

## Soldagem do aço inoxidável AISI 316 com laser à fibra de alta potência: influência dos parâmetros operacionais na micro dureza e na susceptibilidade à corrosão eletrolítica dos cordões de solda

Welding of the stainless steel AISI 316 with high power fiber laser: influence of the operational parameters on microhardness and electrolytic corrosion susceptibility of the weld beads

Bruno Nazário Coelho<sup>1</sup>, Milton Sérgio Fernandes Lima<sup>2</sup>  
Adilson Rodrigues da Costa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Engenharia de Superfície e Técnicas Afins (LESTA) REDEMAT - Escola de Minas/UFOP 35400-000 Ouro Preto, MG

e-mail: [brunonazario@gmail.com](mailto:brunonazario@gmail.com); [adilson@em.ufop.br](mailto:adilson@em.ufop.br)

<sup>2</sup> Laboratório de desenvolvimento de Aplicações de Óptica e Lasers (DedALO) Instituto de Estudos Avançados – IE-Av/CTA – 12228-001 São José dos Campos, SP

e-mail: [msflima@gmail.com](mailto:msflima@gmail.com)

---

### RESUMO

Este trabalho faz uma avaliação da influência de parâmetros operacionais utilizados no processo de soldagem a laser do aço inoxidável AISI 316. Os resultados dos experimentos de soldagem realizados com parâmetros ajustados para diversas situações foram avaliados levando em consideração a densidade de potência disponibilizada e o tempo de interação do feixe com o metal base. Essas avaliações foram baseadas nos resultados de microdureza e nos ensaios de corrosão eletrolítica das soldas, auxiliadas pela macrografia do cordão de solda. Buscou-se evidenciar correlações entre os parâmetros operacionais selecionados para os experimentos e os resultados obtidos nos cordões de solda, medindo-se grandezas como largura e profundidade. Concluiu-se que a escolha adequada dos parâmetros operacionais é fundamental para a garantia da qualidade dos cordões de solda. Além disso, validou-se um método rápido de avaliação da susceptibilidade dos cordões de solda à corrosão.

**Palavras-chave:** soldagem a laser, aço AISI 316, laser à fibra, corrosão eletrolítica.

---

### ABSTRACT

This paper addresses an evaluation of the influence of operational parameters used in the AISI 316 stainless steels laser welding process. The results of the welding experiments performed with parameters adjusted to a variety of situations were evaluated taking into account the power density available and the interaction time of the laser beam with the base metal. These evaluations were based on the results of microhardness and the electrolytic corrosion tests of the solders, assisted by the macrography of the weld bead. It was sought to emphasize correlations between selected operating parameters and the results obtained with weld beads, measuring their width and depth. It was concluded that the proper choice of operating parameters is fundamental to the guarantee of quality of the weld beads. Besides that, a quick method of evaluation of weld beads susceptibility was validated.

**Keywords:** laser welding, AISI 316 stainless steel, fiber laser, electrolytic corrosion.

---

## 1. INTRODUÇÃO

A soldagem a laser apresenta diversas vantagens quando comparada com os métodos tradicionais. A alta produtividade e a facilidade de automação são fatores diferenciais para uma indústria, melhorando a qualidade

do produto e proporcionando uma redução nos custos do processo produtivo. No processo de soldagem a laser, diversas variáveis devem ser consideradas, tais como a potência utilizada, velocidade de passagem do laser, gases de proteção, distância entre as placas a serem soldadas, distância focal, entre outras, que modificam consideravelmente os resultados obtidos na soldagem [1, 2, 3, 4]. Para cada material existem procedimentos de soldagem que aperfeiçoam os resultados do processo. Portanto, estudos que identificam esses parâmetros são relevantes para um desenvolvimento científico e tecnológico, pois promovem ganhos qualitativos e quantitativos no processo de soldagem a laser. Estudos realizados por institutos de pesquisas nos últimos dez anos apontam vantagens evidentes para a soldagem a laser [1]. Critérios rígidos de qualidade metalúrgica, limitações na extensão da zona afetada termicamente (ZTA) e controle de defeitos e distorções fazem com que os fabricantes de aeronaves, trens e navios invistam cada vez mais em novas tecnologias de soldagem.

No meio industrial, os aços inoxidáveis têm uma grande importância devido às características de resistência a um grande número de agentes corrosivos. Nesse contexto, o aço inoxidável austenítico AISI 316 é amplamente utilizado em diversas aplicações como, por exemplo, nas indústrias petrolífera, automotiva e aeroespacial.

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência dos parâmetros (velocidade e potência) no cordão de solda resultante. Para isso, realizou-se experimentalmente a soldagem a laser de chapas do aço inoxidável AISI 316, utilizando-se diferentes combinações entre esses parâmetros operacionais. Além do estabelecimento de correlações entre os parâmetros utilizados, avaliou-se a qualidade das soldas em relação aos aspectos de largura, profundidade, microdureza e sua susceptibilidade à corrosão.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para os ensaios, utilizou-se chapas do aço inoxidável austenítico AISI 316 com 1,0 mm espessura. Os cordões de solda foram feitos com aproximadamente 100 mm de comprimento em soldagens realizadas em cheio nas chapas, um procedimento comum e utilizado em outros trabalhos [1, 2] na pesquisa de soldagem a laser. A composição química do AISI 316 [1] é 0,08 % de C, 2,0 % de Mn, 1,0 % de Si, 16,0 a 18,0 % de Cr, 10,0 a 14,0 % de Ni, 0,045 % de P, 0,03 % de S e 2,0 a 3,0 % de Mo.

