



ANÁLISE DE FALHA EM COMPONENTE DE TUBULAÇÃO DE GASODUTO VIA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, MICROESTRUTURAL, FRACTOGRÁFICA E DE MICRODUREZA

Jesus, W. B. S.¹; Nascimento, L. G. S.²; Costa, D. S.³; Vasconcelos, A. J.^{4*};
Souza, H. R. O.⁴; Silva, M. A. P. S.⁴

1 - Instituto Militar de Engenharia, Praça Gen. Tibúrcio, 80 - Urca, Rio de Janeiro - RJ, 22290-270.

2 - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Campus Belém, Av. Alm. Barroso, 1155 - Marco, Belém - PA, 66093-020.

3 - Universidade Federal do Pará - UFPA, Colégio Intelectual - Tv. We Vinte e Seis, 2 - Coqueiro, Ananindeua - PA, 67130-660.

4 - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará - UFPA, Rua Augusto Correa, 01, Guamá, Belém - PA, 66075-110.

wellington.bruno@ime.eb.br; luiz.nascimento@ifpa.edu.br;
deibsonsc@yahoo.com.br; angelavasconcelos@live.com*;
hericlesoliveira.ho@gmail.com; mariaestillac@gmail.com

RESUMO

Aços inoxidáveis são amplamente utilizados devido ao alto teor de cromo e grande resistência à corrosão, combinando excelente resistência à oxidação, boa ductilidade e soldabilidade. No entanto, falhas não são incomuns, especialmente se cuidados especiais não forem tomados no processo de soldagem. Este estudo visa caracterizar e analisar um flange de aço inoxidável usado como suporte para sensores de temperatura em uma tubulação industrial, que apresentou trincas causadoras de vazamento. Através de ensaios de líquido penetrante, fluorescência de raios-x, microscopia óptica e eletrônica, e microdureza, identificou-se o tipo de aço e as trincas em regiões específicas, associadas ao processo de fabricação, o que influenciou a falha do equipamento.

Palavras-chave: fluorescência de raios-x, fratura, trinca, soldagem, aço inoxidável.

INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são amplamente conhecidos por sua resistência à corrosão e às altas temperaturas, sendo classificados de acordo com a fase

microconstituente predominante em sua microestrutura, com as categorias principais sendo ferríticos, austeníticos e martensíticos. Dentre esses, os aços inoxidáveis austeníticos destacam-se como os mais importantes, devido à presença simultânea de cromo (Cr) e níquel (Ni) em sua composição, variando entre 16-26% e 6-22%, respectivamente (2). Esses materiais são cruciais em diversas aplicações industriais, incluindo o setor de petróleo e gás, onde a resistência à corrosão e a integridade estrutural são fundamentais para o desempenho seguro e eficiente dos componentes.

No setor de petróleo e gás, a busca por materiais mais eficientes e seguros é constante, dada a natureza agressiva dos produtos transportados e as severas condições operacionais. Os aços inoxidáveis, particularmente os austeníticos, são frequentemente escolhidos por sua capacidade de suportar ambientes corrosivos e altas pressões. No entanto, a ocorrência de falhas nesses materiais, especialmente quando expostos a processos como a soldagem, representa um desafio significativo, que pode resultar em graves consequências, incluindo riscos à segurança, perdas econômicas e interrupções operacionais. Embora avanços consideráveis tenham sido feitos na melhoria das propriedades mecânicas desses materiais, a compreensão completa dos mecanismos de falha, particularmente em aplicações críticas como a de petróleo e gás, ainda apresenta lacunas significativas (3-6).

A falha em materiais de engenharia é sempre um evento indesejável por várias razões, as quais incluem vidas humanas que são colocadas em risco, perdas econômicas e interferência na disponibilidade de produtos e serviços. As causas comuns são a seleção e o processamento inadequados de materiais, além do projeto inadequado ou da má utilização de um componente (7,8). Alguns desses problemas podem ser evitados ou resolvidos aplicando-se princípios metalúrgicos apropriados ao processo de soldagem (9). Por isso, a importância de conhecer, identificar, interpretar e correlacionar os fatores que afetam o ciclo térmico que ocorrem durante a soldagem de materiais metálicos (10).

