

EVALUACIÓN DE CORROSIÓN DE UN ACERO AISI 316L EN SALES FUNDIDAS DE  
NITRATO MEDIANTE ENSAYOS GRAVIMÉTRICOS.

ANGIE GIMENA JAIMES CAMPOS  
ASTRID XIOMARA MOGOLLÓN SANABRIA

Trabajo de grado (modalidad: investigación) para optar por el título de Ingeniero Metalúrgico

Director

DARIO YESID PEÑA BALLESTEROS

Ph.D en corrosión

Codirector

ANDERSON ANDRÉS SANDOVAL AMADOR

M.Sc. Ingeniería de Materiales

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES  
BUCARAMANGA

2017

## DEDICATORIA

*Con todo mi cariño y mi amor a las personas que con su esfuerzo hicieron todo en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando sentía que el camino se terminaba, por alegrarme la vida con cada uno de los momentos compartidos, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.*

*Madre, Hermanos y amigos.*

*Angie Gimena Jaimes Campos*

## DEDICATORIA

*A mis padres, Hilda y Guillermo, no tengo palabras para agradecerles, mis compañeros de vida, motores de todos y cada uno de mis logros. Gracias por tanto amor, cariño, comprensión y enseñanzas para alcanzar lo que hoy soy. Son la parte más importante de este proceso y lo serán de toda mi vida.*

*A mis hermanos, Gerson y Viviana, mis colegas de travesuras, los cuales me han acompañado siempre, han hecho mi vida más bonita y me han llenado de sabiduría, cada uno a su manera. Gracias por ser parte de este sueño.*

*A mi abuela Lola, mi tía Dorita y mi tía Nelly, mujeres luchadoras, por darme fuerza y nunca dejarme sola, son parte de mis figuras a seguir.*

*A todos los que desde el cielo me acompañan, fueron y seguirán siendo de gran importancia en mi vida, este logro también es para ustedes.*

*A mi compañera de proyecto, Gimena, más que eso, una amiga, que me toleró todos y cada uno de los días que estuvimos en la universidad. Gracias por nunca dejarme sola, comprenderme y apoyarme en este camino.*

*A mis mejores amigas Mile y Katterin, que más allá eso se han convertido en mis hermanas. Gracias por toda una vida de apoyo, consejos y amistad verdadera.*

*A mi mejor amigo Marlon, por su compañía, el tiempo y el cariño que dedicó en mí durante estos años. Gracias por hacerme fuerte y ayudarme a afrontar mis retos de tú mano.*

*A mis amigos, todos y cada uno de los que aportaron un granito para que en este momento este aquí. Gracias.*

*Astrid Xiomara Mogollón Sanabria*

## AGRADECIMIENTOS

Al Ph.D. Darío Yesid Peña, por darnos la oportunidad de trabajar con él, con el grupo de investigación en corrosión y por apoyarnos en la realización de este proyecto.

Al Mg. Ing. Anderson Sandoval por asesorarnos y acompañarnos en la realización del proyecto.

A nuestros amigos, Kelvin Roa, Cristian Páez y Edna Franco por hacer que la universidad se convirtiera en una experiencia única.

A todos nuestros profesores, por brindarnos todo su conocimiento, tanto de cada una de sus materias, como de la vida.

A los técnicos de planta de aceros, por su trabajo y ayuda constante, siempre dispuestos a ayudar con una sonrisa en el rostro.

Al laboratorio de Rayos-X del Parque Tecnológico Guatiguará adscrito a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión por sus servicios prestados de manera eficiente.

Al laboratorio de Microscopía del Parque Tecnológico Guatiguará adscrito a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión por sus servicios prestados de manera amable y eficiente.

Por último a todos los que de alguna forma hicieron parte del desarrollo de este proyecto.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	15
1. ANTECEDENTES.....	17
2. OBJETIVOS.....	21
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	21
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	22
3.1. PREPARACIÓN DE LAS SUPERFICIES DE LAS MUESTRAS. ....	22
3.2. PREPARACIÓN DE LA MEZCLA.....	22
3.3. MONTAJE Y APLICACIÓN DE LAS MEZCLAS.....	22
3.4. ENSAYOS DE ANÁLISIS.....	24
3.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS E INFORME FINAL.....	24
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	25
4.1 ANÁLISIS METALOGRAFICO.....	25
4.2 VELOCIDAD DE OXIDACIÓN.....	27
4.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE CORROSIÓN .....	30
4.3.1 Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS). ....	30
4.3.2 Difracción de rayos x.....	33
5. CONCLUSIONES.....	37
6. RECOMENDACIONES.....	38
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	39
APÉNDICES .....	41

## LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Montaje experimental de la aplicación de la mezcla de sales.....	23
Figura 2. Montaje experimental de las probetas al interior del horno.....	24
Figura 3. Micrografías ópticas del acero 316L en su estado inicial. 3a, 100 aumentos; 3b, 500 aumentos; 3c, 1000 aumentos. ....	25
Figura 4. Micrografías ópticas del acero 316L después de la exposición a 600°C por 600h a 100 aumentos. 4a, sin sal; 4b, con sal 1; 4c, con sal 2. ....	26
Figura 5. Micrografías ópticas del acero 316L después de la exposición a 600°C por 600h a 1000 aumentos. 5a, sin sal; 5b, con sal 1; 5c, con sal 2. ....	27
Figura 6. Ganancia de masa vs tiempo a 600 °C.....	29
Figura 7. Ganancia de masa vs tiempo, comparación de las sales a partir de 30h de exposición.....	29
Figura 8. Micrografías electrónicas del acero 316L después de la exposición a los diferentes ambientes. 8a, sin sal; 8b, con sal 1; 8c, con sal 2. Adaptado de Laboratorio de Microscopía, Universidad Industrial de Santander. Km 2, vía al Refugio, sede UIS-Guatiguará.....	31
Figura 9. Espesor de la capa superficial después de la exposición a los diferentes ambientes. 9a, sin sal; 9b, con sal 1; 9c, con sal 2. Adaptado de Laboratorio de Microscopía, Universidad Industrial de Santander. Km 2, vía al Refugio, sede UIS-Guatiguará. ....	31
Figura 10. Fotografía del aspecto de la superficie después de la exposición a los diferentes ambientes, vista sin ningún aumento. 6a, sin sal; 6b, con sal 1; 6c, con sal 2. ....	32
Figura 11. Espectro de composición tomada a distintas zonas de la superficie del acero 316L, sin sal. . Adaptado de Laboratorio de Microscopía, Universidad Industrial de Santander. Km 2, vía al Refugio, sede UIS-Guatiguará.....	32

Figura 12. Espectro de composición tomada a distintas zonas de la superficie del acero 316L, sal 1. . Adaptado de Laboratorio de Microscopía, Universidad Industrial de Santander. Km 2, vía al Refugio, sede UIS-Guatiguara.....	32
Figura 13. Espectro de composición tomada a distintas zonas de la superficie del acero 316L, sal 2. . Adaptado de Laboratorio de Microscopía, Universidad Industrial de Santander. Km 2, vía al Refugio, sede UIS-Guatiguara.....	33
Figura 14. Difractograma de productos de corrosión de probeta sin sal a 600°C.....	35
Figura 15. Difractograma de productos de corrosión de probeta sal 1 a 600°C. ....	35
Figura 16. Difractograma de productos de corrosión de probeta sal 2 a 600°C. ....	36

## LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1.Composición del acero 316L utilizado en este proyecto .....	17
Tabla 2. Compuestos detectados por difracción de rayos x después de la exposición en los diferentes tipos de ambiente .....	34

## LISTA DE APÉNDICES

	Pág
Apéndice A. Medidas de las probetas, l (largo), a (ancho), e (espesor), medido en centímetros. ....	41
Apéndice B. Promedios de ganancia de masa para cada hora de exposición. ....	44

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE CORROSIÓN DE UN ACERO AISI 316L EN SALES FUNDIDAS DE NITRATO MEDIANTE ENSAYOS GRAVIMÉTRICOS.\*

**AUTORES:** Jaimes Campos Angie Gimena, Mogollón Sanabria Astrid Xiomara.\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Acero inoxidable, sales fundidas, corrosión a altas temperaturas.

**DESCRIPCIÓN:** Con el reciente auge de las nuevas energías amigables con el medio ambiente, surge la demanda de materiales capaces de resistir a ciertas condiciones de trabajo que exigen estos procesos, por ejemplo, la obtención de energía a partir de luz solar, en la cual el almacenamiento térmico es vital en el transcurso del funcionamiento de la planta. El presente trabajo tiene como fin estudiar la reacción que presenta el acero AISI 316L, usualmente empleado como material de los tanques almacenadores de energía solar, ante el contacto con sales fundidas de nitratos ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  - $\text{NaNO}_3$  - $\text{KNO}_3$  y  $\text{LiNO}_3$ -  $\text{KNO}_3$ - $\text{NaNO}_3$ ); se realizaron pruebas gravimétricas, con dos tipos de sales ternarias de nitratos a una temperatura de  $600^\circ\text{C}$ , evaluando la ganancia de masa en el acero, a su vez se realizaron estudios microestructurales, con el fin de evaluar el daño de la estructura. Por medio de SEM-EDS y micrografías se observó el estado de la capa superficial y el espesor de daño que obtuvo el acero; la micrografía donde se evidenció la mayor agresividad de daño por parte de la sal ternaria en el acero, es la cual tiene el componente de litio, además con el EDS se obtuvieron los principales elementos de las capas, en los que resaltan el O, Fe, Cr, Ca y K. Los resultados de DRX arrojaron (compuestos) como principales productos de corrosión del acero, demostrando así que la sal fundida con el componente de calcio es menos dañina para el acero usado en este proyecto.

---

\*Proyecto de grado, Modalidad, proyecto de investigación.