Utilizou-se um laser Yb:fibra (modelo YLS 2000, IPG Photonics), de acordo com a configuração esquematizada na Figura 1. O laser é produzido numa fibra óptica dopada com Itérbio (Yb), com comprimento de onda de 1080 nm. A fibra de saída tem 50  $\mu\text{m}$  de diâmetro e 5 m de extensão, e é conectada a uma unidade de acoplamento, fazendo a conexão com uma segunda fibra com 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro e 10 m de comprimento. A fibra secundária é conectada a um colimador óptico formando o sistema de acoplamento do feixe. Este laser está inserido numa cabine de processamento em alumínio de aproximadamente 3 m x 3 m x 3 m, equipada com sistemas de gases auxiliares de processo e de exaustão de fumos.

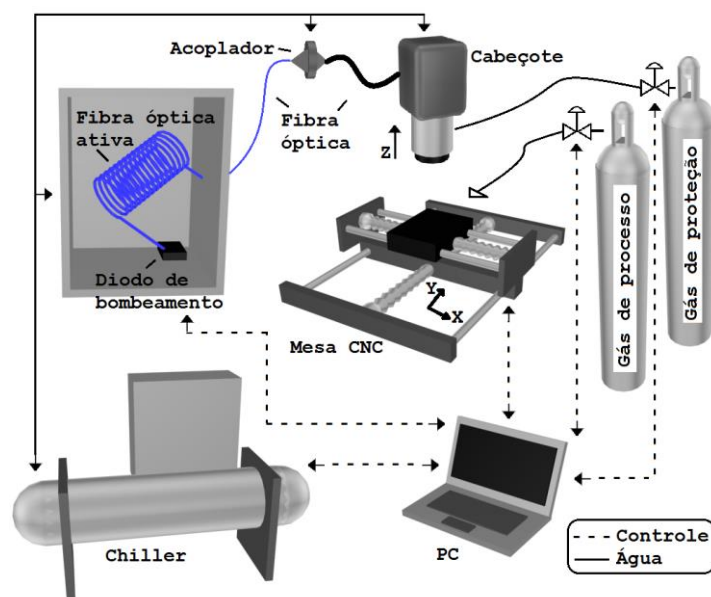


Figura 1: Diagrama da estação de processamento de materiais com laser à fibra.

O porta amostras é montado sobre uma mesa CNC com dois eixos (XY) acoplados em dois servomotores controlados por computador através do software EMC2 [1], com velocidade até 160 mm/s e resolução de 5 µm nos eixos XY. Um eixo Z-vertical com resolução de 1 µm foi incorporado à mesa para o controle da distância focal. Além da movimentação, o software faz o controle do sistema de gases de processo, que comporta quatro tipos diferentes de gases: nitrogênio, oxigênio, argônio e hélio. No presente trabalho os gases utilizados foram nitrogênio e argônio, o primeiro para proteger a óptica e o segundo para promover uma atmosfera inerte sobre o cordão de solda. As soldas foram feitas com o feixe laser parado, enquanto o porta amostras era movimentado.

Lasers à fibra são lasers de estado sólido nos quais uma fibra óptica é dopada com uma pequena porcentagem de terras raras. São usados diodos para estimular o material gerador, que emite fótons no comprimento de onda específico do elemento utilizado para dopagem. Embora seja possível utilizar a fibra do laser como a fibra de entrega final do feixe, é aconselhável a utilização de um acoplamento entre a fibra de entrega do feixe e uma fibra específica para o processamento de materiais, aumentando sua resistência e servindo como meio de proteção contra reflexões indesejadas que podem retornar pela fibra óptica a partir da superfície da peça, danificando o laser [1]. Este tipo de laser existe há muitos anos em baixas potências, porém somente os desenvolvidos na última década atingem altas potências, chegando a ser até superiores a 40 kW, e suas aplicações ainda estão em pleno desenvolvimento no processamento de materiais.

Quando a soldagem é feita em materiais com alta refletividade, como no caso presente, aconselha-se inclinar a amostra de cinco graus para evitar reflexões na câmara óptica que podem causar danos à cavidade do laser [1, 2]. É de extrema importância o controle rigoroso dos parâmetros operacionais, pois afetam diretamente a qualidade da solda. A potência do laser, a velocidade da soldagem, a vazão de gases, a natureza do gás, a distância focal, o vácuo (em alguns casos) e o ângulo da soldagem influenciam vários aspectos relacionados à qualidade do cordão da solda. Para determinar a influência de cada parâmetro no resultado final da solda devem ser realizados vários experimentos com diferentes configurações, analisando-se, a seguir, os resultados obtidos. Nesse trabalho, adotou-se como variáveis a potência do laser e a velocidade de deslocamento da mesa. Os outros parâmetros, como a vazão de argônio e a distância focal, foram fixados.

