

SOLDAGEM ENTRE OS AÇOS INOXIDÁVEIS AISI 304 e AISI 420 COM LASER DE Nd:YAG PULSADO

José Roberto Berretta¹

Wagner de Rossi²

Maurício David Martins das Neves³

Ivan Alves de Almeida⁴

Nilson Dias Vieira Junior⁵

Resumo: Utilizando-se um laser de Nd:YAG pulsado, investigou-se a técnica de soldagem a laser entre os aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 420. O principal objetivo do estudo foi a de analisar a influência da variação do posicionamento do feixe laser incidente em relação à junta, nas características do cordão de solda gerado. Para isso, os materiais foram unidos por solda autógena de topo, com um laser de Nd:YAG pulsado desenvolvido no IPEN. Corpos de prova foram soldados com a incidência do feixe laser na junta e a 0,1 e 0,2 mm em relação a ela, para ambos os lados, o que gerou uma variação na composição química na zona de fusão. Analisaram-se as juntas por microscopia óptica (MO) para se investigar a geometria do cordão e a ocorrência de trincas nas zonas afetadas pelo calor (ZAC) e de fusão (ZF), na microscopia eletrônica de varredura (MEV) se observou com maiores detalhes o verificado na MO, além da análise por EDX/EDS para avaliar a variação de composição química ao longo da seção transversal do cordão de solda. Também foram executados ensaios de microdureza. Como resultado obteve-se que o posicionamento do feixe laser deslocado de 0,1 mm na direção do aço austenítico, proporciona uma maior migração de Ni do AISI 304 para o AISI 420. Isto levou a valores de microdureza Vickers menores que nas outras condições de soldagem tanto na ZF quanto na ZAC do aço AISI 420; o resultado foi à obtenção de uma união com maior tenacidade.

Palavras-chave: solda laser, aço inoxidável, solda de materiais dissimilares

59º CONGRESSO ANUAL DA ABM – INTERNACIONAL
19 a 22 de julho de 2004
São Paulo – SP

(1) Pesquisador do Centro Tecnológico da Marinha – CTM-SP

(2-5) Pesquisadores do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN
Centro de Lasers e Aplicações - CLA

Introdução

O surgimento de novas tecnologias na área de processamento possibilitou a obtenção de novos materiais e novos métodos de manufatura, abrindo-se um novo horizonte de aplicações práticas. Entre os métodos de processamento de materiais em uso atualmente, aqueles que utilizam um feixe laser como ferramenta, estão entre os mais avançados e modernos ^(1, 2, 3).

Os principais tipos de processamento com laser são: solda, corte, furação, marcação e tratamento térmico superficial. Obviamente, todos estes processos possuem um método tradicional correspondente que também estão em constante evolução, visando a diminuição de custos e a melhoria na qualidade. Como alguns projetos requerem processos de difícil, ou mesmo, impossível execução com métodos tradicionais, a utilização de laser como ferramenta está crescendo a cada dia. As vantagens de se usar um feixe de luz para o processamento de materiais são inúmeras: alta densidade de energia e controle preciso da incidência na peça, flexibilidade no caminho do feixe, inexistência da influência de campo magnético, dispensa do aterramento da peça, zona afetada pelo calor muito pequena, baixa distorção da peça, possibilidade de uso de atmosfera controlada, alta velocidade de processo, excelente qualidade do cordão, processo sem contato e sem desgaste de ferramenta, simplicidade de fixação, baixo ruído, fácil automação, etc. A principal desvantagem é o alto custo de investimento inicial, mas que pode ser compensado pela qualidade e pela automação, que reduz a intervenção do operador no processo, minimizando falhas. ^(4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13)

A utilização de juntas dissimilares é bastante elevada em alguns segmentos industriais. Em uma única planta de geração de energia, por exemplo, podem existir acima de 10 mil juntas deste tipo. Além disso, atualmente, a indústria de bens de consumo vem implementando em seus produtos, produzidos em escala, a combinação de materiais para melhorar o rendimento e reduzir custos. Este fato está gerando um grande aumento na demanda por técnicas de soldagem de materiais dissimilares que atendam a produção industrial em escala.

