

ANÁLISE DE FALHA DE ELEMENTO DE AQUECIMENTO USADO EM CALORIFICADOR DE ÁGUA DOCE *

Matheus Mariano da Silva Reis¹
Priscylla Ferreira dos Santos²
Lucas Silva Fontes³
Ihana Gabriela Conceição de Jesus⁴
Sandro Griza⁵

Resumo

O presente estudo trata da análise de falha de elemento de aquecimento utilizado em calorificador de água doce. Três tubos de aquecimento conectados ao suporte compõem o elemento de aquecimento. Um desses tubos apresentou graves danos. O tubo danificado foi fabricado a partir de aço inoxidável superaustenítico com microdureza de 199 HV. O tubo apresentou sensibilização, identificada por carbonetos de cromo nos contornos de grãos. A sensibilização diminui o teor de cromo nas vizinhanças dos contornos de grãos, o que aumenta a propensão a corrosão intergranular da liga em contato com a água. Quando as trincas intergranulares evoluem, elas podem atingir a superfície interna do tubo e permitir o curto-circuito entre o tubo e a bobina de resistência elétrica dentro do tubo. Vários desses locais de curto-circuito identificados no tubo causaram danos por fusão localizada da liga e colapsos plásticos do tubo.

Palavras-chave: Elemento de aquecimento; Sensibilização; Corrosão intergranular; Análise de falha.

FAILURE ANALYSIS OF THE HEATING ELEMENT USED IN THE FRESH WATER CALORIFIER

Abstract

The present report deals with the failure analysis of the heating element used in the fresh water calorifier. Three heating tubes connected to the support compose the heating element. One of these tubes presented severe damage. The damaged tube was manufactured from superaustenitic stainless steel with 199 HV1 microhardness. The tube presented sensitization, identified by chromium carbides in the grain boundaries. Sensitization decreases the chromium content in the vicinities of the grain

boundaries, which enhances the intergranular corrosion of the alloy in contact with the water. When the intergranular cracks evolve to a pitting, they can reach the inner surface of the tube, and allow for the short circuit between the tube and the electric resistance coil inside the tube. Several such short circuit sites identified in the tube caused damage by melting and plastic collapses of the tube.

Keywords: Heating element; Sensitization; Intergranular corrosion; Failure analysis.

¹ Graduando Engenharia de Materiais, Pesquisador de Iniciação Científica, Bolsista, Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

² Graduando Engenharia de Materiais, Pesquisadora de Iniciação Científica, Bolsista, Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

³ Graduando Engenharia de Materiais, Pesquisador de Iniciação Científica, Bolsista, Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil

⁴ Graduando Engenharia de Materiais, Pesquisadora de Iniciação Científica, Bolsista, Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil

⁵ Graduação em Engenharia Mecânica; Mestrado em Engenharia de Minas; Metalúrgica e de Materiais; Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Professor adjunto 3, Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe (UFS), São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O elemento de aquecimento elétrico é comumente utilizado em caldeiras elétricas e aquecedores de água. A caldeira de resistência é caracterizada por um vaso de pressão onde elementos de aquecimento se encontram imersos na água (Figura 1). Esses elementos de aquecimento são alimentados por resistências elétricas para melhor eficiência na produção de vapor, abastecendo máquinas nos diversos processos industriais. Dessa forma, a caldeira elétrica é um equipamento cuja função é produzir vapor através do aquecimento de água [1].

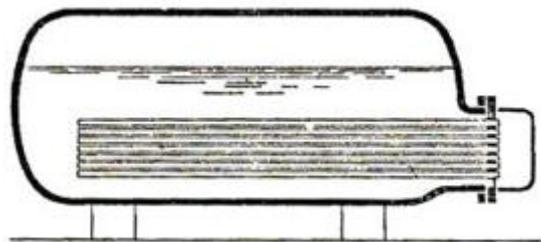


Figura 1. Caldeira de resistência [1]

Sendo assim os elementos de aquecimento são submetidos a pressão, temperatura e ao contato constante com água. Com isso, é requerido que o material usado para compor o elemento de aquecimento seja resistente à corrosão. Por isso são utilizadas ligas com alto teor de cromo e níquel para a fabricação dos elementos [2]. No interior dos tubos de aquecimento, há o fio condutor envolvido e compactado por isolante térmico cerâmico permitindo desempenho em altas temperaturas sem perda de energia.