Existem dois modos fundamentais de soldagem a laser, dependendo da potência do feixe e do seu foco em relação à chapa: soldagem por condução e soldagem de penetração (“keyhole”). A soldagem por condução ocorre quando se utiliza baixa potência, alta velocidade ou feixe desfocado, o que implica em densidade de potência insuficiente para causar evaporação. Na soldagem por penetração profunda ou “keyhole”, a densidade de potência é suficiente para formar um canal de vapor na piscina de fusão. O “keyhole” se comporta como um corpo-negro em que a radiação entra na poça e é submetida a múltiplas reflexões antes de escapar. A transição a partir do modo de condução para a penetração profunda ocorre com o aumento da intensidade do laser [1].

**Tabela 1:** Dados e parâmetros de configuração dos experimentos de soldagem.

SOLDA	POT. W	VEL. mm/s	DP kW/mm <sup>2</sup>	PED (kW/(mm <sup>2</sup> .s)) x 10 <sup>3</sup>
1	1000	150	127,4	191,08
2	800	150	101,9	152,87
3	600	150	76,4	114,65
4	500	150	63,7	95,54
5	400	150	51,0	76,43
6	500	100	63,7	63,69
7	400	100	51,0	50,96
8	300	100	38,2	38,22
9	400	50	51,0	25,48
10	300	50	38,2	19,11
11	200	50	25,5	12,74

$$DP = \frac{P(W)}{s(mm^2)} \quad (1)$$

$$PED = \frac{P(W)}{s(mm^2) \times t(s)} \quad (2)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para analisar a forma dos cordões de solda, realizou-se a aquisição de imagens por microscopia óptica da seção transversal de todos os cordões de solda produzidos. As imagens apresentadas nas Figuras 2, 3 e 4 referem-se às soldagens descritas na Tabela 1.

Na Figura 2, as imagens mostram as soldas 1 a 5, realizadas na velocidade de 150 mm/s.

A largura do cordão de solda tem uma relação inversa com a velocidade; observa-se o aumento da largura com a redução da velocidade de soldagem. Os mais largos foram encontrados nas soldagens com a menor velocidade, 50 mm/s, como mostram as soldas 9 a 11, na Figura 4.

Destaca-se que os melhores resultados para cada velocidade escolhida foram os cordões das soldas 3, 6 e 9. As observações realizadas recorrendo à microscopia óptica revelaram que nesses cordões houve penetração total, além de não apresentarem porosidades nem trincas.

Observou-se uma maior incidência de porosidades nos cordões em que não houve penetração total, pois os gases gerados no processo após a formação do “keyhole” ficaram retidos devido à solidificação rápida dos leitos de solda.

Foram realizadas microindentações piramidais na superfície do material, em um corte transversal dos cordões de solda, com carga de 25g durante 5s. Em cada um dos cordões realizou-se, em média, 30 microindentações, tanto na parte interna como na região próxima ao cordão. O perfil de microdureza foi iniciado no metal de base passando pelo cordão de solda até atingir o metal de base novamente, como mostrado na Figura 5. O perfil observado é característico de todos os demais cordões.

A Tabela 2 mostra os valores médios de microdureza Vickers obtidos em cada um dos cordões. As microindentações do cordão 1 foram descartadas por não apresentarem a qualidade adequada para a medição.

Para uma avaliação consistente dos diferentes valores de microdureza encontrados no metal de base e no cordão de solda, efetuou-se uma análise estatística através do Teste T de Student. Nesse teste consideraram-se os dados em duas situações diferentes: o metal de base como situação inicial e os dados da zona fundida como situação final. A maior parte dos dados apresentou valores menores que 0,05 para o Teste T. Tomando como hipótese nula que a média da situação inicial é igual à média da situação final, pode-se rejeitar a hipótese nula de que a média da situação é igual à média da situação final, pois os valores obtidos foram menores que 0,05, que corresponde ao nível de significância determinado.

Portanto, existe uma diferença significativa entre os valores de microdureza obtidos no interior do cordão de solda e os valores no metal base.

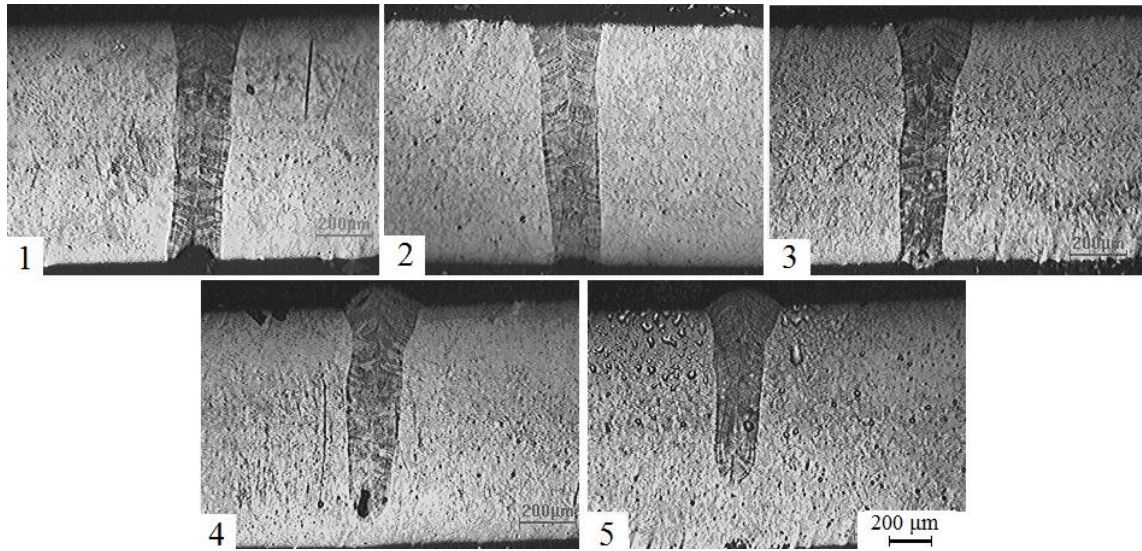


Figura 2: Micrografias dos cordões de solda (150 mm/s).

