

ESTUDO DA TENSÃO RESIDUAL NA SOLDAGEM LASER ENTRE O AÇO CARBONO AISI 1010 E O AÇO INOXIDÁVEL AISI 304

Denilson de Camargo Mirim, dmirim@usp.br¹
José Roberto Berretta, berrretta@ipen.br¹
Wagner de Rossi, wderossi@ipen.br¹
Mariano Castagnet, mcastag@ipen.br¹

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

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. Neste trabalho foi estudada a técnica de soldagem laser entre o aço 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. O principal objetivo do estudo foi a identificação da influência dos parâmetros de soldagem, pela análise das tensões residuais na zona termicamente afetada (ZTA). Foi executado um planejamento fatorial de três fatores a dois níveis com uma réplica, em que foram variadas a potência, a velocidade de soldagem e a posição focal do feixe laser. Na superfície da amostra foram realizadas medidas de tensão residual pela técnica de difração de raios-X, para estudar sua variação em função dos parâmetros investigados. O método do furo cego foi utilizado para avaliar a tensão residual ao longo da profundidade das amostras até a profundidade de 1mm. Além das medidas de tensão residual os cordões de solda foi avaliados por microscopia óptica, que teve como objetivos determinar a geometria do cordão, assim como a extensão da ZTA. Também foram realizados ensaios de tração que avaliaram a eficiência dessa união dissimilar. O software MINITAB foi utilizado para a análise das tensões residuais nas diferentes profundidades da ZTA obtidas pelo método do furo cego. Foi utilizada também 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 Semak (2003), Uenishi (2003).

Dentro das aplicações de laser no processamento de materiais a soldagem vem sendo um dos maiores focos de interesse da pesquisa atual. Recentemente, os estados de tensão residual de diferentes geometrias de soldagem laser, comumente usadas na indústria automotiva, têm sido comparados com o de solda ponto por resistência convencional demonstrando grandes vantagens em relação a esse processo Martinson (2009). Destaca-se também a micro-soldagem (materiais até ~1mm de espessura) entre materiais dissimilares Oliveira (2007).

As soldas dissimilares (dissimilar metal welds – DMWs) são utilizadas em diversos segmentos da indústria. No caso específico de usinas nucleares, tais soldas são necessárias para conectar tubulações de aço inoxidável com componentes fabricados em aços baixa liga Lima et al (2010). Reparos em tubulações usadas em usinas nucleares utilizando um laser de Nd:YAG também foram investigados por Kim, et al. (2001). Um modelo baseado em Elementos Finitos (FE) foi desenvolvido para prever a formação do keyhole e da resposta termo-mecânica durante a soldagem a laser de aço e alumínio em vasos de pressão ou em juntas de topo de tubos. Um detalhado modelo tridimensional não-linear de transiente térmico foi desenvolvido, que simula os mecanismos de formação do keyhole, calcula a distribuição de temperatura local na área de solda e prediz o tamanho e forma do keyhole Moraitis e Labeas (2009). Na literatura existem alguns estudos sobre esse foco de pesquisa, como a união entre titânio e alumínio para aplicações aeronáuticas Kremer et al (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 Berretta et al (2007). 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 Wischhusen et al (2007). Este tipo de junta já foi pesquisado anteriormente para aplicações criogênicas Chen e Kovacevic (2004).

Esses estudos dão uma dimensão da importância atual e global da união entre diferentes materiais. O trabalho aqui apresentado, portanto, procura acrescentar avanços nesta área propondo a investigação de tensão residual na soldagem laser entre os materiais dissimilares AISI 1010 e o aço inoxidável austenítico AISI 304, 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. Devido ao grande aporte térmico e a rápida solidificação da zona de fusão, essa geração de tensões pode 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 ter com ela no caso de fadiga de alto-ciclo. Apesar de ser um fato bastante comum e conhecido, o estudo das tensões residuais induzidas no processo de soldagem apresenta poucos estudos experimentais que a relacionem com as tensões iniciais presentes no material.

O controle do processo de soldagem laser pode reduzir as tensões residuais de um componente, minimizando a necessidade de procedimentos adicionais posteriores 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 Design Mochizuki (2007), aborda a soldagem de materiais dissimilares, onde 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 distorções Dawes (1992). 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 Masabutchi (1980). Observa-se ainda que a maior tensão residual ocorre na ZTA do aço inoxidável.

