

DEGRADAÇÃO MICROESTRUTURAL DE TUBOS DE CALDEIRAS DEVIDO A PRESENÇA DA CAMADA INTERNA DE ÓXIDO¹

Bruno Reis Cardoso²
Franco Wronski Comeli³
Roberta Martins de Santana⁴
Heloisa Cunha Furtado⁵
Maurício Barreto Lisboa⁵
Luiz Henrique de Almeida⁶

Resumo

O sobreaquecimento devido à formação da camada interna de óxido possui uma grande influência na vida dos componentes de caldeiras de plantas industriais. O objetivo do presente trabalho é avaliar o efeito da camada interna de óxido na degradação microestrutural em tubos de caldeiras. Foram recebidas três amostras de tubos de aço 2,25Cr-1Mo utilizados em serpentinas de superaquecedores de caldeiras de usinas termelétricas. A metodologia de estudo comparou as microestruturas das amostras recebidas por técnicas de microscopia ótica, eletrônica de varredura e transmissão. Ensaios mecânicos de tração e dureza foram realizados. Ao final dos ensaios, comprovou-se o efeito deletério da camada interna de óxido na vida do componente. A partir das medições de camada interna de óxido foi estimada a vida residual dos tubos operando sob regime de fluência com uma metodologia consagrada na literatura.

Palavras-chave: Camada de óxido; Degradação microestrutural; Vida remanescente.

MICROSTRUCTURAL DEGRADATION OF BOILER TUBES DUE TO THE PRESENCE OF INTERNAL OXIDE LAYER

Abstract

Overheating due to the formation of the inner oxide layer has a large influence on the life of boiler components. The aim of this study consists in assessing the effect of the inner oxide layer on the microstructural degradation in boiler tubes. Three samples of 2.25Cr-1Mo superheater steel tubes were used. The methodology of the study compared the microstructures of the samples received by optical, scanning electron and transmission electron microscopy. Tensile and hardness tests were performed. At the end of the tests, it was proved the deleterious effect of the inner oxide layer on the life of the component. From the measurements of the inner oxide thickness, the remnant lives of the pipes operating under creep regime were estimated with a methodology consecrated in the literature.

Key words: Oxide scale thickness; Microstructural degradation; Remnant life.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

² Msc, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, CEPEL

³ Msc, Tractebel Energia

⁴ Técnica em Mecânica, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, CEPEL

⁵ Dsc, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, CEPEL

⁶ Dsc, COPPE/UFRJ

1 INTRODUÇÃO

A extensão de vida útil de componentes de caldeiras de plantas industriais é assunto de grande interesse e está diretamente ligada aos componentes que operam a altas temperaturas. Dentre os mecanismos de falha atuantes em tubulações e componentes de caldeiras que operam sob regimes de fluência, o sobreaquecimento devido à formação da camada interna de óxido possui uma grande influência na vida dos componentes. A presença desses depósitos e filmes na parede dos tubos aumenta a temperatura do metal, o que acelera os mecanismos de dano, reduzindo drasticamente a vida do material.⁽¹⁾

A camada de óxido que se forma na superfície interna de tubos de aço baixa liga (até 3% Cr) expostos ao vapor gerado nas caldeiras consiste de uma camada com diferentes níveis. Quando a temperatura do metal está abaixo de aproximadamente 560°C e existe uma alta pressão parcial de oxigênio, uma camada dupla consistindo de um filme de Magnetita (Fe_3O_4) e outro de Hematita (Fe_2O_3) é encontrada. A altas temperaturas, uma camada adicional de Wustita (FeO) pode aparecer. Se o aço do tubo possuir elementos de liga, um óxido spinel ($\text{Fe,Cr,Mo})_3\text{O}_4$, pode se formar, conforme a camada de óxidos cresce na direção da parede do tubo. Esses óxidos se formam de acordo com as seguintes reações:⁽²⁾

- $\text{Fe(s)} + \frac{1}{2} \text{O}_2\text{(g)} = \text{FeO(s)}$
- $3 \text{FeO(s)} + \frac{1}{2} \text{O}_2\text{(g)} = \text{Fe}_3\text{O}_4\text{(s)}$
- $2 \text{Fe}_3\text{O}_4\text{(s)} + \frac{1}{2} \text{O}_2\text{(g)} = 3 \text{Fe}_2\text{O}_3\text{(s)}$.

Na prática, a Magnetita é o óxido mais presente na superfície interna dos tubos em caldeiras de ciclo químico convencional. Os efeitos do processo de oxidação no comportamento mecânico de um componente podem ser:⁽³⁾

- redução da seção resistente ao carregamento mecânico, o que leva a um aumento de tensão;
- isolamento térmico do tubo. A camada possui um efeito considerável na troca térmica do tubo, aumentando sua temperatura e acelerando a degradação do material; e
- desprendimento da camada. Apesar de ser benéfico para o tubo o qual a camada se desprende, o óxido poderá levar ao sobreaquecimento de outros tubos, caso o mesmo fique preso no sistema.

