

INVESTIGAÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL NA SOLDAGEM LASER DE MATERIAIS DISSIMILARES¹

*Denílson de Camargo Mirim²
José Roberto Berretta³
Wagner de Rossi⁴
Nelson Batista de Lima⁵
Rene Ramos de Oliveira⁶
Sérgio Delijaicov⁷
Diego Oliva Gomes⁸*

Resumo

Um dos mais críticos problemas encontrados na união de materiais distintos é a formação da tensão residual, que ocorre principalmente pelo fato desses materiais possuírem coeficientes de expansão térmica e condutividades térmicas diferentes. Assim neste trabalho foi avaliada a tensão residual na técnica de soldagem laser entre o aço baixo carbono, AISI 1010 e AISI 304. Os materiais foram unidos por solda autógena de topo com um laser de Nd:YAG contínuo em que foram variadas a potência, velocidade de soldagem. O principal objetivo do estudo foi identificação e a análise da tensão residual na zona termicamente afetada (ZTA) de ambos os lados do cordão. Um planejamento fatorial de dois fatores a dois níveis cada foi executado para otimizar a combinação dos fatores potência e velocidade. As respostas obtidas foram as tensões residuais em diferentes profundidades na ZTA. Na superfície da amostra foram realizadas medidas de tensão residual pela técnica de difração de raio X. O método do furo cego foi aplicado para medir a tensão residual ao longo da profundidade em ambos os lados da união. Os resultados foram analisados usando 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 podem prever as respostas satisfatoriamente.

Palavras-chave: tensão residual e soldagem laser.

INVESTIGATION OF RESIDUAL STRESS IN LASER WELDING DISSIMILAR MATERIALS

Abstract

One of the most critical problems found in the different materials welding is the residual stress formation, that happens mainly for the fact of those materials they possess coefficients of thermal expansion and different thermal conductivities. Like this in this work the residual tension was evaluated in the technique of welding laser among the steel low carbon, AISI 1010 and AISI 304. The materials were united for it welds autogenous of top with a laser of continuous Nd:YAG in that they were varied the potency, speed and the focus of the laser stayed constant in relation to surface of

¹ **65º Congresso da ABM - Internacional**

² *Aluno de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – São Paulo*

³ *Doutor, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – São Paulo*

⁴ *Doutor, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – São Paulo*

⁵ *Doutor, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – São Paulo*

⁶ *Aluno de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN – São Paulo*

⁷ *Doutor, Centro Universitário da FEI*

⁸ *Aluno de Graduação, Centro Universitário da FEI*

the sample. The main objective of the study went identification and to analysis of the residual stress in HAZ on both sides of seem. Um planning factorial of two factors at two levels each it was executed for optimization the combination of the factors potency and speed. The obtained answers were the residual stress in different depths in HAZ. In the surface of the sample measures of residual stress were accomplished by the technique of X-ray diffraction. The hole drilling strain gage method it was applied to measure the residual stress on both sides of the union. The results were analyzed using the variance analysis and the statistical regression based on the different influences of the entrance and combination of the factors in the residual stress generated in that union. The results indicate that the development of models can foresee the answers satisfactorily.

Keywords: residual stress and laser welding.

1 INTRODUÇÃO

O surgimento de novas tecnologias possibilitou a obtenção de novos materiais e novos métodos de manufatura. Segundo Steen¹, 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^{2,3}.

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 aeronáuticas⁴. 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 satélite⁵. 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 iates⁶. Este tipo de junta já foi pesquisado anteriormente para aplicações criogênicas⁷.

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 tensão residual 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 que uma atenção especial deve-se com ela no caso de fadiga de alto-ciclo.

O controle dos parâmetros de processo de soldagem laser pode reduzir as 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 publicado na revista Nuclear Engineering and Design⁸, em 2007, 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. As uniões entre esses dois tipos de materiais, portanto, são propensas a expansões desiguais e distorções⁹. 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 resfriamento¹⁰. 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^{11,12}, 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 and Olabi^{13,14} 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.¹⁵ 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 tabela 1. As propriedades mecânicas são apresentadas na tabela 2, enquanto as propriedades térmicas estão na tabela 3.

Tabela 1. Composição química dos materiais, 10/2009.

%	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)

Fonte: http://www.efunda.com/materials/alloys/ally_home/alloys.cfm

Tabela 2. Propriedades mecânicas dos materiais, 10/2009.

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

Fonte: http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy_home/alloys.cfm

Tabela 3. Propriedades térmicas dos materiais, 10/2009.

