



## INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO PÓS-SOLDAGEM NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM AÇO BAIXA LIGA API 5L X80MO

Guimarães,V.A.(1); Guimarães,A.A. (2) Vianna,LR (3)

1.Unesp - Campus de Guaratinguetá - [valdir.alves@unesp.br](mailto:valdir.alves@unesp.br)

Autor correspondente. Av. Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Bloco1, Depto de Materiais e Tecnologia, Guaratinguetá - SP

2. Universidade Federal de São João del Rei-UFSJ - [andre.guima@hotmail.com](mailto:andre.guima@hotmail.com)

3.Unesp - Campus de Guaratinguetá - [leonardo.rossi@unesp.br](mailto:leonardo.rossi@unesp.br)

### RESUMO

A utilização de tratamentos térmicos pós soldagem em ligas metálicas aplicadas no setor de petróleo e gás, apresenta grande importância para o desenvolvimento de materiais cada vez mais resistentes e com capacidade de suportar à agressividade do ambiente a que estes materiais são submetidos durante sua utilização. Considerando a aplicabilidade de ligas que contenham constituintes como ferrita acicular, martensita e austenita, os aços de alta resistência e baixa liga produzidos de acordo com as normas API estão entre as mais utilizáveis. Este estudo busca investigar como as aplicações de tratamento térmico pós-soldagem influenciam nas propriedades mecânicas em ligas API 5L X80MO. O objetivo da realização deste trabalho é avançar na caracterização do comportamento mecânico, a partir de um estudo de caso que visa avaliar amostras desta liga, através de amostragem em tubos de aço e por meio de ensaios de microdureza HV5 e ensaios de tração para analisar adequadamente o material selecionado sob diferentes condições do tratamento térmico simulado. Para as análises foram realizados três rotas distintas de tratamentos térmicos pós soldagem a temperaturas de 550 °C, 595 °C e 650 °C. Os resultados demonstraram que as amostras tratadas a 650 °C apresentaram alívio de tensões mais significativo e menor dispersão de resultados entre as amostras pesquisadas demonstrando ser a rota mais eficiente de acordo com os objetivos propostos.

**Palavras-chave:** liga API, tratamento térmico pós-soldagem simulado, ensaio de tração, microdureza.

## INTRODUÇÃO

Os oleodutos e gasodutos utilizando aços com alta resistência podem ser considerados como a maneira mais eficaz de transportar petróleo e gás até as fontes consumidoras. Apesar da crescente busca por fontes alternativas de energia a necessidade de se utilizar combustíveis fósseis ainda se mostra como uma realidade das atividades industriais e da sociedade como um todo.

A maior parte do combustível fóssil está localizado remotamente e precisa ser transportado da fonte para os consumidores. Consequentemente, os tubos fabricados com aços de alta resistência, muitas vezes precisam ser instalados em regiões que apresentam condições operacionais agressivas à sua microestrutura. Tais condições como atmosferas agressivas, proximidade dos oceanos ou mesmo temperaturas ambientais extremas, demandam a produção de ligas com características capazes de suportar estas intempéries. Diante de um cenário como este, a demanda por aços com boa resistência e tenacidade à fratura tem aumentado dentro do mercado de petróleo e gás. As propriedades mecânicas dos aços obtidos por processos especiais de laminação controlada “*Thermo-mechanical control process (TMCP)*”, tem possibilitado a obtenção de materiais com melhores comportamentos mecânicos incluindo elevada resistência mecânica e maior tenacidade (ZHAO et al, 2002).

As microestruturas que permitem a obtenção de propriedades mecânicas adequadas para o aço são obtidas por meio do controle termomecânico do processo de fabricação, seguido de resfriamento controlado acelerado, que é a forma de menor custo e mais eficaz para a obtenção de materiais com alta resistência e tenacidade adequada. Considerando as técnicas de termo-processamento aplicadas a estas ligas é comum a obtenção de microestruturas multiconstituídas contendo martensita, austenita e ferrita acicular com granulação refinada (MAEDA et al, 2021).

