

OXIDACIÓN A ALTA TEMPERATURA DE UN ACERO ASTM A335 P 92 EN CONDICIONES ISOTERMICAS Y DE CICLADO TERMICO

Dario Yesid Peña B.¹*, Hugo Estupiñán D.², José Chacón Nava³, Danaies Infanzon¹, Amaury Álvarez¹.

RESUMEN

En este trabajo describe el comportamiento del acero ACERO ASTM A 335 P 92 bajo un proceso de oxidación isotérmica y cíclica en un rango de temperaturas entre 450 y 700°C, en una atmósfera oxidante. Mediciones termogravimétricas mostraron que en condiciones isotérmicas la velocidad de crecimiento de los óxidos presentan un comportamiento de tipo parabólico en el rango de temperaturas de prueba. Para las pruebas de oxidación cíclica se observó en el intervalo entre 450 y 600°C una cinética de tipo parabólica, mientras que a 450 y 500°C el comportamiento cinético fue de tipo para-lineal. Después de comparar ambos tipos de ensayo, se deriva que la velocidad de oxidación en condiciones de temperatura cíclica fue mayor debido principalmente al choque térmico al que fueron expuestas las capas de óxidos formados. Los resultados mostrados por SEM, para 650°C y tiempo de exposición a 50h en el ensayo de oxidación isotérmico, presentan dos tipos de capas de óxido compuestas por la mezcla de óxidos de Cr y Fe, destacándose que la cantidad de Cr es mayor en la capa externa y la cantidad de Fe es mayor en la interna, mientras que a 700°C y a un tiempo de exposición de 168 h, para el ensayo cíclico, la capa externa fue principalmente magnetita.

Palabras claves: Oxidación isotérmica, oxidación cíclica, acero ASTM A 335 P 92

HIGH TEMPERATURE OXIDATION OF ASTM A335 P92 STEEL UNDER ISOTHERMAL AND CYCLIC CONDITIONS

ABSTRACT

This work describes the behavior of ASTM A 335 P92 steel under a process of continuous and cyclic oxidation at high temperatures between 450° and 700 °C in an oxidizing atmosphere. The gravimetric technique was used to observe the isothermal oxidation and the growth rate of oxides which showed a parabolic trend, $X^2 = K_p t$ with values for K_p [$\text{mg}^2/\text{cm}^4\text{h}$]: 0.00013; 0.00014; 0.00089; 0.01134; 0.01432; 0.01560 corresponding to temperatures of 450°, 500°, 550°, 600°, 650° y 700°C, respectively. For cyclic tests shows that at temperatures between 450° and 600 ° C. a kinetic behavior parabolic type was present, while at 450° and 500°C there was a mixed kinetic behavior type para-linear. After comparing both tests was observed, that the cyclic oxidation rate was higher than the continuous one due to thermal shock of the oxide layers, which carried a spalling of the external oxide. Results obtained by SEM at 650°C temperatures and time of exposition equal to 50 hours in the isothermal oxidation presented two types of compound oxide layers due to the mix of Cr and Fe oxides, noting that the quantity of Cr is greater in the outer layer and the quantity of Fe is greater in the internal layer, in the other hand at 700° C and time of exposition equal to 168 hours in the cyclic oxidation, only the outer layer presented Fe, which was magnetite.

Keywords: Isothermal oxidation, cyclic oxidation, ASTM A-335 P92 steel.

1. Grupo de Investigaciones en Corrosión, Universidad Industrial de Santander. dypena@uis.edu.co

2. Universidad Nacional de Colombia. Grupo de Tribología y Superficies. haestupinand@unal.edu.co

3. Depto de Integridad y Diseño de Materiales Compuestos, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., Chihuahua, México.

INTRODUCCIÓN

Cuando un metal es expuesto a ambientes gaseosos a temperatura elevada, puede darse la formación de una capa de óxido que puede ser o no protector, pero esto depende del tipo de aleación, la temperatura del metal y el tipo de atmósfera al que está expuesto. En estas condiciones, la reacción de corrosión tiene lugar a través de un mecanismo diferente al electroquímico, donde este último necesariamente requiere de una fase líquida en contacto con el metal base. Es decir, cuando un metal es expuesto a algún gas oxidante a temperaturas elevadas la corrosión puede ocurrir por la reacción directa del gas sin la presencia de un electrolito líquido. La velocidad de ataque se incrementa sustancialmente con la temperatura, la película superficial típicamente aumenta como un resultado de la reacción en las interfaces óxido/gas y óxido/metal debido al transporte de cationes o aniones a través del óxido, el cual se comporta como un electrolito sólido [1]. Las aleaciones a alta temperatura tienden a formar con el oxígeno del medio capas protectoras de óxidos resistentes al ataque de compuestos azufrados, al ataque por cenizas, sales y compuestos halogenados. Obviamente, es altamente deseable que la capa de óxido formado sea continua, homogénea y adherente al metal base.

La oxidación de metales y aleaciones se genera por la difusión del oxígeno a través de la interfaz sustrato metálico y entorno y en las películas de óxido y la reacción con los elementos activos de la aleación, o por la difusión directa al interior del metal y la reacción con este para formar el óxido. Esto genera un deterioro de estas películas, enfáticamente en las propiedades mecánicas, reflejado en una reducción de la resistencia a la termofluencia, fatiga térmica, y diferencias de expansión térmica entre el material base y los productos de corrosión formados. El fenómeno de corrosión en alta temperatura, junto a una disminución en propiedades mecánicas del material puede derivar en falla prematura de los equipos, causando grandes pérdidas económicas por reemplazo de materiales y mantenimientos no programados, pero principalmente las asociadas a falta de producción.