O Planejamento de Experimentos (Design of Experiments) DOE será utilizado no estudo da influência dos parâmetros de processo, assim como técnicas estatísticas. Dentro deste método, vários modelos são propostos na literatura Montgomery (1997) e Barros et al (2007), 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 DOE na área de soldagem, entre eles, Anawa and Olabi (2006, 2008) aplicaram DOE e o método Taguchi para estudar o efeito dos parâmetros do processo de soldagem laser na união de materiais dissimilares. Tarnig 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.

A técnica DOE pode satisfazer as necessidades econômicas de solução de problemas e a 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, o planejamento de experimento DOE está se tornando uma ferramenta atrativa para engenheiros e cientistas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados no estudo da união por soldagem 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). Suas propriedades mecânicas são apresentadas na Tab.(2), enquanto as propriedades térmicas estão na Tab.(3).

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

Material	σ_{rup} (Mpa)	σ_{esc} (Mpa)	Alongamento (%)	Mod. de elast. (Gpa)	coef. de Poisson
AISI 1010	343	180	20	210	0,29
AISI 304	617	235	40	193	0,29

Tabela 3. Propriedades térmicas dos materiais em Engenering Materials eFunda (2010).

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

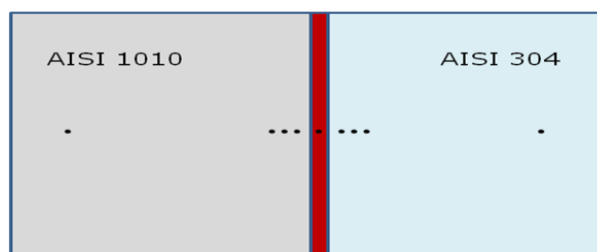
As amostras foram preparadas partindo-se de chapas de 3 mm de espessura nas dimensões de 200 mm x 80 mm para cada um dos materiais. Em seguida, elas foram montadas em um dispositivo, para posicionar e fixar as amostras em conformidade com os requisitos de tolerância, tanto de alinhamento entre as peças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

Tabela 4. Planejamento utilizado no experimento de soldagem.

Amostras	F1	F2	F3
1 e 9	2	1	-0,5
2 e 10	3	1	-0,5
3 e 11	2	3	-0,5
4 e 12	3	3	-0,5
5 e 13	2	1	-3
6 e 14	3	1	-3
7 e 15	2	3	-3
8 e 16	3	3	-3

As medidas de tensão residual foram feitas utilizando um método não destrutivo de difração de raios X, para posição focal 0,5 mm e 3 mm abaixo da superfície da amostra, realizadas no difratômetro do IPEN, do Fabricante Rigaku, Modelo Rint 2000 Anodo de Cr k α 2,29100 Å, 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, conforme Fig.(1). 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 (5) apresenta as diversas profundidades em que foram feitas as medidas de tensão residual com esta técnica.

**Figura1. Pontos em que foram realizadas as medidas de tensão residual pelo método de difração de raios X****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. (2) e Fig. (3). 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. O programa H-Drill foi 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.

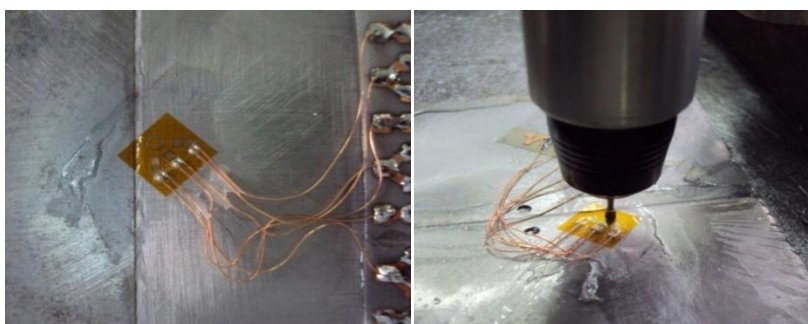


Figura 2. Método do furo cego: colagem e furação do strain gage.

