

CARACTERÍSTICAS DA CAMADA DE ÓXIDOS FORMADAS NO AÇO INOXIDÁVEL 410D APÓS TRATAMENTOS ISOTÉRMICOS EM ATMOSFERA OXIDANTE *

Amanda Aparecida Fátima Arruda¹
Ana Cecília de Carvalho²
Paulo Sérgio Moreira³
Rhelman Rossano Urzêdo Queiróz⁴
Geraldo Lúcio de Faria⁵

Resumo

O objetivo deste trabalho é caracterizar o inoxidável ferrítico 410D e as principais características da camada de óxido formada após a sua submissão a tratamentos isotérmicos. Foi analisada a microestrutura do material no estado de entrega e após tratamentos isotérmicos. O comportamento de oxidação deste aço foi estudado nas temperaturas de 300°C, 600°C e 900°C por longos períodos de tempo e resfriados ao ar. O aumento do tempo e da temperatura dos tratamentos gerou um aumento da espessura da camada de óxido formada. Os resultados também indicam que ocorre uma oxidação separatista, ou seja, ocorre a formação de duas camadas uma rica em cromo e outra rica em ferro. Após a formação desta camada rica em ferro ocorre uma regeneração da camada de Cr₂O₃ sob a liga de Fe-Cr que exibe boa adesão sem mostrar poros na interface da camada de metal. Já a camada de óxido de ferro formada na superfície não possui boa adesão e é porosa.

Palavras-chave: Aço Inoxidável Ferrítico; Camada de Óxido; Oxidação em Altas Temperaturas

CHARACTERISTICS OF OXIDE SCALE FORMED ON STAINLESS STEEL 410D AFTER ISOTHERMAL TREATMENTS IN AN OXIDANT ATMOSPHERE

Abstract

The aim of this study is to characterize the ferritic stainless 410D and the characteristics of oxide layer formed after subject to isothermal treatments. The microstructure of the material was analyzed in the delivery state and after isothermal treatments. The oxidation behavior of this steel was studied in the temperatures of 300°C, 600°C and 900°C for long periods of time and cooled to air. The increasing treatment time and temperature generated an increase in the thickness of the formed oxide layer. The results also indicate that a separatist oxidation occurs, in other words, the formation of two layers one is rich in chromium and another rich in iron. After of this iron-rich layer formation occurs a regeneration of the Cr₂O₃ layer under the Fe-Cr alloy which exhibits good adhesion without showing pores at the interface of the metal layer. The iron oxide layer formed on the surface does not have good adhesion and is porous.

Keywords: Ferritic Stainless Steel; Oxide Scale; High Temperature Oxidation

¹ Engenharia Metalúrgica, Graduada na Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

² Engenharia Metalúrgica, Graduando na Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenharia Metalúrgica, Graduada na Universidade Federal de Ouro Preto, Mestre em Engenharia de Materiais, Técnico, Departamento de Metalurgia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

- ⁴ *Engenharia Metalúrgica, Graduado na Universidade Federal de Ouro Preto, Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Minas – UFMG, Professor, Departamento de Metalurgia, Instituto Federal de Minas Gerais, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*
- ⁵ *Física Aplicada a Ciência de Materiais Graduado na Universidade Federal de Ouro Preto, Doutor em Engenharia de Materiais, Professor, Departamento de Metalurgia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são conhecidos pela sua elevada resistência à corrosão e oxidação. Por apresentarem um bom desempenho químico quando comparado aos aços comuns, algumas famílias dos aços inoxidáveis como a dos ferríticos são recomendáveis para a fabricação de dutos para passagem de vapor e gases úmidos, de sistemas de exaustão de automóveis, de esteiras transportadoras em mineradoras, de sistemas filtrantes na indústria de sucroenergéticos e de passarelas e plataformas na indústria petroquímica.

O aço 410D é um aço inoxidável ferrítico em desenvolvimento e fabricado a um tempo relativamente curto no Brasil. Considerando a questão econômica, pode-se afirmar que o aço inoxidável ferrítico 410D é competitivo com os aços carbonos comuns e possui uma vantagem em relação aos outros aços inoxidáveis ferríticos. A sua composição química que não possui grandes adições de elementos de liga de elevado custo, o que o torna um aço inoxidável relativamente barato. Entretanto, em projetos de engenharia, além da questão econômica, é necessário que se tenha total conhecimento técnico e segurança no material utilizado, portanto deve-se conhecer o comportamento do mesmo em condições que se assemelhem às de aplicação. Neste cenário, e tendo em vista a possibilidade de aplicação do aço 410D em temperaturas elevadas com atmosfera oxidante, é necessário que estudos sejam conduzidos no sentido de caracterizar e avaliar o seu desempenho nestas condições. Assim sendo, este primeiro trabalho se propõe a avaliar a formação e as características de camada de óxidos que se formam no presente aço quando submetido a diferentes intervalos de tempo de exposição a temperaturas que variam de 300°C a 900°C.

