

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE APORTE TÉRMICO EM JUNTAS SOLDADAS DE AÇO API 5L-X70 COM SOLDA LASER ND: YAG PULSADO

W. R. V Sanitá², willian.sanita@docente.unip.br

V. A. Ventrella¹, ventrella@dem.feis.unesp.br

J. Gallego¹, gallego@dem.feis.unesp.br

¹UNESP – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Departamento de Engenharia Mecânica – Ilha Solteira – São Paulo – Brasil

²UNIP – Universidade Paulista – Instituto de Ciências e Tecnologia – Campus JK – São José do Rio Preto – São Paulo – Brasil

Resumo: Atualmente nossa sociedade encontra-se extremamente dependente dos metais. Em transportes, utensílios domésticos, ferramentas e especialmente construções do modo geral. Desta maneira torna-se tão importante quanto o estudo do metal, também o estudo do processo de fabricação, ou seja, das etapas em que estes metais serão submetidos a transformação. Conduziu-se um estudo da soldagem laser na condição “bead on plate” no aço microligado ARBL API 5L Gr. X70 na forma de chapas com 1,0 x 20 x 120 mm (A x L x P). Realizou-se 12 soldas em atmosfera de gás argônio com fluxo de gás de 15 l/min, diâmetro de feixe de 0,2 mm, ângulo de 90°, taxa de repetição de 9, 8, 7, 6, 5 Hz, velocidade de soldagem de 1 mm/s, profundidades de foco iguais a 0,58 mm abaixo da superfície da peça e energia do pulso (E_p) fixada em 10,0 J. A largura temporal (L_t) foi mantida em 10 ms. O aporte térmico foi variado em 90, 80, 70, 60 e 50 J/mm. Os resultados foram analisados com base na relação entre potência, geometria do cordão de solda e microestrutura. Para revelação dos metais de solda utilizou-se reagente Nital 5%. As medidas de geometria (largura e profundidade) dos cordões de solda foram realizadas através de imagens obtidas em câmera digital em um microscópio óptico comum. Os maiores valores de largura profundidade foram encontrados em maiores valores de potência e largura temporal. As microestruturas das amostras apresentaram formações de ferrita acicular, ferrita alotriomórfica e possíveis elevados teores de martensita no caso das amostras de menor aporte térmico (60 e 50 J/mm). Conclui-se que a soldagem a laser dentre os parâmetros estabelecidos manteve ótimos resultados, tanto em regularidade dos cordões como em boa qualidade superficial. Para estes casos teve-se a relação que em taxas de aporte térmico maiores visualmente a concentração de martensita diminui o que possivelmente contribui para a redução do coeficiente de dureza, enquanto que em taxas de aporte menores a concentração o coeficiente de dureza aumenta.

Palavras Chaves: Soldagem. Laser. Nd:YAG. Aços microligados. Aporte térmico.

1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais nos deparamos com situações atípicas onde necessitamos de flexibilidade e rápida solução para os problemas, principalmente quando o problema está direcionado ao material. A gama de materiais metálicos presentes em nosso cotidiano hoje é muito grande e tende a evoluir cada vez mais com o aumento das pesquisas nesta área². O aço está presente no nosso dia a dia, eletrodomésticos, brinquedos, ferramentas, materiais esportivos, na automobilística, na construção civil, etc¹. Dentre os aços há uma série de aplicações destinadas a cada tipo de liga e composição química específica. Alguns tipos são mais utilizados na metalurgia, outros na automobilística, outros na aeronáutica. Alguns na construção civil, está que pode ser expandida desde uma casa a grandes construções como gasodutos, oleodutos, polidutos e minerodutos⁴. Entre os processos de soldagem, o processo de soldagem a laser pulsado Nd: YAG vêm crescendo bastante ao longo dos anos⁶. Como a flexibilidade e velocidade

