

# DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ÓTIMOS NA MICROSSOLDAGEM DE CHAPAS FINAS UTILIZANDO UM LASER DE Cu-HBr

**Código do Trabalho: 021017194**

***Resumo.** Este trabalho teve como objetivo investigar a viabilidade de um novo método de microsoldagem de chapas finas utilizando um laser de Cu-HBr que emite pulsos intensos com duração de nanosegundos em alta taxa de repetição. Nos métodos tradicionais, a microsoldagem de chapas finas é realizada com laser contínuos ou com pulsos de baixa intensidade e de longa duração ( $> 1\text{ms}$ ) que permitem um comprimento de difusão térmica da ordem da espessura das chapas. Lasers com pulsos curtos (10 a 100 ns) são utilizados preferencialmente em processos de corte e furação de materiais. Um amplo estudo experimental do processo de micro-soldagem com pulsos curtos foi realizado utilizando chapas de aço inoxidável (AISI 304) com espessuras entre 25  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ . Os resultados deste estudo indicaram que é possível controlar o intervalo de parâmetros do processo para se obter um cordão de solda com alta razão de aspecto e reduzida zona afetada termicamente. Foi desenvolvido um modelo teórico para explicar a interação de pulsos curtos emitidos com alta taxa de repetição no processo de soldagem. Os resultados deste modelo indicaram que embora a intensidade do laser de Cu-HBr seja suficiente para perfurar as chapas de aço, é possível controlar a geometria do furo de forma a que o material vaporizado fique aprisionado e condense nas paredes internas da cavidade perfurada. Nestas condições experimentais controladas as chapas finas de aço foram soldadas com potências médias de laser entre 10 e 20 W, muito inferiores aos valores utilizados pelos métodos tradicionais.*

***Palavras-chave:** microsoldagem, laser pulsado, aço inoxidável 304*

## 1. INTRODUÇÃO

O primeiro laser ingressou na vida científica em 1960 e desde então, várias pesquisas para sua aplicação vêm sendo realizadas<sup>(1)</sup>. Com a verificação da capacidade do laser em fundir e vaporizar pequenas quantias de metais deu-se início às investigações das aplicações do laser em solda, corte e furação. A solda a laser, entretanto, passou a ser considerada economicamente competitiva com outros métodos de soldagem somente com o desenvolvimento dos lasers de CO<sub>2</sub> e de Nd:YAG<sup>(2)</sup>.

Hoje em dia, o uso de um feixe de laser como ferramenta está entre os métodos de processamento de materiais mais avançados e modernos, ocupando uma posição de destaque na indústria<sup>(3)</sup>.

No campo de microsoldagem, os lasers pulsados assumem um papel importante por possuir algumas características como: controle dimensional no processamento e alta concentração de energia em uma área muito pequena do material, resultando na habilidade de soldar componentes sensíveis ao calor. Assim, a micro-fabricação de componentes finos é possível e novas técnicas de junção a laser têm sido desenvolvidas em várias áreas, incluindo componentes elétricos e eletrônicos, dispositivos médicos, peças de relógio etc.<sup>(4,5,6,7)</sup>.

Entretanto, a motivação principal deste trabalho surgiu dos resultados positivos na junção de chapas finas de aço, utilizando o laser de Cu-HBr<sup>(8,9)</sup>. Partindo-se destes resultados, chega-se ao objetivo deste trabalho que é investigar a viabilidade de realizar microssoldas em chapas de aço inoxidável 304 utilizando um laser de pulsos curtos com alta taxa de repetição.

Esta investigação, nas condições em que foi realizada tem caráter inédito. Isso porque, em geral, os lasers utilizados para efetuar soldas em materiais com espessura entre 10 e 100  $\mu\text{m}$  são do tipo pulsado, com pulsos longos e energias de pulso de radiação elevada (0.1 a 1 J). Na literatura encontram-se estudos sobre microssoldas realizadas em chapas com estas espessuras utilizando lasers contínuos ou de pulsos longos (0,1 a 20 ms)<sup>(5,7,10,11,12)</sup>. Lasers com pulsos curtos (10 a 100 ns) não são utilizados devido ao pequeno comprimento de difusão térmica, limitado pelo tempo do pulso de laser a menos de 1  $\mu\text{m}$ . Por isso, o laser de Cu-HBr possui características – dentre elas, alta intensidade do feixe (na ordem de  $\text{GW}/\text{cm}^2$ ) - que viabiliza sua utilização no processo de corte e/ou perfuração<sup>(13)</sup>. Também na literatura, encontramos vários estudos sobre micro-perfuração e micro-ablação de materiais, utilizando este laser ou outros de características semelhantes<sup>(14,15,16,17,18)</sup>.

