

Solda com Laser de Nd:YAG Pulsado entre os Aços Inoxidáveis AISI 304 e AISI 420

(Weld with Pulsed Nd:YAG Laser of Stainless Steel AISI 304 to AISI 420)

José Roberto Berretta¹, Wagner de Rossi², Maurício David Martins das Neves³, Ivan Alves de Almeida², Nilson Dias Vieira Junior²

¹ Centro Tecnológico da Marinha, São Paulo, SP, Brasil, berretta@ipen.br

² Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Centro de Lasers e Aplicações, São Paulo, SP, Brasil

³ Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Centro de Ciência e Tecnologia dos Materiais, São Paulo, SP, Brasil

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 as características do cordão de solda gerado em relação ao posicionamento do feixe laser incidente na junta. Para isso, os materiais foram unidos por solda de topo autógena, com um laser de Nd:YAG pulsado desenvolvido no IPEN. Corpos de prova foram soldados com o feixe laser incidindo na junta e deslocado de 0,1 e 0,2 mm para ambos os lados. Analisaram-se as juntas por microscopia óptica para se investigar a geometria do cordão e a ocorrência de trincas e poros. No microscópio eletrônico de varredura observou-se as estruturas formadas na zona de fusão e na zona termicamente afetada, fez-se também a análise por espectrometria de raios X por dispersão de energia para avaliar a variação de composição química ao longo da seção transversal do cordão de solda. Também foram executados ensaios de microdureza para se investigar as propriedades mecânicas da solda. Os resultados das análises fornecem subsídios para se definir a melhor posição do feixe laser incidente em relação à junta na soldagem entre esses aços inoxidáveis.

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

Abstract: A pulsed Nd:YAG laser has been used to investigate the laser welding conditions for joining two different materials, which in this case were AISI 304 and AISI 420 stainless steel. The main purpose was to study the 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. Microscopic features of the fusion zone were analyzed and correlated by optical and scanning electron microscopy. The hardness profile of the bead measurement was also obtained for all welding conditions. The results of the analyses supply subsidies to define the best position of the incident laser beam in relation to the joint of both stainless steels.

Keywords: Laser welding; dissimilar materials; stainless steel

1. Introdução

As investigações das aplicações de solda laser tiveram seu início logo em seguida ao desenvolvimento do primeiro equipamento. Com o laser de rubi foi demonstrado a viabilidade da execução de solda laser, ainda na década de sessenta. A maioria dos estudos enfatizou a solda ponto, mas a solda costura pela sobreposição de pulsos também foi demonstrada, embora a uma velocidade muito baixa. Com

o desenvolvimento dos lasers de CO₂ e de Nd:YAG, operando tanto no modo contínuo como no modo pulsado, a solda costura pode ser feita a velocidades mais razoáveis. Em 1971, foi anunciada a soldagem por penetração profunda (soldagem por “keyhole”) com um laser de CO₂ [1]. O desenvolvimento continuado destes tipos de lasers fez com que a solda laser, nos anos noventa, passasse a ser economicamente competitiva com outros métodos de soldagem. Assim, os lasers de CO₂ e de Nd:YAG se tornaram os principais concorrentes em aplicações de solda a laser, e eles permanecem até hoje como os tipos de lasers mais usados em soldagem.

(Recebido em 28/04/2005; Texto Final em 14/02/2006).

Segundo Steen [1], 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. Este destaque origina-se principalmente das aplicações em corte [2], soldagem [3], furação [4] e tratamento térmico superficial [5].

Obviamente, o laser concorre, em todos estes processos, com métodos tradicionais que também estão em constante evolução. Mas esta ferramenta tem apresentado, nos últimos anos, um crescimento superior. 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 [6], [7].

A união entre materiais dissimilares 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. Em uma 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, fabricados 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 [8].

