

SOLDAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX UNS S32750 COM LASER PULSADO DE Nd:YAG

Wagner de Rossi
Gilberto André da Rocha
Maurício David Martins das Neves

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN-CNEN/SP, Av. Prof. Lineu Prestes 2.242, CEP 05508-000 São Paulo, SP

Resumo: O propósito deste trabalho foi o de otimizar a produção de cordões de solda em aço inoxidável super duplex UNS S32750 através de processo de soldagem a laser. Para isto foi utilizado um laser pulsado de Nd:YAG onde a intensidade foi variada de 1,1 a 9,4 x 10⁶ W/cm² por meio da alteração tanto da largura temporal dos pulsos laser quanto do diâmetro do ponto focal. Cordões com penetração total, pouca perda de material e pequena ou nenhuma porosidade foram obtidos em tubos com 1,65mm de espessura de parede. Foram realizadas análises da superfície do cordão e da microestrutura da zona de fusão (ZF) e da zona afetada pelo calor (ZAC), além do perfil de microdureza Knoop da região do cordão.

Palavras-chave: soldagem a laser, laser pulsado, aço super duplex.

1. INTRODUÇÃO

O aço inoxidável super duplex UNS S32750 possui propriedades físicas, mecânicas e metalúrgicas que conferem alta qualidade para ser usado em aplicações com rígidas condições de utilização, alta resistência mecânica e elevada resistência à corrosão, como aquelas necessárias em processos químicos, petroquímicos e equipamentos utilizados com água do mar. Possui excelente resistência ao impacto e à corrosão por cloretos, alta condutividade térmica e um baixo coeficiente de expansão térmica. A alta concentração de cromo, molibdênio e nitrogênio permitem uma excelente resistência à microfissuração, corrosão galvânica e a corrosão em geral. As elevadas propriedades deste aço são obtidas pelo balanço das fases presentes constituído, basicamente, pelas mesmas proporções de ferrita e austenita (Senatore et al, 2007).

Alguns trabalhos são observados na literatura usando a soldagem com arco elétrico do aço UNS S 32750, em especial o processo TIG (Tungsten Inert Gas) (Tedeschi et al, 2010 e Senatore et al, 2007); no entanto, raras são as citações usando a soldagem laser. O processo laser apresenta diversos aspectos positivos, tais como, alta precisão na incidência do feixe, baixa zona afetada pelo calor (ZAC), possibilita alcançar alta penetração usando juntas com bordos retos sem a necessidade de chanfros e o uso de material de adição (MA). Portanto, o processo laser permite executar soldagens com muita precisão, por meio do controle do fluxo de energia entregue à peça, que é alcançado pelo efetivo controle de diferentes parâmetros (Hall, 1989).

Diversos parâmetros usados na soldagem com laser de Nd:YAG influenciam na geometria do cordão de soldagem, entre eles pode-se destacar: energia por pulso, largura temporal, diâmetro e distância do ponto focal, taxa de repetição, velocidade, vazão e composição do gás de proteção e sobreposição dos pulsos laser.

Parâmetros do laser, tais como, energia do pulso, largura temporal, taxa de repetição e velocidade são regulados diretamente no equipamento antes da soldagem. Outras variáveis são dependentes das condições do experimento. Por exemplo, o diâmetro do ponto focal d_{min} de um feixe laser com diâmetro inicial d_0 , fator de qualidade M^2 e focalizado por uma lente de comprimento focal f é dado pela equação 1 (Johnston, 1990):

$$d_{min} = 4M^2\lambda f / (\pi \cdot d_0) \quad (1)$$

A variação deste diâmetro em relação à posição do ponto focal - Z é dada pela equação 2 (Hall, 1989):

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{M^2 \lambda Z}{\pi \omega_0^2}\right)^2} \quad (2)$$

onde ω e ω_0 são respectivamente, o raio do feixe na posição Z e no foco, onde $\omega_0 = d_{min}$.

A intensidade do pulso laser é o parâmetro mais importante na soldagem e é calculada pela equação 3, onde E é a energia do pulso, t_p o tempo de duração deste pulso, e A é sua área sobre a superfície a ser soldada. Baixa intensidade do pulso laser pode levar a uma profundidade de penetração muito baixa, enquanto que intensidade muito alta causa perda excessiva de material através de ejeção de líquido e evaporação do MB.

$$I = \frac{E}{t_p \cdot A} \quad (3)$$

A taxa de sobreposição de pulsos é calculada por meio da relação entre a taxa de repetição dos pulsos laser, o diâmetro do ponto focal e a velocidade de deslocamento da peça em relação ao feixe. Quando este diâmetro é aquele da poça formada por um único pulso laser, a velocidade de processo – v – pode ser calculada como: $v = d_1 \cdot f$, onde d_1 é o diâmetro da poça líquida e f a taxa de repetição de pulsos.