Os aços inoxidáveis em condições de alta temperatura podem sofrer o processo chamado de sensitização. A sensitização é uma fragilização que ocorre através da precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grãos da austenita, como resultado da combinação do cromo com o carbono quando a liga de aço está exposta à altas temperaturas [3,4]. Dessa maneira, os precipitados de carbonetos de cromo se formam nos contornos de grão, fazendo com que aumente a susceptibilidade à corrosão intergranular [5], visto que o interior do grão permanecerá rico em cromo, mas a periferia do grão ficará empobrecida de cromo. Isto favorece a corrosão galvânica da periferia do grão. Além disso, a formação dos carbonetos por si fragiliza os contornos de grão. O grau de sensitização pode ser avaliado utilizando métodos da norma ASTM A262, que possibilita verificar a tendência da liga sofrer com esse fenômeno [6].

Diante disso, o presente estudo tem o objetivo de analisar a falha do elemento de aquecimento constituído de aço inoxidável superaustenítico, usado em caldeira elétrica submetido à ambiente corrosivo e às altas temperaturas. As condições de uso contribuíram para falha catastrófica dos tubos, porém a falha iniciou-se por uma fragilização intergranular causada pelo processo de sensitização da liga.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O elemento de aquecimento de um calorificador de água fresca foi estudado para análise de falha (Figura 1). Três tubos de aquecimento conectados ao suporte do termostato compõem o elemento de aquecimento. Um desses tubos apresentou graves danos. O tubo de aquecimento consiste em um tubo de parede fina

preenchido com pó de cerâmica isolante e a bobina de resistência elétrica centrada e envolvida pela cerâmica. O isolamento evita o contato elétrico do tubo com a bobina – evitando o curto-circuito entre o tubo e a bobina de resistência elétrica dentro do tubo, e permite controlar a taxa de transferência de calor para a água. Os eletrodos mantêm as bobinas nas extremidades dos tubos, na conexão com o suporte. Vários locais de curto-circuito identificados no tubo causaram danos por fusão e colapsos plásticos do tubo.



Figura 2. Elemento de aquecimento. A seta indica o local onde o segmento danificado do tubo estava antes do corte para análise.

Câmera fotográfica (Canon 1000D) e microscópio estereoscópico (Zeiss Stemi 2000) permitiram obter imagens para análise visual. As amostras metalográficas foram preparadas a partir dos cortes longitudinal e transversal do tubo, nos locais danificados. As amostras foram preparadas de acordo com o procedimento padrão de lixamento e polimento, e foram atacadas com reagente adequado (75% de HCl e 25% de HNO₃). As metalografias foram obtidas a partir de microscópio óptico (Leica DM 2500 M).

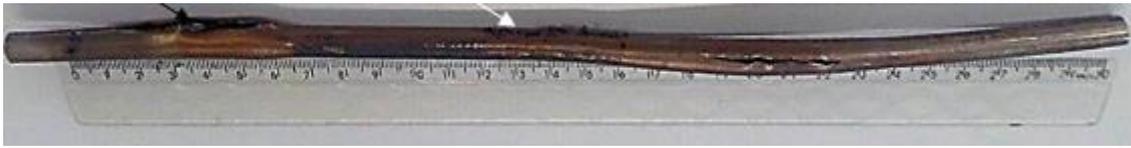
A verificação de microdureza (Future Tech FM 800) foi feita através de cinco indentações de microdureza Vickers (HV1) sobre uma das amostras metalográficas. A análise química foi realizada por espectrometria de emissão óptica (Foundry Master Expert, Oxford Instruments) através de cinco queimas em uma amostra devidamente preparada. A análise EDX (EDX 720HS, Shimadzu) foi utilizada para confirmar o conteúdo de Mo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização de danos