O principal objetivo do trabalho é avaliar, através de um estudo comparativo, o efeito da camada interna de óxido na degradação microestrutural e na redução da resistência mecânica de tubos de serpentinas de superaquecedores de caldeiras. Neste estudo, foram realizados ensaios de caracterização microestrutural e de propriedades mecânicas com o intuito de comprovar o efeito deletério da camada interna de óxido na vida do componente. Ao final dos ensaios, foram realizadas estimativas de vida remanescente a partir de valores de espessura de camada interna de óxido, obtidos de medições de campo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Material de Estudo

Foram recebidas três amostras de tubos do aço 10CrMo910, um aço do tipo 2,25Cr-1Mo, muito utilizado em aplicações a alta temperatura. As amostras foram nomeadas da seguinte maneira:

- Tubo 1. Material novo;
- Tubo 2. Tubo retirado após 191.000 horas de operação apresentando camada interna de óxido de aproximadamente 130 μm ;
- Tubo 3. Tubo retirado após 191.000 horas de operação apresentando camada interna de óxido de aproximadamente 850 μm .

Os Tubos 2 e 3 foram retirados da serpentina do superaquecedor final de uma caldeira de uma unidade de geração de energia termelétrica no Brasil. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático do componente analisado. Os tubos foram retirados da região denominada 7X, identificada na Figura 1 por uma seta. As condições nominais de pressão e temperatura de operação são 10,8 MPa (110 kgf/cm²) e 510°C, respectivamente. O diâmetro externo e a espessura nominal dos tubos são 31,8 mm e 5,6 mm, respectivamente.

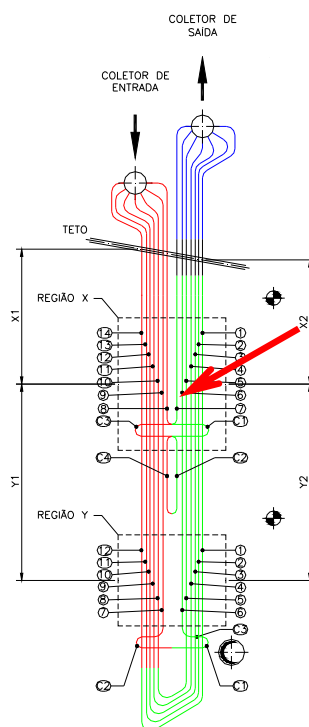


Figura 1. Desenho esquemático do superaquecedor avaliado no presente trabalho.

A Tabela 1 apresenta a composição química das amostras recebidas. As composições estão de acordo com as do aço 10CrMo910. Exceto o teor de cromo do Tubo 1, que está levemente abaixo do teor mínimo especificado para o material.

Tabela 1. Composição química das amostras recebidas

Amostra	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo
Tubo 1	0,129	0,196	0,350	1,902	0,90
Tubo 2	0,14	0,237	0,461	2,142	0,90
Tubo 3	0,129	0,218	0,459	2,140	0,91
10CrMo910	0,08 – 0,14	Máx 0,50	0,30 – 0,70	2,00 – 2,50	0,90 – 1,10

A Figura 2 apresenta os tubos recebidos para obtenção dos corpos-de-prova. Os tubos foram lixados para remoção da camada de óxido externa.

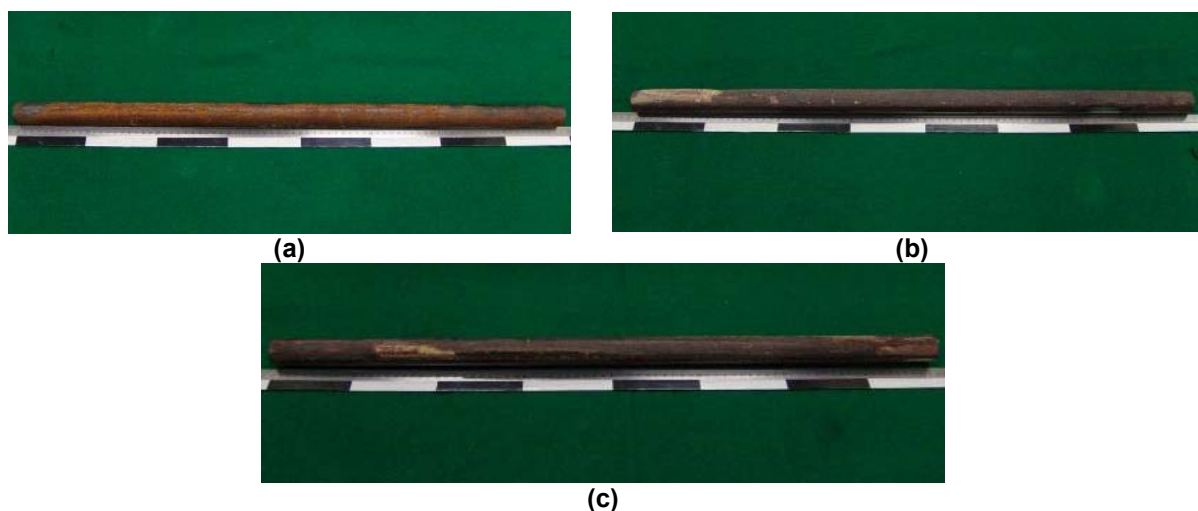


Figura 2. Tubos recebidos para obtenção de corpos-de-prova: (a) Tubo 1; (b) Tubo 2; (c) Tubo 3.

