

# ESTUDO DA OXIDAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI 444 EM TEMPERATURAS ELEVADAS E EM ATMOSFERAS COM DIFERENTES PRESSÕES PARCIAIS DE OXIGÊNIO<sup>1</sup>

*Antônio Claret Soares Sabion<sup>2</sup>*

*Maria de Fátima Salgado<sup>3</sup>*

*Ronaldo Bayão Toffolo<sup>4</sup>*

*Anne-Marie Huntz<sup>5</sup>*

*Marcony Monteiro<sup>6</sup>*

*Vincent Ji<sup>5</sup>*

*Edson Hugo Rossi<sup>7</sup>*

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo investigar a cinética de crescimento e a composição de filmes de óxidos formados pela oxidação do aço inoxidável ferrítico AISI 444, à altas temperaturas, em atmosferas de ar seco, argônio contendo 1ppm de O<sub>2</sub> e Ar/H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O. As amostras do aço foram oxidadas em uma termobalança, com sensibilidade de ± 1µg, entre 850°C e 950°C, por 50 h. As cinéticas de crescimento dos filmes de óxidos foram estabelecidas medindo-se o ganho de massa por unidade de área versus tempo de oxidação. A microestrutura e a composição química dos óxidos foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia dispersiva de energia, difração de raios X e espectrometria de massa de íons secundários. Nas atmosferas de ar seco, Ar+1ppm O<sub>2</sub> e Ar/H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O, entre 850°C e 950°C, as cinéticas de crescimento dos filmes de óxidos seguem uma lei parabólica. Análises químicas mostram que os filmes formados sobre o aço AISI 444 nas diferentes atmosferas são constituídos de óxido de cromo contendo elementos como Mn, Fe, Ti e Si. Análise comparativa das taxas de oxidação, nas diferentes atmosferas, entre 850 e 950°C, mostra, surpreendentemente, que o aço AISI 444 apresenta maior resistência à oxidação em ar seco e menor resistência em Ar+1ppm de O<sub>2</sub>.

**Palavras-chave:** Aço AISI 444; Oxidação em ar; Oxidação em Ar+1ppm O<sub>2</sub>; Oxidação em Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O.

## STUDY OF THE OXIDATION OF THE AISI 444 STAINLESS STEEL AT HIGH TEMPERATURES IN ATMOSPHERES UNDER DIFFERENT OXYGEN PARTIAL PRESSURES

### Abstract

The aim of this work is to study the growth kinetics and the composition of oxide films formed by the oxidation of the AISI 444 ferritic stainless steel at high temperatures, in dry synthetic air, in argon containing 1 ppm O<sub>2</sub> and in Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O gaseous mixture. The samples of AISI 444 steel were oxidized in a thermobalance, with sensibility of ± 1µg, between 850°C and 950°C, for 50h. The growth kinetics of the oxide films were established by measuring the mass gain per unit area versus oxidation time. The microstructure and the chemical composition were analyzed by scanning electron microscopy, energy dispersive spectroscopy, secondary ion mass spectrometry and X ray diffraction. In dry air, Ar+1ppmO<sub>2</sub> or Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O atmospheres, between 850°C and 950°C, the growth kinetics of the oxide films follow a parabolic law. Chemical analyses show that the oxide films formed on the AISI 444 steel are chromium oxide containing other elements such as Mn, Fe, Ti and Si. Comparative analysis of the oxidation rates of the AISI 444 steel, in the different atmospheres, between 850°C and 950°C, surprisingly shows that the AISI 444 steel presents greater oxidation resistance in dry air and lower oxidation resistance in Ar+1ppm O<sub>2</sub>.

**Key words:** AISI 444 stainless steel; Oxidation in air; Oxidation in Ar+1ppm O<sub>2</sub>; Oxidation in Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Professor Doutor – Universidade Federal de Ouro Preto*

<sup>3</sup> *Professora MSc.-Universidade do Estado do Maranhão*

<sup>4</sup> *Professor MSc. – Centro Federal de Educação Tecnológica –Ouro Preto*