Destaca-se ainda que a maioria dos dutos fabricados com estas ligas passam por procedimentos de soldagem que podem gerar uma região termicamente afetada causando alterações localizadas de composição química e resistência mecânica. É muito comum nestas regiões a formação de microestruturas contendo alta fração volumétrica de martensita que podem causar redução acentuada de tenacidade da junta soldada. (BAYRAKTAR; KAPLAN, 2004).

De acordo com a *American Petroleum Institute* os aços com aplicação voltada para o setor de petróleo e gás podem ser classificados de acordo com sua resistência mecânica, sua composição química e sua aplicação. As especificações designadas seguem a Organização Internacional de Padronização ISO 3183, que padroniza os sistemas de transporte por dutos, equipamentos e estruturas *offshore* para as indústrias de petróleo, petroquímica e gás natural. O comitê técnico autor dos padrões reconheceu que existem dois níveis de especificações de produtos. Portanto, desenvolveu a PSL1 e a PSL2. A classificação PSL1 se refere a especificações de qualidade padrão para as tubulações e a PSL2 especifica propriedades químicas, mecânicas e requisitos de teste. As classes cobertas por esta especificação são A25, A, B e as seguintes classes X: X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70, X80. O número de dois dígitos após o X indica a resistência ao escoamento mínima (em PSI) do tubo produzido para esta especificação (CALDEIRA, 2005).

Dentro desta classificação apresentada, os aços são diferenciados em relação ao valor de seu limite de escoamento, cuja identificação aparece no próprio nome da liga. Assim, um aço do tipo API 5L X80MO define um tipo de aço que possui um limite de escoamento de aproximadamente 80 ksi (equivalente a 555 MPa). O sufixo que acompanha o grau do aço é a letra M, que de acordo com a norma API 5L, refere-se ao processo de fabricação da chapa por laminação termomecânica controlada (API, 2018).

## MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho foram utilizadas amostras de um aço API 5L X80 MO com composição química apresentada pela Tabela 1. Este material é caracterizado por apresentar baixo teor de carbono com pequenas adições de níquel, cromo e molibdênio que atuam no sentido de inibir o crescimento de grão durante o processo de laminação a quente.

Tabela 1 - Composição química em porcentagem de peso dos principais elementos dos aços API 5L X80 MO.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	V+Nb+Ti	Cu	Ni	Cr/Mo
Peso, %	0,046	0,303	1,820	0,009	0,008	0,057	0,186	0,220	0,302
max.	0,045	0,304	1,820	0,009	0,006	0,056	0,187	0,220	0,300

As amostras para os ensaios foram retiradas de um tubo com costura soldado por arco submerso de acordo com a figura 1. O tratamento térmico pós-soldagem (conhecido também como TTPS) foi realizado em três temperaturas distintas: 550°C, 595°C e 650°C, sendo utilizada sempre a exposição de 1 polegada por 3 horas, seguido de resfriamento ao ar. Foram retiradas amostras para a realização dos ensaios de tração [ASTM E8M] e dureza Vickers utilizando-se uma carga de 5kgf [ASTM E92].

