

Soldagem do Aço Inoxidável Aisi 304 por Laser de Nd:Yag

Maurício David M. das Neves

MSc., pesquisador do IPEN, e-mail: mdneves@net.ipen.br

José Roberto Berretta

MSc., pesquisador do Centro Tecnológico da Marinha; e-mail: berretta@net.ipen.br

Wagner de Rossi - Gesse Eduardo C. Nogueira -

Niklaus Ursus Wetter - Nilson Dias Vieira Júnior

Drs., Pesquisadores Do Ipen - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Comissão Nacional de Energia Nuclear - SP

Resumo

Este trabalho representa a continuação de um programa do IPEN, que visa o domínio da tecnologia de construção e aplicação de lasers de estado sólido. Entre os desenvolvimentos recentes destaca-se a Central de Processamento de Materiais via Laser (CPML), equipamento que consiste na integração e automatização de um laser de Nd:YAG pulsátil, com um CNC de quatro eixos, controlados por microcomputador.

Utilizando-se a CPML, foram realizadas soldagens em chapas de aço inoxidável AISI 304, previamente, encruado. Alguns parâmetros, tais como energia, densidade de potência e tempo de duração do pulso do laser foram alterados para estudar seu efeito na geometria de junta. Analisou-se, por microscopia óptica, a influência destas variáveis na geometria do cordão (profundidade de penetração, variação da área fundida, formação de cratera e presença de porosidade). Realizaram-se levantamentos de perfis de microdureza Vickers para estimativa dimensional da zona afetada pelo calor (ZAC).

Verificou-se que a penetração da solda, a largura do cordão e a zona afetada pelo calor aumentaram com o incremento da densidade de potência e do tempo de duração do feixe.

Valores de densidade de potência situados no intervalo $3.10^9 - 8.10^9$ W/cm² propiciaram juntas com elevada relação penetração/largura do cordão (presença do "key hole") e mínima ZAC.

Abstract

This work takes part of a continuing research program at IPEN that aims to establish the knowledge of construction and applications of solid state lasers. Among the recent developments, a Laser Material Processing Center (CPML) was built; it consists of a four axes CNC milling machine integrated with a Nd:YAG pulses laser, both controlled by a personal computer.

By using the CPML, sheets AISI 304 stainless steel were welded. The geometry of the joint was studied as a function of the laser parameters as energy, power density and pulse duration. The influence of the laser parameters on the joint was them analyzed by optical microscopy. The relevant parameters are: depth penetration, fused volume variation, crater formation and porosity. The Vickers microhardness profile was also studied to estimate the dimensions of the Heat Affected Zone (HAZ).

It was verified that the welding penetration, and width, as well as the HAZ increased with the increase of the power density e pulse duration. In the power density range of 3.10^9 to 8.10^9

W/cm² provided joint, therefore with a high contrast ration depth/width of the joint (keyhole presence) and minimum HAZ.

1. Introdução

A utilização de lasers para soldagem tem crescido nos últimos anos devido à excelente qualidade alcançada pela junta propiciando a execução de soldas precisas, com elevada relação penetração/largura do cordão, mínima zona afetada pelo calor e reduzida distorção do material de base^(1,2). O processo possibilita elevadas taxas de repetibilidade e produtividade, facilitando a automatização das soldagens e reduzindo seus custos, motivando novas aplicações⁽³⁾.

Os lasers mais utilizados em aplicações industriais são de estado sólido ou gasoso, de acordo com seu elemento ativo, respectivamente, neodímio ou gás CO₂. A soldagem com o laser estado sólido pulsado de Nd:YAG (Yttrium Aluminum Garnet) baseia-se na geração e emissão de um pulso de energia concentrada, com alta taxa de repetição por unidade de tempo, propiciando uma solda contínua através da sobreposição dos pontos.

Em soldagens a laser, a geometria do cordão (largura/profundidade de penetração) e a zona afetada pelo calor (ZAC) no material de base (MB) são influenciadas pelas propriedades de interação da radiação laser com o material⁽⁴⁾.

Esta interação depende das propriedades do feixe laser, do material e da atmosfera de proteção⁽⁵⁻⁸⁾. As propriedades do feixe

laser que influenciam nesta interação são: características de energia da radiação laser, densidade de potência, duração da exposição à fonte de calor, distribuição espacial da intensidade do feixe e parâmetros geométricos do feixe. As características relevantes do material são: dimensões (massa) da peça irradiada, quantidade específica de energia absorvida e a taxa em que a energia absorvida é dissipada no material. A atmosfera de proteção é o parâmetro que exerce maior influência na profundidade de penetração e na zona afetada pelo calor.

A densidade de potência é estimada através da relação: energia do feixe dividida pelo produto da largura temporal (duração do pulso) com a área do pulso. Valores menores de densidade de potência propiciam maior eficiência na interação do laser com o MB, em razão de menor perturbação do feixe incidente, devido à pequena presença de plasma. Em soldas com elevada densidade de potência ocorre a vaporização excessiva do MB e formação de plasma⁽⁹⁾, que pode dificultar em parte a absorção de energia pelo MB.

A distribuição temporal do pulso quando retangular garante a densidade de energia, praticamente constante, durante o pulso. O pulso retangular com um pico de potência no seu início facilita a união de ligas de alumínio e cobre que apresentam dificuldade de soldagem, diminuindo o efeito dos

defeitos como as crateras e reduzindo a expulsão de metal líquido durante o pulso. Os formatos com rampas ascendentes ou descendentes são favoráveis em soldas onde se deseja o controle da solidificação e taxa de resfriamento, com objetivo de reduzir as trincas de solidificação, como é o caso dos aços inoxidáveis.

A solda depende da forma do ponto de incidência do feixe laser no material (circular, cilíndrico) e também da distribuição de energia na seção transversal do feixe (gaussiana, multimodo), que influenciam diretamente na relação profundidade/largura do cordão⁽⁸⁾.