<sup>5</sup> *Professor Doutor – Université de Paris-Süd 11*

<sup>6</sup> *Mestrando REDEMAT/UFOP*

<sup>7</sup> *Engenheiro, MSc.-ArcelorMittal Inox do Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Aços inoxidáveis austeníticos, tradicionalmente utilizados em temperaturas elevadas, têm sido progressivamente substituídos por aços inoxidáveis ferríticos de menor custo, devido a ausência de níquel.<sup>(1)</sup> Além disso, os aços ferríticos apresentam propriedades interessantes como, por exemplo, coeficiente de expansão térmica menor do que o dos aços austeníticos, o que é desejável em aplicações que requerem resistência à ciclagem térmica. Nas aplicações industriais em temperaturas elevadas, o aço pode estar em contato com gases quentes nos quais a pressão parcial de oxigênio varia em uma ampla faixa de valores. Considerando que a pressão de oxigênio pode afetar a cinética de oxidação e também as características microestruturais e químicas dos filmes de óxidos formados sobre os aços, torna-se da maior importância investigar o comportamento de aços inoxidáveis ferríticos em temperaturas elevadas e em diferentes atmosferas.

Recentemente, comparou-se os comportamentos das oxidações dos aços inoxidáveis ferrítico AISI 439 e austenítico AISI 304 em atmosferas oxidantes (ar e oxigênio) e em atmosfera de Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O com pressões parciais de oxigênio extremamente baixas, entre 10<sup>-20</sup> e 10<sup>-18</sup> atm, na faixa de 850°C a 950°C.<sup>(1,2)</sup> Os resultados obtidos mostram que a cinética de oxidação do aço AISI 439 apresenta pouca dependência com a pressão de oxigênio nas condições estudadas. Nas mesmas condições experimentais, a cinética de oxidação do aço austenítico AISI 304, comumente utilizado em temperaturas elevadas, varia significativamente com a pressão de oxigênio.

O presente trabalho trata da oxidação do aço inoxidável ferrítico AISI 444. Este aço apresenta potencial para utilização em temperaturas elevadas e tem sido objeto de investigações para aplicações diversas, tais como componentes de sistema de exaustão de automóveis<sup>(3)</sup> e interconectores de células a combustível de óxidos sólidos.<sup>(4,5)</sup> Tem sido também aplicado intensamente em trocadores de calor na indústria alcooleira. O objetivo deste trabalho é investigar a cinética de crescimento e a composição de filmes de óxidos formados pela oxidação do aço inoxidável ferrítico AISI 444 em diferentes atmosferas. Para fins de comparação com os resultados de estudos anteriores,<sup>(1,2)</sup> a oxidação do aço AISI 444 foi investigada nas mesmas condições utilizadas para os aços AISI 304 e AISI 439, ou seja, em atmosfera oxidante (ar) e em atmosfera com pressão de oxigênio extremamente baixa (Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O). Além disso, foi utilizada uma terceira atmosfera de argônio de alta pureza, contendo traços de oxigênio (1ppm), com uma pressão parcial de oxigênio intermediária às das atmosferas de ar e Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. Os resultados obtidos para a oxidação do aço AISI 444 são discutidos e comparados com os resultados determinados previamente para os aços AISI 439 e AISI 304, nas mesmas condições experimentais.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

As amostras do aço AISI 444 foram cedidas pela empresa ArcelorMittal Inox do Brasil. A análise química desse aço foi fornecida pelo fabricante e mostra os seguintes componentes (% em peso): C (0,02), Mn (0,30), Si (0,60), Cr (17,75), Mo (1,80), Nb (0,18), Ti (0,14) e N (110 ppm).

As amostras foram cortadas na forma de placas com as dimensões de 10 mm x 10mm x 0,6 mm. Um orifício de 0,8mm foi perfurado junto ao ponto médio de uma das arestas para a suspensão da amostra na termobalança por meio de um fio de

platina. As duas faces das amostras foram lixadas com SiC (granas 1.000 e 1.200) e polidas com pasta de diamante de 3  $\mu\text{m}$  e 1 $\mu\text{m}$  visando obter um acabamento especular.

Os tratamentos de oxidação isotérmica foram realizados em uma termobalança Setaram TGDTA 92, com sensibilidade de  $\pm 1\mu\text{m}$ . Os tratamentos de oxidação foram realizados entre 850 e 950 $^{\circ}\text{C}$ , por 50h, em atmosferas dinâmicas de ar seco ( $P_{\text{O}_2} = 0,21 \text{ atm}$ ), Ar+1ppm  $\text{O}_2$  ( $P_{\text{O}_2} = 10^{-6} \text{ atm}$ ) e Ar- $\text{H}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  ( $P_{\text{O}_2} < 10^{-18} \text{ atm}$ ) mantidas sob uma pressão total de 1 atm. As cinéticas de oxidação foram estabelecidas medindo-se o ganho de massa por unidade de área em função do tempo de oxidação.