Os danos do tubo ocorreram de duas maneiras: fusão localizada e duas regiões onde a deformação plástica ocorreu devido à sobrepressão do tubo em ambos os lados da região de fusão (Figura 3). O tubo possui um depósito superficial (ou tonalidade) azul em algumas regiões. A sobrepressão proporcionou fluxo plástico e trincas longitudinais no tubo. Um dos locais de sobrepressão corresponde à extremidade do eletrodo. A Figura 4 mostra em detalhes os locais de fusão e superaquecimento localizados ao longo da parede do tubo. O aspecto de queima (Figura 5) identifica locais de superaquecimento. Pites e pontos de fusão do metal foram identificados em alguns lugares na superfície interna do tubo, onde as trincas intergranulares na superfície externa também podem ser vistas em menor ampliação

(Figura 6). Pites seguem da superfície externa para a superfície interna do tubo (Figura 7).



(a)



(b)



(c)

Figura 3. A fusão localizada (seta branca) entre as duas regiões de sobrepressão do tubo (a). A seta preta indica a extremidade do eletrodo, junto a um dos locais de sobrepressão (b). O pó isolante pode ser visto dentro do tubo. O tubo possui um depósito azul em algumas regiões, como pode ser visto em (a) e destacado em (c).

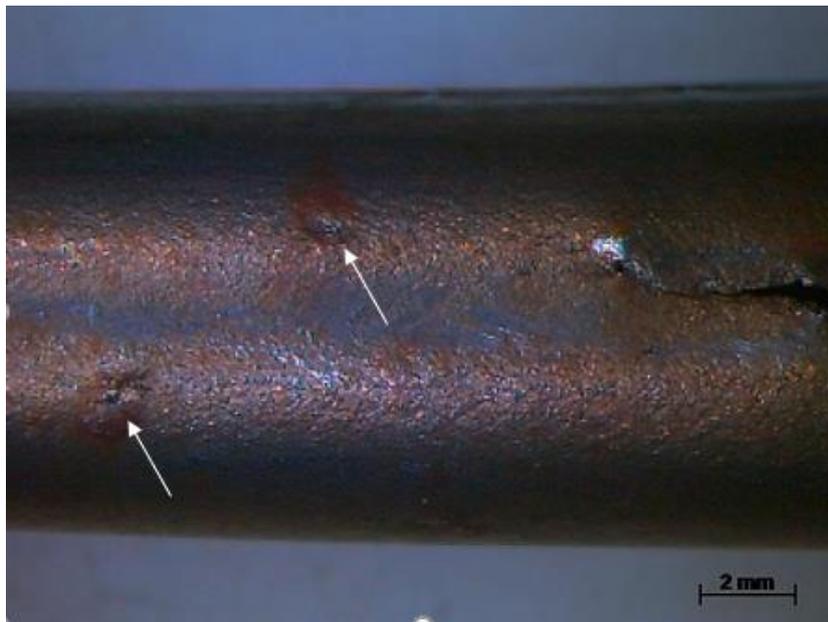


(a)

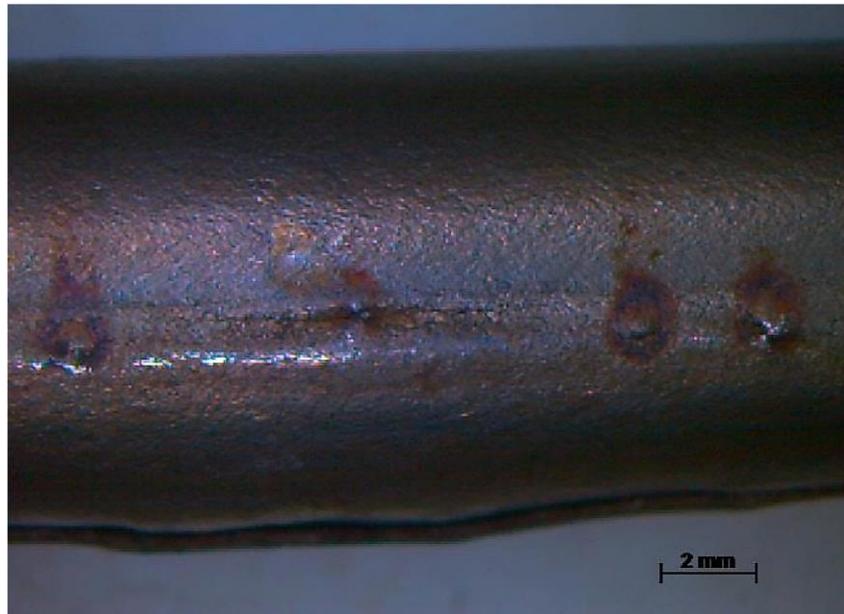


(b)

Figura 4. A fusão localizada do tubo. As setas destacam alguns dos pontos de superaquecimento (a). Detalhe da fusão localizada (b).