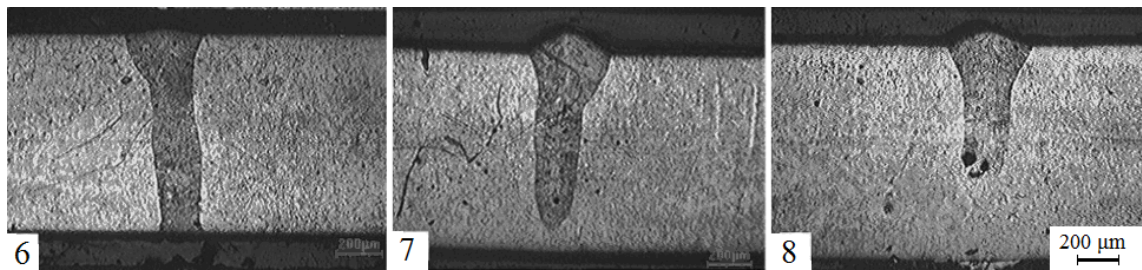


Figura 3: Micrografias dos cordões de solda (100 mm/s).

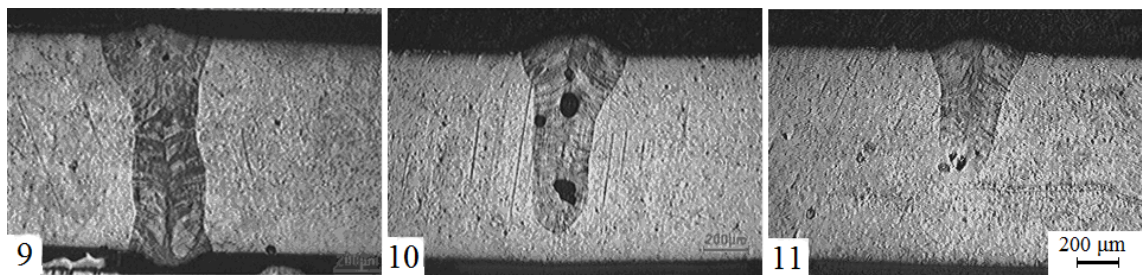


Figura 4: Micrografias dos cordões de solda (50 mm/s).

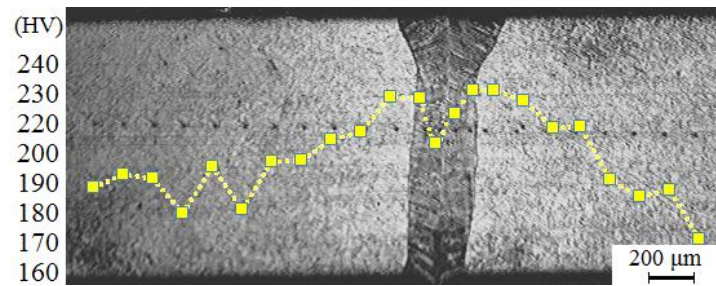


Figura 5: Perfil de microdureza na seção transversal da solda 6.

Observa-se que, em geral, as médias dos valores de microdureza obtidos dentro do cordão de solda são de 10 % a 20 % maiores que as médias dos valores medidos fora do cordão (no metal base), evidenciando um pequeno endurecimento na região soldada. E ainda, de acordo com o observado nas micrografias, a região próxima ao cordão (ZTA) não apresentou diferenças significativas nos valores de microdureza, o que é comum na solda a laser, devido ao tempo reduzido da interação do feixe laser com a região vizinha.

Além da microdureza, mediu-se a profundidade e largura média dos cordões, a fim de estabelecer correlações entre as diferentes configurações de parâmetros utilizados. As medidas de largura foram realizadas no topo (leito de fusão), no meio e na base do cordão de solda, e a partir desses valores calculou-se a largura média. Esses dados estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 2:** Resultados de microdureza Vickers (HV).