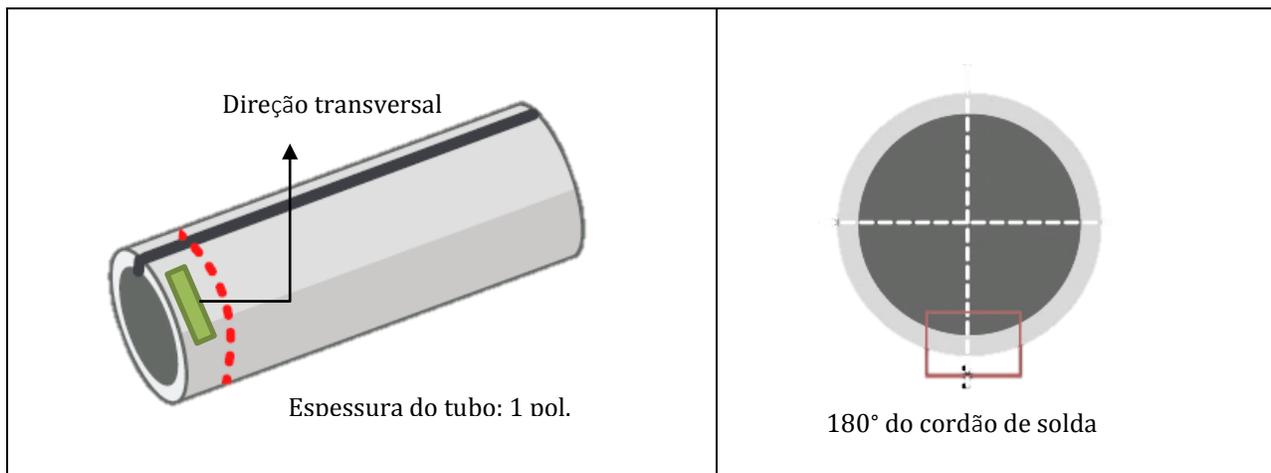


Figura 1 - Representação esquemática de retirada de amostras para a realização dos ensaios

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As figuras 3 e 4 apresentam os resultados dos ensaios de tração para as diversas condições metalúrgicas pesquisadas. Verifica-se que a condição tratada a 550 °C não apresentou diferenças significativas de comportamento mecânico quando comparada com a condição no estado como fabricada. As condições tratadas em temperaturas superiores apresentaram ligeira queda de resistência mecânica evidenciando ter havido um alívio de tensões mais pronunciado. Importante ressaltar que mesmo após o tratamentos térmicos pós soldagem (TTPS) todas as condições metalúrgicas continuaram a atender os requisitos da norma API 5L que define os valores mínimos e máximos de resistência mecânica para o aço X80 MO como fica evidenciado na figura 5.

Esta variação de comportamento mecânico, suscita a hipótese que a uma temperatura mais elevada houve um possível favorecimento da nucleação e crescimento de fases como perlita mais grosseira, que pode estar associada a uma queda no limite de resistência, segundo destacado Olabi (1996). Nesta linha, a alteração nas propriedades mecânicas pode estar relacionada à formação de fases menos duras ou à mudança na distribuição de carbonetos na microestrutura do material, pela recristalização de grãos e coalescência de precipitados, influenciando diretamente sua dureza e resistência.

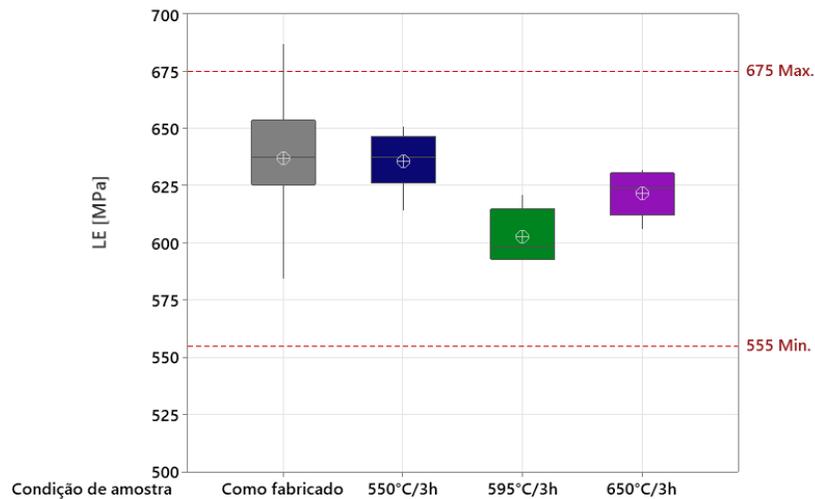


Figura 3 - Resultados do limite de escoamento para o Aço API 5LXMO.

