

ANÁLISE DE FALHAS EM TUBULAÇÃO DO PRÉ-AQUECEDOR DE AR DA CALDEIRA DE UMA USINA SUCROALCOOLEIRA

Joner Oliveira Alves ¹
Saghi Ophelie Bahar Saedlou ²
Tarcísio Reis de Oliveira ³

Resumo

O aumento da demanda por energia a partir do bagaço da cana tem feito com que as usinas de açúcar e álcool busquem alternativas para redução da manutenção das caldeiras, liberando mais tempo para a produção. O emprego do aço inoxidável tem se mostrado uma das principais ferramentas para esta redução. Entretanto, erros de especificação podem levar a falhas prematuras. Este trabalho reporta os fatores que levaram a tubos de aço inoxidável AISI 409 romperem após meia safra quando aplicados no pré-aquecedor de ar da caldeira de uma usina. Nesta aplicação, o AISI 304 dura cerca de 15 safras e o aço carbono em torno de 3. Foram utilizadas as técnicas de análise química via úmida, microscopia ótica e EDS para caracterizar um tubo enviado pela usina. Os resultados apontaram formação de cloreto nas paredes internas dos tubos que, em conjunto com o ambiente, acelerou o processo de corrosão. O aço carbono apresentou maior vida útil dada a espessura 70% mais elevada. Devido às condições de trabalho do equipamento é recomendável o emprego de aços inoxidáveis com maior resistência à corrosão, como o tradicional austenítico AISI 304 ou o ferrítico AISI 444 este último que apresenta melhor troca térmica.

Palavras-chave: Aço inoxidável; Corrosão; Tubo; Sucroalcooleiro.

FAILURE ANALYSIS IN TUBING OF AIR PREHEATER OF BOILER FROM A SUGARCANE MILL

Abstract

The increased demand for energy from sugarcane bagasse has made the sugar and alcohol mills search alternatives to reduce maintenance of the boilers, releasing more time to the production. The stainless steel use has become one of the main tools for such reduction. However, specification errors can lead to premature failures. This work reports the factors that led tubes of AISI 409 stainless steel fail after half season when applied in a air preheater of boiler from a sugarcane mill. In such application, the AISI 304 lasts about 15 seasons and the carbon steel about 3. A tube sent by the sugar mill was characterized by wet chemical analysis, optical microscopy and EDS. Results indicated chloride formation on the internal walls of the tube, which combined with the environment, accelerated the corrosion process. The carbon steel showed high lifetime due to a 70% higher thickness. Due to the work conditions is recommended the use of stainless steels with higher corrosion resistance, such as the traditional AISI 304 or the ferritic AISI 444, the last presents better thermal exchange.

Keywords: Stainless steel; Corrosion; Tubes; Sugarcane.

I INTRODUÇÃO

A cogeração de energia através da queima do bagaço tornou-se um produto altamente rentável para as indústrias de açúcar e álcool, pois proporciona usinas autossustentáveis além da possibilidade de venda do excedente energético. Tais vantagens fazem com que as usinas queimem bagaço para geração de energia até mesmo

durante a entressafra [1,2]. Portanto, uma redução na manutenção dos equipamentos ligados a esta área é altamente vantajosa. Devido ao ambiente de corrosão e desgaste deste setor, o emprego do aço inoxidável possibilita um ganho de desempenho comprovado por experiências laboratoriais e industriais [3,4].

¹Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Diretor do Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Mineraias, Belém, PA, Brasil.
E-mail: joner.alves@cni.org.br

²Engenheira Química, Coordenadora de Pesquisas em Corrosão, Aperam Europe, Isbergues, Nord-Pas-de-Calais, França.
E-mail: saghi.saedlou@aperam.com

³Doutor em Ciência dos Materiais, Coordenador de Pesquisas em Aço Inoxidável, Aperam South America, Timóteo, MG, Brasil.
E-mail: tarcisio.oliveira@aperam.com

Dentro do setor de caldeiraria, encontra-se o pré-aquecedor de ar (Pré-ar). Este equipamento tem a função de um trocador de calor que eleva a temperatura do ar antes que este entre na fornalha e diminui a temperatura dos gases que vão para o lavador de gases [5]. A Figura 1 demonstra o sistema de funcionamento deste equipamento.