\*\*Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Director: Ph.D. en corrosión, Darío Yesid Peña Ballesteros. Codirector: M. Ing. de materiales, Anderson Sandoval Amador

## ABSTRACT

**TITLE:** Corrosion Evaluation of a Stainless Steel (SS) AISI 316L in Nitrate Molten Salts by Gravimetric Techniques. \*

**AUTHORS:** Jaimes Campos Angie Gimena, Mogollón Sanabria Astrid Xiomara. \*\*

**KEYWORDS:** Stainless Steel (SS), molten salts, high temperature, corrosion, hot corrosion

**DESCRIPTION:** Recently, new energy-friendly environment techniques are being studied generating so the creation and improvement of materials able to withstand some specific working conditions, e.g., obtaining energy from sunlight, this is a situation where thermal storage is vital for the optimal operation of the plant. This research aims to study the SS 316L behavior, mainly used as the material for solar energy storage tanks, when it gets in contact with a nitrate molten salts like (Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> -NaNO<sub>3</sub> -KNO<sub>3</sub> y LiNO<sub>3</sub>- KNO<sub>3</sub>- NaNO<sub>3</sub>)

Gravimetric tests were developed with two different type of ternary nitrate salts at 600 Celsius, thus, evaluating the mass gain in steel; at the same time microstructural studies were applied in order to evaluate the damage of the structure. Through the SEM-EDS technique and analyzing the micrographics images gotten, it was possible to observe in detail the conditions and status of the surface layer and thickness of steel damage. The micrograph showing the most aggressive damage by the part of the ternary salt in the steel, which has the components of lithium, in addition to the ESD were obtained the main elements of the layers, in which they highlight the, O , Fe, Cr, Ca and K. The results of XRD yielded (compounds) as the main corrosion products of the steel, demonstrating that the salt with the calcium component is less harmful to the steel used in this project.

---

\*Bachelor Thesis. Modality, research project.

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science.  
Directors: Dario Yesid Peña Ballesteros, Ph.D in corrosion; Anderson Sandoval Amador, MEng of materials.

## INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de energía en el mundo ha abierto la puerta a nuevas opciones de obtención de esta, de manera que los recursos ambientales no se vean agotados. Las plantas solares, como receptores térmicos trabajados con sales fundidas, dan una alternativa a este problema. Para la utilización de sales fundidas es importante tener en cuenta el tipo de material del que están hechos los tanques de almacenamiento, estos materiales deben contar con excelentes propiedades, tales como una alta resistencia a la corrosión en presencia de la mezcla de sal y un buen comportamiento a altas temperaturas, debido a que las plantas se encuentran en condiciones de trabajo que, por lo general superan, los 550°C (Salbidegoitia, 2008), en la que la integridad del material común podría verse seriamente afectado.

La selección del material es un proceso importante con el que se garantiza la mitigación de los efectos negativos en este por los procesos que se llevan en las plantas, este proceso ha sido estudiado a lo largo de las últimas décadas, en donde se ha observado una buena respuesta por parte de los aceros inoxidable austeníticos de la serie 300, entre los que se destacan los aceros 304 y 316 debido a sus buenas propiedades como la resistencia a la corrosión a altas temperaturas.

Para este estudio en específico se trabajó con el acero AISI 316L, el cual es una variación del acero AISI 316, debido a su menor contenido de carbono presenta mayor resistencia a la corrosión, ya que, se disminuye la precipitación de carburos que se forman por el calor evitando que la planta presente daños por corrosión.

Por tal motivo el objetivo principal de este trabajo es evaluar el comportamiento del acero 316L en contacto con dos mezclas de sales de nitratos ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ - $\text{LiNO}_3$ - $\text{NaNO}_3$ - $\text{KNO}_3$ ), para esto se llevaron a cabo pruebas gravimétricas tras la exposición a alta temperatura; seguido a esto, se realizaron análisis mediante SEM, DRX y metalografía con el fin de evidenciar de manera clara el cambio que tuvo el acero.

## 1. ANTECEDENTES

Los aceros inoxidable son materiales que por sus propiedades tienen gran aplicación en industrias que involucran procesos con ambientes agresivos, por ejemplo, las industrias químicas, aeronáutica, recipientes con presiones altas, entre otros. Este tipo de aceros tienen una clasificación debido a su microestructura, en el que encontramos los aceros austeníticos, dichos aceros poseen como segundo componente principal el níquel, el cual hace que la austenita encontrada a altas temperaturas se mantenga a temperatura ambiente o menores a esta (Laufgang, 2003).

Entre los aceros inoxidable austeníticos encontramos el acero 316L, con la composición mostrada en la Tabla 1, su principal característica es el bajo porcentaje de carbono, el cual previene la sensitización (precipitación del Cr en los límites de grano), dicha característica se usa en aplicaciones donde el material está sometido a altas temperaturas (450°-650°C), donde ocurre el problema a estos rangos de temperatura, provocando a su vez corrosión del tipo intergranular (Medina Borja, 2014).

*Tabla 1.* Composición del acero 316L utilizado en este proyecto

%C	%Mn	%P	%Si	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%N	%Fe
0,012	0,78	0,035	0,49	0,003	16,0- 18,0	10,11	2,0- 3,0	0,1	BAL

Para entender el proceso de corrosión que se lleva en el metal, es importante tener en cuenta que es un cambio que se da cuando una sal se deposita sobre el material, ya que cuando los componentes de la sal alcanzan la temperatura de fusión, se produce un electrolito iónico estable a altas temperaturas, acelerando la corrosión, por medio de la acción fundente del electrolito sobre la capa de óxido protectora, generando un intercambio iónico entre el metal y la capa salina, denominado ataque acelerado.

Dependiendo de la temperatura de trabajo, aparecen los fenómenos de amenaza a la corrosión los cuales fueron catalogados como:

Corrosión en Caliente Tipo I: ocurre en un rango de temperatura entre 825-950°C, donde la capa salina se encuentra en estado completamente líquido, caracterizado por la oxidación de la aleación y la reducción de la sal, no tiene un comportamiento muy severo, debido a la formación de una barrera protectora.

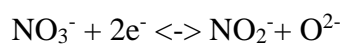
Corrosión en Caliente Tipo II: es un tipo de corrosión de ‘baja temperatura’, que ocurre en un rango de 500-800°C, caracterizado por el ataque localizado de los productos de la disolución de la sal y la capa corroída adyacente al metal base. (Jose Luddey Marulanda, Trisancho R, & Cañas, 2009; Rapp & Zhang, 1994)

Aunque los anteriores estudios muestran a la corrosión en caliente para aplicaciones de calderas, también sirve como referencia para la aplicación que se evaluará en este trabajo, el cual es la utilización del acero 316L como material base en tanques de almacenamiento de sales fundidas, para la obtención de energía solar; las sales fundidas de nitrato son usadas en el proceso debido a sus buenas propiedades de almacenamiento de calor latente, aumentando la eficiencia de la planta ya que pueden incluso trabajar sin la luz solar (Fallis, 2013). El estudio de sales se viene haciendo desde hace tiempo, teniendo como principal base la mezcla binaria de nitratos de sodio y potasio, aunque muy utilizada en la industria, puede ser modificada a mezclas ternarias con nitratos de calcio y litio para aumentar la productividad de la planta, debido a que los componentes de calcio y litio de la sal disminuye el punto de fusión y mejoran la estabilidad térmica de la sal binaria (Ushak & Grageda, 2015).

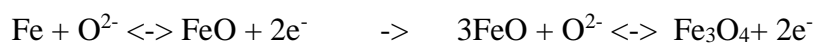
El estudio de la reacción entre el acero y la sal, se ha abordado con anterioridad, debido a que el control de la reacción previene algún tipo de falla por corrosión afectando la vida útil de la planta; en distintos trabajos se estudiaron aceros del tipo austeníticos (304, 316) diferentes al que se presenta, en mezclas de nitratos, tanto binarios como ternarios, en dichos estudios se predijo el comportamiento corrosivo, tanto por métodos gravimétricos como electroquímicos; todos ellos evaluaron los productos de la corrosión por medio de SEM-EDS y DRX en la capa formada después de la exposición a las sales, demostrando la viabilidad del uso de distintos aceros, para la implementación de las plantas, también que tan eficaces eran las sales para almacenar la energía. (Cheng, Chen, & Wang, 2015; Fernández, Galleguillos, Fuentealba, & Pérez, 2015; Goods & Bradshaw, 2003).

Al llevar las sales de nitratos ( $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{LiNO}_3$ ) a altas temperaturas se produce una descomposición de sus compuestos, es así como se generan reacciones propias de cada uno de estas sales, a continuación se presentan algunas de las principales reacciones presentadas en trabajos previos y cómo puede afectar estas descomposiciones a las reacciones propias del acero:

- El nitrato se descompone siguiendo la siguiente reacción:



- Cuando sucede la reacción, se promueve la aparición de la siguiente:



- La presencia de Ca y Li de las sales son formadas a partir de la reacción de la hematita con los óxidos de calcio y litio dando como resultado:  $\text{CaFe}_2\text{O}_4$  y  $\text{LiFe}_3\text{O}_3$ . (Cheng et al., 2015; Fernández, Cortes, Fuentealba, & Pérez, 2015)

Uno de los principales estudios que sirvió como base de esta investigación se elaboró en el 2013 Fernández (Fernandez Diaz, 2013), donde se expuso los diferentes tipos de aceros comúnmente utilizados en las plantas, destacando los aceros A1, T11 Y T22 , con las diferentes sales comerciales, incluyendo las dos sales que se usaron en el proyecto ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  - $\text{NaNO}_3$  - $\text{KNO}_3$  y  $\text{LiNO}_3$ -  $\text{KNO}_3$ -  $\text{NaNO}_3$ ) evaluando su comportamiento, mostrando las características de trabajo y la reacción con el material; en donde las sales mostraron el mejor comportamiento frente a la oxidación del metal expuesto, dando productos de corrosión característicos del proceso como los son la ferrita, hematita, óxidos de cromo y los productos de cada sal.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la oxidación de un acero AISI 316L, en presencia de sales fundidas de nitratos.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la velocidad de oxidación del acero AISI 316L en contacto con dos diferentes mezclas de sales obtenidas a partir de los nitratos,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{LiNO}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , mediante pruebas gravimétricas.
- Establecer el efecto del tipo de mezcla, en la corrosión del acero AISI 316 L en presencia de sales fundidas de nitratos sobre su superficie a  $600^\circ\text{C}$ .
- Caracterizar los productos de oxidación mediante técnicas DRX, SEM-EDS.