A união entre estes materiais é largamente utilizada nos setores de geração de energia, químico, petroquímico, nuclear, aeronáutico e aeroespacial e são adotadas com base em critérios técnicos e econômicos. Isto é necessário, pois um produto deve apresentar rendimento e custo satisfatórios.

Juntas entre materiais dissimilares são normalmente produzidas usando processos de soldagem convencionais, tais como, soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido (SAER), soldagem a arco com eletrodo metálico e atmosfera gasosa (SAMG) e soldagem a arco com eletrodo de tungstênio e atmosfera gasosa (SATG). Investigações de produção destes tipos de juntas e a análise de suas falhas vêm sendo extensivamente documentada, e várias medidas vêm sendo implementadas para aumentar sua qualidade. Devido ao rápido desenvolvimento nos últimos anos da tecnologia de feixes de alta densidade de energia, isto é, do laser e do feixe de elétrons, investigações de soldagem utilizando estes equipamentos vêm recebendo atenção especial ⁽¹⁻¹²⁾.

A soldagem laser usa o efeito de aquecimento provocado pela luz de um feixe laser concentrado, coerente e monocromático, para produzir o cordão de solda. A densidade de potência de um feixe laser industrial estende-se sobre muitas ordens de grandeza e pode alcançar aproximadamente 10^8 W.cm^{-2} . Densidades de potência na faixa de $10^6 - 5 \times 10^7 \text{ W.cm}^{-2}$ são suficientes para iniciar uma vaporização local.

Assim, as altas densidades de potência propiciam uma cavidade de vapor penetrando profundamente através da espessura do material; este processo, conhecido como princípio de soldagem laser por “keyhole”, possibilita que uniões sejam feitas, com rapidez e em um único passo,

Muitas das vantagens e limitações da solda laser em comparação com outros processos de soldagem se originam das propriedades do feixe focalizado. Ao mesmo tempo em que a alta densidade de potência permite a execução de soldas pelo princípio de “keyhole”, a baixa energia fornecida ao material produz uma zona afetada pelo calor bastante estreita, com baixa tensão residual e pequenas distorções, minimizando assim a necessidade de retrabalho. A alta velocidade de resfriamento favorece a formação de uma microestrutura fina, que normalmente propicia melhores propriedades mecânicas. Por outro lado, a elevada taxa de resfriamento pode originar na presença de martensita, que pode ser prejudicial a algumas propriedades mecânicas do cordão gerado. As soldas laser podem ser produzidas na presença da atmosfera e o feixe laser pode ser rapidamente acionado ou interrompido durante uma operação. A seleção do material, o projeto do componente e o projeto da junta são também influenciados pelas características da solda laser.⁽¹⁴⁾

Soldagem autógena é a maior vantagem deste tipo de solda na união de materiais diferentes. Por ser o feixe focalizado em um pequeno ponto e posicionado por CNC, torna-se possível o controle preciso, tanto da localização como da composição química do cordão de solda. Este procedimento requer tolerâncias rígidas na preparação da junta. Também pode ser usado material de adição na solda laser, que pode ser introduzido antes ou durante o processamento (em forma de pó, arame ou perfil particular). Neste caso, a tolerância na montagem da junta não é tão rígida e a composição química do cordão de solda é controlada pelo material de adição, que minimiza as diferenças físicas e químicas entre os materiais. Portanto, a soldagem entre materiais dissimilares utilizando feixe laser como ferramenta é um processo que fornece uma junta de alta qualidade, com pequena zona afetada pelo calor, executada em alta velocidade, sendo ainda, um processo de fácil automação.

Neste trabalho, investigou-se a união entre os aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 420, utilizando-se para a soldagem um laser de Nd:YAG pulsado desenvolvido no IPEN. O principal objetivo do estudo foi investigar a variação do posicionamento do feixe laser incidente em relação a junta, nas características do cordão de solda gerado.

Procedimento Experimental

Os materiais utilizados para a investigação da união por solda laser foram: o aço inoxidável austenítico AISI 304 e o aço inoxidável martensítico AISI 420. Estes materiais têm a composição química apresentada na tabela 1.