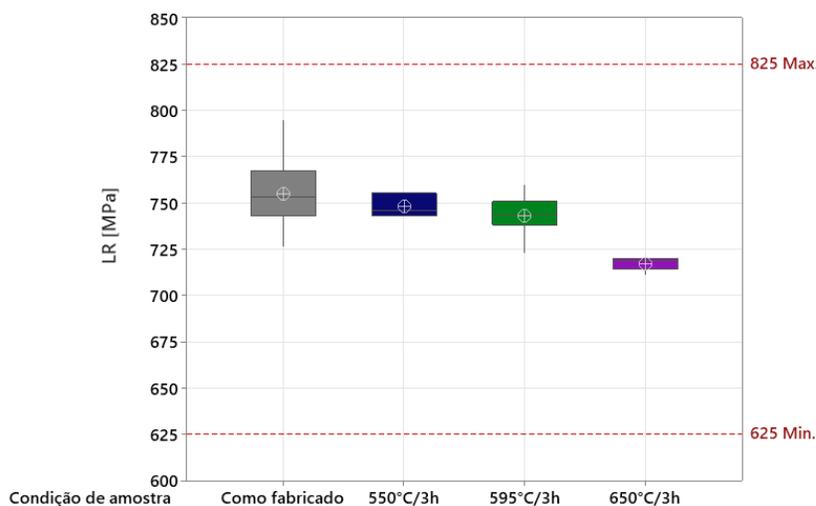


Figura 4 - Resultados do limite de resistência a tração para o Aço API 5LXMO.

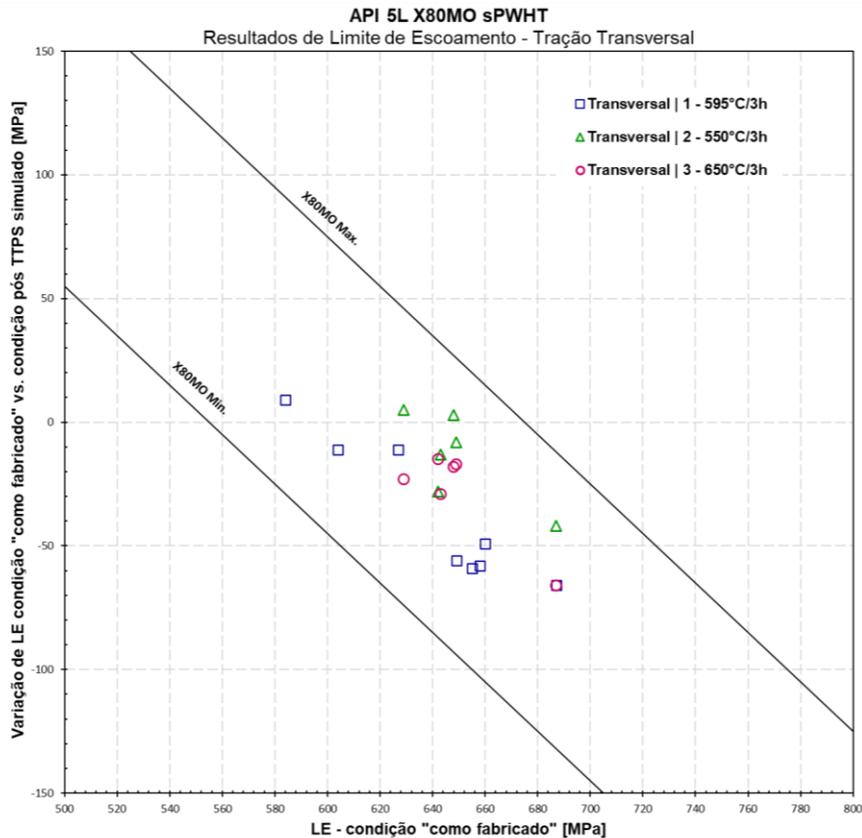


Figura 5 – Resultados de limite de escoamento (LE) em cada condição ensaiada, na forma de valores individuais.

Os ensaios de dureza tem sido utilizados frequentemente como uma forma eficiente de acompanhamento de tratamentos térmicos. O ensaio tem capacidade de detectar de forma satisfatória pequenas alterações de microestrutura e comportamento mecânico em ligas metálicas. As Figuras 6, 7, 8 e 9 apresentam os resultados de dureza na forma de gráficos, por meio de uma escala de cores. Os perfis de microdureza foram identificados para cada uma das quatro condições metalúrgicas pesquisadas onde cada uma das amostras foram devidamente fotografadas. Verifica-se nas figuras abaixo a imagem de cada uma das amostras e uma malha de 1 mm x 1,5 mm para cada endentação realizada.