## 2. FORMAÇÃO DA CAVIDADE EM UMA AMOSTRA IRRADIADA POR UM FEIXE DE LASER PULSADO

No processo de condução de calor a vaporização da superfície é indesejável para as aplicações de soldagem a laser. Quando utilizamos lasers com altos valores de intensidade ( $> 10^6 \text{ W}/\text{cm}^2$ ) na interação com a matéria, o processo físico dominante é a vaporização e o papel da fusão do material tende a ser menos significativo, fazendo com que as aplicações dominantes estejam ligadas à remoção de material, como: perfuração e corte.

Assim, na interação da matéria com feixes de alta intensidade, a maior parte da energia incidente é consumida no processo de vaporização do material. Além disso, no caso da utilização de um laser de pulsos curtos com alta taxa de repetição, o tempo de exposição da amostra à radiação laser vai depender da quantidade de pulsos aplicados sobre a superfície do material. Dessa forma, a energia absorvida pela amostra gera três situações distintas. A Figura 1 mostra um desenho esquemático dessas situações. (a) Uma pequena quantidade de pulsos de laser é aplicada sobre a superfície do material. Nesta situação, a profundidade de penetração na amostra é pequena e o vapor gerado durante a interação é perdido para o meio. (b) Uma maior quantidade de pulsos de laser é aplicada sobre a superfície da amostra, gerando um orifício de geometria côncava. Neste caso, podemos dizer hipoteticamente que o vapor gerado, em cada pulso aplicado, se condensa na superfície interna do orifício, redistribuindo a energia do feixe de laser em toda a extensão da cavidade durante o tempo entre pulsos. (c) Uma quantidade muito grande de pulsos de laser é aplicada sobre a amostra, criando uma cavidade profunda no material. Aqui, o vapor gerado pela ação do laser é transmitido através desse furo e a energia depositada na cavidade torna-se menor.

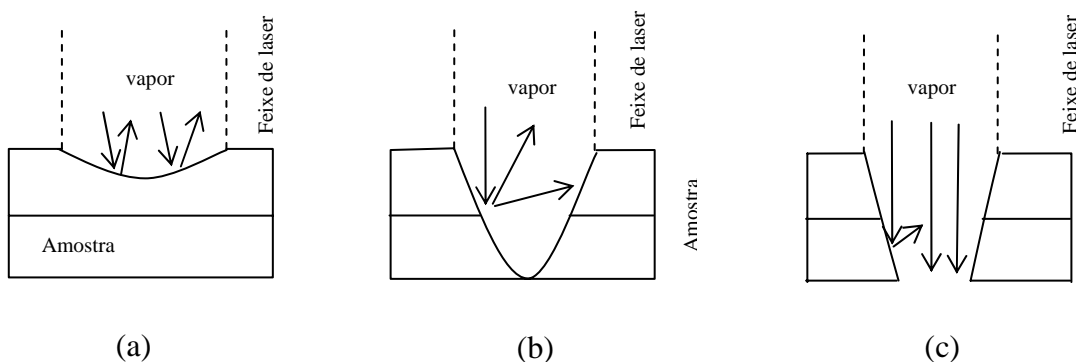


Figura 1. Desenho esquemático das situações geradas na amostra durante a absorção da energia do feixe de laser. (a) pequena quantidade de pulsos aplicados, (b) maior quantidade de pulsos aplicados e (c) quantidade muito grande de pulsos aplicados.

Considerando as situações descritas, existe então, uma fração de energia do laser acoplada no material que depende diretamente da geometria da cavidade. Esta fração pode ser considerada desprezível ( $fr=0$ ), se a profundidade de penetração da cavidade formada no material for pequena; e máxima ( $fr=1$ ), quando a profundidade de penetração na amostra cresce.

Isso nos leva a uma outra hipótese que a redistribuição da energia do feixe de laser ocorre em toda a profundidade da amostra, similar à ocorrida no processo de soldagem conhecido como *keyhole* feita por lasers contínuos (cw) ou de pulsos longos. Entretanto, note que em nossos estudos, a profundidade de penetração na amostra foi obtida utilizando um feixe de laser com potência média baixa, variando de 10 a 20 W. O mesmo não ocorre na utilização de um laser cw, por exemplo, onde a potência requerida é até 100 vezes maior.

