


Avaliação das propriedades mecânicas e metalúrgicas de tubo de aço carbono com costura para aplicações industriais

Sebastião José de Souza¹ 
Carlos Roberto Camello Lima^{1*} 

Resumo

Tubos de aço devem atender às exigências para o uso, especialmente para suportar tensões mecânicas a que a estrutura será submetida. No processo de fabricação dos tubos, após a conformação, os tubos são soldados, em geral pelo processo por resistência elétrica (ERW) e devem atender a exigências normativas. Neste trabalho, foram avaliadas três diferentes condições de soldagem para a fabricação de tubos de aço a partir de chapa AMT TUB 235, variando-se a potência e a velocidade de soldagem. As amostras soldadas foram avaliadas quanto ao achatamento, alargamento, dureza, resistência à tração e microestrutura. Os ensaios mostraram que a condição de maior potência e maior velocidade apresentou os melhores resultados nas propriedades mecânicas e metalúrgicas.

Palavras-chave: Conformação mecânica; Ensaios mecânicos; Tubos com costura.

Evaluation of mechanical and metallurgical properties of seam carbon steel pipe for industrial applications

Abstract

Steel tubes must meet specific requirements for use, especially to withstand mechanical stresses to which the structure will be subjected. In the tube manufacturing process, after forming, the tubes are welded, generally using the electrical resistance welding process (ERW) and must meet regulatory requirements. In this work, three different welding conditions were evaluated for the manufacture of steel tubes from AMT TUB 235 sheet, varying the power and welding speed. The welded samples were evaluated for flattening, widening, hardness, tensile strength, and microstructure. The tests showed that the condition of higher power and higher weld speed presented the best results in mechanical and metallurgical properties.

Keywords: Mechanical forming; Mechanical tests; Welded pipes.

1 Introdução

O aço é uma liga ferro-carbono que se encontra presente de forma expressiva no cotidiano da sociedade [1,2]. São encontrados nessa liga, também, níquel, tungstênio, manganês, cromo, fósforo, enxofre entre outros elementos e resíduos resultantes do processo de fabricação [3,4].

Tubos de aço são utilizados em diversas aplicações, como na indústria moveleira, construção civil, sucroalcooleira, autopeças, entre outras. Os tubos devem atender às exigências para o uso, especialmente para suportar tensões mecânicas a que a estrutura será submetida. Os tubos são, em geral, conformados a partir de chapas de aço de características apropriadas aos requisitos funcionais. A conformação de tubos como um processo de dobragem contínua, que consiste na passagem de uma chapa plana por múltiplos pares de

rolos, onde a chapa progressivamente vai tomando forma tubular sem alteração de sua espessura e a temperatura ambiente. O processo tem grande flexibilidade pois podem ser conformados perfis de variadas formas e complexidade [5,6].

No processo de fabricação, após a conformação, os tubos são soldados pelo processo de resistência elétrica ERW (Electrical Resistance Welding). Este processo tem as vantagens de alta eficiência de produção, baixo custo, alta precisão dimensional e fácil automação [7]. Na soldagem ERW, a corrente elétrica necessária para o aquecimento é transmitida para o metal a ser soldado por meio de uma bobina de indução, que envolve o metal sem tocá-lo [8]. A operacionalização da soldagem de tubos é realizada longitudinalmente pelo topo. A bobina de indução envolve o tubo na parte aberta, um

¹Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, Brasil.

*Autor correspondente: carlos.lima@mackenzie.br



pouco afastada dos rolos de pressão. A corrente é induzida na superfície do tubo, abaixo da bobina, exceto na parte aberta do tubo. A principal vantagem da soldagem por indução advém do aquecimento localizado da superfície, resultando em uma zona termicamente afetada (ZTA) muito estreita, normalmente não necessitando tratamento térmico posterior. O aquecimento extremamente localizado, limita a oxidação e a distorção, evitando o aquecimento do material próximo à solda. O processo ERW aplicado a tubos (Figura 1) é realizado com solda contínua longitudinal com baixa frequência, podendo haver a variação para o processo de alta frequência, chamado HFIW (High-Frequency Induction Welding) [9,10].