2.2 Metodologia de Estudo

A metodologia utilizada para avaliar a degradação microestrutural em tubos de caldeiras, devido a presença da camada interna de óxido, foi determinada a partir da experiência já adquirida em estudos com tubos de caldeiras degradados no campo e em laboratório⁽⁴⁾ (Figura 3).

Foi realizada uma comparação das microestruturas das amostras recebidas por técnicas de microscopia. A microscopia ótica foi realizada para uma análise preliminar e possível correlação das microestruturas com o critério de Toft e Marsden.⁽⁵⁾ Utilizou-se a microscopia eletrônica de varredura para uma análise detalhada de interface microestrutura/camada de óxido. Amostras de réplicas de extração foram obtidas dos três tubos para observação dos precipitados presentes, através da microscopia eletrônica de transmissão. Os precipitados foram identificados por EDS através de resultados já apresentados na literatura.⁽⁶⁾

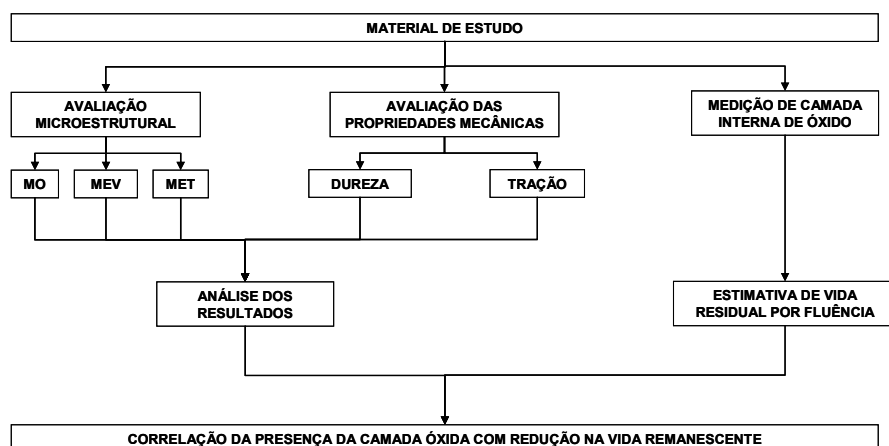


Figura 3. Metodologia proposta para avaliação da degradação microestrutural devido efeito da camada interna de óxido em tubos de caldeiras.

Ensaaios de tração a temperatura ambiente com uma taxa de deformação de $3,3 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ foram realizados em uma máquina EMIC modelo DL 30000. Corpos-de-prova em formato plano foram usinados (Figura 4a). Para os ensaios a 600°C , foi utilizada uma taxa de deformação de $1,2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$, os testes foram feitos numa máquina Time Groups, modelo WDW-100. Para estes ensaios, foram extraídos corpos-de-prova cilíndricos da direção longitudinal dos tubos (Figura 4b).

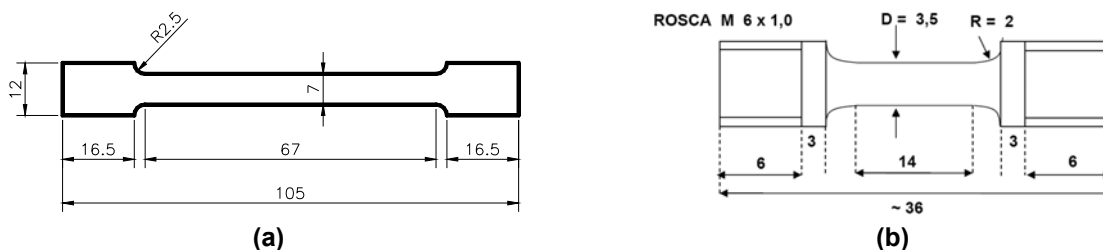


Figura 4. Corpos-de-prova obtidos para ensaios de tração: (a) Temperatura ambiente; (b) Alta temperatura, 600°C .

Foram realizados ensaios de dureza Vickers em quatro regiões distintas dos tubos, de 0,5 em 0,5 mm, conforme Figura 5. Foi utilizado um durômetro Emcotest, modelo 750G3.

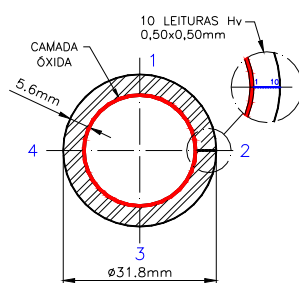


Figura 5. Desenho esquemático apresentando as regiões onde foram realizados ensaios de dureza Vickers.