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

Fonte: http://www.efunda.com/materials/alloys/alloy_home/alloys.cfm

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 tabela 3, com uma réplica para cada condição de soldagem. O foco do feixe laser incidente ficou constante em relação à superfície da amostra a uma profundidade de 3mm.

Tabela 4. Planejamento utilizado no experimento de soldagem, 10/2009.

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

Fonte: MIRIM, D.C. et al.

As medidas de tensão residual foram feitas utilizando um método não destrutivo de difração de raio X, realizada no difratômetro do IPEN, que teve como objetivo medir a tensão na superfície da amostra e verificar a extensão da ZTA. Foram realizadas as medidas sobre o cordão e a 2, 4 e 6mm da sua borda, mais uma medição a 50mm para a verificação da tensão a que estava submetido o material de base. A distribuição das tensões em relação a suas distâncias do cordão de solda foi feita de ambos os lados do cordão. Também 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 4 apresenta as diversas profundidades em que foram feitas as medidas de tensão residual com esta técnica.

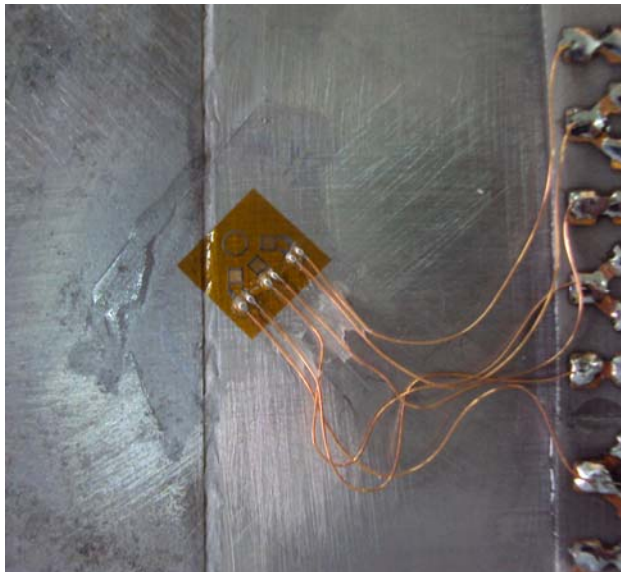
Tabela 5. Profundidades das medidas de tensão residual no método do furo cego, 10/2009.

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

Fonte: MIRIM, D.C. et al.

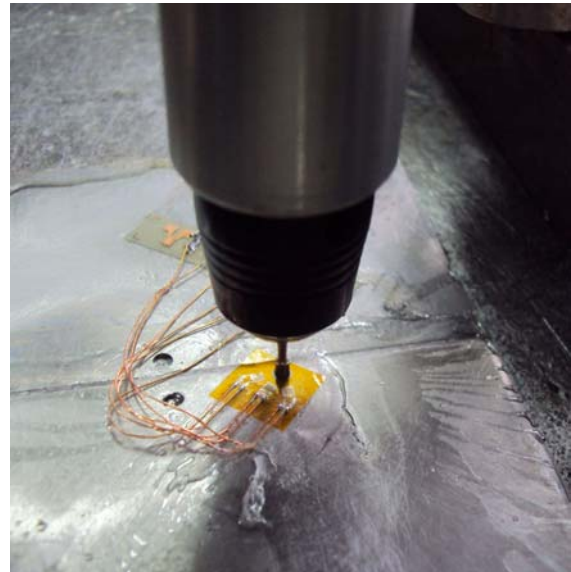
No método do furo cego os strain gages são colados na superfície da amostra, para medir as microdeformações durante a furação, figura 1 e 2. Segundo Scharger¹⁵ a precisão deste método está diretamente relacionado com a precisão que se executa a furação no centro do strain gage.

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 portanto 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 principais direções que se apresentaram, assim como para fazer a representação gráfica das tensões ao longo da profundidade de ambos os materiais da união.



Fonte: MIRIM, D.C. et al.