As microestruturas dos filmes de óxidos foram examinadas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), as análises químicas dos filmes foram realizadas por espectroscopia dispersiva de energia (EDS), espectrometria de massa de íons secundários (SIMS) e as fases presentes foram analisadas por difração de raios X com ângulo de incidência rasante (DRX).

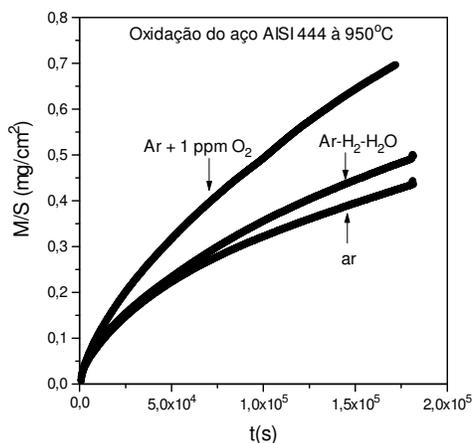
### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Cinética de Oxidação do Aço AISI 444

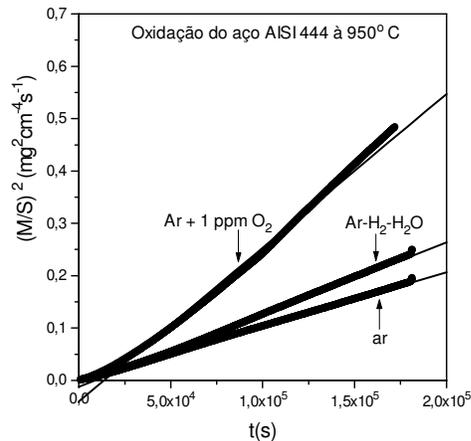
As análises termogravimétricas do aço AISI 444, à 950 $^{\circ}\text{C}$ , nas atmosferas de ar, Ar+1ppm  $\text{O}_2$  e Ar- $\text{H}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  são mostradas na Figura 1.

Para todas as temperaturas e atmosferas utilizadas, as cinéticas de oxidação seguem uma lei parabólica. Isso significa que o crescimento do filme de óxido, nas diferentes condições experimentais, é controlado pela difusão de cátion e/ou de oxigênio através do filme de óxido.<sup>(6)</sup>

A cinética de oxidação parabólica é descrita pela seguinte relação:  $(M/S)^2 = k_p t + k_o$ , onde  $M/S$  é o ganho de massa por unidade de área,  $k_p$  a constante parabólica de oxidação,  $t$  é o tempo de oxidação e  $k_o$  é uma constante. A constante  $k_p$  foi determinada em gráficos de  $(M/S)^2$  versus tempo como mostrado na Figura 2.



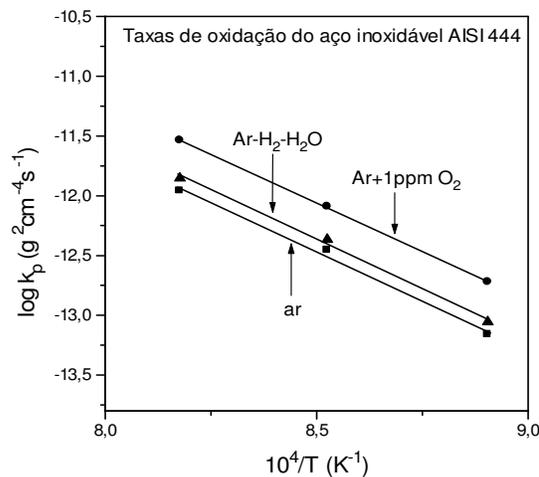
**Figura 1.** Análises termogravimétricas do aço AISI 444 em ar, Ar+1ppm  $\text{O}_2$  e em Ar- $\text{H}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  à 950 $^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 2.** Determinação das constantes parabólicas de oxidação em ar, Ar+1ppm O<sub>2</sub> e em Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O à 950°C.

A linearidade observada nos gráficos de  $(M/S)^2$  versus  $t$ , como na Figura 2, confirma a cinética de oxidação parabólica observada em todas as condições experimentais utilizadas.