	Ni (%)	Cr (%)	Fe (%)	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	Mo (%)	Cu (%)
AISI 304	8,9	18,4	balanço	0,8	1,06	0,34	0,03	0,05	0,05
AISI 420	0,13	13,0	balanço	0,15	0,17	0,46	0,04	-	0,02

Tabela 1 – Composição química dos materiais utilizados (análise do lab. espectrometria de fluorescência de raios-X do IPEN).

As amostras foram preparadas partindo-se de chapas de 0,8 mm de espessura nas dimensões de 20 x 50 mm para os dois materiais. Em seguida, elas foram montadas em um dispositivo (desenvolvido especialmente para este trabalho), para posicionar e fixar as amostras em conformidade com os requisitos de tolerância, tanto de

alinhamento entre as peças como também da folga na aresta de solda. A união entre eles foi feita por solda autógena de topo ao longo da aresta de 50 mm.

O posicionamento do feixe laser incidente variou em relação à junta. O feixe foi posicionado na junta e deslocado de 0,1 e 0,2 mm para ambos os lados.

As soldas foram realizadas em um equipamento desenvolvido no IPEN, denominado Central de Processamento de Materiais a Laser (CPML). Este equipamento é composto por uma fresadora CNC de 4 eixos, na qual foi acoplado um laser de Nd:YAG pulsado, com energia por pulso de até 10 J, taxa de repetição de até 300 Hz, potência média de 100W, potência pico de 3 KW e largura temporal dos pulsos controlada desde 0,2 até 10 ms.

O feixe laser utilizado foi focalizado a 3 mm abaixo da superfície do material, e os parâmetros utilizados no experimento foram os seguintes: energia (E) = 6,0 J, potência média (P_m) = 84 W, tempo de pulso (t_p) = 7 ms e frequência de pulsos (f)=14 Hz. Os cordões de solda foram realizados com velocidade de soldagem (v) = 300 mm/min e sobreposição dos pulsos estimada em 30%. Como gás de assistência, para a proteção da solda, utilizou-se o argônio com uma vazão de 10 l/min.

A análise destas uniões foi feita inicialmente pela metalografia da seção transversal do cordão de solda e por observação em microscópio óptico; investigou-se a geometria do cordão, a profundidade de penetração e a ocorrência de trincas nas zonas afetadas pelo calor (ZAC) e de fusão (ZF). A possibilidade de formação de poros, gerados pelo colapso do “keyhole”, também foi analisada nas zonas de fusão. As análises acima também foram feitas para os diversos posicionamentos do feixe em relação à interface dos materiais.

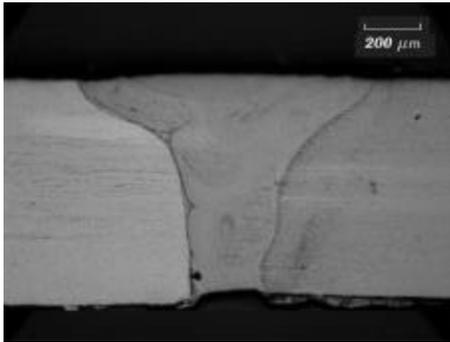
As estruturas da seção transversal das amostras foram reveladas em equipamento de ataque eletro-químico, marca Buehler modelo electromet 4. Devido à diferença entre os materiais, encontramos grande dificuldade na revelação das suas estruturas simultaneamente na mesma amostra; por este motivo, em todos os casos, sempre obtivemos uma região com melhor qualidade que a outra.

No microscópio eletrônico de varredura (MEV) foi utilizado para uma melhor investigação do que havia sido verificado na microscopia óptica. Além disso, uma análise por EDX/EDS também foi executada ao longo da seção transversal, a uma profundidade de aproximadamente 0,3 mm, para avaliar a variação de composição química no cordão de solda.

