



ANÁLISE DE FALHA DO TUBO DE TROCADOR DE CALOR ESPIRAL INOX 304L

Isaú de S. A. Júnior^{1*}, Sandro Griza², Iris S. Santos³, Brenno L. Nascimento⁴ e
Myllena V. Silva⁵

1 - Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, SE. Povoado Carlos Torres, Salgado, CEP 49390 - 000, SE.

isaujr@hotmail.com

2 - Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, SE. .

3 - Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, SE.

4 - Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, SE.

5 - Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, SE.

RESUMO

A análise de falha pode revelar-se como uma importante ferramenta para melhoria de projeto de elementos de equipamentos. Nesse contexto, o presente estudo visa determinar as causas que levaram o tubo de serpentina - fabricado em liga de aço inoxidável 304L de diâmetro 1-1/2" SCH-40S, elemento que permite a troca térmica entre dois fluidos com diferentes temperaturas e características, sofrer uma trinca que percorreu um caminho de propagação em forma helicoidal ao seu redor. O estudo seguiu a metodologia usual empregada em análise de falhas. Dessa forma, foi realizada análise visual da trinca e a sua microestrutura a partir de seção metalográfica de corte transversal ao plano principal do tubo, ensaio de dureza e análise química. Através da metodologia empregada foram estabelecidos os fatores mais relevantes que provocaram a falha do componente. A falha foi por corrosão sob tensão, propagando - se de forma frágil, governada pela máxima tensão normal, percorrendo um caminho em hélice ao redor do tubo. A fabricação por enrolamento em serpentina do tubo fornece a componente normal das tensões residuais que favoreceu o mecanismo de corrosão sob tensão. Além disso, constatou -se que a microestrutura austenítica recozida do aço do tubo apresentou crescimento de grão junto às paredes interna e externa. Isto se deveu ao aquecimento durante o processo de fabricação. Grãos grosseiros reduzem a tensão crítica para escoamento, influenciando na corrosão sob tensão.

Palavras-chave: Trocador de calor. Análise de falha. Aço austenítico. Corrosão sob tensão.

INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis (AI) possuem propriedades como elevada resistência à corrosão, boa resistência mecânica, excelente soldabilidade, tenacidade e alta capacidade de conformação que permitem aplicações em diversos campos da engenharia [1] [2].

Nos aços inoxidáveis é possível encontrar famílias em função dos elementos de liga adicionados e, por consequência, da microestrutura obtida à temperatura ambiente. Dentre as diferentes classes de aços inoxidáveis, os austeníticos são os mais utilizados, caracterizados pelo baixo teor de carbono ligado ao cromo e níquel, cujo resultado é a formação da estrutura austenítica (γ). Os aços inoxidáveis austeníticos (AIA's) são comumente utilizados nas indústrias químicas, petroquímicas, alimentícias e automobilísticas [2] [3].

Entre as famílias dos AIA's está o AISI 304. O desenvolvimento de componentes e estruturas utilizando este material em decorrência das suas propriedades é uma realidade corrente [3]. Componentes compostos por AIA's e que estão suscetíveis a presença simultânea de componente normal das tensões residuais e um meio corrosivo específico são preocupação das indústrias de processos químicos e de petróleo em decorrência das constantes falhas [4] [5].

No cenário industrial, a falha é o evento indesejável, pois cria consequências prejudiciais, nocivas e de risco. A análise de falhas consiste em um processo que associa inspeção visual, análise técnica, coleta de dados e interpretação das análises. Após essas etapas será possível indicar os motivos que culminaram com a falha e propor soluções de melhoria ou mesmo prevenção total contra a causa [4].