Outra característica importante é a utilização de uma sobreposição constante dos pulsos durante o deslocamento, visando soldas com penetração uniforme e sem um número excessivo de pulsos por unidade de comprimento ao longo do cordão.

A potência pico é a relação da energia com a duração do pulso, sendo utilizada para se determinar a densidade de potência, dando subsídios para estimativa do volume de metal fundido durante o pulso laser. A potência média é calculada pelo produto da frequência e a energia de pulso, determinando a velocidade com que a soldagem pode ser executada.

As propriedades termofísicas do MB influenciam na geometria do cordão e nas dimensões da ZAC. Portanto, a temperatura atingida pela superfície do MB altera a

interação feixe/material durante o pulso, principalmente, em razão da variação da refletância. A rugosidade do MB também influencia na refletância, modificando o comportamento feixe/MB.

A literatura indica diversos trabalhos⁽¹⁰⁻¹²⁾ estudando o efeito dos parâmetros de soldagem do laser Nd:YAG nas dimensões da solda e microestrutura dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304. Modificações dos parâmetros de soldagem do laser implicam na alteração da densidade de potência, variando a profundidade de penetração da solda.

Independente da distribuição temporal e formato do pulso observam-se basicamente, três níveis de penetração. Uma penetração pouco profunda, na qual a solda ocorre apenas por condução com densidade de energia inferior a 3GW/m^2 . Valores de densidade de potência entre 3 e 9GW/m^2 , que apresentaram uma penetração profunda, favorecendo a formação do "key-hole". As soldas realizadas com densidade de potência superior a 9GW/m^2 apresentaram excessiva penetração provocando furação e perda de material.

Os aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 quando soldados através de processos convencionais, como o TIG (Tungsten Inert Gas) mostram uma microestrutura "duplex", com matriz austenítica (γ) e ferrita δ residual⁽¹³⁾. Nesta condições, onde a velocidade de resfriamento não é tão elevada,

como no processo laser, a seqüência de solidificação apresentada por estes aços é: $L \rightarrow L + \delta \rightarrow L + \gamma + \delta \rightarrow \gamma + \delta$. A presença de ferrita δ residual, em porcentagens em torno de 5%, na microestrutura destes aços é benéfica, pois dificulta o aparecimento trincas a quente.⁽¹⁴⁻¹⁵⁾

Em processos de soldagem com alta concentração de energia, devido a elevada velocidade de resfriamento, podem ocorrer mudanças na seqüência de solidificação⁽¹⁵⁻¹⁶⁾.

Os resultados de Vitek e Lippold mostram respectivamente, que as soldas realizadas com os processos laser ou feixe de elétrons podem alterar a quantidade de ferrita δ e a morfologia de solidificação basicamente pela modificação da velocidade de soldagem.

Os objetivos deste trabalho são: estudar as influências da densidade de potência e do tempo de duração do pulso do laser Nd:YAG, sobre as dimensões da poça de fusão e da zona afetada pelo calor e também, a influência da velocidade de soldagem na morfologia da zona de fusão (ZF), do aço inoxidável AISI 304

2. Materiais e Métodos

Empregou-se como MB um aço inoxidável austenítico AISI 304, deformado a frio com 25% de redução. Foram preparadas amostras retangulares nas dimensões de 25,0 x 10,0mm e espessura de 2,0 mm. Posteriormente, sua

microdureza foi medida pelo processo Vickers, empregando-se uma carga de 300g. A composição química, em peso, do aço utilizado é apresentada na tabela I.

Foram executadas soldas na superfície do MB empregando-se uma vazão de 10 l/min de argônio, com o bico de proteção gasosa situado a 1,0 mm da superfície do MB.

Variaram-se o tempo de duração do pulso (t) e a velocidade de soldagem. A energia do laser (E) em cada situação foi medida através de um calorímetro. O diâmetro do feixe de incidência no MB permaneceu constante em todas as soldas, utilizando-se o valor de $3,20 \cdot 10^{-4}\text{m}$ (320 μm), o que implicou em área constante do feixe (A). A densidade de potência (W_p) foi calculada pela relação: $W_p = E / (t \cdot A)$ ^(a).

O equipamento utilizado, neste experimento, foi a central de processamento de materiais a laser (CPML) com capacidade de soldagem em duas dimensões, desenvolvido no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN, em São Paulo. A CPML possui capacidade de soldagem em um plano com 700 mm x 300 mm, ou em um eixo de rotação, com possibilidade de interpolação entre quaisquer dois eixos. O laser foi projetado para o processamento de materiais é de Nd:YAG, do tipo pulsado, com energia por pulso de até 10 J, taxa de repetição maior que 300 Hz, potência

Tabela I: Composição química (% peso) do aço AISI 304.

%C	%Mn	%Si	%P	%Mn	%Cr	%Ni	%Fe
0.08	1.71	0.51	0.01	1.67	18.68	9.72	balan.

média de 100 W, potência pico de 3 KW e largura temporal dos pulsos continuamente controlada entre 0,2 e 10 ms.

Após as soldagens, as amostras foram cortadas na seção transversal da solda, preparadas metalograficamente e atacadas eletroquimicamente. Utilizou-se a microscopia ótica para medir as dimensões típicas do cordão e observação microestrutural. Foram levantados em algumas amostras os perfis de microdureza Vickers em função da distância, na superfície e a $4 \cdot 10^{-4}$ m de profundidade, com objetivo de ajudar no dimensionamento da ZAC. As ZF foram fraturadas e observadas por microscopia eletrônica de varredura em um equipamento, marca

Philips - XL30. Mediram-se ainda os maiores diâmetros dos poros provocados pelo aprisionamento de gases, em algumas condições de soldagem.