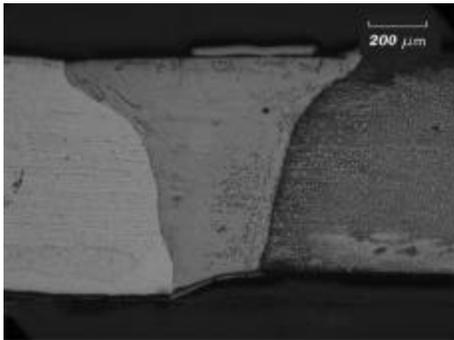
Ensaio de microdureza Vickers, também foram executados a uma profundidade de 0,3 mm ao longo da seção transversal e espaçados de 0,05 mm, com carga de 40 gramas em um equipamento marca Wolpert, para avaliar o cordão de solda e a zona afetada pelo calor.

Resultados

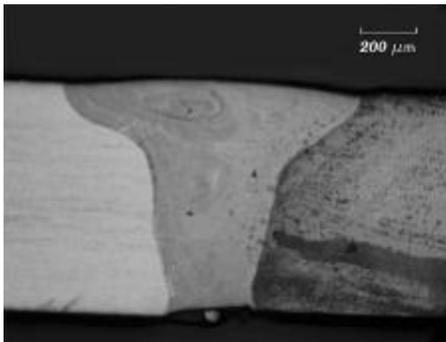
Inicialmente foram realizadas análises, por microscopia ótica (MO), nas soldas laser efetuadas em passe único, pela técnica de soldagem por “keyhole”. As seções transversais dos cordões de solda são apresentadas nas figura 1. Observa-se que a variação do posicionamento do feixe não influencia a geometria do cordão, que é típica de soldagem por “keyhole”. Em todas as condições de soldagem não foram observadas ocorrências de trincas na ZF e na ZAC e também de poros gerados por



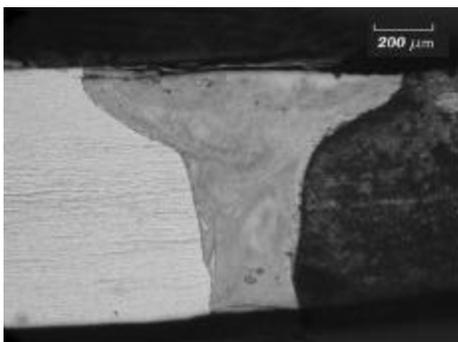
Posição do Feixe, deslocado de 0,2 mm da junta para c
AISI 304



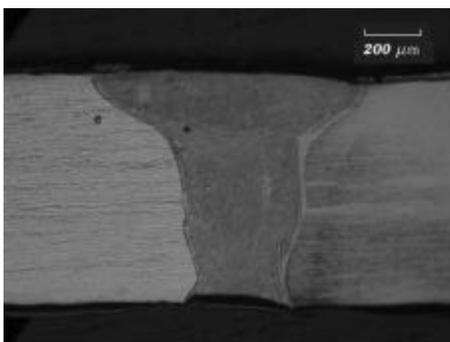
Posição do Feixe, deslocado de 0,1 mm da junta para c
AISI 304



Posição do Feixe, na junta



Posição do Feixe, deslocado de 0,1 mm da junta para c
AISI 420



Posição do Feixe, deslocado de 0,2 mm da junta para c
AISI 420

Figuras 1 - Microscopia óptica, da seção transversal, dos cordões de solda gerados pela variação da posição do feixe laser em relação à junta. Materiais: AISI 304 à esquerda e AISI 420 à direita.

colapso do 'keyhole' na ZF. As dimensões da largura do cordão apresentaram valores médios de 1 mm na superfície e de 0,45 mm na raiz, o que torna o uso do deslocamento de 0,2 mm do feixe laser inviável, pois qualquer variação no processo de soldagem pode comprometer a união entre os materiais ao longo da junta.