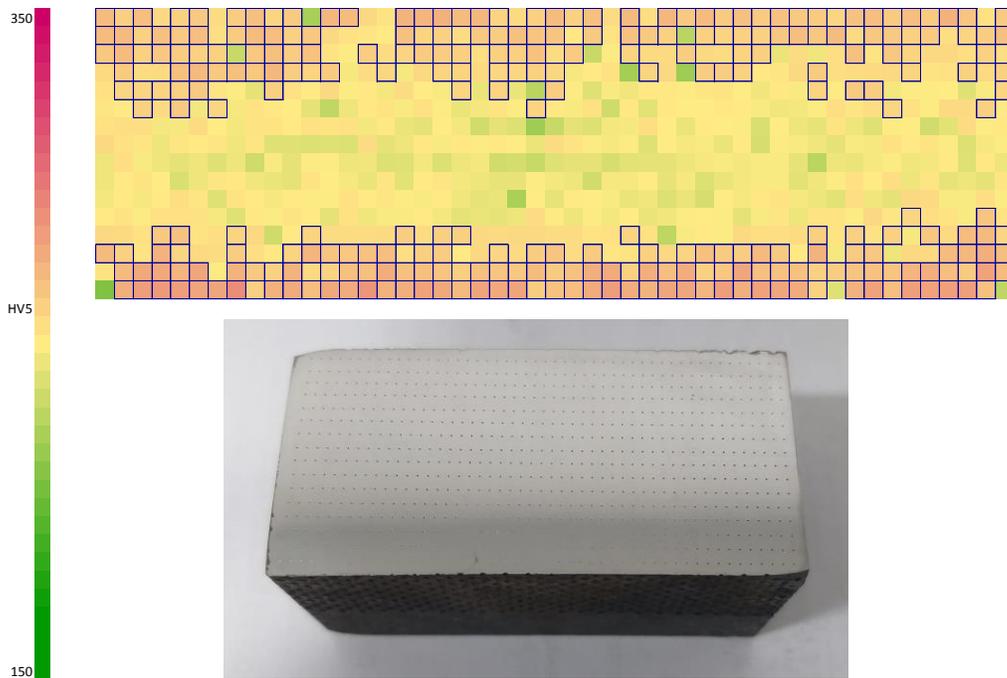


Figura 6 – Perfil de microdureza Vickers HV5 para amostra na condição “como fabricado”.Fonte: Próprio autor.