Na parte interna dos tubos descem os gases de combustão da caldeira, sendo que na parte superior a temperatura destes gases é cerca de 300°C. No lado externo dos tubos, ar atmosférico passa à temperatura ambiente e sofre aquecimento. Na parte inferior dos tubos, os gases de combustão saem a cerca de 200°C. Inicialmente, não existe nenhum contaminante proveniente da caldeira, que queima somente o bagaço da cana, sendo nula a chance de uma queima de óleo. O principal agente agressivo no pré-aquecedor de ar é a condensação por diferença de temperatura (gases quentes internos com ar frio externo), sendo que esta umidade pode provocar um ambiente corrosivo. Outro fator considerável é o desgaste causado por areia, cinzas ou resto de bagaço não queimado que adentram o equipamento [6].

O AISI 409, material realmente empregado nas tubulações analisadas, é um aço inoxidável ferrítico, com cerca de 11% de cromo e outros elementos de liga que estabelecem a formação da camada passiva, que de uma maneira natural e contínua proporciona proteção duradoura contra a corrosão. Esta liga é estabilizada ao titânio, o que oferece uma maior soldabilidade e estabilidade da estrutura ferrítica. As principais aplicações deste aço concentram-se em sistemas de exaustão de gases, motores de explosão e estampagem em geral [7,8].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Tubos de aço inoxidável AISI 409 com dimensões de 63,5 x 1,5 x 4.570 mm foram aplicados no pré-aquecedor de ar da caldeira de uma usina integrada de açúcar e álcool

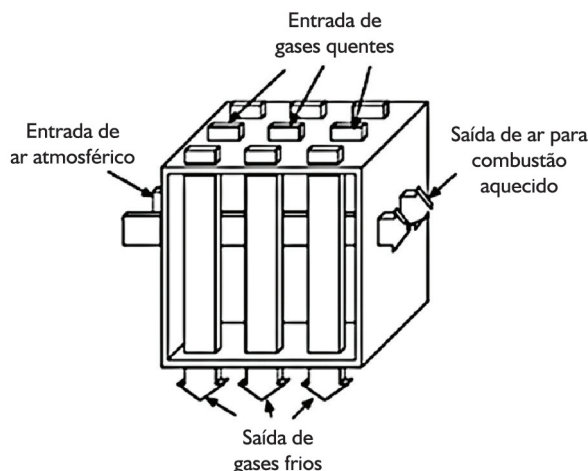


Figura 1. Esquema de funcionamento pré-aquecedor de ar.

localizada no estado de Alagoas. A instalação ocorreu em agosto de 2010, tendo a operação ocorrida durante a safra de setembro/2010 a março/2011 quando apresentaram redução de espessura até a ruptura da parede.

Visando uma análise da falha apresentada, foram retiradas amostras de um tubo completo, dividido em dez partes para transporte. A parte "1" é proveniente da região superior onde foi realizada a pré-expansão da tubulação, um procedimento de esforço mecânico que pode causar falhas quando não devidamente aplicado. A Figura 2 exhibe o tubo conforme recebido para análise e um esquema do desgaste apresentado.

As amostras foram caracterizadas com o emprego das técnicas de análise química via úmida, microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As tubulações do setor de caldeiraria em usinas de açúcar e álcool possuem um histórico de aplicação do aço inoxidável AISI 304, que para a aplicação específica no pré-aquecedor de ar possui um histórico de duração de até 15 safras. O emprego de aços inoxidáveis ferríticos neste setor tem como objetivo uma redução no custo da matéria-prima frente aos aços austeníticos, além de proporcionar maiores valores de troca térmica e resistência à corrosão sob tensão [4,5]. Entretanto, existe uma variedade de ligas inoxidáveis ferríticas, sendo que a escolha deve ser pautada a componentes estruturais e ao ambiente corrosivo. Ainda empregado em algumas usinas, o aço carbono SAE 1020 possui tempo de vida de aproximadamente 3 safras quando aplicado no pré-aquecedor de ar, sendo que espessuras maiores são demandadas.