Tanto no processo de conformação, como especialmente na soldagem, é primordial evitar o surgimento de defeitos, como a iniciação e propagação de trincas. Caso ocorram, pode-se ter propagação ao longo de grandes extensões, levando a falhas catastróficas [11]. Nesse contexto, é necessário realizar a avaliação do comportamento mecânico de tubos de aço soldados. Com base nas dimensões dos tubos estudados, avaliam-se propriedades mecânicas, como Limite de Escoamento, Resistência à Tração, entre outros. Adicionalmente, sendo a solda a característica mais importante do tubo com costura, é natural que receba a maior atenção possível dos operadores e inspetores envolvidos, sendo, portanto, importante avaliar as características e propriedades metalúrgicas das soldas executadas. Mesmo com a grande evolução da metalurgia deste tipo de aço nas últimas décadas, o desafio é restringir o surgimento de defeitos oriundos de processos fabris relacionados à microestrutura dos materiais.



Figura 1. Medição realizada após o ensaio de alargamento da Amostra 1.

O objetivo do presente trabalho é avaliar as propriedades de tubos de aço carbono com costura aplicados na indústria automotiva em função da variação nos parâmetros de soldagem. São avaliadas a dureza, limite de escoamento, limite de resistência, alongamento e, adicionalmente, o alargamento e o achatamento dos tubos soldados, apoiados pela análise da microestrutura formada.

2 Materiais e métodos

Tubos com diâmetro de 33,7 mm e 3,35 mm de espessura foram fabricados a partir de chapas em aço estrutural AMT TUB235, laminado a frio, soldados por indução pelo processo ERW (Electrical Resistance Welding), em conformidade com a norma ABNT NBR 6591 [12]. Os tubos foram conformados numa máquina formadora MT-01 TH Lemont. Foram executados ensaios normativos de achatamento - ABNT NBR 6154 [13], ensaio de alargamento - ABNT NBR 16261 [14], medição de dureza Rockwell - ABNT NBR ISO 6508-1 [15], ensaio de tração ABNT NBR 6673 [16] e análise metalográfica, utilizando microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura. Os parâmetros utilizados para a soldagem dos tubos foram variados em três condições de velocidade do processo e potência, como discriminado na Tabela 1.

Foram, ainda, realizadas medições a fim de verificar o comportamento da dureza nas regiões envolvidas no processo de soldagem. Foram medidas as durezas nestas regiões de maneira sistemática, desde o metal base, até a zona fundida, passando pela ZTA. Foram realizadas cinco medidas em cada uma das três regiões, metal base, ZTA e zona fundida. As medições foram realizadas no sentido do diâmetro externo para o diâmetro interno. Devido a região da ZTA ter se apresentado relativamente pequena, com espessura próxima de 3,35 mm, e à espessura reduzida da seção transversal do tubo, foi considerada mais eficiente a medição através do método de microdureza Vickers. A carga utilizada no ensaio foi de 500 gr. Os resultados são apresentados pelo valor médio em cada região, afastadas em 0,30 mm entre uma medida e outra.

3 Resultados e discussões

3.1 Propriedades mecânicas da matéria prima

A composição química e propriedades mecânicas do aço AMT TUB235 da matéria prima em aço plano usado para

Tabela 1. Parâmetros de Velocidade e Potência utilizados na soldagem ERW

Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Velocidade (m/min)		Potência (KW)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
33,70	3,35	20	100	30	160
	Amostra 1		35		90
	Amostra 2		36		93
	Amostra 3		39		96

Tabela 2. Análise Química e das Propriedades Mecânicas da Matéria Prima TUB 235

Composição Química (% máx.)					Propriedades Mecânicas		
C	Mn	Si	P	S	Limite de Escoamento (MPa mín.)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (% mín.)
0,10	0,46	0,008	0,019	0,007	304	422	31

Tabela 3. Resultado do Ensaio de Tração do Tubo com Costura

	Limite de Escoamento (MPa mín.)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento (% mín.)
Requisitos Normativos do Grau	390	414	24
Amostra 1	379	405	40
Amostra 2	383	403	40
Amostra 3	372	400	44

a fabricação da amostra, conforme certificado do fornecedor, são apresentadas na Tabela 2.

3.2 Propriedades mecânicas do tubo com costura

Os resultados referentes às propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração dos tubos são apresentados na Tabela 3.