Os valores obtidos para as constantes de oxidação parabólicas estão representados no diagrama de Arrhenius da Figura 3.



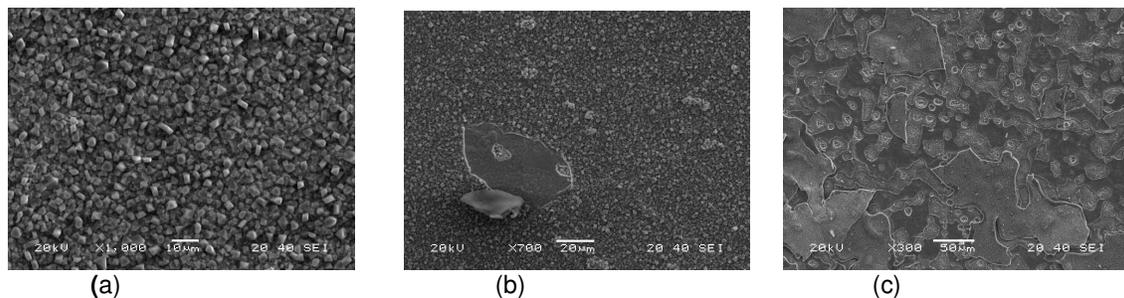
**Figura 3.** Variação das constantes parabólicas de oxidação com a temperatura nas atmosferas de ar, Ar+1ppm O<sub>2</sub> e Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O.

### 3.2 Microestrutura e Composição Química dos Filmes de Óxidos

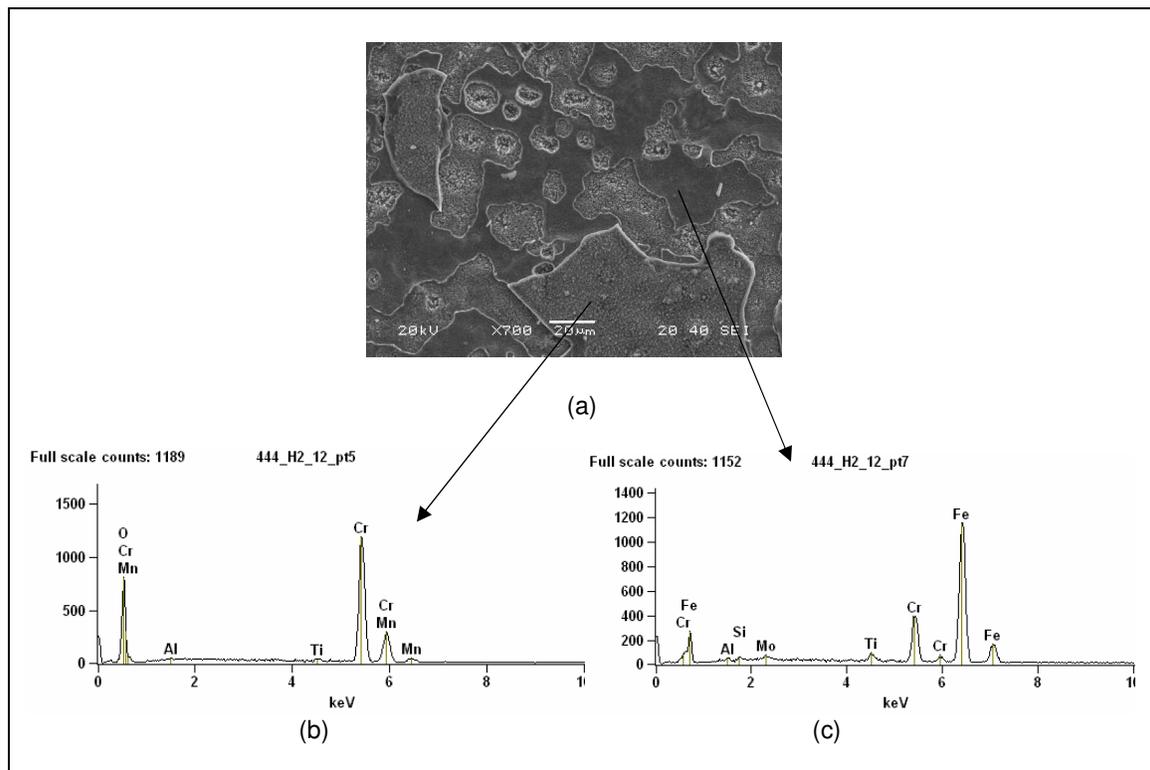
Os filmes de óxidos formados em ar foram contínuos e homogêneos na faixa de 850°C a 950°C (Figura 4a). Em atmosfera de Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, o filme foi contínuo e homogêneo à 850°C. À 900°C foi observado alguma descamação (Figura 4b), que tornou-se significativa à 950°C. Em Ar+1ppm O<sub>2</sub> o filme de óxido foi contínuo e homogêneo à 850°C, porém houve descamação acima dessa temperatura, como mostra a Fig 4c. Nas regiões com descamações, como na Figura 5a para oxidação

em Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, à 950°C, podem ser observados filmes de óxidos em diferentes níveis, com a camada externa e as camadas internas apresentando diferentes composições químicas conforme mostram as análises EDS das Figuras 5b-c.

Análises EDS mostram o Cr como elemento metálico majoritário nos filmes contínuos e homogêneos. Nos filmes com descamação, o Cr é majoritário no filme de óxido externo (Figura 5b), enquanto que o Fe é majoritário no filmes internos (Figura 5c). De um modo geral, os filmes contínuos e homogêneos apresentaram, além do Cr, elementos como Mn, Fe, Ti e Si. Nas regiões com descamação, foram observados no filme externo os elementos Cr, Mn e Ti, enquanto que nos filme de óxidos internos foram detectados além do ferro, componente majoritário, os elementos Cr, Ti e quantidades variáveis em diferentes pontos de Si e Mo.



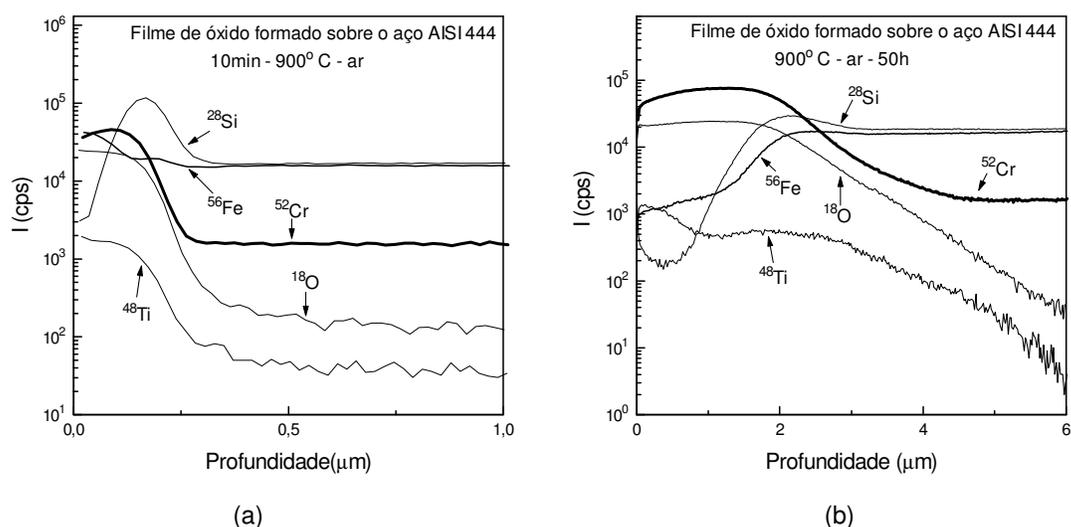
**Figura 4.** Microestrutura do filme de óxido formado sobre o aço AISI 444 após: (a) oxidação à 950°C, em ar; 50h; (b) oxidação à 900°C, em Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, 50h, com início de descamação; e (c) oxidação à 900°C, em Ar+1ppm O<sub>2</sub>, 50h, apresentando descamação.



**Figura 5.** (a) Microestrutura do aço AISI 444 após oxidação à 950°C, em Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, 50h, mostrando descamação do filme de óxido; (b) análise EDS da camada externa do filme de óxido formado pela oxidação do aço AISI 444 à 950°C em Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O e (c) análise EDS da camada interna do mesmo filme de óxido.