A resistência de um metal ou uma liga metálica à oxidação em altas temperaturas depende da formação da camada de óxido, que pode ser protetora isolando o material do ambiente agressivo, formando uma barreira física contra a difusão de espécies iônicas e eletrônicas [1-3].

O crescimento de filme de óxido depende do transporte das espécies através da interface óxido/gás, da concentração de defeitos dessa interface e da pressão parcial de oxigênio. Os mecanismos de difusão que ocorrem no processo de crescimento de filme de óxido de cromo em um aço inoxidável ou em uma liga rica em cromo podem não ser os mesmo que ocorrem no cromo puro, isso ocorre devido aos defeitos cristalinos presentes nos óxidos que são influenciados pelas impurezas metálicas e pelos elementos de liga [4].

A exposição de ligas Fe-Cr em ambientes com presença de H_2O/O_2 em temperaturas acima de 500°C pode resultar na degradação da camada de óxido de cromo protetora através da evaporação do cromo em $CrO_2(OH)_2$ e CrO_3 . A taxa de evaporação do Cr_2O_3 é linearmente dependente do tempo e aumenta com o aumento da temperatura [5].

A evaporação do óxido de cromo pode levar a depreciação da camada de proteção da liga Fe-Cr, podendo resultar na formação de uma camada de óxido de ferro pobremente protetora aumentando assim a taxa de oxidação. As taxas de oxidação mais elevadas foram atribuídas a menores razões Cr/Fe e, conseqüentemente, maiores taxas de difusão no estado sólido [6].

Com o desenvolvimento de novos aços inoxidáveis ferríticos com uma quantidade elevada de Cr, é necessário compreender as características de oxidação de tais aços inoxidáveis ferríticos no ambiente com elevadas temperaturas. Cheng et al.(2014) estudou os aços inoxidáveis ferríticos B443NT e B445J1M a 1150°C em

uma atmosfera úmida, simulada com 18% de vapor de água fluindo para o forno a uma taxa de 1000 ml/min injetando ar sintético com a água na temperatura da água de 58,4°C. A pressão total do gás foi de 1atm. Foram analisadas as formações de camadas de óxidos em ambos os aços e a composição destas camadas. No estudo foi comprovada a ocorrência de duas camadas de óxido uma rica em cromo e outra rica em ferro. Conclui-se que o óxido rico em Cr forma-se no substrato de aço. Além disso, nessa camada de óxido logo acima da interface do metal, o teor de Fe é insignificante e o teor de Cr é alto, ilustrando que um filme de Cr₂O₃ é regenerado, o que pode impedir que a camada de óxido rica em ferro cresça profundamente no substrato. No aço B443NT a depleção de Cr é detectada sob a camada de óxidos em um intervalo de 10 µm, já no aço B445J1M não ocorre depleção de Cr de acordo com o teor de Cr perto da interface do óxido com o metal. Existem vazios na interface entre o óxido rico em cromo e o óxido rico em ferro. Por outro lado, nenhuma cavidade grande pode ser vista na interface superfície do aço inoxidável, mostrando que a camada de óxido formada neste aço é aderente ao substrato e compacta [7].

Este trabalho propõe avaliar as características da camada de óxido formada na superfície do aço 410D, através da realização de diferentes tratamentos isotérmicos. Será analisada a evolução da camada de óxido formada, sua composição e posteriormente análise metalográfica dos corpos de provas. Gerando resultados experimentais que podem contribuir para avaliações futuras mais aprofundadas sobre a possibilidade de aplicação desse aço em altas temperaturas por longos períodos de tempo.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais

O material a ser estudado neste trabalho é o aço inoxidável ferrítico 410D produzido pela empresa Aperam South América. A composição química do aço é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável ferrítico 410D

Elemento	C	Cr	Mn	Si	P	S
Concentração	0.007	11.43	0.588	0.603	0.023	0.0005
Elemento	Ni	Nb	Ti	V	Mo	Al
Concentração	0.329	0.015	0.001	0.028	0.008	0.002

Analisando a composição química apresentada na Tabela 1, pode-se observar que o aço 410D é um aço inoxidável devido ao seu teor de cromo acima de 11%. Já o teor de carbono se encontra bem abaixo do teor indicado para esse aço 0,03% composição fornecida pela literatura, o que contribui para aumentar o campo de estabilidade da fase ferrita e diminui a formação de carbonetos e nitretos de cromo evitando um possível empobrecimento local de cromo que poderia levar a corrosão intergranular. Os elementos nióbio, titânio e molibdênio estão presentes em quantidades muito baixas podendo-se concluir que este aço não é estabilizado. O molibdênio, níquel e cromo são adicionados para aumentar a resistência à corrosão deste aço que é a principal propriedade dos aços inoxidáveis.