Este tipo de solda sempre foi, e ainda é produzida usando-se processos de soldagem convencional, 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) e soldagem por fricção. Com o rápido desenvolvimento, nos últimos anos, da tecnologia de feixes com alta densidade de energia investigações de soldagem laser [9, 10] vêm recebendo atenção especial.

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 na faixa de $10^6 - 5 \times 10^7 \text{ W.cm}^{-2}$ já é suficiente para iniciar uma vaporização local. Nesta faixa é gerada uma cavidade de vapor que penetra profundamente através da espessura do material. Este processo é conhecido como soldagem laser por “keyhole”, que tem como característica principal soldar com rapidez e em passe único.

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 [11, 12]. 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 de pressão 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 [11].

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 o aço inoxidável austenítico AISI 304 e o aço inoxidável martensítico AISI 420, que é utilizada na produção de equipamentos e instrumentos de grande interesse para a indústria de papel e celulose, têxtil, frigorífica, alimentícia, utensílios domésticos, hospitalar e odontológica. Para a soldagem utilizou-se um laser de Nd:YAG pulsado desenvolvido no Centro de Lasers e Aplicações do IPEN. O principal objetivo do estudo foi investigar a variação do posicionamento do feixe laser incidente em relação à junta, nas características do cordão gerado em soldagem autógena, tais como, a geometria do cordão, a profundidade de penetração, a ocorrência de trincas e poros. A distribuição dos elementos de liga ao longo da seção transversal da solda e propriedades mecânicas pelos ensaios de microdureza e tração, também foram medidas. Com este procedimento pretendeu-se conhecer melhor a importância deste parâmetro para o processo de soldagem a laser, e com isto obter um cordão de solda isento de defeitos e que mantivesse as características mecânicas.

2. 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. Suas composições químicas nominais são mostradas na tabela 1. Estas composições foram confirmadas por análise feita através de espectrometria de fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda, realizada em um equipamento marca Rigaku, modelo RIX – 3000 do laboratório de Fluorescência de raios X do CQMA/IPEN. Os resultados desta análise estão apresentados na tabela 2.

Tabela 1. Composição química dos materiais [13]

| | Ni (%) | Cr (%) | Fe (%) | C (%) | Mn (%) | Si (%) | S (%) | P (%) | Mo (%) | N ₂ (%) | Cu (%) |
|----------|----------|---------|---------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------------------|--------|
| AISI 304 | 8 – 10,5 | 18 - 20 | balanço | 0,08 | 2 | 0,75 | 0,03 | 0,045 | | 0,1 | |
| AISI 420 | 0,75 | 12 – 14 | balanço | 0,15 | 1 | 1 | 0,03 | 0,04 | 0,5 | | |

Tabela 2. Composição química dos materiais analisados no IPEN

| | Ni (%) | Cr (%) | Fe (%) | C (%) | Mn (%) | Si (%) | S (%) | P (%) | Mo (%) | N ₂ (%) | Cu (%) |
|----------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------------------|--------|
| AISI 304 | 8,9 | 18,4 | 71,2 | | 1,06 | 0,34 | | 0,03 | 0,05 | | 0,05 |
| AISI 420 | 0,13 | 13,0 | 86,2 | | 0,17 | 0,46 | | 0,04 | | | 0,02 |

As amostras foram preparadas partindo-se de chapas de 0,8 mm de espessura nas dimensões de 20 mm x 50 mm para os dois 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 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. A tabela 3 apresenta as amostras geradas pela variação na posição do feixe laser.