A intensidade (fluxo de energia) pode ser variada através destes parâmetros e influenciar nas características da poça de fusão. Pode-se, controlar o gradiente de aquecimento, a temperatura máxima e o volume da poça de fusão. Estas características, juntamente com as propriedades térmicas do metal e da relação entre o volume da poça e o volume da peça levam a uma taxa de resfriamento que geralmente é muito alta para o caso de um laser pulsado. Isto pode produzir uma solda profunda (*key hole*), com propriedades metalúrgicas características de um rápido resfriamento (Ventrela et al, 2011; Ventrela et al, 2010; Neves et al, 2010).

O objetivo deste trabalho é avaliar os efeitos dos principais parâmetros do laser pulsado de Nd:YAG, na geometria e microestrutura da zona de fusão e da zona afetada pelo calor na soldagem do aço UNS S32750.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O aço super-duplex SAF 2507 (UNS S32750) em estudo foi adquirido sob a forma de tubo com 19,1 mm de diâmetro e 1,65 mm de espessura. Sua composição química segue apresentada na tabela (1).

Tabela 1. Composição química do aço UNS S32750 em estudo.

UNS	% C _{máx}	% Si	% Mn	% Cr	% Ni	% Mo	% N	% Cu
S32750	0,030	0,8	1,2	25	7	4,0	0,30	-

Os experimentos de soldagem foram executados com um laser pulsado de Nd:YAG, acoplado a uma fresadora com controle CNC de três eixos, cujo sistema é chamado de CPML – Central de Processamento de Materiais a Laser do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN.

Os parâmetros variados foram largura temporal dos pulsos (t_p) e o diâmetro do ponto focal. Para focalização do feixe laser utilizou-se uma lente com distância focal de $f = 100$ mm, e a posição Z do foco foi variada da superfície ($Z = 0$) até o valor de 2,5 mm abaixo da superfície do MB ($Z = -2,5$ mm), com variação de passo de 0,5mm.

O laser de Nd:YAG possui comprimento de onda de emissão $\lambda = 1,064$ μ m, o sistema utilizado emite um feixe com $M^2 = 12$, com diâmetro de aproximadamente 14 mm ao incidir na lente de focalização.

A variação do diâmetro em relação à posição do ponto focal - Z calculado pela equação 2 (Hall, 1989) vai de 116 μ m até 414 μ m. As intensidades dos pulsos laser (I) foram calculadas pela equação 3.

A taxa de sobreposição dos pulsos foi calculada através da relação entre a taxa de repetição e a velocidade de deslocamento da peça em relação ao feixe. Foi escolhida uma sobreposição de 70 % tomando-se como referência, não o diâmetro do feixe laser na peça, mas sim o diâmetro da poça formada por um único pulso laser. Os parâmetros utilizados foram:

Energia por pulso: $E = 6$ J

Diâmetro do ponto de solda (poça líquida): $d_1 = 0,8$ mm

Velocidade de soldagem: $v = 130$ mm/min.

Taxa de repetição de pulsos: $f = 9$ Hz

Taxa de sobreposição: 70 %

A escolha destes parâmetros teve como objetivo a obtenção de uma solda de qualidade com penetração total, mesmo diante das limitações impostas pelo equipamento. Assim, a energia máxima possível de 6 Joules foi mantida fixa enquanto que os outros parâmetros que compõem a intensidade (eq. 3), largura temporal e intensidade, foram variados dentro de um intervalo disponível pelo arranjo e que se supunha adequado para os experimentos.

Com os parâmetros descritos, foram realizados 12 cordões de solda ao longo do comprimento do tubo, todos espaçados igualmente em seu contorno de tal forma que não houvesse influência no cordão anterior ou subsequente. Durante a realização das soldas foi empregada uma vazão de 10 l/ min. de argônio puro para a proteção do cordão.

Após a realização dos cordões de soldagem foram extraídas amostras por meio de corte transversal com disco diamantado. O anel resultante foi embutido em resina acrílica e preparado por técnicas metalográficas de lixamento e

polimento. Posteriormente, as amostras foram submetidas a ataque eletrolítico com a solução de 50% de ácido nítrico e 50% de água, tensão de 5 V e tempo de ataque de 10 segundos.