2.2 Procedimentos Experimentais

2.2.1 Análise Microestrutural e Efeito da Temperatura de Tratamento Sobre a Fração de Fases

A análise da microestrutura e da microdureza do material foi realizado no Laboratório de Tratamentos Térmicos e Microscopia Óptica (LTM). As amostras foram cortadas em quadrados de 30x30mm com 6mm de espessura no material em três condições: estado de entrega, após 10 minutos à 900°C e 10 minutos à 1000°C. Posteriormente as amostras foram preparadas de acordo com a Norma ASTM E3 (2011) quimicamente atacadas com o reativo Villela para revelação da microestrutura. As imagens foram obtidas em um microscópio óptico LEICA DM2700M. Devido à verificação de estruturas bifásicas (ferrita-martensita) nas condições citadas acima foi realizada medição das frações de fases por meio da utilização do Software Image J.

Após a obtenção das imagens da microestrutura, foram feitas medições de microdureza Vickers, em um microdurômetro da marca Pantec, modelo HXD – 1000TM. Foi utilizada uma carga de 200gf com um tempo de aplicação de 5 segundos. Um total de 20 indentações aleatórias foram executadas em cada amostra.

2.2.2 Tratamentos Isotérmicos e Oxidação

As amostras do aço inoxidável ferrítico 410D (30mmx30mm) foram submetidas a tratamentos isotérmicos em diferentes temperaturas, por diferentes intervalos de tempo, para avaliar o ganho de massa e o crescimento da camada de óxidos. A Figura 1 mostra os tratamentos realizados. Os tratamentos térmicos foram feitos em um forno tipo Mufla do Laboratório de Tratamentos Térmicos e Microscopia Óptica (LTM) do DEMET - UFOP em duas condições com suporte feito de aço carbono e outra com um suporte refratário para apoio das amostras no forno.

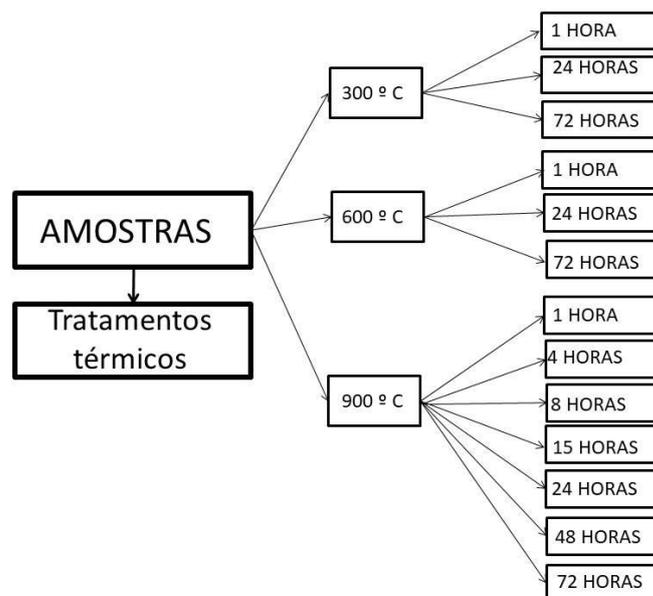


Figura 1. Esquema ilustrando as temperaturas e intervalos de tempo dos tratamentos isotérmicos a que as amostras foram submetidas.

Para analisar o efeito dos tratamentos isotérmicos nas amostras, foram realizados os procedimentos de metalografia, medição do ganho de massa, medição da espessura da camada de óxidos, análise da camada de óxido via microscopia eletrônica de varredura.

Os procedimentos de preparação metalográfica para a caracterização microestrutural de amostras foram realizados no LTM. As amostras que passaram pelos tratamentos térmicos citados na Tabela 2 e foram preparadas para a caracterização de acordo com a Norma ASTM E3 (2011).

A medição do ganho de massa foi feita no Laboratório de Tratamentos Térmicos e de Microscopia Óptica (LTM) com a pesagem das amostras antes e após os tratamentos isotérmicos em uma balança com precisão de 0,01g. O ganho de massa percentual foi calculado por meio da Equação 1, onde m_0 é a massa inicial e m é a massa após os tratamentos térmicos.

$$\text{ganho de massa (\%)} = \left(\frac{m - m_0}{m_0} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

A obtenção de imagens e análise das camadas de óxido foi realizada em um Microscópio Eletrônico de Varredura da marca Vega3 Tescan no Laboratório de Microscopia do IFMG - Ouro Preto. As medições das espessuras dos filmes de óxidos crescidos sobre as amostras foram feitas por meio da utilização do software Umias do LTM. Para uma obtenção de dados representativos, foram realizadas 100 medições por amostra.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Análise Microestrutural

As microestruturas obtidas podem ser observadas na Figura 2. Na Figura 2(a) observa-se uma microestrutura ferrítica, com morfologia equiaxial e homogênea, como era esperado para o aço 410D como fabricado.