O presente estudo teve o intuito de analisar as causas que levaram o tubo de serpentina fabricado em liga de aço inoxidável 304L de diâmetro 1-1/2" SCH-40S, elemento que permite a troca térmica entre dois fluidos com diferentes temperaturas e características, sofrer uma trinca que percorreu um caminho de propagação em forma helicoidal ao seu redor. Para essa análise, se fez necessário caracterizar a composição e a microestrutura da peça, além de identificar o mecanismo de fratura para propor alterações que reduzam a incidência de falhas futuras.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram feitas a caracterização metalúrgica e análise de trincas do tubo de serpentina fabricado em liga de aço inoxidável 304L de diâmetro 1-1/2" SCH-40S. Foram selecionadas duas amostras do tubo para as análises, uma delas contendo a trinca identificada visivelmente (Figura 1. a)). A figura 1. b) mostra o sistema das serpentinas de fluxo de água e vapor de água da qual foi retirada as amostras da análise. O sistema opera em uma indústria de alimentos.

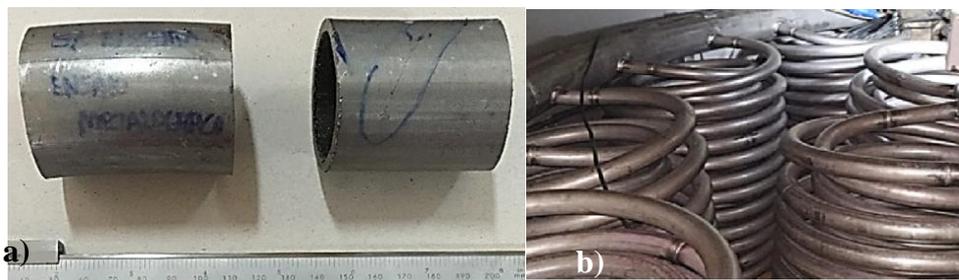


Figura 1.a) Amostras do tubo de aço inoxidável 304L. Amostra íntegra à esquerda, amostra trincada à direita. A trinca está delineada pelo risco em azul. b) Tubos enrolados que formam as serpentinas

As imagens macroscópicas foram obtidas por câmera fotográfica. A trinca foi aberta mecanicamente para análise de mecanismo de falha. Foi feita análise visual da trinca em estereomicroscópio (Zeiss Stemi 2000C). A análise microestrutural foi realizada a partir de seção metalográfica de corte transversal ao plano da trinca. A amostra foi polida em pasta de diamante de 1 μm e atacada com reativo água régia (75% de HCl 25% de HNO₃). A microdureza da liga foi verificada através da escala Vickers (Future Tech FM 800, 1 kgf),

aplicando cinco endentações aleatoriamente distribuídas sobre a amostra metalográfica. A análise química foi realizada através de cinco queimas em amostra do tubo devidamente preparada, utilizando espectrômetro de emissão ótica (Oxford Foundry Master Xpert).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A microdureza da liga é de 180 HV (desvio padrão de 2 HV). O aço de fabricação do tubo é inoxidável austenítico AISI 304L, de acordo com os teores dos elementos encontrados na análise química (Tabela 1).

Tabela 1. Composição química (% peso) do aço inoxidável de fabricação do tubo.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
0,04	0,34	1,14	0,04	0,03	18,6	0,16	8,62	0,08

A trinca analisada percorreu um caminho de propagação em forma helicoidal ao redor do tubo (Figura 3. a)). A serpentina é fabricada através de conformação por enrolamento do tubo matéria prima (procedimento igual ao de fabricação de molas helicoidais por enrolamento). Assim, a distribuição de tensões residuais na parede do tubo devido ao enrolamento compreende a tensão normal principal a 45 graus com o eixo do tubo. Esta tensão pode provocar a abertura de trinca em hélice ao redor do tubo no caso de trincas frágeis, governadas pela tensão normal, assim como verificado neste caso. A trinca progride no plano de máxima tensão normal, mas apresenta ramificações, que indicam mecanismo de trinca por corrosão sob tensão (Figura 3.b)). A parede interna do tubo, junto ao plano da trinca, apresenta intensa formação de pites de corrosão (Figura 4).