A partir das medições de camada óxida, de informações geométricas e do tempo de operação, foi estimada a vida residual dos tubos operando sob regime de fluência. Já existe na literatura uma metodologia consagrada.⁽⁷⁾

O método de cálculo para estimativa de vida residual baseado em medições de camada interna de Magnetita pode ser dividido em três módulos.⁽⁷⁾ Os módulos e os dados de entrada necessários para cada um deles são apresentados a seguir:

- Módulo 1 – Dados geométricos do tubo sob investigação e carregamento. Os dados de entrada neste módulo são:
 - os raios interno e externo do tubo no instante de tempo $t = 0$ (isto é, os valores nominais de projeto ou informados antes do início da operação do equipamento);
 - o número de horas de operação do equipamento até a parada;
 - o valor mínimo medido do raio externo do tubo após a parada da unidade;
 - a pressão interna do vapor.

Os dados de saída são a taxa de desgaste na parede externa do tubo, e a variação do raio externo do tubo em função do tempo.

- Módulo 2 – Estimativa da evolução da espessura da camada de óxido na parede interna do tubo e da temperatura efetiva de metal. Os dados de entrada neste módulo são:
 - o valor médio da espessura da camada de óxido medida em campo após a parada da unidade;
 - modelo adotado para o crescimento da camada de óxido: linear ou quadrático.

O modelo quadrático foi o adotado, pois esse apresentou resultados mais conservadores.

O dado de saída é a temperatura média efetiva de metal no instante de tempo que corresponde ao tempo de operação até o momento da análise.

- Módulo 3 – Estimativa do dano total acumulado e da vida remanescente. Neste módulo, pode-se obter a vida remanescente por duas maneiras. Na primeira, são calculadas as tensões mecânicas representativas e os pontos de interseção entre a curva de tensão real a qual está sujeito o tubo sob investigação e as curvas de resistência à fluência do aço analisado. Na segunda, a vida remanescente é calculada a partir do dano total acumulado até o momento da parada para inspeção. Utilizando a regra de acúmulo linear de Robinson pode-se calcular o dano total por fluência acumulado até o instante de tempo correspondente ao tempo de operação. Para ambas, foram utilizadas as curvas de resistência à fluência do material ASTM A 387 Grau 22, um aço equivalente ao 10CrMo910. A literatura recomenda a utilização do resultado mais conservador.

As análises foram realizadas utilizando-se valores de espessura de camada interna de óxido, obtidas pelo método ultra-sônico, durante a inspeção programada do componente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 6 apresenta as micrografias obtidas por microscopia ótica para cada um dos tubos analisados. Em todos os tubos foi identificada uma estrutura do tipo ferrita-perlita. A partir dos resultados apresentados, pode-se observar que o Tubo 1 está no estágio A, ou seja, sem sinais de degradação, de acordo com o critério de Toft e Marsden.⁽⁵⁾ O Tubo 2 apresenta microestrutura no estágio C/D de acordo com o critério citado anteriormente. Como era esperado, devido à presença de uma camada muito espessa de Magnetita, o Tubo 3 apresentou-se mais degradado, no estágio D/E.

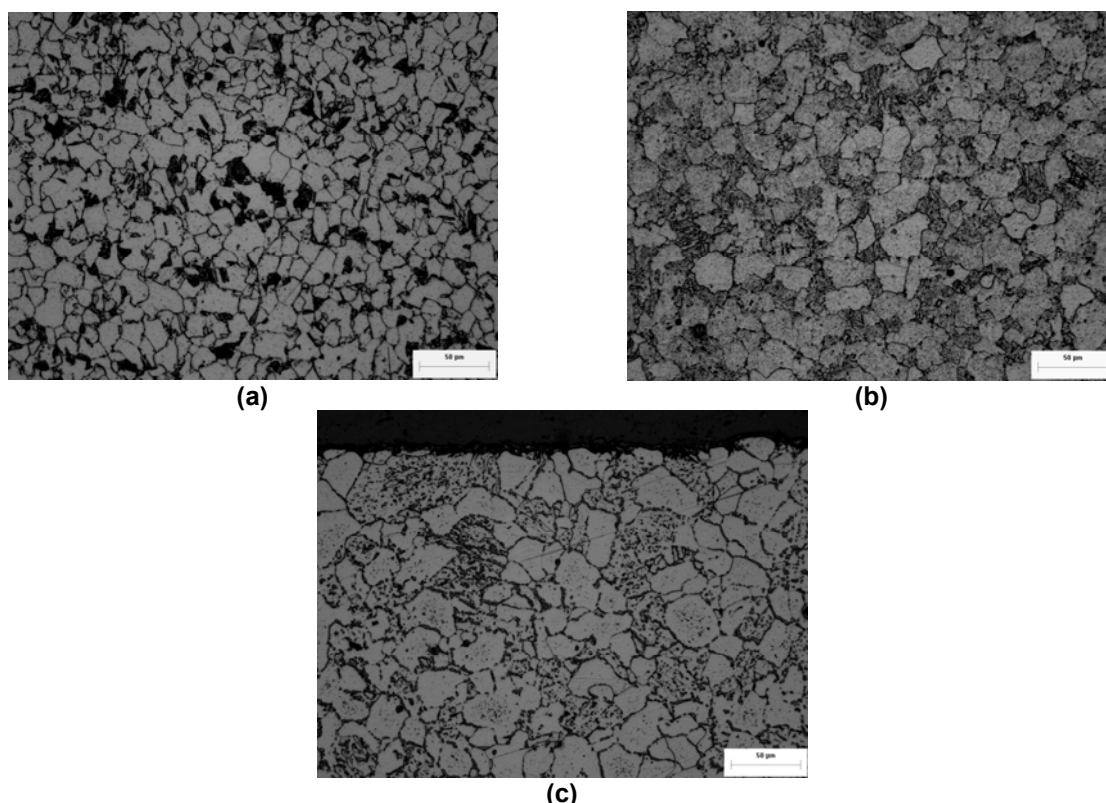
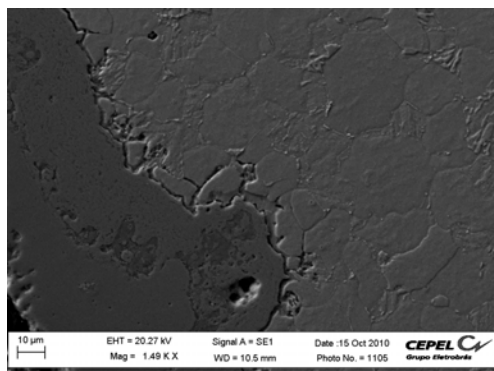