Na indústria, vários equipamentos envolvem a soldagem como processo de fabricação e/ou manutenção, tais como: confecção de tanques químicos, aplicações estruturais, equipamentos de cozinha e artefatos de decoração (11-13). Nesse contexto, os aços desenvolvidos para o setor de petróleo e gás podem ser soldados por todos os processos de soldagem comercialmente disponíveis com ou sem adição de metal de adição. Aços inoxidáveis austeníticos submetidos à soldagem são

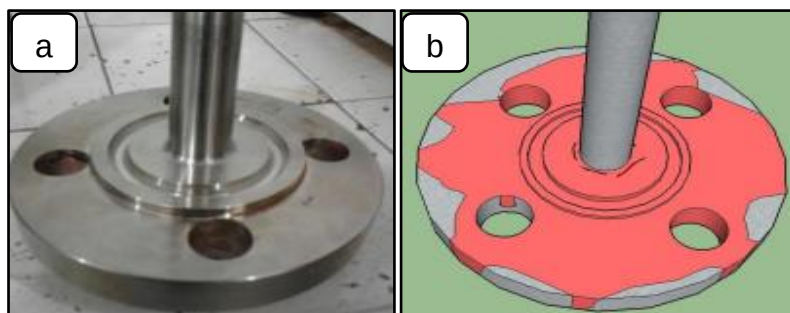
susceptíveis à fissuração na solidificação e à corrosão intergranular caso não seja realizada a soldagem de maneira adequada (14).

Este estudo tem como objetivo caracterizar e analisar um flange de aço inoxidável com trincas para investigar os motivos que levaram à sua falha em serviço, visando contribuir para o aprimoramento da qualidade e desempenho desses componentes em aplicações de gasodutos. Dessa forma, foi retirada uma mostra da peça para a realização dos ensaios de líquido penetrante (ELP), composição química por fluorescência de raios-X (FRX), preparação da amostra através de metalografia, seguida de realização de microscopia óptica (MO), eletrônica de varredura (MEV) e análise de microdureza Vickers (HV). Os resultados obtidos não só contribuirão para a compreensão dos mecanismos de falha em aços inoxidáveis austeníticos, mas também fornecerão diretrizes valiosas para a prevenção de falhas futuras em aplicações críticas, fortalecendo a segurança e a eficiência operacional na indústria de petróleo e gás.

MATERIAIS E MÉTODOS

O ensaio de Líquido Penetrante foi realizado no flange ainda acoplado ao eixo, seguindo rigorosamente a norma Petrobras N-2370 (15). A preparação da amostra incluiu a limpeza inicial da superfície da peça com a aplicação de um removedor por pulverização. Após a limpeza, a superfície foi seca com um pano limpo para garantir a remoção completa de contaminantes. Em seguida, o penetrante foi aplicado uniformemente na superfície do flange, permitindo que ele se infiltrasse nas possíveis discontinuidades por um período de 30 minutos. Após esse tempo de penetração, o excesso de penetrante foi cuidadosamente removido, seguido pela aplicação do revelador. Este último foi deixado agir por mais 30 minutos para garantir a completa revelação de possíveis trincas ou defeitos. A Figura 1 ilustra o flange antes da aplicação do líquido penetrante, e uma modelagem 3D do flange com o líquido penetrante.

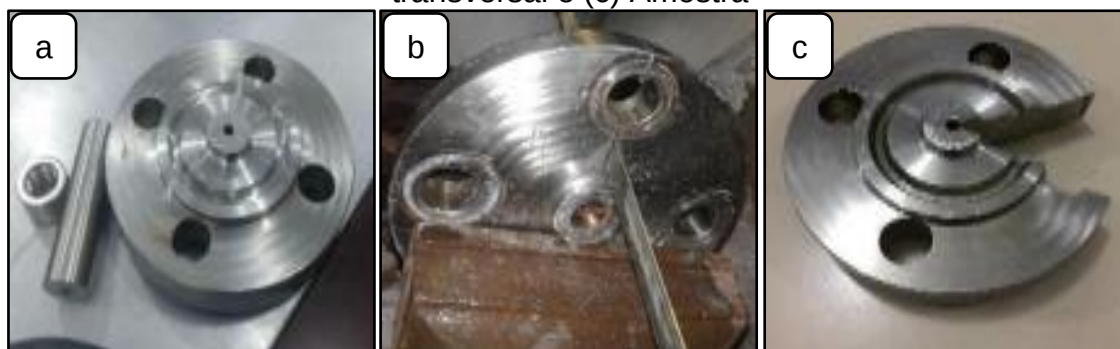
Figura 1. (a) Flange antes da aplicação do líquido penetrante, (b) Modelagem 3D flange com o líquido penetrante



