

SOLDAGEM A LASER DE AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA MECÂNICA

Milton Sérgio Fernandes de Lima, msflima@gmail.com¹

Sheila Medeiros de Carvalho, sheila_mcarvalho@yahoo.com.br²

Antonio Jorge Abdalla, abdalla@ieav.cta.br¹

Rudimar Riva, riva@ieav.cta.br¹

¹Instituto de Estudos Avançados (IEAv), CP 6055, CEP 12228-970, São José dos Campos, SP

²Escola de Engenharia de Lorena (EEL), Universidade de São Paulo (USP), CP 116, CEP12602-810, Lorena, SP

Resumo: *O desenvolvimento de soldas a laser autógenas de aços de alta-resistência mecânica é apresentado neste trabalho, exemplificado pela apresentação dos resultados para um aço AISI 300M. Verificou-se que o laser a fibra produz penetração total do cordão em potências de 1200 W e velocidades de 50 mm/s. Tanto o cordão quanto a zona afetada termicamente apresentaram durezas da ordem de 660 HV, comparado com cerca de 400 HV do material de base. Para se reduzir a dureza do cordão, um tratamento de revenimento na solda a 400 °C por 2 h foi realizado. Após o tratamento o limite de resistência em tração chegou a 1310 MPa enquanto o alongamento chegou a 5 %. Os resultados mostram que é possível obter soldas com alta qualidade de aços de alta-resistência com uso do laser e tratamentos térmicos subseqüente.*

Palavras-chave: *soldagem a laser, aços de alta-resistência, aços especiais, transformações de fases, metalurgia física.*

1. INTRODUÇÃO

A soldagem a laser (*laser beam welding*) é um processo que utiliza a intensidade luminosa proveniente de um emissor de laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) para fundir a junta entre os materiais sendo unidos. A energia do laser é rapidamente transferida para os elétrons de condução dos metais, que fazem os átomos vibrarem e transmitirem o calor em profundidade. Se a absorvidade da superfície for suficientemente alta para o comprimento de onda do laser, pode haver fusão ou vaporização na região de incidência. Assim, são divididos os dois principais processos de soldagem com lasers: por condução e por penetração. A solda por condução ocorre quando a intensidade luminosa é absorvida numa camada muito pequena na superfície e o calor se propaga conforme a difusividade térmica do material. A solda por penetração, também chamada de solda por *keyhole*, envolve intensidades acima de 10^6 W/cm². Neste nível de intensidade, o laser é suficientemente potente para vaporizar uma quantidade de material no centro do seu diâmetro focal. Uma vez criada uma cavidade, o feixe de laser pode penetrar mais fundo na peça, pois existem reflexões nas paredes do canal, guiando o feixe e aumentando a eficiência do processo. As aplicações de soldagem a laser em grandes estruturas, por exemplo, ferroviárias, aeronáuticas ou navais, sempre usam a soldagem por penetração.

A soldagem a laser já é comumente utilizada para a soldagem de longas estruturas em aço com vários milímetros de espessura. Um laser de CO₂ com 3 kW de potência, o que pode ser considerado uma potência baixa para este tipo de laser, é capaz de soldar chapas de 3 mm de aço carbono a uma velocidade de 1 m/min. Lasers a fibra com 4 kW de potência permitem soldar chapas de até 8 mm de aço nestes mesmos níveis de velocidade. Isso ocorre porque os lasers a fibra tem um comprimento de onda de um décimo daquele do laser de CO₂ e um diâmetro focal bem menor. A soldagem a laser é geralmente executada num passe em apenas um lado da junta sem chanfro, o que confere uma velocidade de produção muito superior aos processos de soldagem convencionais.

Devido a alta taxa de resfriamento, tanto a zona fundida (ZF) quanto a zona termicamente afetada (ZTA) apresentam microestruturas refinadas e fases metaestáveis. No caso dos aços, existe uma tendência à formação de martensita e austenita retida com teores variáveis segundo a taxa de resfriamento, entre 10^3 e 10^6 °C/s, e a composição. De uma forma geral, a zona fundida é composta de dendritas de austenita, parcialmente temperadas, com carbonetos primários finos interdendríticos. Na ZTA se observa uma seqüência de microestruturas a partir da interface com a ZF para dentro do material da seguinte forma: Ao lado da zona fundida, cria-se uma região de grãos austeníticos grosseiros como resultado da alta temperatura e do conseqüente crescimento de grãos. Indo em direção do material de base, aparecem grãos finos austeníticos quando a temperatura está um pouco acima de Ac₃. Em regiões um pouco mais frias, ao redor de Ac₃, se observa grãos parcialmente austenitizados. Finalmente, ao lado do metal não-transformado (de

base), se observa o revenimento. No caso da soldagem a laser, todas essas microestruturas estão muito próximas, uma vez que a ZTA é muito pequena e alguns poucos grãos estão envolvidos.