Na Tabela 3, observa-se um aumento significativo no LE dos tubos em relação à amostra da chapa. Isto ocorre devido ao encruamento do material durante a formação do tubo, elevação da dureza devido à deformação plástica quando deformados a frio. O material resiste cada vez mais à tração externa, exigindo uma tensão cada vez maior para se deformar. Os resultados do alongamento (AL), apresentados na Tabela 3, excedem o valor mínimo de referência em mais de 80%. Pela norma AMT TUB235, o valor mínimo é determinado como 24%. A amostra 3 apresentou um valor de alongamento 10% maior que as demais amostras.

3.3 Ensaio de alargamento

Os resultados do ensaio de alargamento para os tubos são apresentados na Tabela 4, sendo ilustrado tipicamente na Figura 1. O maior alargamento foi para a amostra 3 e o menor para a amostra 1, porém todas as amostras mostram alargamento acima do mínimo requerido por norma.

Mesmo considerando-se que todos as amostras podem ser aceitas com referência às exigências normativas, pode-se perceber um alargamento cerca de 10 a 15% superior para as amostras 2 e 3 em relação à amostra 1.

3.4 Ensaio de achatamento

Os resultados do ensaio de achatamento para os tubos são apresentados na Tabela 5, com ilustração típica na Figura 2. Todas as amostras resultaram isentas de trincas nos ensaios, tendo sido assim aprovadas de acordo com a norma específica.

Tabela 4. Resultado do ensaio de alargamento dos tubos

	Alargamento (mm)
Referência (mínimo)	38,76
Amostra 1	45,05
Amostra 2	49,20
Amostra 3	52,00

Tabela 5. Ensaio de Achatamento

Diâmetro (33,70 mm)	Posição da Solda		Resultado
	9 horas	12 horas	
Amostra 1	Sem trincas	Sem trincas	Aprovado
Amostra 2	Sem trincas	Sem trincas	Aprovado
Amostra 3	Sem trincas	Sem trincas	Aprovado

**Figura 2.** Ensaio de Achatamento 12 horas com o tubo levado ao estado limite para verificar a resistência da solda.

3.5 Metalografia da solda

Os resultados do ensaio de metalografia para os tubos soldados nas três diferentes condições não mostraram diferenças significativas. A imagem mostrada na Figura 3 é representativa das três condições.

Na Figura 3, é possível confirmar a formação geométrica em formato de ampolheta, identificando a solda com uma compressão ideal.

3.6 Análise microestrutural da solda

Apesar da relativamente pequena espessura de parede do tubo, observa-se, na Figura 4, a fusão da junta soldada e a transformação de grãos, típica para as diferentes amostras.

As Figuras 5 e 6 mostram as características microestruturais das amostras para as diferentes condições

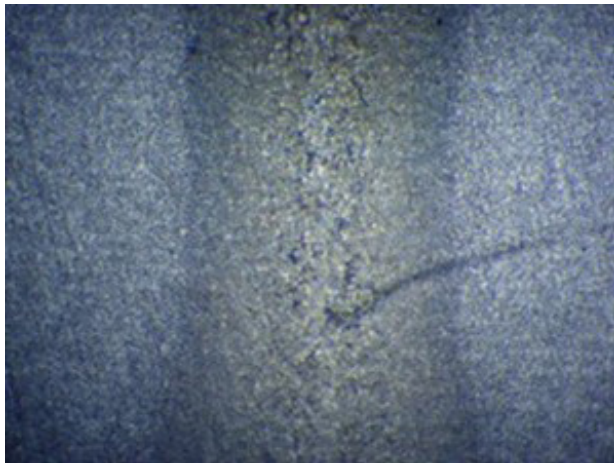


Figura 3. Imagem de microscopia ótica mostrando a segregação de carbono e a Zona Termicamente Afetada (ataque de Nital 3%).

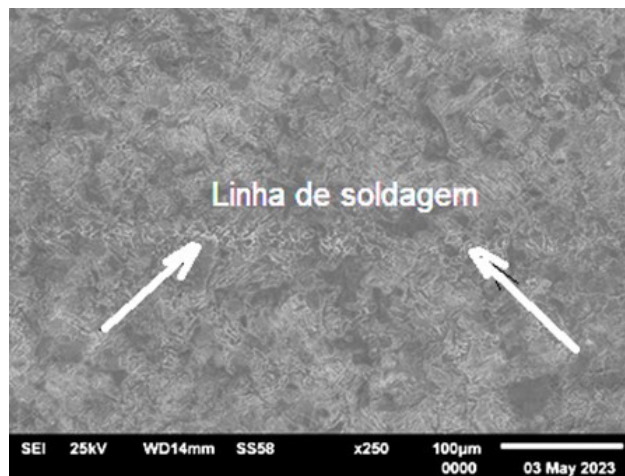


Figura 4. Imagem de MEV da junta soldada da amostra 1.