A análise química da amostra foi conduzida utilizando a técnica de fluorescência de raios-X (FRX), empregando o equipamento modelo S2-Ranger. Esta técnica foi escolhida devido à sua capacidade de realizar uma análise não destrutiva e fornecer uma composição elementar detalhada com alta precisão, essencial para a avaliação da composição química da liga do flange.

A preparação da amostra para os ensaios metalográficos foi realizada seguindo a ordem de corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico. Inicialmente, a peça foi cortada longitudinalmente ao longo do eixo e, em seguida, transversalmente na região circular, onde foi identificada a presença de trincas. Esse corte transversal foi projetado para expor a área afetada pela trinca, permitindo um estudo detalhado da falha. A Figura 2 mostra a sequência de cortes realizados. Em seguida, duas amostras foram retiradas para análise, e estas foram embutidas a frio utilizando uma combinação de resina acrílica e catalisador, com um tempo de cura total de 24 horas.

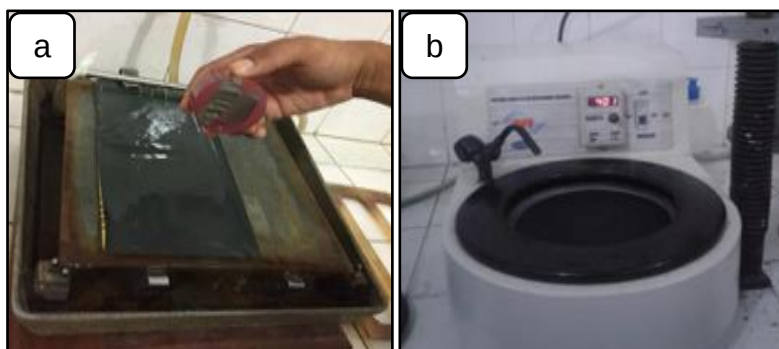
Figura 2. Sequência de cortes realizados, (a) Corte do eixo, (b) Início do corte transversal e (c) Amostra



Após o embutimento, as amostras foram lixadas utilizando uma lixadeira manual (Figura 3a), passando por uma série de lixas com granulação variando de 100 a 2000 mesh. A lixagem foi realizada com refrigeração à base de água para minimizar o aquecimento e evitar alterações microestruturais. O polimento subsequente foi

executado em uma politriz da marca/modelo PANAMBRA (Figura 3b), operando a uma rotação de 225 rpm e utilizando alumina de 0,3 mícron como abrasivo para alcançar um acabamento superficial adequado. O ataque químico foi realizado com o reativo de Marble (CuSO_4 , 20 ml de HCl e 20 ml de H_2O), aplicado por esfregação durante 60 segundos, para revelar as características da microestrutura.

Figura 3. (a) Lixadeira manual e (b) politriz.

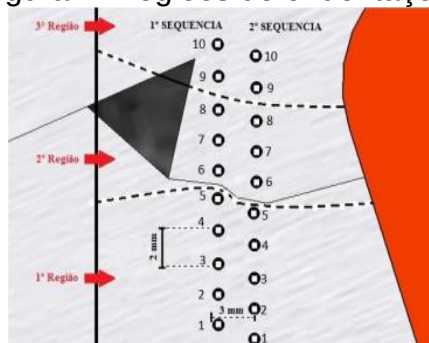


Microscopia e Ensaios de Dureza

As micrografias da microestrutura foram obtidas utilizando microscopia óptica (MO), seguida por análise em microscopia eletrônica de varredura (MEV), particularmente na região de fratura. A escolha dessas técnicas foi justificada pela necessidade de uma caracterização detalhada das trincas e da microestrutura do flange, permitindo uma avaliação precisa dos mecanismos de falha envolvidos.