A análise da composição química do tubo recebido foi realizada utilizando o método via úmida. Os resultados, dispostos na Tabela 1, apontaram que o aço empregado na produção dos tubos está de acordo com a especificação para a liga S40910 de acordo com a norma ASTM A240 [9] (Tabela 1).

Uma medição da parede do tubo revelou que a espessura nominal (1,5 mm) manteve-se praticamente inalterada nas amostras 1 a 5. A amostra 6 apresentou espessura nominal no início, decrescendo de forma crítica até o rompimento (a Figura 3 ilustra esta situação). A perda de espessura ocorreu preponderantemente em uma mesma direção, a que ocorreu o rompimento.

A análise via microscopia ótica não apontou defeitos ou inclusões significativas na estrutura das amostras analisadas. A Figura 4 exhibe macrografias de regiões do tubo sem perda de espessura (amostra 1) e na zona do rompimento (amostra 6), tendo em destaque a perda da espessura da parede do tubo, decrescendo de cerca de 1,5 mm para 0,2 mm.

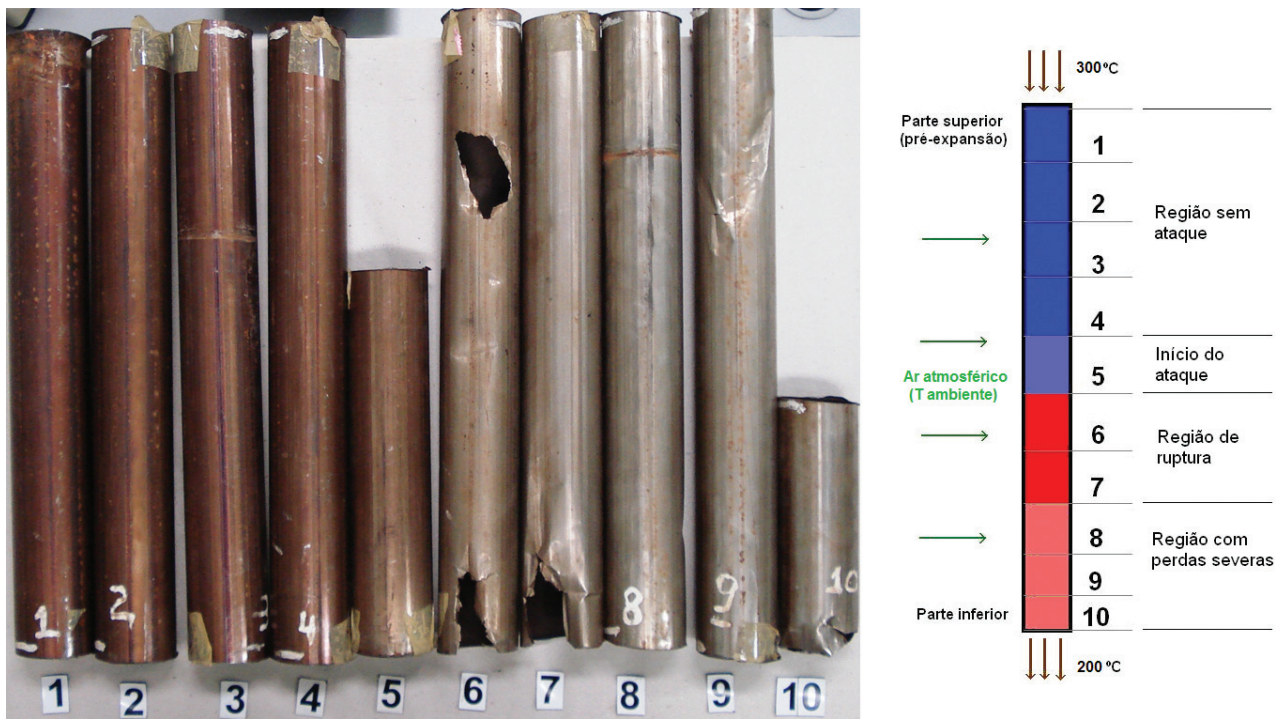


Figura 2. Amostras do tubo recebidas com detalhamento do desgaste apresentado.