En plantas generadoras de electricidad a partir de combustibles fósiles, la oxidación es la reacción de superficie y de difusión más influyente en materiales expuestos a alta temperatura. Una gran mayoría de

los procesos y ambientes industriales tienen suficiente actividad de oxígeno para dar condiciones de oxidación. Lo anterior es debido a que estos procesos usan exceso de aire para asegurar la combustión completa del combustible utilizado. Los principales productos de combustión consisten primariamente de O_2 , N_2 , CO_2 , SO_2 y H_2O . A pesar de que las aleaciones en estos ambientes son oxidadas por oxígeno, otros productos de combustión tales como H_2O , SO_2 y CO_2 pueden jugar un papel importante afectando el comportamiento del material, cuya oxidación inestable puede ocurrir como corrosión uniforme, en forma de picadura o ataque intergranular, presentando una morfología similar a la presentada a partir de sistemas acuosos [2]. Estos óxidos son a menudo formados en la corrosión por gases a alta temperatura. La energía libre estándar de formación del óxido estable es más negativo que para un óxido inestable, pero en realidad éste puede a menudo existir indefinidamente entre transformaciones no cuantificables [3]. Un ejemplo común es la wustita (FeO) cuando se forma durante la laminación en caliente del acero. Termodinámicamente es inestable por debajo de $570^\circ C$, pero debido a que la descomposición cinética es extremadamente lenta, se puede encontrar FeO a más bajas temperaturas.

En este trabajo se estudió el comportamiento del acero ASTM A335 P 92 el cual es utilizado para la fabricación de tubos para calderas de potencia, en un rango de temperatura entre 450 y $700^\circ C$ en aire, utilizando ensayos cíclicos y continuos, para así contribuir al entendimiento de su comportamiento en las condiciones mencionadas.

PARTE EXPERIMENTAL

Las probetas fueron maquinadas a partir de un tubo de acero ASTM A 335 P 92 hasta obtener una forma de paralelepípedo rectangular de dimensiones: 20 mm de ancho, 15 mm de largo y 2 mm de espesor. La superficie de las probetas fue preparada metalográficamente con lijas de carburo de silicio hasta grado 600. Posteriormente se desengrasaron en un baño ultrasónico en acetona durante 5 minutos y se pesaron en una balanza Mettler AE 240 con una precisión de 0.0001 g. Las probetas se almacenaron en un desecador después de ser pesadas con el fin de evitar su oxidación. La Tabla 1 muestra la composición del acero de prueba.

Tabla 1. Composición química (% peso) del acero ASTM A335 P92

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
% peso	0.115	0.454	0.220	0.013	0.0033	9.14	0.400
Elemento	Ni	Al	V	Nb	W	N	B
% peso	0.119	0.011	0.165	0.055	1.979	0.039	0.0022

Fuente: SMT Laboratorio prove tecnologiche ed analisi (Tenaris).

Para el ensayo de oxidación Isotérmica se utilizó un horno horizontal adecuado con un reactor de forma tubular, hecho en acero inoxidable y un porta crisoles especial. El ensayo de oxidación continua se realizó de acuerdo a la norma JIS Z2281–1993 “*Test Method for Continuous Oxidation Test at Elevated Temperatures for Metallic Materials*” [4], empleando las siguientes condiciones: temperaturas de trabajo de 450°, 500°, 550°, 600°, 650°,700°C; luego las probetas fueron retiradas del horno transcurridos los siguientes tiempos: 1, 10, 20, 50 y 168 horas, de exposición continua en aire. Estos ensayos se realizaron por duplicado para obtener mayor confiabilidad de los resultados. Para la oxidación cíclica se utilizó la norma JIS Z 2282-1996 “*Method of Cyclic Oxidation Testing at Elevated Temperatures for Metallic Materials*” [5]. Un ciclo representa una hora, el cual se divide en: 5 minutos de calentamiento hasta la temperatura de trabajo, 40 minutos a la temperatura requerida y 15 minutos de enfriamiento. Las temperaturas que se emplearon para el ensayo fueron: 450, 500, 550, 600, 650, y 700°C, y las probetas se retiraron en los siguientes ciclos: 1, 10, 20, 50, 168 ciclos.

Después de la exposición térmica bajo condiciones de oxidación, las muestras fueron analizadas empleando un microscopio electrónico JEOL **JSM** 5910 LV. En algunos casos se empleó la técnica de “depth profiling” para conocer la distribución de elementos desde la superficie del óxido formado, hacia el interior de la aleación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Oxidación Isotérmica.- Los resultados gravimétricos obtenidos para la oxidación isotérmica del acero ferrítico ASTM A335 P92 para las temperaturas de 450, 500, 550, 600, 650 y 700°C y tiempos de exposición de 1, 10, 20, 50 y 168 h, se detallan en la Figuras 1, 2 y 3.