Assim, para descrever o processo de redeposição de material na interação com um laser de pulsos curtos de alta taxa de repetição, podemos utilizar o modelo (desenvolvido por Rosenthal [19]) da teoria de *keyhole*, assumindo que uma fração de energia ( $fr$ ) do laser incidente é absorvida em uma chapa semi-infinita ao longo de uma linha (no modelo original de Rosenthal,  $fr$  é simplesmente a emissividade do material). A geometria desse modelo é esquematizada na Figura 2<sup>(3)</sup>.

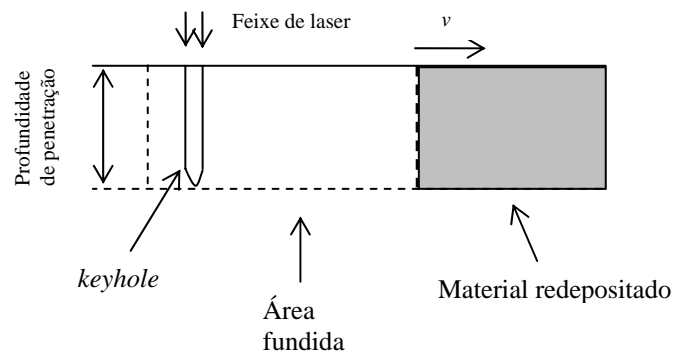


Figura 2. Geometria do modelo de penetração de uma chapa semi-infinita.

Dessa forma, o perfil de distribuição de temperatura neste modelo é dado pela fórmula de Rosenthal [19]:

$$T(x, y) = \frac{Pfr}{2\pi KLC} \exp\left(x \frac{v}{2k}\right) K_0\left(\sqrt{x^2 + y^2} \frac{v}{2k}\right) \quad (1)$$

onde  $P$  é a potência média do laser,  $fr$  é a fração da potência do laser absorvida,  $K$  e  $k$  são respectivamente, a condutividade e difusividade térmica do material.  $LC$  é a espessura da chapa e  $K_0$ , a função Bessel de ordem 0 e  $v$ , a velocidade de translação da chapa.

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho, o laser de Cu-HBr foi usado nos experimentos de microssoldagem em chapas finas de aço inoxidável AISI 304. A Figura 3 mostra um diagrama esquemático do arranjo experimental para produzir as micro-junções. O feixe de laser é refletido por um espelho plano. Utilizando uma lente convergente, esse feixe é focalizado sobre duas chapas de aço inoxidável, presas a uma mesa de translação micrométrica de velocidade controlada.