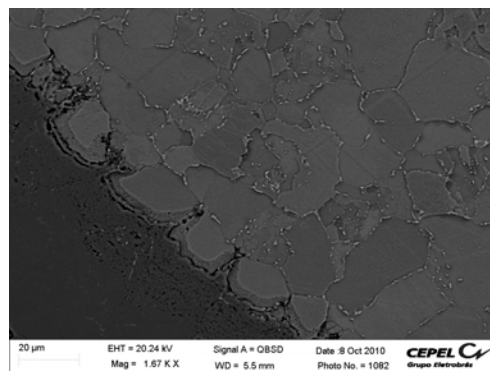
Figura 6. Micrografias obtidas por microscopia ótica: (a) Tubo 1, sem sinal de degradação; (b) Tubo 2, pouco sinal de degradação; (c) Tubo 3, maior degradação microestrutural.

A análise da interface microestrutura/camada de óxido realizada nos Tubos 2 e 3 indicou que a camada se forma à custa das paredes dos tubos (Figura 7). É possível observar a formação de uma subcamada e a presença de vazios, mais nitidamente no Tubo 3, devido ao desprendimento dos grãos que estavam sofrendo o processo de oxidação.

A Figura 8(a) apresenta a micrografia obtida por microscopia eletrônica de transmissão numa réplica de extração do Tubo 1. Como era esperado, foram encontradas diversas regiões compostas pelo precipitado M_3C , apontando a indicação de perlita na microestrutura inicial do tubo. A Figura 8(b) apresenta o espectro do precipitado M_3C encontrado na amostra. O espectro encontrado está de acordo com espectros apresentados em aços similares.⁽⁶⁾

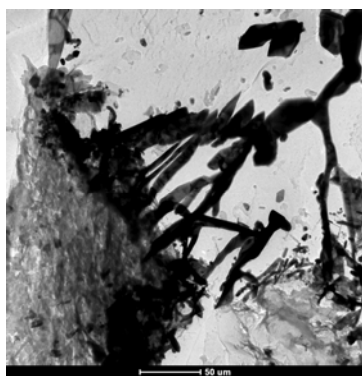


(a)

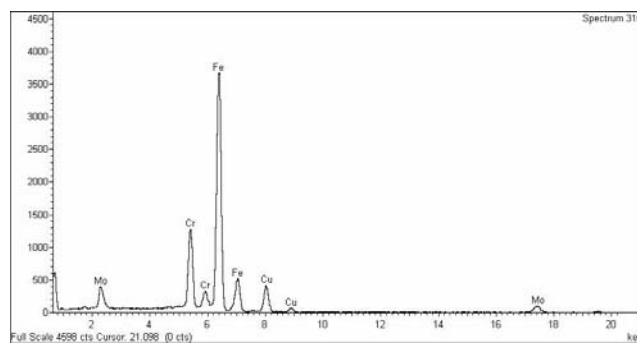


(b)

Figura 7. Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura: (a) Tubo 2 apresentando uma subcamada; (b) Tubo 3 apresentando subcamada e vazios devido ao processo de oxidação.



(a)



(b)

Figura 8. Análise de microscopia eletrônica de transmissão em réplica de extração do Tubo 1: (a) Região rica em precipitados do tipo M_3C ; (b) Espectro de EDS do precipitado M_3C .