de soldagem. É possível perceber o aumento dos tamanhos de grão do substrato na região análoga à solda para todas as amostras, independente das condições de soldagem utilizadas. Não há aparente diferença entre as três condições de soldagem

A Figura 6 mostra as imagens na região da solda para as diferentes amostras.

Pode-se observar que não há alteração relevante na microestrutura e fases presentes para as três condições de soldagem. A estrutura é basicamente martensítica revenida com ilhas de ferrita. Os grãos apresentam uma forma mais alongada, quando comparados com a região do substrato na Zona Termicamente Afetada. A microestrutura na região da solda é mostrada em maior ampliação na Figura 7. Pode-se, então, perceber uma maior homogeneidade na solda da amostra 3, na condição de maior aporte térmico.

3.7 Microdureza na região da solda

As medidas de dureza na região soldada são apresentadas na Tabela 6. As medições foram realizadas no sentido do diâmetro externo para o diâmetro interno. Os valores de microdureza apresentados na região da solda revelam eficiência do processo de soldagem por resistência elétrica ERW. Tais resultados podem ser explicados pela equivalência nos tamanhos dos grãos resultantes do processo de soldagem. Em outras palavras, observa-se que a região da solda apresenta homogeneidade, pois a dureza apresentada pela Tabela 6 é referente às corridas feitas na linha de solda e na zona termicamente afetada (ZTA) e apresentaram um desvio padrão pequeno em relação aos outros ensaios. Novamente, constata-se a presença de microestrutura martensítica revenida com ilhas de ferrita (relacionadas à porcentagem de carbono de 0,10%) em todas as regiões analisadas (material-base, ZTA e linha de solda). A maior microdureza é verificada para a amostra 3 na região da zona fundida e na área do metal base, e praticamente em toda a região da ZTA. Microdurezas similares, variando de 180 a 207 HV forma reportadas para o metal base e ZTA, respectivamente [17].

A observação que se faz ao aumento da microdureza na região da Zona Fundida ou Linha de Solda está relacionada à microestrutura, modificada pelo processo de soldagem. A Figura 8 mostra uma imagem típica das medidas de microdureza realizadas na região soldada.

Tabela 6. Valores obtidos para ensaio de dureza na linha da solda (HV)

Regiões	Zona Fundida			ZTA		Metal Base	
Distância	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,90	2,20
Amostra 1	229	200	193	203	181	171	162
Amostra 2	222	200	193	218	212	173	163
Amostra 3	208	220	198	207	217	198	187