A geometria da zona de fusão e a microestrutura das amostras foram analisadas por microscópio óptico, enquanto a distribuição de elementos de liga foi avaliada por analisador de energia dispersiva de raios X acoplado ao microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Realizou-se um perfil de microdureza Knoop utilizando-se um microdurômetro HMV-2000 da Shimadzu com carga de 25 gramas e tempo de aplicação de 5 segundos. As medidas foram realizadas desde o centro dos cordões de solda até o MB numa profundidade de 100 micrometros abaixo da superfície.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 1 são observadas imagens do tubo com os respectivos cordões nas diversas condições de soldagem. Observam-se cordões retilíneos com superfície mais rugosa em relação ao MB, levemente oxidada e a presença de cordões com poucos respingos.



Figura 1. Tubo de aço Inoxidável Super Duplex UNS S32750 mostrando os doze cordões de solda.

Na tabela 2 observam-se os parâmetros de soldagem com as dimensões dos cordões, profundidade de penetração e largura do cordão.

Tabela 2 Parâmetros de soldagem.

Cordão de solda (#)	Parâmetros de soldagem				Profundidade de penetração (mm)	Largura do cordão (mm)
	Diâmetro do feixe 2ω (μm)*	Largura temporal t_p (ms)	Intensidade $I \times 10^6$ (W/cm^2)	Ponto focal (mm)		
1	116	12	4,5	0,0	0,5	0,67
2	141	12	3,1	0,5	0,6	0,73
3	141	4	9,4	0,5	total	0,63
4	197	4	5,0	1,0	total	0,74
5	265	4	2,7	1,5	total	0,71
6	338	4	1,7	2,0	total	0,73
7	414	4	1,1	2,5	0,7	0,90
8	197	6	3,3	1,0	1,6	0,91
9	265	6	1,8	1,5	1,5	0,78
10	116	9	6,1	0,0	1,0	0,77
11	141	9	4,2	0,5	1,0	0,79
12	197	9	2,2	1,0	0,9	0,72

* 2ω é o diâmetro do feixe sobre a superfície conforme calculado pela equação 2.

Verifica-se a tendência do menor tempo de pulso provocar maior aumento da penetração de soldagem, enquanto a largura não apresenta uma tendência definida de comportamento. Praticamente, em todas as condições de soldagem realizadas com tempo de pulso de 4 ms ocorreu penetração total na soldagem. A exceção foi a condição 7, que utilizou o maior ponto focal, o que acabou reduzindo a penetração e aumentando a largura do cordão. Neste caso, a intensidade foi baixa de mais para provocar a formação de um *key hole* profundo; foi a menor intensidade em todo experimento. Outras condições de soldagem, em especial com valores do tempo de pulso maiores não mostraram penetração total. Pulsos com largura temporal de 6 ms produziram profundidade quase que total; com largura de 9 ms a profundidade foi de aproximadamente 1,0 mm enquanto que 12 ms levaram a profundidade de 0,5 a 0,6mm. Em todos os casos, para uma mesma largura temporal, a intensidade maior levou a uma profundidade maior.

Portanto, observa-se que a largura temporal dos pulsos laser tem grande influência na profundidade de penetração, enquanto que diâmetros menores, que levam a intensidades maiores (para uma mesma duração de pulso) apresentam uma influência muito pequena.

Após a execução da soldagem, observa-se a formação de respingos fora da área de solda e um aspecto mais rugoso da superfície do cordão, em especial nas condições 3 a 6 (figura 2). Isto deve-se ao curto tempo de pulso e à elevada quantidade de calor no início destes pulsos. No caso da utilização de menor tempo de pulso a energia do feixe laser é entregue ao MB num tempo menor, podendo ocorrer uma rápida fusão e maior agitação do metal líquido, aumentando a possibilidade da formação de respingos e aspecto mais rugoso da superfície.

Em contrapartida, pulsos mais longos provocam uma superfície mais regular e homogênea, praticamente sem respingos, conforme observado nas condições 1 e 2 da figura 3. No entanto, nestas condições a penetração da soldagem é diminuída.