Os aços de alta-resistência mecânica apresentam uma microestrutura complexa composta de ferrita, bainita, martensita e austenita retida em níveis controlados para balancear a resistência mecânica, tenacidade e ductilidade. Os aços de alta resistência elevam a resistência mecânica por tratamento térmico de têmpera, que promove uma estrutura quase 100% martensítica, seguida de um revenimento para melhorar a ductilidade e a tenacidade. A soldagem desses aços é complicada, pois as altas taxas de resfriamento levam a uma estrutura martensítica dura e frágil, podendo eventualmente apresentar alguma ductilidade após revenimento. No caso dos aços Maraging, ainda podem haver fases intermetálicas devido ao revenido da martensita Fe-Ni. As fases presentes nos aços respondem diferentemente ao aquecimento e resfriamento rápido observado durante a soldagem a laser, mas o resultado depende muito da possibilidade ou não de difusão a longa distância. Isso geralmente não ocorre e o resultado observado é geralmente uma austenita supersaturada em vanádio, molibdênio, silício, titânio, e outros solutos. Durante o resfriamento uma boa parte dos grãos é temperada, principalmente aqueles que estão na ZTA onde o calor é extraído mais rapidamente.

Com a importância dos aços de alta-resistência 4340 e 300M, ou ainda dos aços Maraging, em aplicações de trens de pouso de aeronaves, envelopes motores para foguetes e em algumas partes de veículos lançadores de satélites, surge a necessidade de unir esse aço de forma consistente (Anazawa, 2007). A soldagem a laser pode ser usada para união desses aços, pois permite controle do aporte térmico e reduzida zona afetada pelo calor, com mínimo empenamento.

Na literatura não são verificados muitos relatos sobre a soldagem desses aços, mesmo utilizando técnicas tradicionais, como TIG/MIG ou arco submerso. No entanto, os autores Lee e Su estudaram o efeito do revenimento sobre as propriedades mecânicas de um aço de alta-resistência após a têmpera. Como o principal efeito endurecedor da soldagem a laser desses aços é a têmpera, esse trabalho é pertinente. Esses autores processaram amostras do aço AISI 4340 fornecidas na forma de barra extrudada, austenitizaram a 850 °C por 30 minutos, resfriaram em óleo e fizeram um tratamento térmico posterior de revenimento em temperaturas entre 100 e 600°C, por 2 horas e 48 horas, respectivamente, para cada corpo-de-prova. Esses autores observaram resultados satisfatórios nos ensaios de tração para tratamentos de revenimento a partir de 400°C para ambos os tempos de tratamento. O aço 4340 é similar ao aço 300M e, portanto, esse tipo de tratamento parece ser pertinente aqui.

Neste trabalho, um laser a fibra de 2 kW foi utilizado para produzir soldas com penetração de até 3 mm em aços da classe AISI 300M. O objetivo deste artigo é apresentar os resultados obtidos para a soldagem a laser de um aço de alta-resistência classe 300M e estabelecer procedimentos para obter soldas com boa performance estrutural.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O aço em estudo é da classe AISI 300M normalizado a 900°C por uma hora e resfriado em forno até a temperatura ambiente. A composição química é apresentada na Tab. 1. A solda é feita em chapas planas com 3 mm de espessura, lixadas até papel SiC600.

Tabela 1. Composição química do aço 300M (% peso), (Anazawa, 2007).