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología experimental que se utilizó para la elaboración del proyecto de investigación se presenta a continuación.

#### 3.1. PREPARACIÓN DE LAS SUPERFICIES DE LAS MUESTRAS.

La lámina de acero 316L se cortó en muestras de 20 mm x 20 mm x 2 mm, se desbastaron con papel de desbaste (número 60, 80, 120, 240, 400 y 600), para darle un acabado homogéneo a toda la superficie, posteriormente se llevaron a baño ultrasónico con etanol, por 10 minutos para eliminar impurezas.

#### 3.2 PREPARACIÓN DE LA MEZCLA

Para la preparación de los dos tipos de sales ternarias se tomaron en cuenta los porcentajes de un estudio previo realizado (Fernández Díaz, 2013) con composición para la primera sal  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$  (48 %, 7%, 45% respectivamente, en una concentración de 270 g/L), para la segunda sal  $\text{LiNO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$  (20%, 52%, 28% respectivamente, en una concentración de 130,5 g/L), se disolvieron las sales en 0,2L de agua destilada de igual proporción.

#### 3.3 MONTAJE Y APLICACIÓN DE LAS MEZCLAS

Con el fin de garantizar una capa de sal homogénea en las muestras se introdujeron dentro de recipientes Petri, seguido se aplicó la mezcla de sal de tal forma que cubriera completamente las probetas, se llevaron a una plancha a una temperatura de 200°C (La temperatura se garantizó situando un recipiente con aceite mineral sobre la plancha y sumergiendo un termómetro) entonces, al llegar al punto de evaporación de la sal se presenta una capa homogénea en las muestras, como se presenta en la Figura 1.

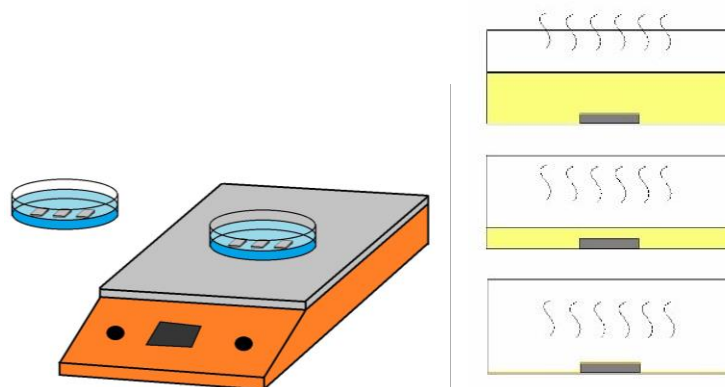
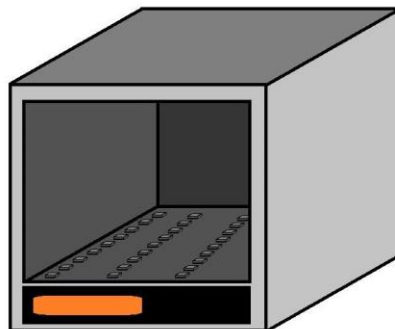


Figura 1. Montaje experimental de la aplicación de la mezcla de sales.

Para el inicio de la prueba se precalentó el horno a una temperatura de  $200^{\circ}\text{C}$ , ya que con esta se sumergirán las probetas en la mezcla de sal, con el fin de eliminar el agua libre, al realizar el proceso se obtiene sobre las probetas una capa fina y homogénea de sal, la cual se evidencia con la ganancia de peso, mostrado en el Apéndice B, donde se muestra el peso de la probeta con la sal antes de la exposición.

Por cada tiempo de exposición (1h, 3h, 10h, 30h, 100h, 150h, 300h, 450h, 600h) se utilizaron tres probetas dando un total de 27 probetas por experimento, la manera de ubicación en el horno se muestra en la Figura 2, las primeras horas de exposición se ubicaron en la parte frontal del horno y así sucesivamente, hasta que las probetas de 600h estuvieran al fondo; cabe recalcar que se realizó una prueba con el acero libre de sal, con el fin de tener una referencia del comportamiento del metal a la temperatura de exposición.



*Figura 2.* Montaje experimental de las probetas al interior del horno.

Al cumplirse el tiempo de exposición las probetas son retiradas del horno, pesadas y almacenadas individualmente.

### 3.4 ENSAYOS DE ANÁLISIS

Posterior a la elaboración de las pruebas gravimétricas, las probetas fueron evaluadas con pruebas de DRX, SEM-EDS y metalografía, con el fin de evaluar el cambio de la estructura del material y los productos de oxidación que se presentaron.

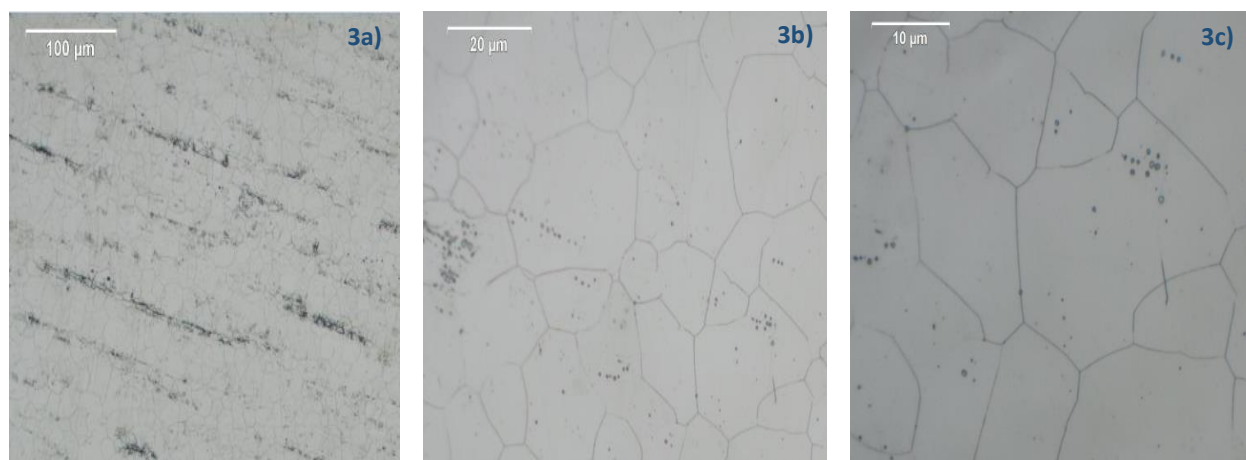
### 3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS E INFORME FINAL

Con los resultados obtenidos en las pruebas del numeral anterior, se evaluó el comportamiento del acero, a fin de dar respuesta a los objetivos planteados y poder realizar las conclusiones que son incluidas en el informe final junto a los análisis y todos los resultados de la prueba.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISIS METALOGRAFICO

Con el fin de observar posibles cambios en la estructura del material, se presentan a continuación las figuras de las metalografías realizadas al acero 316L, antes y después de la exposición a 600°C. La Figura 3a. muestra la estructura del acero 316L en estado inicial sin exposición, donde se observa granos de forma equiaxial y tamaño fino, N° 6, se determina mediante la norma de estimación de tamaño de grano E112 – 12 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size (ASTM Standard, 2012); las Figuras 3b y 3c muestran la microestructura a mayores aumentos, pudiéndose observar la matriz propia de este tipo de acero; austenítica de granos equiaxiales tal como se presenta según la literatura.

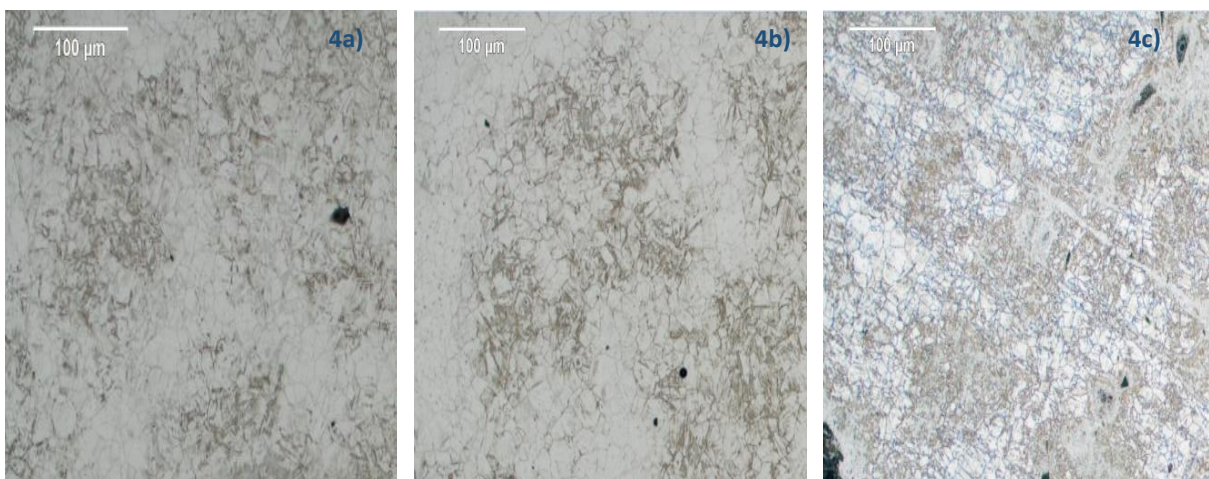


*Figura 3.* Micrografías ópticas del acero 316L en su estado inicial. 3a, 100 aumentos; 3b, 500 aumentos; 3c, 1000 aumentos.