Tabela 3. Amostras utilizadas no experimento de soldagem.

| Amostra | Materiais | Posição do feixe em relação à junta |
|---------|-------------------|-------------------------------------|
| AM/M02 | AISI304 / AISI420 | 0,2 mm p/ lado do AISI420 |
| AM/M01 | AISI304 / AISI420 | 0,1 mm p/ lado do AISI420 |
| AM/J | AISI304 / AISI420 | na linha da junta |
| AM/A01 | AISI304 / AISI420 | 0,1 mm p/ lado do AISI304 |
| AM/A02 | AISI304 / AISI420 | 0,2 mm p/ lado do AISI304 |

As soldas foram realizadas na Central de Processamento de Materiais a Laser (CPML). Um equipamento desenvolvido no IPEN 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 500 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 observação em microscópio óptico da seção transversal do cordão de solda, para se investigar a geometria do cordão, a

profundidade de penetração e a ocorrência de trincas nas zonas termicamente afetada (ZTA) e de fusão (ZF). A possibilidade de formação de poros, gerados pelo colapso do “keyhole”, também foi analisada na zona de fusão. As análises acima foram feitas para todos os posicionamentos do feixe em relação à junta.

As estruturas da seção transversal das amostras foram reveladas em um equipamento de ataque eletroquímico, 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), marca Philips modelo XL30, foi investigada a microestrutura da seção transversal das uniões, além da espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX) executada ao longo da seção transversal em pontos espaçados de 0,06 mm, a uma profundidade de aproximadamente 0,3 mm, para avaliar a variação de % peso dos principais elementos no cordão de solda (Cr, Ni, Fe).

Ensaio de microdureza Vickers, também foram executados a uma profundidade de 0,3 mm ao longo da seção transversal e espaçados de 0,07 mm, com carga de 40 gramas, em um equipamento de dureza instrumentada marca Fischer, modelo Fischerscope H100V, para avaliar o cordão de solda e a zona termicamente afetada.

3. Resultados

Inicialmente foram realizadas análises por microscopia óptica (MO) nas soldas laser. Estas soldas foram autógenas, efetuadas em passe único, com a utilização da técnica de soldagem por “keyhole”. Nas seções transversais dos cordões de solda, apresentadas desde a figura 1 até a figura 5, observa-se que a variação do posicionamento do feixe não influencia a geometria do cordão, o qual é sempre típico de soldagem por “keyhole”.

Todas as condições de soldagem apresentam uma união uniforme, isentas de trincas na zona de fusão e também na zona termicamente afetada. Poros na zona de fusão, que são gerados por colapso do “keyhole” durante a solda, também não são observados. As dimensões da largura do cordão

apresentaram valores médios de 1 mm na superfície e de 0,45 mm na raiz. Com estas dimensões de cordão, fica claro que qualquer variação no processo de soldagem pode comprometer a união entre os materiais. Este comprometimento pode ocorrer, inclusive, quando se usa o feixe laser com deslocamento de 0,2 mm em relação à junta.

Na figura 1 e até a figura 5 também são apresentadas a distribuição em % peso dos principais elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da união. Observa-se que a distribuição dos elementos na zona de fusão tem boa homogeneidade quando o feixe está posicionado na junta e também quando está deslocado para qualquer lado a partir dela.

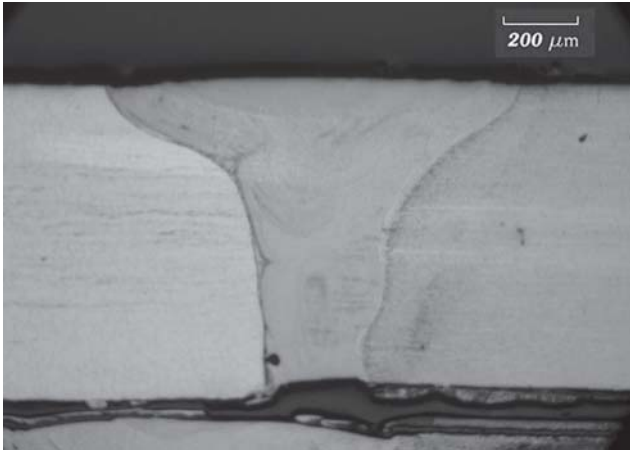


Figura 1 - Microscopia óptica e gráfico da % peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AM/A02. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