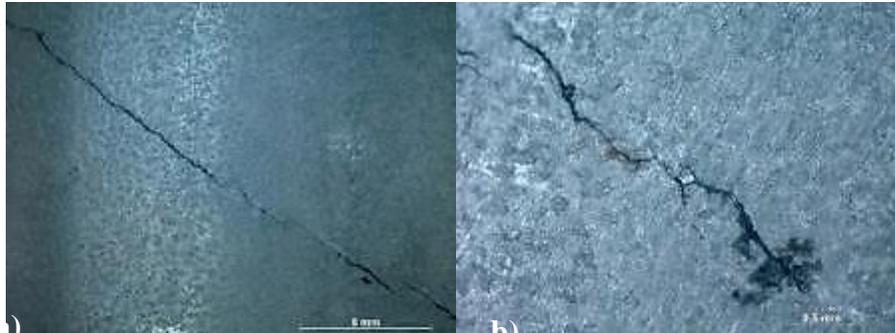


Figura 3. a) Trinca seguindo percurso helicoidal ao redor do tubo. b) Aspecto ramificado da trinca quando vista em maior ampliação.



Figura 4. Parede interna do tubo. O plano inferior da imagem coincide com a trinca após ser aberta. Observa-se grande intensidade de pites de corrosão dispersos sobre a parede interna.

Após a abertura mecânica da trinca, foi realizada a análise de sua superfície (Figura 5). A trinca mostra aspecto frágil de superfície de fratura plana, sem a presença de zona de cisalhamento final. Marcas de propagação da trinca são observadas, que correspondem a marcas provocadas com o passar do tempo por mecanismo de trincamento por corrosão sob tensão.



Figura 5. Superfície da trinca que mostra aspecto frágil de fratura plana. A seta indica a parede interna do tubo na imagem a esquerda. A imagem em maior detalhe da direita permite observar marcas horizontais, assim como a indicada pela seta, que correspondem a marcas de propagação da trinca por corrosão sob tensão.

A análise metalográfica permitiu identificar mais uma trinca secundária abaixo da trinca principal e paralela a esta, apresentando também as ramificações (Figura 6).



Figura 6. A trinca principal corresponde ao plano superior da imagem. Além disso, observa-se trinca secundária abaixo da principal, que inicia na parede interna do tubo (a direita na imagem) e progride paralelamente a principal, apresentando ramificações.

A microestrutura do aço inoxidável de fabricação do tubo é constituída por grãos de austenita (Figura 7), contendo maclas de recozimento e maclas de deformação (Figura 8). Os grãos austeníticos estão refinados no núcleo, mas apresentam crescimento de grão junto às paredes interna e externa do tubo.



Figura 7. Microestrutura austenítica do aço inoxidável de fabricação do tubo. Linhas verticais correspondem as linhas de fluxo de laminação da matéria prima do tubo (fibramento mecânico). A parte

a direita da imagem mostra a microestrutura junto a parede interna do tubo. Observamos crescimento de grão junto a parede interna. Este mesmo aspecto foi observado na análise da parede externa (não mostrado). Seguindo-se para a esquerda, chegamos no centro da espessura de parede, que apresenta grãos refinados.

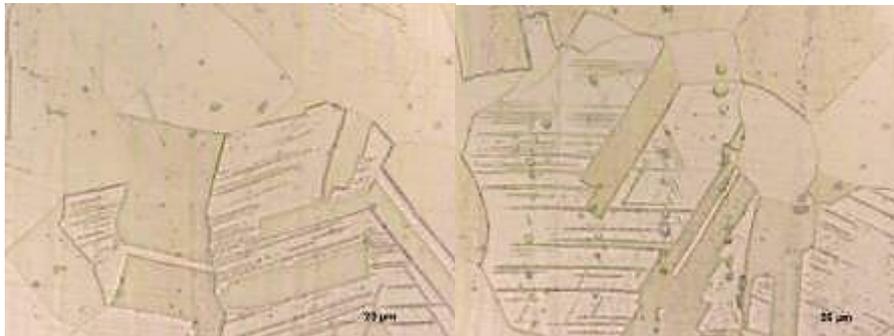


Figura 8. A microestrutura do aço inoxidável de fabricação do tubo é constituída por grãos de austenita contendo maclas de recozimento (faixas regulares que transpassam os grãos) e algumas maclas de deformação (linhas finas).