O ensaio de dureza Vickers (HV) foi realizado na segunda amostra utilizando um microdurômetro modelo HV-1000B, sob uma carga de 200 grama-força, aplicada por 12 segundos. As endentações foram espaçadas a uma distância de 2,0 mm, conforme especificado pela norma ASTM E384 - 17 (16) para este tipo de material. A amostra foi dividida em três regiões para a execução do ensaio, com um total de 20 endentações realizadas. Estas foram distribuídas em duas sequências paralelas de 10 endentações cada, com uma distância de 3 mm entre as sequências (Figura 4). O objetivo das duas sequências de endentações foi garantir a precisão dos valores obtidos e a consistência dos resultados em relação ao comportamento do material na presença de trincas.

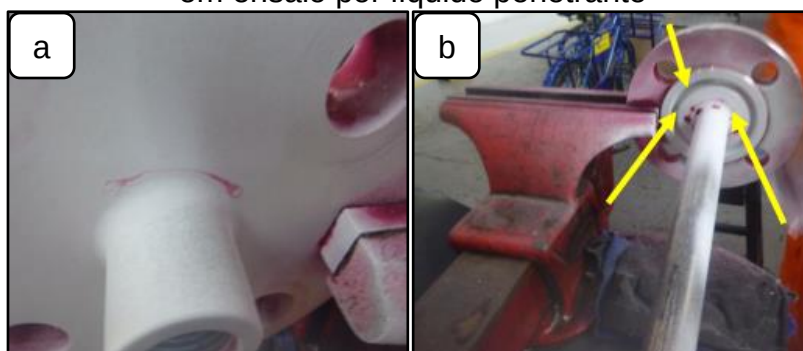
Figura 4. Regiões de endentações



RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ensaio de líquido penetrante permitiu a identificação de descontinuidades superficiais significativas na peça em estudo, particularmente na interseção entre o eixo e a flange. As trincas observadas (Figuras 5a e 5b) eram pequenas em tamanho e espessura, mas estavam concentradas em regiões críticas, sugerindo um ponto de fragilidade na peça. A concentração de trincas nessas áreas pode ser atribuída a tensões residuais resultantes de processos anteriores, como soldagem ou usinagem. Essas trincas, mesmo sendo superficiais, podem comprometer a integridade estrutural da peça ao servirem como pontos de nucleação para a propagação de falhas sob condições de carga cíclica.

Figura 5. (a) Trincas na região de interseção eixo e a flange (b) Trincas detectadas em ensaio por líquido penetrante



A análise química realizada por fluorescência de raios-X (FRX) revelou que a composição da amostra é compatível com a do aço inoxidável 316L, conforme mostrado nas Tabelas 1 e 2. O teor de carbono, inferior a 0,08%, é característico do aço 316L, conhecido por sua resistência à corrosão e excelente comportamento em ambientes agressivos, como os encontrados na indústria petrolífera. A composição química obtida está dentro dos limites especificados para o 316L, confirmando sua adequação para uso em aplicações críticas. No entanto, a presença de elementos

como o molibdênio e o níquel, em quantidades ligeiramente inferiores às esperadas, pode influenciar a resistência à corrosão e a tenacidade do material, o que pode ter contribuído para a falha observada (17,18).

Tabela 1. Fluorescência de raios-X (FRX) da amostra

Amostra (%)	Si	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Mo	Sum
	0,38	16,84	1,62	68,53	0,37	9,79	0,50	1,94	100,0

Tabela 2. Fluorescência de raios-X (FRX) do aço 316L (19)

	Elementos (%)	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
316L	Mínimo	0	0	0	16,00	10,00	2,00
	Máximo	0,03	1,00	2,00	18,00	14,00	3,00

A microestrutura da amostra foi analisada utilizando microscopia óptica (Figura 6a), e os resultados indicaram uma matriz austenítica típica de aços inoxidáveis (Figura 6b). A ausência de sinais de tensionamento mecânico nos grãos austeníticos sugere que a microestrutura não foi significativamente comprometida por processos térmicos ou mecânicos excessivos. No entanto, a análise mais detalhada revelou a presença de trincas tanto intergranulares quanto transgranulares (Figuras 7a e 7b). A trinca intergranular originada no chanfro indica que o processo de fabricação pode ter introduzido tensões residuais significativas, enquanto a trinca transgranular na região de solda sugere falhas no processo de soldagem, como pouca penetração do material de adição no material de base, que pode ter se originado provavelmente por efeitos térmicos do processo. Na região fundida também pode-se observar uma grande quantidade de poros vermiculares, o que pode estar associado a velocidade que se deu a soldagem, ou o aporte térmico insuficiente para que ocorresse a junção entre os materiais.