3. Resultados e Discussão

Os valores da profundidade de penetração e largura do cordão são apresentados em função do tempo de pulso e densidade de potência, conforme observado na tabela II.

Verificou-se uma relação direta entre as características geométricas do cordão (penetração alcançada e largura do cordão) com a densidade de potência e tempo de duração do pulso.

Os valores de penetração e

largura apresentados nesta tabela referem-se às médias, que tiveram um desvio inferior a 10%. Nas figuras 1 a 4 são mostradas as seções transversais do cordão de solda, onde é possível verificar a largura e a profundidade de penetração.

Basicamente, para as condições de soldagem empregadas neste trabalho, observou-se que a penetração ocorreu apenas pelo mecanismo de transferência de energia do tipo "key-hole". Liu⁽¹⁰⁾ considerou que a penetração por "key-hole" ocorre quando a relação penetração da solda/largura do cordão for superior a 0,4.

A interação do feixe/MB provoca no metal uma cavidade profunda, chamada de "key-hole", que apresenta uma coluna de vapor

Tabela II. Parâmetros de soldagem em função da geometria do cordão

Amostra nº	tempo de pulso (t) [s.10 ⁻³]	Energia (E) [J]	Densid.de Potência (W) [GW/m ²]	largura do cordão (l) [m].10 ⁻⁶	Penetração (p) [m].10 ⁻⁶	Relação (p/l)	Volume V [m ³].10 ⁻¹⁰
01	10.0	6,00	7,47	980	1410	1.43	5.32
02	10.0	5,10	6,35	960	1370	1.43	4.96
03	10.0	4,30	5,35	830	940	1.13	2.54
04	10.0	3,40	4,23	740	790	1.07	1.70
05	7.50	4,60	7,49	950	1120	1.20	3.98
06	7.50	3,90	6,47	890	1050	1.18	3.26
07	7.50	3,20	5,35	780	920	1.18	2.20
08	7.50	2,70	4,48	610	620	1.02	0.90
09	5.00	3,00	7,47	800	1110	1.39	2.79
10	5.00	2,60	6,47	730	960	1.31	2.01
11	5.00	2,15	5,35	650	670	1.04	1.11
12	5.00	1,70	4,23	540	430	0.80	0.49
13	2.50	1,50	7,47	620	890	1.44	1.34
14	2.50	1,30	6,47	600	730	1.22	1.08
15	2.50	1,10	5,47	540	590	1.09	0.68
16	2.50	0,86	4,28	470	400	0.85	0.35

metálico envolvido por uma fina camada de metal líquido. A formação do "key-hole" começa pela fusão do metal, seguindo-se uma vaporização rápida do MB, provocando sua expulsão da cavidade, em algumas situações. A vaporização e as forças atuantes originam uma depressão na superfície do cordão de solda, desenvolvendo uma cavidade. A formação desta cavida-

de ocasiona um incremento na absorção aparente, elevando a eficiência energética e possibilitando a retenção do feixe em seu interior, provocando, inicialmente, um rápido aumento nas dimensões do "key-hole".

Observou-se que a penetração da solda é maior quanto mais elevado o tempo de duração do pulso. Segundo a literatura a veloci-

dade de penetração é maior no início do pulso e diminui durante o pulso, devido à perda de energia ou calor. A perda de energia no decorrer do pulso deve-se à diminuição da energia que alcança o fundo do key-hole, reduzindo a absorção e facilitando a desfocalização do feixe pelo vapor metálico^(9,11).

A largura do cordão (diâmetro da solda) aumentou com a den-

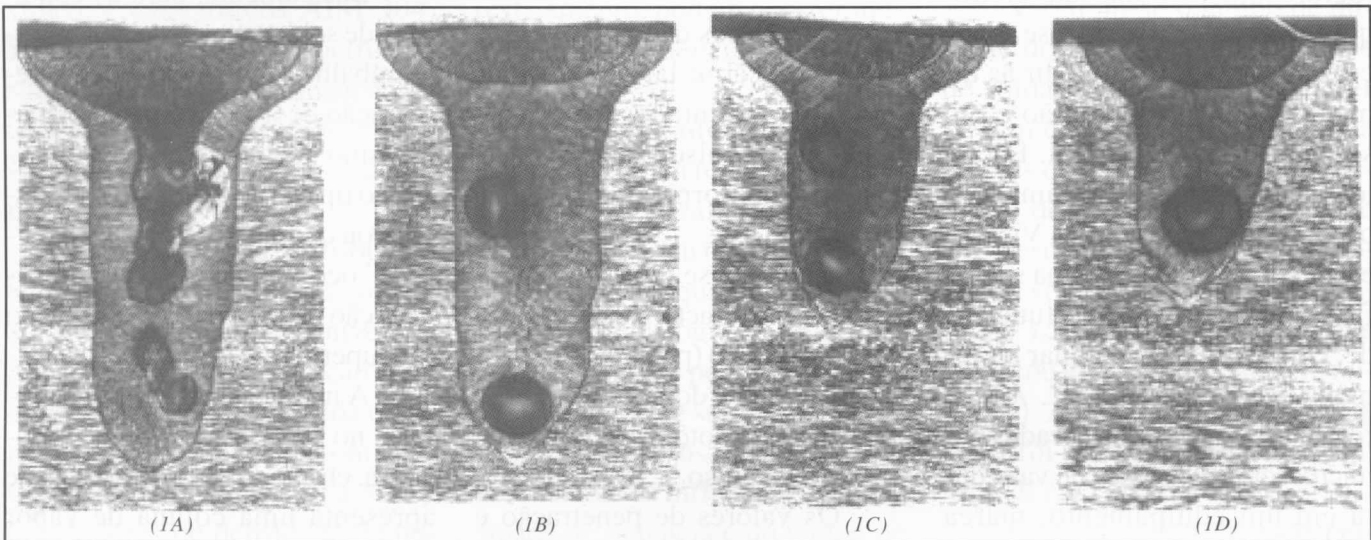


Figura 1: Fotomicrografias óticas da seção transversal da solda para o tempo de pulso de 10,0ms (52X)
1A- Amostra 01, 1B - amostra 02, 1C - amostra 03, 1D - amostra 04