(a)

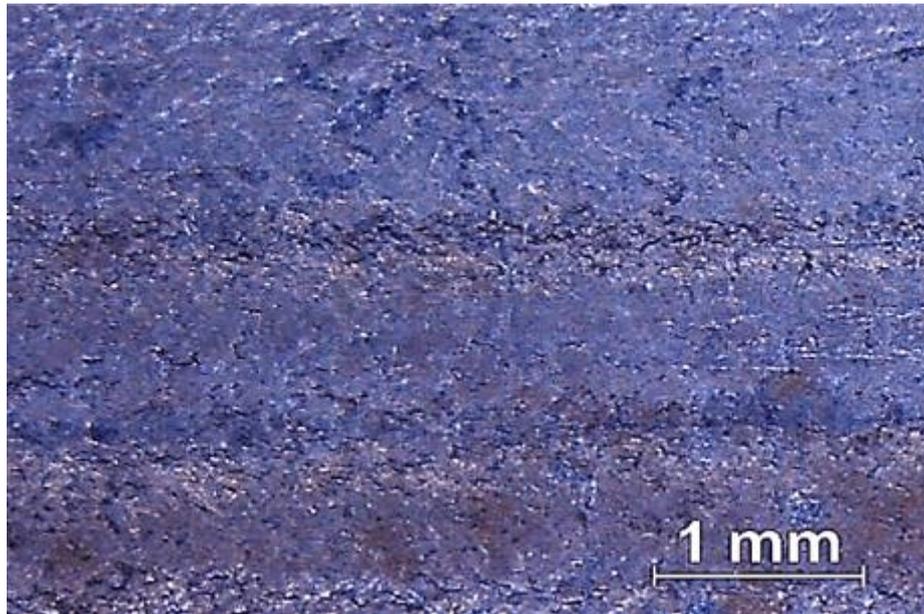


(b)

Figura 5. O aspecto de queima (setas) mais próximo de um dos sites de sobrepressão identifica o superaquecimento (a). Queima e fenda longitudinal perto da trinca de sobrepressão (b).

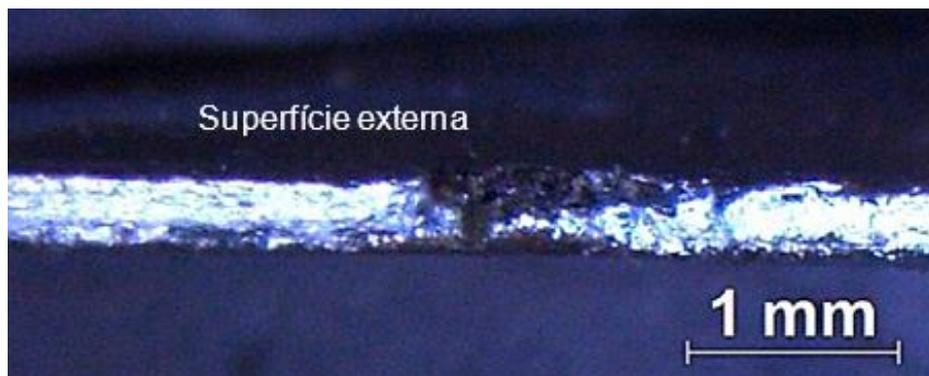


(a)