Figura 6. (a) Micrografia do flange e (b) Microestrutura típica de aço inoxidável austenítico (20)

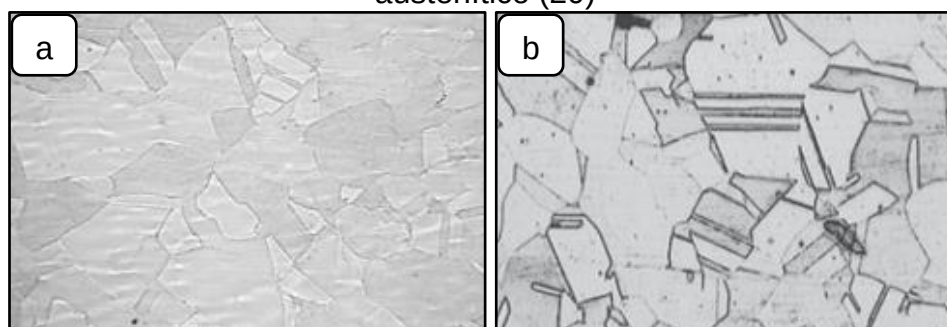
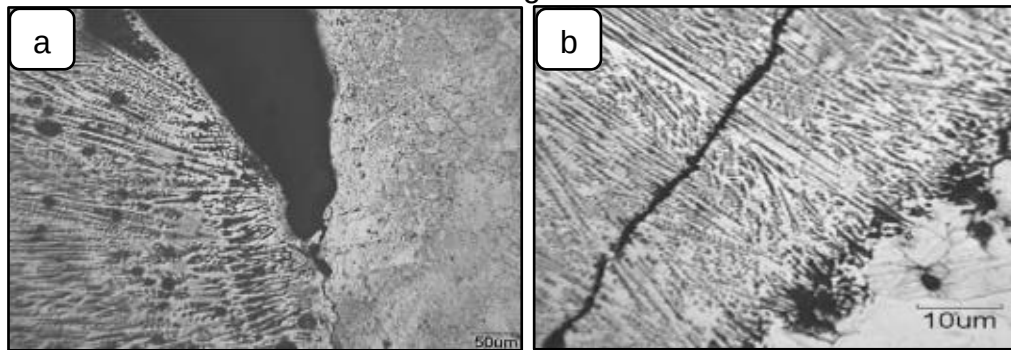


Figura 7. (a) Micrografia da propagação da trinca a partir do chanfro e (b) Micrografia de trinca na região de solda



A fractografia obtida por MEV (Figuras 8a e 8b) mostrou uma superfície de fratura com características de fratura frágil, sugerindo baixa tenacidade na Zona Termicamente Afetada (ZTA). Essa fragilidade pode ser atribuída à presença de contaminações durante a soldagem, levando à formação de trincas de solidificação. Não foram observadas estrias típicas de fadiga, o que reforça a hipótese de que a falha foi causada por mecanismos de fratura frágil em vez de fadiga cíclica. Além disso, a presença de fratura dúctil na região da solda (Figuras 9a e 9b) sugere que a ZTA sofreu uma variação significativa nas propriedades mecânicas, possivelmente devido a diferenças no resfriamento ou no processo de soldagem.