C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	V	Cu
0,39	0,0005	0,009	1,78	0,76	0,76	1,69	0,40	0,003	0,08	0,14

O laser a fibra utilizado neste trabalho está instalado no Laboratório Multiusuário de Desenvolvimento e Aplicações de Lasers e Óptica (DedALO), do Instituto de Estudos Avançados (IEAv). Trata-se de um laser de 2 kW de potência média (IPG, Modelo YLR-2000) dotado de uma fibra de saída com 50 µm de diâmetro e 5 metros de extensão. Uma unidade de acoplamento de fibras faz a conexão de uma segunda fibra com 100 µm de diâmetro e 10 metros de comprimento que é utilizada nos processos de soldagem. A fibra secundária é conectada a um colimador óptico formando o sistema de acoplamento do feixe. Um esquema simplificado desta estação de processamento está mostrado na Fig. 1. Os experimentos de soldagem foram realizados em uma mesa de comando numérico computadorizada, controlada por computador e acionada por motores de passo, com velocidade máxima de 160 mm/s e cursos dos eixos X de 430 mm e Y de 508 mm, ambos com resolução de 5 µm. Um eixo Z com curso de 215 mm e resolução de 1 µm foi incorporado à mesa. Este eixo fixa a óptica de focalização e facilita posicionar corretamente o foco do feixe de laser sobre a amostra.

Os parâmetros de soldagem estudados foram a potência e a velocidade de soldagem. O foco do feixe de laser foi mantido constante, com distância focal de 160 mm (distância lente-peça), sobre a superfície do material, o que representa um diâmetro de feixe de 100 µm. Nos ensaios, foi utilizado um bocal de gás circular posicionado manualmente a cerca de 3 mm do diâmetro focal com fluxo de 30 l/min. de argônio. O nitrogênio foi utilizado como gás de proteção da cabeça do dispositivo. Estes procedimentos permitiram definir o intervalo de parâmetros ótimos de processo, associando a qualidade da solda à potência do laser e à velocidade de soldagem.

Para verificar a microestrutura resultante e os defeitos devido ao processo de soldagem, foi utilizado um microscópio óptico Leica modelo *Reichert Polyvar 2*. Para permitir a visualização das diferentes fases existentes no material, os corpos-de-prova foram atacados com o reagente Nital 2% (2ml HNO₃ e 98ml de álcool etílico PA) por 15 segundos, lavadas em água e em álcool etílico e secas com um jato de ar comprimido. As medidas de dureza foram

feitas com um microdurômetro digital (*Microhardness Tester FM700*, da *Future Tech Co.*) com penetrador piramidal de base quadrada e ângulo entre faces de 136° , do tipo Vickers. O forno utilizado para os tratamentos térmicos é elétrico da marca Fornitec. Todos os tratamentos térmicos foram realizados depois que o forno estabilizou a sua temperatura por, pelo menos, 6 horas.

O equipamento utilizado para os ensaios mecânicos foi uma máquina de tração MTS 810 M, com célula de carga com capacidade de 250 kN. A velocidade do deslocamento do cabeçote foi de 1,0 mm/min. Para cada condição de soldagem analisada foram ensaiados 3 CDPs em tração. Nos ensaios de tração foram avaliados os seguintes parâmetros (Dieter, 1988): Limite de escoamento: foi considerada a tensão que produz uma deformação permanente de 0,2%; Tensão máxima: é calculada pelo carregamento aplicado no instante da ruptura do CDP dividido pela área final da seção transversal do corpo de prova; Alongamento: calculado pela variação percentual no comprimento da região útil do corpo de prova, antes e após o rompimento; Estricção: calculado pela diferença entre a área inicial e a final (após a ruptura) da seção transversal do CDP, dividido pela área inicial. Nos ensaios mecânicos, a norma aplicável é a ASTM E8M-95a (ASTM, 2009).