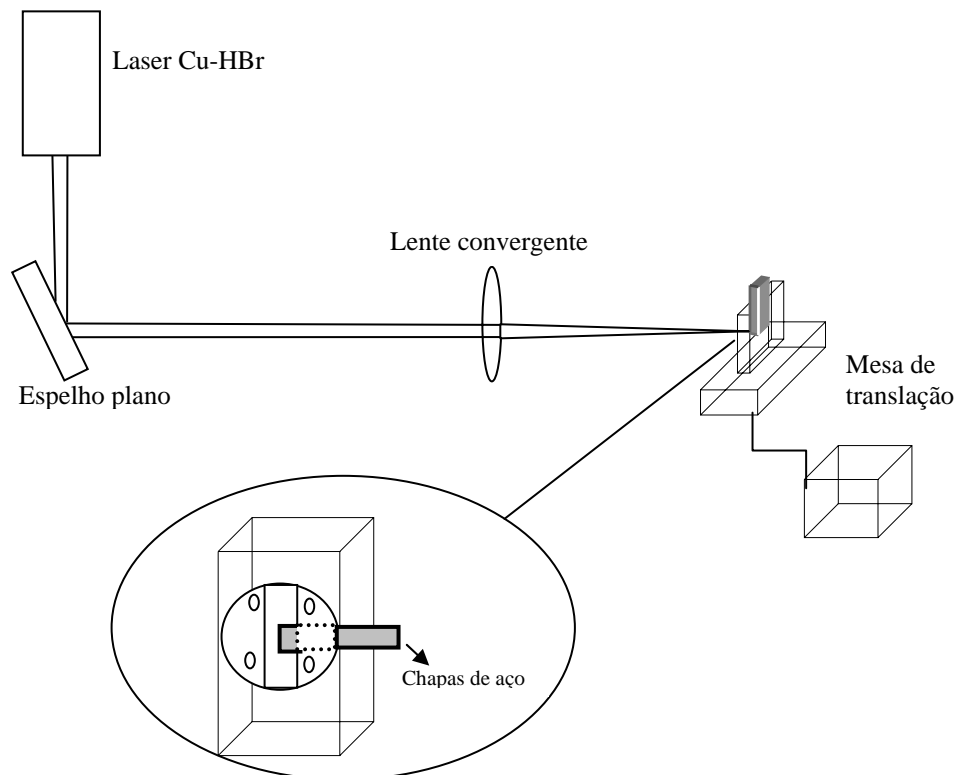


Figura 3. Desenho esquemático do arranjo experimental para produzir micro junções.

As amostras utilizadas nos experimentos foram feitas de chapas de aço AISI 304 com espessuras de 25, 50 e 100  $\mu\text{m}$ , cortadas nas dimensões de 10 mm x 25 mm aproximadamente. Um dispositivo desenvolvido especialmente para este trabalho, foi feito para fixar e posicionar as amostras na mesa de translação.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Microsoldagem entre chapas de aço inoxidáveis com 100 $\mu\text{m}$ de espessura

Junções foram realizadas em chapas de aço com espessura de 100  $\mu\text{m}$  considerando os parâmetros de soldagem descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros considerados na microsoldagem realizada em chapas com 100  $\mu\text{m}$  de espessura.

	<i>Valores dos parâmetros</i>
Velocidade de soldagem	1 a 3 mm/s
Potência média do laser (emissão simultânea)	20 W
Raio do feixe focalizado sobre a amostra ( $w_0$ )	30 $\mu\text{m}$
Taxa de repetição dos pulsos	14 kHz
Tempo de pulso do laser	30 ns

As seções transversais das amostras obtidas estão apresentadas na Figura 4. Na Figura 4-a, onde a velocidade de soldagem utilizada foi de 1 mm/s, um cordão de solda formou-se em toda a amostra irradiada pelo feixe, embora a chapa superior tenha sido completamente cortada após a interação com o laser. Nas velocidades de soldagem entre 2 e 3 mm/s (Figuras 4-b e 4-c), os resultados obtidos foram aproximadamente os mesmos. Conforme observado, as amostras não foram cortadas, gerando um cordão de fusão na região exposta ao laser.

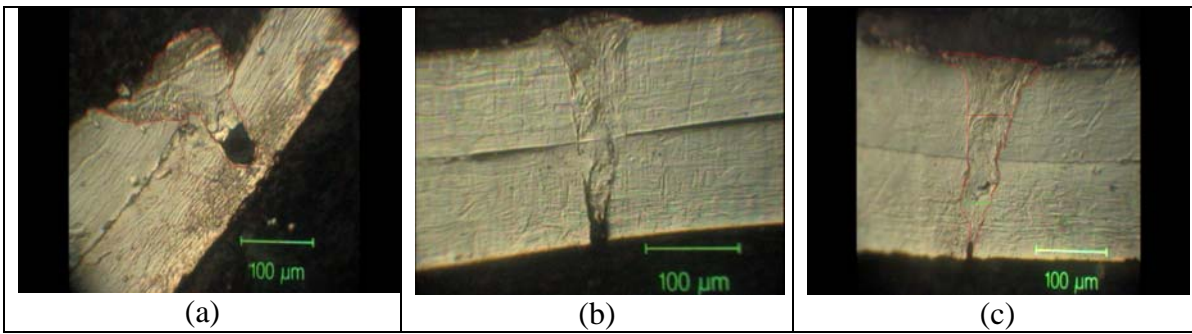


Figura 4. Microscopia óptica da microssolda obtida em chapas de aço 304, utilizando o laser de Cu-HBr com potência média de 20 W, variando-se a velocidade de soldagem utilizada. (a) 1 mm/s, (b) 2 mm/s e (c) 3 mm/s.

Os resultados da geometria da cavidade formada na amostra estão apresentados na Figura 5-a. Observe que, para as velocidades de soldagem de 2 e 3 mm/s, a cavidade formada possui uma geometria cônica e sua profundidade aproxima-se da espessura da amostra, ou seja, 200 µm. O mesmo não ocorreu na situação onde a velocidade de soldagem utilizada foi de 1 mm/s, onde a profundidade da cavidade gerada ultrapassa a espessura da amostra. A Figura 5-b apresenta os resultados da largura da cavidade na superfície inferior da amostra. Nas velocidades de soldagem entre 2 e 3 mm/s, a abertura gerada é muito pequena. Já na situação onde a velocidade de soldagem considerada foi de 1 mm/s, a largura da cavidade na amostra é relativamente maior do que nas anteriores.