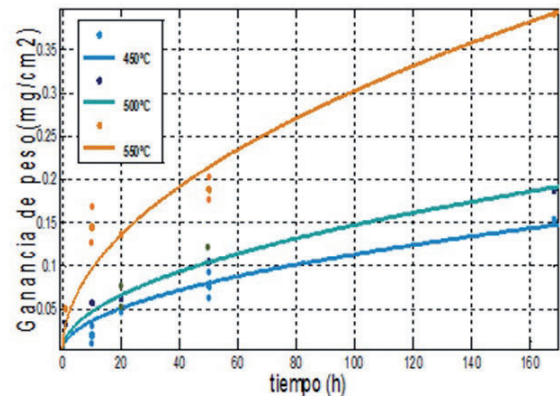


Figura 1. Gráfica de ganancia de peso vs. tiempo de exposición del acero ferrítico ASTM A335 P92 para temperaturas de 450,500 y 550°C

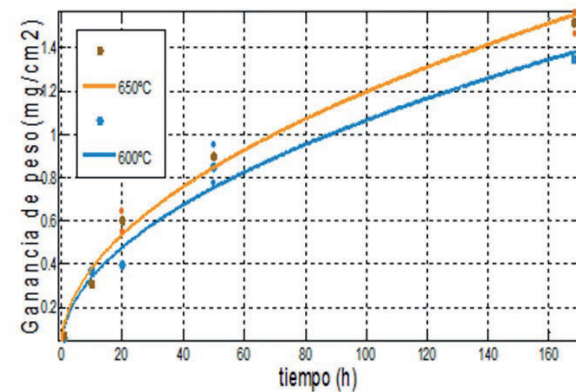


Figura 2. Gráfica de ganancia de peso vs. Tiempo de exposición del acero ferrítico ASTM A335 P92 para temperaturas de 600 y 650°C

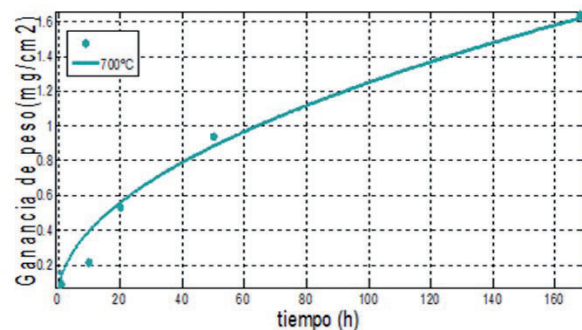


Figura 3. Gráfica de ganancia de peso vs. Tiempo de exposición del acero ferrítico ASTM A335 P92 para una temperatura de 700°C

La velocidad de crecimiento para las diferentes temperaturas se ajustó a un modelo parabólico, donde $X^2 = K_p \cdot t$. Este comportamiento corresponde a un proceso netamente controlado por la difusión en estado sólido, y es característico de un óxido protector. El

comportamiento que presenta la ganancia de peso en las curvas anteriores se debe inicialmente a la adsorción de la especie gaseosa, en este caso oxígeno, sobre la superficie del acero ASTM A335 P92, que posteriormente reacciona con elementos del acero como el Cr y Fe para dar inicio a la oxidación y formación de núcleos de óxido [6].

Para las temperaturas de 450°, 500° y 550°C entre 1 hora y 10 horas de exposición, la ganancia de peso tiende a valores cercanos a cero y la oxidación es mínima, la formación de los núcleos de óxidos se presentan a 1 hora de exposición para los diferentes ensayos [7]. Superficialmente en estas probetas se observó una apariencia de color azul característico del óxido de cromo, pero sin la posible presencia de una costra. La poca ganancia de peso puede atribuirse a las características protectoras de la capa de cromita.

A partir de 600°C y para tiempos mayores a 50 horas de exposición, la ganancia de peso aumentó considerablemente, así a 650°C y 168 horas de exposición, la ganancia de peso fue de 1,52 mg/cm², en tanto que a 700°C y 168 horas, la ganancia de peso fue de 1,64 mg/cm², siendo estos valores notablemente altos en comparación con los obtenidos a temperaturas menores de 600°C bajo el mismo tiempo de exposición. Cálculo de la constante de crecimiento K_p: Uno de los parámetros que permiten determinar la cinética de crecimiento de capa de óxido cuando se generan óxidos protectores, es la denominada constante de crecimiento parabólico K_p. [8] Para el cálculo de las constantes cinéticas o de crecimiento K_p se realizó una regresión no lineal (con los datos de ganancia de peso y tiempo de exposición), obteniendo los siguientes valores para cada temperatura:

$$\begin{aligned} K_{p450^\circ\text{C}} &= 0.00013 \text{ [mg}^2/\text{cm}^4 \text{ h]} \text{ con } R^2 = 0.9742. \\ K_{p500^\circ\text{C}} &= 0.00014 \text{ [mg}^2/\text{cm}^4 \text{ h]} \text{ con } R^2 = 0.9966. \\ K_{p550^\circ\text{C}} &= 0.00089 \text{ [mg}^2/\text{cm}^4 \text{ h]} \text{ con } R^2 = 0.9837. \\ K_{p600^\circ\text{C}} &= 0.01134 \text{ [mg}^2/\text{cm}^4 \text{ h]} \text{ con } R^2 = 0.9797. \\ K_{p650^\circ\text{C}} &= 0.01432 \text{ [mg}^2/\text{cm}^4 \text{ h]} \text{ con } R^2 = 0.9878. \\ K_{p700^\circ\text{C}} &= 0.01560 \text{ [mg}^2/\text{cm}^4 \text{ h]} \text{ con } R^2 = 0.9760 \end{aligned}$$