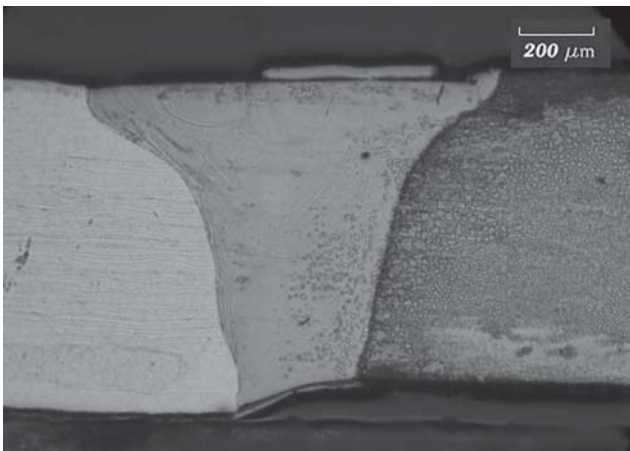


Figura 2 - Microscopia óptica e gráfico da % peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AM/A01. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

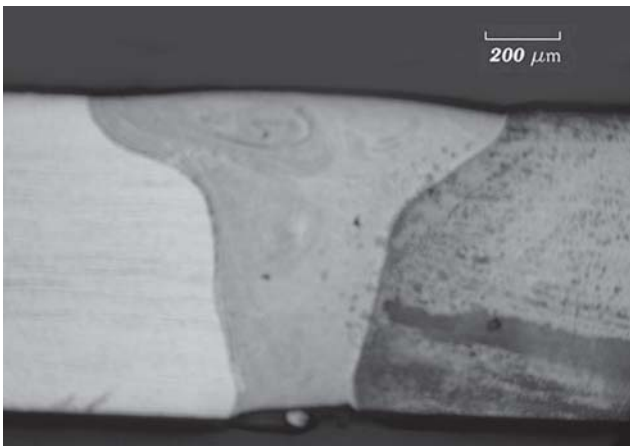


Figura 3 - Microscopia óptica e gráfico da % peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AM/J. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

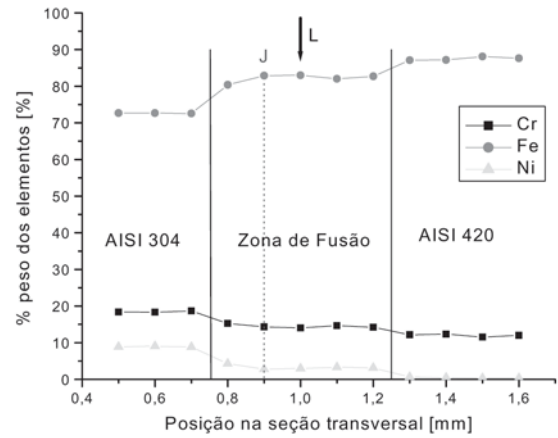
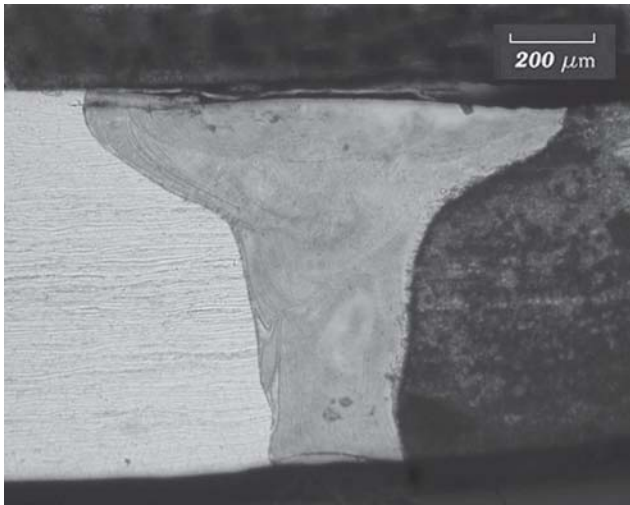