A Figura 9(a) apresenta a micrografia obtida por microscopia eletrônica de transmissão numa réplica de extração do Tubo 2. A literatura mostra que tubos de caldeira expostos a operação em longo prazo tendem a apresentar coalescimento de precipitados em contornos de grãos, conforme observado, assim como a perda da estrutura perlítica, característica observada no lado direito da micrografia.^(4,8) No entanto, a presença de precipitados do tipo M_2C no grão ferrítico do material, lado direito da micrografia, pode indicar que o mesmo não encontra-se num estágio avançado de degradação microestrutural. A Figura 9(b) apresenta o espectro do precipitado $M_{23}C_6$ encontrado em maior quantidade no contorno de grão da micrografia. O espectro encontrado está de acordo com espectros apresentados em aços similares.⁽⁶⁾

A Figura 10(a) apresenta a micrografia obtida por microscopia eletrônica de transmissão numa réplica de extração do Tubo 3. A literatura mostra que tubos de caldeira expostos tempos muito longos sob efeito da temperatura e da tensão mecânica tendem a apresentar coalescimento excessivo dos precipitados nos contornos de grão⁽⁴⁾. Para o caso específico do Tubo 3, foram identificados precipitados coalescidos do tipo M_6C , que de acordo com a literatura, são esperados para estágios avançados de degradação microestrutural.^(4,8) A Figura 10(b) apresenta o espectro do precipitado M_6C encontrado em maior quantidade no contorno de grão da micrografia. O espectro encontrado está de acordo com espectros apresentados em aços similares.⁽⁶⁾

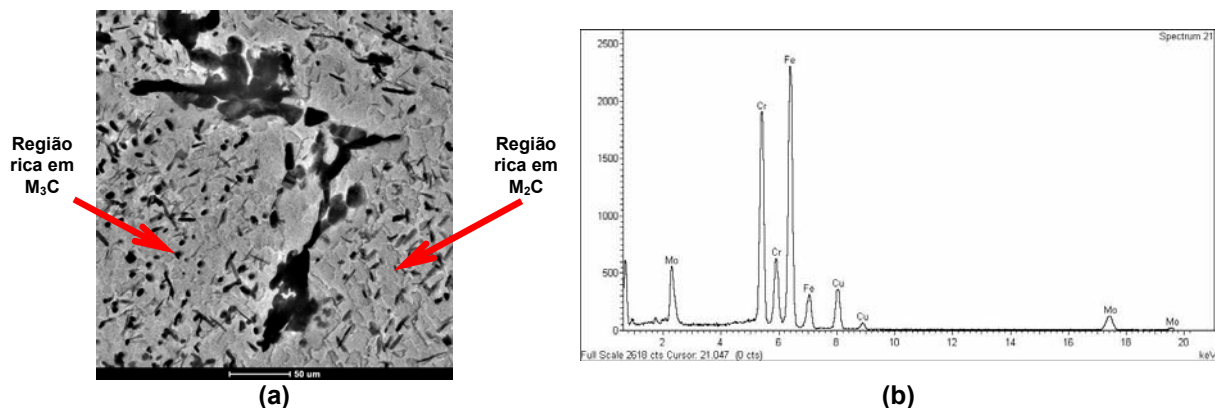


Figura 9. Análise de microscopia eletrônica de transmissão em réplica de extração do Tubo 2: (a) Região indicando coalescimento de precipitados nos contornos; (b) Espectro de EDS do precipitado $M_{23}C_6$.

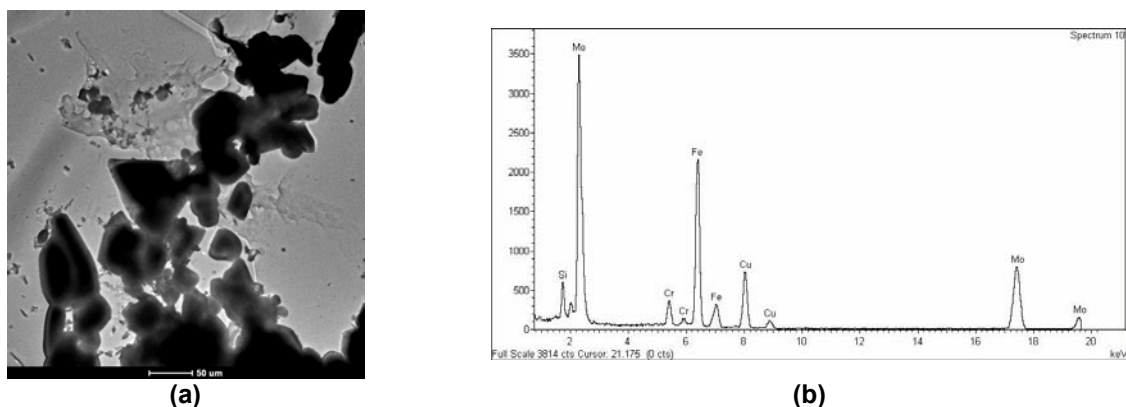


Figura 10. Análise de microscopia eletrônica de transmissão em réplica de extração do Tubo 3: (a) Contorno de grão rico em precipitados do tipo M_6C , indicando degradação microestrutural avançada; (b) Espectro de EDS do precipitado M_6C .

Ao contrário do observado no Tubo 2, não foram identificadas regiões ricas em precipitados do tipo M_3C , que constituem a região perlítica, nem mesmo precipitados do tipo M_2C , que conferem alguma resistência nos grãos ferríticos, nas amostras do Tubo 3.