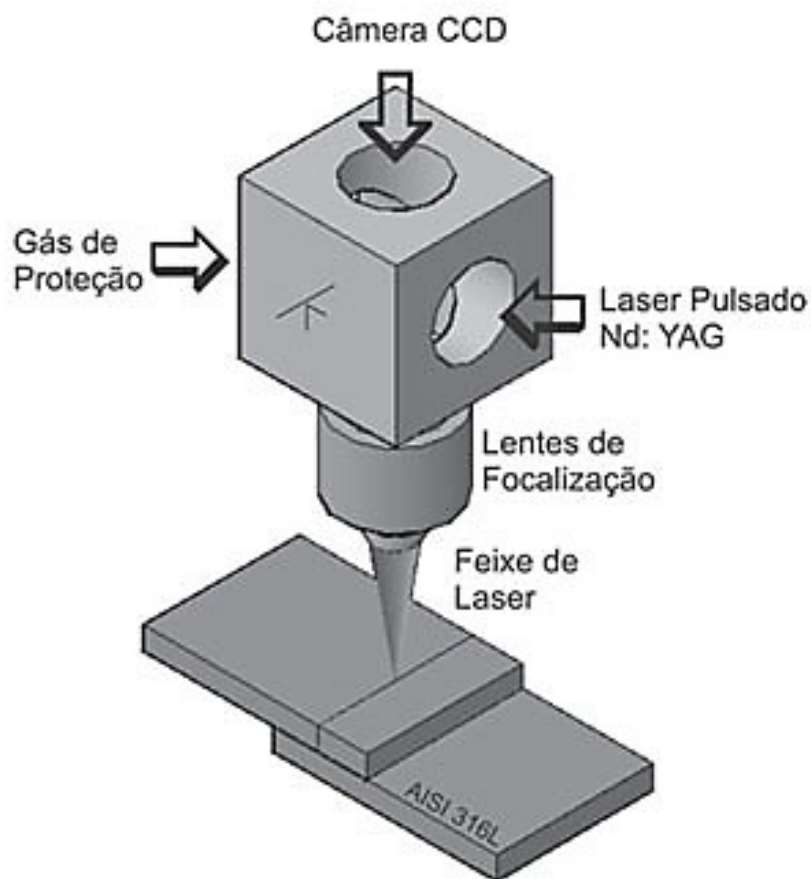
de fabricação estão sendo assuntos em alta da competitividade entre as empresas, este tipo de processo se enquadra perfeitamente as novas exigências do mercado. Este projeto visa estudar o comportamento deste processo em um aço API 5L X70 utilizado no ramo petrolífero onde as exigências de soldagem são mais acirradas.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL (OU PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL)

O presente trabalho de pesquisa foi realizado utilizando um equipamento de soldagem laser Nd: YAG na condição pulsado, cujo arranjo experimental e características podem ser vistos na figura 1 e quadro 1 respectivamente. Utilizou-se argônio como gás de proteção.

O metal base utilizado neste estudo foi o aço API 5L-X70, na forma de chapas de 1,0mm de espessura. As amostras foram cortadas na dimensão de 20mm x 120mm. A composição química do metal base é mostrada na tabela 1. Os resultados experimentais foram analisados com base no aporte térmico, geometria do cordão de solda, microestrutura e presença de descontinuidades e ensaio de microdureza Vickers. As amostras foram preparadas limpas para garantir a mesma condição superficial das chapas e um acabamento homogêneo.

Figura 1 – Diagrama esquemático do sistema de soldagem por laser pulsado de Nd: YAG



Fonte: Vicente A. Ventrella, et. All, 2010⁸

Quadro 1 – Característica da Fonte Laser Nd: YAG pulsada

Características	Valor
Modelo/ Fabricante	UW 150A/ United Winners
Tipo de Laser	Nd: YAG
Comprimento de onda	1064 nm
Potência máxima do laser (fonte)	150 W
Potência de pico (feixe)	7 KW
Energia máxima de pulso	80 J
Largura do pulso	0,5 a 30 ms
Frequência	1 a 300 Hz
Comprimento de onda	1,06µm
Mídia	Nd ³⁺ :Y ₃ Al ₅ O ₁₂ , garnet (sólido)
Sistema de posicionamento	Diodo laser vermelho e câmera CCD