A ZF apresenta uma microestrutura fina e basicamente dendrítica, benéfica para as propriedades mecânicas de uma união. Principalmente devido à alta velocidade de resfriamento, típico do processo de solda laser, conforme observado no MEV, figura 2.^{(6) (14)}

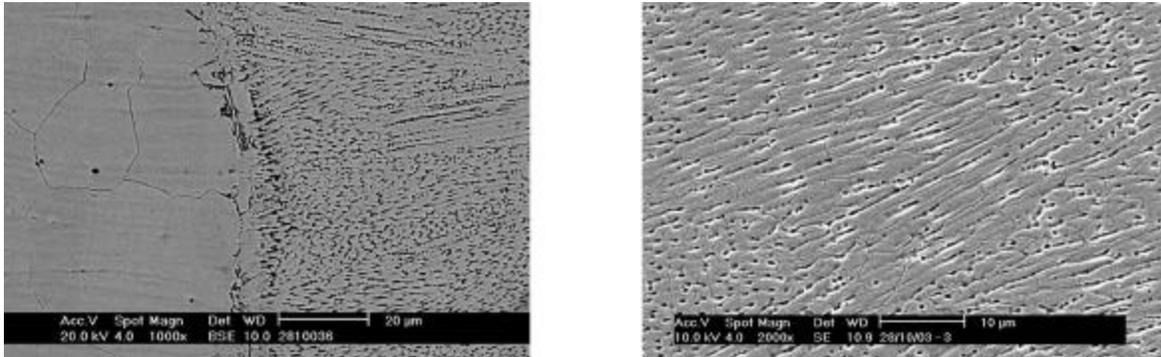


Figura 2 – Detalhes de zona de fusão típica de processo de solda laser; zona fundida e material base (esquerda), zona de fusão (direita)

A análise por EDX/EDS foi executada ao longo da seção transversal, a uma profundidade de aproximadamente 0,3 mm, para avaliar a variação de composição química no cordão de solda. O feixe laser é focalizado em um pequeno ponto e posicionado por CNC, o que torna possível o controle preciso da localização da ZF. Na figura 3, que apresenta a variação do Ni em % de peso ao longo da seção transversal da união, observa-se a influência da variação da posição do feixe laser e conseqüentemente da ZF em relação à junta na composição química do cordão de solda. Verifica-se que a distribuição de Ni ao longo da ZF não foi uniforme. A elevada velocidade de resfriamento não possibilitou a homogeneização do Ni na ZF, permanecendo em maior concentração no AISI 304 independentemente do posicionamento do feixe laser. Segundo Kane, o níquel tem um significativo efeito na tenacidade. O aumento da quantidade de níquel no cordão de solda reduz a quantidade de ferrita e estabiliza a estrutura austenítica, gerando portanto um grande aumento na tenacidade.⁽¹⁵⁾

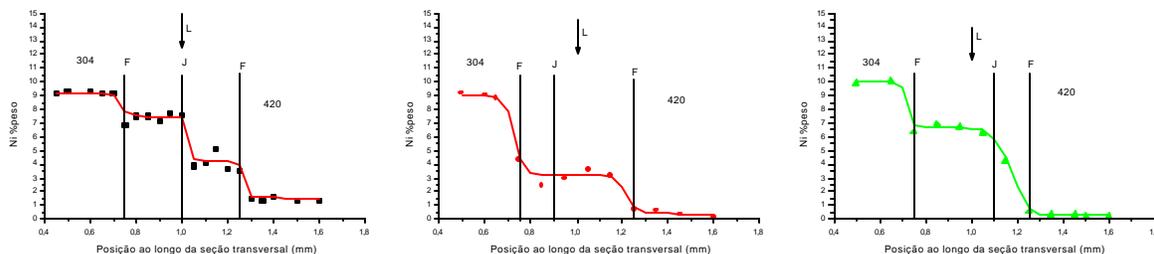


Figura 3 – Distribuição de níquel ao longo da seção transversal do cordão de solda (delimitado pelas linhas identificadas com a letra F) em função do posicionamento da incidência do feixe laser (seta L) em relação à junta (J).

Os ensaios de microdureza Vickers, também, foram executados a uma profundidade de 0,3 mm ao longo da seção transversal com carga de 40 gramas, e seus resultados são apresentados na figura 4. Observa-se que, conforme o feixe se desloca do aço AISI 420 para o aço AISI 304, a dureza máxima diminui, também ocorrendo à redução no perfil de dureza. Dentro deste experimento, o melhor posicionamento para o feixe laser, apontado nos gráficos de dureza, é o deslocamento de 0,1 mm na direção do aço 304. Esta condição nos dá um valor de dureza máxima de 290 Hv.