Além das medidas de tensão residual, os cordões de solda foram avaliados por diversas metodologias de análise. Entre elas, inspeção visual, microscopia ótica e de medições dimensionais. Essas análises tiveram como objetivo, determinar as dimensões do cordão de solda, sua geometria, profundidade de penetração, ocorrência de trincas ou porosidades na zona de fusão (ZF), assim como na zona termicamente afetada (ZTA). Também foi realizado ensaio mecânico de tração com o objetivo de verificar a eficiência das soldas nas suas diversas condições. Esse ensaio foi realizado no laboratório de ensaios mecânicos do IPEN, no equipamento INSTRON 4400R.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises iniciais de microscopia ótica determinaram a geometria, a penetração e as dimensões do cordão de solda que são apresentados nas Fig. 5 a 10.



Figura 3. Micrografia da seção transversal da amostra 1 (P=2kW; V=1m/min; F = -0,5mm);



Figura 4. Micrografia da seção transversal da amostra 2 (P=3kW; V=1m/min; F = 0,5mm)

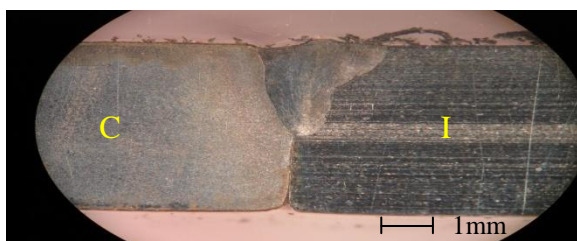


Figura 5. Micrografia da seção transversal da amostra 3 (P=2kW; V=3m/min; F = -0,5mm)

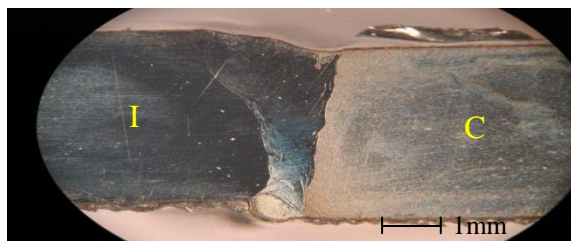


Figura 6. Micrografia da seção transversal da amostra 4 (P=3kW; V=3m/min; F = -0,5mm)

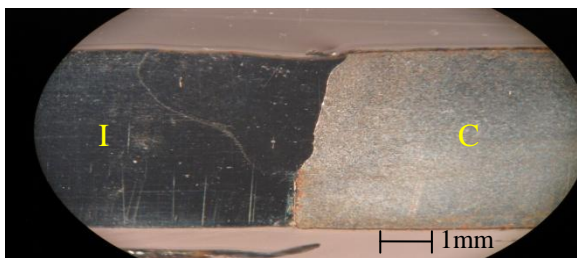


Figura 7. Micrografia da seção transversal da amostra 5 (P=2kW; V=1m/min; F= - 3mm)

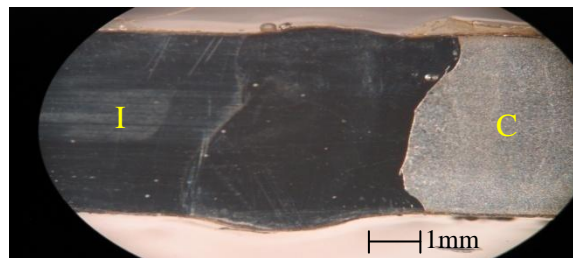


Figura 8. Micrografia da seção transversal da amostra 6 (P=3kW; V=1m/min; F= - 3mm)

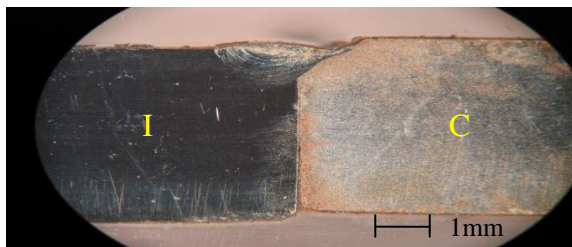


Figura 9. Micrografia da seção transversal da amostra 7 (P=2kW; V=3m/min; F= - 3mm)