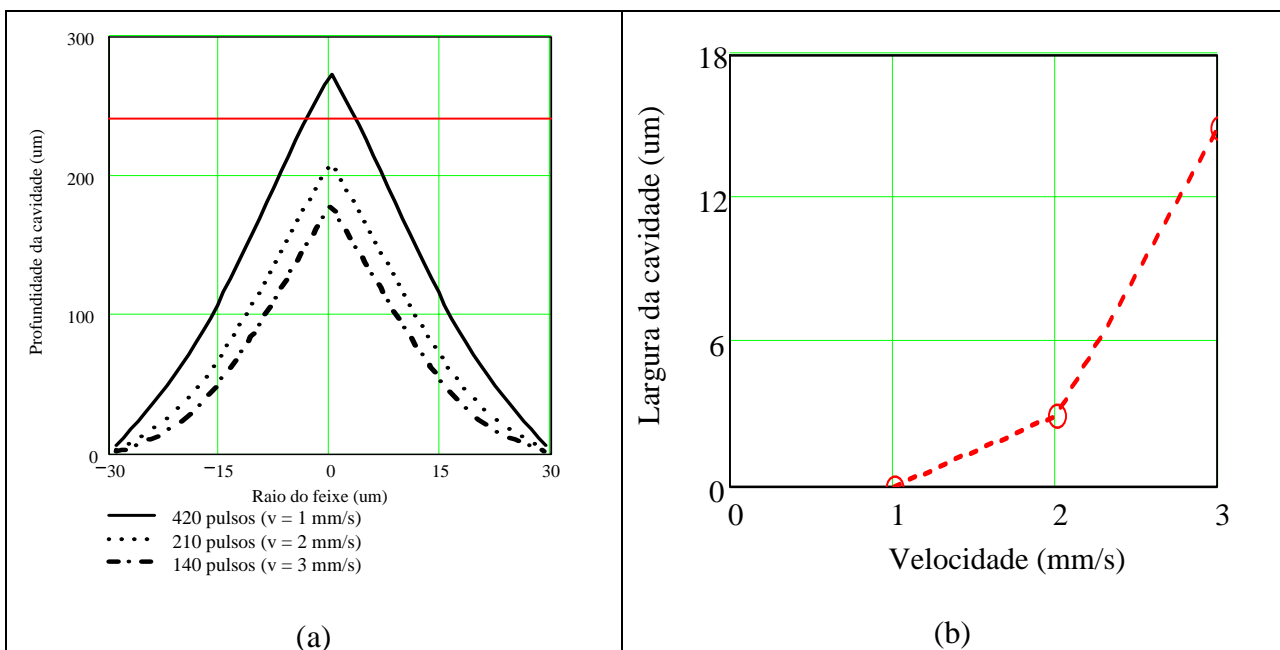


Figura 5. (a) profundidade da cavidade formada na amostra em relação ao raio do feixe de laser focalizado, considerando as velocidades utilizadas experimentalmente. (b) tamanho da largura da cavidade em relação à velocidade de soldagem utilizada.

A Figura 6 apresenta a variação de temperatura em relação à largura transversal da amostra, considerando as velocidades de soldagem utilizadas. Nas três situações descritas, a fração de energia absorvida pelo material foi aproximadamente a mesma, ou seja, 0,33.

