



UFSC



JESTA
Journal of Exact Sciences and Technological Applications



ISSN 2965-694X
ACESSO ABERTO

JESTA, Cachoeira do Sul, v. 3, p. 01-08, e92112, 2025 • <https://doi.org/10.5902/2965694X92112>
Submissão: 20/05/2025 • Aprovação: 29/08/2025 • Publicação: 01/12/2025

Aplicações Tecnológicas

Soldagem por fricção linear em aço API 5L X65 PSL2

Linear friction stir welding in API 5L X65 PSL2 steel

Eduardo Colombelli da Rosa^I , Guilherme Vieira Braga Lemos^I ,
Marcio Medeiros de Magalhães^{II} , Jonas Trento Buzzatti^{II} ,
Diogo Trento Buzzatti^{II} , Afonso Reguly^{II} , Fabiano Dornelles Ramos^{III}

^IUniversidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS, Brasil

^{II}Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

^{III}Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Cachoeira do Sul, RS, Brasil

RESUMO

O processo de soldagem por fricção linear (*linear friction welding*, LFW) foi aplicado ao aço de alta resistência baixa liga (ARBL) API 5L X65 PSL2e uma caracterização da junta soldada foi realizada. Neste estudo, análises metalográficas foram executadas com microscopia ótica para verificar a microestrutura, enquanto as propriedades mecânicas foram avaliadas por meio de ensaio de microdureza. Este processo de união no estado sólido foi eficaz na liga API X65 PSL2, onde a junta não apresentou defeitos e mostrou maiores valores de microdureza em comparação ao metal de base, indicando uma melhoria nas propriedades mecânicas do aço após a soldagem.

Palavras-chave: Soldagem por fricção linear; Aço API X65; Microestrutura; Propriedades mecânicas

ABSTRACT

Linear friction welding (LFW) was applied to low alloy high-strength (HSLA) API 5L X65 PSL2 steel, and a characterization of the welded joint was performed. In this study, metallographic analyses were carried out by optical microscopy to verify the microstructure, while the mechanical properties were evaluated by a microhardness test. This solid-state joining process was effective in the API X65 PSL2 steel, where the welded joint showed no defects and higher microhardness as compared to that of the base material, indicating an improvement in the steel's mechanical properties after LFW.

Keywords: Linear friction welding; API X65 steel; Microstructure; Mechanical properties



Artigo publicado por JESTA sob uma licença CC BY-NC 4.0.



INTRODUÇÃO

O aço API 5L X65, considerado um aço alta resistência baixa liga (ARBL), é aplicado extensivamente em dutos rígidos destinados ao transporte de óleo e gás, com destaque para a indústria do petróleo e, em especial, nos campos de exploração em águas profundas. Em geral, este aço apresenta teores de carbono entre 0,10% e 0,18% e elementos de liga como manganês, nióbio e vanádio, conferindo-lhe notável resistência mecânica e ductilidade [1]. Além disso, como a indústria está sempre em busca de inovações, novas aplicações para este aço podem considerar torres de turbinas eólicas, suportes de painéis solares, entre outros.

A soldagem com fusão (arco elétrico) é destaque como um dos principais métodos de união de materiais metálicos ferrosos e não ferrosos, desempenhando papel crucial na manufatura e manutenção de estruturas e componentes. Os processos de soldagem baseados na fusão, como a soldagem MIG/MAG, TIG, eletrodo revestido, arco submerso e até mesmo processos de manufatura aditiva como a fusão seletiva a laser (*selective laser melting*), promovem o aquecimento do material até a temperatura de fusão, muitas vezes utilizando metais de adição. Em contrapartida, a soldagem por fricção linear, como uma variação do processo de união no estado sólido *friction stir welding* (FSW), oferece diversas vantagens como a redução das tensões residuais trativas (e a consequente distorção), sem a necessidade de metal de adição, a possibilidade de soldagem de ligas distintas (dissimilares), a diminuição da zona afetada pelo calor (ZAC), o risco atenuado de formação de trincas induzidas por hidrogênio, a ausência de porosidade e a prevenção da formação de microestrutura colunar/dendrítica prejudicial [2, 3, 4, 5, 6].