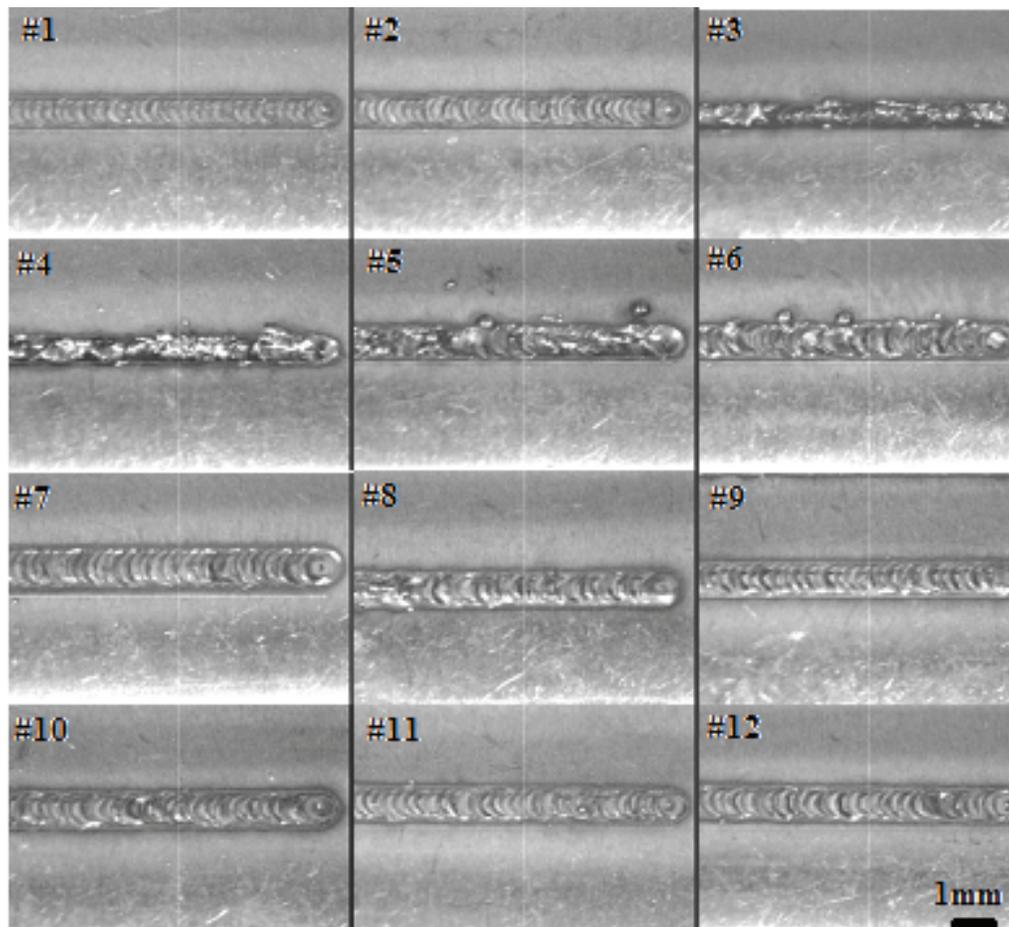


Figura 2. Vista da superfície de soldagem para os 12 cordões.

Na figura 3 observam-se imagens da seção transversal dos cordões de solda obtidas por microscópio óptico. Verifica-se que apenas na condição com tempo de pulso de 4 ms a penetração foi completa. Também pode ser constatada uma elevada perda de material, indicada por setas, tanto na superfície como na raiz do cordão de soldagem. A maior perda de material nesta condição deve estar relacionada à perda de material por respingos, volatilização ou maior fusão na superfície do cordão ocasionando irregularidades. Ainda pode ser verificado que cordões de solda com elevada razão de aspecto podem ser obtidos com pequena largura temporal (< 6 ms).

As condições para largura de pulso de 9 e 12 ms parecem ter provocado penetração do feixe laser por condução. Os tempos de 4 e 6 ms a penetração ocorreu por key-hole. Normalmente a explicação para a formação do key-hole é dada em termos da intensidade, onde para cada material existiria um limiar para a sua formação. Contudo, a manutenção da cavidade produzida por este fenômeno depende de um delicado balanço entre as forças de expansão dos gases em seu interior e as forças de gravidade e coesão que tendem a colapsar o material líquido. Este é um processo bastante complexo e que necessitaria de muito mais estudos para a sua completa explicação. Por estes motivos, não são observados uma relação direta entre as intensidades para as larguras temporais menores (4 e 6 ms) e maiores (9 e 12 ms) e a formação ou não de key-hole.