Considerando-se que os Tubos 2 e 3 operaram o mesmo tempo sob as mesmas condições, pode-se afirmar que a presença de uma elevada camada interna de Magnetita, que atua como um isolante térmico durante a operação, pode ter sido responsável pelo aquecimento localizado do Tubo 3, acelerando a degradação microestrutural do mesmo.

A Figura 11(a) apresenta as curvas Tensão *versus* Deformação obtidas nos ensaios de tração a temperatura ambiente e a 600°C. A Figura 11(b) apresenta os valores médios de dureza ao longo da parede de cada um dos tubos. A Tabela 2 apresenta os valores médios das propriedades de tração e dureza para as amostras analisadas.

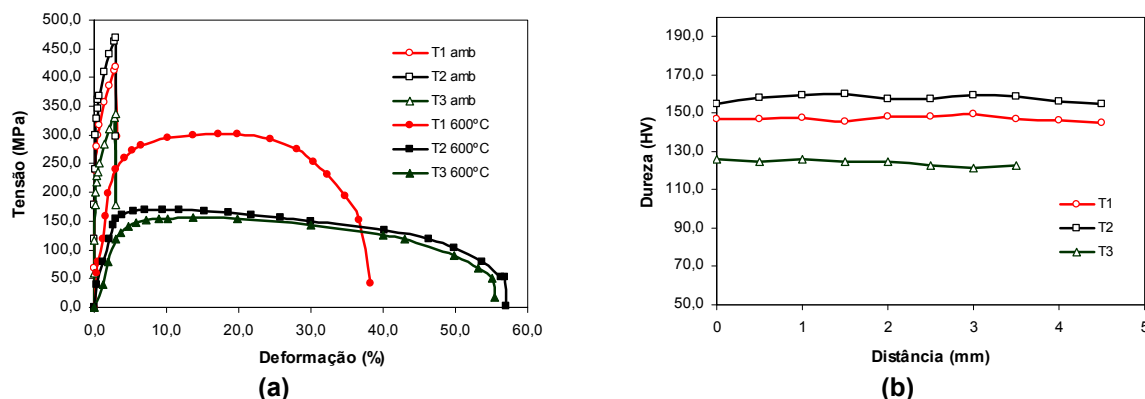


Figura 11. Propriedades mecânicas dos tubos: (a) Resultados de tração a temperatura ambiente e a 600°C; (b) Valores de dureza Vickers ao longo da parede dos tubos.

Tabela 2. Valores médios das propriedades de tração e dureza dos tubos

Amostra	Limite de Escoamento 0,2% (MPa)		Resistência a Tração (MPa)		Alongamento (%)		Dureza (HV)
	25°C	600°C	25°C	600°C	25°C	600°C	25°C
Tubo 1	228,8	228,5	515,9	302,2	25,9	38,3	147,2
Tubo 2	323,1	147,5	534,6	169,6	17,3	57,1	157,6
Tubo 3	266,5	126,2	487,1	156,8	23,3	55,3	124,1
10CrMo910	280 *	170 **	450 - 600 *	290 **	22 *	---	250* máx

* www.keymetals.com; ** Creep Properties of Heat Resistant Steels and Superalloys

O fato do Tubo 2 ter apresentado valores de tração a temperatura ambiente e dureza superiores aos do Tubo 1 pode estar associado ao fenômeno de endurecimento secundário. Isso se deve ao aumento na quantidade de precipitados, consequência da exposição do material a temperatura elevada por longo período de tempo. No entanto, a presença de precipitados coalescidos nos contornos de grão, contribuiu de maneira a reduzir a resistência do material quando o mesmo foi submetido a um ensaio em temperaturas elevadas e com uma taxa de deformação mais baixa.

Como era esperado, o Tubo 3 apresentou os valores mais baixos de limite de escoamento, limite de resistência a tração e dureza. Os resultados apresentados acima confirmam o efeito deletério da presença de uma camada de óxido muito espessa nas propriedades mecânicas de tubos de aços utilizados em caldeiras industriais.

Para realização da estimativa de vida remanescente, foram utilizados os valores de camada interna de Magnetita de 130µm para o Tubo 2, pois este foi o valor mínimo medido pelo equipamento ultra-sônico durante a inspeção realizada no componente. Para o Tubo 3, foi obtido um valor máximo de 933µm, referente à área do tubo exposta ao lado da chama da caldeira. A Tabela 3 apresenta de forma resumida os principais resultados obtidos pela metodologia de cálculo.

Tabela 3. Principais resultados obtidos pela metodologia de cálculo para estimativa de vida remanescente por fluência baseada na medição da camada interna de óxido

Tubo	Camada de Óxido (µm)	Tensão Representativa (MPa)	Temperatura Efetiva (°C)	Vida Remanescente Método 1 (h)	Vida Remanescente Método 2 (h)
2	130	28,2	509,8	$2,04 \times 10^6$	$1,05 \times 10^6$
3	993	31,6	601,8	$2,57 \times 10^5$	$1,06 \times 10^5$

Como citado anteriormente, a camada se forma à custa da espessura da parede do tubo, portanto, já era esperada uma maior tensão mecânica para o tubo contendo a camada mais elevada.