Las Figuras 4(a, b, c) muestran la microestructura del acero después del tiempo de exposición de 600h a 600°C, con los diferentes tipos de ambientes (sólo oxidación, sal 1, sal 2, respectivamente), a 100 aumentos y en las Figuras 5(a, b, c) se presentan las microestructuras a 1000 aumentos. Aunque el cambio de la estructura no es muy evidente, en las Figuras 4(a, b,

c) las cuales son las requeridas para la determinar el tamaño de grano, se observó un cambio en el tamaño de grano, pasando de un N° 6 en la estructura sin exposición a un N° 6 <sup>1/2</sup>, aunque este cambio puede ser relativo, depende del lugar donde se toma la micrografía. En la microestructura de solo oxidación, Figura (4a) y en la sal 1, Figura (4b), además en la microestructura con la sal 2, Figura (4c), el tamaño de grano en un N° 7, después de la exposición, también se observa la aparición de maclas, evidenciando un alto grado de tensión dentro de la microestructura; como se puede observar los límites de grano tendieron a redondearse y a engrosar como se presentó en las probetas que contenían las mezclas de sal. En las Figuras 4b y 4c, se representa la microestructura de los aceros expuestos a los dos tipos de sales, también es posible evidenciar zonas de mayor daño por la sal, evidenciado por un cambio de color (oscuro).

*Figura 4.* Micrografías ópticas del acero 316L después de la exposición a 600°C por 600h a 100 aumentos. 4a, sin sal; 4b, con sal 1; 4c, con sal 2.



En la Figura 5a, se observa que tras la exposición del acero 316L a alta temperatura, la estructura en los límites de grano no evidencia engrosamiento, pero si, la presencia de maclas al igual que los otros dos ambientes; a diferencia de la exposición con la sal 1 ya que como es posible ver en la Figura 5b, algunos de sus límites de grano se engrosaron y redondearon

por la oxidación que se presentó y a su vez en ellos se presentan pequeños puntos, los cuales pueden ser catalogados como inicio de porosidades. El daño más grave lo sufrieron las probetas sometidas a la sal 2, Figura 5c, ya que se puede ver una corrosión avanzada en la mayoría de la superficie, dejando zonas donde no existen límites granos y otras más atacadas donde se presenta poros, indicando una pérdida del material base.

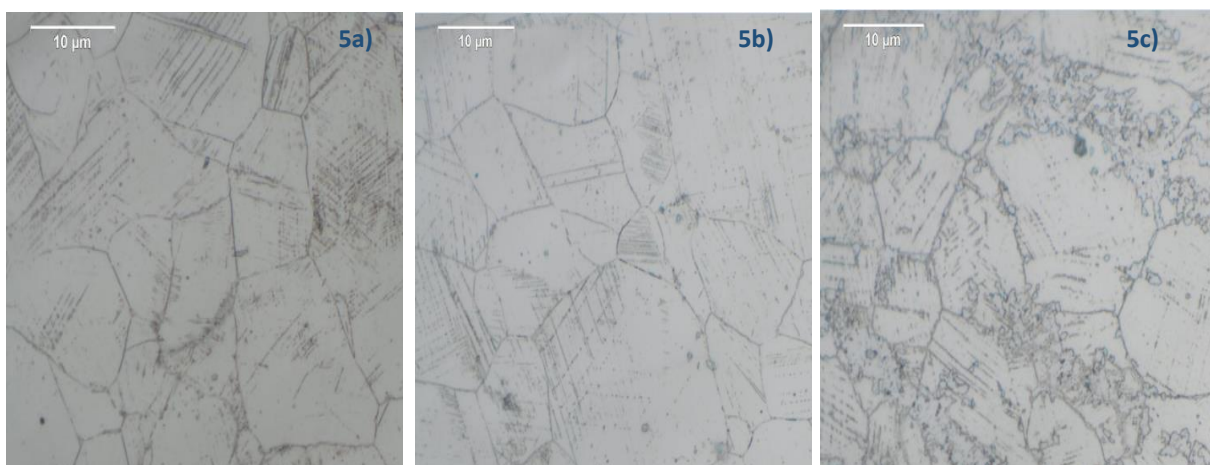


Figura 5. Micrografías ópticas del acero 316L después de la exposición a 600°C por 600h a 1000 aumentos. 5a, sin sal; 5b, con sal 1; 5c, con sal 2.

#### 4.2 VELOCIDAD DE OXIDACIÓN

La velocidad con la que se oxida el metal del proyecto se calculó mediante la ganancia de peso del material por unidad de área ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ), los datos que se utilizaron para el cálculo de ganancia de masa se encuentran en el APÉNDICE A.

Las Figura 6 muestra la ganancia de masa a lo largo del tiempo de exposición, el cual es de 600h de trabajo, cada una de ellas se realizaron con los datos obtenidos experimentalmente, los cuales se presentan en el APÉNDICE B; como se evidencia en la curva azul, la velocidad de oxidación del material en la temperatura de trabajo es acelerada en las primeras horas de exposición, alcanzando la mayor velocidad a las 30h de trabajo, donde se tiene una ganancia

de  $2,0596 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2$ , a partir de este punto el acero empieza a estabilizarse, indicando que se ha formado una capa protectora, que según la composición del acero es rica en cromo (José Luddey Marulanda, Castañeda, & Perez, 2013), la cual evita que siga ocurriendo la oxidación en la superficie del material.

El comportamiento de las curvas verde y morada, muestra una zona inicial de exposición con una velocidad de oxidación mayor a la del acero, esto se debe a que en ese intervalo de tiempo, la sal fundida se empieza a descomponer térmicamente (Fernandez Diaz, 2013), este comportamiento se encuentra encerrado en la zona roja de la Figura 6, caracterizado por la pérdida de peso en la probeta por parte de la sal. Después de las 30h de exposición se tiene en cuenta la ganancia de masa del acero, se presenta una pendiente en ambas curvas lo que evidencia que hubo una reacción con la sal; aunque en presencia de la sal 1 la ganancia de masa es mayor que la sal 2, como se evidencia en la Figura 7.

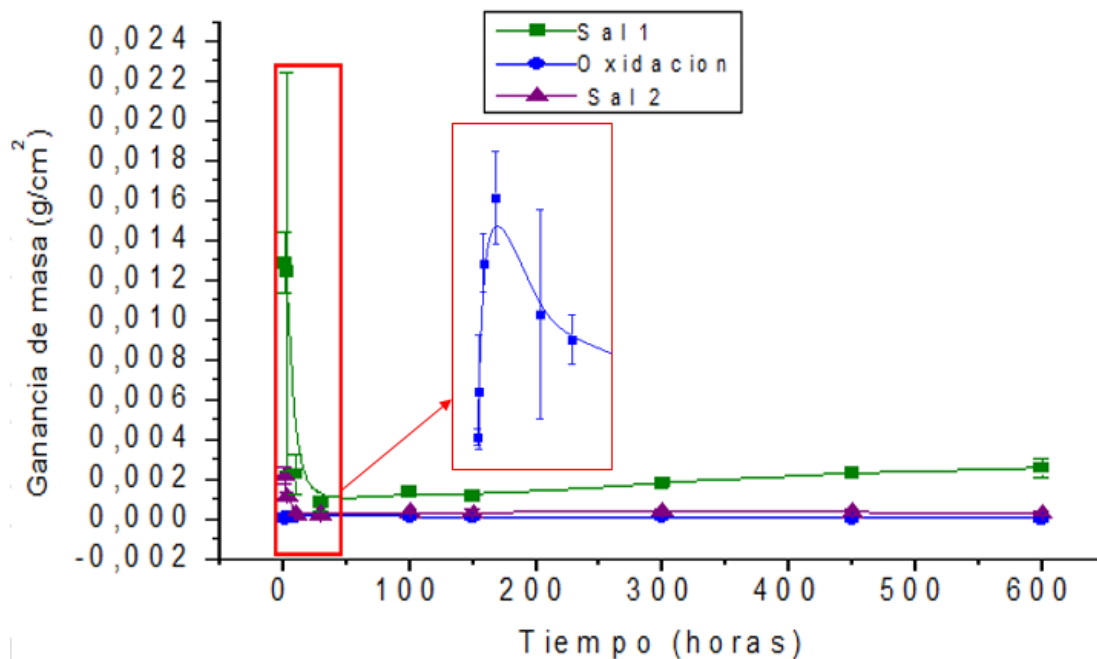


Figura 6. Ganancia de masa vs tiempo a 600 °C.