Fonte: Próprio Autor

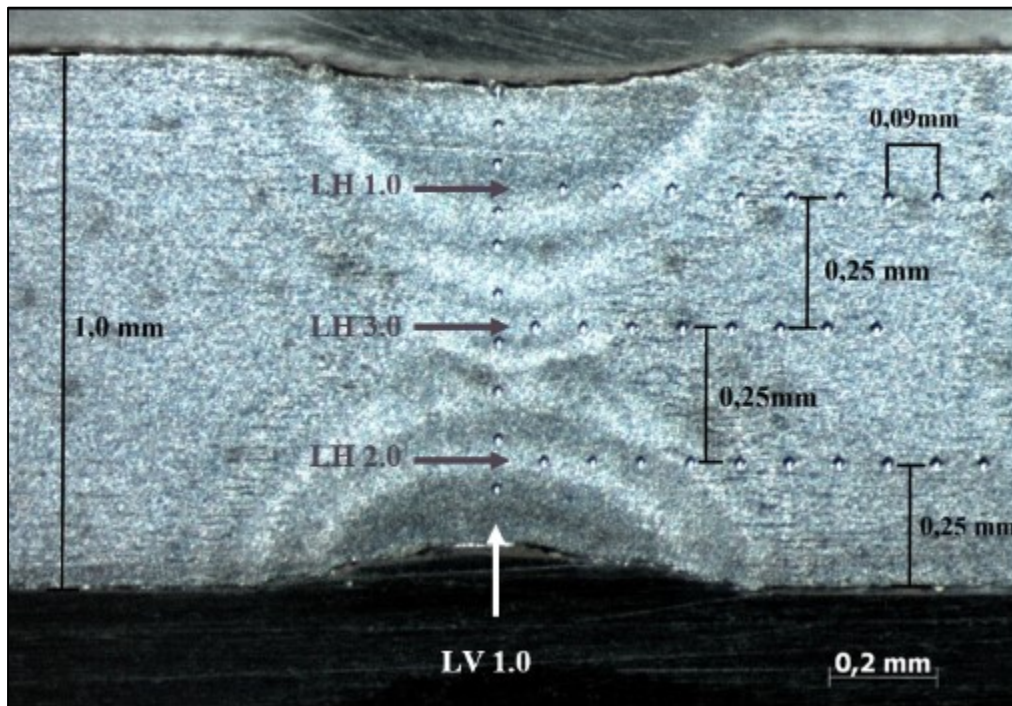
Tabela 1 - Composição química (% em peso) e carbono equivalente (CE), aço API 5L X70

Elem.	C	Mn	P	S	V	Nb	Al	CE
Teor %	0,117	1,49	0,018	0,006	0,020	0,017	0,014	0,37

Fonte: (USIMINAS MECÂNICA, 2012)

Para avaliar a influência do aporte térmico nas características do cordão de solda, as soldas foram realizadas na condição de “bead on plate”. As soldagens foram realizadas autógenas com diâmetro de feixe em 0,2mm e ângulo de 90°, potência de pico de 1 KW e velocidade de soldagem (v) de 1,00 mm/s. A condição do gás argônio em vazão de 15 l/ min foi mantida para todas as amostras. Foi mantida também fixa a largura temporal (tp) de 10ms e energia de pulso (Ep) de 10J. A frequência foi variável, desta forma foi possível obtenção de amostras com *Heat Inputs* (Aportes térmicos) de 50, 60, 70, 80 e 90 J/mm. A soldagem foi realizada nos dois lados. Após soldagem as amostras foram cortadas e preparadas para análise metalográfica da secção transversal do cordão de solda, através do lixamento e polimento das amostras. A revelação da estrutura do cordão foi através de ataque com reagente Nital 5%. As medidas do cordão de solda foram realizadas através de um microscópio ótico e um software de análise de imagem para verificação da taxa de fração volumétrica das microestruturas, comparando o metal base e metal de solda quanto a variação e transformações de fase. As medidas de dureza foram realizadas a partir de um microdurômetro Vickers (HV0,01), utilizando uma carga padrão de 1000 gf, o valor unitário de cada unidade do tambor de medição foi igual a $3,66 \times 10^{-4}$ mm. O valor final de dureza foi obtido através da equação de dureza Vickers padrão, trabalhada com as variáveis específicas do ensaio. Na figura 2 pode ser visto as distâncias e os sentidos adotados na medição de dureza Vickers do metal base e da zona fundida.

Figura 2 – Macrografia do esquemático para o ensaio de microdureza (Amostra SL70)