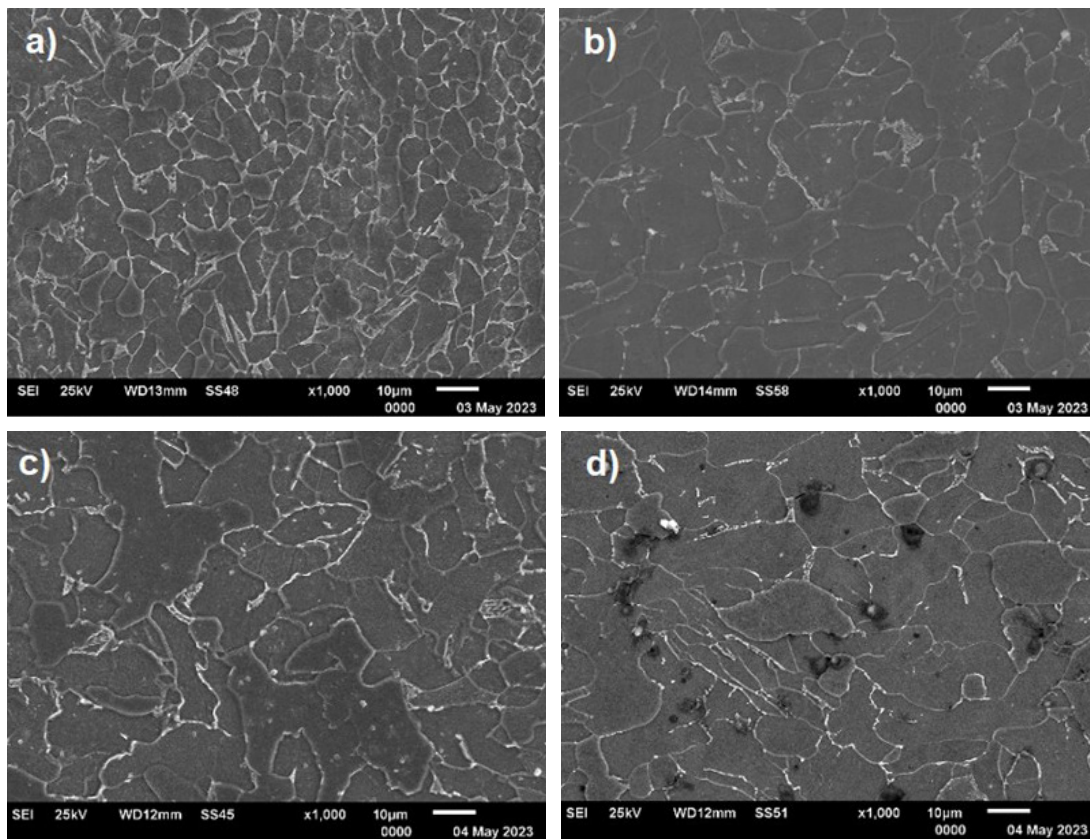


Figura 5. Imagens por MEV do substrato próximo à solda para as amostras (a) sem solda; (b) amostra 1; (c) amostra 2; (d) amostra 3.

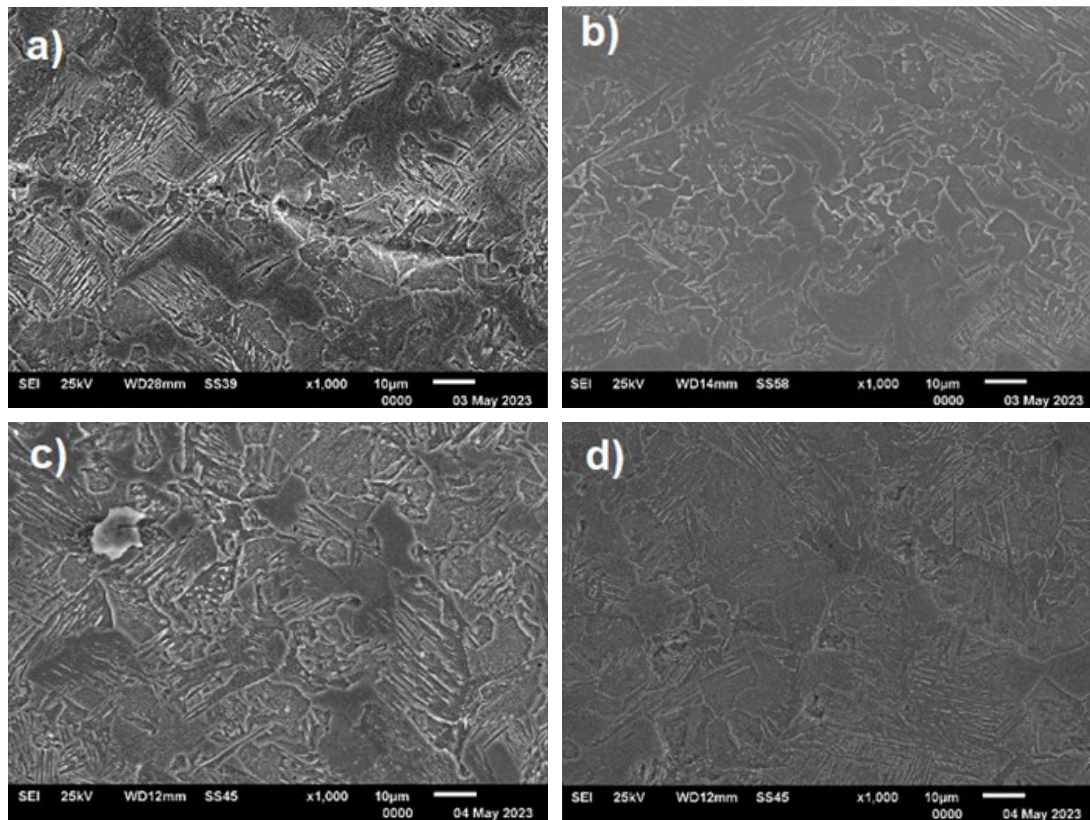


Figura 6. Imagens por MEV da solda para as amostras (a) sem solda; (b) amostra 1; (c) amostra 2; (d) amostra 3.