Figura 8. (a) e (b) Aspecto da fratura em região frágil

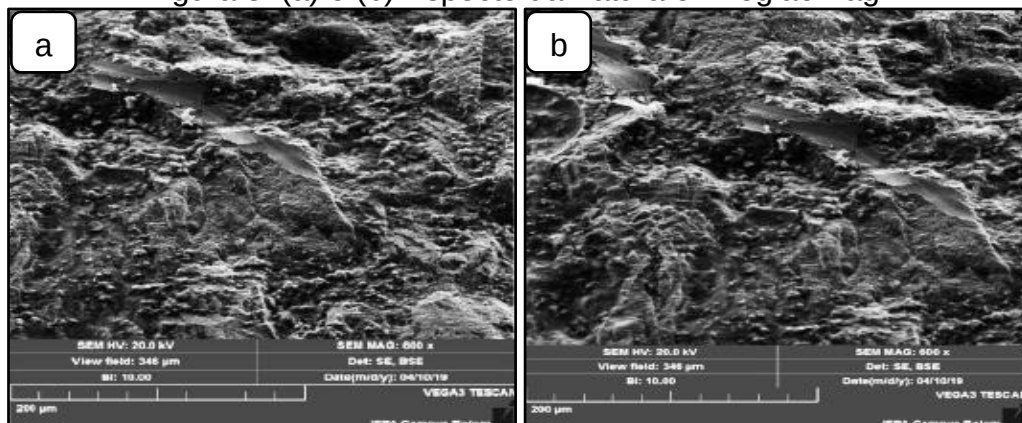
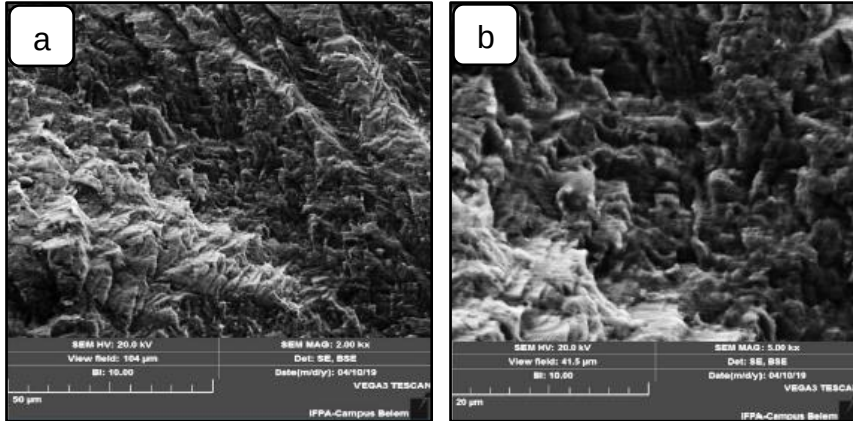


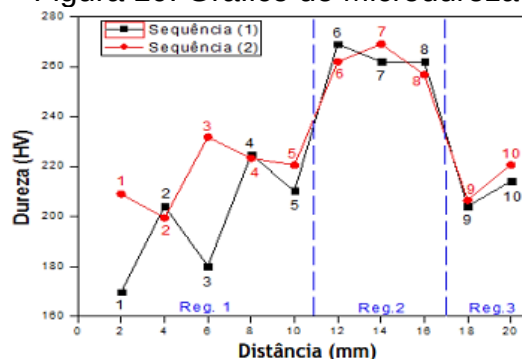
Figura 9. (a) e (b) Aspecto da fratura revelando região dúctil



A Figura 10 mostra os dados obtidos no ensaio de microdureza (HV), onde cada sequência de endentação (sequências 1 e 2) é composta por 10 pontos. Os 5 primeiros pontos do gráfico referentes a primeira região de endentação, onde é possível observar uma variação de dureza a partir de um ponto próximo a extremidade seguindo em direção a outra extremidade. Já na segunda região mais próxima ao cordão de solda e à trinca, que abrange os pontos 6, 7 e 8, é possível observar valores maiores e mais constantes de dureza. Do 5º para o 6º ponto, há um aumento brusco na dureza, causado possivelmente pelo endurecimento do material devido ao calor do processo de soldagem, como a formação de martensita. A microestrutura resultante da soldagem, quando não aliviada de tensões, pode favorecer a formação e propagação de trincas, devido à segregação de fases com baixo ponto de fusão (21).

Na transição da segunda para a terceira região da amostra, foi observada uma queda brusca na dureza do 8º para o 9º ponto, seguida por um pico moderado. A ZTA é mais suscetível a trincas devido ao aquecimento e à mudança na microestrutura, como o aumento de dureza e redução da resistência (22). Essa queda na dureza pode ser atribuída ao afastamento da região de solda, com os valores dos pontos 9 e 10 correspondendo ao material de base, sem a influência da temperatura de soldagem.