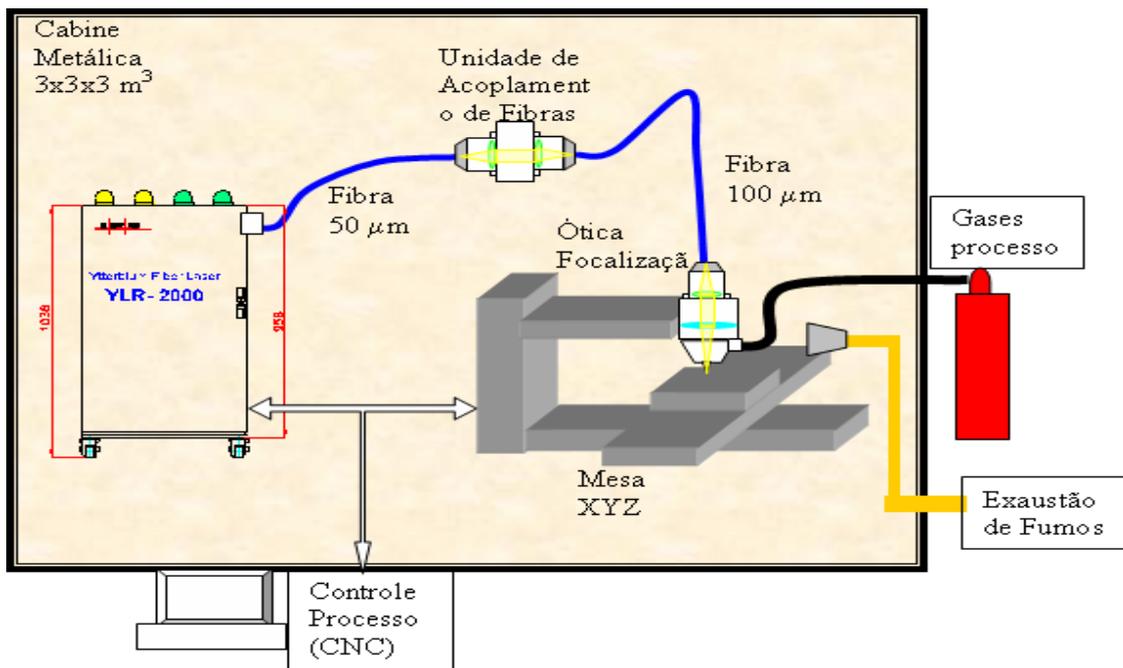


Figura 1. Diagrama da estação de processamento de materiais com laser a fibra.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de se obter soldas de boa qualidade, como primeiro passo nesse trabalho foram soldados dois corpos-de-prova (CDPs) retangulares de $30 \times 10 \times 3 \text{ mm}^3$. O primeiro CDP foi submetido a 7 passes de soldagem em regiões distintas da amostra a uma velocidade constante de 50 mm/s e a potência variando de 300 a 1300 W. Esta velocidade foi escolhida arbitrariamente, segundo ensaios livres preliminares. O segundo CDP foi submetido a 10 passes de soldagem em regiões distintas da amostra, com potência constante de 800 W, escolhida por estar no meio das potências testadas no primeiro CDP, e a velocidade de soldagem foi variada de 5 a 150 mm/s. A Fig. 2 apresenta os resultados das medidas da penetração da solda em função da potência e da velocidade. Na Fig. 2 verifica-se que a potência e a velocidade do laser influenciam decisivamente na penetração da raiz de solda, verificando-se uma correlação linear entre a profundidade da raiz e a potência do laser para uma velocidade fixa de 50mm/s. Por outro lado, observa-se uma correlação logarítmica entre a profundidade de raiz e a velocidade de soldagem para uma potência fixa de 800 W.

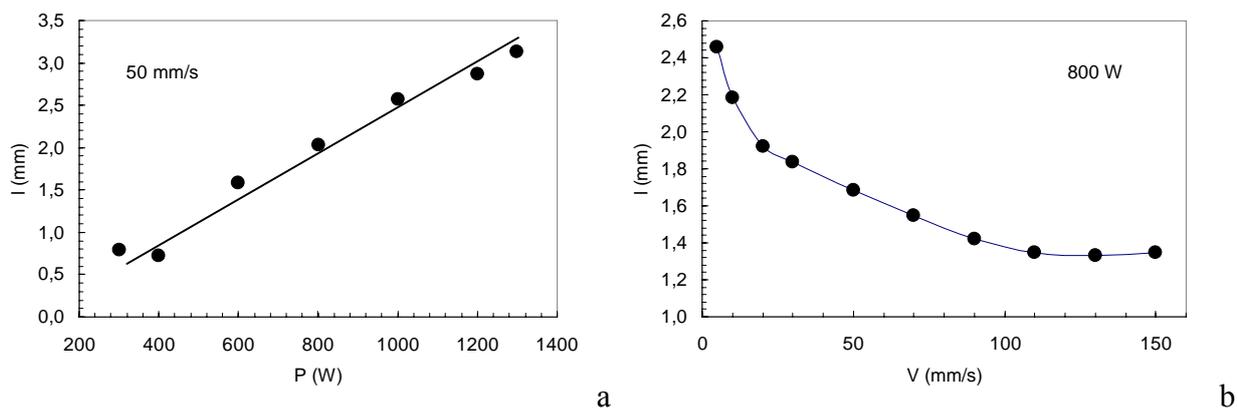


Figura 2. (a) influência da potência (P) na penetração (I) para uma velocidade de soldagem constante de 50 mm/s; (b) influência da velocidade (V) na penetração (I) para uma potência de laser constante de 800 W.