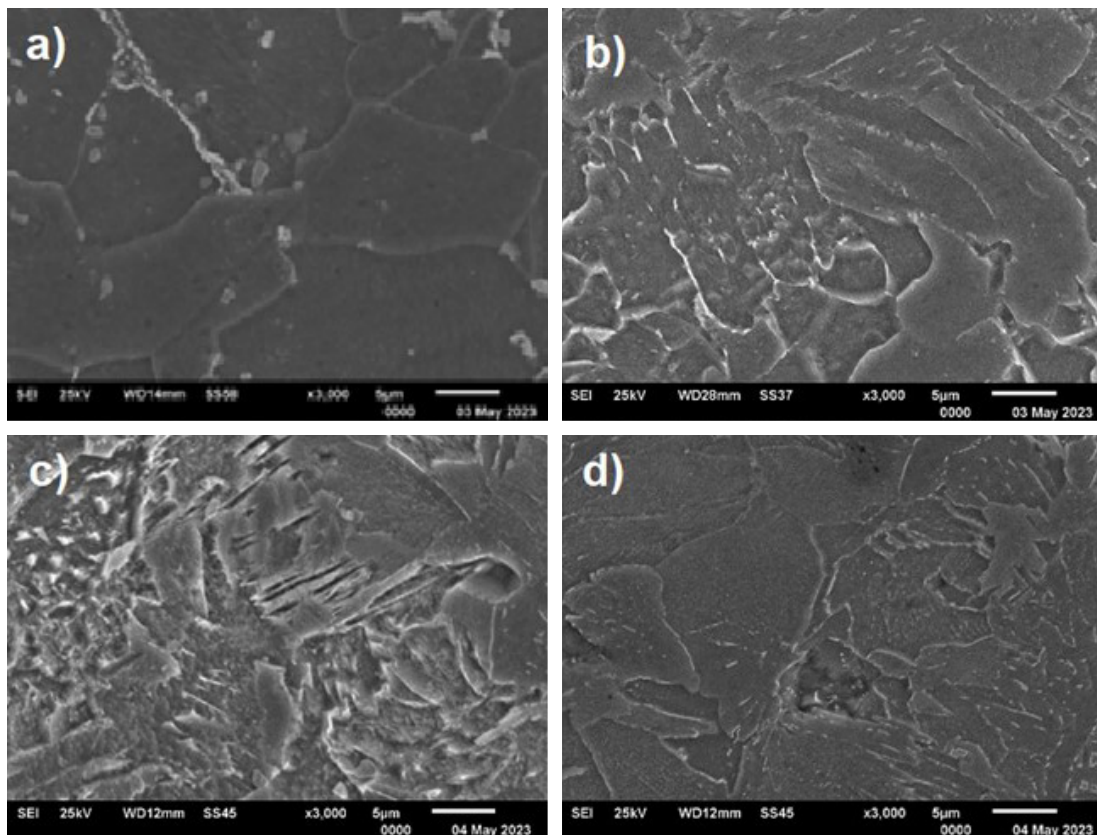


Figura 7. Imagens por MEV da solda ampliadas para as amostras (a) matéria prima; (b) amostra 1; (c) amostra 2; (d) amostra 3.

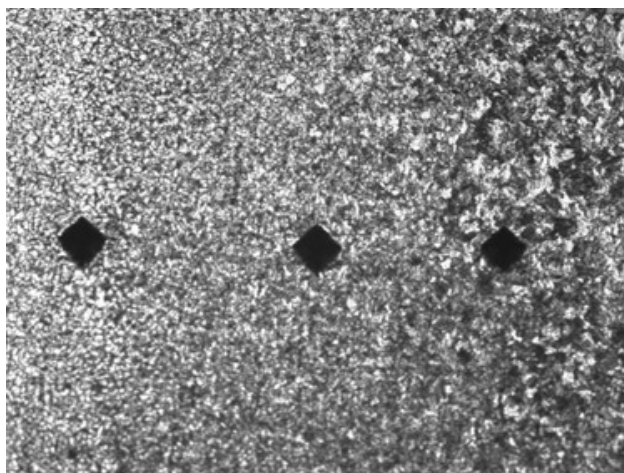


Figura 8. Impressão da microdureza na seção da solda.