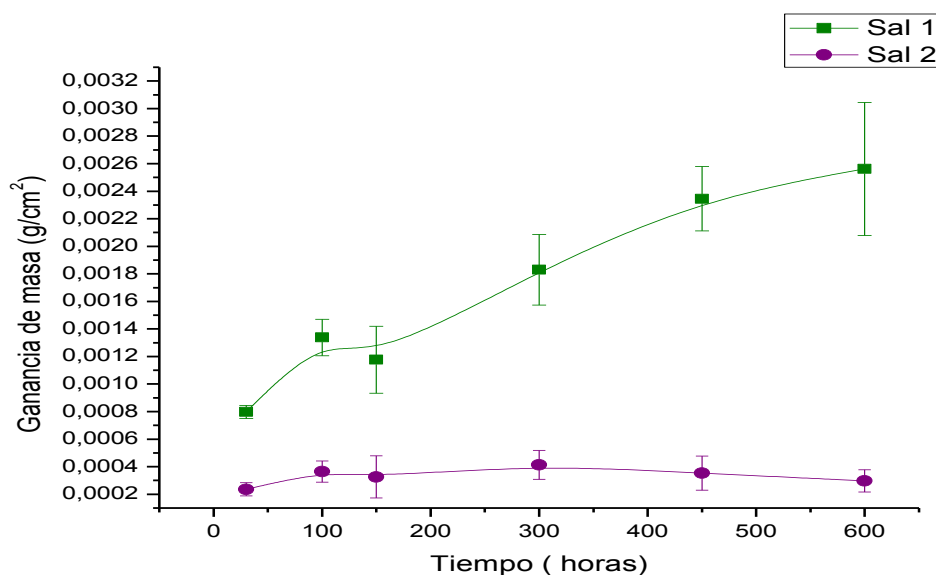


Figura 7. Ganancia de masa vs tiempo, comparación de las sales a partir de 30h de exposición.

La figura anterior evidencia el comportamiento parabólico que toman las curvas de ganancia de masa con respecto al tiempo, frente a la exposición de las sales; en el cual el valor mayor presentado en la sal de calcio es de  $2,561 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2$  a las 600h de exposición, indicando que esta sal podría seguir reaccionando, en cambio la sal de litio presenta su máximo valor

las 300h de exposición, es de  $4,131 \times 10^{-4} g/cm^2$  y a partir de ahí empieza a disminuir, esto se debe a que la capa de óxido formada sobre el acero se desprende con gran facilidad.

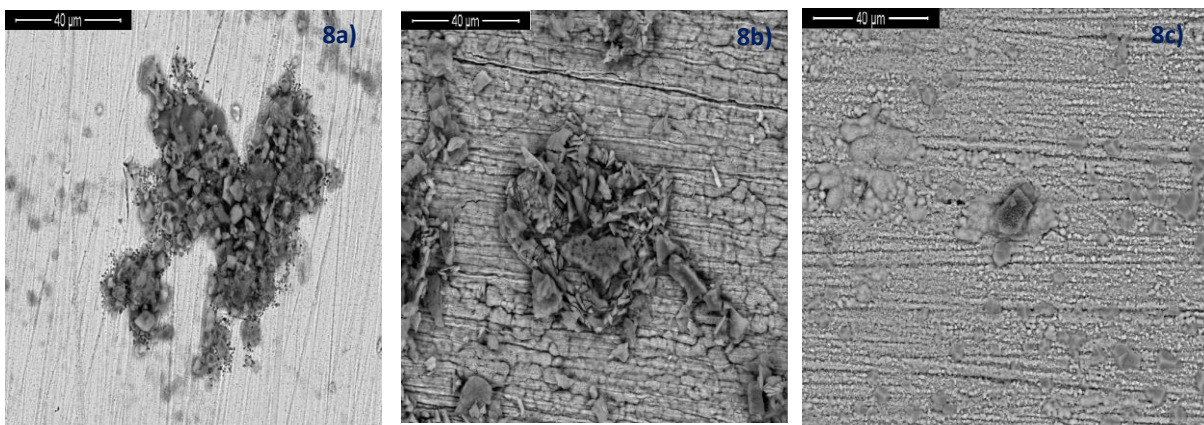
### 4.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE OXIDACIÓN

4.3.1 Microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS). La Figura 8 muestra el estado superficial del acero 316L después de la exposición a los distintos ambientes, se observa que en la superficie sin sal (8a), hay una zona con aglomeración de óxido; a su vez las superficies expuestas al contacto con la sal tiene zonas de acumulación de los productos de la reacción entre el acero y la mezcla de sal, demostrando que la capa salina después del ensayo no es homogénea en toda la superficie.

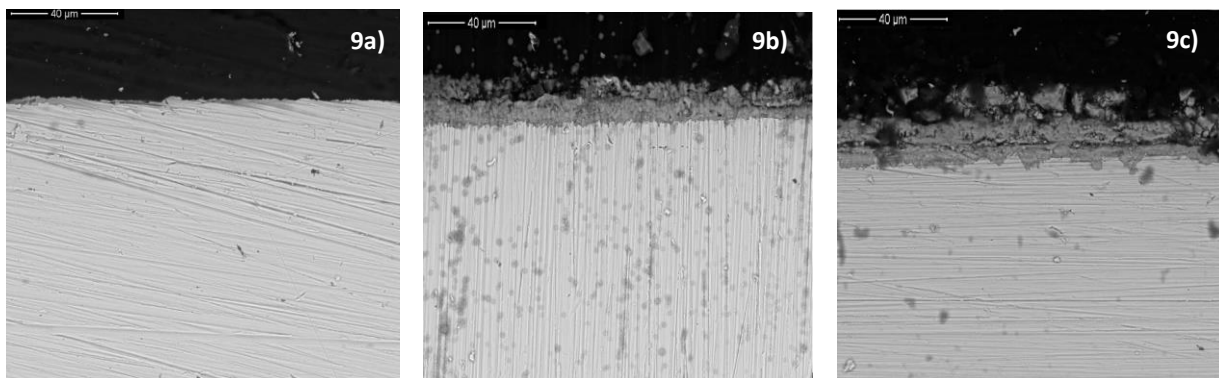
Como se ve en la Figura 9, el espesor de las capas de daño sobre cada una de las superficies es diferente para cada ambiente, la homogeneidad de las capas de daño en 9a y 9b es mayor que la vista en 9c; se debe a la adherencia tanto del óxido como de la sal fundida al acero, ya que se evidenció, como se presenta en la Figura 10, que la sal 1 se desprendía con facilidad en forma de polvo, pero el óxido permanecía en la superficie y la sal 2 se desprende de la superficie retirando también el óxido. Los espesores promedios de las capas son respectivamente: 9a) No se genera un espesor perceptible para tomar medida; 9b)  $12,081 \mu m$ ; 9c)  $7,98 \mu m$ , aunque los datos oscilan entre  $3,65-9,18 \mu m$ .

Los resultados del SEM-EDS de cada una de las superficies después de la exposición se muestra en las Figuras 11, 12 y 13; se observa los principales elementos detectados en cada una de las zonas, donde se destacan el O y el Fe en el cupón sin sal; Ca, Fe, O, Mn y Cr entre otros en el cupón con la sal 1; K, Na, Si, O y Fe en el cupón con la sal 2. Se presentaron picos

significativos en los ensayos de oxidación y sal 2, se pudo deber a una contaminación del horno de trabajo.



*Figura 8.* Micrografías electrónicas del acero 316L después de la exposición a los diferentes ambientes. 8a, sin sal; 8b, con sal 1; 8c, con sal 2. Adaptado de Laboratorio de Microscopía, Universidad Industrial de Santander. Km 2, vía al Refugio, sede UIS-Guatiguará.



*Figura 9.* Espesor de la capa superficial después de la exposición a los diferentes ambientes. 9a, sin sal; 9b, con sal 1; 9c, con sal 2. Adaptado de Laboratorio de Microscopía, Universidad Industrial de Santander. Km 2, vía al Refugio, sede UIS-Guatiguará.

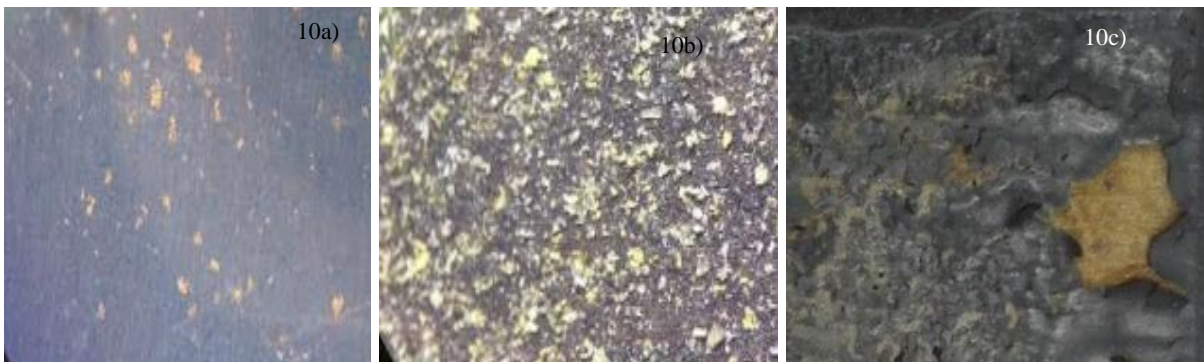


Figura 10. Fotografía del aspecto de la superficie después de la exposición a los diferentes ambientes, vista sin ningún aumento. 6a, sin sal; 6b, con sal 1; 6c, con sal 2.

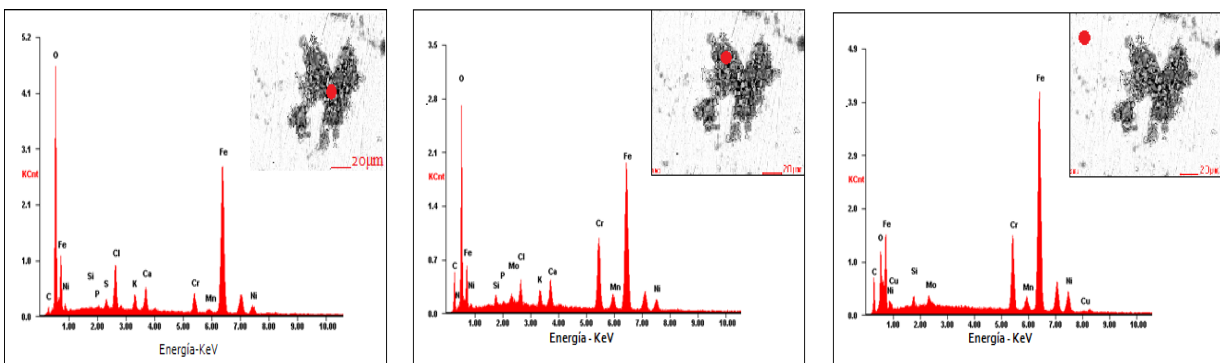


Figura 11. Espectro de composición tomada a distintas zonas de la superficie del acero 316L, sin sal. . Adaptado de Laboratorio de Microscopía, Universidad Industrial de Santander. Km 2, vía al Refugio, sede UIS-Guatiguara.