Na Figura 2 (b) e (c) pode-se observar que a microestrutura das amostras após 10 minutos (tempo de encharque) a 900°C e 1000°C, respectivamente, e ambas resfriada ao ar em uma superfície refratária é bifásica sendo composta de ferrita e martensita. Segundo Modenesi (2000), a depender da concentração de Cr na composição química dos aços inoxidáveis ferríticos, mesmo com o aquecimento contínuo da estrutura até temperaturas da ordem de 1000°C, pode não ocorrer a decomposição da ferrita em austenita. Isto se daria pelo caráter α -gêneo do Cr que, termodinamicamente, contrai o campo de estabilidade da austenita, favorecendo a estabilidade da ferrita. Entretanto, para menores relações entre teor de Cr e concentração de elementos γ -gêneos, alguns aços inoxidáveis ferríticos podem ser parcial, ou totalmente austenitizados no aquecimento. Durante o seu resfriamento, a depender da taxa, pode haver transformação martensítica total, ou parcial [8].

Em um estudo realizado por Vilela (2017) obteve-se por simulação computacional o diagrama de fases no equilíbrio específico para o aço inoxidável ferrítico 410D. Concluiu-se com o diagrama de equilíbrio que o campo monofásico austenítico deste aço se estende no intervalo de temperatura de 822,6 a 1186°C. Logo as temperaturas 900°C e 1000°C estão acima da temperatura crítica Ac1 e abaixo de Ac3, portanto, uma parte da ferrita se transforma em austenita, fase que dissolveu mais carbono. No resfriamento, essa austenita com maior concentração de carbono transforma-se em martensita, resultando em uma estrutura bifásica [9].

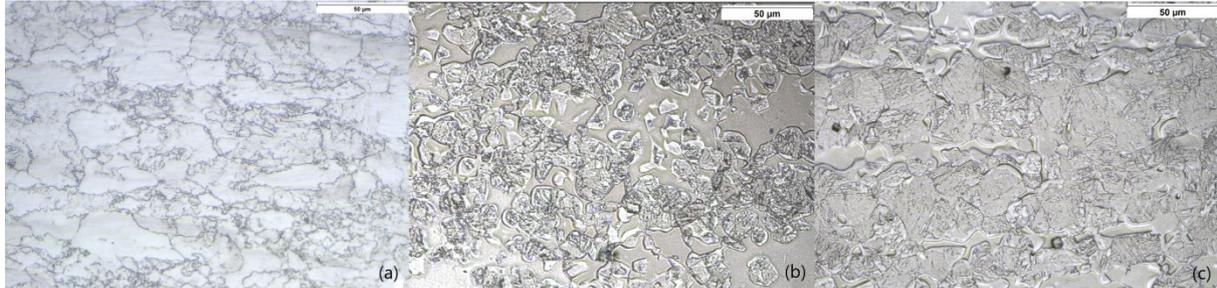


Figura 2. Microestruturas obtidas (a) Estado de entrega (b) 900°C /10 min (c) 1000°C/10min

A Tabela 2 apresenta os resultados de Metalografia Quantitativa e de Microdureza Vickers. Observa-se que a variação na microdureza entre as amostras é relativamente baixa. As amostras bifásicas (tratadas a 900°C e 1000°C) apresentam um aumento em relação ao estado de entrega e esse aumento é justificado pela transformação martensítica. Como as amostras apresentaram uma matriz de martensita e grãos de ferrita aleatoriamente distribuídos nessa matriz, o desvio médio também se apresenta maior, uma vez que o valor encontrado na dureza depende do campo em que a indentação atingiu, podendo ser, aleatoriamente na ferrita, ou na martensita. A martensita obtida na transformação deste aço é considerada uma martensita relativamente macia já que os valores médios encontrados são abaixo de 350. Para a comprovação do aumento da dureza do material com o aumento da fase martensítica foi realizada uma contagem de frações fases que também é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados de metalografia quantitativa e de microdureza Vickers

Amostra	Estado de entrega	900°C - 10min	1000°C - 10min
Estrutura	Ferrita	Ferrita/Martensita	Ferrita/Martensita
Fração de Fases	100%	28,2% Ferrita	14% Ferrita
Dureza Média	211	251	259
Desvio Padrão	4	12	12

2.3.2 Análise da Camada de Óxidos

A Figura 3 apresenta o ganho de massa com o tempo para o aço inoxidável ferrítico 410D oxidado a 900°C em um suporte de aço carbono e um suporte refratário, resfriados ao ar. Houve pouco ganho de peso em amostras deste aço quando tratadas em baixas temperaturas. Nas temperaturas de 300°C e 600°C, considerando a metodologia de medição utilizada neste trabalho, não houve ganho de massa significativo. Cheng et al.(2014), estudou dois aços inoxidáveis ferríticos. Neste estudo foi difícil distinguir efeitos de temperatura na taxa de oxidação abaixo da temperatura de 1060°C, sendo que esta temperatura pode mudar de acordo com a liga estudada [7].