A temperatura calculada para o metal do Tubo 3, devido à presença de uma elevada camada de óxido, que atua como um isolante térmico durante a operação da caldeira, foi de 601,8°C, um valor muito acima do especificado para operação do material. Pode-se associar com segurança a presença da camada de óxido com a severa degradação microestrutural e a perda de resistência nas propriedades mecânicas do Tubo 3. Para o Tubo 2, a temperatura manteve-se de acordo com a de operação nominal, mostrando que uma camada de 130µm não influi na troca térmica do tubo. Pode-se considerar que o Tubo 2 apresentou os sinais de degradação microestrutural esperados para a condição de operação a qual ele estava submetido.

Os resultados acima mostram claramente como a camada interna de óxido pode influenciar a vida remanescente do material. É possível notar que a presença de uma camada espessa foi capaz de reduzir em aproximadamente uma ordem de grandeza a vida remanescente do Tubo 3, quando o mesmo é comparado com o Tubo 2, para ambos os métodos de cálculo. Seguindo-se a recomendação da literatura de adotar o método mais conservador, pode-se assumir que a vida remanescente dos Tubos 2 e 3 são $1,05 \times 10^6$ e $1,06 \times 10^5$ horas, respectivamente.

4 CONCLUSÃO

A metodologia de ensaios proposta no presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da camada interna de Magnetita na degradação microestrutural e na perda de resistência mecânica em tubos de caldeiras industriais.

Os ensaios de caracterização microestrutural mostram claramente que tubos apresentando camadas internas muito espessas de Magnetita sofrerão uma degradação microestrutural acelerada, pois a camada atuará como um isolante térmico causando um aumento localizado de temperatura. Para o caso de aços do tipo 2,25Cr-1Mo, a degradação acelerada foi constatada através da identificação de precipitados do tipo M_6C coalescidos e localizados nos contornos de grão do Tubo 3.

O fato do Tubo 2 ter apresentado valores de tração a temperatura ambiente e dureza superiores aos do Tubo 1 pode estar associado ao fenômeno de endurecimento secundário. Isso se deve ao aumento na quantidade de precipitados, consequência da exposição do material a temperatura elevada por longo período de tempo. No entanto, a presença de precipitados coalescidos nos contornos de grão, contribuiu de maneira a reduzir a resistência do material quando o mesmo foi submetido a um ensaio em temperaturas elevadas e com uma taxa de deformação mais baixa. O mesmo efeito foi

observado de maneira mais significativa no Tubo 3, que apresentou o maior nível de degradação microestrutural.

Os resultados obtidos para estimativa de vida residual, pelo mecanismo de dano por fluência, mostram que uma camada de 130µm não contribuiu de maneira deletéria para o Tubo 2. Para o Tubo 3, com uma camada acima de 700µm, foi estimada uma vida remanescente com uma ordem de grandeza a menos que a do Tubo 2, indicando que uma camada espessa de Magnetita pode influir significativamente na vida residual dos tubos.

Pode-se assumir que o material apresentando uma camada significativa de Magnetita estará exposto a uma condição de operação a qual não foi projetado. Com isso, apresentará uma perda de resistência mecânica de forma mais rápida do que a esperada, podendo sofrer sua ruptura antes de sua vida prevista, levando a paradas forçadas, que representam custos a manutenção de caldeiras industriais.

REFERÊNCIAS

- 1 ASM, METALS HANDBOOK. Failure Analysis and Prevention - Vol. 11, Ohio, Metals Park, ASM International, 2002.
- 2 PATERSON, S.R., MOSER, R., RETTING, T.W. The oxidation of boiler tubes. In: PROCEEDINGS OF AN INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTERACTION OF IRON-BASED MATERIALS WITH WATER AND STEAM, Heidelberg: EPRI, 1992. p. 8-1-8-25.
- 3 ENNIS, P.J., QUADAKKERS, W.J. Mechanisms of oxidation and the influence of steam oxidation on service life of power plant components. In : ABE, F., TORSTEN-ULF, K. VISWANATHAN, R.(Ed.). Creep-resistant steels, Cambridge: Woodhead Publishing, 2008. cap. 19 p. 519-535.
- 4 FURTADO, H.C. Avaliação de danos em aços ferríticos Cr-Mo operando em regime de fluência. Rio de Janeiro: Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2004.
- 5 TOFT, L.H, MARSDEN, R.A. Structural processes in creep: special report no 70, Iron & Steel Institute, p. 238-244, London. 1961.
- 6 TODD, J.A. The early stages of tempering in a 3Cr-1.5Mo steel. Scripta Metallurgica, v. 20, n.2, p. 269-274, 1986.
- 7 PATERSON, S.R., RETTING, T.W. Remaining life Assessment of superheater and reheater tubes, EPRI Report CS-5564, Palo Alto, California, EPRI, 1988.
- 8 YANG, Y., CHEN, Y. SRIDHARAN, K., ALLEN, T.R., Evolution of carbide precipitates in 2.25Cr-1Mo steel during long-term service in a power plant. Metallurgical and Materials Transactions A, v. 41, n. 6, p. 1441-1447, June. 2010.