Análises por difração de raios X com ângulo de incidência rasante mostram que as principais fases presentes nos óxidos formados sobre o aço AISI 444, em ar seco, são  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  e  $\text{MnCr}_2\text{O}_4$ . Foram observados também nos difratogramas picos relativos aos compostos  $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$ ,  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ,  $\text{CrFeO}_7\text{Ti}_2$  e  $\text{TiO}_2$ . Em  $\text{Ar}+1\text{ppm O}_2$ , as principais fases observadas foram  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{MnO}_4$ ,  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  e  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ . Na atmosfera de  $\text{Ar-H}_2\text{-H}_2\text{O}$  foram observadas as fases  $\text{Cr}_2\text{FeO}_4$ ,  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$  e também alguns picos de  $\text{Fe}_2\text{Mo}_3\text{O}_{12}$  e  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ .

As Figuras 6a-b mostram análises por espectrometria de massa de íons secundários através do filme de óxido formado à  $900^\circ\text{C}$ , em ar, após oxidações por 10min (Figura 6a) e 50h (Figura 6b). Os elementos observados ao longo do filme (Cr, Fe, Ti, Si) estão de acordo com as análises EDS. Deve ser observado que no início da oxidação (Figura 6a), há formação não só de óxido de cromo, mas também de óxido de ferro, óxido de titânio e expressiva oxidação do silício. O Mn não foi detectado pela análise SIMS devido à sua baixa afinidade eletrônica,<sup>(7)</sup> mas ele se inclui entre os elementos oxidados no início da oxidação. Outros elementos, como o Mo, também não foram detectados pela técnica SIMS.



**Figura 6.** Análises por espectrometria de massa de íons secundários dos filmes de óxidos formados sobre o aço AISI 444 em ar, à  $900^\circ\text{C}$ , (a) 10 min, (b) 50h.

## 4 DISCUSSÃO

### 4.1 Influência da Temperatura e da Atmosfera sobre a Oxidação do aço AISI 444

A Figura 1 mostra claramente a influência da composição da atmosfera sobre a cinética de oxidação do aço AISI 444 à  $950^\circ\text{C}$ .

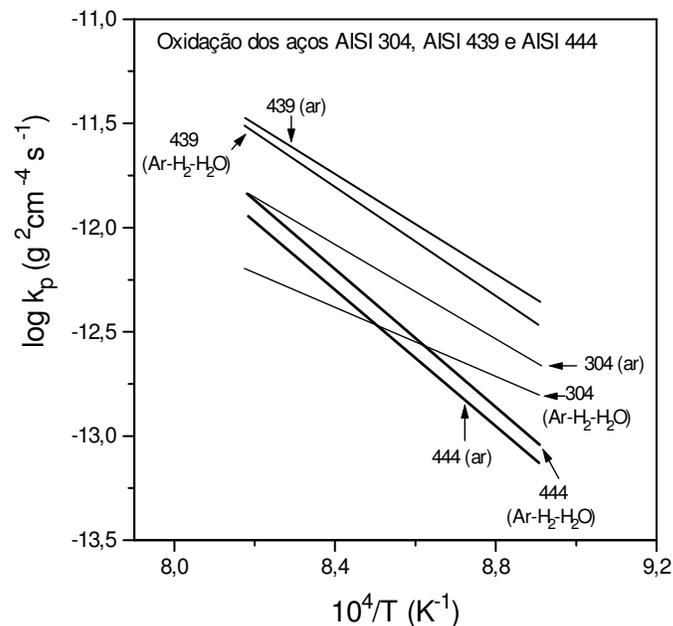
No intervalo de  $850^\circ\text{C}$  a  $950^\circ\text{C}$ , a maior taxa de oxidação do aço AISI 444 é observada na atmosfera de  $\text{Ar}+1\text{ppm O}_2$ , enquanto que a menor taxa de oxidação é observada em ar. A taxa de oxidação em  $\text{Ar-H}_2\text{-H}_2\text{O}$  é intermediária, porém próxima da taxa de oxidação em ar. Portanto, para as temperaturas e atmosferas utilizadas, o aço AISI 444 apresenta maior resistência à oxidação em ar e menor resistência em  $\text{Ar}+1\text{ppm O}_2$  (Figura 3).