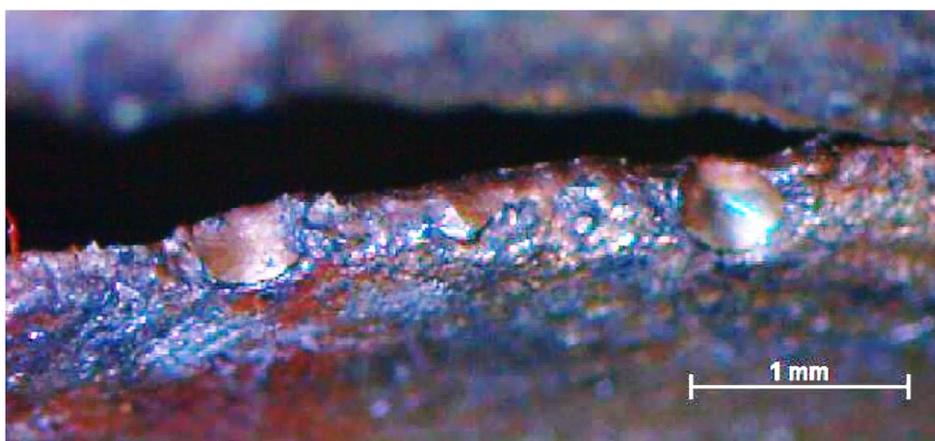


(b)

Figura 6. Pites e ponto de fusão (seta preta) na superfície interna do tubo. Uma trinca coincide com os dois pontos (a). Trincas intergranulares na superfície externa (b).



(a)

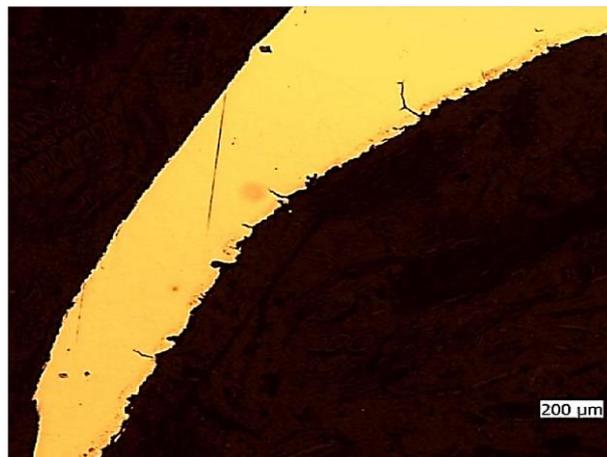


(b)

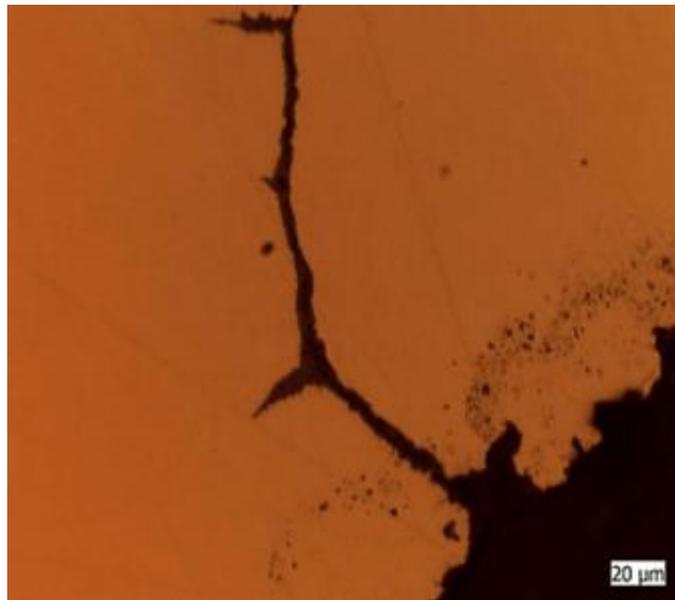
Figura 7. Pites seguindo da superfície externa para a superfície interna do tubo (a). Pites junto a trinca de sobrepressão (b).