O aço inoxidável ferrítico 410D apresentou uma boa resistência à oxidação em altas temperaturas. As curvas do aço apresentam uma tendência de aumento de ganho de massa com o aumento do tempo de residência no forno. Pode-se notar um maior ganho de massa das amostras que foram ao forno sob um refratário em comparação as amostras que foram colocadas com um suporte de aço carbono. Isso se deve ao fato de que o suporte feito de aço carbono acaba oxidando primeiro em relação ao

aço inoxidável que é um material mais nobre. Sendo assim ocorre uma proteção do aço inoxidável e uma menor oxidação das amostras do aço inoxidável ferrítico 410D com suporte de aço carbono quando comparado as amostras com suporte refratário. Porém ocorre uma diminuição da taxa de aumento de massa entre 4 e 8 horas à 900°C para o aço inoxidável ferrítico 410D. Isso ocorre devido à ocorrência da oxidação separatista neste intervalo de tempo. A camada de óxido é constituída principalmente de Cr_2O_3 (cromia) que é a camada protetora até o intervalo de 4 horas. A partir deste intervalo ocorre a depleção do óxido de cromo e uma diminuição da taxa de aumento de massa. Quando começa a formação do óxido de ferro mostra um aumento abrupto da taxa de crescimento de óxido quando a cromia transita para óxidos de ferro. A taxa de crescimento pode ser atribuída pela regeneração de Cr_2O_3 sob o óxido de ferro [10-12]. Geralmente, quanto maior a extensão da depleção de Cr, menos provável será que a camada de Cr_2O_3 seja curada ou reformada [13-14]. O presente estudo mostra a camada de óxido desbastada formada em no aço inoxidável ferrítico 410D na Figura 4 (a) 4 horas e (b) 72 horas.

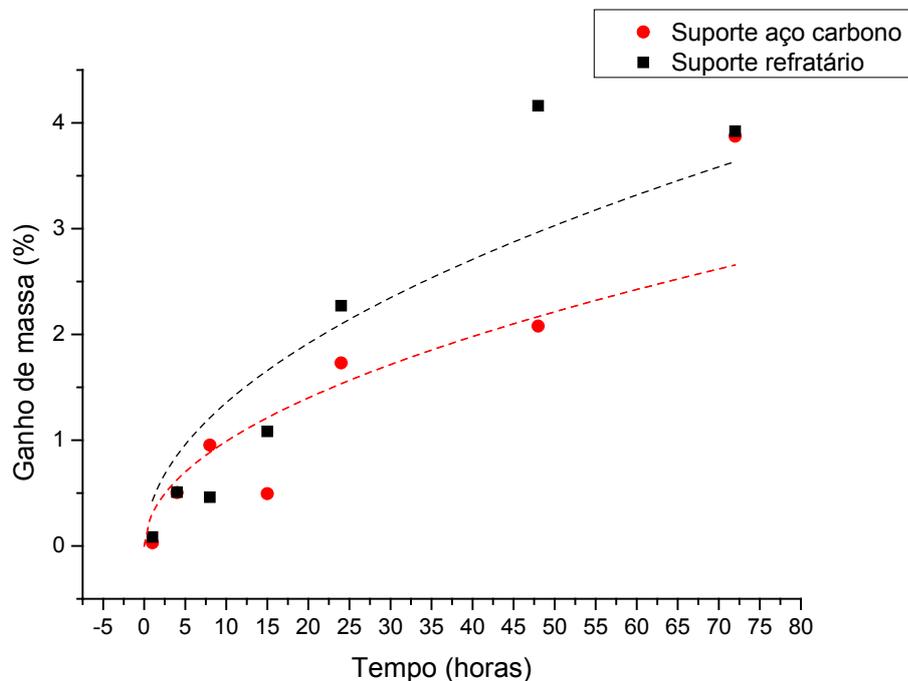


Figura 3. Gráfico de ganho de massa de acordo com o tempo de residência da amostra no forno.

A Figura 4 mostra a seção transversal da camada de óxido formada sobre o substrato do metal. A camada de óxido na Figura 4 (b) 72 horas de tratamento é mais espessa do que na Figura 4 (a) 4 horas de tratamento. Essa camada de óxido das amostras evolui e aumenta sua espessura com o aumento do tempo em que as amostras foram expostas à temperatura de 900°C.

Na fase inicial da oxidação dos aços inoxidáveis os cristais se formam aleatoriamente em diferentes tempos de espera. Com o progresso do tempo, os cristais de óxido se fundirão até que toda a superfície do metal esteja coberta com óxidos de cromo que crescem todos na mesma velocidade. Ocorre então um desenvolvimento do espinélio interno de Fe-Cr antes da formação dos óxidos de ferro externos. A formação de espinélio de Fe-Cr é principalmente controlada pela

difusão interna do oxigênio [7]. A mobilidade de íons Fe no espinélio de Fe-Cr é maior que a dos íons Cr, permitindo a migração dos íons Fe para fora através de espinélio Fe-Cr e reagem com O_2 para formar óxidos de ferro exteriores. A precipitação interna rápida de óxidos não protetores, como o $(Fe,Cr)_3O_4$, forma-se na zona com deficiência de Cr.