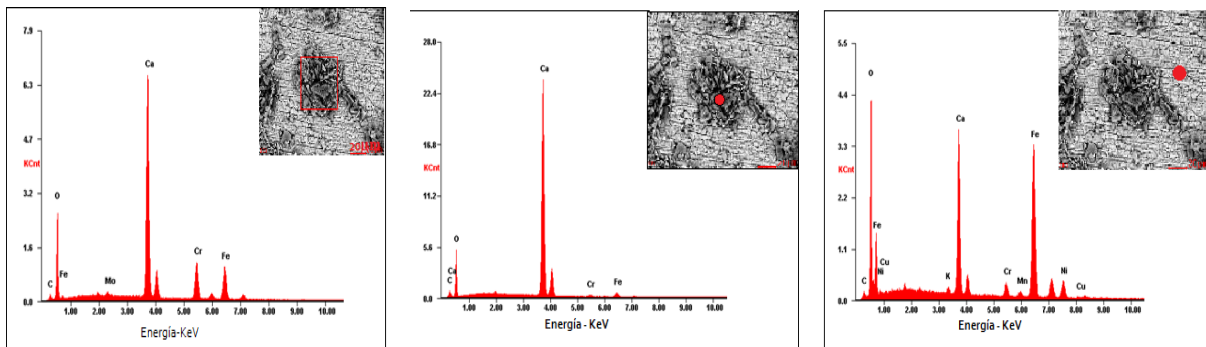


Figura 12. Espectro de composición tomada a distintas zonas de la superficie del acero 316L, sal 1. . Adaptado de Laboratorio de Microscopía, Universidad Industrial de Santander. Km 2, vía al Refugio, sede UIS-Guatiguara.

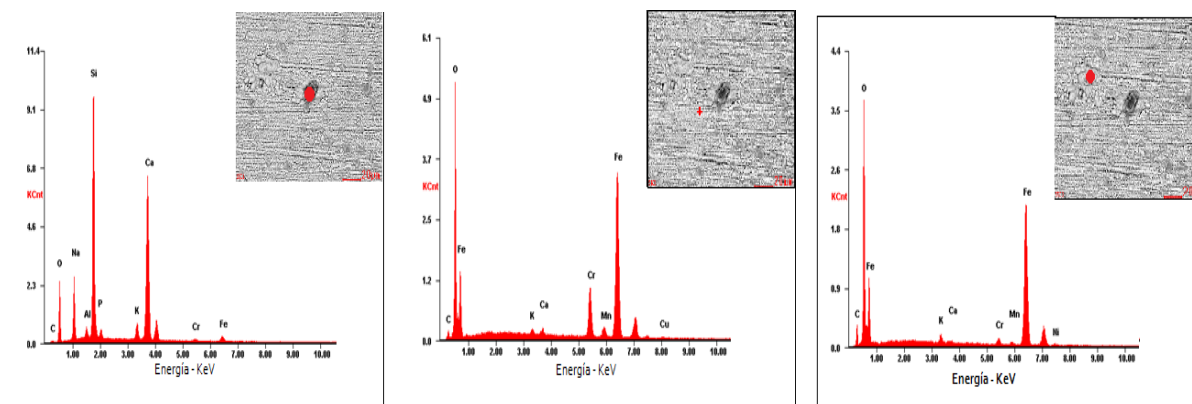


Figura 13. Espectro de composición tomada a distintas zonas de la superficie del acero 316L, sal 2. . Adaptado de Laboratorio de Microscopía, Universidad Industrial de Santander. Km 2, vía al Refugio, sede UIS-Guatiguara.

4.3.2 Difracción de rayos x. Se realizaron pruebas de difracción de rayos x con el fin de detectar las fases cristalinas formadas después de la exposición en los tres ambientes de trabajo, en el acero 316L. Los análisis cualitativos de las fases presentes en el acero a estudiar se realizaron mediante la comparación de los perfiles observados con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD).

La Tabla 2 muestra los compuestos detectados, tras 600 horas de exposición a 600°C del acero 316L, sin sal, con la sal 1 y con la sal 2. Se pueden apreciar elementos comunes en las tres muestras tales como  $\alpha$ -Hierro, níquel cromo y níquel hierro, propios de la composición del acero, aunque la intensidad de estos disminuye en los ambientes con las sales, estos componentes forman una capa protectora sobre la superficie del material haciendo que la velocidad de oxidación ante la exposición a alta temperatura sea menos severa comparada con un acero común.

Tabla 2. Compuestos detectados por difracción de rayos x después de la exposición en los diferentes tipos de ambiente.

<b>FASE CRISTALINA</b>		
<b>SIN SAL</b>	<b>SAL 1</b>	<b>SAL 2</b>
Fe $\alpha$ -Hierro	Ca ( O H ) <sub>2</sub> Portlandita	Fe $\alpha$ -Hierro
Cr Cromo	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Hematita	Cr Ni Níquel Cromo
Fe <sub>0.612</sub> Ni <sub>0.388</sub> Níquel Hierro	Fe $\alpha$ -Hierro	Fe <sub>0.612</sub> Ni <sub>0.388</sub> Níquel Hierro
Cr Ni Níquel Cromo	Fe <sub>0.612</sub> Ni <sub>0.388</sub> Níquel Hierro	Li <sub>0.5</sub> Fe <sub>1.5</sub> Fe O <sub>4</sub> Óxido de litio y hierro
Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> Carburo de Cromo	Cr Ni Níquel Cromo	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Magnetita
	Ca <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>5</sub> Óxido de calcio y hierro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> $\alpha$ -Hematita
	Ca Cr O <sub>4</sub> Cromatita	
	Ca O Óxido de calcio	
	Na ( N O <sub>2</sub> ) Nitrito de sodio	

La Figura 14 muestra el difractograma del acero expuesto al ambiente solo oxidante, se puede observar que el pico principal corresponde al carburo de cromo, junto al cromo y al níquel hierro; es de recordar que los carburos de cromo son en su mayoría responsables de la sensitización, ya que éstos se forman en los límites de grano, y si el acero está en un ambiente altamente oxidante, fallará en la zonas aledañas al límite (Vasquez, 1996).

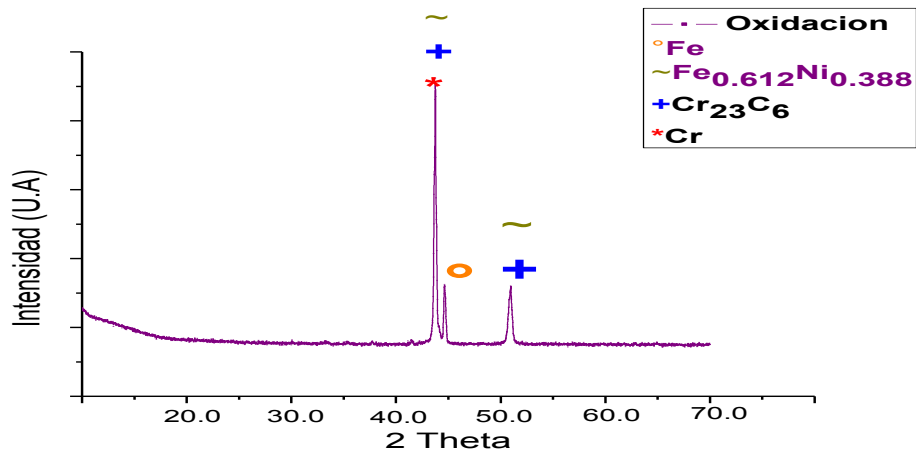


Figura 14. Diffractograma de productos de corrosión de probeta sin sal a 600°C.

En la Figura 15 se observa el diffractograma de la muestra sometida a la sal 1, se pueden apreciar picos significativos correspondientes a la aglomeración de  $\text{CaCrO}_4$ ,  $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , siendo el cromato de calcio el de mayor proporción, con esto es evidente que hubo una reacción entre el acero y la sal, a su vez al observar compuestos como  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{Na}(\text{NO}_2)$ , se puede inferir que la sal reaccionó con la atmósfera y se descompuso.

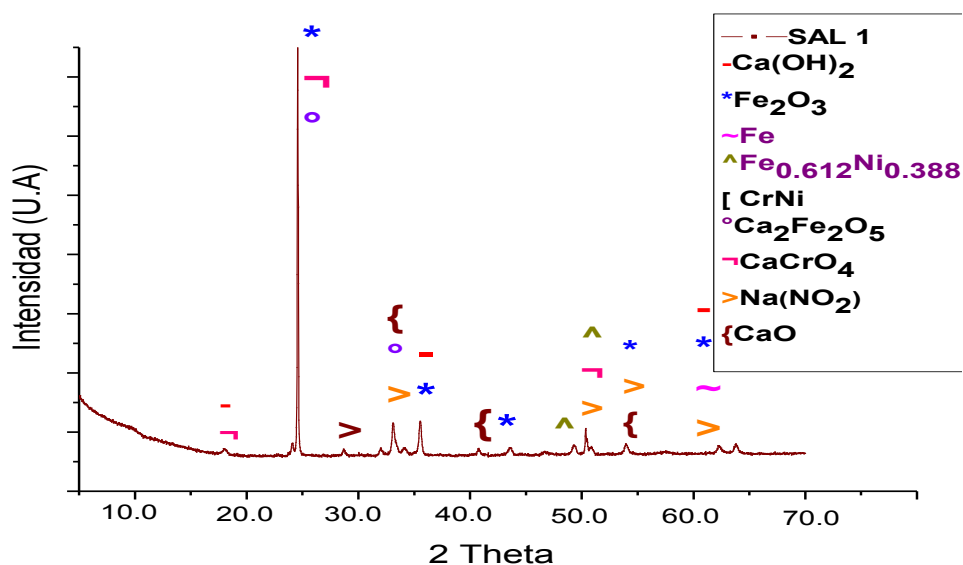


Figura 15. Diffractograma de productos de corrosión de probeta sal 1 a 600°C.