A Fig. 3a apresenta uma micrografia obtida pelo corte transversal de uma solda na condição $V=50$ mm/s e $P=1200$ W. A zona fundida (ZF), zona termicamente afetada (ZTA) e material de base são marcados na Fig. 3a. A ZF se estende desde o topo atingindo a espessura da chapa na sua raiz, apresentando uma morfologia típica de soldagem por *keyhole*. A largura do cordão é variável, mantendo-se em aproximadamente 0,4 mm na profundidade do *keyhole*. A extensão máxima da ZTA também está em torno de 0,4 mm. Na Fig. 3b a região do topo da solda é mais visível, mostrando as dendritas se desenvolvendo a partir das bordas em direção ao centro. As dendritas com espaçamento secundário médio de 2 μm são decoradas por placas de martensita (listas cinzas) e a região interdendrítica é preenchida por carbonetos, conforme mostrado na Fig. 3c. A ZTA se mostra relativamente clara e composta por grãos de austenita temperados. No material de base, as regiões mais escuras (cinza e preto) são constituídas de martensita, bainita e carbonetos, as regiões mais claras mostram porções de ferrita e austenita retida (Anazawa, 2008). A interface entre o material de base e o ZTA, Fig. 3d, mostra uma solubilização gradativa das fases da região escura para formar uma austenita supersaturada. Os valores de dureza são altos tanto na ZF quanto na ZTA, Figs. 3c e 3d, estando em torno de 670 HV, comparando-se com o material de base que possui 433 HV. As características microestruturais e durezas observadas na amostra estudada na Fig. 3 são similares às outras amostras verificadas quando se variou a velocidade de soldagem e a potência do laser (Fig. 2), apenas diferindo as dimensões da ZF e ZTA.