Figura 4 - Microscopia óptica e gráfico da % peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AM/M01. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

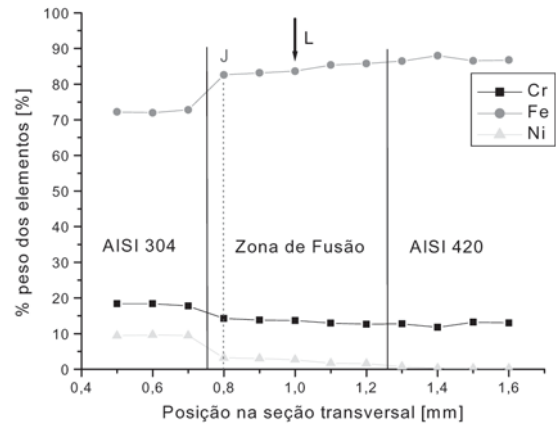
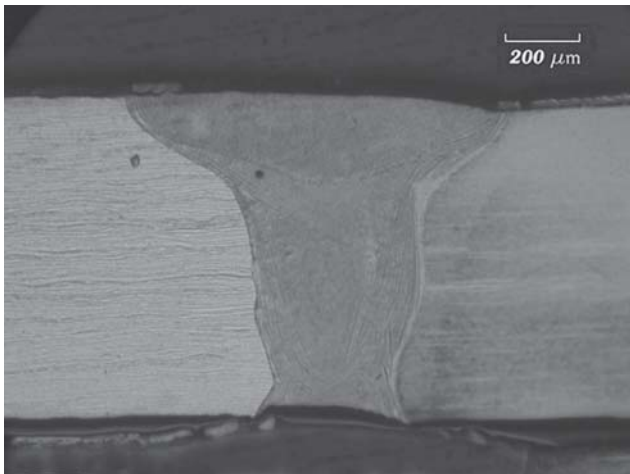


Figura 5 - Microscopia óptica e gráfico da % peso dos elementos (Fe, Ni e Cr) ao longo da seção transversal da amostra AM/M02. [(seta L) feixe laser, (J) junta].

A investigação destas uniões no microscópio eletrônico de varredura mostrou que a zona de fusão apresenta uma microestrutura fina e basicamente dendrítica, conforme mostrada na figura 6. Esta estrutura, que é benéfica para as

propriedades mecânicas de uma união, ocorre principalmente devido à alta velocidade de resfriamento, que é uma característica típica do processo de solda laser [3, 12].

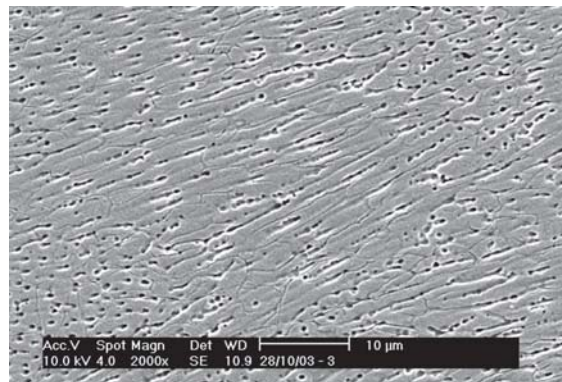
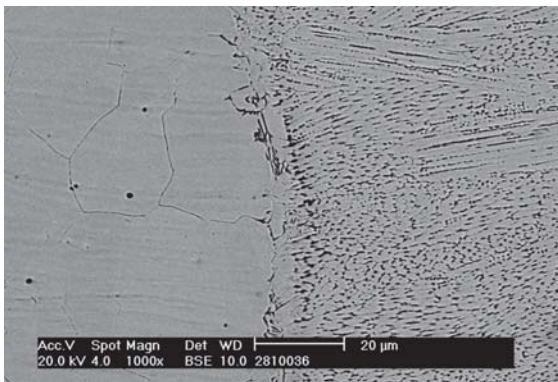