El diffractograma que se presenta en la Figura 16 corresponde a la muestra expuesta a la sal 2, en el cual se pueden observar picos significativos correspondientes a  $\text{Li}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{FeO}_4$ , como un

compuesto de la sal que se presenta al desprenderse el hierro proveniente del acero; las capas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  son detectadas con mayor intensidad en este ambiente, por lo que hay una mayor degradación de la superficie bajo estas condiciones.

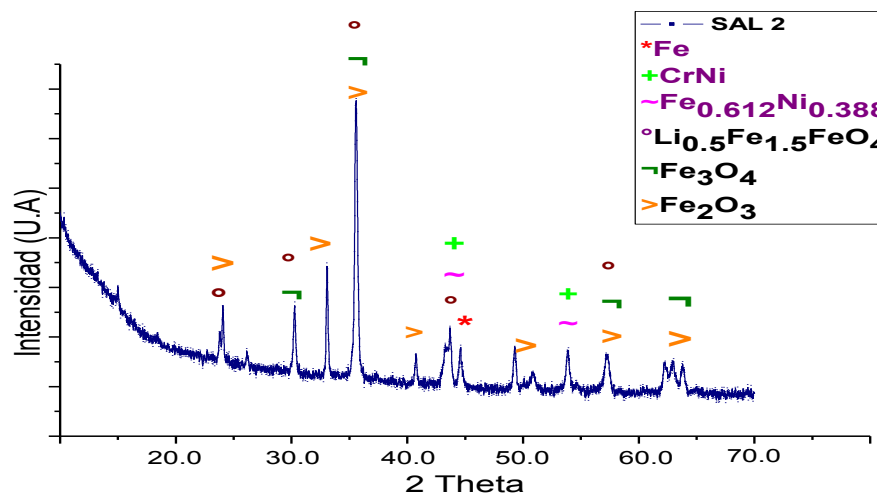


Figura 16. Difractograma de productos de corrosión de probeta sal 2 a 600°C.

## 5. CONCLUSIONES

- Mediante el método gravimétrico se determinaron los valores de ganancia de masa, con los cuales se evaluó el comportamiento del acero AISI 316L en presencia de las mezclas de sales fundidas de nitratos de  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{LiNO}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ .
- Las gráficas de ganancia de masa vs el tiempo de exposición, del acero AISI 316L, tienen un comportamiento parabólico, en las sales se presenta después de las 30h de exposición, el cual es característico de los óxidos formados para proteger la aleación, disminuyendo la oxidación acelerada frente a la mezcla de sales.
- La influencia del tipo de sal sobre el acero es evidente, debido a que la sal 1 más oxidante de la sal 2; la pendiente en la gráfica de la sal 1 de ganancia de masa es mayor, e inclusive a 600 horas de tiempo de exposición, no se evidencia una estabilización en su crecimiento. En cuanto a la sal 2 la ganancia de masa después de las 300h empieza a disminuir, mostrando una pérdida del peso del acero por la oxidación.
- La homogeneidad de la capa de oxidación se ve afectada con la presencia de las sales; se afecta mayormente cuando está en contacto con la sal fundida que contiene litio, ya que después de retiradas del horno a los mayores tiempos de exposición, la capa se desprende por lo que el proceso de oxidación del acero se incrementa ostensiblemente.
- La reacción de la sal 2 con el metal base es más severa que la sal 1, lo cual se evidencia en los productos que se detectaron mediante DRX, donde se detectaron productos de oxidación del material base, el cual se desprende de la superficie junto con la sal.

## 6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que el horno a usar cuente con una atmósfera protectora, con el fin de evitar que la mezcla de sales fundidas de nitratos de  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{LiNO}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  se vea afectada por la atmósfera oxidante que se presenta en el horno, generando productos ajenos a los esperados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASTM Standard. E112-12:Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, E112-12 ASTM International § (2012). <https://doi.org/10.1520/E0112-12.1.4>
2. Cheng, W. J., Chen, D. J., & Wang, C. J. (2015). High-temperature corrosion of Cr-Mo steel in molten LiNO<sub>3</sub>-NaNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub> eutectic salt for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 132, 563–569. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.10.007>
3. Fallis, A. . (2013). *Molten salts chemistry from lab to applications*. *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
4. Fernández, A. G., Cortes, M., Fuentealba, E., & Pérez, F. J. (2015). Corrosion properties of a ternary nitrate/nitrite molten salt inconcentrated solar technology. *Renewable Energy*, 80, 177–183. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.072>
5. Fernández, A. G., Galleguillos, H., Fuentealba, E., & Pérez, F. J. (2015). Corrosion of stainless steels and low-Cr steel in molten Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-NaNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub> eutectic salt for direct energy storage in CSP plants. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 141, 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.05.004>
6. Fernandez Diaz, A. G. (2013). *Estudios fisico-quimicos y de corrosion a elevada temperatura para el diseño de nuevos fluidos almacenadores de energia en centrales solares de concentracion*. UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID.
7. Goods, S. H., & Bradshaw, R. W. (2003). Corrosion of Stainless Steels and Carbon Steel by Molten Mixtures of Commercial Nitrate Salts. *ASM International*, 13, 78–87. <https://doi.org/10.1361/10599490417542>
8. Laufgang, S. G. (2003). Aceros inoxidables. Retrieved March 2, 2017, from

[http://materias.fi.uba.ar/6713/ACEROS\\_INOXIDABLES.pdf](http://materias.fi.uba.ar/6713/ACEROS_INOXIDABLES.pdf)

9. Marulanda, J. L., Castañeda, S. I., & Perez, F. J. (2013). Estudio de microestructura y composición de la oxidación en vapor a 700 y 750°C de los aceros austeníticos AISI 304, 316 y 317. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, N. °67, 98–111.
10. Marulanda, J. L., Trisancho R, J. L., & Cañas, A. (2009). Protección contra la corrosión en sales fundidas de un acero hot rolled, en el rango de temperaturas de 400°-600°C, recubierto por rociado térmico con acero inoxidable 312. *DYNA*, 76, 229–235.
11. Medina Borja, J. (2014). *Proyecto de investigación fin de carrera análisis de aceros inoxidables austeníticos*. ESCUELA UNIVERSITARIA INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL ZARAGOZA. Retrieved from <http://zaguan.unizar.es/record/15908/files/TAZ-PFC-2014-366.pdf>
12. Rapp, R. A., & Zhang, Y. S. (1994). Hot corrosion of materials: Fundamental studies. *Jom*, 46(12), 47–55. <https://doi.org/10.1007/BF03222665>
13. Salbidegoitia, I. B. (2008). Energía Solar. *Solar Energy*., 83(9), 561–566. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=35598474&lang=es&site=ehost-live>
14. Ushak, S., & Grageda, M. (2015). *Using molten salts and other liquid sensible storage media in thermal energy storage (TES) systems*. *Advances in Thermal Energy Storage Systems - Methods and Applications*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1533/9781782420965.1.49>
15. Vasquez, J. P. (1996). *Estudio de la precipitación de carburos en el acero inoxidable 304 en enfriamiento continuo*. Universidad Autonoma de Nuevo Leon.

## APÉNDICES

Apéndice A. Medidas de las probetas, l (largo), a (ancho), e (espesor), medido en centímetros.

OXIDACIÓN SIN SAL					
N°	Tiempo (h)	l (cm)	a (cm)	e (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )
1	1	2,094	2,054	0,282	10,941624
2	1	1,92	1,873	0,292	9,407432
3	1	2,018	2,014	0,284	10,41868
4	3	1,955	1,858	0,291	9,483946
5	3	1,894	1,79	0,291	8,924608
6	3	2,104	2,061	0,288	11,071728
7	10	2,004	1,731	0,292	9,119088
8	10	2,072	2,038	0,281	10,755292
9	10	1,967	1,814	0,284	9,283884
10	30	1,883	1,851	0,29	9,136586
11	30	1,999	1,988	0,29	10,260484
12	30	2,059	2,011	0,278	10,544218
13	100	2,14	2,015	0,291	11,04241
14	100	1,919	1,733	0,289	8,76211
15	100	1,94	1,875	0,29	9,4877
16	150	1,867	1,778	0,291	8,760442
17	150	1,926	1,878	0,291	9,447984
18	150	1,892	1,873	0,291	9,278662
19	300	1,836	1,807	0,288	8,733672
20	300	1,961	1,779	0,287	9,123998
21	300	2,125	1,9	0,292	10,4256
22	450	1,991	1,966	0,288	10,107844
23	450	1,842	1,779	0,291	8,661258
24	450	1,954	1,768	0,277	8,971332
25	600	1,951	1,871	0,285	9,479182
26	600	2,035	1,819	0,29	9,63865
27	600	2,059	2,01	0,291	10,645338