Donde R es el coeficiente de correlación. Los valores de K_p tienden a aumentar con la temperatura, lo cual indica que la velocidad de oxidación es una función directa de la temperatura. Los valores de K_p entre 450°C - 550°C fueron pequeños comparados con los valores de K_p a 600°C, 650°C y 700°C. Entonces, el aumento en la temperatura contribuye a una mayor difusión en estado sólido por lo cual se obtiene mayor espesor en la capa de óxido que se manifiesta como mayor ganancia

de peso. En las superficies de estas probetas se observa una capa de óxido definida.

Teniendo en cuenta el comportamiento de la oxidación isotérmica con el tiempo y el valor de K_p, las capas de óxido formadas en el acero ASTM A335 P92, obedecen a una ley de crecimiento parabólico cuyas ecuaciones, para las diferentes temperaturas, se muestran a continuación:

$$450^\circ\text{C}: X^2 = 0.00013 t \quad (1)$$

$$500^\circ\text{C}: X^2 = 0.00014 t \quad (2)$$

$$550^\circ\text{C}: X^2 = 0.00089 t \quad (3)$$

$$600^\circ\text{C}: X^2 = 0.01134 t \quad (4)$$

$$650^\circ\text{C}: X^2 = 0.01432 t \quad (5)$$

$$700^\circ\text{C}: X^2 = 0.01560 t \quad (6)$$

Donde X es el espesor de la capa de óxido formado y t el tiempo de exposición en condiciones de oxidación isotérmica. Para el máximo tiempo de exposición que son 168 horas, se obtuvieron los siguientes valores de ganancia de peso para cada capa de óxido formado.

$$450^\circ\text{C}: X = 0.14778 \text{ mg/cm}^2$$

$$500^\circ\text{C}: X = 0.15336 \text{ mg/cm}^2$$

$$550^\circ\text{C}: X = 0.38668 \text{ mg/cm}^2$$

$$600^\circ\text{C}: X = 1.38026 \text{ mg/cm}^2$$

$$650^\circ\text{C}: X = 1.55105 \text{ mg/cm}^2$$

$$700^\circ\text{C}: X = 1.61889 \text{ mg/cm}^2$$

Oxidación Cíclica: la ganancia de peso aumenta con el incremento de la temperatura y el tiempo de exposición. En el rango entre 450° a 600°C, se observa que en las primeras horas de exposición se presenta una velocidad de crecimiento parabólico, y para tiempos mayores a 20 ciclos la velocidad de crecimiento tiende a un comportamiento lineal, cambiando de una ley a otra (comportamiento para-lineal), debido a que aparecen restricciones al paso de oxígeno a través de la película de óxido en formación [7,8,10]. Mientras que para 650° y 700°C se presenta un comportamiento parabólico similar al isotérmico.

El cálculo de las constantes cinéticas o de crecimiento no es posible realizarlo al igual que en el proceso isotérmico, debido a que el proceso no ocurre a una temperatura constante [9]. En las figuras 4 y 5 se muestran los resultados de ganancia de peso, obtenidos de los ensayos cíclicos realizados al acero ASTM A335 P92 para las diferentes temperaturas.

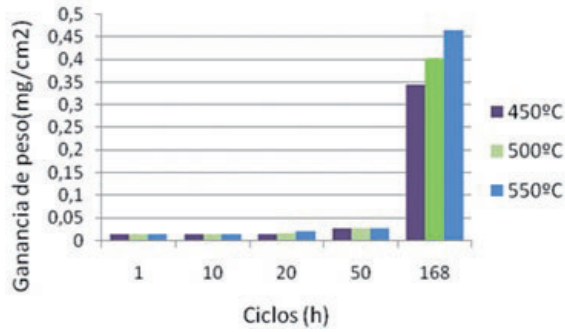


Figura 4. Gráfica de ganancia de peso vs. Ciclos de exposición del acero ASTM A335 P92, para temperaturas de 450°, 500° y 550°C

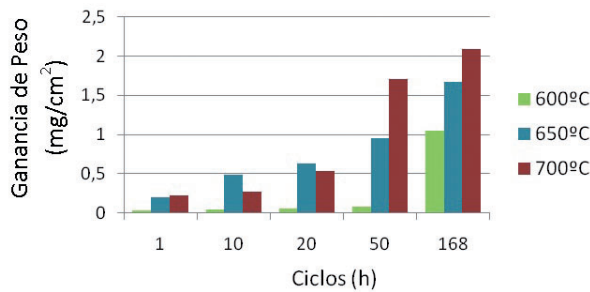


Figura 5. Gráfica de ganancia de peso vs. ciclos de exposición del acero ASTM A335 P92, para temperaturas de 600°, 650° y 700°C

De la figura 4 se puede observar que para tiempos de exposición de 1 a 50 ciclos, la ganancia de peso fue mínima para las diferentes temperaturas, con valores muy cercanos a cero. Para el máximo tiempo de exposición de 168 horas, se observa un incremento sustancial en la ganancia de peso.