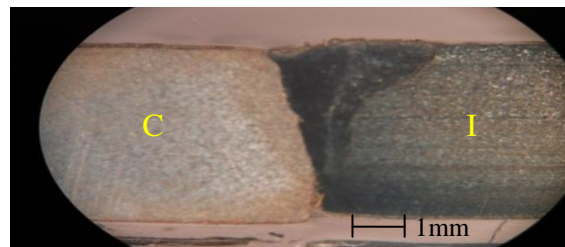


Figura 10. Micrografia da seção transversal da amostra 8 (P=3kW; V=3m/min; F= - 3mm)

Com base nas análises obtidas por microscopia óptica, se verificou a geometria do cordão típica de soldagem por *keyhole* (soldagem profunda), que com o foco posicionado a 0,5 mm abaixo da superfície, as soldas tiveram uma penetração total nas amostras 1,2 e 4, na condição de menor potência e maior velocidade, amostra 3, a penetração chegou a 1,6mm (a espessura da amostra é de 3mm).

Com o foco a 3mm abaixo da superfície apenas em uma das quatro condições investigadas se obteve a penetração total sendo esta na condição de maior potência e menor velocidade, amostra 6. Na condição de 2kW e 1m/min, amostra 5, a penetração foi de 2mm, na condição de 2kW e 3m/min, a penetração foi de 0,6 mm, e na condição de 3kW e 3m/min, amostra 8, a penetração foi de 2,3 mm.

Em todas as condições estudadas não foram observadas porosidades ou trincas na zona de fusão (ZF) e na zona termicamente afetada (ZTA).

Na difração de raios X, obteve-se resultados de tensão residual na superfície das amostras com comportamentos apresentados nos gráficos das figuras 11 e 12.

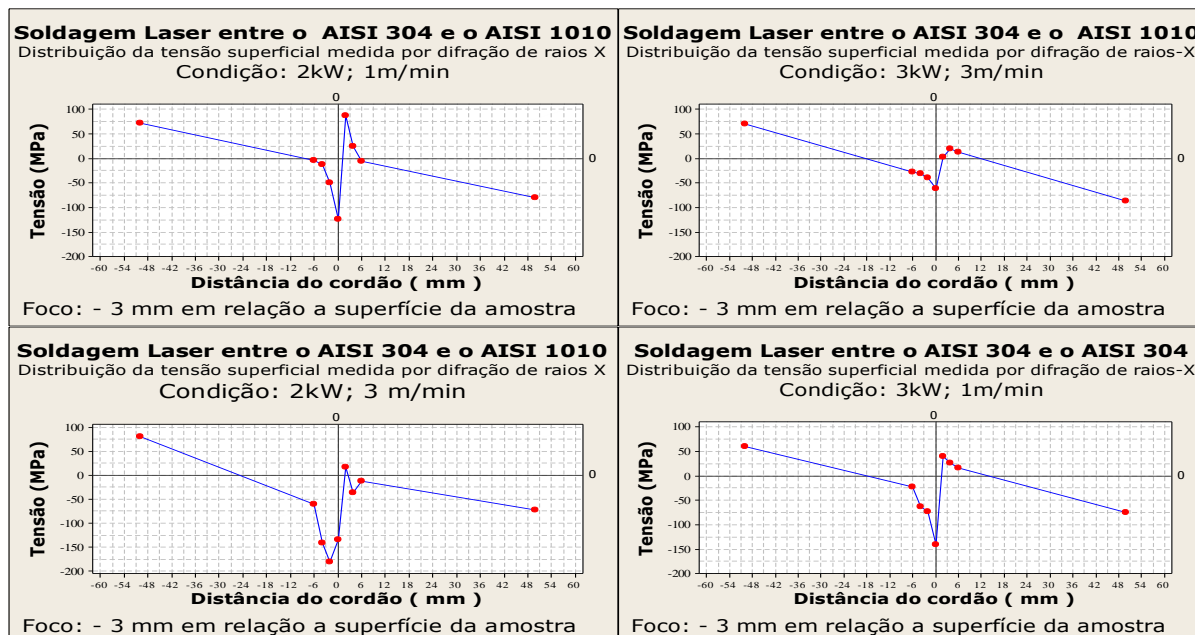


Figura 11. Distribuição da tensão residual na superfície obtida pela análise de difração de raios X, (lado esquerdo aço inoxidável e lado direito aço carbono).