Figura 6 – Detalhes de zona de fusão típica de processo de solda laser; zona fundida e material base (esquerda), zona de fusão (direita)

Na investigação da seção transversal dos cordões de solda em microscopia óptica foram determinadas suas geometrias e dimensões. Assim, definiu-se uma área média da seção transversal destes cordões. Com esta área e a posição do feixe em relação à junta pode-se prever qual a porcentagem volumétrica de cada material na zona de fusão. Conhecendo-se estes valores construiu-se a tabela 4, em que a % peso dos principais elementos químicos foi estimada.

Tabela 4 – Tabela da % peso estimada dos principais elementos químicos no cordão de solda laser dos aços AISI 304 x AISI 420 em função da posição do feixe em relação à junta

| | AISI 304 | AISI420 | Ni | Cr | Fe |
|----------|----------------|----------------|----------|----------|----------|
| | (% vol. na ZF) | (% vol. na ZF) | (% peso) | (% peso) | (% peso) |
| AISI 304 | | | 8,9 | 18,4 | 71,2 |
| AISI 420 | | | 0,13 | 13,0 | 86,2 |
| AM/A02 | 0,846 | 0,154 | 7,55 | 17,57 | 74,88 |
| AM/AO1 | 0,673 | 0,327 | 6,03 | 16,63 | 77,33 |
| AM/J | 0,5 | 0,5 | 4,52 | 15,70 | 79,78 |
| AM/M01 | 0,327 | 0,673 | 3,00 | 14,77 | 82,23 |
| AM/M02 | 0,154 | 0,846 | 1,48 | 13,83 | 84,69 |

Na análise por espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX) obteve-se os valores da % peso dos principais elementos químicos (Ni, Cr e Fe) ao longo da seção transversal do cordão de solda laser. A figura 7 apresenta estas variações em % peso de cada um dos principais elementos, para cada posição do feixe laser e conseqüentemente da zona de fusão em relação à junta.

Os gráficos da figura 7 sugerem que a posição do feixe laser em relação à junta, quando se faz uma união entre estes aços, influenciam na distribuição de % peso dos principais elementos químicos na zona de fusão. A homogeneidade na distribuição dos elementos ao longo da

seção transversal da zona de fusão é clara. Isto ocorre tanto quando o feixe está posicionado na junta, como também, quando está deslocado para qualquer um dos lados. Portanto, por estas medidas, podemos calcular os valores médios da % peso dos principais elementos químicos no cordão de solda laser. Estes valores são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Tabela dos valores médios da % peso dos principais elementos químicos no cordão de solda laser, medidos por EDX, em função da posição do feixe em relação à junta

| | Ni | Cr | Fe |
|---------|-------------|--------------|--------------|
| Amostra | (% peso) | (% peso) | (% peso) |
| AM/A02 | 6,95 ± 0,45 | 16,18 ± 0,44 | 76,67 ± 0,88 |
| AM/AO1 | 6,07 ± 0,29 | 16,12 ± 0,18 | 77,80 ± 0,41 |
| AM/J | 5,33 ± 1,46 | 15,53 ± 0,78 | 79,13 ± 2,22 |
| AM/M01 | 3,29 ± 0,60 | 14,51 ± 0,49 | 82,20 ± 1,07 |
| AM/M02 | 2,42 ± 0,75 | 13,47 ± 0,66 | 84,11 ± 1,40 |

As medidas acima demonstram que a metodologia empregada para se estimar a % peso dos principais elementos químicos no cordão de solda está correta. Os dados estimados e obtidos nas análises por espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX), para os cordões de solda, são praticamente os mesmos. Os desvios encontrados na comparação dos valores são atribuídos às variações que ocorrem durante os procedimentos experimentais.