CONCLUSÕES

A trinca analisada apresentou mecanismo de propagação por corrosão sob tensão. A trinca propagou de forma frágil, governada pela máxima tensão normal, percorrendo um caminho em hélice ao redor do tubo. A fabricação por enrolamento em serpentina do tubo fornece a componente normal das tensões residuais que favorece o mecanismo de corrosão sob tensão.

As deformações do enrolamento devido às eventuais variações de pressão e temperatura em serviço também poderiam contribuir para a falha, que neste caso poderia ser por corrosão sob tensão ou outros mecanismos, como corrosão fadiga ou fadiga térmica. Mas estes outros mecanismos só ocorreriam em condições severas de variações de pressão/temperatura, o que não é o caso desta serpentina. A intensa formação de pites de corrosão na parede interna do tubo indica a susceptibilidade da liga AISI 304L à corrosão sob o meio de fluxo.

A microestrutura austenítica recozida (dureza de 180 HV) do aço do tubo apresentou crescimento de grão junto às paredes interna e externa. Isto se deve ao aquecimento durante o processo de fabricação. Grãos grosseiros devem ser evitados, pois reduzem a tensão crítica para escoamento, influenciando na corrosão sob tensão.

Algumas alternativas podem ser tomadas para reduzir a possibilidade de corrosão sob tensão dos tubos, dentre as quais destacam-se:

- Alívio de tensões após o enrolamento dos tubos;
- Controle da composição do fluido, para reduzir a susceptibilidade de corrosão;
- Seleção de liga mais resistente a corrosão como a liga AISI 316 ou AISI 316L;
- Evitar o crescimento de grão pelo controle de tempo e temperatura de aquecimento durante a fabricação da matéria prima do tubo.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, CAPES e FAPITEC pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

1. PADILHA, L. C. G. E. A. F. Aços inoxidáveis austeníticos. Microestrutura e propriedades. 2. ed. [S.l.]: hemus, 2002.
2. CAO, B.; IWAMOTO, T.; BHATTACHARJEE, P. P. An experimental study on strain-induced martensitic transformation behavior in SUS304 austenitic stainless steel during higher strain rate deformation by continuous evaluation of relative magnetic permeability. *Materials Science and Engineering: A*, v. 774, 2020.
3. ZENG, W.; YUAN, H. Mechanical behavior and fatigue performance of austenitic stainless steel under consideration of martensitic phase transformation. *Materials Science and Engineering: A*, v. 679, p. 249-257, 2017.
4. RAVINDRANATH, K.; ALAZEMI, R. Failure of stainless steel 304L air cooler tubes due to stress corrosion cracking caused by organic chlorides. *Engineering Failure Analysis*, v. 102, p. 79-86, 2019.
5. KHALIFEH, A. R. et al. Stress corrosion cracking of a circulation water heater tubesheet. *Engineering Failure Analysis*, v. 78, p. 55-66, 2017.

FAILURE ANALYSIS OF SPIRAL HEAT EXCHANGER TUBE 304L STAINLESS

ABSTRACT

Failure analysis can prove to be an important tool for improving design and equipment elements. In this context, this study aims to determine the causes that led to the serpentine tube made of stainless steel alloy 304L with a diameter of 1-1/2" SCH-40S, element that allowed the thermal exchange between two fluids with different temperatures and characteristics, suffer a crack that propagated in a helical way around it. The study followed the usual methodology used in failure analysis. In this way, a visual analysis of the crack and its microstructure was carried out from a metallographic cross-section to the plane, hardness test and chemical analysis. Through the methodology used, the most relevant factors that caused the component failure were established. In view of this, it was found that the crack analyzed showed a propagation mechanism by stress corrosion, propagating fragilely around the tube, governed by the maximum normal stress. Coil winding fabrication of the tube provides the normal component of residual stresses that favors the stress corrosion cracking mechanism. Furthermore, it was found that the annealed austenitic microstructure of the tube steel showed grain growth along the inner and outer walls. This is due to heating during the manufacturing process. Coarse grains reduce the critical stress for yielding, influencing stress corrosion cracking.

Keywords: *Heat exchanger. Failure analysis. Austenitic steel. Stress corrosion.*