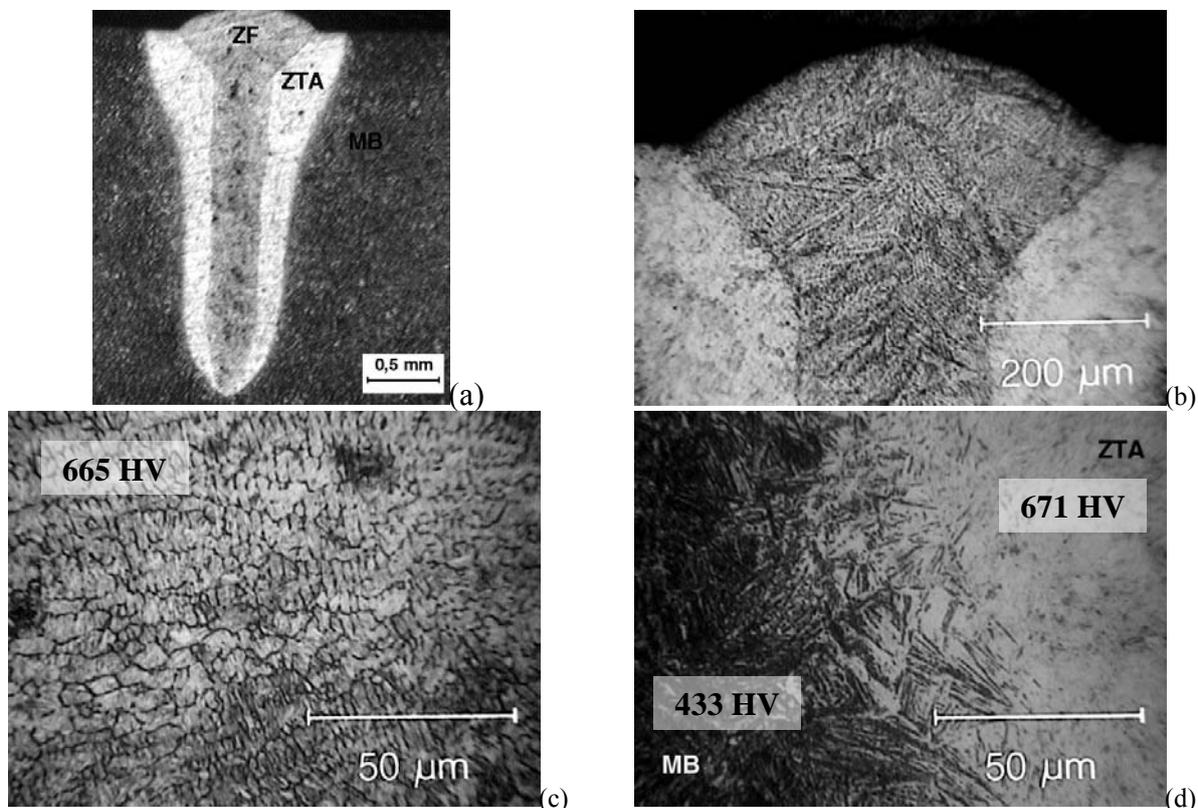


Figura 3. Análise da solda na condição $V=50$ mm/s e $P=1200$ W: a) Visão geral das regiões da solda; b) detalhe do topo da zona fundida; c) Estrutura dendrítica e dureza média da ZF e d) zona de interface entre ZTA e MB com durezas associadas.

Fica evidente pelas análises que o cordão de solda possui dureza acima do esperado e, portanto o cordão apresenta uma baixa tenacidade. A fim de se contornar esse problema foi feito um tratamento térmico de revenimento em forno na temperatura de 400 °C por duas horas, conforme recomendado por Lee e Su (1997). O tratamento permitiu diminuir a dureza da ZF e ZTA, atingindo 497 HV e 512 HV, respectivamente. A microestrutura evoluiu para um mistura de placas de ferrita e carbonetos na ZTA, enquanto na ZF o resíduo interdendrítico fica mais marcado, conforme apresentado na Fig. 4. Como a ZF apresenta uma estrutura bruta de fusão refinada o carboneto cresce no espaço interdendrítico, deixando as dendritas originalmente austeníticas mais ferríticas.

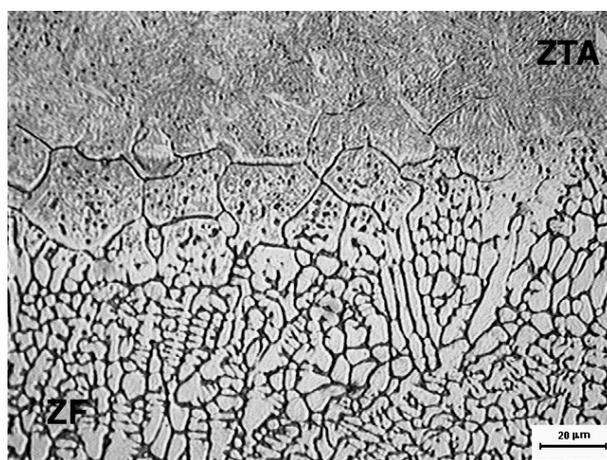


Figura 4. Aspecto da superfície da amostra revenida entre a zona termicamente afetada e a zona fundida.

Foi comparado o efeito da soldagem e do tratamento térmico no comportamento das placas em ensaios de tração em três condições: A) ensaios em chapas inteiriças, sem soldagem; B) ensaios em chapas soldadas e C) ensaios em chapas soldadas e revenidas. Os resultados são apresentados na Tab. 2. A condição de soldagem a laser é sempre com velocidade de 50 mm/s e potência do laser de 1200W.

Tabela 2. Resultados dos ensaios de tração nos CDPs

CDP	Limite de escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Alongamento (%)	Estricção (%)
A - inteiriço	925±67	1611±132	12,0±0,3	18±7,9
B - soldado	-	591±87	0,9±0,7	-
C - soldado e revenido	1150±10	1295±20	4,7±2,0	5,9±5,0

As propriedades mecânicas do CDP A, na condição como normalizado, sem solda e sem revenimento, atingiu altos valores de limite de escoamento, tensão de ruptura, alongamento e estricção. Esta é a condição do material como recebido, e equivale à condição “ideal” para as propriedades mecânicas visadas.