SAL Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , NaNO <sub>3</sub> , KNO <sub>3</sub>					
Nº	Tiempo (h)	l (cm)	a (cm)	e (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )
1	1	2,05	2,026	0,285	10,60681
2	1	2,147	1,714	0,285	9,560686
3	1	1,827	1,826	0,287	8,769026
4	3	2,117	2,007	0,289	10,88131
5	3	1,989	1,797	0,285	9,306486
6	3	1,927	1,867	0,293	9,418702
7	10	2,065	2,025	0,291	10,74363
8	10	2,119	2,005	0,284	10,839622
9	10	2,102	1,996	0,284	10,718848
10	30	1,985	1,945	0,293	10,02463
11	30	2,032	1,975	0,288	10,334432
12	30	2,018	1,695	0,282	8,935152
13	100	2,037	1,925	0,292	10,156258
14	100	2,033	1,77	0,29	9,40256
15	100	2,007	1,815	0,29	9,50217
16	150	1,962	1,818	0,291	9,333792
17	150	1,973	1,832	0,285	9,397922
18	150	2,048	1,656	0,293	8,95352
19	300	1,953	1,777	0,267	8,932782
20	300	2,085	1,725	0,284	9,35733
21	300	2,002	1,848	0,292	9,647792
22	450	2,018	1,928	0,277	9,967492
23	450	1,96	1,832	0,285	9,34288
24	450	1,911	1,685	0,278	8,439446
25	600	2,081	1,822	0,276	9,73762
26	600	1,956	1,917	0,275	9,629454
27	600	1,985	1,945	0,293	10,02463

SAL LiNO <sub>3</sub> , KNO <sub>3</sub> , NaNO <sub>3</sub>					
N°	Tiempo (h)	l (cm)	a (cm)	e (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )
1	1	1,905	1,645	0,289	8,31935
2	1	2,189	1,978	0,289	11,06821
3	1	1,95	1,885	0,29	9,5758
4	3	2,145	1,985	0,29	10,91105
5	3	1,986	1,946	0,287	9,98648
6	3	2,035	1,98	0,29	10,3873
7	10	2,112	2,025	0,285	10,91169
8	10	2,078	1,778	0,28	9,548728
9	10	2,085	2,045	0,295	10,96435
10	30	2,045	2,025	0,287	10,61843
11	30	2,19	2,095	0,29	11,6614
12	30	2,175	2,095	0,291	11,59839
13	100	2,145	1,967	0,295	10,86451
14	100	2,085	1,924	0,299	10,420462
15	100	2,046	2,056	0,289	10,784108
16	150	2,089	2,036	0,281	10,824658
17	150	2,095	1,859	0,286	10,050898
18	150	1,995	1,835	0,29	9,54305
19	300	2,078	1,967	0,296	10,569492
20	300	2,085	2,025	0,285	10,78695
21	300	1,985	2,023	0,299	10,428094
22	450	2,089	2,015	0,295	10,84003
23	450	2,056	1,867	0,29	9,952444
24	450	2,045	1,679	0,286	8,997238
25	600	2,041	2,023	0,289	10,606878
26	600	1,945	1,812	0,29	9,22774
27	600	2,089	2,068	0,286	11,017908

Apéndice B. Promedios de ganancia de masa para cada hora de exposición.

OXIDACIÓN SIN SAL						
Hora	Cupón	Peso inicial (g)	Peso Final (g)*	Ganancia de masa (g/cm <sup>2</sup> )	Promedio	Desviación
1	1	7,3342	7,3346	3,351E-05	2,6789E-05	6,2123E-06
	2	7,9114	7,9116	2,126E-05		
	3	8,1421	8,1424	2,560E-05		
3	4	9,2593	9,2594	1,406E-05	6,0214E-05	4,3077E-05
	5	8,2162	8,2168	6,723E-05		
	6	8,8981	8,8992	9,935E-05		
10	7	8,2361	8,2375	1,535E-04	0,00015647	2,1728E-05
	8	7,7993	7,8008	1,364E-04		
	9	9,4808	9,4824	1,795E-04		
30	10	7,9269	7,9291	2,371E-04	0,00020596	3,4478E-05
	11	9,2224	9,2241	1,689E-04		
	12	7,8416	7,8438	2,118E-04		
100	13	7,8772	7,8795	2,083E-04	0,00011812	7,8095E-05
	14	8,8222	8,8228	7,228E-05		
	15	8,9791	8,9798	7,378E-05		
150	16	9,6028	9,6039	1,180E-04	9,9897E-05	1,8414E-05
	17	7,3579	7,3586	8,115E-05		
	18	8,2810	8,2819	1,006E-04		
300	19	7,7255	7,7263	9,160E-05	7,3007E-05	1,8623E-05
	20	8,2417	8,2424	7,307E-05		
	21	8,0802	8,0808	5,435E-05		
450	22	7,4807	7,4813	5,276E-05	4,9967E-05	3,3262E-05
	23	7,9529	7,9530	1,539E-05		
	24	9,2594	9,2602	8,174E-05		
600	25	8,8594	8,8598	4,220E-05	4,9164E-05	3,2463E-05
	26	7,4901	7,4903	2,075E-05		
	27	9,1126	9,1135	8,454E-05		

\* Peso de la probeta tomado después de ser expuestos a las condiciones del ensayo (600°C a distintos tiempos).

SAL Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> , NaNO <sub>3</sub> , KNO <sub>3</sub>							
Hora	Cupón	Peso inicial (g)	Peso con sal(g)*	Peso Final (g)	Ganancia de masa (g/cm <sup>2</sup> )	Promedio	Desviación
1	1	8,7022	9,0072	8,8475	0,013699	0,01286081	0,00150576
	2	6,7758	7,0098	6,9074	0,013761		
	3	6,9311	7,0652	7,0286	0,011122		
3	4	9,0043	9,2726	9,1077	0,009503	0,01241671	0,010031
	5	7,2188	7,5584	7,4383	0,023582		
	6	7,7910	7,9388	7,8302	0,004165		
10	7	8,9665	9,2587	8,9817	0,001409	0,00224407	0,00099353
	8	9,4597	9,7352	9,4959	0,003343		
	9	8,8518	9,1329	8,8730	0,001981		
30	10	8,4047	8,6094	8,4164	0,001170	0,00079802	0,00037074
	11	8,9317	9,0242	8,9361	0,000429		
	12	7,8383	7,9249	7,8454	0,000795		
100	13	8,0023	8,1538	8,0159	0,001336	0,00133792	0,00013226
	14	7,9312	8,0981	7,9450	0,001471		
	15	8,0950	8,2106	8,1064	0,001207		
150	16	7,4220	7,5759	7,4321	0,001075	0,00117688	0,00024298
	17	7,8140	7,9905	7,8276	0,001454		
	18	7,4293	7,6273	7,4382	0,001001		
300	19	6,7882	6,9714	6,8020	0,001545	0,00182992	0,00025625
	20	7,5876	7,8260	7,6067	0,002041		
	21	7,9824	8,1189	8,0007	0,001904		
450	22	8,5971	8,8457	8,6182	0,002114	0,00234558	0,00023281
	23	8,0077	8,4138	8,0296	0,002344		
	24	7,2707	7,4416	7,2924	0,002579		
600	25	8,0710	8,2387	8,0918	0,002136	0,00256147	0,0004838
	26	8,1628	8,4110	8,1926	0,003088		
	27	8,0256	8,3136	8,0502	0,002461		

\*\* El peso con sal se refiere al peso tomada después de aplicada la sal antes de que este sea llevado a la exposición del horno, se toma con el fin de controlar la capa de sal que tendrá cada una de las probetas.

SAL LiNO <sub>3</sub> , KNO <sub>3</sub> , NaNO <sub>3</sub>							
Hora	Cupón	Peso inicial (g)	Peso con sal(g)	Peso Final (g)	Ganancia de masa (g/cm <sup>2</sup> )	Promedio	Desviación
1	1	7,1382	7,2196	7,1526	0,0017269	0,00219301	0,0004562
	2	8,6517	8,8072	8,6762	0,0022135		
	3	8,0831	8,2584	8,1083	0,0026386		
3	4	9,1562	9,6855	9,1690	0,0011731	0,00114392	0,0002295
	5	8,7120	9,2957	8,7210	0,0009012		
	6	8,7647	8,8423	8,7788	0,0013574		
10	7	9,6672	9,7965	9,6703	0,0002810	0,00025647	2,7411E-05
	8	8,3693	8,4484	8,3715	0,0002269		
	9	9,6394	9,8468	9,6422	0,0002615		
30	10	9,3486	9,7498	9,3509	0,0002166	0,00023566	4,8013E-05
	11	9,0428	9,1668	9,0451	0,0002001		
	12	9,4190	9,5392	9,4223	0,0002903		
100	13	9,6229	9,8118	9,6261	0,0002884	0,00036396	7,6834E-05
	14	8,8764	9,5169	8,8801	0,0003615		
	15	9,5373	9,1040	9,5421	0,0004420		
150	16	9,1256	9,3552	9,1300	0,0004065	0,00032596	0,00015239
	17	7,6775	7,8741	7,6817	0,0004212		
	18	8,0824	8,2516	8,0838	0,0001502		
300	19	9,0233	9,2350	9,0272	0,0003753	0,00041308	0,00010478
	20	8,8051	8,9642	8,8108	0,0005315		
	21	9,0202	9,2298	9,0236	0,0003324		
450	22	9,2287	9,3526	9,2331	0,0004059	0,00035306	0,0001242
	23	8,3506	8,4717	8,3550	0,0004421		
	24	8,0614	8,1388	8,0633	0,0002112		
600	25	9,1477	9,2798	9,1508	0,0002954	0,00029751	8,0752E-05
	26	7,9877	8,1122	7,9912	0,0003793		
	27	9,3140	9,3903	9,3164	0,0002178		