Para las temperaturas de 600°, 650° y 700°C, la ganancia de peso mostrada en la figura 5 aumentó con el incremento de la temperatura y tiempo de exposición. Los mayores valores de ganancia de peso se obtuvieron para las temperaturas de 650° y 700°C en un tiempo de exposición entre 50 y 168 horas, obedeciendo a una mayor activación de la difusión en estado sólido de los iones de cromo y hierro del metal base hacia la capa del metal base formado, aumentando el espesor de la capa de óxido, siendo el óxido de cromo el más importante [7]. Mientras que para la temperatura de 600°C los valores de ganancia de peso fueron bajos excepto en el máximo tiempo de exposición. A esta temperatura, la baja velocidad de oxidación determinada es favorable puesto que la temperatura de trabajo del material en condiciones reales es de esperar que este alrededor de los 600°C. Las Figuras 6, 7 y 8 muestran la comparación en ganancia de peso para la oxidación cíclica y la oxidación isotérmica

a 500, 650 y 700°C, a tiempos iguales de exposición. La velocidad de oxidación para temperaturas entre 450 y 600°C, fue mayor en el proceso isotérmico a excepción de tiempos de exposición de 168 horas.

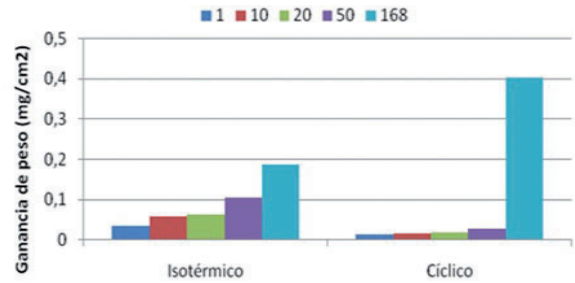


Figura 6. Gráfica comparativa entre la oxidación isotérmica y oxidación cíclica a 500°C del acero ferrítico ASTM A 335 P92, para tiempos de exposición de 1, 10, 20, 50 y 168 horas.

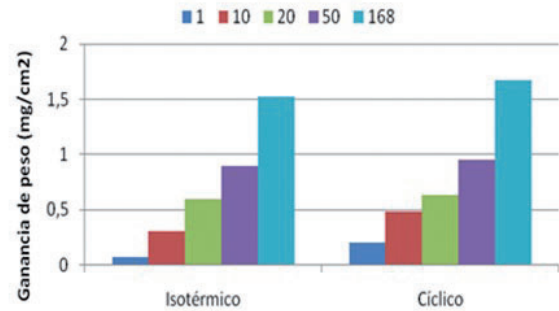


Figura 7. Gráfica comparativa entre los procesos de oxidación isotérmico y cíclico a 650°C del acero ASTM A 335 P92, para tiempos de exposición de 1, 10, 20, 50 y 168 horas.

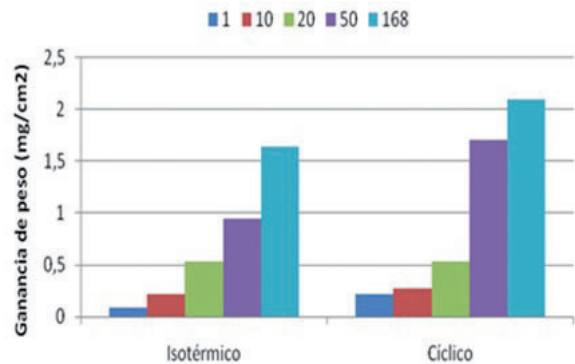


Figura 8. Gráfica comparativa entre los procesos de oxidación isotérmico y cíclico a 700°C del acero ASTM A 335 P92, para tiempos de exposición de 1, 10, 20, 50 y 168 horas.

Para temperaturas mayores a 600°C, se puede observar que en el proceso cíclico se tiene una velocidad de oxidación más alta que en el isotérmico reflejada en

la ganancia de peso obtenida, aunque a 20 horas de exposición las ganancias fueron similares (figura 7 y 8). Se puede decir que la mayor oxidación en el proceso cíclico a temperaturas por arriba de 600°C se debe principalmente al choque térmico generado por los ciclos de calentamiento y enfriamientos, produciendo agrietamientos en la costra de óxido, permitiendo sitios de acceso al oxígeno, contribuyendo así a una mayor oxidación del metal base.

El análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia por dispersión de rayos X (EDAX), se realizó para determinar la morfología y composición aproximada de las capas presentes en el sistema metal-óxido.

Este análisis se realizó a probetas expuestas a 650°C durante 50 horas y para 700°C a 168 ciclos, debido a que en estas condiciones se presentan los mayores valores de oxidación.

De las figuras 9 y 10, se observan tres capas formadas en el acero luego de ser expuesto a una oxidación isotérmica durante 50 horas a 650°C. El mapeo muestra los principales elementos encontrados en cada zona y la intensidad de puntos sugiere la proporción del mismo. La capa interna, es la matriz metálica del acero teniendo en mayor porcentaje atómico el Fe, en esta se presentan elementos de aleación como Cr, C, W, Al y una pequeña cantidad de oxígeno que alcanzó a difundir. En la capa intermedia, la difusión de elementos es mayor que en la interna, presentándose compuestos de carbono y de oxígeno, como el carburo de aluminio, óxidos de hierro y de cromo, morfológicamente esta capa no se ve muy compacta y su espesor es variable. La capa externa de óxido presenta un espesor aproximado de 10 μm , notándose más compacta y uniforme, presentando pocos defectos tipo poros. Según el espectro a) de la figura 11, la capa externa presenta óxidos de hierro y de cromo.