Tabela I. Composição química do tubo empregado e especificações da ASTM A240 para o aço inoxidável AISI 409, em %peso [9]

	C	Mn	P	S	N ₂	Si	Cr	Ni	Outros
Tubo	0,01	0,14	0,03	0,00	0,01	0,43	11,07	0,18	Ti = 0,17 Nb = 0,01
ASTM	≤ 0,03	≤ 1,00	≤ 0,04	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 1,00	10,50-11,70	≤ 0,50	6(C+N) ≤ Ti ≤ 0,5 ≤ Nb 0,17



Figura 3. Perda de espessura crítica na região da amostra 6.

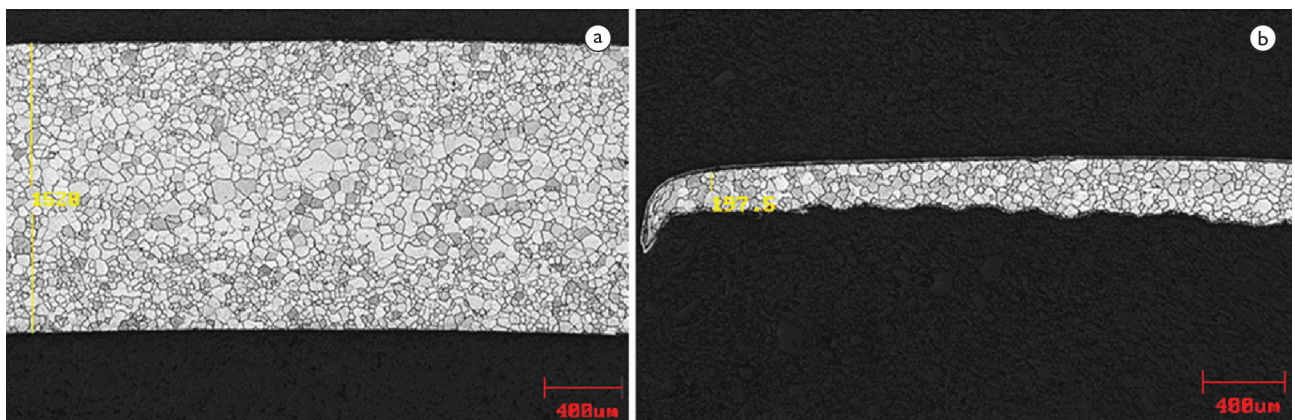


Figura 4. Macrografia das amostras: I - sem perda de espessura (a), e 6 - na região do rompimento (b).

Uma maior concentração de óxidos foi formada nas regiões de rompimento, o que certifica a influência do envolvimento destes na falha dos tubos. A Figura 5a apresenta a análise de uma área da amostra 6 sem perda de espessura e a Figura 5b mostra a região do rompimento. Regiões das áreas de rompimento apresentaram cerca de três vezes mais óxidos do que regiões vizinhas.

A análise química por EDS foi utilizada para uma verificação dos óxidos formados nas superfícies internas e externas das amostras. A formação de pontos de corrosão é evidenciada ao longo de todo o tubo, entretanto torna-se altamente concentrada nas regiões próximas ao rompimento (amostras 6-10). A Figura 6 exhibe o resultado da análise química na região interna da amostra 3, sendo representativa para as amostras 1 a 5. Foram verificados pequenos pontos de corrosão na superfície do aço.

A região da amostra 6, onde ocorreu o rompimento, apresenta uma intensa formação de óxidos na parede interna dos tubos. Além de elementos associados a queima do bagaço da cana, destaca-se a presença do cloro (Cl), como pode ser observado na Figura 7. A presença de

cloro possui explicações diversas, todas ligadas a características da usina, como a proximidade da região costeira, o tempo e forma de estocagem do bagaço (céu aberto), o método de colheita da cana ou até mesmo o tipo de água utilizada no processo (proveniente de um lago com alimentação intermitente pelo mar).