Figura 10. Gráfico de Microdureza



A Tabela 3 apresenta os resultados dos valores da média e desvio padrão do ensaio de microdureza Vickers, reforçando novamente a variação da dureza.

Tabela 3. Microdureza

	MPa
Sequência 1 (HV)	220,01 ± 34,51
Sequência 2 (HV)	229,91 ± 24,55

Os resultados deste estudo têm importantes implicações para a melhoria do desempenho e confiabilidade dos aços inoxidáveis em aplicações de petróleo e gás. A identificação de trincas superficiais e a análise das zonas de solda e ZTA sugerem que o controle dos parâmetros de soldagem e a aplicação de tratamentos térmicos de alívio de tensões são essenciais para minimizar a ocorrência de falhas. Além disso, a caracterização química e microestrutural pode servir como base para a seleção de materiais e processos de fabricação mais robustos, visando aumentar a durabilidade e segurança dos componentes críticos em ambientes severos.

CONCLUSÃO

A análise química por FRX confirmou que a amostra estudada tem uma composição próxima à do aço inoxidável 316L, caracterizada por uma matriz austenítica. A microscopia óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV) identificaram trincas na região de solda e uma microestrutura típica de aços inoxidáveis austeníticos. A análise da superfície de fratura revelou a coexistência de fratura frágil e dúctil, sugerindo múltiplos fatores para a falha. A presença de trincas intergranulares e transgranulares, junto com a falta de penetração do material de adição na solda, indica que a falha foi possivelmente ocasionada por um processo de soldagem inadequado. O ensaio de microdureza Vickers (HV) mostrou variações ao longo da amostra, com menores valores em áreas distantes da solda e maiores nas regiões próximas, evidenciando o impacto térmico na zona afetada pela soldagem.

A ausência de sinais de fadiga ou falhas mecânicas e a não sensibilização sugerem que o material estava adequado para o serviço, reforçando que a falha ocorreu durante a soldagem. O estudo destaca a importância de um controle rigoroso nos parâmetros de soldagem para evitar falhas estruturais em aços inoxidáveis austeníticos. Recomenda-se para futuros trabalhos a investigação de métodos alternativos de soldagem e tratamentos pós-soldagem, além do uso de técnicas avançadas de caracterização para a compreensão dos mecanismos de falha.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a estrutura e o apoio financeiro fornecidos pelo IFPA, UFPA, CAPES e CNPq para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

1. GARDNER, L. Stability and design of stainless steel structures—Review and outlook. THIN-WALLED STRUCTURES, v. 141, p. 208-216, 2019.
2. ROMEIRO, S. B. B. Química na Siderurgia. 300f. Tese (Doutorado em Educação Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
3. SANTOS M. L. *et al.* Caracterização mecânica e análise da morfologia de fratura de chapas de aço Api 5l X80 com diferentes espessuras e composições químicas. IV Congresso Brasileiro de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – CONEPETRO, realizado em 26 de maio de 2021.
4. BACCA, K.; LOPES, N.; BATISTA, G.; DOS SANTOS, C.; COSTA, E. Electrochemical, mechanical, and tribological properties of corrosion product scales formed on X65 steel under CO₂ supercritical pressure environments. SURFACE AND COATINGS TECHNOLOGY, v. 446, p.128789, 2022.
5. VELÁZQUEZ, J.; GONZÁLEZ-ARÉVALO, N.; DÍAZ-CRUZ, M.; CERVANTES-TOBÓN, A.; HERRERA-HERNÁNDEZ, H.; HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, E. Failure pressure estimation for an aged and corroded oil and gas pipeline: A finite element study. JOURNAL OF NATURAL GAS SCIENCE AND ENGINEERING, v. 101, p. 104532, 2022.
6. VARGAS, B. A.; ALBITER, A.; VAZQUEZ, G. H.; CAMARGO, O. M.; HALLEN, J. M. Efeito do envelhecimento natural sobre as regiões microestruturais, propriedades mecânicas, resistência à corrosão e fraturas em juntas soldadas em tubulação de aço API5L X52. REV METAL. v. 50, p. 223-23, 2014.
7. CALLISTER, W. D., RETHWISCH, D. G. Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução. 9 ed. 2016.
8. BARON, A. The generalized diagram of fracture toughness for pipeline steels. INT. JOURNAL OF PRESSURE VESSELS AND PIPING, v. 98, p. 26-29, 2012.
9. KARAMI, V.; DARIANI, B.; HASHEMI, R. Investigation of forming limit curves and mechanical properties of 316 stainless steel/St37 steel tailor-welded blanks produced by tungsten inert gas and friction stir welding method. CIRP JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND TECHNOLOGY, v. 32, p. 437-446, 2021.
10. LOBATO, J. C. S. Caracterização Estrutural e de Propriedades Mecânicas da Solda Depositada pelo Processo GMAW - Arame Frio em Chapas de Aço. 100f. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos de Fabricação) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.
11. TANG, W.; YANG, X.; LI, S.; LI, H. Microstructure and properties of CLAM/316L steel friction stir welded joints. JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, v. 271, p.189-201, 2019.
12. JAFARZADEGAN, M.; FENG, A.; ABDOLLAH-ZADEH, A.; SAEID, T.; SHEN, J.; ASSADI, H. Microstructural characterization in dissimilar friction stir welding between 304 stainless steel and st37 steel. MAT CHARAC., v. 74, p. 28-41, 2012.
13. KUMAR SINGH, D.; SAHOO, G.; BASU, R.; SHARMA, V.; MOHTADI-BONAB, M. Investigation on the microstructure-mechanical property correlation in dissimilar