Antes da camada de Cr_2O_3 falhar, ocorre o surgimento e crescimento de defeitos e poros na interface do metal com os óxidos. Algumas partes da camada de Cr_2O_3 podem até se descolar do substrato, isso ocorre devido à influência da volatilização de Cr sob ar úmido podendo causar depleção de Cr na amostra de aço. O mecanismo de separação pode ser explicado pela evaporação de espécies voláteis de cromo [6-7]. O mecanismo de separação também pode ser explicado pela falha química induzida mecanicamente [14]. A interface entre a camada de metal aparece convoluta, já a interface entre os óxidos de cromo e de ferro possui vazios, defeitos e porosidade.

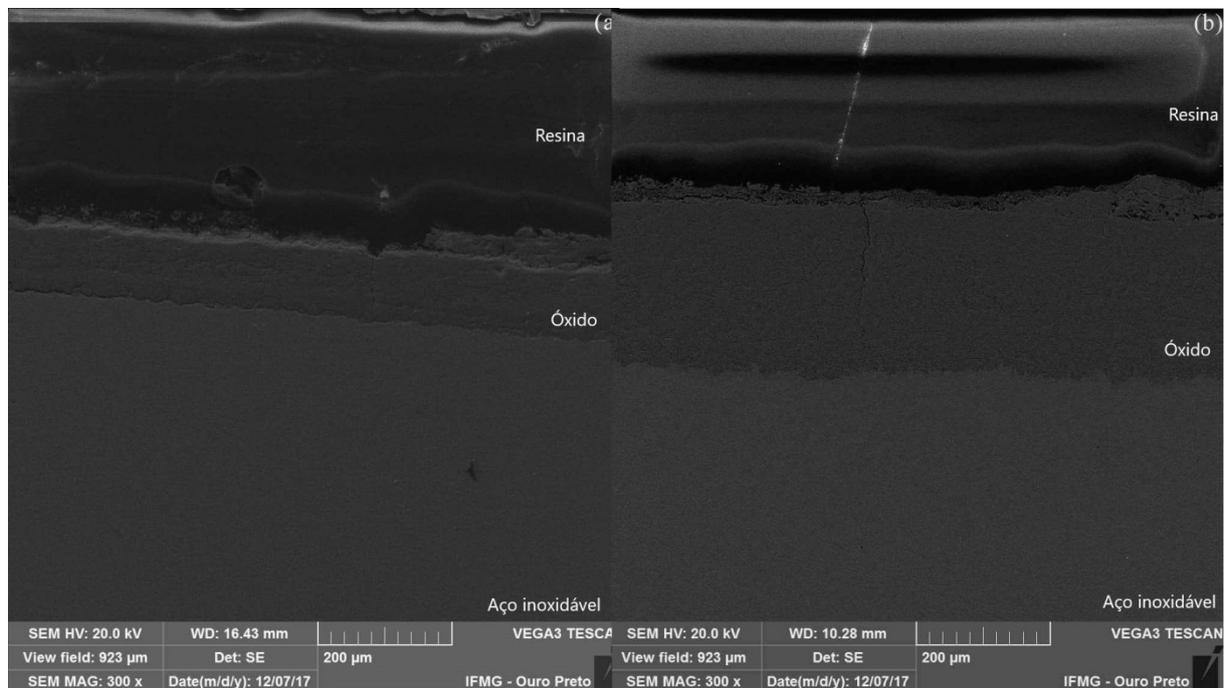


Figura 4. Camada de óxido obtida após tratamento isotérmico a 900°C (a) 4 horas (b) 72horas.

Com base nos resultados da Figura 5 o ganho de massa das amostras no suporte de aço carbono é menor do que no suporte refratário na temperatura de 900°C indicando que a camada de óxido formada no aço com suporte metálico é mais fina que a camada de óxido formada no suporte refratário. O aumento da espessura da camada de óxido é diretamente proporcional ao aumento de tempo de tratamento térmico. Isso ocorre devido a três motivos já explicados acima. O primeiro é que com o aumento da temperatura da amostra ocorre juntamente o aumento da difusão do cromo e do ferro no material, reagindo com o oxigênio do ambiente formando e crescendo a camada protetora formada. O segundo motivo é que durante o tempo em que a amostra se encontra no forno ocorre a depleção de cromo e em seguida a regeneração e crescimento da camada rica em cromo. Além desses dois motivos, ocorre também a formação das duas camadas de óxido, chamadas camadas separatistas. A primeira camada rica em cromo e com o aumento do tempo de

residência da amostra no forno ocorre a formação de uma segunda camada de óxido esta rica em ferro.