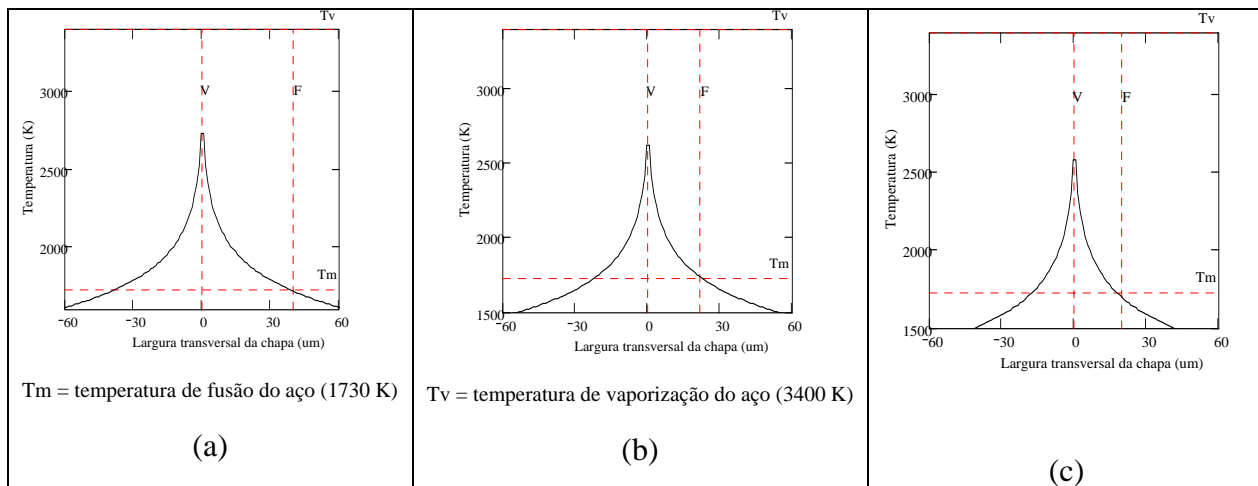


Figura 6. Variação de temperatura em relação a largura transversal da amostra considerando a velocidade de soldagem utilizada em cada situação. (a) 1 mm/s, (b) 2 mm/s e (c) 3 mm/s.

Os resultados obtidos acima apontam para uma condição de soldagem, onde a cavidade formada na amostra - função da velocidade de soldagem e da intensidade do feixe de laser - gerou uma absorção de energia ideal, capaz de produzir um cordão de solda com alta razão de aspecto (conforme pôde ser observado na microscopia óptica dos resultados experimentais).

Concluimos então que os parâmetros de soldagem descritos acima (Tabela 1) são ideais para obtermos microssoldas com alta razão de aspecto. A fim de verificarmos a reprodutibilidade dos resultados, outras amostras foram submetidas ao procedimento experimental e em seguida, analisadas por microscopia óptica. A Figura 7 apresenta a reprodutibilidade das microssoldas obtidas em amostras de aço inoxidável 304 com 200  $\mu\text{m}$  de espessura, irradiadas pelo laser de Cu-HBr. Neste caso, a velocidade de soldagem utilizada foi de 3 mm/s.

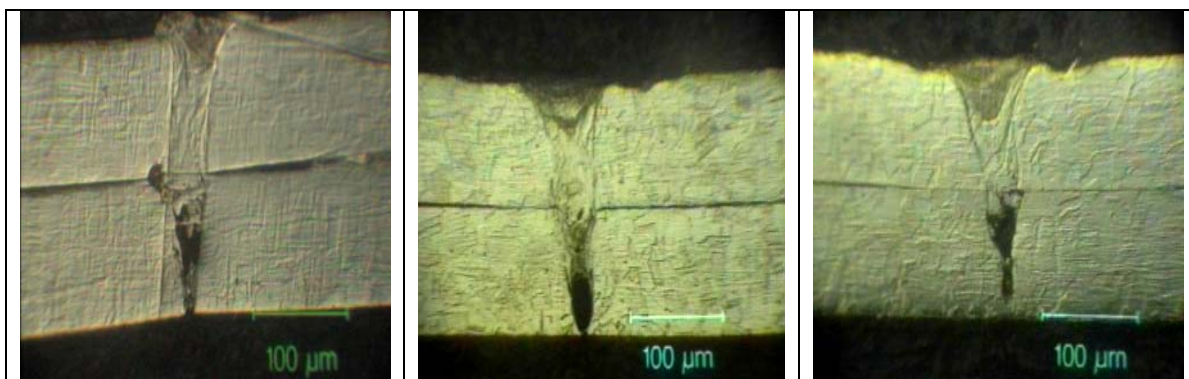


Figura 7. Reprodutibilidade da microssolda obtida em chapas de aço inoxidável 304 com 200  $\mu\text{m}$  de espessura, irradiadas pelo laser de Cu-HBr, com velocidade de soldagem de 3 mm/s.