A presença de cloretos em proporções acima de 100 ppm e em meio úmido torna o ambiente agressivo ao aço. Neste caso, foi apontada a formação de corrosão em regiões com 0,25% em peso (2.500 ppm), atingindo valores superiores em análises mais pontuais. Para o pré-aquecedor de ar, a característica do processo que promove o ambiente corrosivo é a troca térmica entre o ar frio e as paredes dos tubos (aquecidas devido às temperaturas dos gases internos), o que gera condensação nas tubulações. Tal fato se deve à pressão interna nas tubulações, que eleva o ponto de condensação da água. Tem-se que, por exemplo, a uma pressão de 20 kgf/cm² a temperatura de condensação da água é de cerca de 210°C [10]. Sendo assim, dependendo da pressão aplicada, como a do equipamento analisado de 21 kgf/cm² (valor medido

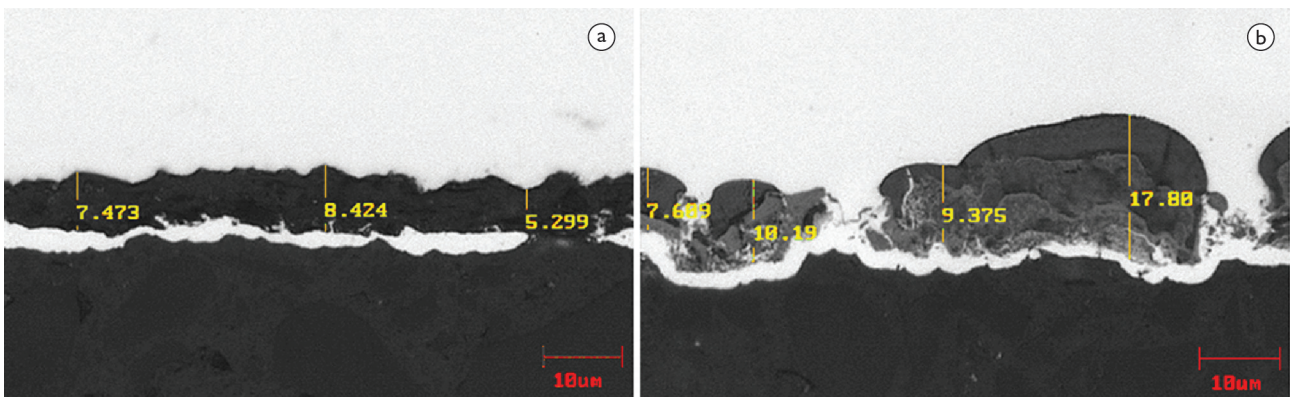


Figura 5. Camada de óxidos formada na amostra 6: região sem perda de espessura (a) e região do rompimento (b) - valores em microns.

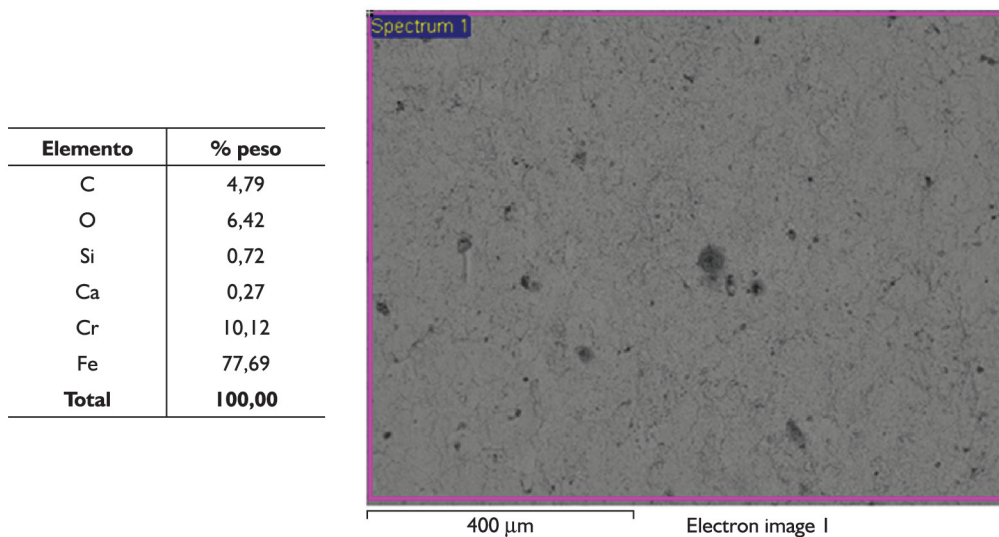


Figura 6. Análise química via EDS da região interna da amostra 3.