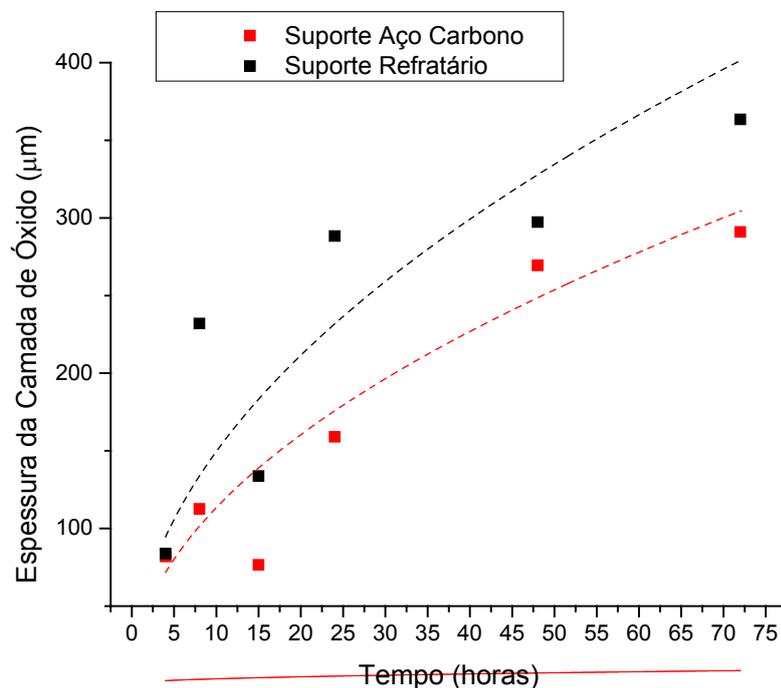


Figura 5. Gráfico da espessura da camada de óxido de acordo com o tempo de residência no forno.

A imagem e o mapa de elementos EDS da seção transversal da amostra oxidada a 900°C durante 72 horas são mostrados na Figura 5. Uma forte indicação de Cr está presente na interface do metal. Os óxidos de ferro crescem para fora e o espinélio de Fe-Cr cresce para dentro consumindo o substrato de metal. A depleção de Cr é detectada sob a camada de óxidos. A Figura 5c pode-se observar que a camada de óxido perto da interface do metal é compacta. Além disso, na camada de óxido logo acima da interface do metal, a intensidade de Fe é insignificante e Cr é alta, ilustrando que um filme de Cr_2O_3 é regenerado, o que pode impedir que o espinélio cresça profundamente no substrato. Por outro lado, não há grandes cavidades possam ser vistas na interface do metal, mostrando que a camada de óxido é aderente ao substrato. Já a Figura 5a nos mostra o óxido de ferro formado sob o óxido de cromo e em contato com a superfície possui irregularidades, defeitos e vazios, logo se percebe que ele possui uma baixa aderência ao substrato.

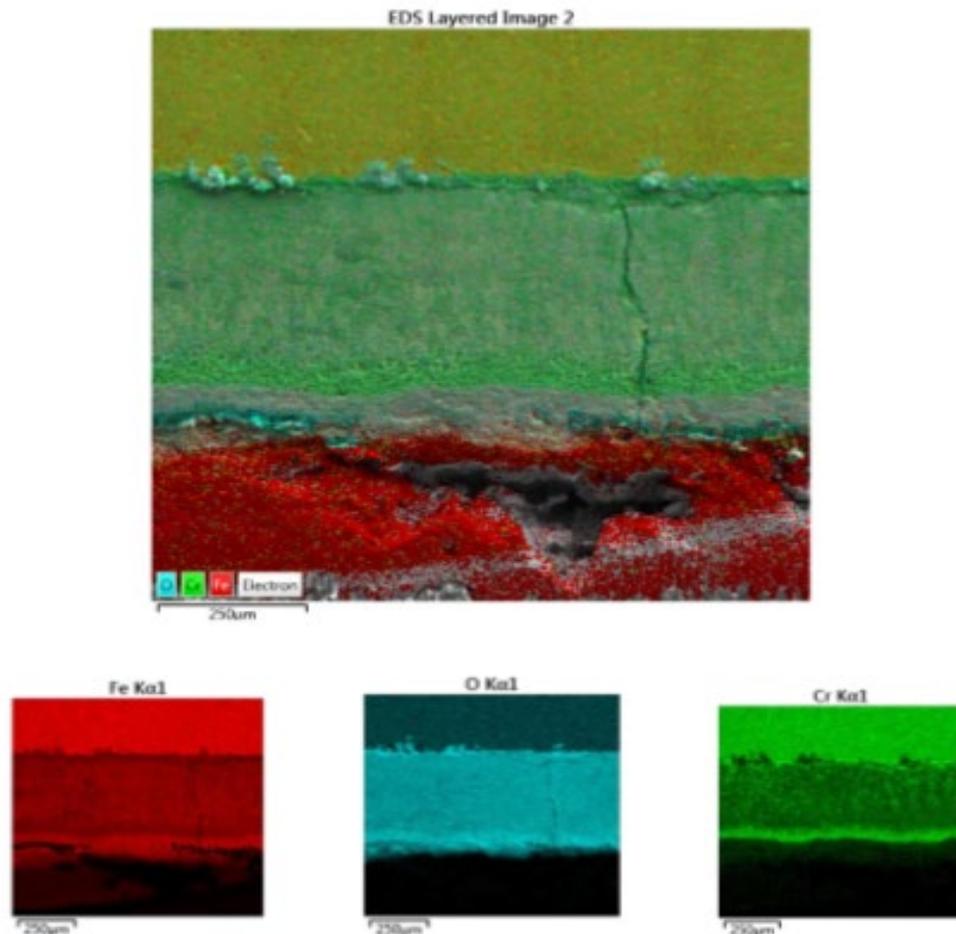


Figura 6. Mapa de elementos EDS obtido via MEV

3 CONCLUSÃO

O aço estudado em seu estado de entrega é basicamente ferrítico, porém com tratamentos térmicos em temperaturas acima de 823°C começa a ocorrer a austenitização deste material formando uma estrutura bifásica composta de martensita e ferrita. Quanto maior a temperatura de tratamento maior a fração de martensita formada. Essa estrutura bifásica formada leva a um aumento da dureza do material.