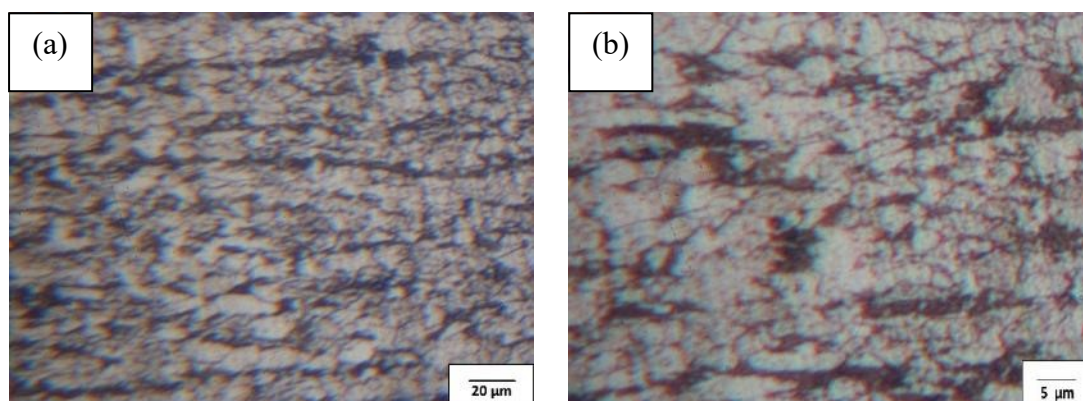


Fonte: Próprio Autor

2.1. Resultado e Discussão

Inicialmente foi realizada uma caracterização do metal base como recebido. A figura 3 mostra micrografias do metal base na direção normal a laminação.

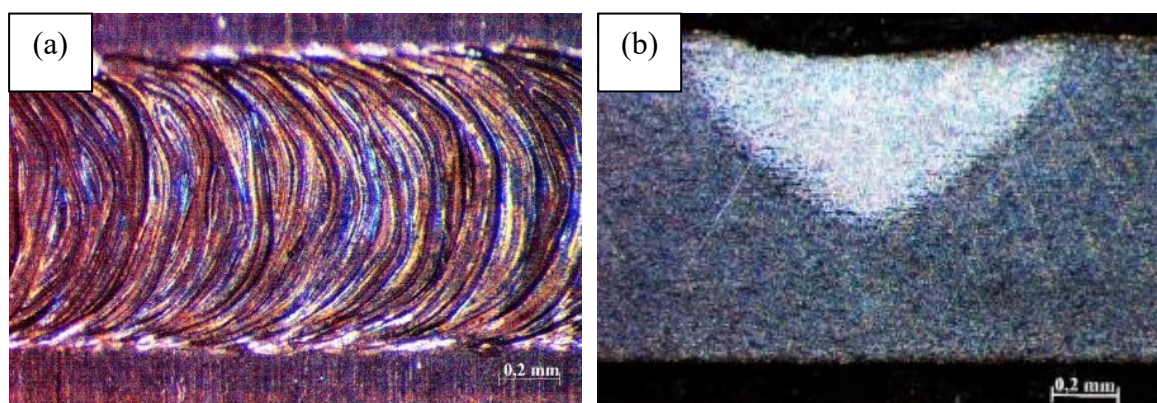
Figura 3 – Micrografias do metal base na direção: normal a direção de laminação



Fonte: Próprio Autor

A figura 4 mostra o cordão de solda realizado na condição de “bead on plate” utilizando energia de pulso de 10J e largura temporal de 10ms

Figura 4 – Macrografia, cordão de solda na condição "bead on plate" (10J – 10ms), vista superior (a), vista de corte transversal (b)



Fonte: Próprio Autor

Na tabela 2 podem ser vistas as classificações das amostras quanto as suas variações de aporte térmico ao qual foi variado a frequência, tendo assim variação dos Heat Input de soldagem.

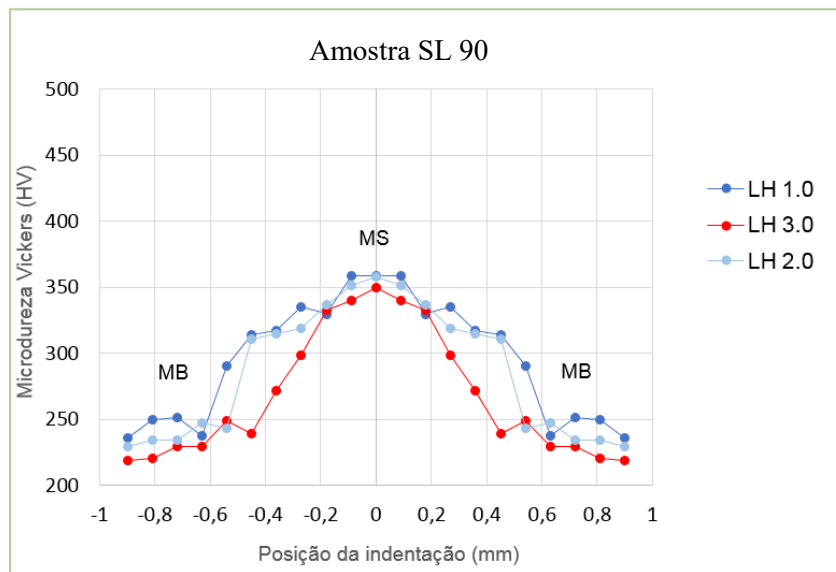
Tabela 2 - Parâmetros de soldagem do aço API 5L X70 com vazão de argônio de 15 l/min