O presente trabalho dedica-se à análise da união de duas seções de aço X65 através do processo de soldagem por fricção linear. Portanto, essa investigação compreende uma análise microestrutural e de propriedades mecânicas (através do ensaio de microdureza), visando a verificação da qualidade da solda produzida.



MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, foram utilizadas duas seções de aço API X65, com dimensões de 15 mm de largura, 45 mm de comprimento e 6 mm de espessura para a soldagem. A composição química verificada foi: 0,098% C, 1,41% Mn, 0,009% P, 0,003% S, 0,264% Si, 0,07% Cr, 0,051% Mo, 0,015% Ni e 0,026% V. Estes dados foram comparados com o padrão da norma API 5L^[7] e estavam em conformidade. O carbono equivalente (CE), calculado de acordo com a Equação 1, foi de 0,189 e estava dentro dos limites exigidos (CE=0,25 para o grau PSL2).

O processo de soldagem foi executado na máquina denominada MFL (Máquina de Fricção Linear), desenvolvida no LAMEF/UFRGS especificamente para a união de risers de armadura de tração de tubos flexíveis. A Figura 1 ilustra a máquina MFL, que possui capacidade de operar com frequência de até 100 Hz e aplicar força máxima de 25 kN. Os parâmetros de processo empregados neste trabalho foram: frequência de 30 Hz, taxa de aplicação de força de 0,1 kN/s e um consumo de 7,4 mm.

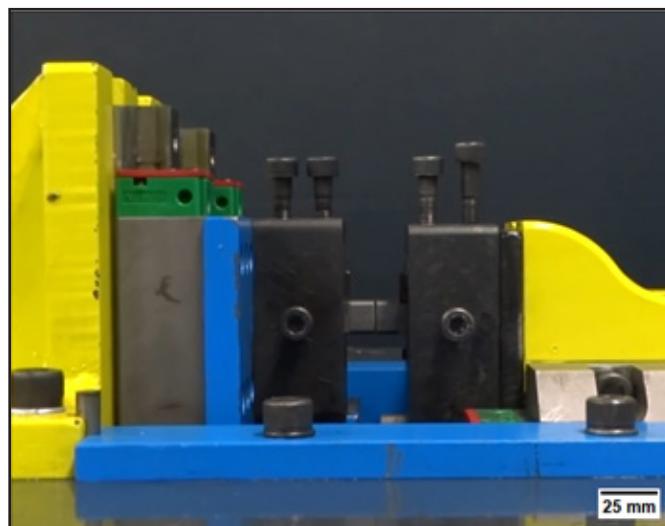


Figura 1 – Máquina MFL utilizada para a soldagem por fricção linear

Para a caracterização da solda, uma amostra resultante do processo (Figura 2a) foi seccionada e submetida às etapas convencionais de metalografia e posteriormente atacada com o reagente Nital 5% para análise microestrutural. A observação da

microestrutura do material de base (MB) e da interface da junta soldada foi realizada por meio de microscopia óptica. A Figura 2a) exibe a amostra após o processo de soldagem, enquanto a Figura 2b) apresenta um desenho tridimensional esquemático da amostra.