Para todas as condições experimentais utilizadas, a cinética de oxidação do aço AISI 444 ocorre apenas em um estágio, ao contrário do que acontece com outros aços inoxidáveis como o aço ferrítico AISI 430A e o aço austenítico AISI 304 que apresentam mais de uma cinética de oxidação acima de 900°C, em ar.<sup>(2,8)</sup>

As constantes de oxidação parabólicas do aço AISI 444 estão representadas no diagrama de Arrhenius da Figura 3, onde pode-se ver claramente o efeito da atmosfera sobre a cinética de oxidação. As energias de ativação de 317kJ/mol, 311kJ/mol e 316kJ/mol, para o ar, Ar+1ppm O<sub>2</sub> e Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, respectivamente, são muito próximas e mostram que o mecanismo de oxidação é o mesmo nas três atmosferas.

Considerando que o aço AISI 444 apresenta ainda poucas aplicações em temperaturas elevadas, é conveniente comparar o seu comportamento de oxidação com os de outros aços tradicionalmente utilizados, como o aço austenítico AISI 304, ou recomendados, como o AISI 439, para aplicações à altas temperaturas.<sup>(1,2)</sup>

A Figura 7 compara as taxas de oxidação do aço AISI 444 com as taxas de oxidação dos aços AISI 304 e AISI 439 em ar e em Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O.<sup>(1,2)</sup> As taxas de oxidação dos aços inoxidáveis ferríticos AISI 439 e AISI 444 apresentam pouca variação nas atmosferas de ar e Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, ao contrário do aço AISI 304.



**Figura 7.** Comparação das constantes parabólicas dos aços AISI 439, AISI 444 e AISI 304.

Na faixa de 850°C a 950°C, o aço AISI 444 é o mais resistente à oxidação em ar, enquanto que em atmosfera de Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O o aço AISI 444 é o mais resistente à oxidação até 900°C. Acima dessa temperatura o aço AISI 304 apresenta a maior resistência à oxidação.

Considerando esses resultados, e baseando-se exclusivamente no comportamento da oxidação, isto é, ignorando-se outros aspectos como o comportamento mecânico, pode-se afirmar que o aço AISI 444 apresenta potencial

para aplicações em altas temperaturas, em particular, em ar, na faixa de 850°C a 950°C.

## 4.2 Morfologia e Composição Química dos Filmes de Óxidos

Conforme explicado no item 3.2, apenas os filmes de óxidos formados em ar apresentaram-se contínuos e homogêneos. Em Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, houve início de descamação à partir de 900°C, e na atmosfera de Ar+1ppm O<sub>2</sub> houve descamação acentuada à partir de 900°C. Como todos os tratamentos de oxidação foram feitos seguindo um mesmo ciclo térmico, a não integridade dos filmes de óxidos formados, principalmente em Ar+1ppm O<sub>2</sub> não pode estar relacionada a choques térmicos, mas provavelmente à natureza da atmosfera utilizada.

Os resultados das análises EDS estão de acordo com as análises SIMS e com as fases observadas por difração de raios X. As análises SIMS mostram a forte oxidação do Si no início da oxidação (Figura 6a), e para tempos longos (50h) a distribuição da concentração do Si apresenta um aumento na interface metal-óxido. Esse resultado está de acordo com as análises EDS que mostraram Si nas partes internas dos filmes próximas à interface metal/óxido. Esse aumento do Si na interface metal/óxido é frequentemente atribuído a uma oxidação interna,<sup>(2)</sup> mas pode estar relacionado também com o óxido de silício formado no início da oxidação.

As presenças de Mn e Fe nos filmes de óxidos já foram discutidas pelos autores em trabalhos prévios sobre difusão desses elementos no Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.<sup>(7,9)</sup> De acordo com Sabioni et al.,<sup>(7)</sup> a presença de partículas ricas em Mn na superfície externa oxidada resulta da oxidação inicial do Mn que apresenta maior afinidade pelo oxigênio do que o Cr. Após a oxidação inicial do Mn, na seqüência, ele difunde-se através do filme de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> em direção à superfície externa do filme. A quantidade de Mn no filme é limitada pela baixa concentração de Mn, em relação à concentração do Cr, e pode formar a fase espinélio. De acordo também com Sabioni et al.,<sup>(9)</sup> o filme de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> não age como barreira à difusão do ferro. Portanto, parte do ferro presente no filme de Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pode ser devida à difusão do ferro inicialmente oxidado. Isso também explica o ferro achado no filme de óxido formado em atmosfera de Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, na qual a pressão de oxigênio é muito baixa para permitir a formação de óxidos de ferro. Nesse caso, provavelmente, o ferro difunde-se através do filme a partir do substrato metálico.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados do estudo da oxidação do aço AISI 444 em atmosferas de ar seco, Ar+1ppm O<sub>2</sub> e Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, na faixa de 850°C a 950°C, mostram que a maior resistência à oxidação deste aço ocorre em ar e a menor resistência é observada em Ar+1ppm O<sub>2</sub>.