Amostra	Energia Pulso [J]	Largura Temporal [ms]	Aporte Térmico [J/mm]	Taxa de repetição [Hz]	Velocidade soldagem [mm/s]	Potência de Pico (kW)	Profundidade Penetração (~mm)
SL 90	10,0	10,0	90,0	9,0	1,00	1,0	0,585
SL 80	10,0	10,0	80,0	8,0	1,00	1,0	0,576
SL 70	10,0	10,0	70,0	7,0	1,00	1,0	0,555
SL 60	10,0	10,0	60,0	6,0	1,00	1,0	0,545
SL 50	10,0	10,0	50,0	5,0	1,00	1,0	0,538

Fonte: Próprio Autor

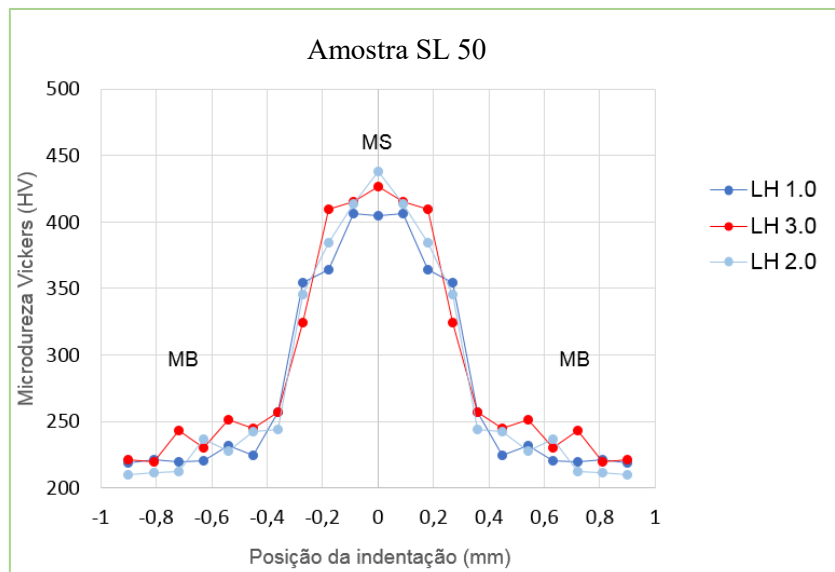
A seguir nas figuras 5 e 6 podem ser vistos resultados de medição de dureza Vickers nas amostras SL 50 e SL 90 nas linhas horizontais (LH), onde pode ser visto maior concentração de dureza nas amostras de menor aporte térmico.

Figura 5 - Impressões de dureza, junta laser e MB, amostra SL 90



Fonte: Próprio Autor

Figura 6 - Impressões de dureza, junta laser e MB, amostra SL 50



Fonte: Próprio Autor

Na tabela 3 pode ser visto os resultados obtidos de dureza nestas linhas horizontais (LH) em média para MB e MS e as medidas obtidas para a ZTA em cada uma das amostras.

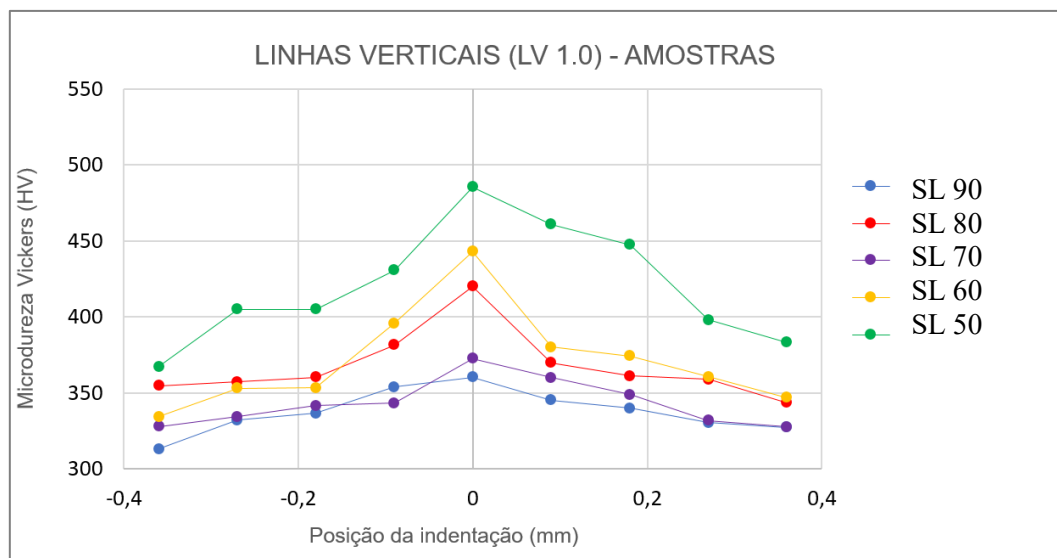
Tabela 3 – Microdureza Vickers – Linhas Horizontais