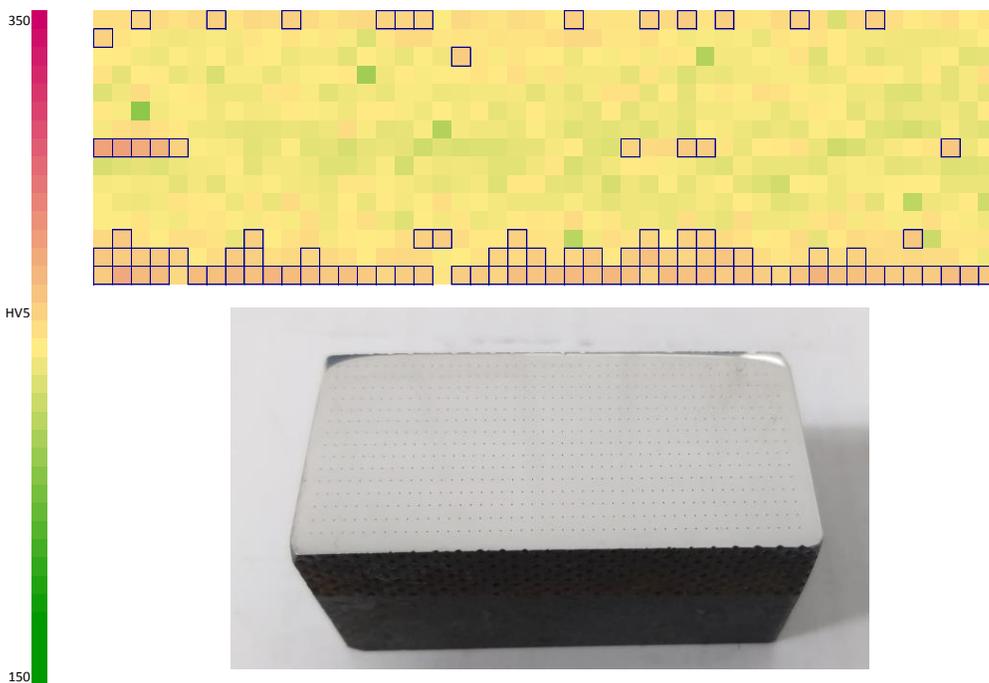


Figura 7 – Perfil de microdureza Vickers HV5 para amostra na condição pós TTPS com 550°C/3h.Fonte: Próprio autor.

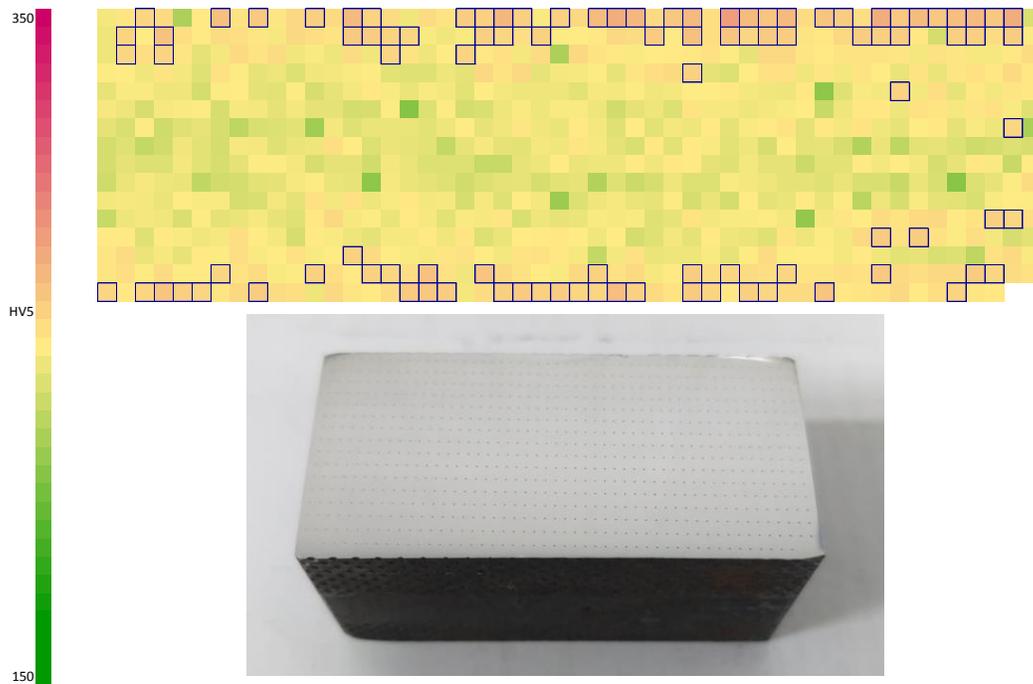


Figura 8 – Perfil de microdureza Vickers HV5 para amostra na condição pós TTPS com 595°C/3h. Fonte: Próprio autor.