#### 4.2 Metalografia do processo de microssoldagem em chapas de aço inoxidáveis com 100 $\mu\text{m}$ de espessura

Nas condições de soldagem descritas na seção anterior, utilizando chapas de aço 304 com 100  $\mu\text{m}$  de espessura, uma análise metalográfica foi feita sobre o cordão de solda obtido. Verificou-se que esse cordão se estende pelas duas chapas, apresentando um topo pronunciado e uma raiz com alguma retração. Um resultado importante é a reduzida zona afetada termicamente. Como pode ser observado na Figura 8, placas de martensitas estão presentes próximos ao cordão de solda formado. Isso significa que, muito próximo à interface da solda, a transferência de calor para o material base foi controlada, pois martensitas se decompõem rapidamente em temperaturas entre 600 e 700 K (aproximadamente 300 e 400°C).

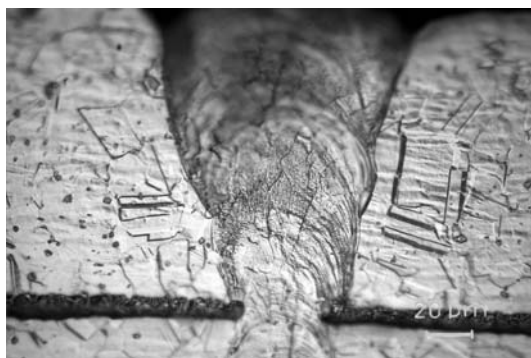


Figura 8. Detalhe da microestrutura da solda e do material base obtida em nossos estudos, onde placas de martensitas estão próximas à região fundida da amostra.

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi mostrada a viabilidade de realizar microssoldas de penetração em chapas finas, utilizando um laser de pulsos curtos com alta taxa de repetição. Em geral, os lasers utilizados para efetuar soldas em materiais com espessura entre 10 e 100  $\mu\text{m}$  são do tipo pulsado, com pulsos longos (0,1 a 1 ms) e energias de pulsos elevadas (0,1 a 1 J). Pulsos curtos não são geralmente utilizados na soldagem a laser por causa da limitada profundidade de penetração térmica no material.

Primeiramente verificou-se, através de experimentos e de modelos desenvolvidos, que a geometria da cavidade formada - função da velocidade de soldagem (ou da quantidade de pulsos sobrepostos) e da intensidade do feixe de laser -, influencia fortemente na fração de energia absorvida pelo material na interação com o feixe de laser; e uma maior absorção se dá quando esta cavidade possui geometria cônica e sua profundidade aproxima-se da espessura da amostra.

Conclui-se que esta condição ocorre na interação do feixe - com potência média de 20 W - com chapas de aço de 100  $\mu\text{m}$  de espessura e velocidades de soldagem entre 1 e 3 mm/s, onde obtivemos uma condição ideal de soldagem capaz de produzir um cordão de solda com alta razão de aspecto. Observamos também nesta situação, uma melhora na eficiência de junção, com valores próximos aos considerados nas soldagens a laser convencionais.

Uma análise metalográfica foi feita sobre o cordão de solda citado acima. Verificou-se que esse cordão se estende pelas duas chapas, apresentando um topo pronunciado e uma raiz com alguma retração. Os grãos estão definidos tanto no material base quanto na região fundida. Na junta das chapas não houve o desenvolvimento de trincas, garantindo assim que o método não induz tensões entre a chapa superior e a inferior. Um resultado importante obtido foi a reduzida zona afetada termicamente.

## REFERÊNCIAS

- <sup>1</sup> READY J. F. **Industrial Applications of Lasers**. Ed. Academic Press. 2ª ed., ISBN 0125839618. 1997.
- <sup>2</sup> BERRETTA, J.R. **Solda laser em materiais dissimilares com laser de Nd:YAG pulsado**. 2005. 120f. Tese Doutorado em Ciências - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- <sup>3</sup> STEEN, W. M. **Laser Material Processing**. Ed. Springer-Verlag. 2ª ed., ISBN 3540761748. 1998.