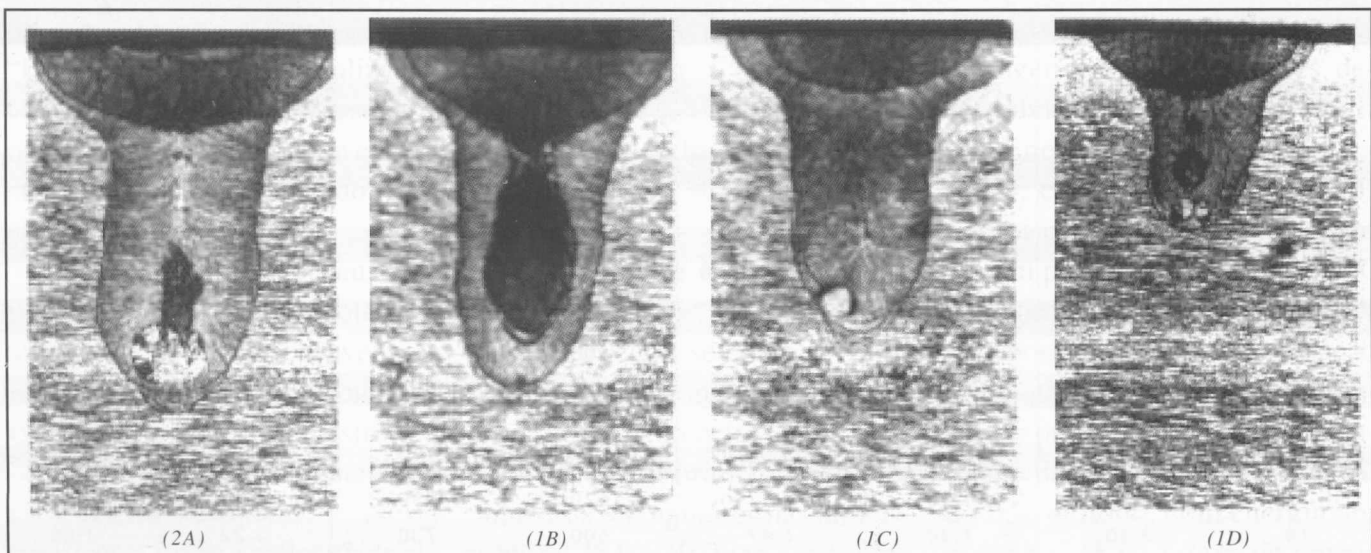


Figura 2: Fotomicrografias óticas da seção transversal da solda para o tempo de pulso de 7,50ms (52X)
2A- Amostra 05, 2B - amostra 06, 2C - amostra 07, 2D - amostra 08

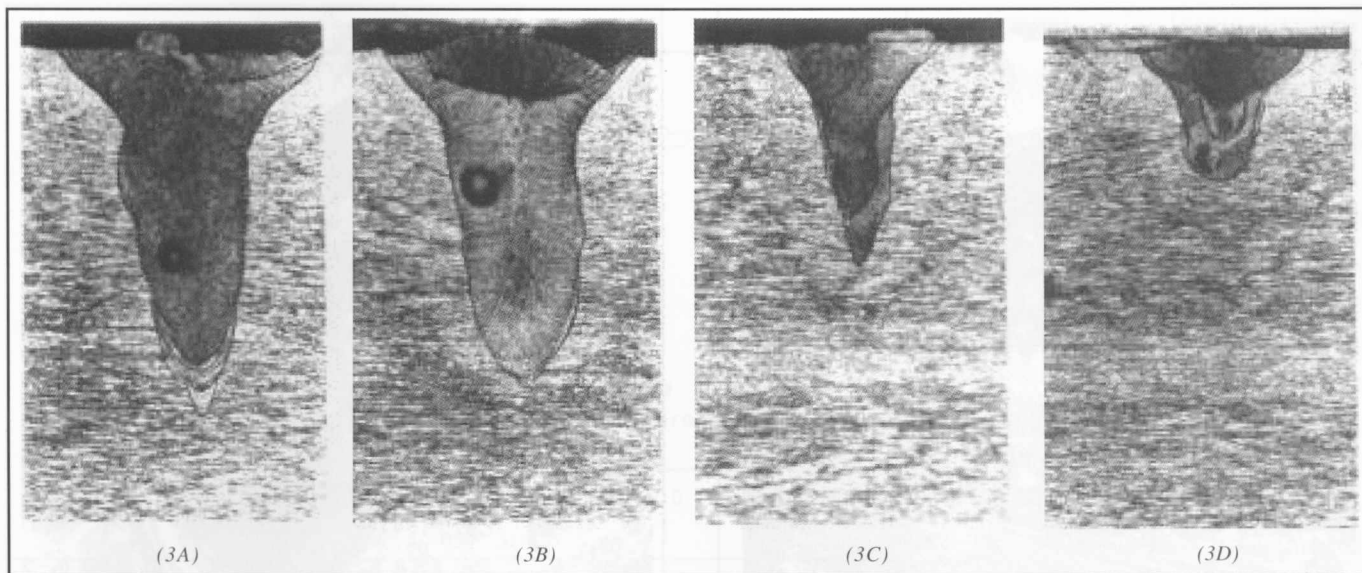


Figura 3: Fotomicrografias óticas da seção transversal da solda para o tempo de pulso de 5,00ms (52X)
3A- Amostra 09, 3B - amostra 10, 3C - amostra 11, 3D - amostra 12