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.

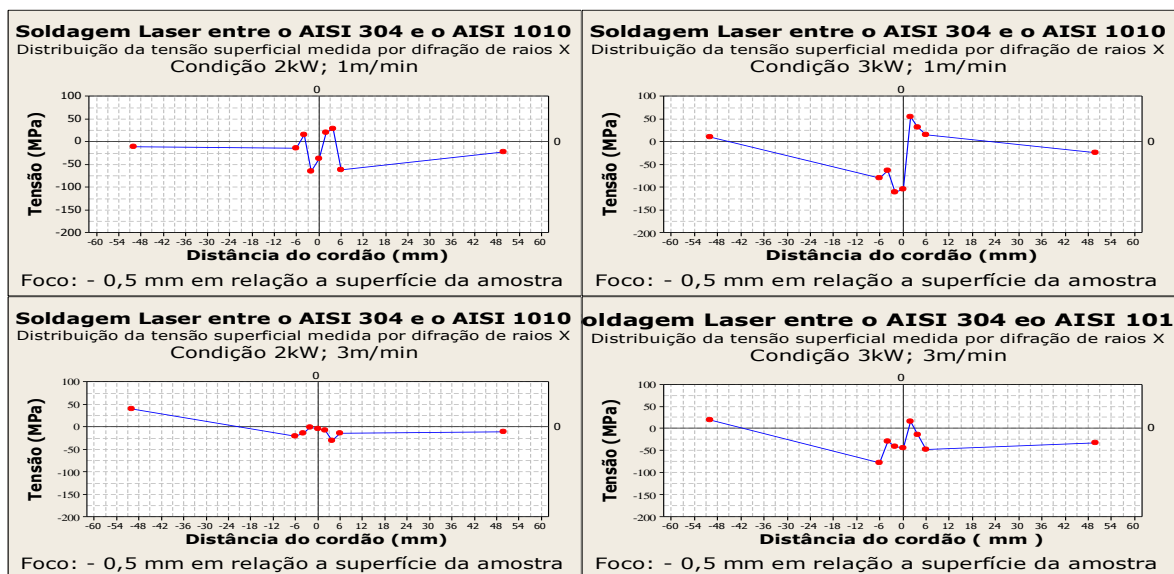


Figura 12. Distribuição da tensão residual na superfície obtida pela análise de difração de raios X com o foco 0,5 mm abaixo da superfície da amostra (lado esquerdo aço inoxidável e lado direito aço carbono).

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 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. Nas Tab. (8) e Tab. (9) são apresentados os valores experimentais obtidos nas direções principais. Foram observados os maiores valores de tensão residual para o aço inoxidável em profundidades abaixo de 0,7mm, para as condições de maior potência e menor velocidade, enquanto para o aço carbono foram verificados os maiores valores com o foco do feixe posicionado a 3mm abaixo da superfície, $P = 3 \text{ kW}$ e $V = 1 \text{ m/min}$.

Tabela 8. Valores experimentais de tensão residual principais, em Mpa, obtidas das médias das amostras pelo método do furo cego (lado aço inoxidável AISI 304)

Médias	P (kW)	V (m/min)	F(mm)	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7	σ_8	σ_9	σ_{10}
1 e 9	2	1	-0,5	108	132	156	176	194	207	217	226	235	245
2 e 10	3	1	-0,5	-31	1	37	78	122	165	208	251	294	336
3 e 11	2	3	-0,5	-30	54	114	140	135	113	89	68	53	40
4 e 12	3	3	-0,5	0	22	51	75	82	78	65	40	1	-46
5 e 13	2	1	-3	8	9	9	10	12	15	19	25	30	36
6 e 14	3	1	-3	11	-4	-13	3	45	83	122	163	206	250
7 e 15	2	3	-3	-21	-16	-12	-7	-3	2	6	11	15	20
8 e 16	3	3	-3	0	26	52	76	96	113	123	127	129	132

Tabela 9. Valores experimentais de tensões residuais principais, em Mpa, obtidas das médias das amostras pelo método do furo cego (lado aço carbono AISI 1010)