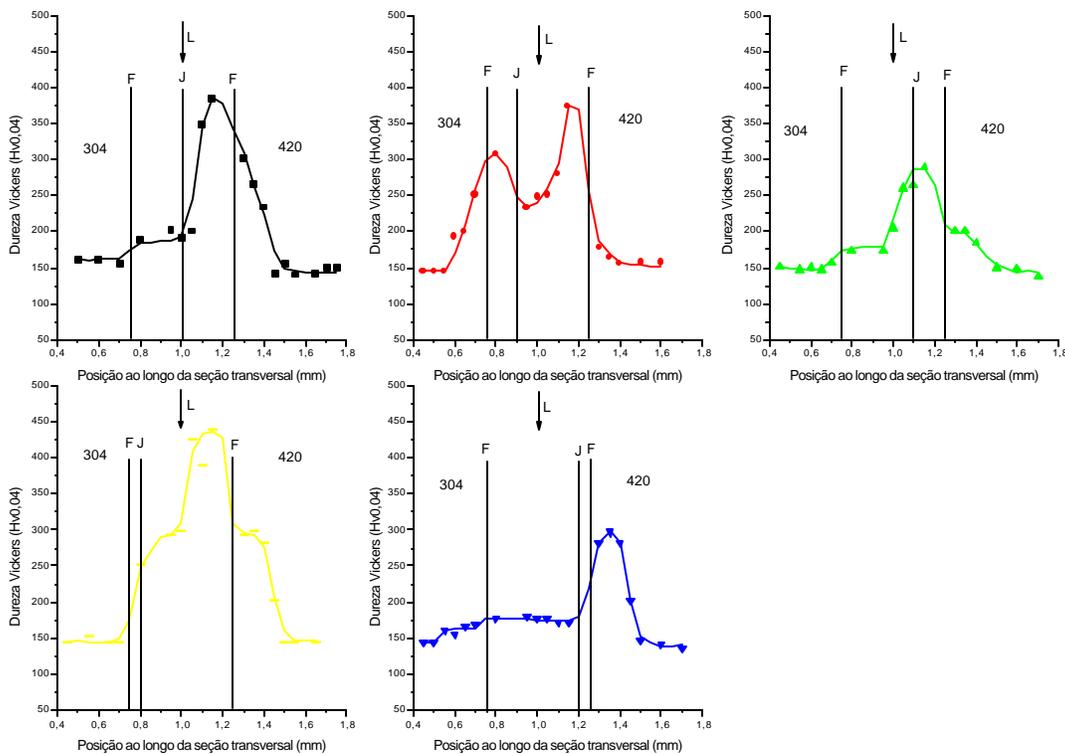


Figura 4 - Perfil de dureza ao longo da seção transversal do cordão de solda (delimitado pelas linhas identificadas com a letra F) em função do posicionamento da incidência do feixe laser (seta L) em relação à junta (J).

Conclusões

As propriedades de focalização do feixe laser permitem o controle preciso tanto da localização como da composição química do cordão de solda.

O posicionamento do feixe laser deslocado de 0,1 mm na direção do aço AISI 304, proporciona uma maior migração de Ni do aço AISI 304 para o aço AISI 420. Os valores de microdureza Vickers são menores que nas outras condições de soldagem, tanto na ZF quanto na ZAC do aço AISI 420. Conseqüentemente uma microestrutura mais tenaz se forma na união entre estes materiais nesta posição de incidência do feixe laser.

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.