Elemento	% peso
C	6,24
O	36,95
Na	0,50
Mg	0,75
Al	2,46
Si	3,12
P	0,58
S	0,32
Cl	0,25
K	0,43
Ca	1,24
Ti	0,30
Cr	5,33
Fe	41,50
Total	100,00

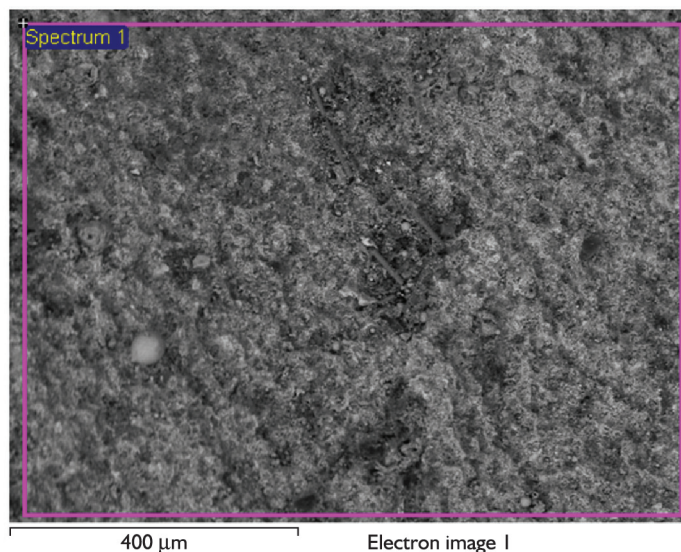


Figura 7. Análise química da região interna da amostra 6 (próximo ao rompimento).

na usina), as temperaturas de aproximadamente 200°C na parte inferior dos tubos (amostras 6-10) tendem a formar condensados. Estes condensados associados com a presença de cloretos tornam o ambiente suscetível à formação de corrosão por pites. O detalhamento do ataque exibido na Figura 2 ilustra este fenômeno.

Os aços carbono sofrem corrosão generalizada, na qual grande área da superfície é afetada. Os aços inoxidáveis na condição passiva estão protegidos contra esta forma de ataque, entretanto podem ocorrer ataques em formas localizadas, resultando em problemas de corrosão por mecanismos específicos (corrosão em frestas, por pite, intergranular, sob tensão ou galvânica) [8,11]. No caso dos tubos, a corrosão localizada está associada aos íons cloretos em meio aquoso. A condição ácida (baixo pH) e o aumento na temperatura contribuem para estabelecer os mecanismos da corrosão em frestas e por pite. Estes mecanismos estão todos associados com a destruição localizada da camada passiva do aço empregado, tornando-o tão susceptível à corrosão quanto o aço carbono nestas regiões. O efeito galvânico causado pela diferenciada condição da região afetada pela falta de proteção passiva frente ao restante do tubo é outro fator a ser considerado [11,12].

Tendo sido criados pontos de corrosão, as altas temperaturas e a passagem de agentes abrasivos como areia e bagaço no interior da tubulação desgastaram a área afetada, reduzindo a espessura da parede dos tubos. A pressão dos gases no interior dos tubos levou ao rompimento nas regiões onde ocorreu uma redução crítica da espessura.

Como anteriormente relatado, os tubos em aço carbono SAE 1020 tiveram uma vida útil superior aos tubos produzidos em aço inoxidável AISI 409. Contribuíram para este fato a forma como ocorreu a corrosão

no aço inoxidável (localizada) que difere do aço carbono (generalizada), mas principalmente a espessura 70% superior empregada para SAE 1020 (2,5 mm) frente ao AISI 409 (1,5 mm).

O projeto do pré-aquecedor de ar em questão foi elaborado pela própria usina de açúcar, com base em outro projeto de uma usina localizada no interior paulista e que, portanto, possui ambiente corrosivo mais brando. Para o equipamento apresentado neste trabalho é necessário o emprego de aços inoxidáveis com maior resistência à corrosão, como o tradicional austenítico AISI 304 ou o ferrítico AISI 444 que possui melhor troca térmica. Para casos específicos, a liga AISI 439 pode ser uma solução mais econômica, desde que anteriormente verificadas as tendências de formação em menor volume de cloretos e condensados [3,5].