3.1.1 Caracterização metalúrgica

A metalografia como polida da amostra da seção transversal mostrou corrosão intergranular a partir da superfície interna, perto de um pite (Figura 8 e 9). A microestrutura é composta por grãos de austenita e maclas de recozimento. Carbonetos de cromo indicam a sensibilização da liga, conforme observado nos contornos dos grãos (Figura 10). A sensitização permitiu a corrosão intergranular a partir da superfície externa do tubo (Figura 11). Microestrutura dendrítica foi identificada na seção transversal junto a um dos pites, apresentando aparência de queima. Isto indica o aquecimento localizado por curto-circuito (Figura 12 e 13). A dureza do tubo é de 199 HV1 (10,2 HV de desvio padrão). Os resultados da análise química estão na Tabela 1. O tubo foi fabricado a partir de aço inoxidável superaustenítico, ligado com Cr, Ni e Mo, com conteúdo em P e S em excesso.



(a)



(b)

Figura 8. Corrosão intergranular a partir da superfície interna (a). Detalhe em (b)

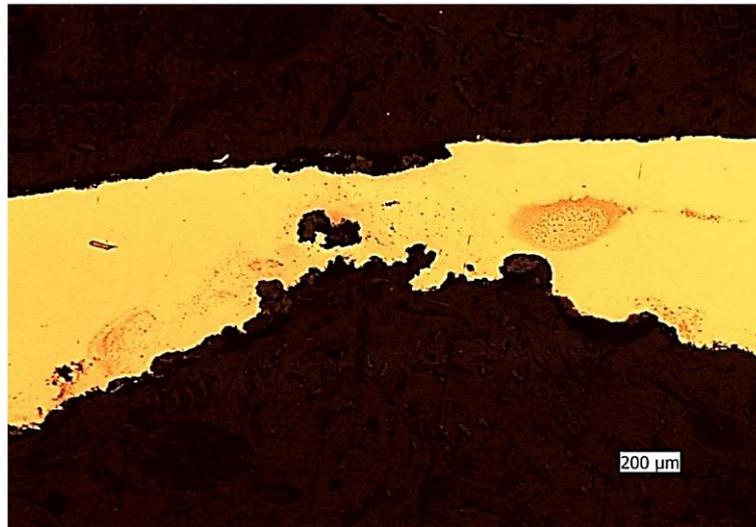


Figura 9. Corrosão junto a ambas parede externa e interna do tubo

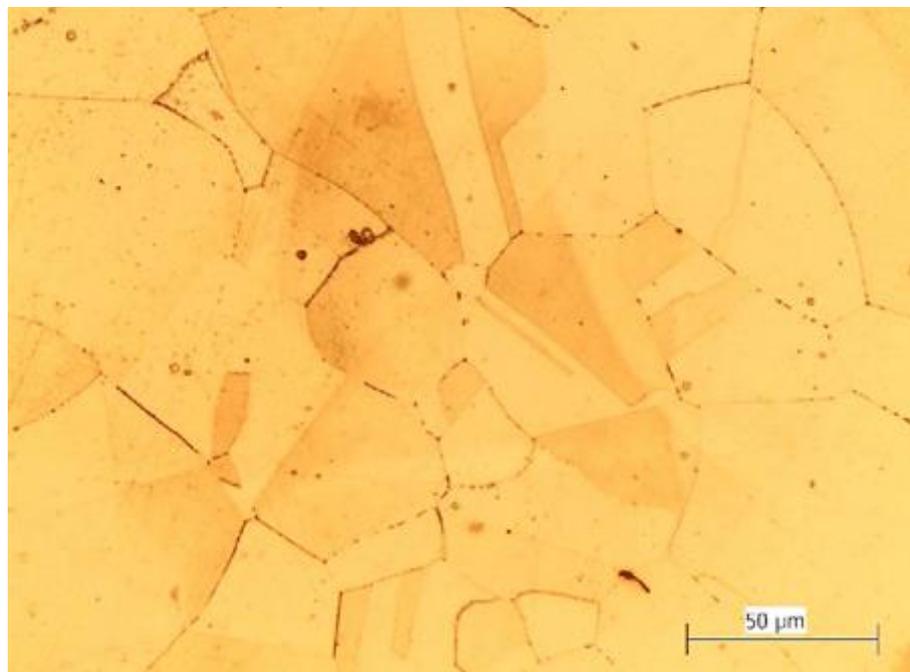


Figura 10. A microestrutura é composta de grãos de austenita, maclas de recozimento e carbonetos de cromo nos contornos dos grãos, indicando sensibilização da liga.