Para o CDP na condição somente soldada B, os valores de tensão de ruptura e de alongamento chegaram somente a 33 e 8%, respectivamente, dos valores obtidos para o CDP inteiriço A. O material é tão frágil que não foi possível medir o limite de escoamento e a estricção. Trata-se de uma condição na qual a alta dureza do cordão confere um conjunto de propriedades mecânicas inapropriadas para uso em estruturas soldadas.

O CDP C submetido ao tratamento térmico de revenimento após a soldagem apresentou uma melhoria nas propriedades em tração em relação a condição como soldada B, embora logicamente inferior a condição inteiriça. O limite de escoamento aumentou no CDP C em relação ao inteiriço, provavelmente devido a mudança no módulo de elasticidade. As outras propriedades, tensão máxima, alongamento e estricção foram reduzidas em relação ao material inteiriço, mas mostram que existe a possibilidade de uso em aplicações de engenharia.

Esses resultados permitem antever que as soldas a laser produzidas de outros aços de alta-resistência, como 4340 e Maraging, podem ser realizadas e, com o devido tratamento de revenimento, são passíveis de aplicações de engenharia.

4. CONCLUSÕES

Foram realizadas com sucesso soldas a laser em chapas de aço AISI 300M. Verificou-se que o laser a fibra produz penetração total do cordão em potências de 1200 W e velocidades de 50 mm/s. Tanto o cordão quanto a zona afetada termicamente apresentaram durezas da ordem de 660 HV, comparado com cerca de 400 HV do material de base. Para se reduzir a dureza do cordão, um tratamento de revenimento na solda a 400 °C por 2 h foi realizado. Após o tratamento

a tensão máxima em tração chegou a 1300 MPa enquanto o alongamento chegou a 5 %. Os resultados mostram que é possível obter soldas com alta qualidade de aços de alta-resistência com uso do laser e tratamentos térmicos subsequente.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio técnico em microscopia da Divisão de Materiais do Instituto de Aeronáutica e Espaço (AMR/IAE) e à Escola de Engenharia de Lorena (EEL/USP) pelo apoio em ensaios de materiais.

6. REFERÊNCIAS

- Anazawa, R. M., 2007, “Caracterização mecânica e microestrutural de um aço 300M com microestrutura multifásica”. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá,.
- Anazawa, R.M., Abdalla, A.J., Hashimoto, T.M., Pereira, M.S., Carrer, G.R., Elisei, C.C.A., Baptista, C.A.R.P., 2008, “Aumento do limite de escoamento de um aço multifásico devido ao envelhecimento por deformação e efeito TRIP”. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, Vol. 27, No. 1, pp. 19-23,.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, 2009, ASTM E8 / E8M - 08 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. Disponível em: <<http://www.astm.org/Standards/E8.htm>>. Acesso em: 01/04/2009.
- Dieter, G.E., 1988, “Mechanical Metallurgy”, Metric Edition, New York: McGraw Hill, 751 p.
- Lee, W.-S., Su, T-T., 1997, “Mechanical properties and microstructural features of AISI 4340 high-strength alloy steel under quenched and tempered conditions”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 87, pp. 198-206.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

LASER BEAM WELDING OF HIGH-STRENGTH STEELS

Milton Sérgio Fernandes de Lima, msflima@gmail.com¹

Sheila Medeiros de Carvalho, sheila_mcarvalho@yahoo.com.br²

Antonio Jorge Abdalla, abdalla@ieav.cta.br¹

Rudimar Riva, riva@ieav.cta.br¹

¹Instituto de Estudos Avançados (IEAv), CP 6055, CEP 12228-970, São José dos Campos, SP

²Escola de Engenharia de Lorena (EEL), Universidade de São Paulo (USP), CP 116, CEP12602-810, Lorena, SP

Abstract: *The development of autogenous laser welds of high mechanical strength steels is presented in this paper, exemplifying by presenting the results for the AISI 300M steel. It was verified that the fiber laser produced full weld penetration at power of 1200 W and speeds of 50 mm/s. Both the weldment and the heat-affected zone presented hardnesses of about 660 HV, compared to about 400 HV of the base metal. In order to reduce the weld hardness, tempering at 400 °C for 2 hours was realized. After the treatment the ultimate tensile strength reached 1310 MPa and the elongation attained 5 %. The results shown that high quality welds of high-strength steels were possible using the laser and subsequent heat treatments.*

Keywords: *laser beam welding, high-strength steels, special steels, phase transformations, physical metallurgy.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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