CORDÃO DE SOLDA	MÉDIA DO CORDÃO (HV)	DESV. PAD. DO CORDÃO	MÉDIA DO MB (HV)	DESV. PAD. DO MB	TESTE T DE STUDENT
2	199	17,47	161	7,30	0,0043
3	216	5,39	192	9,39	< 0,001
4	235	5,99	198	9,66	<0,001
5	216	9,08	184	22,13	0,058
6	220	9,92	185	9,79	< 0,001
7	277	13,79	195	12,43	0,0148
8	221	7,79	202	13,70	< 0,001
9	229	3,02	193	8,57	< 0,001
10	217	14,01	188	13,23	< 0,001
11	201	4,79	189	8,32	0,0012

**Tabela 3:** Medidas de profundidade e largura dos cordões de solda.

CORDÃO DE SOLDA	PROFUNDIDADE ( $\mu\text{m}$ )	LARGURA ( $\mu\text{m}$ )			
		TOPO	MEIO	BASE	MÉDIA
1	1000	320	250	235	268
2	1000	325	230	210	255
3	1000	315	205	185	235
4	890	310	220	155	228
5	710	305	185	165	218
6	1000	430	275	255	320
7	875	430	255	190	292
8	610	385	205	190	260
9	1000	580	325	440	448
10	845	560	305	270	378
11	620	455	275	230	320

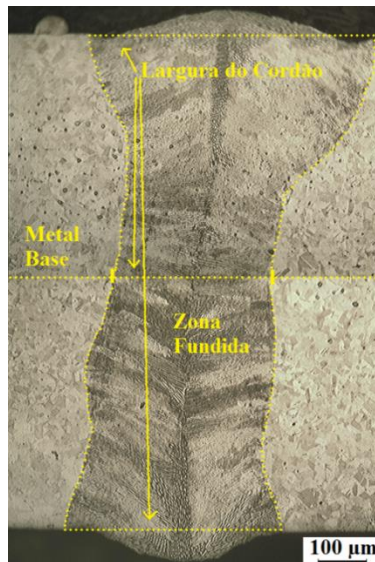


Figura 6: Seção transversal da solda 9 (200X).

### 1.1 Análise da susceptibilidade à corrosão através de técnicas de tratamento de imagem

O procedimento experimental de corrosão eletrolítica foi feito utilizando-se uma máquina de polimento e ataque eletrolítico (modelo LECTROPOL, fabricante STRUERS). Os ensaios foram realizados sobre o leito de solda, e não sobre a seção transversal, pois é aquela região que fica exposta ao ambiente. Já o centro do cordão de solda foi centralizado sobre uma máscara com abertura circular de  $0,5 \text{ cm}^2$ , que é a região onde ocorrem as reações eletrolíticas, e utilizou-se um reativo composto por ácido perclórico, água destilada, etanol e butilcellosolve, durante 10 s e corrente de 9 A.

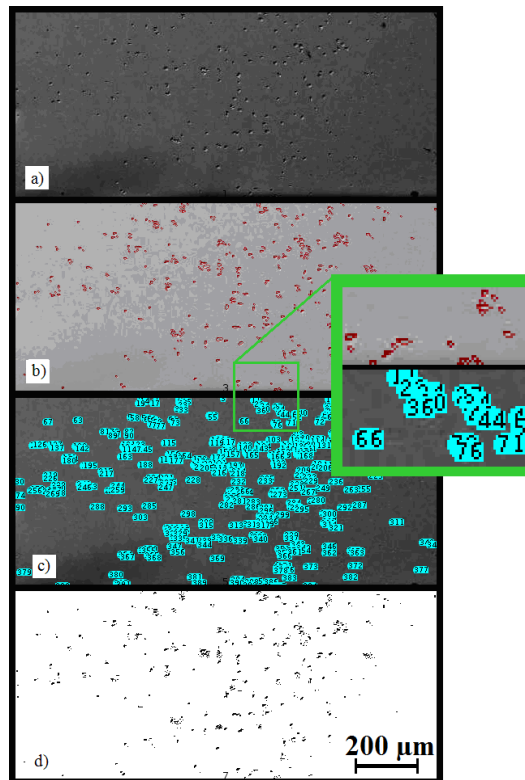
As amostras soldadas e submetidas à corrosão eletrolítica foram analisadas com o auxílio do MEV para a aquisição de imagens com resolução adequada para as análises. O tratamento de imagem foi feito pelo software Image [1, 2] 1.44, visando ao reconhecimento e à identificação automáticos dos pontos de corrosão. Utilizou-se o mesmo tratamento para todas as amostras após os ensaios de corrosão eletrolítica do AISI 316.

Na Figura 7 estão apresentadas as imagens resultantes do reconhecimento dos pontos de corrosão. Em (a), a imagem adquirida do MEV; em (b), a imagem com identificação dos pontos; em (c), a contagem dos pontos identificados; e em (d), a imagem editada para cálculo da “densidade” (quantidade de pontos por unidade de superfície).

A Tabela 4 contém os valores e os resultados obtidos nessa análise: o número de pontos encontrados, a área por estes ocupada, o perímetro total dos pontos de corrosão e a porcentagem de pontos em relação à área total da imagem. As observações foram feitas no plano da soldagem (topo).

Tabela 4: Análise da imagem de corrosão eletrolítica no metal base.