Amostras	MB			ZTA			MS		
	LH 1.0 (HV)	LH 2.0 (HV)	LH 3.0 (HV)	LH 1.0 (HV)	LH 2.0 (HV)	LH 3.0 (HV)	LH 1.0 (HV)	LH 2.0 (HV)	LH 3.0 (HV)
SL 50	252,91	237,64	236,75	314,21	311,03	298,48	340,01	336,07	340,92
Média (HV)	<u>242,44</u>			<u>307,91</u>			<u>339,00</u>		
SL 60	252,61	258,88	238,43	328,98	319,60	297,24	336,56	354,71	349,27
Média (HV)	<u>249,97</u>			<u>315,27</u>			<u>346,84</u>		
SL 70	227,88	242,65	229,40	350,57	357,34	309,88	365,11	367,36	362,16
Média (HV)	<u>233,31</u>			<u>339,26</u>			<u>364,88</u>		
SL 80	238,60	230,90	230,22	339,5	342,33	348,54	420,48	363,85	389,63
Média (HV)	<u>233,24</u>			<u>343,47</u>			<u>391,32</u>		
SL 90	227,59	226,44	238,01	354,57	345,84	323,99	391,95	412,35	417,49
Média (HV)	<u>230,68</u>			<u>341,47</u>			<u>407,26</u>		

Fonte: Próprio Autor

Na figura 7 pode ser visto gráfico de dispersão traçado para as linhas verticais (LV), referente ao centro do cordão de solda em linha vertical de cada amostra na secção de corte.

Figura 7 – Gráfico de Microdureza Vickers para a região central



Fonte: Próprio Autor

A seguir na tabela 4 pode ser visto os resultados para cada uma das 9 impressões distribuídas ao longo da espessura da chapa, na região central do cordão de solda, juntamente com os valores de média e desvio padrão para cada amostra analisada.

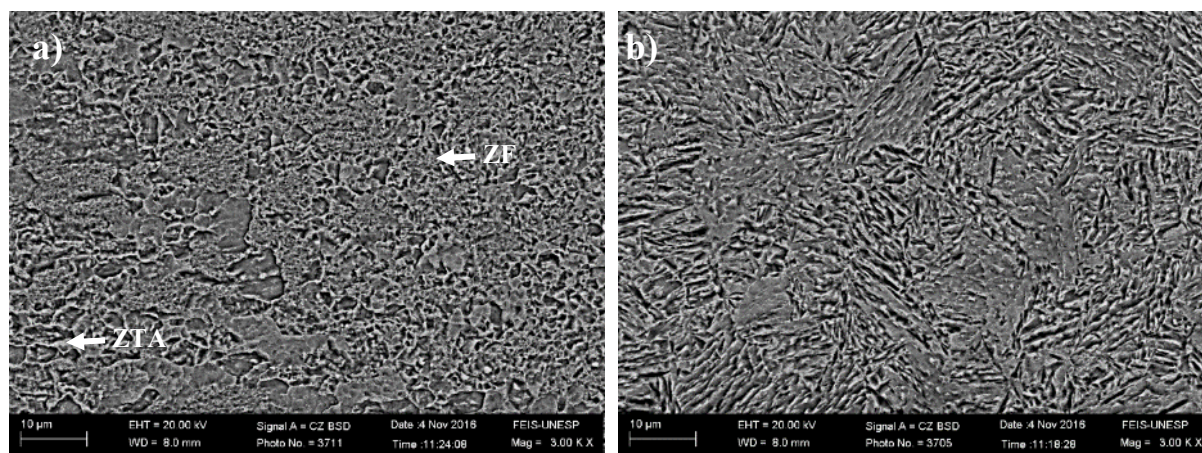
Tabela 4 – Microdureza Vickers região central do cordão (LV 1.0)