- steel welds of stainless steel SS 304 and medium carbon steel EN 8. JOURNAL OF MANUFACTURING PROCESSES, v. 36, p. 281-292, 2018.
14. BATISTA L. A. Soldagem MIG/MAG com fluxo ativo do aço inoxidável austenítico AISI 304L. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte, 2018.
 15. PETROBRAS. Norma Petrobras N-2370. Comissão de Normas Técnicas, 2003.
 16. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E384: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. In West Conshohocken, p. 19428-2959, United States, 2005.
 17. DA CRUZ JUNIOR, E.J.; GALLEGO, J.; SETTIMI, A.G. *et al.* Influence of Nickel on the Microstructure, Mechanical Properties, and Corrosion Resistance of Laser-Welded Super-Duplex Stainless Steel. JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE, v. 30, p. 3024-3032, 2021.
 18. SUN, YT.; TAN, X.; LEI, LL. *et al.* Revisiting the effect of molybdenum on pitting resistance of stainless steels. TUNGSTEN, v. 3, p. 329-337, 2021.
 19. AMERICAN SOCIETY FOR METALS HANDBOOK. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. 6. Ed. Ohio: ASM International, p. 289, 1994.
 20. SANTOS, T. F. A.; ANDRADE, M. S.; CASTRO, A. L. F. Efeito da taxa de aquecimento na reversão da martensita induzida por deformação em umaço inoxidável austenítico do tipo ABNT 304. REVISTA ESCOLA DE MINAS. Ouro Preto, v. 1, p. 53-58, 2009.
 21. CARVALHO, A. M. S.; FILHO, M. M. M.; MARTINS, D. A. Análise de falha em eixo de motor usado em processamento de cosméticos. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciencia dos Materiais, Cuiabá. Conferências, Mato Grosso, p. 6502-6510, 2014.
 22. MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; BRACARENSE, A. Q. Soldagem, Fundamentos e tecnologia. 2 ed. Belo Horizonte: UFMG, 362 p., 2005.

FAILURE ANALYSIS OF GAS PIPELINE COMPONENTS VIA CHEMICAL, MICROSTRUCTURAL, FRACTOGRAPHIC AND MICROHARDNESS CHARACTERIZATION

ABSTRACT

Stainless steels are widely used due to their high chromium content and high corrosion resistance, combining excellent oxidation resistance, good ductility and weldability. However, failures are not uncommon, especially if special care is not taken in the welding process. This study aims to characterize and analyze a stainless steel flange used as a support for temperature sensors in an industrial pipeline, which presented cracks causing leakage. Through liquid penetrant tests, X-ray fluorescence, optical and electron microscopy, and microhardness, the type of steel and the cracks in specific regions associated with the manufacturing process, which influenced the equipment failure, were identified.

Keywords: x-ray fluorescence, fracture, crack, welding, stainless steel.