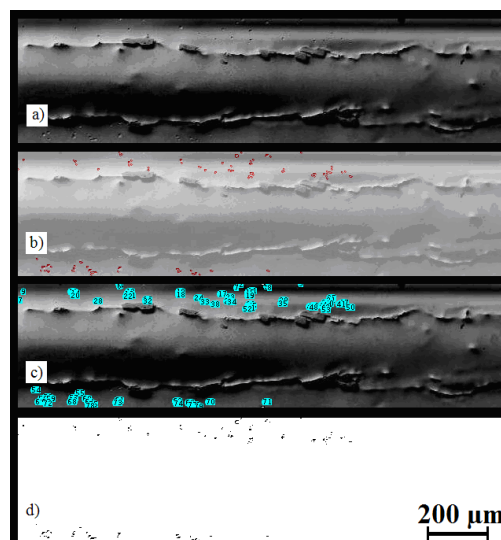
Nº DE PARTÍCULAS	ÁREA ( $\mu \text{ m}^2$ )			PERÍMETRO ( $\mu \text{ m}$ )			DENSIDADE DE VAZIOS
	MÁX	MÍN	MÉDIA	MÁX	MÍN	MÉDIA	
401	215,89	6,75	29,29	117,81	7,35	18,43	1,42%



**Figura 7:** Tratamento de imagem da corrosão no metal base (75X).

Na Figura 8 estão as imagens resultantes do reconhecimento dos pontos de corrosão para o cordão de solda. Em (b) e (c), pode-se observar a redução na quantidade de pontos de corrosão sobre o cordão de solda. Para a comparação adequada dos resultados, a área total analisada nas Figuras 5 e 6 é a mesma.

Os resultados dessa análise estão apresentados na Tabela 5, na qual se percebe, efetivamente, a redução do número de pontos de corrosão em relação ao caso anterior, além de uma redução no tamanho médio desses pontos.



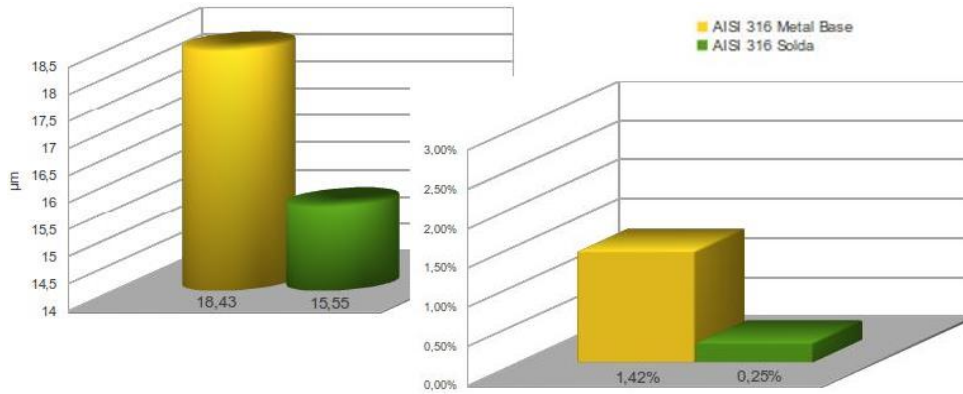
**Figura 8:** Tratamento de imagem da corrosão no cordão de solda (75X).



**Tabela 5:** Análise da imagem de corrosão eletrolítica no cordão de solda.

Nº DE PARTÍCULAS	ÁREA ( $\mu\text{m}^2$ )			PERÍMETRO ( $\mu\text{m}$ )			DENSIDADE DE VAZIOS
	MÁX	MÍN	MÉDIA	MÁX	MÍN	MÉDIA	
79	80,96	6,75	21,69	57,51	7,35	15,55	0,25%

Uma comparação entre as Tabelas 4 e 5 é mostrada na Figura 9.



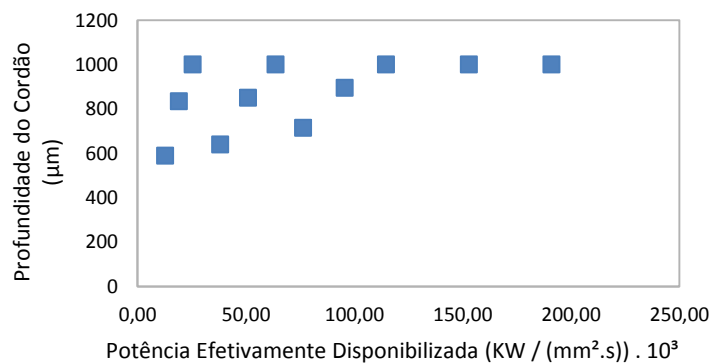
**Figura 9:** Tamanho médio (esquerda) e densidade de pontos de corrosão (direita) - metal base x solda.

A região soldada apresentou um desempenho superior ao metal base em relação à susceptibilidade à corrosão, pois além da menor densidade de pontos encontrados, o tamanho médio desses pontos também foi inferior, o que caracteriza uma maior resistência à corrosão.

Durante o processo de soldagem, podem ocorrer inúmeras alterações que afetam de forma significativa o comportamento do material em relação à corrosão. Esse tipo de comportamento, em que o cordão de solda apresenta resultados superiores ao metal base, é comum na literatura e depende de fatores como parâmetros de soldagem, a técnica empregada e o próprio material [5, 6]. Os problemas de corrosão normalmente associados com a soldagem de aços inoxidáveis austeníticos estão relacionados com efeitos de precipitação e de segregação química, que geram regiões com baixos teores de Cr, o que enfraquece a camada passiva. Estes problemas podem ser eliminados ou minimizados através do controle da metalurgia do metal base e do controle dos parâmetros de soldagem [17, 18]