MEDIÇÕES	AMOSTRAS				
	SL 50	SL 60	SL 70	SL 80	SL 90
-4	313,20	327,96	354,72	334,33	367,34
-3	332,05	334,23	357,25	353,09	405,07
-2	336,71	341,55	360,26	353,31	405,07
-1	353,91	343,39	381,72	395,92	430,92
0 ¹	360,46	372,67	420,28	443,09	485,53
1	345,37	359,96	369,81	380,35	461,12
2	340,08	349,03	361,26	374,30	447,62
3	330,44	331,74	359,09	360,78	397,98
4	327,41	327,72	343,61	346,89	383,36
MÉDIA (HV)	337,74	343,14	367,55	371,34	420,44
DESVIO PADRÃO	14,30	15,29	22,35	32,75	38,59

Fonte: Próprio Autor

Nas figuras 8 e 9 a) e b) podem ser vistos a micrografia realizada para os cordões de solda das amostras SL 90 e SL 50 respectivamente. Constata-se a formação de ferrita acicular e martensita.

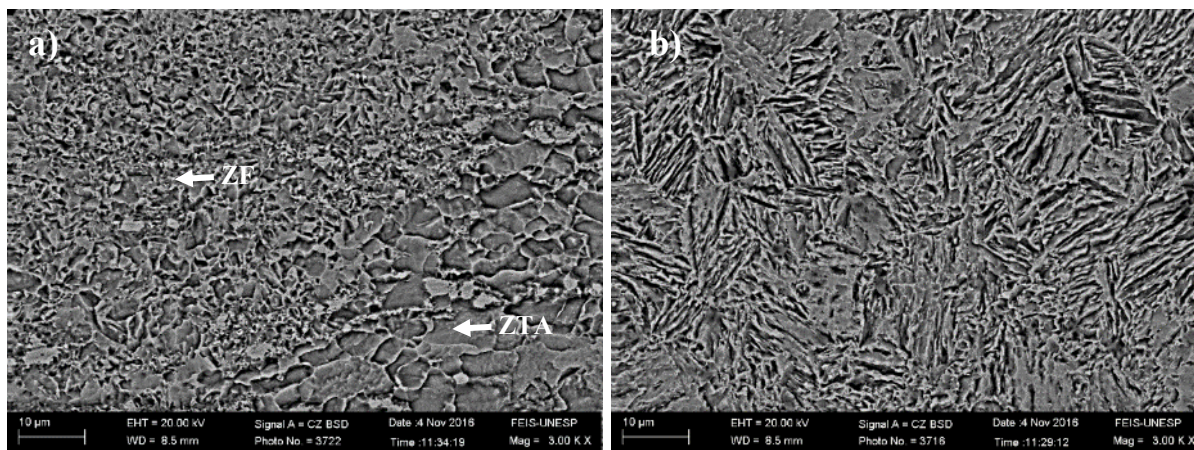
Figura 8 – Micrografia (MEV) do cordão de solda da amostra SL 90, soldado com largura temporal de 10ms e aporte térmico de 90J/min, ZTA (a) e ZF (b)



Fonte: Próprio Autor

¹ A medição 0 representa a impressão realizada no centro da espessura da chapa, as demais foram feitas a partir desta.

Figura 9 – Micrografia (MEV) do cordão de solda da amostra SL 50, soldado com largura temporal de 10ms e aporte térmico de 50J/min, ZTA (a) e ZF (b)



Fonte: Próprio Autor

Nota-se que para as amostras de maior aporte térmico a taxa de concentração em fração volumétrica de martensita é menor.

2.2. Conclusão

- A soldagem laser Nd: YAG do aço API 5L X70 dentre os parâmetros estabelecidos estabelece ótimos resultados tanto em regularidade dos cordões como boa qualidade superficial, onde são poucas as porosidades externas visualizadas;
- Para estes casos teve-se a relação de que em taxas de aporte térmico menores a fração volumétrica de martensita do metal de solda tende a aumentar, onde consequentemente aumenta os valores de dureza para o cordão de solda, podendo estes serem visualizados nos resultados aqui descritos;
 - Provavelmente esta relação de maior concentração de martensita em taxas de aporte térmico menores se dá ao fato do resfriamento ser mais longo do que em taxas de aporte térmico maiores onde a taxa de repetição será maior, formando assim maior concentração de martensita na liga.

3. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro do CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Também a empresa USIMINAS pela doação da chapa metálica para a pesquisa. Também a USP – DEM/ São Carlos e ao professor Alessandro Roger Rodrigues pelo apoio no trabalho. Uma menção também ao Dr. Otavio Villar da Silva Neto pelo seus conselhos e dicas.

4. REFERÊNCIAS

- [1] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE - API. **Specification for line Pipe**: API specification 5L. Washington : [s.n.], 2007.
- [2] AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding metallurgy**: carbon and alloy steels. 4. ed. Miami : Linnert, 1994. v. 1, p. 568-581. 0-87171-457-4.
- [3] BHADESIA, H. K. D. H.; HONEYCOMBE, R. **Steels**: microstructure and properties. 3. ed. [S.l.]: Elsevier, 2006. p. 287-306.
- [4] CALDEIRA, E. A. Desenvolvimento de aços atendendo a norma API 5L, no laminador de tiras a quente da Companhia Siderurgica de Tubarão (CST). In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 6., **Congresso...** Belo Horizonte: [s.n.], 2005. p. 60.
- [5] CUDDY, L. J. **The Effect of microalloy concentration on the recrystallisation of austenite during hot deformation**: thermomechanical processing of microalloyed austenite. Warrendale: TMS, 1982. p. 129-140.

- [6] KATAYAMA, S. **Handbook of laser welding technologies**. [S.l.] : Woodhead Publishing Limited, 2013. p. 30-631. p. 41.
- [7] METALS HANDBOOK. **Welding, brazing, and soldering**. 9. ed. New Jersey:[s.n.], 1983. v. 6, p. 180-2873, 473-2873.
- [8] VENTRELLA, V. A. Análise comparativa dos processos de soldagem arame tubular e eletrodo revestido na soldagem do aço API 5L X70. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO-COBEF, 2., 2007, Estância de São Pedro. **Congresso...** Estância de São Pedro: ABCM, 2007. p 14.

5. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

ANALYSIS OF THE VARIATION OF HEAT INPUT IN WELDED JOINTS OF API 5L-X70 STEEL WITH PULSED ND: YAG LASER WELDING

W. R. V Sanitá², willian.sanita@docente.unip.br
V. A. Ventrella¹, ventrella@dem.feis.unesp.br
J. Gallego¹, gallego@dem.feis.unesp.br

¹UNESP – University of Engineering of Ilha Solteira – Mechanical Engineering Department – Ilha Solteira – São Paulo – Brazil

²UNIP – Universidade Paulista – Institute of Science and Technology – JK Campus – São José do Rio Preto – São Paulo - Brazil

Abstract: *Our society is now extremely dependent of metals. In transport, household appliances, tools and especially buildings in general. In this way it becomes as important as the study of the metal, also the study of the manufacturing process, that is, of the stages in which these metals will undergo transformation. A laser welding study was conducted on the "bead on plate" condition in ARBL API 5L Gr. X70 micro alloyed steel in the form of sheets with 1.0 x 20 x 120 mm (A x L x P). 12 welds were performed in an argon gas atmosphere with gas flow of 15 l / min, bore diameter of 0.2 mm, angle of 90 °, repetition rate of 9, 8, 7, 6, 5 Hz, speed of welding of 1 mm / s, depths of focus equal to 0.58 mm below the surface of the part and pulse energy (Ep) set at 10.0 J. The temporal width (Lt) was maintained at 10 ms. The thermal input was varied at 90, 80, 70, 60 and 50 J / mm. The results were analyzed based on the relationship between power, weld bead geometry and microstructure. For the development of the solder metals, 5% Nital reagent was used. The measurements of the geometry (width and depth) of the weld beads were made through images obtained in a digital camera under a common optical microscope. The largest values of depth width were found at higher values of power and temporal width. The microstructures of the samples presented formations of acicular ferrite, allotriomorphic ferrite and possible high martensite contents in the case of samples with the lowest thermal input (60 and 50 J / mm). It is concluded that the laser welding of the established parameters maintained excellent results, both in the regularity of the cords and in good surface quality. For these cases the relation was observed that in thermal contribution rates visually the concentration of martensite decreases which possibly contributes to the reduction of the coefficient of hardness, whereas in rates of contribution smaller the concentration the coefficient of hardness increases.*

Keywords: *Welding. Laser. Nd: YAG. Micro alloyed steels. Thermal input.*