4 Conclusões

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se apresentar as seguintes conclusões:

- A variação nas condições de soldagem não alterou a microestrutura da zona termicamente afetada (ZTA), apresentando uma microestrutura com textura bruta de fusão, formando uma fração de agulhas de ferrita

no centro da solda e perlita esboroadá próximo ao limite da faixa aquecida;

- A faixa de variação utilizada para as condições de soldagem permitiu obter homogeneidade microestrutural em todas as diferentes condições, não evidenciando impurezas ou interposição de óxidos na linha do aquecimento;
- As condições de soldagem com maior potência e maior velocidade apresentaram os melhores resultados. A amostra 3, de maior aporte térmico, foi a que mostrou maior alongamento, 10% maior que as outras condições;
- A soldagem com maior potência e maior velocidade apresentou, ainda, o maior alargamento. Foi também a que apresentou menor limite de resistência, porém na faixa de 1% de redução, como também o menor limite de escoamento, na ordem de 2% de redução.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, 2021.

Referências

- 1 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. ABNT NBR 11888: bobinas e chapas finas a frio e a quente de aço carbono e de aço de alta resistência e baixa liga: requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT; 2015.
- 2 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. ABNT NBR 11889: bobinas e chapas grossas de aço carbono e de aço de baixa liga e alta resistência. Rio de Janeiro: ABNT; 2015.
- 3 Chiaverini V. Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. São Paulo: Associação Brasileira de Metais; 2002.
- 4 Silva ALVC, Mei PR. Aços e ligas especiais. 3ª ed. São Paulo: Blücher; 2010.
- 5 Halmos GT. Roll forming handbook. Boca Raton: CRC Press; 2005.
- 6 Bidabadi BS, Moslemi Naeini H, Salmani Tehrani M, Barghikar H. Experimental and numerical study of bowing defects in cold roll-formed, u-channel sections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016;118:243-253. <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.11.007>.
- 7 Duan CH, Cao XK, Zhao MH, Luo XP. Research on deformation prediction method of laser melting deposited large-sized parts based on inherent strain method. *Key Engineering Materials*. 2021;871:65-72. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.871.65>.
- 8 Marques PV. Soldagem: fundamentos e tecnologia. Belo Horizonte: UFMG; 2005.
- 9 Marques PV, Modenesi PJ, Bracarense AQ. Soldagem: fundamentos e tecnologia. 3ª ed. Belo Horizonte: UFMG; 2011.
- 10 Tian P, Xu K, Lu G, Qiao G, Liao B, Xiao F. Evaluation of the mechanical properties of the x52 high frequency electric resistance welding pipes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2018;165:59-67. <http://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2018.06.006>.
- 11 Silva MC. Determinação experimental da tenacidade à fratura da zona termicamente afetada de junta soldada de aço API 5L X80 [tese]. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo; 2009.
- 12 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. ABNT NBR 6591: Tubos de aço carbono com soldas longitudinal de seção circular, quadrada, retangular e especial para fins industriais. Rio de Janeiro: ABNT; 2008.
- 13 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. ABNT NBR 6154: Tubos de aço de seção circular ensaio de achatamento. Rio de Janeiro: ABNT; 2015.
- 14 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. ABNT NBR 16261: tubos de aço: ensaio de alargamento. Rio de Janeiro: ABNT; 2014.
- 15 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. ABNT NBR ISO 6508-1: materiais metálicos: ensaio de dureza Rockwell. Parte 1: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT; 2019.
- 16 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. ABNT NBR 6673: produtos planos de aço: determinação das propriedades mecânicas à tração. Rio de Janeiro: ABNT; 1981.
- 17 Luo J, Zhao X, Liu M, Luo S, Hu M, Wu G, et al. Influence of boss-backing welding to ERW pipe. *Materials Research Express*. 2021;8(5):056517. <http://doi.org/10.1088/2053-1591/ac0013>.

Recebido em: 2 Jun. 2023

Aceito em: 21 Abr. 2024