### 1.2 Correlações entre os parâmetros operacionais

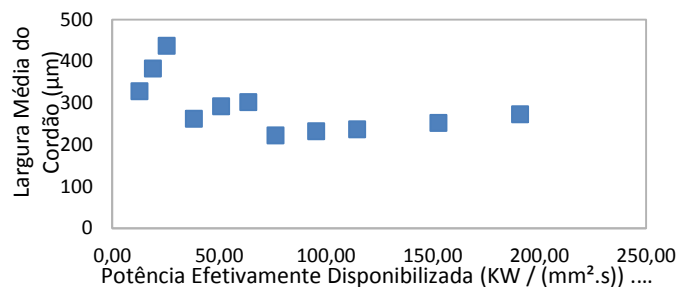
Uma importante análise a ser realizada é o estabelecimento de correlações entre os parâmetros de soldagem utilizados e os resultados obtidos. A Figura 10 correlaciona à potência efetivamente disponibilizada com a profundidade obtida nas diversas soldagens do AISI 316. Cada ponto representa um cordão de solda da Tabela 1.



**Figura 10:** Correlação entre a potência efetivamente disponibilizada e a profundidade dos cordões de solda.

Observam-se três agrupamentos diferentes, com baixa, média e alta densidade de potência. O ponto máximo no gráfico foi 1000  $\mu\text{m}$ , pois é exatamente a espessura da chapa. Cada ponto nas imagens corresponde a um único cordão de solda, portanto os dados nos gráficos são referentes a vários cordões soldados com diferentes parâmetros de velocidade e potência.

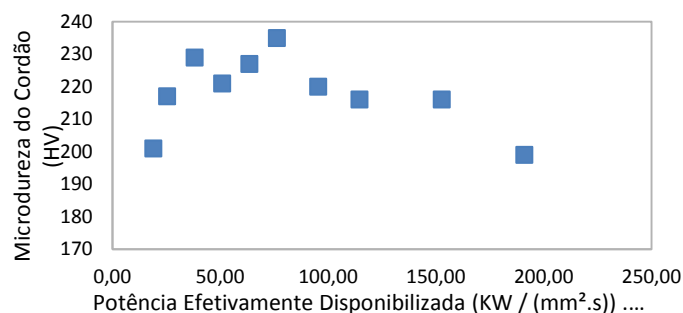
A Figura 11 mostra a correlação entre a potência efetivamente disponibilizada e a largura média dos cordões de solda. Também é possível observar três agrupamentos distintos, sugerindo correlações lineares.



**Figura 11:** Correlação entre a potência efetivamente disponibilizada e a largura média dos cordões de solda.

Entre a microdureza dos cordões e a potência efetivamente disponibilizada não foi possível evidenciar correlações simples tal como nos casos anteriores, como mostra a Figura 12.

Essas análises auxiliam a obtenção de soldas com parâmetros adequados, além de facilitar a configuração dos ajustes iniciais para trabalhos futuros utilizando lasers do tipo Yb:fibra e o aço inoxidável austenítico AISI 316 ou aços com composições semelhantes.



**Figura 12:** Correlação entre a densidade de potência e a microdureza dos cordões de solda.

Observou-se que a profundidade de penetração está diretamente relacionada com a densidade de potência do feixe do laser e é uma função da potência incidente e do diâmetro do feixe. Para um feixe de diâmetro constante, a penetração aumenta à medida que a potência do feixe também é aumentada, o que é relatado em diversos trabalhos [10, 20, 21, 22], sendo que a penetração aumenta de maneira aproximadamente linear com a potência do laser incidente [23, 24]. Além disso, pode-se controlar a velocidade e a potência para estabelecer uma potência efetivamente disponibilizada adequada para cada situação, pois ambos os parâmetros afetam a profundidade, o primeiro inversamente e o segundo diretamente; igualmente para o ajuste da largura do cordão de solda, utilizado em situações que exijam esse tipo de controle. Os efeitos da variação desses parâmetros, alterando assim a densidade de potência, influenciaram os resultados em outros trabalhos [10] de forma semelhante aos obtidos aqui, em relação à profundidade e à largura dos cordões de solda.

#### 4. CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido buscou encontrar os ajustes mais adequados entre os parâmetros operacionais para soldagens do aço inoxidável AISI 316 utilizando um laser de alta potência Yb: fibra. Constatou-se que o ajuste adequado dos parâmetros é de grande importância para a qualidade da solda. Considerando a qualidade da

solda em função da relação entre a largura e penetração, a melhor configuração foi a da solda 3, de 600 W e 150 mm/s.

Em geral, observou-se um pequeno endurecimento no cordão de solda.

Em relação à susceptibilidade à corrosão, o cordão de solda apresentou resultados superiores ao material base. Para essa análise, foi desenvolvido um método rápido de avaliação da susceptibilidade à corrosão combinando uma técnica computacional de tratamento de imagens com a corrosão provocada em ataque eletrolítico.

Correlações entre a potência, a velocidade de soldagem e a potência efetivamente disponibilizada com a profundidade, largura, microdureza dos cordões de solda e defeitos (porosidades) foram observadas, evidenciando combinações mais adequadas das variáveis de processo. Essas correlações são fisicamente consistentes e seguem padrões validados em trabalhos de outros autores [10, 21, 22, 23].