A presença de poros na ZF pode estar relacionada ao mecanismo de formação do "key-hole", que pode causar aprisionamento do vapor metálico na poça de fusão, durante o colapso do "key-hole". A maior quantidade de poros está relacionada à penetração incompleta na ZF

Os parâmetros escolhidos para a soldagem tiveram como objetivo utilizar da forma mais eficiente possível a energia do pulso laser, e assim fundir o maior volume possível. Para isto, a temperatura da superfície deve rapidamente atingir a temperatura de fusão; e isto por dois motivos: 1- a reflexão da superfície diminui com o aumento da temperatura chegando a quase zero para a fase líquida. 2- a difusão de calor é diminuída durante o tempo de aquecimento e a largura do cordão é menor. Este requisito pode ser obtido por um pulso laser de alta intensidade, o qual deve ter uma largura temporal curta e um diâmetro pequeno. Contudo, intensidade muito alta, aquece o material a uma temperatura muito além da sua temperatura de fusão; a energia do pulso é transformada em energia térmica muito alta para um volume muito pequeno de material. Além disso, o material evaporado absorve o restante do pulso laser, criando um plasma sobre a superfície, o qual consome a energia disponível e diminui a eficiência do processo.

Assim, é preciso encontrar um ponto ótimo onde a temperatura de fusão seja rapidamente obtida, porém sem que haja muita evaporação de material ou formação excessiva de plasma. Além disso, também é desejável que o volume fundido seja distribuído numa geometria onde a razão de aspecto seja grande, ou seja, que tenha pequena largura e grande profundidade.

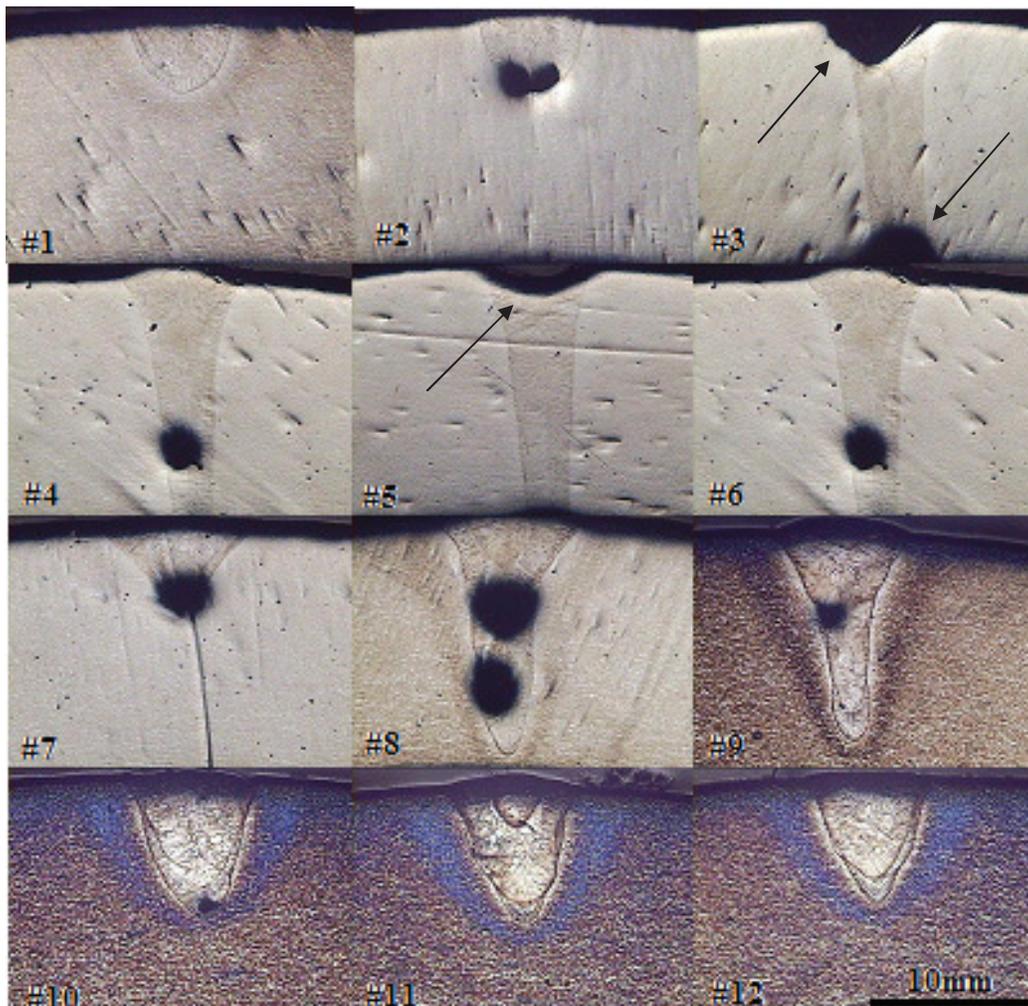


Figura 3. Seção transversal dos cordões de solda, vistos com microscópio óptico com aumento de 12,5 x. As setas indicam perda de material na superfície e na raiz do cordão

Nas figuras 4 e 5 são observadas as microestruturas do aço UNS S32750. Nas figuras 4 (a) e 4 (b) verifica-se a microestrutura do material de base como recebido. A microestrutura é composta de matriz ferrítica e ilhas alongadas de fase austenítica.