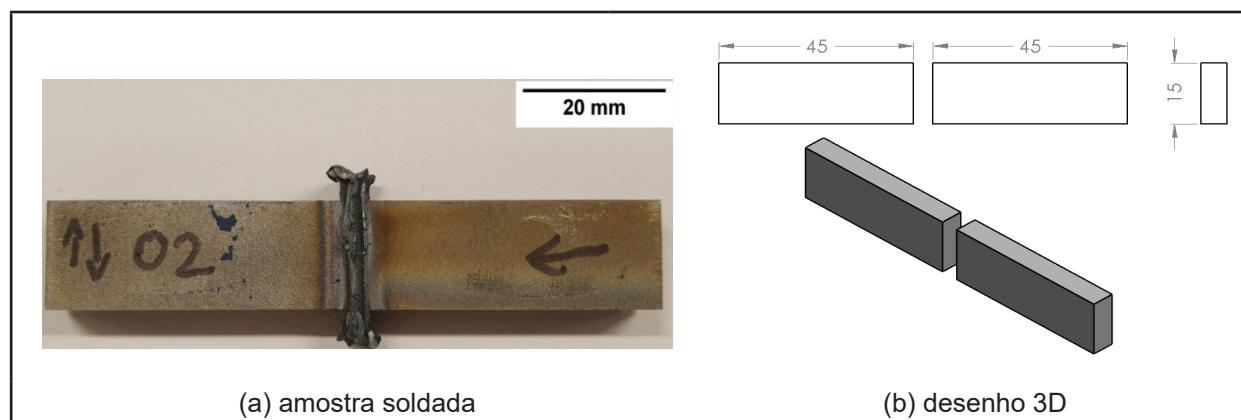


Figura 2 - Amostra

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram analisadas diferentes regiões da macroestrutura, começando pelo material de base (região não afetada pelo processo de soldagem) e terminando na interface da junta soldada, como mostrado na Figura 3.

A Figura 3-a) apresenta uma macrografia longitudinal, revelando o MB e a região de interface da junta soldada. Assim, a Figura 3-b) consiste em uma micrografia da microestrutura do aço API X65 na condição de como recebido, também na seção longitudinal. A análise desta micrografia revelou diferentes morfologias de ferrita, com predominância da ferrita poligonal (FP) e frações menores de ferrita acicular (FA) e ferrita quase-poligonal (FQ). Adicionalmente, observações em maiores aumentos indicaram a presença de carbonetos dispersos no MB.

A Figura 3-c) exibe uma micrografia da região central da solda, adjacente à interface de união. Nesta região, nota-se um refino de grão, o qual pode ser atribuído ao fenômeno de recristalização dinâmica da austenita. Este fenômeno é induzido pela



combinação entre a temperatura gerada e a deformação plástica intensa imposta pelo processo de soldagem por fricção linear. A microestrutura predominante nesta zona refinada consiste em ferrita acicular (FA) e bainita (B). Finalmente, a inspeção visual e a análise microestrutural confirmam a ausência de descontinuidades como porosidade e trincas, o que indica a eficácia da soldagem por fricção linear na produção de juntas soldadas de aço X65 com alta qualidade.