Trabalhos futuros deverão enfatizar aspectos relacionados ao desempenho das soldas quando submetidas à tração, torção e fadiga, p.ex.. A variação de outros parâmetros operacionais, como vazão dos gases, orientação do feixe e distância focal deve, também, ser levada em conta na expectativa de contribuir para um melhor desempenho operacional do laser e uma otimização da qualidade das soldas.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte do CNPq, CAPES, UFOP / REDEMAT e CTA / IEAv.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] TZENG, Y., "Process characterization of pulsed Nd:YAG laser seam welding", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 16, n. 1, pp. 10-18, 2000.
- [2] WANDERA, C., *Performance of high power fibre laser cutting of thick-section steel and medium-section aluminium*, Tese de D.Sc., Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland, 2010.
- [3] COLACO, R., PINA, C., VILAR, R., *et al.*, "Influence of the processing conditions on the abrasive wear behaviour of a laser surface melted tool steel", *Scripta Materialia*, v. 41, n. 7, pp. 715-721, 1999.
- [4] EL-BATAHGY, A., "Effect of laser beam welding parameters on fusion zone shape and microstructure of austenitic stainless steels", *Materials Letters*, v. 32, n. 2-3, pp. 155-163, 1997.
- [5] RIVA, R., LIMA, M.S.F., OLIVEIRA, A.C., *et al.*, "Desenvolvimento da soldagem a laser para a fabricação de aeronaves", In: *VIII Workshop Anual de Pesquisa e Desenvolvimento do IEAv*, v. 01, pp.63, São José dos Campos, SP, 2008.
- [6] ZHANG, L., LU, J.Z., LUO, K.Y., *et al.*, "Residual stress, micro-hardness and tensile properties of ANSI 304 stainless steel thick sheet by fiber laser welding", *Materials Science & Engineering A*, v. 561, pp. 136-144, 2013.
- [7] EL-BATAHGY, A., KHOURSHID, A., SHAREF, T., *et al.*, "Effect of laser beam welding parameters microstructure and properties of duplex stainless steels", *Materials Sciences and Applications*, v. 02, n. 10, pp. 1443-1451, 2011.
- [8] ASM HandBook, "Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys", In: *ASM International Handbook Committee*, v. 01, 10 ed., pp. 1063, 1990.
- [9] EMC2, LINUXCNC.ORG, <http://www.linuxcnc.org/>, acessado em junho de 2013.
- [10] VERHAEGHE, G., "The fiber laser - a newcomer for material welding and cutting", *Welding Journal*, v. 84, n. 8, pp. 56-60, 2005.
- [11] STEEN, W.M., *Laser Material Processing*, 1 ed., London, Springer-Verlag, 1991.
- [12] OLSEN, F.O, JORGENSEN, H., BAGGER, *et al.*, "Recent investigations in sensors for adaptive control of laser cutting and welding", In: *Laser advanced materials processing - LAMP-92*, pp. 405-414, Nagasaki, Japan, 1992.
- [13] J. Dutta Majumdar , I. Manna, LASER PROCESSING OF MATERIALS, <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02706446#page-1>, acessado em junho de 2013.
- [14] RYKALIN, N.N., UGLOV, A.A., KOKORA, A., *et al.*, *Laser Machining and Welding*, 1 ed., Moscow, Mir Publishers, 1978.

- [15] IMAGE PROCESSING AND ANALYSIS IN JAVA, <http://rsb.info.nih.gov/ij>, acessado em junho de 2013.
- [16] RIBEIRO, R.B., CODARO, E.N., HEIN, L.R.O., *et al.*, “Análise morfológica da corrosão por pites em aço inoxidável austenítico AISI 310S submetido à exposição em névoa salina”, *revista Matéria*, v. 14, n. 3, pp. 957 – 964, 2009.
- [17] Cramer, S.D., Covino, B.S, *ASM Metals HandBook*, v. 13A, Ohio USA, ASM International, 2003.
- [18] Michael A. Streicher, ASTM INTERNATIONAL, [http://www.astm.org/DIGITAL\\_LIBRARY/STP/PAGES/STP34842S.htm](http://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/STP/PAGES/STP34842S.htm), acessado em junho de 2013.
- [19] BRAUTIGAM, F.C., “Welding practices to minimize corrosion”, *Chemical Engineering*, v. 84, n. 2, pp. 145-147, Jan. 1977.
- [20] BENYOUNIS, K.Y., OLABI, A.G., HASHMI, M.S.J., *et al.*, “Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 164, pp. 978-985, 2005.
- [21] LIM, C., TSAI, H., LEE, D.C., *et al.*, “Influence of CO2 laser welding parameters on the microstructure, metallurgy, and mechanical properties of Mg-Al alloys”, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, v. 19, n. 12, pp. 1114, 2012.
- [22] EL-BATAHGY, A., KHOURSHID, A., SHAREF, T., *et al.*, “Effect of laser beam welding parameters on microstructure and properties of duplex stainless steel”, *Materials Sciences and Applications*, v. 2, n. 10, pp. 1443-1451, 2011.
- [23] LOCKE, E., HELLA, R., “Metal processing with a high-power CO2 laser”, *The IEEE Journal of Quantum Electronics*, v. 10, n. 2, pp. 179-185, 1974.
- [24] BAARDSEN, E.L., BISARO, R.E., “High speed welding of sheet steel with a CO2 laser”, *Welding Journal*, v. 52, pp. 227-229, Apr. 1973.
- [25] ION, J.C., *Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application*, 1 ed., New York, Elsevier, 2005.