- <sup>4</sup> FREWIN M. R., SCOTT D. A., Finite element model of pulsed laser welding. **Welding Research Supplement**; p. 15-s-21-s, 1999.
- <sup>5</sup> MIYAMOTO I., PARK S., TOSHIHIKO O., Ultrafine-keyhole welding process using single-mode fiber laser. **LMP**; Section A, p. 203-316.
- <sup>6</sup> DEARDEN G., Recent advances in laser micro welding, soldering and bonding. **Laser in Manufacturing 2005** – Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, pp. 615-623, Munich, Germany, June 2005.
- <sup>7</sup> NAEEM M., COLLINS P., Micro-joining with Nd:YAG laser, **Laser in Manufacturing 2005** – Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, pp. 643-649, Munich, Germany, June 2005.
- <sup>8</sup> RIVA, R.; WATANUKI, J.T.; RODRIGUES, N.A.S.; CAPELLA DE OLIVEIRA, A. Estudo de micro-junção de chapa finas metálicas usando um laser de Cu-HBr. In: **XXV ENCONTRO NACIONAL DE FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA**, 2002.
- <sup>9</sup> RIVA, R; RODRIGUES, N.A.S.; SCHWAB, C.; CAPELLA DE OLIVEIRA, A. Welding of Stainless Steel Membrans with a Cu-HyBrID laser. In: **XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE APLICAÇÕES DE VÁCUO NA INDÚSTRIA E NA CIÊNCIA**, 2002.
- <sup>10</sup> DU, J., LONGOBARDI, J., LATHAM, W. P., KAR, A. Laser marginal lap microwelding for ultra thin sheet metal. **J. Laser Applications**, v. 14, n. 1, p. 4-8, 2002.
- <sup>11</sup> SEMAK, V. V., KNOROVSKY, G. A., MAC CALLUM, D. O. On the possibility of microwelding with laser beams. **J. Phys. D: Appl. Phys.**; n. 36, p. 2170-2174, 2003.
- <sup>12</sup> KLEINE K. F., WATKINS K. G., Micro welding with single mode fiber lasers. **Laser in Manufacturing 2005** – Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, pp. 637-641, Munich, Germany, June 2005.
- <sup>13</sup> SANTOS C. L. **Determinação dos parâmetros ótimos de operação de um laser de Cu-HBr**. Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1999.
- <sup>14</sup> STAUTER C., FONTAINE J., ENGEL TH., Real-time determination of the amount of removed material during short pulses laser micromachining. **Applied Surface Science**; 96-98, p. 522-527, 1996.
- <sup>15</sup> KORNER C., MAYERHOFER R., HARTMANN M., BERGMANN H. W., Physical and material aspects in using visible laser pulses of nanosecond duration for ablation. **Applied Physics**; A 63, p. 123-131, 1996.
- <sup>16</sup> LUFT A., FRANZ U., EMSERMANN A., KASPAR J., A study of thermal and mechanical effects on materials induced by pulsed laser drilling. **Applied Physics**; A 63, p. 93-101, 1996.
- <sup>17</sup> GOVORKOV S. V., SLOBODTCHIKOV E. V., WIESSNER A. O., BASTING D., High accuracy microdrilling of steel with solid-state UV laser at 10 mm/sec rate. **Lambda Highlights**; n. 57, p. 3-5.



<sup>18</sup> KNOWLES M. R. H., Micro-ablation with high power pulsed copper vapor lasers. **Optics Express**; vol 7, n. 2, p. 50-55, 2000.

<sup>19</sup> ROSENTHAL D., The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments. **Trans. ASME**; 43(11), p. 849-866, 1946.

## **DETERMINATION OF THE GREAT PARAMETERS IN MICROWELDING OF THIN SHEETS USING A LASER OF Cu-HBr**

**Word's code: 021017194**

***Abstract.** The objective of this work was to investigate the viability of a new method to micro-weld thin sheets using a high repetition rate Cu-HyBrID laser emitting intense nanoseconds pulses. In traditional methods, the micro-welding of thin sheets is obtained by using continuous or long pulses laser ( $> 1\text{ms}$ ) that allows a thermal diffuse length comparable to the sheet thickness. Short pulse lasers (10 to 100 ns) are most used to drill and cut materials. A broad experimental study of micro-welding process using short laser pulses was conducted on stainless steel (AISI 304) thin sheets with thickness varying from 25  $\mu\text{m}$  to 100  $\mu\text{m}$ . The main characteristics of the Cu-HBr laser beam were measured for every experimental condition, allowing a precise determination of laser beam intensity on the micro-welding area. The results of the study demonstrated the possibility of controlling the process parameters in order to obtain penetration welds with high aspect ratio and reduced heat affected zone (HAZ). A theoretical model was developed to explain the interaction of short laser pulses emitted at high repetition rates on the micro-welding process. Model results indicated that however the high intensity of laser pulses is more than necessary to perforate the thin sheets, it is possible to control the hole geometry in a way that the vapor remains trapped and further condensate on the cavity inner walls allowing the welding of the sheets. In those controlled experimental conditions the thin sheets were welded using between 10 and 20 W of laser average power, that is much lower than the power used on traditional methods.*

*Keywords: microwelding, pulsed laser, 304 stainless steel*