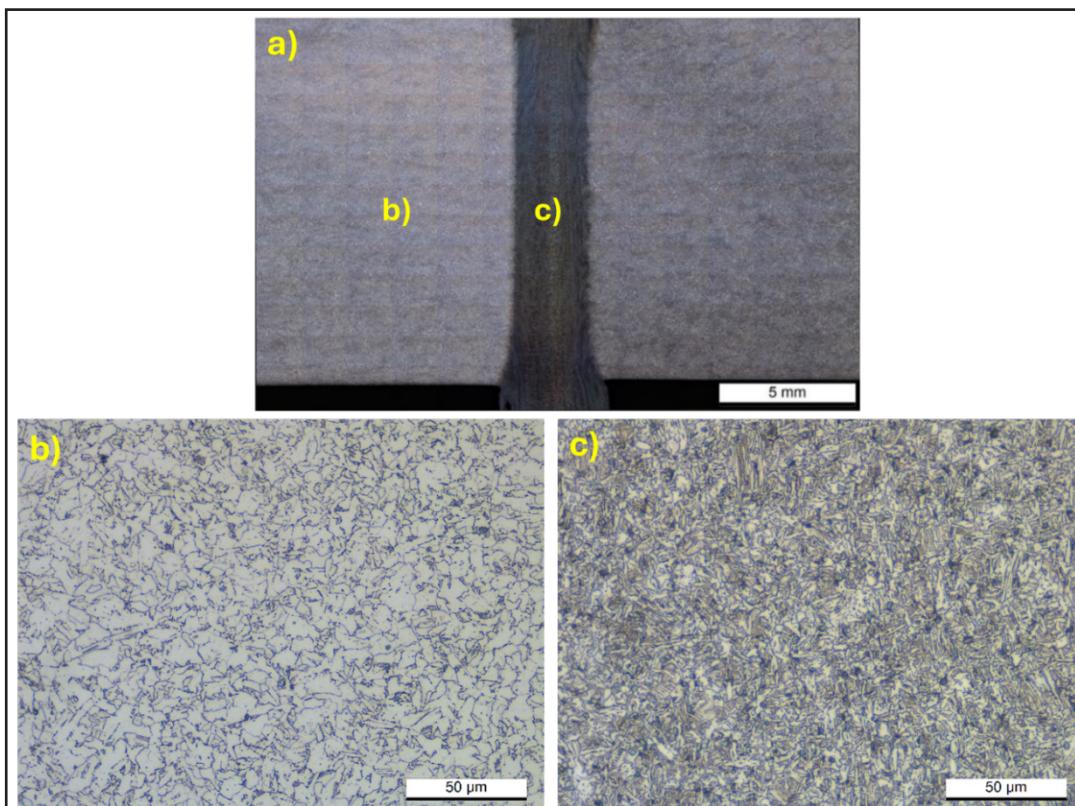


Figura 3 - a) Macrografia da junta soldada, b) Material base (como recebido), c) Centro da junta soldada

O perfil de microdureza é mostrado na Figura 4. Como pode ser observado, os valores de microdureza na junta não excederam as recomendações da norma API 5L.

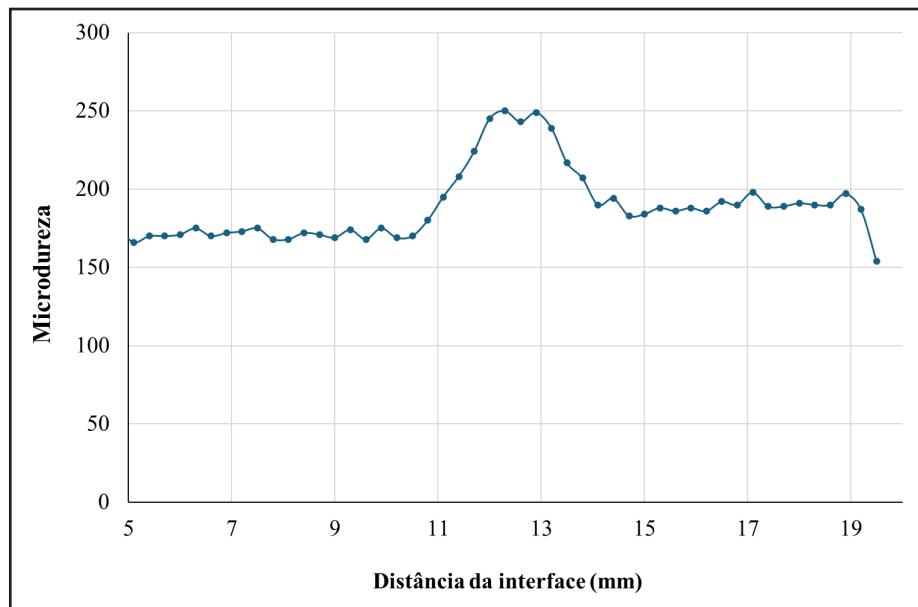


Figura 4 – Perfil de microdureza

Além disso, em uma região próxima a interface de soldagem, um aumento de microdureza pode ser notado, o que é comum na soldagem por fricção em aço [8, 9]. Esta melhoria pode estar relacionada à formação de grãos finos, microestruturas mais duras (ex: bainita) ou até mesmo carbonetos formados devido a soldagem por fricção linear.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo mostraram a eficácia da soldagem por fricção linear para a união do aço API 5L X65 PSL2. A junta exibiu refino de grão e aumento de dureza na região central (próxima à interface da solda) decorrentes do atrito e a deformação plástica elevada induzidos por este processo no estado sólido. Para trabalhos futuros, recomenda-se uma avaliação detalhada das propriedades mecânicas da junta soldada.