Ao longo das seções transversais dos cordões de solda também foram executados ensaios de microdureza Vickers. Estas medidas foram feitas com uma carga de 40 gramas ao longo de uma linha paralela à superfície, e situada a uma profundidade de 0,3 mm. Na figura 8 são apresentados os perfis de microdureza obtidos desta maneira.

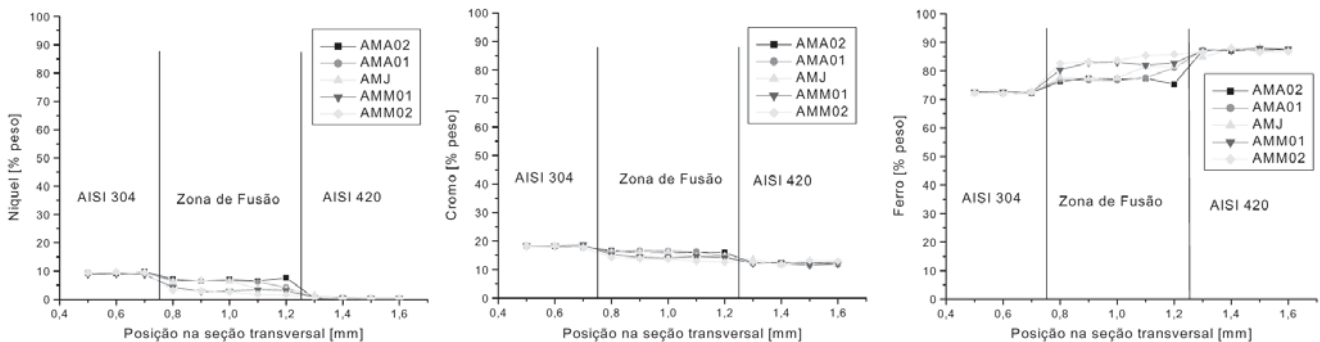


Figura 7 – Distribuição do níquel, cromo e ferro na seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta, para união entre AISI 304 e AISI 420.

Observa-se então, que o valor máximo de dureza localiza-se na zona termicamente afetada do aço AISI 420, ocorrendo para qualquer posição do feixe laser incidente. Este resultado era esperado, pois o aço AISI 420 é um aço inoxidável martensítico. Durante o processo de soldagem a laser, a zona termicamente afetada é submetida a um ciclo térmico com altas velocidades de resfriamento, o que propicia a formação de estrutura martensítica nesta região.

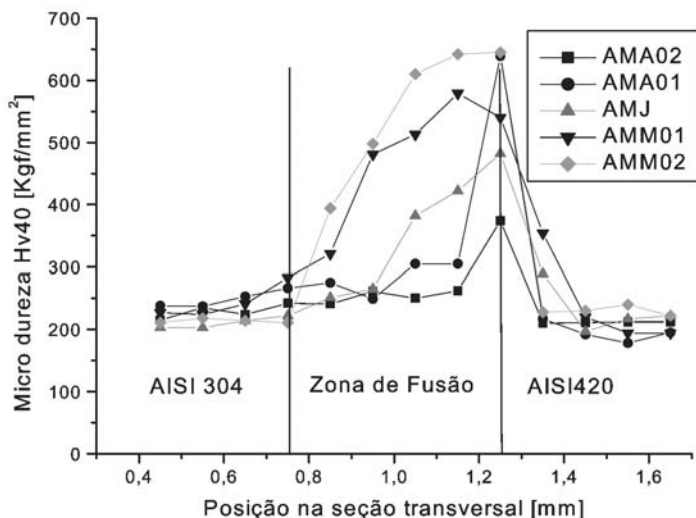


Figura 8 - Perfil de dureza ao longo da seção transversal do cordão de solda em função da incidência do feixe laser em relação à junta, na união entre AISI 304 e AISI 420.

Observa-se que, conforme a posição do feixe laser varia, do aço AISI 420 no sentido do aço AISI 304, vai ocorrendo uma redução gradativa no perfil de dureza ao longo da seção transversal na zona de fusão. Pois, quando o feixe está deslocado no sentido do 420, a zona de fusão contém uma grande quantidade de martensita, que vai se reduzindo até chegar a zero conforme o feixe vai caminhando para o aço AISI 304.