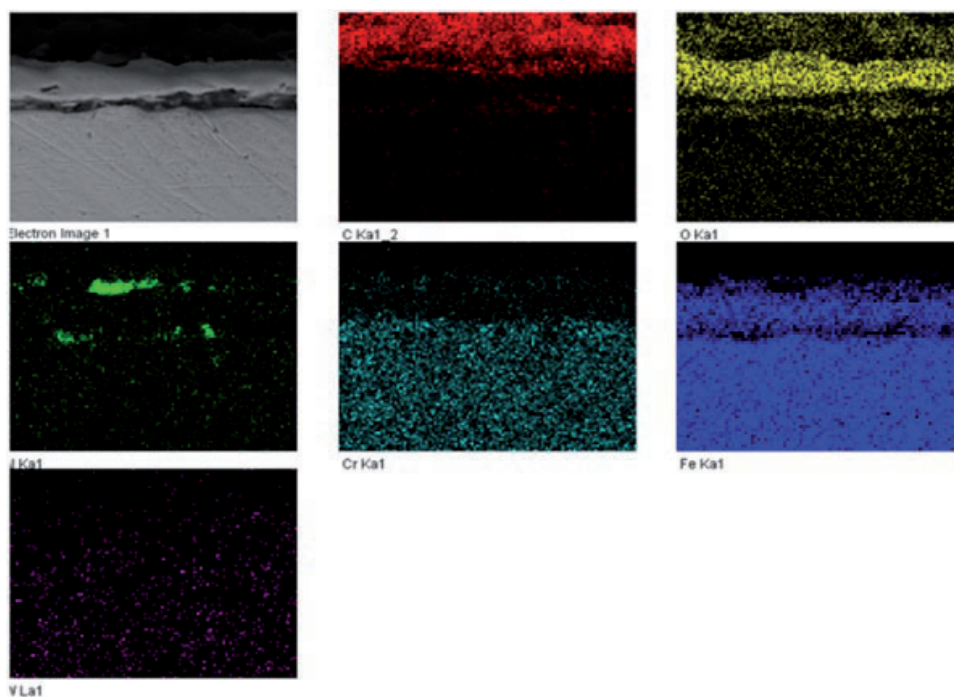


Figura 9. Mapa de composición de cada uno de los elementos presentes en las tres capas formadas isotérmicamente a una temperatura de 650 °C durante 50 horas.

En la figura 9 se observa los mapas composicionales de cada uno de los elementos presentes formados por oxidación isotérmica. De acuerdo a la intensidad

observada, en su orden el cromo, el hierro y el vanadio, son los elementos que forman en mayor cantidad óxidos y en menor proporción el wolframio.

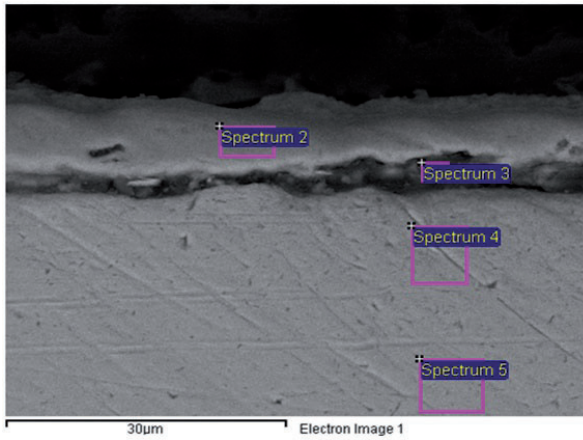


Figura 10. Análisis de cada una de las capas presentes en el sistema a 650 °C durante 50 horas.

En la figura 11a, 11b y 11c, se muestran los espectros EDS de los estratos analizados que se señalan en la figura 10. Estos en su orden son: espectro 2-figura 11a; espectro 3-figura 11b; espectro 4-figura 11c.

Se observa en el área del espectro 3, un producto característico de la oxidación térmica de óxido de cromo.

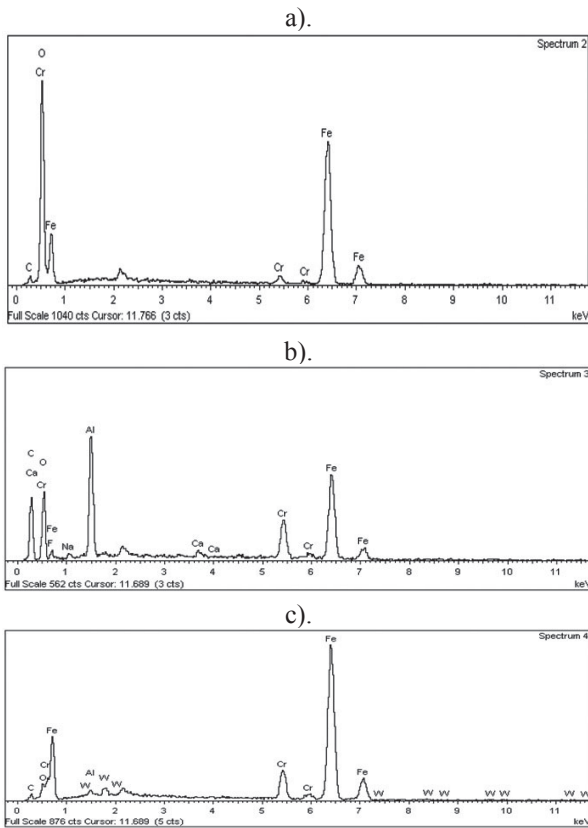


Figura 11. Espectro de cada una de las capas presentes en el sistema a 650 °C a 50 horas