Figura 11. Sensitização permitiu a corrosão intergranular a partir da superfície externa (esquerda) do tubo.

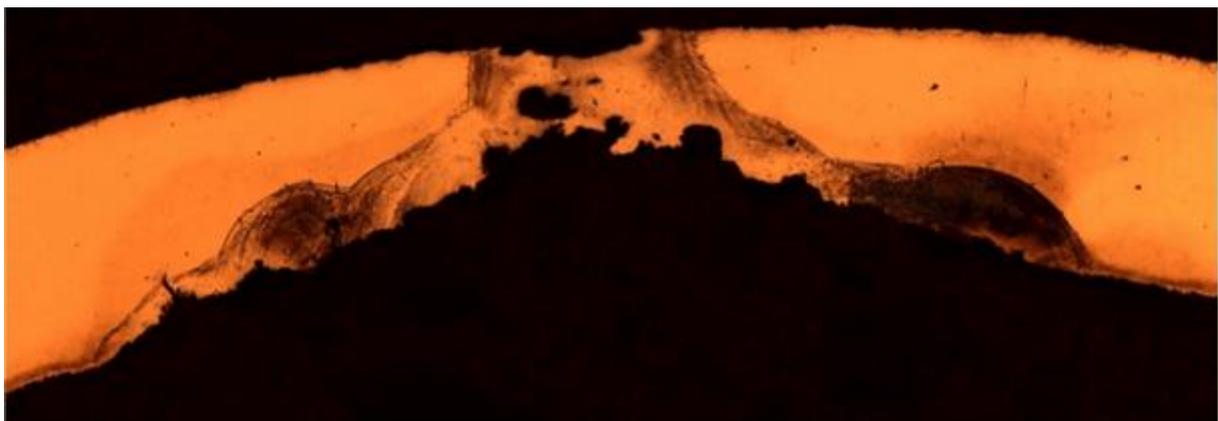
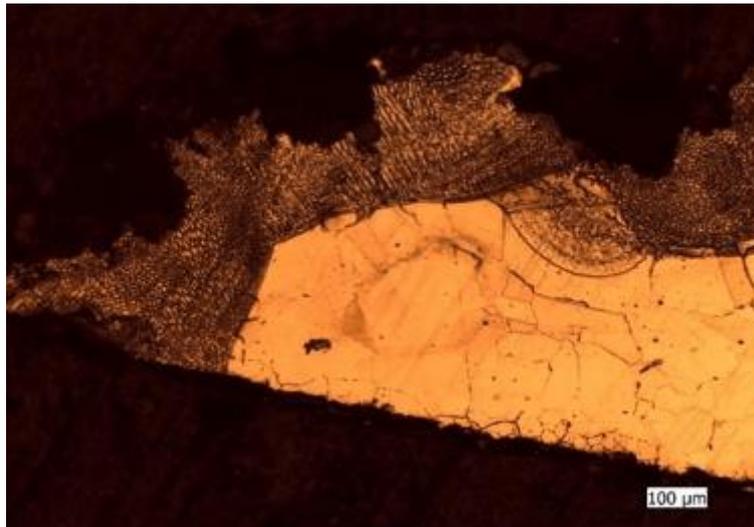
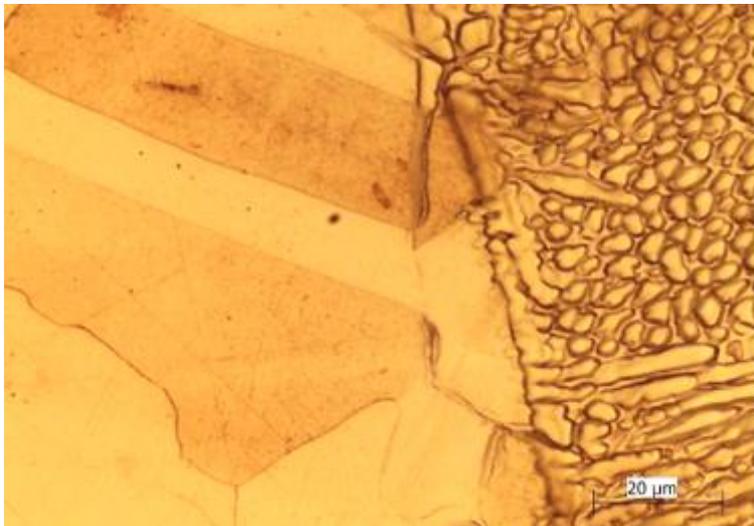