4. Conclusões

O controle preciso da localização do feixe laser é consequência de suas propriedades de focalização e do sistema de posicionamento.

Na solda laser autógena, efetuada em passe único pela técnica de soldagem por “keyhole”, a variação do posicionamento do feixe não influencia na geometria do cordão.

Todas as condições de soldagem apresentam uma união uniforme, isentas de trincas na zona de fusão e também na zona termicamente afetada. Também não houve, durante a soldagem, a ocorrência de poros por colapso do “keyhole” na zona de fusão das seções transversais analisadas.

A distribuição em % peso dos principais elementos (Fe, Ni e Cr), ao longo da seção transversal da zona de fusão, tem boa homogeneidade tanto quando o feixe está

posicionado na junta como também quando está deslocado para qualquer um dos lados.

A zona de fusão apresenta uma microestrutura fina e basicamente dendrítica, que é benéfica para as propriedades mecânicas de uma união.

A metodologia empregada neste estudo para se estimar a % peso dos principais elementos químicos no cordão de solda é correta. Os dados estimados foram confirmados na análise por espectrometria de raios X por dispersão de energia (EDX) em todos os casos.

A zona termicamente afetada do aço AISI 420, para qualquer posição do feixe laser incidente, apresentou o valor máximo de microdureza.

Conforme se varia à posição do feixe laser, do aço AISI 420 para o aço AISI 304, observa-se uma redução gradativa no perfil de dureza ao longo da seção transversal na zona de fusão.

Por fim, 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. Referências Bibliográficas

(Endnotes)

- [1] STEEN, W. M. Laser Material Processing. Ed. Springer-Verlag. 2a ed., ISBN 3540761748. 1998.
- [2] ROHDE, H. Sharp Cutting and Drilling with Pulsed Solid State Lasers. In: VDI-Tantung'96, Stuttgart, Deutschland, p. 1-10. 1996.
- [3] 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.
- [4] BERRETTA, J. R., ROSSI, W., COSTA, F. E., VIEIRA Jr., N. D. Estudos das Técnicas de Perfuração a Laser. In: V Simpósio Estadual de Lasers e Aplicações, IPEN, São Paulo, p. 325-327, 1992.
- [5] BERRETTA, J. R. Investigação de Processo de Endurecimento de Materiais via Laser. 1995. Dissertação de Mestrado – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- [6] SEMAK, V. V., KNOROVSKY, G. A., MACCALLUM, D. O. On the possibility of microwelding with laser beams. J. Phys. D: Appl. Phys.; n. 36, p. 2170–2174, 2003.
- [7] 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
- [8] ZHANG, L., FONTANA, G. Autogenous laser welding of stainless steel to free-cutting steel for the manufacture of hydraulic valves. J. Materials Processing Technology; n.74, p. 174-182, 1998.
- [9] ZHANG, L., GOBBI, S. L., RICHTER, K.H. Autogenous welding of Hastelloy X to Mar-M 247 by laser. J. Materials Processing Technology; n.70, p. 285-292, 1997.

- [¹⁰] SUN, Z., KUO, M. Bridging the joint gap with wire feed laser welding. *J. Materials Processing Technology*; n.87, p. 213-222, 1999. ^{zz}
- [¹¹] *Metals Handbook, Welding, Brazing and Soldering*, ASM, 9^a edition, Vol. 6, ISBN 0-87170-007. 1993.
- [¹²] KANE, S. F. Welding Consumable Development for a Cryogenic Application. *Welding Research Supplement*, p. 292s-300s; august 1999.
- [¹³] MatWeb Material Property Data – homepage que fornece informações sobre materiais. Disponível em: <http://www.matweb.com> . Acesso em: 17 de agosto 2004.