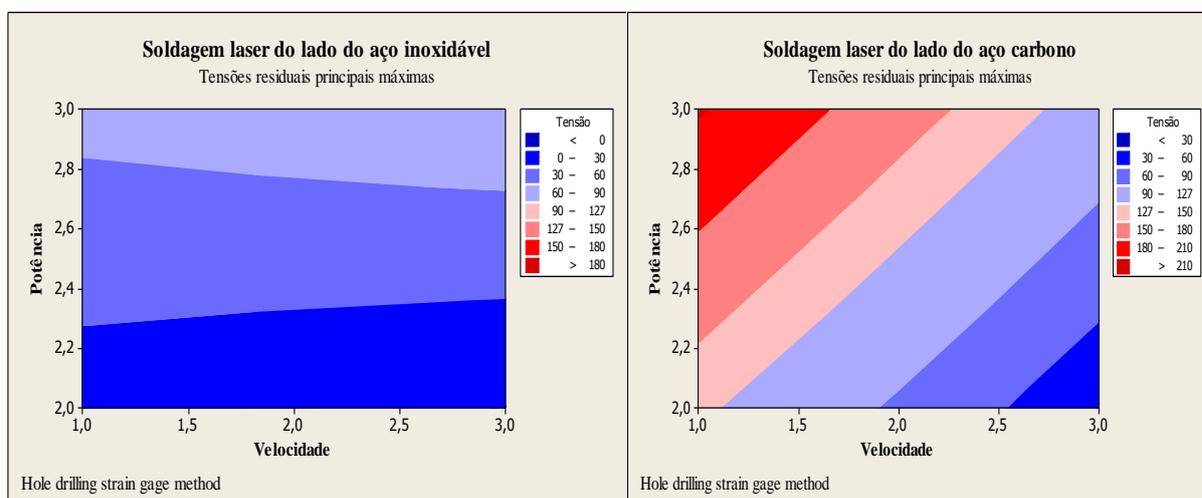


Figura 6. Mostra as diversas condições de soldagem laser e as tensões de resposta nas profundidades de até 1mm da superfície das amostras para ambos os materiais investigados.

4. CONCLUSÕES

Na análise de difração de raios-X, observaram-se tensões residuais compressivas na região do cordão de solda para todos os parâmetros de soldagem investigados. Na região da ZTA no aço inoxidável também se observa tensões residuais compressivas para a posição do foco do feixe laser a 3mm abaixo da superfície. Com a mudança do foco para 0,5 mm abaixo da superfície, foi observada uma queda nos valores dessas tensões. No aço carbono a ZTA apresentou baixos valores de tensões residuais de tração, não superando 90 MPa com o foco 3 mm abaixo da superfície e para o foco a 0,5 mm abaixo da superfície não superou 60 MPa. Portanto a posição do foco a 0,5mm abaixo da superfície parece ser uma condição bastante favorável a soldagem laser, no planejamento do experimento estudado neste trabalho.

Assim, novas investigações serão conduzidas, levando em conta este resultado na montagem de um novo planejamento de experimento para confirmação desta melhor condição de soldagem.

No método do furo cego a melhor condição de soldagem foi a de $P = 3\text{kW}$ e $V = 3\text{m/min}$, que apresenta tensões compressivas no aço inoxidável em todas as direções e no aço carbono uma baixa tensão de tração na direção paralela ao cordão em torno de 100MPa, portanto sendo considerada a condição mais adequada para esta união.

A análise estatística indicou grande influência do parâmetro de potência nos resultados de tensão residual. Assim a potência do laser é o principal fator a ser considerado no processo de soldagem laser desses materiais.

A velocidade por sua vez pode influenciar no processo apenas quando é de baixo valor e associada a altos valores de potência. Pois apresenta nesta condição os maiores valores de tensão residual de tração, que podem gerar problemas para a união.

A grande quantidade de medidas de tensão residual obtidas pelo método do furo cego nos permitiu construir equações do comportamento da tensão residual em função dos parâmetros de potência e velocidade, com uma boa confiabilidade.

A técnica de soldagem a laser de materiais dissimilares é promissora, podendo futuramente concorrer com outros métodos já consolidados e que estão sendo utilizados comercialmente.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPq pelo fomento a este trabalho através dos projetos CNPQ n° 565210/2008-4 e CNPQ n° 303242/2006-0, agradeço ao IPEN por disponibilizar a infraestrutura necessária a este projeto e a UNIFEI por disponibilizar seu laboratório para análises de tensão residual pelo método do furo cego. Agradeço também a empresa TRUMPF do Brasil por disponibilizar o equipamento de soldagem a laser para esse estudo.