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



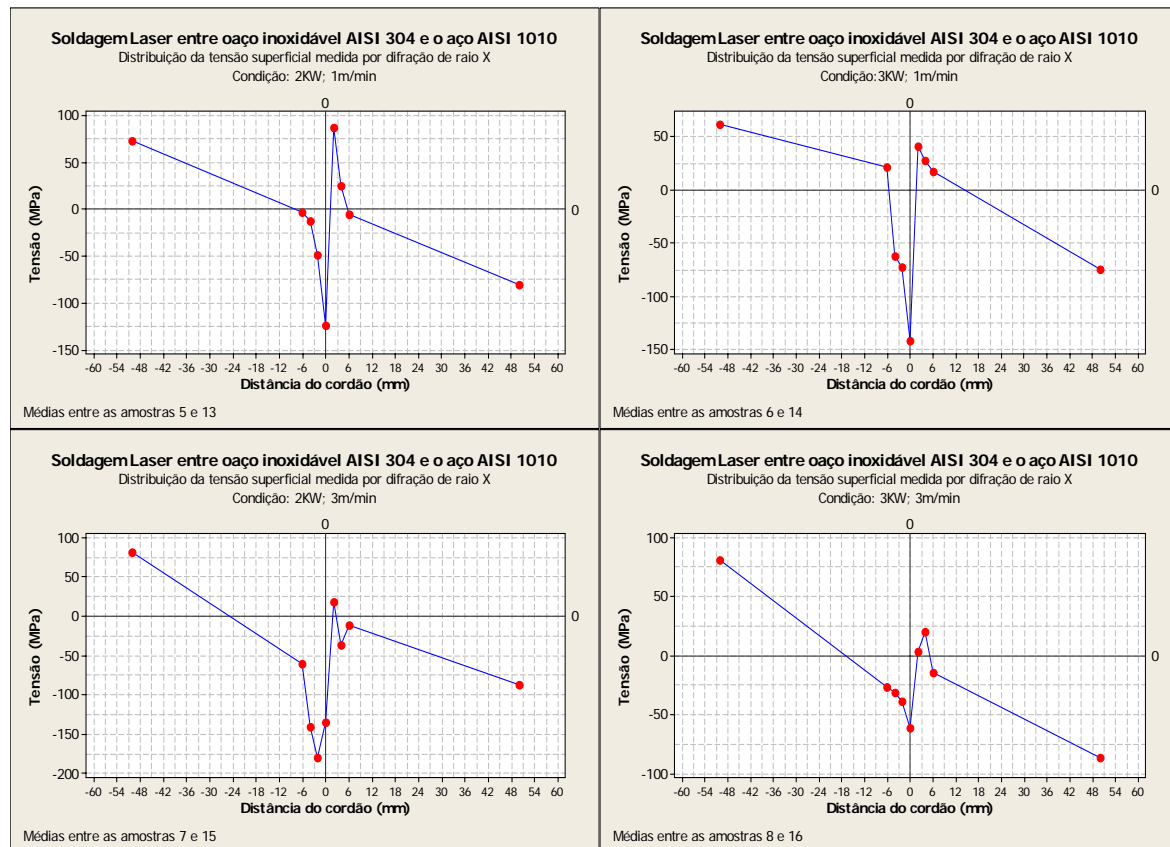
Fonte: MIRIM, D.C. et al..

Figura 2. Método do furo cego – furação.

Na análise estatística das tensões residuais utilizou-se o software MINITAB 15. 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 materiais.

3.RESULTADOS E DISCUSSÕES

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



Fonte: Ensaio de difração de raio X – gráficos MINITAB 15. MIRIM, D.C. et al.

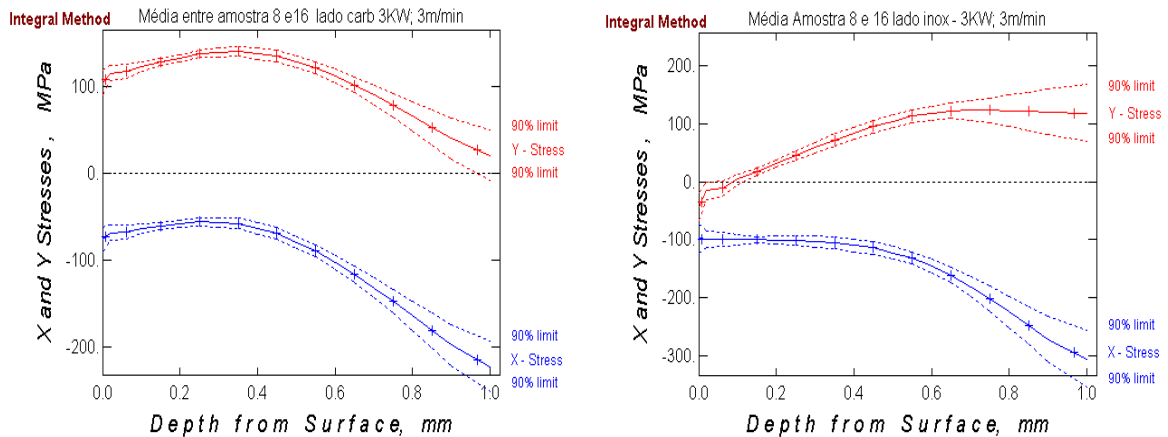
Figura 3. Distribuição da tensão residual na superfície obtida pela análise de difração de raio X (lado esquerdo aço inoxidável e lado direito aço carbono).