Os filmes de óxidos formados pela oxidação do aço AISI 444 são contínuos e homogêneos, em ar seco, para todas as temperaturas utilizadas, e apresenta descamações em Ar+1ppm O<sub>2</sub> e em Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O, a partir de 900°C.

As análises químicas por EDS, SIMS e DRX mostram o Cr como o elemento majoritário dos filmes de óxidos, exceto em camadas internas observadas em zonas descamadas onde predomina o ferro.

Nas mesmas condições experimentais, o aço 444 apresenta maior resistência à oxidação em ar do que os aços austenítico AISI 304 e ferrítico AISI 439. Em

atmosfera de Ar-H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O o aço AISI 444 apresenta maior resistência à oxidação do que o AISI 304 e o AISI 439 até 900° C, sendo superado acima desta temperatura pelo AISI 304.

## Agradecimentos

Os autores são gratos à FAPEMIG e CNPq pelo auxílio financeiro, ao pesquisador F. Jomard do CNRS/França pelas análises SIMS, ao Microlab-DEGEO-UFOP pelas análises MEV/EDS e ao Laboratório Nacional de Luz Sincrotron pelas análises de DRX. A autora M.F. Salgado agradece à UEMA pela bolsa de doutorado.

## REFERÊNCIAS

- 1 SABIONI, A.C.S.; HUNTZ, A.M.; LUZ, E.C.; MANTEL, M.; HAUT., C. Comparative study of High Temperatura Oxidation Behaviour in AISI 304 and AISI 439 Stainless Steels. *Materials Research*, v. 6, n. 2, p. 179-185, april-june, 2003.
- 2 HUNTZ, A.M.H.; RECKMANN, A.; HAUT, C.; SÉVERAC, C.; HERBST, M.; RESENDE, F.C.T.; SABIONI, A.C.S. Oxidation of AISI 304 and AISI 439 Stainless Steels. *Material Science and Engineering A*, v. 447, n. (1-2), p. 266-276, 2007.
- 3 INOU, Y.; KIKUCHI, M. Present and Future Trends of Stainless Steel for Automotive Exhaust System. *Nippon Steel Technical Report*, n. 88, p. 62-69, July, 2003.
- 4 ZHU, J.H.; ZHANG, Y.; BASU, A.; LU, Z.G.; PARATHAMAN, M.; LEE, D.F.; PAYZANT, E.A. LaCrO<sub>3</sub>-based coatings on ferritic stainless steel for solid oxide fuel cell interconnect applications. *Surface and Coatings Technology*, v. 177-178, p. 65-72, 2004
- 5 CHANDRA-AMBHORN, S., WOUTERS, Y., ANTONI, L., TOSCAN, F., GALERIE, A. Adhesion of oxide scales grown on ferritic stainless steels in solid oxide fuel cells temperature and atmosphere conditions. *Journal of Power Sources* 171 (2), 688-695(2007).
- 6 WAGNER, C. Diffusion and High Temperature Oxidation of Metals. *Atom Movements*. Cleveland: ASM Seminar, p. 153-173 (1951).
- 7 SABIONI, A.C.S., HUNTZ, A. M., BORGES, L.C. AND JOMARD , F. First study of manganese diffusion in Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> polycrystal and thin films. *Philosophical Magazine A* 87(12), 1921-1937(2007).
- 8 PARDINI, A.C.; SABIONI, A.C.S.; HUNTZ, A.M.; ROSSI, E.H., PANIAGO, R.; MALHERBE, L. Estudo da oxidação em altas temperaturas de aços inoxidáveis ferríticos AISI 430 não estabilizado e estabilizado com nióbio. 18<sup>o</sup> CBECiMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 24 a 28 de Novembro de 2008, Porto de Galinhas, PE, Brasil. 7657-7668
- 9 SABIONI, A.C.S., HUNTZ, A.M., SILVA , F. AND JOMARD , F. Diffusion of iron in Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: polycrystals and thin films. *Material Science and Engineering A* 392(1-2) 254-261(2005).