Referências Bibliográficas

- 1 Schubert, E.; Klassen, M.; Zerner, I.; "Light-weight structures produced by laser beam joining for future applications in automobile and aerospace industry"; J. Materials Processing Technology; 115;; pg. 2-8. (2001)
- 2 Tusek, J.; Kampus, Z.; Suban, M.; "Welding of tailored blanks of different materials"; J. Materials Processing Technology; 119; pg. 180-184. (2001)
- 3 Modest, M. F., "Laser Machining of Ablating/Decomposing Materials – Trough Cutting and Drilling Models", ICALEO'96 Proc. Sec. Laser Cutting'96; 711P; (1994)
- 4 "Laser Materials Processing, Proc. of ICALEO'90", Ed. Ream, S. L., Dausinger, F., Fujioka, F. (1991)
- 5 "Laser Materials Processing, Proc. of ICALEO'93", vol. 2306, Ed. Denney, P., Miyamoto, I., Mordike, B. L. (1994)
- 6 Neves, M. D. M., Berretta, J. R., Rossi, W., Nogueira, E. C., Wetter, N. U., Vieira Jr., N. D., "Soldagem do Aço Inoxidável AISI304 por Laser de Nd:YAG", Soldagem & Inspeção, ABS, ano 5, n. 6, suplemento técnico.(2001)
- 7 Berretta, J. R., Neves, M. D. M., Rossi, W., Almeida, I. A., Morato, S. P., Vieira Jr., N. D., "Soldagem com Laser de Nd:YAG do Aço Inoxidável Martensítico AISI420",Proc. XXV CONSOLDA (2000)
- 8 Rohde, H., "Sharp Cutting and Drilling with Pulsed Solid State Lasers", VDI-Tantung'96, Stuttgart, Deutschland, pg. 1-10 (1996)
- 9 Rohde, H., Dausinger, F., "The Forming Process of a Through Hole Drilling with a Single Laser Pulse", Proc. ICALEO'95, San Diego, USA
- 10 Peak, U. C., Gagliano, F. P., "Thermal Analysis of Laser Drilling Process", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. QE-8, pg. 112-119 (1972)
- 11 Berretta, J. R., Rossi, W., Costa, F. E., Vieira Jr., N. D., "Estudos das Técnicas de Perfuração a Laser", V Simpósio Estadual de Lasers e Aplicações, IPEN, São Paulo, pg. 325-327, (1992)
- 12 Berretta, J. R., Lima, E. A., Ferreira, P. I., Rossi, W., Vieira Jr., N. D., "Estudos do Tratamento Térmico Superficial de Materiais via Laser", V Simpósio Estadual de Lasers e Aplicações, IPEN, São Paulo, pg. 330-332, (1992)
- 13 Berretta, J. R., "Investigação de Processo de Endurecimento de Materiais via Laser", Dissertação de Mestrado, IPEN/USP (1995)
- 14 Metals Handbook, Welding, Brazing and Soldering, ASM, 9ª edition, Vol. 6, ISBN 0-87170-007 (1993)
- 15 Kane, S.F., "Welding Consumable Development for a Cryogenic Application", Welding Research Supplement, pp. 292s-300s; august 1999

WELDING OF STAINLESS STEEL AISI 304 TO AISI 420 WITH PULSED Nd:YAG LASER

José Roberto Berretta¹

Wagner de Rossi²

Maurício David Martins das Neves³

Ivan Alves de Almeida⁴

Nilson Dias Vieira Junior⁵

Abstract: A pulsed Nd:YAG laser has been used to investigate the laser welding conditions for joining two different materials, in this case AISI 304 and AISI 420 stainless steel were used. The main purpose was to study the physical characteristics of the welding bead as the laser focus position is moved away from the interface between the two materials. Variations in the chemical composition of the melted zone were observed as the center of the pool is moved in a perpendicular direction in relation to the joint. Using butt configuration, several autogenous welding were obtained with the focus in the center of the joint and displaced 0.1 and 0.2 mm on both sides. The fusion zone was analyzed by both optical and scanning electron microscopy; the hardness profile of the bead was also obtained for all welding conditions. The better result was achieved were the laser beam focus was displaced 0.1mm in the AISI 304 steel direction; this condition allows a higher degree of Ni migration from the AISI 304 to the AISI 420 steel, giving rise to lower values of hardness decreasing consequently the probabilities of cracks formation.

Keywords: Laser welding; dissimilar materials; stainless steel

59º CONGRESSO ANUAL DA ABM – INTERNACIONAL
19 a 22 de julho de 2004
São Paulo – SP

- (1) Researcher of Centro Tecnológico da Marinha – CTM-SP
- (2-5) Researcher of Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN
Centro de Lasers e Aplicações - CLA