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. À 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.

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, nos quais na direção x (perpendicular ao cordão) foram verificadas tensões residuais de compressão e na direção y (paralela ao cordão) foram verificadas tensões residuais de tração ou de tensões próximas a zero.

A figuras 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

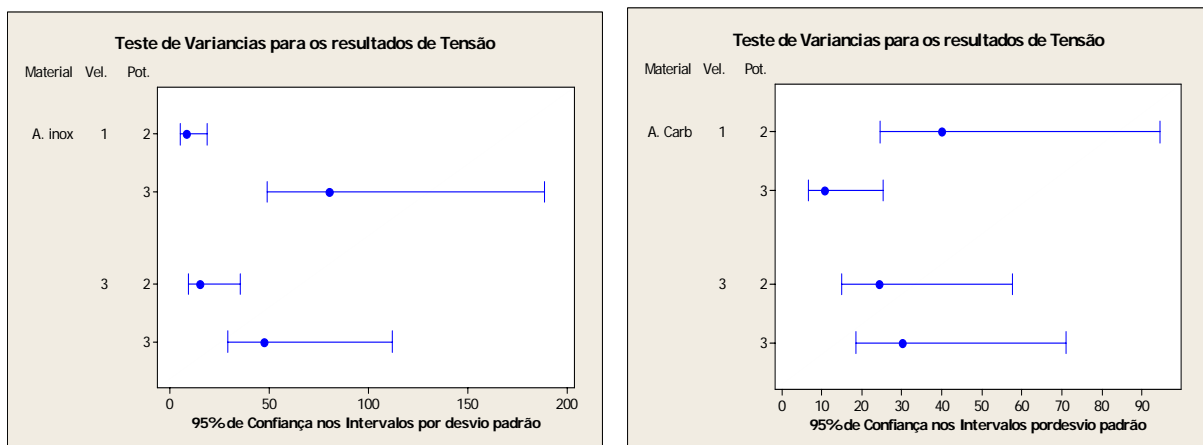
0,6 mm de profundidade. Para maiores profundidades as tensões residuais caminham para os valores dos materiais de base. Na direção y foram verificadas tensões residuais de tração da ordem de 100 MPa até aproximadamente 0,6 mm de profundidade no aço carbono e no aço inoxidável observa-se tensões residuais 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 pelo método do furo cego esta foi considerada a melhor condição de soldagem.



Fonte: Gráficos gerados pelo programa H-Drill. MIRIM, D.C. et al.

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 figura 5. Nesta análise foram considerados os valores de tensões residuais obtidos pelo método do furo cego em ambos os lados da união e nas diversas profundidades.



Fonte: Ensaio pelo método do furo cego – análise de variância usando o programa MINITAB 15. MIRIM, D.C. et al.

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 $P = 3 \text{ KW}$ e $V = 1 \text{ m/min}$, sendo máxima na condição de $P = 2 \text{ KW}$ e $V = 1 \text{ m/min}$, porém com valores que não superam 100 MPa .

A análise de regressão estatística relacionou parâmetros de velocidade e potencia, 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:

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

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(aj) 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.