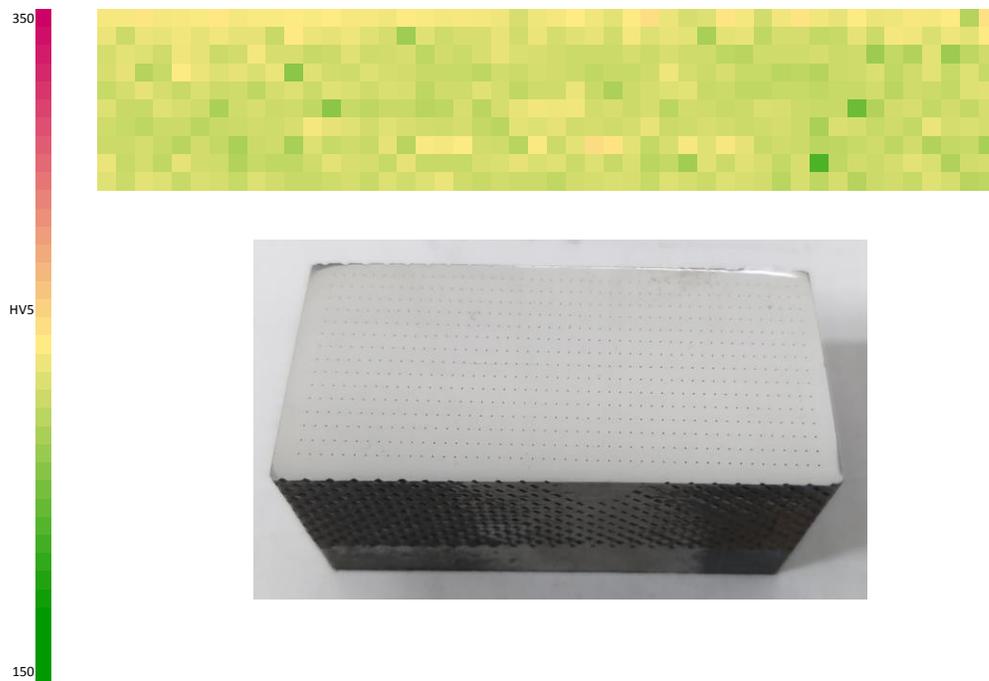


Figura 9 – Perfil de microdureza Vickers HV5 para amostra na condição pós TTPS com 650°C/3h. Fonte: Próprio autor.

Com base nos perfis de microdureza acima apresentados, observa-se na Figura 6 que, na condição “como fabricado”, a dureza da amostra tem quantidade notável de valores acima de 300 HV5, considerando as extremidades superior e inferior do perfil obtido. É importante ressaltar que a presença de quadrados com bordas azuis em um perfil indica pontos de dureza acima de 250 HV5.

Neste caso, por se tratar de uma liga de alta resistência mecânica e que também apresenta dureza elevada, entende-se que este resultado, após deformações acumuladas no material pela fabricação do tubo, é justificável e possui coerência com o comportamento esperado para um aço API 5L X80MO aqui em estudo.

Adiante, na Figura 7, é possível observar que, na condição pós TTPS com 550°C/3h, o perfil passou a apresentar praticamente a metade da ocorrência com pontos acima de 250 HV5 (quadrados com bordas azuis), tendo também incidência consideravelmente menor de pontos com dureza acima de 300 HV5. Sendo assim, pode-se inferir que a temperatura de patamar neste nível pode ainda não ser suficiente para promover o alívio de tensões esperado, resultando assim em pontos de dureza mais elevada remanescentes nas extremidades superior e inferior do perfil, assim como presença de alguns outros pontos em sua linha central (referência horizontal).

Seguindo, a partir da Figura 8, nota-se que, na condição pós TTPS com 595°C/3h, o perfil apresenta razoável similaridade ao perfil comentado anteriormente com comparável quantidade de pontos com valores acima de 250 HV5 e 300 HV5. Tendo em vista que esta é a condição padrão estabelecida por norma para este tratamento térmico de alívio de tensões, é possível suscitar que a diferença entre temperaturas de patamar, variando entre 550 e 600°C, não gerou influência relevante nesta amostragem pelos dados coletados.

Por fim, no último perfil de dureza indicado na Figura 9, observa-se que na condição pós TTPS com 650°C/3h, os valores são, de modo geral, significativamente menores na comparação com todas as demais condições, pois todos os valores estão abaixo de 250 HV5, em uma faixa aproximada de 200 a 240 HV5. É importante destacar que esta mesma amostra apresentou maior queda de tensão de escoamento no ensaio de tração (diferença de 66 MPa).

Por meio destes resultados e análise comparativa, pode-se afirmar que com a utilização de uma temperatura de patamar mais elevada, o material amostrado apresentou maior alívio de tensões, evidenciando assim a influência da elevação temperatura no comportamento das propriedades mecânicas, possivelmente por uma variação microestrutural relevante.