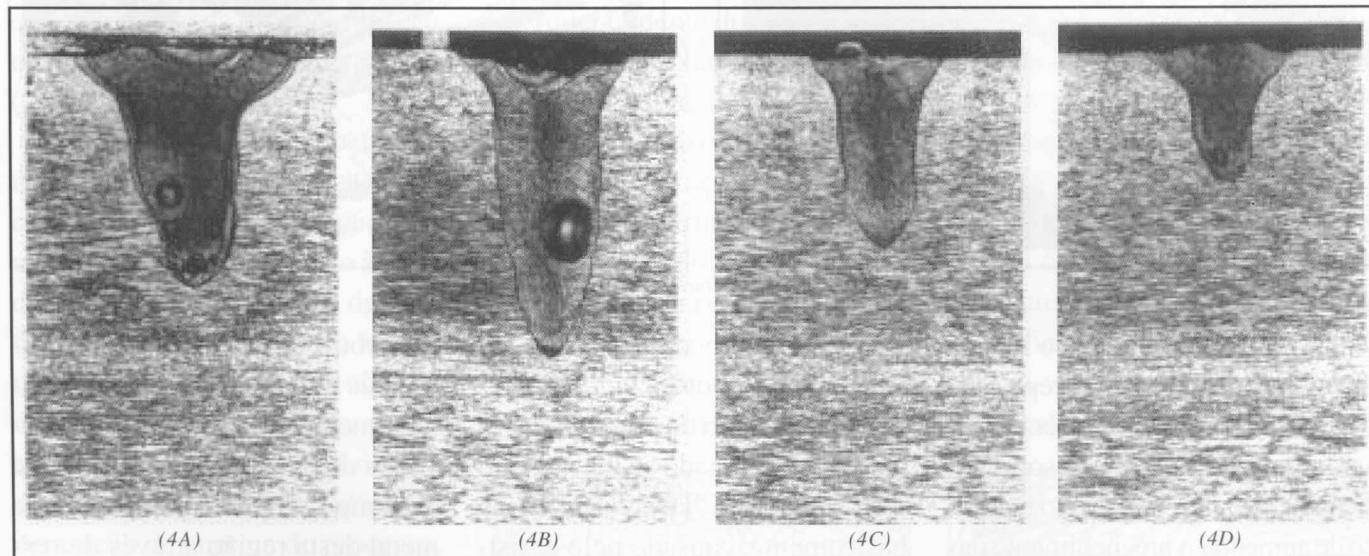


Figura 4: Fotomicrografias óticas da seção transversal da solda para o tempo de pulso de 2,50ms (52X)
4A- Amostra 13, 4B - amostra 14, 4C - amostra 15, 4D - amostra 16

sidade de potência, tempo de pulso e portanto energia, apresentando um valor superior ao diâmetro do feixe utilizado ($3,20 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 320 \mu\text{m}$). No regime de soldagem com a presença de "key hole" a largura do cordão foi sempre superior ao diâmetro do feixe, apesar de se posicionar o ponto focal sobre a superfície ou pouco abaixo da mes-

ma. A maior largura do cordão em relação ao ponto focal deveu-se à elevada quantidade de energia colocada na superfície, num pequeno intervalo de tempo, provocando a fusão em regiões vizinhas ao local de incidência do ponto focal.

O volume de metal fundido no ponto de solda foi estimado pela relação $V = (\pi \cdot l^2 \cdot p) / 8$, onde l

= largura e p = profundidade de penetração. A literatura recomenda assumir uma geometria parabólica para zona de fusão. Verificou-se um maior volume de metal fundido para valores elevados de densidade de potência e tempo de duração do pulso, conforme mostrado na tabela II.