Médias	P (kW)	V (m.min)	F(mm)	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6	σ_7	σ_8	σ_9	σ_{10}
1 e 9	2	1	-0,5	25	21	19	39	54	53	38	17	-4	-23
2 e 10	3	1	-0,5	68	71	65	48	23	4	6	29	62	97
3 e 11	2	3	-0,5	22	28	57	77	82	70	43	5	-38	-36
4 e 12	3	3	-0,5	29	5	66	89	94	90	86	103	123	146
5 e 13	2	1	-3	178	171	164	154	142	125	106	85	64	45
6 e 14	3	1	-3	211	213	219	224	223	218	210	201	191	181
7 e 15	2	3	-3	72	64	57	49	40	31	21	11	1	-10
8 e 16	3	3	-3	118	129	138	141	135	122	102	78	53	27

A Fig.(13) apresenta o gráfico da tensão residual ao longo da profundidade para a condição de soldagem de $P = 3 \text{ kW}$, $V = 3 \text{ m/min}$ e $F = -0,5 \text{ mm}$. Observa-se no aço carbono, na direção x, baixas tensões residuais compressivas da ordem de 100 MPa, próximas a superfície, que à medida que a profundidade aumenta passa a assumir valores de tensão de natureza trativa de baixo valor, não superando 100 MPa. Na direção y foram verificadas tensões residuais que oscilaram entre tração e compressão no aço carbono. No aço inoxidável, na direção x, observam-se tensões residuais de natureza compressiva ao longo de toda a profundidade. Na direção y, foram obtidos valores de tensão residual de tração máxima da ordem de 50 MPa, até aproximadamente 0,4 mm e tendendo para compressão para maiores profundidades. Assim considerando-se os resultados obtidos para ambos os materiais pelo método do furo cego esta foi considerada a melhor condição de soldagem.

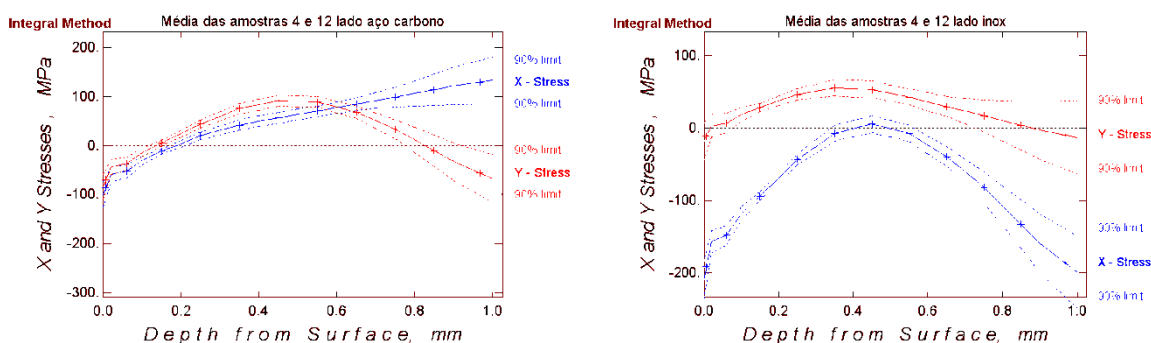


Figura 13. Distribuição da tensão residual obtida pelo método do furo cego nas direções x e y ao longo da profundidade dos materiais a aproximadamente 1mm da borda do cordão de solda (direção x perpendicular ao cordão e direção y paralela ao cordão).

A análise 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):

$$\text{Tensão} = -53,0 + 58,8 \text{ Pot.} - 19,7 \text{ Vel.} + 29,1 \text{ Foco} - 53,6 \text{ Prof.} \quad (1)$$

Com os seguintes coeficientes: $S = 45,3073$ $R\text{-Sq} = 59,4\%$ $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 57,2\%$ $p = 0,000$, em que:

S = é o desvio padrão dos resíduos;

$R\text{-Sq}$ = é o coeficiente de determinação;

$R\text{-Sq}(\text{adj})$ = é o coeficiente de determinação ajustado;

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):

$$\text{Tensão} = 77,2 + 18,9 \text{ Pot.} - 29,0 \text{ Vel.} - 26,2 \text{ Foco} + 132 \text{ Prof.} \quad (2)$$

Com os seguintes coeficientes: $S = 62,1185$ $R\text{-Sq} = 48,6\%$ $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 45,8\%$

Com base nos dados experimentais foi estruturado o gráfico de contorno que relacionou os fatores foco, potência e velocidade com as diversas respostas de tensão residual, nos quais também é possível estimar os seus valores na

soldagem laser. Esse gráfico foi utilizado para o aço inoxidável AISI 304 na posição focal - 0,5 mm, onde foram verificados os maiores valores de tensão residual. Portanto segue o gráfico, conforme mostra Fig. (16).