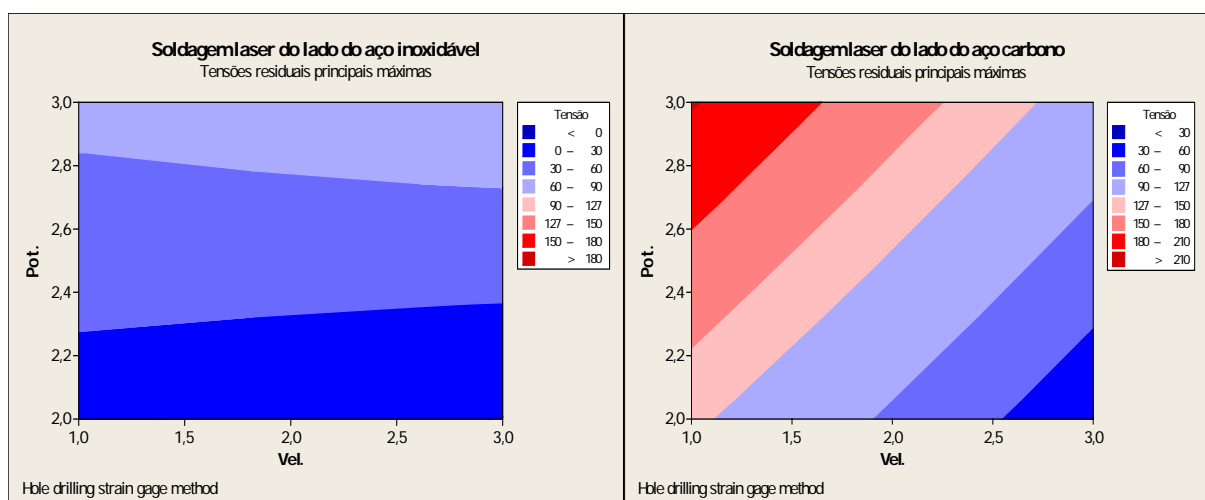
Na análise do aço inoxidável a equação de regressão obtida é:

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

Com os seguintes coeficientes:

$$S = 32,2920 \quad R\text{-Sq} = 70,9\% \quad R\text{-Sq(aj)} = 68,2\%$$

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.



Fonte: Ensaio pelo método do furo cego gráficos de contorno gerados usando o programa MINITAB 15. MIRIM, D.C. et al.

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 Raio X, a ZTA de ambos os materiais ocupou uma estreita faixa paralela ao cordão de solda, apresentando tensões compressivas na região do cordão de solda e na ZTA do aço inoxidável. Foram observadas baixas tensões de tração na ZTA do aço carbono, não superando 90 MPa, portanto uma união bastante estável para todas as condições investigadas na superfície das amostras.

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 a grande influência da potência na tensão residual. Assim a potencia 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 as altas potências. 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.

AGRADECIMENTOS

Agradeço 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.

REFERÊNCIAS

- 1 STEEN, W. M. Laser Material Processing. Ed. Springer-Verlag. 3a ed., ISBN1852336986.2005.
- 2 SEMAK, V.V., KNOROVSKY, G. A., MAC CALLUM, D.O. On the possibility of microwelding with laser beams. J. Phys. D: Appl. Phys.; n. 36, p.2170-2174, 2003.
- 3 UENISHI, K., SEKI, M. KUNIMASA, T., et al. YAG laser Micro Welding of Stainless Steel and Shape Memory Alloy, Proc. of Third Intern. Symp. Laser Precision Microfabrication, SPIE, v.4830, p.57-63, 2003.

- 4 KREIMEYER, M., VOLTERSEN, 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.
- 5 BERRETTA, J. R.;ROSSI, W.; NEVES, M.D.M.; ALMEIDA, I. A.; VIEIRA Jr.,N.D..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. 2007.
- 6 WISCHHUSEN, B.M., WAGNER, F., VOLLERTSEN, 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 CHEN, C. M., KOVACEVIC, R.Joining of Al 6061 alloy to AISI 1018 steel by combined effects of fusion and solid state welding. Jof machine tools & manufature, n. 44, p. 1205-1214, 2004.
- 8 MOCHIZUKI, M. 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, 2007.
- 9 DAWES, C. Laser Welding. Mac Graw- hill, Inc, New York, 1992.
- 10 MASABUTCHI, K. Analisis of Welded structures, Pragmon Press Ltda. 1980.
- 11 MONTGOMERY, D.C. Desinn and Analysis of Experiments. 4 ed. New York: John Wiley & Sons. 1997.
- 12 BRUNS, R.E., SCARMINIO, I.S., BARROS NETO, B. Como fazer experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. Campinas Editora Unicamp. 2001.
- 13 ANAWA,E.M., OLABI A.G. Effect of laser welding conditions on toughness of dissimilar welded components. J. of Applied Mechanics and Materials. v.5-6, pp.375-380. 2006
- 14 ANAWA,E.M., OLABI A.G. Using Taguchi method to optimize welding pool of dissimilar laser-welded components J. of Optics & Laser technology. v.40, pp 379-388. 2008.
- 15 TARNG. Y.S., JUANG, S.C., CHANG, C.H. The use of grey-based Taguchi methods to determine submerged arc welding process parameters in hardfacing, J. Materials Processing Technology. v. 128, inssue 1-3, pp. 1-6. 2002.
- 16 SCHARJER, G.S. Aplication of finite element calculation to residual stress measurements.J.Eng.Mater. Technol. 103, 157-163.1981