6. REFERÊNCIAS

- Anawa, E.M., Olabi A.G., 2006. Effect of laser welding conditions on toughness of dissimilar welded components. *J. of Applied Mechanics and Materials*. v.5-6, pp.375-380.
- Anawa, E.M., Olabi A.G., 2008. Using Taguchi method to optimize welding pool of dissimilar laser-welded components *J. of Optics & Laser technology*. v.40, pp 379-388.
- Berretta, J. R.; Rossi, W.; Neves, M.D.M.; Almeida, I. A.; Vieira Jr., N.D., 2007. Pulsed Nd: YAG laser welding of AISI 304 to AISI 420 stainless steels. *Optics and Lasers in Engineering*, v.45, issue 9, p.960-966.
- Bruns, R.E., Scarminio, I.S., Barros Neto, B. . 2001 *Como fazer experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria*. Campinas Editora Unicamp.
- Chen, C. M., Kovacevic, 2004. R.Joining of AI 6061 alloy to AISI 1018 steel by combined effects of fusion and solid state welding. *Jof machine tools & manufacture*, n. 44, p. 1205-1214.
- Dawes, C. , 1992. *Laser Welding*. Mac Graw- hill, Inc, New York.
- Difratômetro IPEN, Fabricante Rigaku, Modelo Rint 2000 Anodo de Cromo k alfa 2,29100 angstroms.
- Engenering Materials eFunda: http://www.efunda.com/materials/alloys/alooy_home/alloys.cfm.
- Hole-drilling Residual Stress Calculation Program versão 3.01; equipamento de furação RS-200 / Vishay.
- Kreimeyer, M., Voltersen, 2005. F Processing titanium aluminium hybrid joints for aircraft applications. *Laser in Manufacturing 2005 – Proceedings of the third International WLT- Conference on Lasers in Manufacturing*, pp.73-78, Munich, Germany, June 2005.
- Kuka Roboter no Brasil: robô kuka, modelo KR 30/HA
- Masabutchi, K., 1980 *Analisis of Welded structures*, Pragmon Press Ltda.
- Mochizuki, M. , 2007. Control of welding residual stress for ensuring integrity against fatigue and stress corrosion craking. *Nuclear Engineering and Desing*. V. 237, issue 2, pp. 107-123.
- Montgomery, D.C., 1997. *Desinn and Analysis of Experiments*. 4 ed. New York: John Wiley & Sons.
- Scharjer, G.S., 1981, *Aplication of finite element calculation to residual stress measurements*. *J.Eng.Mater. Technol.* 103, 157-163.
- Semak, V.V., Knorovsk, G. A., Mac Callum, D.O., 2003. On the possibility of microwelding with laser beams. *J. Phys. D: Appl. Phys.*; n. 36, p.2170-2174.
- Steen, W. M., 2005 *Laser Material Processing*. Ed. Springer-Verlag. 3a ed., ISBN1852336986.
- Tarng. Y.S., Juang, S.C., Chang, C.H., 2002. The use of grey-based Taguchi methods to determine submerged arc welding process parameters in hardfacing, *J. Materials Processing Technology*. v. 128, insue 1-3, pp. 1-6.
- Trumpf máquinas, equipamento modelo TruLaser 5020 de 3,3kW Nd:YAG contínuo.
- Uenishi, K., Seki, M. Kunimasa, T., et al., 2003. YAG laser Micro Welding of Stainless Steel and Shape Memory Alloy, *Proc. of Third Intern. Symp. Laser Precion Microfabricacion, SPIE*, v.4830, p.57-63.
- Wischhusen, B.M., Wagner, F., Voltersen, F., Metschkow, B. Laser joining of aluminium to steel for modern yacht construction. *Laser in Manufacturing 2007- proceedings of the Fourth International WLT- Conference on Lasers in Manufacturing*, pp.105-110, Munich, Germany, June 2007.

7. DIREITOS AUTORAIS

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



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

INVESTIGATION OF RESIDUAL STRESS IN LASER WELDING LOW CARBON STEEL AISI 1010 AND STAINLESS STEEL AISI 304

José Roberto Berretta, berrretta@ipen.br¹
Denilson de Camargo Mirim, dmirim@usp.br¹
Wagner de Rossi, wderossi@ipen.br¹
Nelson Batista de Lima, nblima@ipen.br¹
Rene Ramos de Oliveira, rolivier@ipen.br¹
Sergio Delijaicov, sergiode@fei.edu.br²
Diego Gomes Oliva, gomes.oliva@gmail.com²

¹Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Av. Lineu Prestes 2242, Cidade universitária, São Paulo, SP, CEP: 05508-000

²Centro Universitário da FEI, Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972, Bairro Assunção, São Bernardo do Campo, SP, CEP 09850-901

***Abstract:** One of the most critical problems found in the union of different materials is the residual stress formation, which happens mainly because these materials have different both thermal expansion coefficients and thermal conductivities. Thus this study evaluated the technique of laser welding between the both low carbon steel and stainless, AISI 1010 and AISI 304. The materials were joined by autogenous welding with a continuous Nd:YAG laser, that were varied in power, welding speed and focus of the laser beam. The main objective was to identify the influence of welding parameters mentioned, by the analysis of residual stresses in the heat affected zone (HAZ). The residual stresses by diffraction of X-rays were measured on surface of sample, to investigate the relationship with the laser welding parameters. A factorial design of two factors at two levels was performed to investigate the combination of speed and power factors, with laser focus positioned 3mm below the surface of the samples. Responses were used as the residual stresses at different depths of the HAZ, obtained by the method of hole drilling. For the analysis of the results were used to analysis of variance and regression statistics based on the different influences of the input and combination of factors in the residual stress generated in this union. The results indicate that the development of models can provide satisfactory answers.*

Keywords: residual stress and laser welding.