Durante a oxidação do aço 410D notou-se um ganho de massa com o aumento do tempo de residência no forno. Porém, ocorre uma diminuição da taxa de aumento de massa entre 4 e 8 horas à 900°C. Isso ocorre devido à depleção do óxido de cromo que leva a uma diminuição da taxa de aumento de massa. Após 8 horas de residência no forno ocorre um aumento abrupto da taxa de crescimento de óxido que é atribuída a regeneração de Cr_2O_3 e o crescimento do óxido de ferro.

Para a situação mais extrema avaliada, 900°C durante 72 horas, as amostras que foram ao forno sob um refratário tiveram um aumento máximo de 4,2% em relação ao seu peso inicial enquanto as amostras que foram colocadas com um suporte de aço carbono obtiveram um aumento de 3,9%.

A análise de EDS confirmou que ocorre a formação de duas camadas de óxidos separatistas. A primeira camada de óxido que cresce sob o aço inoxidável é rica em

romo, compacta e aderente ao substrato. Acima dessa camada de óxido de cromo ocorre a formação de um segundo óxido sendo este rico em ferro. Porém este óxido de ferro possui uma baixa aderência ao óxido de cromo, irregularidades na superfície, defeitos e vazios.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa APERAM por ceder gentilmente as amostras utilizadas neste trabalho, à CAPES e ao CNPq pelo financiamento de Bolsas de Pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 Khanna AS. Introduction to high temperature Oxidation and Corrosion. Ed. ASM International. The Materials Information Society, 2002, 321p.
- 2 Sabioni ACS, Huntz AM, Luz EC, Mantel M, Haut C. Comparative Study of High Temperature Oxidation Behavior in AISI 439 Stainless Steels. Materials Research, Vol. 6, No 2, p.179-185, 2003.
- 3 Huntz AM, Reckmann A, Haut C, Sévérac C, Herbst M, Resende FCT, Sabioni ACS. Oxidation of AISI 304 and AISI 439 stainless steels. Materials Science and Engineering A, 447, 266 – 276, 2007.
- 4 Gemelli E. Corrosão de Materiais Metálicos e sua Caracterização. Rio de Janeiro: LTC, 2001, 183p.
- 5 Yamauchi A, Kurokawa K, Takahashi H. Evaporation of Cr₂O₃ in Atmospheres Containing H₂O. Oxidation of Metals. Vol 59, 2003, 517-529.
- 6 Asteman H, Svensson JE, Johansson LG. Evidence for Chromium Evaporation Influencing the Oxidation of 304L: The Effect of Temperature and Flow Rate. Oxidation of Metals. Vol 57, 2002, 193-216.
- 7 Cheng X, Jiang Z, Wei D, Zhao J, Monaghan BJ, Longbottom RJ, Jiang. Characteristics of oxide scale formed on ferritic stainless steels in simulated reheating atmosphere. Surface and Coatings Technology. Vol 258, 2014, 257-26
- 8 Modenesi PJ. Soldabilidade dos aços inoxidáveis. São Paulo, Osasco. Centro Nacional de Tecnologia em Metalurgia. 2001.
- 9 Vilela, LBM. Efeito da Deformação a Frio e da Temperatura de Recozimento Final Sobre a Evolução Estrutural de um Aço Inoxidável Ferrítico ASTM 410. Dissertação de Mestrado. REDEMAT-UFOP. 2017.
- 10 Rahmel Manter A. High Temperature Corrosion of Advanced Materials and Protective Coatings. Corrosion, Vol 39, 1988, p.354-354.
- 11 Moulin P, Huntz AM, Lacombe P, Influence des phenomenes diffusionnels sur le mecanisme d'oxydation des alliages NiCr. Acta Metallurgica., Vol 28, 1980, p.745-756.
- 12 Huntz AM, Reckmann A, Haut C, Severac C, Herbst C, Resende FCT, Sabioni ASCS. Oxidation of AISI 304 and AISI 439 stainless steels. Materials Science and Engineering: A, Vol 447, 2007, p.266-276.
- 13 Henry S, Galerie A, Antoni L, Oxidation behaviour of cast Ni–Cr alloys in steam at 800°C. Materials Science Forum, Vol 369-372, 2001, p.353-360.
- 14 H.E. Evans, Mechanisms of Breakaway Oxidation and Application to Chromia-Forming Steel. Oxidation Metals, Vol 52, 1999, p.379-401..