Figura 12. A mesma seção metalográfica da Figura 8, porém após o ataque químico. A aparência de queima indica aquecimento localizado por curto-circuito.



(a)



(b)

Figura 13. A microestrutura dendrítica na seção transversal junto a um dos pites (a). Isto indica aquecimento localizado por curto-circuito. Detalhe da microestrutura austenítica poligonal e formação dendrítica à direita (b).

Tabela 1. Composição química do tubo (% peso)

| Elemento | C | Al | Ni | Cu | Si | Mn | Mo | P | S | Cr | W | V |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| (%) | 0,04 | 0,27 | 17,0 | 2,65 | 1,55 | 0,42 | 6,50 | 0,10 | 0,09 | 22,9 | 0,45 | 0,11 |

4. CONCLUSÃO

O presente estudo trata da análise de falha do elemento de aquecimento utilizado no calorificador de água doce. O tubo foi fabricado em aço inoxidável superaustenítico ligado ao Cr, Ni e Mo. A microdureza do tubo é de 199 HV.

O tubo apresentou sensitização, que foi identificada por carbonetos de cromo nos contornos dos grãos austeníticos. A sensitização é um processo de difusão de cromo devido à exposição da liga a altas temperaturas por um certo tempo, o que diminui o teor de cromo na periferia dos grãos, e aumenta a propensão à corrosão intergranular da liga em contato com a água, bem como favorece a formação de

trincas intergranulares. Quando as trincas intergranulares evoluem para um pite, elas podem alcançar a superfície interna do tubo. De fato, tanto a superfície externa quanto a interna do tubo apresentaram corrosão intergranular, que indica que ocorreu a entrada de água no interior do tubo, e permitiu o curto-circuito entre o tubo e a bobina de resistência elétrica dentro do tubo, já que a água pode fluir pelas partículas do isolante cerâmico. O tubo apresenta vários locais de curto circuito, que causaram danos no tubo por fusão localizada e deformação plástica. A deformação plástica ocorreu devido à sobrepressão do tubo em ambos os lados da região de fusão, e indica que houve confinamento de água que aqueceu por curto-circuito, transformando-se em vapor e, portanto, expandindo-se, causando a sobrepressão.

Agradecimentos

Os autores agradecem as agências de fomento Cnpq, Capes e Fapitec

REFERÊNCIAS

- 1 Mucciato, JC. Caldeiras de alta pressão. Revista TAE. 2012 [acesso em 30 maio 2019]. Disponível em: <http://www.revistatae.com.br/4493-noticias>.
- 2 Padilha, A.F.; Guedes, L.C. Aços inoxidáveis austeníticos. São Paulo: Hemus Editora Limitada; 1994.
- 3 Sartori F, Bagetti JH. Avaliação do grau de sensitização em juntas soldadas pelos processos GTAW e FCAW em aços inoxidáveis austenítico AISI 304 e AISI 304L. 21º CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 09 a 13 de novembro de 2014, Cuiabá, MT, Brasil.
- 4 Vioto, RP, Antunes RA. Estudo do fenômeno de sensitização do aço inoxidável austenítico estabilizado AISI 347. 22º CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 06 a 10 de novembro de 2016, Natal, RN, Brasil.
- 5 JIAO, J.; SUN, J.; LI, G.; WU, B.; HE, C. Evaluation of the intergranular corrosion in austenitic stainless steel using collinear wave mixing method. NDT&E Int., v. 69, p. 1-8, 2015.
- 6 American Society for Testing and Materials. Standard practices for detecting susceptibility to Intergranular attack in austenitic stainless steels. (ASTM A262-02a). ASTM International: West Conshohocken; 2008.