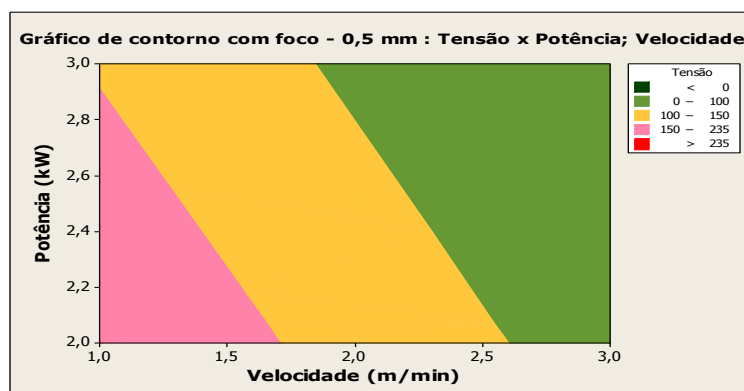


Figura 14. Gráfico de contorno para foco 0,5 mm do aço inoxidável AISI 304

Nos ensaios de tração realizados, das oito condições de soldagem, apenas em dois casos o corpo de prova rompeu na solda, Fig.(17)

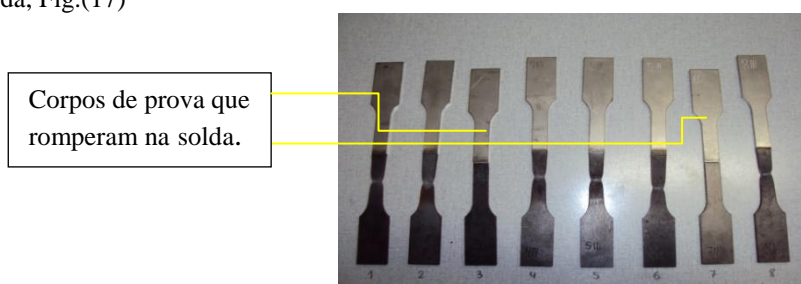


Figura 15. Corpos de prova utilizados no ensaio de tração

Os resultados dos corpos de prova 7 e 3, que foram soldados na condição de potência 2kW, 3m/min, romperam na solda durante o ensaio de tração. Esse era um resultado esperado, pois nas micrografias realizadas nessas amostras, se observa que os cordões de solda são superficiais, de pequena profundidade. Os outros corpos de prova tiveram o comportamento muito semelhante entre si e romperam fora da região de soldagem, no metal base. Este fato reflete os benefícios de serem geradas tensões residuais de natureza compressiva no cordão de solda, pois mesmo nas amostras 5 e 8, onde não ocorreu a penetração total do cordão de solda, o rompimento ocorreu fora da região de soldagem.

4. CONCLUSÕES

No processo de soldagem laser estudado, as análises metalográficas mostraram que com o foco do laser posicionado 0,5 mm abaixo da superfície foram obtidos os melhores resultados, propiciando penetração total na maioria dos casos e geometria típica de soldagem por *keyhole*.

As medidas de tensão residual, por ambos os métodos de análise utilizados (difração de raios X e método de furo cego), na condição de $P = 3 \text{ kW}$, $V = 3 \text{ m/min}$ e $F = 0,5 \text{ mm}$, mostraram que seus valores são baixos não superando 146 MPa, do lado do aço carbono AISI 1010 e de 82 MPa do lado do aço inoxidável AISI 304. O senso comum indica que o processo de soldagem laser gera baixas distorções às peças. Este estudo confirma este conhecimento com dados quantitativos.