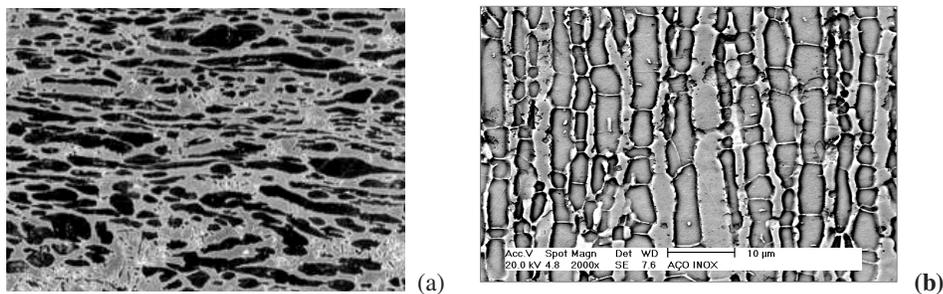


Figura 4. UNS 32750 como recebido (a) Imagem obtida por microscopia óptica com ataque Beraha; a matrix (áreas escuras) é composta de ferrita e as regiões claras são austenita e (b) Imagem obtida por MEV ataque eletroquímico.

Na figura 5 são observadas as microestruturas da ZF obtidas em condições diversas de soldagem. Observa-se próximo da interface com o MB regiões da zona de fusão com grãos alongados na direção de extração de calor e evidências de crescimento epitaxial. Verificam-se regiões com maior tamanho de grão ocasionado pelo calor adicional oriundo da sobreposição dos pulsos. Nas regiões centrais da ZF, a microestrutura apresenta grãos maiores e geometria equiaxial, em relação à interface, isto é, próximo ao MB. Isto deve ter sido ocasionado pelo subsequente aquecimento causado pela sobreposição dos pulsos laser. A matriz da ZF é ferrítica com a presença de ilhas de austenita. Análises efetuadas por analisador de energia dispersiva de raios X, acoplado ao MEV, apontaram para maiores teores de cromo e molibdênio, na ZF favorecendo a estabilização da matriz ferrítica. Verifica-se a presença de uma ZAC de pequena dimensão situada no MB ao lado da ZF.

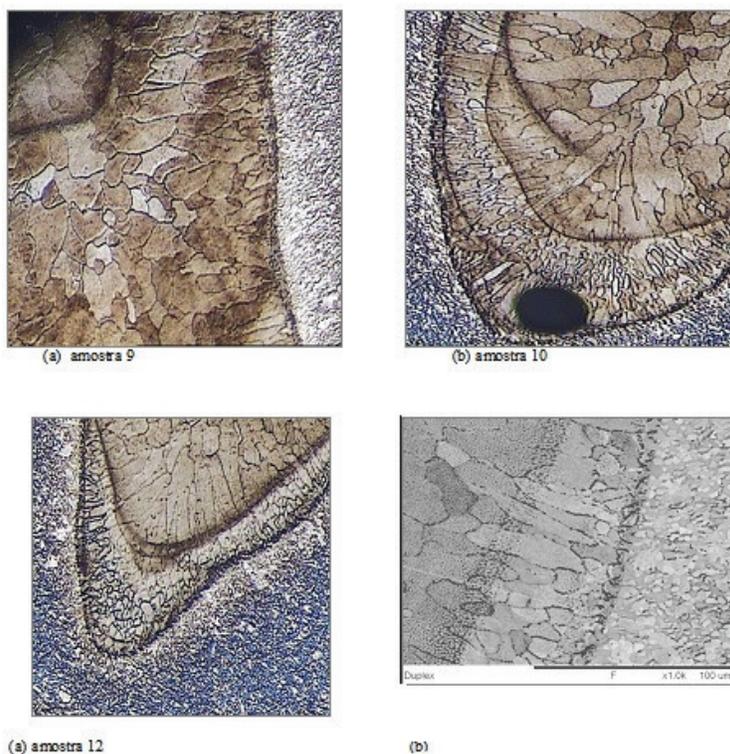


Figura 5. Imagem obtida por microscopia óptica das zonas de fusão, zona afetada pelo calor e metal base para as amostras, #10, #11 e #9 e #12.