O efeito da densidade de po-

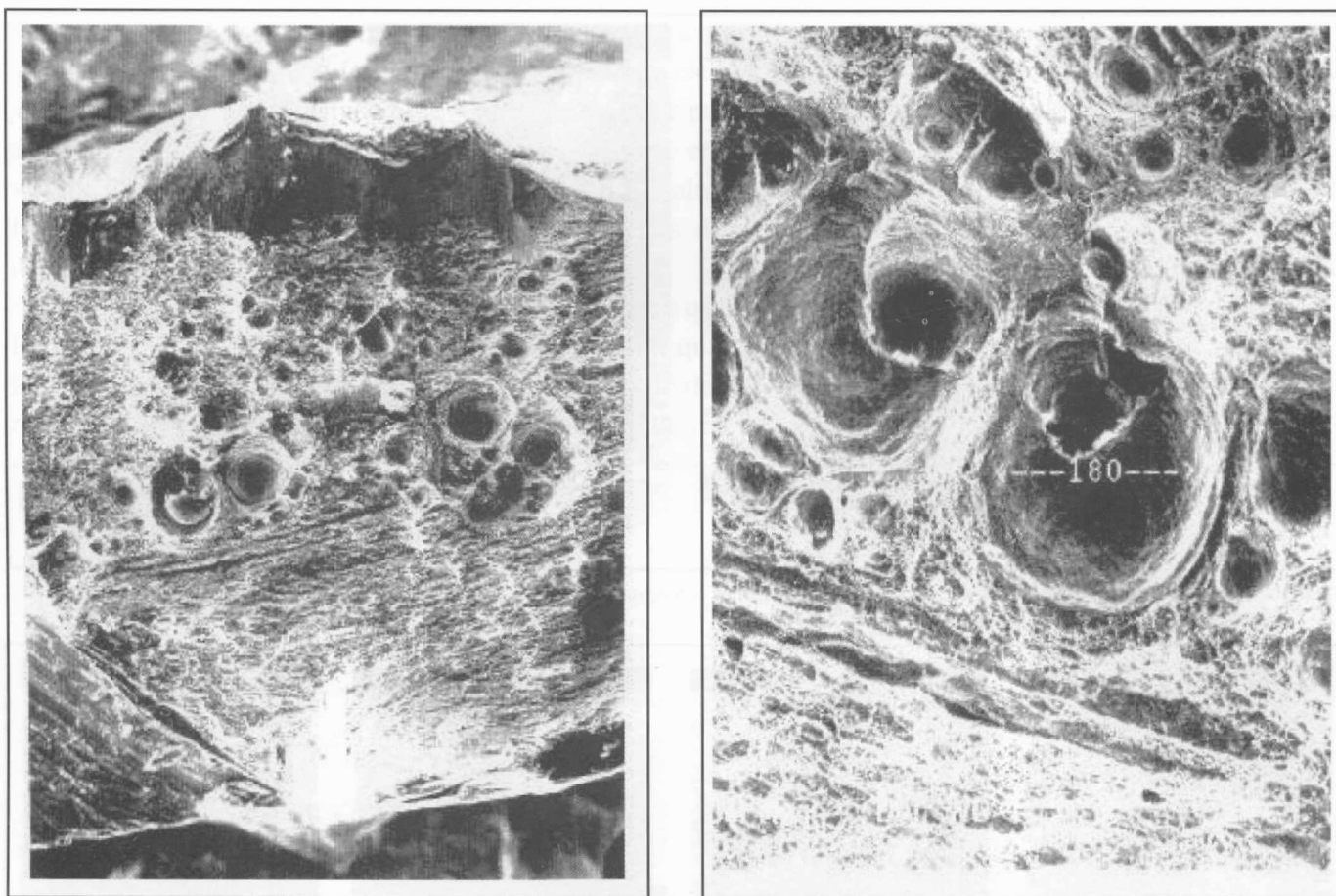


Figura 5: MEV da região de fratura da ZF (5A - 38x) (5B - 120x)

tência e do tempo de pulso nas dimensões da solda com sobreposição foram similares às soldas com pulsos simples, no entanto, a sobreposição de pulsos tem o efeito benéfico de aumentar o preenchimento das descontinuidades de soldagem, pela atuação dos pulsos subsequentes, reduzindo suas dimensões.

As soldas realizadas no intervalo de densidade de potência utilizado neste trabalho apresentaram descontinuidades de soldagem, normalmente, crateras e poros de gases ocluídos, situados geralmente na região central e inferior, vide figuras 1 a 4. A área das crateras e poros mostraram-

se diretamente dependentes da densidade de potência.

A presença de poros de gases ocluídos está ligado ao mecanismo de formação do "key-hole", sendo basicamente, causado pelo aprisionamento do vapor metálico na poça de fusão, durante o colapso do "key-hole". Nas figuras 5a e 5b são observados por MEV os poros da região de fratura da zona de fusão. Os poros apresentaram para maiores densidade de potência e tempo de duração de pulso um diâmetro máximo de 180 μm , conforme verificado na figura 5b.

A observação da superfície do MB após a execução da soldagem

mostrou a formação de gotas individuais fora da área de solda, principalmente para valores mais elevados de densidade de potência e de tempo de pulso. As perdas de metal desta região através de respingos facilitaram a formação do defeito tipo cratera, e segundo a literatura, começam basicamente no início do pulso.

O perfil de microdureza Vickers (HV) em função da distância, conforme observado na figura 6, mostra um comportamento padrão em todas amostras. O metal de base e a zona de fusão (ZF) apresentaram respectivamente, os valores de (390 ± 28) e (214 ± 21) HV.

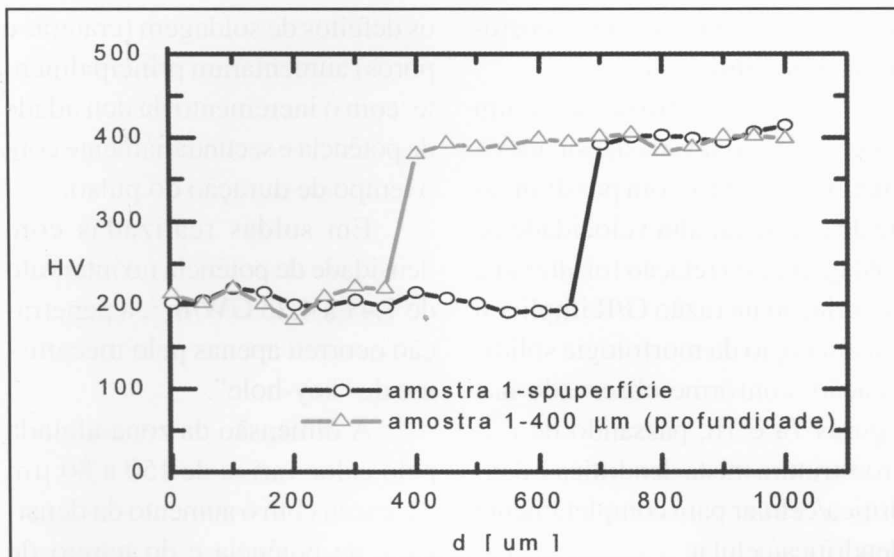


Figura 6: Perfil de microdureza Vickers [Kg/mm²] X distância [μm]

Verificou-se na ZAC uma pequena redução da microdureza em relação a ZF, atingindo o valor de (203 ± 18) HV.

Observou-se que o perfil de microdureza realizado na superfície do MB apresentou maior dimensão da ZAC, em relação às medidas efetuadas a 400μm de profundidade da superfície do MB. A menor dimensão da ZAC a 400 μm de profundidade deveu-se a menor quantidade de calor nesta região, devido principalmente, à alta concentração de energia do processo. A dimensão máxima da ZAC foi inferior a 150μm e mostrou-se proporcional, principalmente, à densidade de potência.