Morfológicamente la probeta ensayada a 700°C durante 168 ciclos, evidencia una capa interna o matriz, constituida principalmente por el hierro y otra capa externa de óxido, que a diferencia del ensayo isotérmico solo presenta óxido de hierro, la capa es menos compacta, presentando defectos tipo poros y grietas, esto corrobora que choques térmicos inducidos por ciclos de calentamientos y enfriamiento debilitan la capa de óxido formada haciéndola menos protectora, ver figura 12.

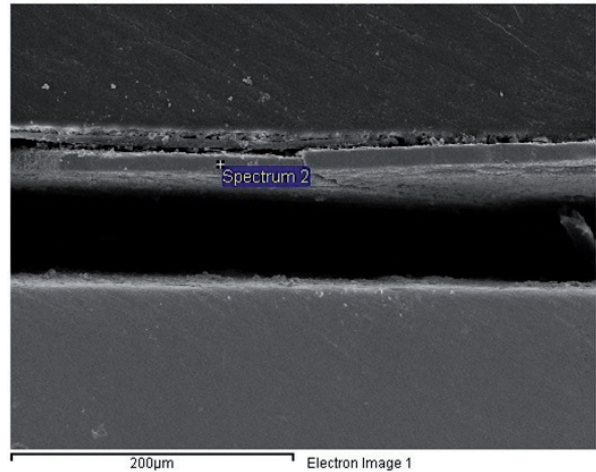


Figura 12. Análisis de las capas presentes en el ensayo cíclico a 700°C durante 168.

En la figura 13 se muestra la distribución de los elementos presentes en relación a las distancia en µm de la capa a la matriz metálica, en esta se pueden estimar los espesores de las diferentes capas. Así para 700°C a 168 ciclos la capa externa de óxido presenta un espesor aproximado de 40µm siendo mucho mayor que para 650°C a 50 horas, el cual posee un espesor aproximado de 10 µm. Confirmando que a temperaturas y tiempos mayores el ambiente generado es más agresivo.

El vacío presente en la distribución, obedece a un desprendimiento que sufrió la capa de óxido de la matriz del acero. Y el exceso de carbono a pocas micras se debe al carbono presente en la composición química de la resina dental empleada para el montaje de las probetas. El espectro mostrado en la figura 14, revela que la superficie del óxido está constituida en su mayor proporción por Fe, Cr y O, los cuales tienden a formar compuestos de óxido de hierro, óxido de cromo y una combinación de ellos, este tipo de compuesto llamado espinela, es común en estos sistemas debido a su estabilidad termodinámica bajo estas condiciones; en la figura 15 se observa la morfología de estos compuestos.

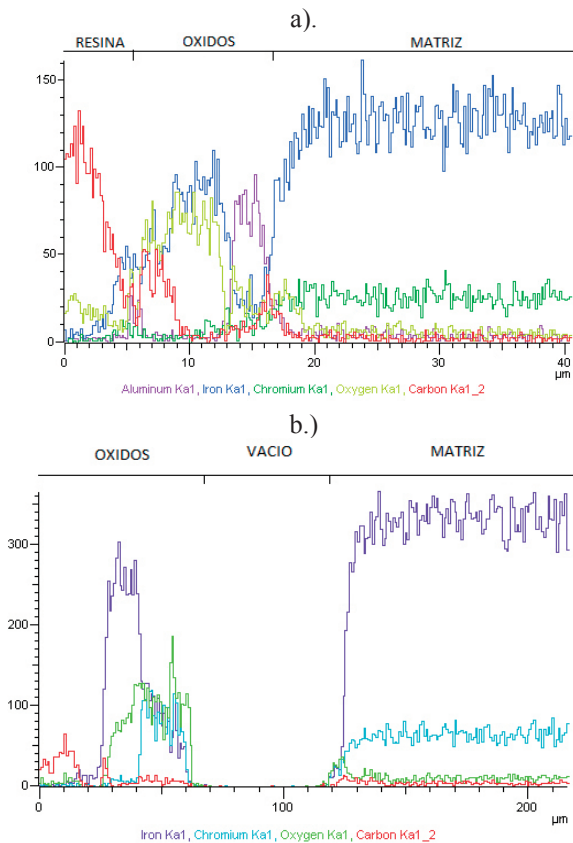


Figura 13. Distribución atómica vs espesor de capa para los ensayos a) Isotérmico 650°C a 50 horas. b) Cíclico 700°C a 168 ciclos

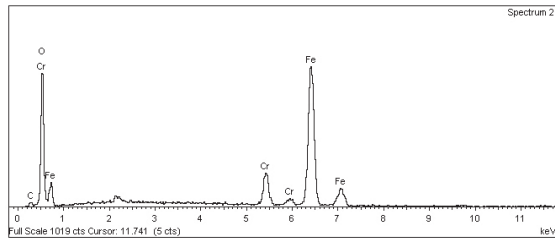


Figura 14. Espectro superficial a 700°C y 168 ciclos.