Medidas realizadas com o ferritoscopio apontam para valores diferentes de ferrita nas diversas regiões da junta soldada. No metal de base os valores situaram-se em $(33,4 \pm 2,2)$ % de ferrita. Nas regiões do MB próximas da zona de fusão a porcentagem de ferrita estava 10% abaixo do restante do MB.

A **Figura** figura 6 mostra a região onde as medidas de microdureza foram realizadas para a amostra #9. Os resultados para esta amostra e também para os cordões 3 e 7 são mostrados na figura 7.

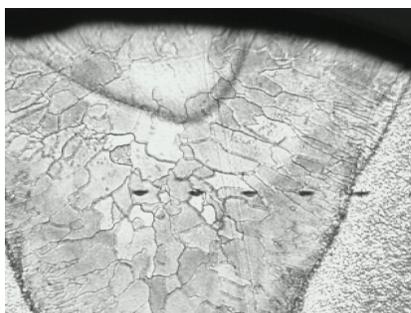


Figura 6. Região onde foram feitas as medidas de microdureza na amostra #9.

Nos gráficos de microdureza observa-se um endurecimento na região da zona de fusão em relação à ZAC e ao MB, em razão da elevada velocidade de resfriamento desta região. Mesmo assim, não foram observadas trincas nas regiões da junta soldada.

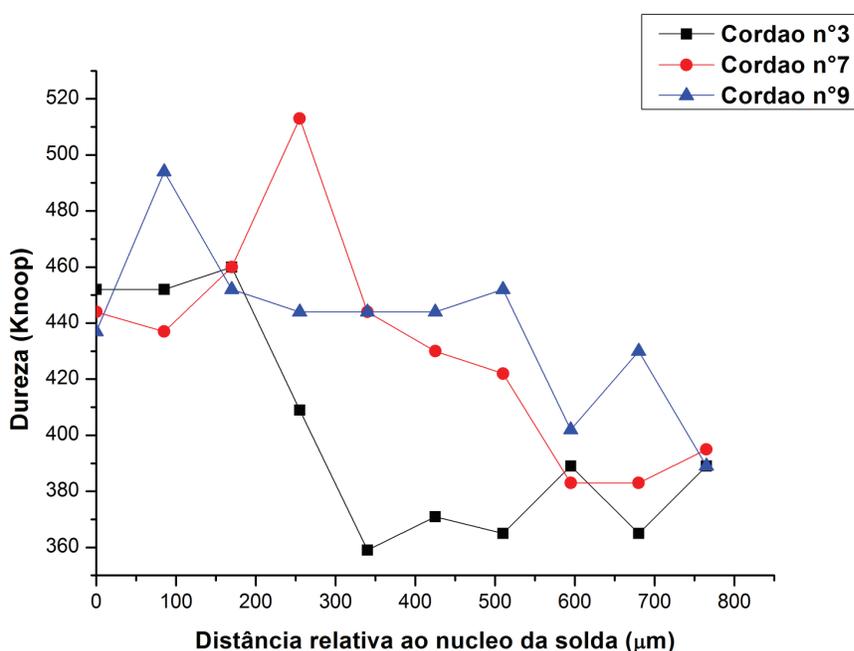


Figura 7. Perfis de microdureza Knoop de três dos doze cordões de solda, desde o centro (posição zero) até o metal base.

Do gráfico de microdureza também observa-se uma tendência de maior dureza na ZF independentemente dos parâmetros de soldagem. Observa-se ainda uma elevada variação destes valores em função da distância, o que pode estar relacionado ao processo de sobreposição do feixe que ocasiona diferentes microestruturas.

4. CONCLUSÕES

Com o uso de laser pulsado de Nd:YAG é possível obter soldas profundas do tipo *key hole* neste aço super duplex. A intensidade do pulso sobre a superfície é um dos parâmetros mais importantes na soldagem a laser, porém, seu valor absoluto não pode ser diretamente relacionado à qualidade da solda. De maneira geral, observou-se uma grande influência da largura temporal e uma menor influência do diâmetro do ponto focal. Pulsos temporalmente mais curtos levam a uma solda mais profunda; para uma mesma largura temporal, as condições com menor diâmetro do ponto focal também proporcionam maior profundidade.