## **CONCLUSÕES**

Os resultados obtidos demonstraram que o tratamento térmico pós-soldagem desempenha um papel fundamental na redução da dureza e na melhoria das propriedades mecânicas do material. Este processo é essencial para garantir a durabilidade e a performance das tubulações em ambientes desafiadores, como os encontrados em indústrias de petróleo, gás e química. Após a soldagem, a região afetada pelo calor (ZAC) dos aços pode apresentar um aumento significativo na dureza devido à formação de estruturas martensíticas. Essas estruturas são resultantes da rápida solidificação e transformação da fase austenítica durante o resfriamento. A dureza elevada pode levar a problemas como a fragilidade e a baixa ductilidade, tornando o material suscetível a fraturas e falhas em serviço. O tratamento térmico pós-soldagem, que inclui técnicas como o recozimento e a normalização, visa mitigar esses problemas ao reduzir a dureza da ZAC e restabelecer o equilíbrio das propriedades mecânicas do aço. Esse processo ajuda a aliviar as tensões residuais induzidas pela soldagem e melhora a tenacidade e a resistência ao impacto do material.

Avaliando-se os resultados de tração (LE e LR) e microdureza (HV5) verifica-se uma variação mais relevante de propriedades na condição de amostra ensaiada pós TTPS a 650°C/3h. Portanto, a redução da dureza por meio do tratamento térmico pós-soldagem não é apenas uma questão de otimização de propriedades, mas uma etapa indispensável para garantir a segurança e a eficiência das tubulações em serviço.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

API - AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Specification for Line Pipe – API Specification 5L. Washington, 2018.

BAYRAKTAR, E.; KAPLAN, D. Mechanical and metallurgical investigation of martensite-austenite constituents in simulated welding conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 153-154, 2004.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING OF MATERIALS; *ANNUAL Book of ASTM Standards*, Section 3: Metals Test Methods and Analytical Procedures.vol.03.01, 2024.

CALDEIRA, E. A. Desenvolvimento de aços atendendo a norma API 5L, no laminador de tiras a quente da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST). CONGRESSO ANUAL DA ABM, Belo Horizonte, 2005.

ZHAO, M.C.; YANG, K.; SHAN, Y.; The effects of thermo-mechanical control process on microstructures and mechanical properties of a commercial pipeline steel,- *Materials Science and Engineering: A*, 2002

MAEDA, T; OKUHATA, S; MATSUDA, K; MASUMURA, T; Toughening mechanism in 5% Mn and 10% Mn martensitic steels treated by thermo-mechanical control process ... - *Materials Science and Engineering A*, Vol 812, 2021 -

ISO 3183 - International Standard for Petroleum and natural gas industries — Steel pipe for pipeline transportation systems, reference number ISO 3183:2019(E) © ISO 2019

OLABI, A.G.; HASHMI, M.S.J.; Stress relief procedures for low carbon steel (1020) welded components,- *Journal of materials processing technology*, 1996

## INFLUENCE OF POST-WELDING HEAT TREATMENT ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF AN API 5L X80MO LOW ALLOY STEEL

The use of heat treatments on metallic alloys applied in the oil and gas sector proves to be of great value for the development of materials that are increasingly resistant to the aggressiveness of the environment to which the materials are subjected during their use. Considering the applicability of alloys that contain constituents such as acicular ferrite, martensite and austenite, with low-alloy and high-strength steels being used for this purpose, the API 5L X80MO alloy is among those applicable. This study seeks to investigate how post-weld heat treatment (in this case a simulated-PWHT) applications influence in the mechanical properties of API 5L X80MO alloys. The objective of carrying out this work is to advance the research of this influence, based on a case study that aims to evaluate samples of this alloy, through sampling in steel pipes, and through HV5 microhardness and tensile tests to properly analyze the selected material under different simulated heat treatment conditions under analysis. The methodology of this work is structured based on testing standards, such as ASTM A370, and other related for testing steel materials. At the end of the study is intended to evaluate how different heat treatment conditions can affect the performance and resistance of the material regarding its market application. On this regard, the hypothesis described throughout the work intends to be validated through understanding the results presented from the proposed case study.

**Keywords:** API steel alloy, simulated post-weld heat treatment, tensile test, microhardness.