4 CONCLUSÕES

De uma forma geral, pode-se afirmar que a presença de cloretos associado ao acúmulo de condensados acelerou o processo de degradação da camada passiva de partes do tubo em aço inoxidável AISI 409. Tal processo em conjunto ao efeito galvânico associado tornou a tubulação susceptível à corrosão. A ação de agentes abrasivos e altas temperaturas no interior da tubulação desgastaram a área afetada pela corrosão, reduzindo a espessura da parede dos tubos e levando ao rompimento devido à pressão interna dos gases. Portanto, devido às condições de trabalho do pré-aquecedor de ar da caldeira, que envolvem meio corrosivo e abrasivo, altas temperaturas e pressão interna, é oportuno o emprego de aços inoxidáveis com maior resistência a corrosão, como o tradicional austenítico AISI 304 ou o ferrítico AISI 444

que possui melhor troca térmica. Para casos específicos, o AISI 439 pode também ser indicado, desde que anteriormente verificadas as tendências de formação de cloretos e condensados.

Agradecimentos

Trabalho relacionado a projetos desenvolvidos com auxílio da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP.

REFERÊNCIAS

- 1 Zhuo C, Alves JO, Tenório JAS, Levendis YA. Synthesis of carbon nanomaterials through up-cycling agricultural and municipal solid wastes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2012;51(7):2922-2930. <http://dx.doi.org/10.1021/ie202711h>
- 2 Alves JO, Tenório JAS, Zhuo C, Levendis YA. Characterization of nanomaterials produced from sugarcane bagasse. *Journal of Materials Research and Technology*. 2012;1(1):31-34. [http://dx.doi.org/10.1016/S2238-7854\(12\)70007-8](http://dx.doi.org/10.1016/S2238-7854(12)70007-8)
- 3 Alves JO, Bailo LA. Modernização das usinas sucroalcooleiras do Nordeste. *Revista CanaMix*. 2012;44:40-41.
- 4 Santos LJC, Tenório JAS. Avaliação do ciclo de vida e custeio do ciclo de vida de evaporadores para usinas de açúcar. *REM: Revista Escola de Minas*. 2010;63(1):179-184. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672010000100030>
- 5 Alves JO, Bailo LA, Oliveira TR, Guida RB. Emprego do aço inoxidável em equipamentos para manejo de efluentes gasosos no setor sucroenergético. In: Associação Brasileira de Aço Inoxidável. *Anais do XI Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável – INOX 2012*; 23-25 de outubro de 2012; São Paulo, Brasil. São Paulo: ABINOX; 2012. p. 1-7.
- 6 McKendry P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology*. 2002;83(1):47-54. [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5)
- 7 Sousa RRM, Araújo FO, Costa JAP, Oliveira AM, Melo MS, Alves C Jr. Cathodic cage nitriding of AISI 409 ferritic stainless steel with the addition of CH₄. *Materials Research*. 2012;15(2):260-265. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392012005000016>
- 8 Oliveira TR, Silva RCR, Quintao H, Fernandes WMA. 11% chromium ferritic stainless steel for automotive exhaust applications with better weldability and drawability. In: Associazione Italiana di Metallurgia. *Proceedings of the 3th European Stainless Steels Congress*; 1999 June 6-9; Chia-Laguna, Italy. Milano: AIM; 1999.
- 9 American Society of Testing and Materials International. *ASTM A240/A240M - 11b: Standard specification for chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications*. West Conshohocken: ASTM International; 2011.
- 10 Brighenti CRF. *Integração do co-gerador de energia do setor sucroalcooleiro com o sistema elétrico [dissertação mestrado]*. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2003.
- 11 Cramer SD, Covino BS Jr, editors. *ASM Handbook: Corrosion: fundamentals, testing, and protection*. USA: ASM International; 2005. v.13A.
- 12 Lo KH, Shek CH, Lai JKL. Recent developments in stainless steels. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2009;65(4-6):39-104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mser.2009.03.001>

Recebido em: 19 Out. 2013

Aceito em: 15 Maio 2014