A adequada relação entre largura temporal e o diâmetro do feixe são fundamentais para a obtenção de um bom cordão de solda. Esta relação, entretanto, é muito complicada, pois pode levar à ocorrência de diversos fenômenos não estudados neste trabalho, como a ocorrência de formação de plasma para intensidades muito altas. Este plasma pode absorver energia do laser e transmiti-la para a superfície na forma de calor, aumentando a eficiência de soldagem, ou

pode espalhar e desfocalizar o feixe incidente, diminuindo esta eficiência. O exato fenômeno depende da densidade do plasma, que também depende do gás de proteção, e do comprimento de onda do laser utilizado.

Cordões de solda de alta razão de aspecto, sem perda de material e com mais de 1,6 mm de profundidade podem ser obtidos com energia por pulso relativamente baixa de 6J.

Poros relativamente grandes, mas em pequena quantidade foram observados na raiz da maioria dos cordões. Os dados coletados, contudo, não permitem uma conclusão sobre a sua formação.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com suporte financeiro da FAPESP (projeto 2010/05871-1) e do CNPq (projeto 2009/4732394-2 e PIBIC).

6. REFERÊNCIAS

Senatore, M.; Finito, L.; Perea, E.; “Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L” - Rev. Esc. Minas vol.60 no.1 Ouro Preto Jan./Mar. 2007 pp. 175-181 disponível em ["http://www.scielo.br/pdf/rem/v60n1/v60n1a27.pdf"](http://www.scielo.br/pdf/rem/v60n1/v60n1a27.pdf) <http://www.scielo.br/pdf/rem/v60n1/v60n1a27.pdf> acesso 10/09/2012.

Tedeschi, P.A. L.; Signorelli, R.; Neves, M. D. M.; “Comparação da Junta Soldada pelo Processo GTAW dos Aços Inoxidáveis AISI 316 L e Super-Duplex UNS S32750 para Trocadores de Calor Usados em Refinarias de Petróleo” XXXVI – Congresso Nacional de Soldagem – 2010 - Disponível em <http://www.ipen.br/biblioteca/2010/eventos/15992.pdf>

Hall, D., “The Physics and Technology of Laser Resonators”, Taylor & Francis, New York, 1989.

Johnston Jr, T.F.; “M² concept characterizes beam quality”; Laser Focus World, 1990, pp.173-183.

Neves, M. D. M., Lotto, A., Berretta, J. R., de Rossi, W., Vieira Jr. N. D., “Microstructure development in Nd:YAG laser welding of AISI 304 and Inconel 600”, Welding International, 2010, v. 24, pp. 739-748.

Ventrella, V. A., Berretta, J. R., de Rossi, W., “Micro Welding of Ni-based Alloy Monel 400 Thin Foil by Pulsed Nd:YAG laser”, Physics Procedia, 2011, v. 12, pp. 350 - 357

Ventrella, V. A., Berretta, J. R., de Rossi, W., Pulsed Nd:YAG laser seam welding of AISI 316L stainless steel thin foils, Journal of Materials Processing Technology, 2010, v. 210 pp. 1838-1843.

7. DIREITOS AUTORAIS

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



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO
DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO
7th BRAZILIAN CONGRESS ON MANUFACTURING ENGINEERING
15 a 19 de abril de 2013 – Penedo, Itatiaia – RJ - Brasil
April 15th to 19th, 2013 – Penedo, Itatiaia – RJ – Brazil

PULSED Nd:YAG LASER WELDING OF SUPER DUPLEX STAINLESS STEEL UNS S32750

Wagner de Rossi
Gilberto André da Rocha
Maurício David Martins das Neves

**Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN-CNEN/SP, Av. Prof. Lineu Prestes 2.242, CEP 05508-000
São Paulo, SP**

***Abstract.** The aim of this work was to optimize the welding production for the UNS S 32750 super duplex stainless steel through the laser welding process. To this purpose a pulsed Nd:YAG laser was used with intensity ranging from 1.1 to 9.4 W/cm² through the variation of both, temporal width of the laser pulses and beam diameter in the focal spot. Welded beads with total penetration with low loss of material and almost any porosity were obtained in tubes with wall of 1.6mm of thicknes. Metallographic and microstructure analysis were performed in the melted zone and in the heated affected zone. Measurements of Knoop microhardness were also performed in the weld bead.*

***Keywords:** laser welding, pulsed laser, super duplex steel.*

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.