REFERÊNCIAS

- [1] Cortis, G.; Nalli, F.; Sasso, M.; Cortese, L. & Mancini, E. (2022). Effects of Temperature and Strain Rate on the Ductility of an API X65 Grade Steel. *Appl. Sci.* 12, 2444.



- [2] Ye, F.; Fujii, H., Tsumura, T.; & Nakata, K. (2006). Friction stir welding of Inconel alloy 600. *Journal of materials science*, 41(16), 5376-5379.
- [3] Lemos, G. V. B.; Farina, A. B.; Nunes, R. M.; da Cunha, P. H. C. P.; Bergmann, L.; dos Santos, J. F.; & Reguly, A. (2019). Residual stress characterization in friction stir welds of alloy 625. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(3), 2528-2537.
- [4] Walter, N. M. B; Lemos, G. V. B.; Kieckow, G. S.; Buzzatti, D. T.; Buzzatti, J. T.; Mattei, F.; Reguly, A.; Clarke, T.; Paes, M. T. P.; Dalpiaz, G. & Marinho, R. R. (2024) Investigating microstructure, mechanical properties, and pitting corrosion resistance of UNS S32760 super duplex stainless steel after linear friction welding. *Journal of Materials Research and Technology*, 1637-1643.
- [5] Kangazian, J.; & Shamanian, M. (2019). Microstructure and mechanical characterization of Incoloy 825 Ni-based alloy welded to 2507 super duplex stainless steel through dissimilar friction stir welding. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(8), 1677-1688.
- [6] Lemos, G. V. B.; Farina, A. B.; Piaggio, H.; Bergmann, L.; Ferreira, J. Z.; Dos Santos, J. F.; & Reguly, A. (2022). Mitigating the susceptibility to intergranular corrosion of alloy 625 by friction-stir welding. *Scientific Reports*, 12(1), 1-9.
- [7] American Petroleum Institute. API specification 5L. 45th ed. Washington: API Publishing Services; 2012.
- [8] Lemos, G. V. B.; Buzzatti, D.; Amavisca, C.; Dalpiaz, G.; Paes, M. T. P.; Kanan, L.; Reguly, A. Manufacturing an upset end by friction welding in an API X65 steel. *Tecnol Metal Mater Min.* 2021;18: e2452
- [9] D.T. Buzzatti, J.T. Buzzatti, G.V.B. Lemos, C. V. Amavisca, D. L. P. Oliveira, F. Mattei, G. Dalpiaz, A. Reguly. Towards friction welding to API grade B steel pipes. *Journal of Advanced Joining Processes*, Vol. 2, 2020.

Sobre os autores:

Eduardo Colombelli da Rosa

Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS, Brasil
Email: colombelli.eduardo@gmail.com - <https://orcid.org/0009-0000-9342-6104>

Guilherme Vieira Braga Lemos

Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS, Brasil
Email: guilherme.lemos@uol.com.br - <https://orcid.org/0000-0002-2964-362X>

Marcio Medeiros de Magalhães

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil
Email: marcio.medeiros@ufrgs.br - <https://orcid.org/0000-0002-7940-3552>

Jonas Trento Buzzatti

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil
Email: jtbuzzatti@hotmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-5704-2784>

Diogo Trento Buzzatti

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil
Email: dtbuzzatti@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0003-3483-6933>

**Afonso Reguly**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil
Email: areguly@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-4880-3780>

Fabiano Dornelles Ramos

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Cachoeira do Sul, RS, Brasil
Email: fabiano.ramos@caxias.ifrs.edu.br - <https://orcid.org/0000-0002-8876-9986>

Como citar este artigo

Rosa, E. C. da, Lemos, G. V. B., Magalhães, M. M. de, Buzzatti, J. T., Buzzatti, D. T., Reguly, A., & Ramos, F. D. (2025). Soldagem por fricção linear em aço API 5L X65 PSL2. *JESTA*, Cachoeira do Sul, (3) e92112, Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/JESTA/article/view/92112>.