As soldas realizadas nos aços AISI 304 apresentaram uma zona de fusão (ZF) com microestrutura refinada e diferenças de morfologia, quando a velocidade de soldagem foi alterada. Submeteu-se a ZF ao ensaio com balança magnética e não detectou-se a

presença de ferrita δ nestas soldas, independente dos parâmetros de soldagem. Não foram observadas a presença de trincas de solidificação (trincas a quente) comuns a estes aços.

A microestrutura da ZF mostrou uma morfologia de transição de dendrítica para celular/dendrítica, quando foram utilizadas velocidades de soldagem da ordem de 14,4 cm/min, conforme observado

na figura 7a. Na figura 7b observou-se uma microestrutura totalmente, celular/dendrítica, obtida com velocidade de soldagem de 68,4 cm/min.

Segundo Lippold ⁽¹⁶⁾, sob condições normais de solidificação, os aços AISI 304 tem microestrutura dependente da relação Cr_{eq}/Ni_{eq} . No entanto, para elevada velocidade de solidificação Suutala ⁽¹⁷⁾ reconhece que ocorre uma modificação na primeira fase a ser solidificada, passando de ferrita δ para austenita γ, dando origem a microestrutura sem a presença de ferrita δ. Esta modificação microestrutural depende da composição, taxa de crescimento e de um valor crítico para taxa de crescimento (R_c). Quando for utilizada taxa de crescimento com valores superiores a R_c , a austenita é a primeira fase a solidificar-se ⁽¹⁶⁾.

A velocidade ou taxa de resfriamento é estimada através do

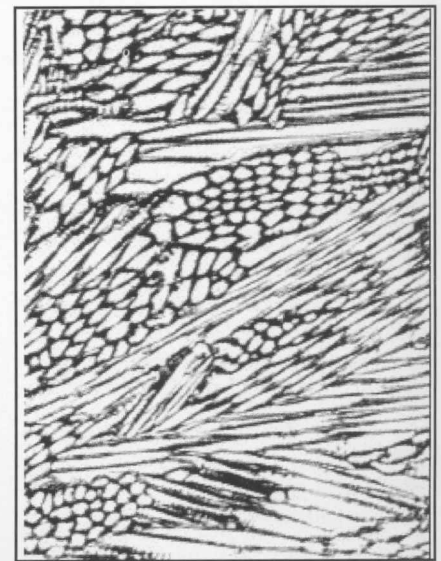
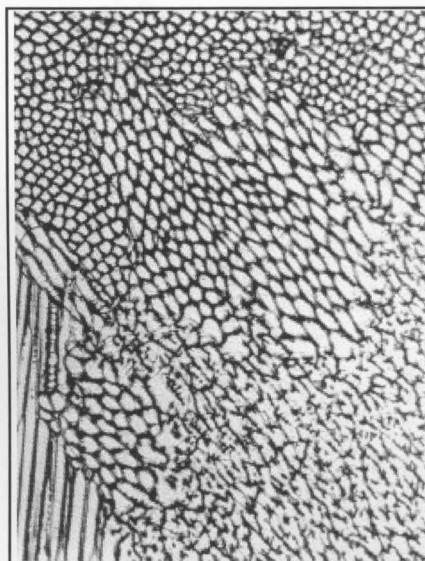


Figura 7: Microscopia óptica da ZF (7A, 14,4 cm/min, 500x; 7B -68,4 cm/min, 500x)

produto gradiente de temperatura (G) pela velocidade de crescimento (R). Este parâmetro é reconhecido como exercendo influência significativa na microestrutura dos aços inoxidáveis, embora a mudança na morfologia de solidificação tenha sido basicamente, função da elevada taxa de crescimento (R), uma vez que o gradiente de temperatura não se altera de forma significativa, para o mesmo nível de potência⁽¹⁴⁾. O aumento na taxa de crescimento (R) ocorreu em razão do aumento da velocidade de soldagem, resultando em um incremento na velocidade da interface sólido/líquido, provavelmente, ultrapassando o valor de R_c .

Outro parâmetro importante é

a relação G/R por definir a morfologia de solidificação.

Em soldas utilizando-se um processo com elevada densidade de energia, portanto, com possibilidade de empregar alta velocidade de soldagem, esta relação foi alterada. A variação na razão G/R implicou em alteração da morfologia solidificação, conforme observado nas figuras 7a e 7b, passando de microestrutura mista dendrítica e dendrítica/celular para completamente dendrítica/celular.

4. Conclusões

As características dimensionais do cordão (profundidade de penetração e largura do cordão) e

os defeitos de soldagem (crateras e poros) aumentaram principalmente, com o incremento da densidade de potência e secundariamente com o tempo de duração do pulso.

Em soldas realizadas com densidade de potência no intervalo de 7,47 a 4,23 GW/m², a penetração ocorreu apenas pelo mecanismo de "key-hole".

A dimensão da zona afetada pelo calor variou de 150 a 80 µm e cresceu com o aumento da densidade de potência e do tempo de duração do pulso.

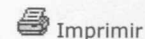
A elevada velocidade de solidificação na soldagem com o laser de Nd-YAG pulsado alterou as características microestruturais previstas pelo diagrama de Schaeffler.