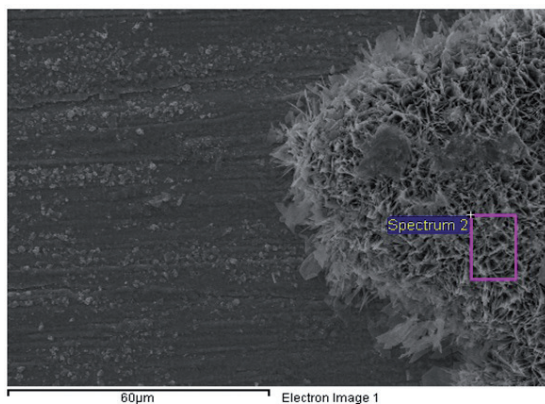


Figura 15. Análisis superficial SEM para 700°C a 168 ciclos.

Se observa una morfología esponjosa con presencia de laminillas que cubre de forma parcial la superficie del sustrato de acero.

CONCLUSIONES

El comportamiento cinético que se presentó en el acero ASTM A335 P92 para el ensayo de oxidación isotérmica es de tipo parabólico $X^2=Kt$, este comportamiento es característico al crecimiento de compuestos protectores formados a partir de los procesos que son controlados por la difusión del estado sólido.

Al comparar las velocidades de oxidación del acero ASTM A335 P92 después de ser expuestos a los ensayos de oxidación isotérmica y cíclica a una misma temperatura y tiempo de exposición, se obtuvo una oxidación más alta para las probetas expuestas a la oxidación cíclica en aire para temperaturas entre 650 y 700°C, debido a los choques térmicos generados en cada uno de los ciclos de calentamiento y enfriamiento.

Teniendo en cuenta la temperatura de trabajo del acero, que es alrededor de los 600°C, el ensayo cíclico presentó más baja velocidad de oxidación comparado con la velocidad de oxidación del ensayo isotérmico. Esto es favorable debido a que los fenómenos cíclicos se acercan más a los procesos ocurridos en la industria

Los óxidos formados sobre las probetas del acero ASTM A 335 P92 ensayadas isotérmicamente a 650°C presentan dos capas de óxidos compuestas por hierro y cromo, la capa interna se caracteriza por que evidencia menor cantidad de cromo que el presente en la capa externa. En las probetas ensayadas cíclicamente a 700°C la capa de óxido presente se caracteriza por que presenta óxidos de hierro en su capa externa, más que óxido de cromo. Un incremento en la temperatura a partir de 650 °C afecta la estabilidad del óxido de cromo, aumentando la presencia de óxido de hierro.

El estudio del comportamiento de este acero es útil para la selección de materiales utilizados para la fabricación de calderas generadoras de energía, teniendo en cuenta la combinación de la buena resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión de este material, comprobado en este estudio de oxidación.

REFERENCIAS

[1] AI, George, High temperature Corrosion of engineering alloys: oxidation. Ohio: ASM, 1990. p. 15-43.

- [2] Corrosión en sistemas en generación de vapor, Primer Encuentro Nacional de Corrosión y Protección. Universidad de Antioquia (CESET Grupo de Corrosión), Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín 1991 .p 1-6.
- [3] BRADFORD, Samuel, A, Fundamentals of Corrosion in Gases. 9 ed. Ohio, ASM, 1987, p. 13, 61-76.
- [4] Test method for continuous oxidation test at elevated temperatures for metallic materials. Tokio: JIS, 1993. p. 8 (JIS Z 2281).
- [5] JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD. Method of cyclic oxidation testing at elevated temperatures for metallic materials. Tokio: JIS, 1996. p. 8 (JIS Z 2282).
- [6] Corrosión a temperatura alta del acero ferrítico 9Cr-1Mo modificado P91, en atmosferas simuladas oxidantes-carburantes. REVISTA DE METALURGIA, 48(2), 2012. p 97-106
- [7] CARVAJAL Niño Yesid, Estudio cinético de la oxidación a alta temperatura del acero ferrítico Fe-9Cr-1Mo modificado Bucaramanga, 2002, p. 94-96, Trabajo de grado (Magister en Ingeniería Metalúrgica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Fisicoquímica. Área de corrosión.
- [8] GÓMEZ BARROSO, Carlos. Oxidación-carburación simultanea del acero ferrítico 9Cr-1Mo modificado grado p91, en ambientes con hidrocarburos a temperatura alta. Bucaramanga, 2002, p. 11-12, Trabajo de grado (M.Sc. Ingeniería Metalúrgica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Fisicoquímica. Área de corrosión
- [9] ASM Handbook. Properties and selection irons, steels, and high-performance alloys. 1997. Vol. 1
- [10] MACHUCA MARTÍNEZ, Jesús y BARRAZA RESTREPO, Harold. Oxidación isotérmica del acero ferrítico ASTM a-178 a altas temperaturas. Bucaramanga, 2002, p. 22, Trabajo de grado (Ingeniero Metalúrgico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Fisicoquímica. Área de corrosión.

Recepción: 10 de junio de 2014
Aceptación: 13 de octubre de 2014