Os ensaios de tração realizados nas amostras mostraram que as tensões residuais compressivas no cordão de solda e no aço AISI 304 e as tensões residuais de tração no AISI 1010 geradas pelo processo de solda a laser contribuíram para melhoria das propriedades mecânicas da união. Na amostra 3, por exemplo, embora a penetração do cordão seja de 53,3%, a carga máxima suportada no ensaio foi de aproximadamente 92% da carga média suportada pelos corpos de prova que romperam fora da região de solda.

A metodologia, baseada na técnica de planejamento experimental e de análise estatística, colaborou decisivamente para os bons resultados do estudo identificando e quantificando o grau de influência de cada parâmetro.

Portanto, conclui-se que a solda laser entre o aço carbono AISI 1010 e o aço inoxidável AISI 304 pode ser obtida com baixa tensão residual, alta qualidade e 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.
- Barros Neto, B., Scarmino, I.S., Bruns, R.E., 2007. Como fazer experimentos. Campinas, Editora Unicamp,
- 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 Al 6061 alloy to AISI 1018 steel by combined effects of fusion and solid state welding. *J. of machine tools & manufacture*, n. 44, p. 1205-1214.
- Dawes, C. , 1992. Laser Welding. Mac Graw- hill, Inc, New York.
- Deng, D., Kiosshima, S. 2010. Numerical simulation of residual stresses induced by laser beam welding in a SUS316 stainless steel pipe with considering initial residual stress influences. *Nuclear Engineering and Design*, V.240 688–696.
- Difratômetro IPEN, Fabricante Rigaku, Modelo Rint 2000 Anodo de Cr $k\alpha$ 2,29100 angstroms.
- Engenering Materials eFund: http://www.efunda.com/materials/alloys/aloooy_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.
- Lima L.I.L., Silva G.M., Chilque A.R.A., Schwartzman M.M.A.M., Bracarense A.Q., Quinan M.A.D., 2010 Caracterização Microestrutural De Soldas Dissimilares Dos Aços Astm A-508 E AISI 316L, *Soldagem Insp*. São Paulo, Vol. 15, No. 2, p.112-120, Abr/Jun 2010.
- Martinson, P., Daneshpour S., Koçak, M., Riekeher, S. and Staron, P. 2009. Residual stress analysis of laser spot welding of steel sheets. *Material and Design* 30, p.3351-3359,
- 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 cracking. *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.
- Moratis Oraits G.A., Labeas G.N., 2009. Prediction of residual stresses and distortions due to laser beam welding of butt joints in pressure vessels. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* v.86 p.133–142
- Oliveira, A.C. *Microsoldagem em chapas finas utilizando um laser de Cu-HBr* 2007. Dissertação (Mestrado) – Instituto Tecnológico de Aeronáuticas, São José dos Campos.
- 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 incluídos no seu trabalho.

RESIDUAL STRESS IN THE STUDY OF LASER WELDING BETWEEN CARBON STEEL AISI 1010 AND STAINLESS STEEL AISI 304

Denilson de Camargo Mirim, dmirim@usp.br¹

José Roberto Berretta, berrretta@ipen.br¹

Wagner de Rossi, wderossi@ipen.br¹

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

Abstract: *One of the most critical problems encountered in the union of the different materials is the formation the residual stress, which occurs mainly because these materials have thermal expansion coefficients and different thermal conductivities. In this study, the technique of laser welding of carbon steel AISI 1010 and AISI 304 stainless steel. The materials were joined by top autogenous welding with a Nd: YAG solid. The main objective was to identify the influence of welding parameters, the analysis of residual stresses in the heat affected zone (HAZ). He was executed a three-factor factorial design at two levels with a replica, which were varied in power, welding speed and focal position of the laser beam. On the surface of the sample were measured residual stresses by diffraction of X-rays to study the variation in the parameters investigated. The hole drilling method was used to evaluate the residual stress along the depth of the samples to a depth of 1mm. Besides measurement of residual stress weld seams were evaluated by light microscopy, which aimed to determine the geometry of the cord, as well as the extent of HAZ. Also tensile tests were conducted that evaluated the effectiveness of this union dissimilar. The software MINITAB was used to analyze the residual stresses at different depths of HAZ obtained by hole drilling. It was also used statistical regression based on the different influences of the input and the 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 stresses and welding laser.*