B i b l i o g r a f i a

- 1] **Metals Handbook-Welding, Brazing&Soldering**, ASM, Vol. 6, 9ª Ed. (1983) pp. 647-671
- 2] **Welding Handbook - Welding Processes**, AWS, Vol. 2, 8ª Edition (1991), pp. 713-738
- 3] Sanders, F. I.; Wagoner, R. H.; - **Forming of tailor-welded blanks-Metall. Trans. A**, Vol.27 A, september (1996), pp. 2605-2616
- 4] Mannik, L.; Brown, S. K.; - **A relationship between laser power, penetration, depth and welding speed in the laser welding of steels-Journal of Laser Appl. 2** (1990) pp. 22-25
- 5] **Laser heating of metals** - Prokhorov, A. M.; Konov, V. I.; Ursu I.; Mihăilescu M.; Ed. Adam Hilger, Bristol-Philadelphia and New York, USA, (1990) - ISBN 0-7503-0040-X
- 6] **Laser di Potenza-Applicazioni Meccaniche**, Consiglio Nazionale Delle Ricerche, LongoCastellani M.; e Sona A - Roma - Itália (1991)
- 7] Berreta, J. R.; **Investigação de processo de endurecimento de materiais via laser**, tese MSc., USP - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (1995)
- 8] Kovalenko, V.S.; Verkhoturov, A. D.; Golovko. L. F.; and Podchernyaeva, I. A.; - **Laser Journal Soviet Laser Research**, vol 9, nº 1, january (1988), pp.2-77
- 9] Brown, C. O ; Banas, C. M. ; - **Deep-penetration welding**, AWS Welding Conference, San Francisco, April (1971)
- 10] Liu, J. T.; Weckmam, D.C.; Kerr, H.W.; - **The effects of process variables on pulsed Nd:YAG laser spot welds: Part I AISI 409 stainless steel**, Metall. Trans. B, Vol 24B (1993), pp1065-1076.
- 11] Bransch, H.N.; Weckman, D.C.; Kerr, H.W.; - **Effects of pulse shaping on Nd:YAG spot welds in austenitic SS**, Weld. Journal, June (1994), pp. 141s - 151s
- 12] Liu, J. T.; Weckmam, D.C.; Kerr, H.W.; - **A comparison on the weldability of aluminum and stainless steel using Nd:YAG lasers**. Internat. Trends in Welding Science and Technology, ed. David, S.; Vitek J.M.; ASM International (1993) pp. 757-761
- 13] Neves, M. D.M.; **Soldagem de varetas combustíveis de aço inoxidável para reatores nucleares**, tese MSc., Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP (1987)
- 14] Zacharia, T.; David S. A.; Vitek J.M.; Debroy T.;-**Heat transfer during Nd:YAG pulsed laser welding and its effect on solidification structure of austenitic SS**, Metall. Trans. Vol. 20 A, (1989) pp.957-967
- 15] David S.A.; Vitek J.M.;Hebble T.L.;-**Effect of rapid solidification on SS weld metal microstructures and its implications on the Schaeffler Diagram**, Weld. Journal (1987) pp.289s-300s.
- 16] Lippold J. C. - **Centerline cracking in deep penetration electron beam welds in type 304L Stainless Steel**, Weld. Journal, may (1985), pp. 127s - 136s
- 17] Suutala, N.; **Effect of solidification conditions on the solidification mode in austenitic stainless steels** - Acta Universitatis, Série C, nº 23, Metalurgia nº3 (1982)



FORMULÁRIO DE ENCAMINHAMENTO - PERIÓDICO



Nº PEDIDO PE000465961/2010

IDENTIFICAÇÃO DO PEDIDO

TÍTULO DO PERIÓDICO: SOLDAGEM & INSPEÇÃO

ANO: 1999

VOLUME: 0

FASCÍCULO/MÊS: 0

SUPLEMENTO:

ISSN:

AUTOR DO ARTIGO: ROSSI, WAGNER DE

TÍTULO DO ARTIGO: SOLDAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 POR LASER DE ND:YAG

PÁGINA INICIAL: 0

PÁGINA FINAL: 0

TOTAL DE PÁGINAS: 1

BÔNUS UTILIZADOS: 1

FORMA DE ENVIO: E-MAIL

SITUAÇÃO DO PEDIDO: [] Atendido [] Repassado [] Cancelado

FORMA DO DOC.ORIGINAL:

TOTAL DE PÁG.CONFIRMAÇÃO:

MOTIVO:

OBSERVAÇÃO:

FORMULÁRIO DE ENCAMINHAMENTO - PERIÓDICO

BIBLIOTECA-BASE

NOME: UFMG/EE/BT - BIBLIOTECA

ENDEREÇO: RUA GUAICURUS, 175

CEP: 30111060

CIDADE-UF: BELO HORIZONTE-MG

Nº PEDIDO PE000465961/2010

USUARIO: CPF: 93362161804

NOME: MARIA ENEIDE DE SOUZA ARAUJO

TEL: (11) 38169093

E-MAIL: mearaujo@ipen.br

SOLICITANTE: CÓDIGO ou CPF: 005390-2

NOME: IPEN/BT - BIBLIOTECA TEREZINE ARANTES FERRAZ

TEL: (11) 31339093

E-MAIL: bibl@ipen.br

IDENTIFICAÇÃO DO PEDIDO

TÍTULO DO PERIÓDICO: SOLDAGEM & INSPEÇÃO

ANO: 1999

VOLUME: 0

FASCÍCULO/MÊS: 0

SUPLEMENTO:

ISSN:

AUTOR DO ARTIGO: ROSSI, WAGNER DE

TÍTULO DO ARTIGO: SOLDAGEM DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 POR LASER DE ND:YAG

PÁGINA INICIAL: 0

PÁGINA FINAL: 0

TOTAL DE PÁGINAS: 1

BÔNUS UTILIZADOS: 1

FORMA DE ENVIO: E-MAIL

FORMA DO DOC.ORIGINAL:

TOTAL DE PÁG.CONFIRMAÇÃO:

DESTINATÁRIO

NOME: IPEN/BT - BIBLIOTECA TEREZINE ARANTES FERRAZ

ENDEREÇO: AVENIDA PROFESSOR LINEU PRESTES - 2242

CEP: 05508000

CIDADE-UF: SAO PAULO-SP

TEL: 31339093

E-MAIL: bibl@ipen.br

Recebi o pedido Nº

Data ____/____/____

Assinatura _____

Voltar