

Corrosión a alta temperatura del acero inoxidable AISI 316L en termofluidos a base de sales de nitrato fundido para plantas de concentración solar

High temperature corrosion of stainless steel AISI 316L in molten nitrate salts based thermofluids for concentration solar plants

Anderson Sandoval-Amador ^{1,2}, Angie Gimena Jaimes-Campos ³,
Astrid Xiomara Mogollón-Sanabria ³, Hugo Armando Estupiñán-Duran ⁴,
Darío Yesid Peña-Ballesteros ^{3,5}

¹ Instituto de Física Arroyo Seco, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, CP: 7000, Tandil, Buenos Aires, Argentina.

² Foundation of Researchers in Science and Technology of Materials, CP: 680003, Bucaramanga, Colombia.

³ Grupo de Investigaciones en Corrosión, Universidad Industrial de Santander, CP: 680002, Bucaramanga, Santander, Colombia

⁴ Grupo de Investigación en Biosuperficies, Universidad Nacional de Colombia, CP: 050034, Medellín, Antioquia, Colombia

⁵ Centro de Materiales y Nanociencias, Universidad Industrial de Santander, CP: 681011, Piedecuesta, Santander, Colombia
e-mail: anderson84f@gmail.com, haestupinand@unal.edu.co, dypeña@uis.edu.co

RESUMEN

Con el reciente auge de las 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. En el presente trabajo se evaluó la reacción que presenta el acero AISI 316L en contacto con sales fundidas de nitratos ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + \text{NaNO}_3 + \text{KNO}_3$ y $\text{LiNO}_3 + \text{KNO}_3 + \text{NaNO}_3$), para ello se realizaron pruebas gravimétricas, con dos tipos de sales ternarias de nitratos a una temperatura de 600°C, evaluando la ganancia de masa en el acero, a su vez se realizaron estudios metalográficos, con el fin de evaluar el daño de la microestructura. Por medio de SEM y micrografías ópticas se observó la morfología de la capa y el daño del acero. La superficie donde se evidenció la mayor agresividad de daño por parte de la sal ternaria en el acero es la superficie del acero expuesta a la sal de litio. Los resultados de DRX arrojaron $\text{Fe}_{0,612}\text{Ni}_{0,388}$ y CrNi, como principales productos de corrosión del acero, demostrando así que la sal fundida con el componente de calcio es menos corrosiva para el acero usado en este proyecto.

Palabras-chave: corrosión, sales fundidas, altas temperaturas, sales solares.

ABSTRACT

With the recent boom of environmentally friendly energies, the demand for materials capable of resisting certain working conditions demanded by these processes arises, for example, the obtaining of energy from sunlight, in which the Thermal storage is vital during the operation of the plant. In the present work, the reaction of AISI 316L steel in contact with molten nitrate salts ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + \text{NaNO}_3 + \text{KNO}_3$ and $\text{LiNO}_3 + \text{KNO}_3 + \text{NaNO}_3$) was evaluated, gravimetric tests were carried out with Two types of ternary salts of nitrates at a temperature of 600°C, evaluating the gain of mass in the steel, in turn, were carried out metallographic studies, in order to evaluate the damage of the microstructure. By means of SEM and optical micrographs, the morphology of the layer and the damage caused to the steel was observed. The surface where the greater aggressiveness of damage by the ternary salt in the steel was evidenced is the surface of the steel exposed to the lithium salt. The results of DRX yielded $\text{Fe}_{0,612}\text{Ni}_{0,388}$ and CrNi, as the main steel corrosion products, demonstrating that the salt fused with the calcium component is less harmful to the steel used in this project.

Keywords: corrosion, molten salts, high temperatures, solar salts.

1. INTRODUCCION

La creciente demanda de energía en el mundo ha causado que en las últimas décadas se hayan desarrollado diferentes tipos de tecnologías para la producción de energía limpia, como lo es el caso de la energía geotérmica, energía fotovoltaica, la energía mareomotriz, la energía eólica y la energía solar entre otras [1]. Además de suplir la alta demanda energética, uno de los principales objetivos de estas nuevas tecnologías es velar por que los recursos ambientales no se vean agotados y al mismo tiempo buscan reducir el impacto ambiental que dichos procesos pueden generar.

Las plantas solares, como concentradores térmicos han surgido como una excelente alternativa para suplir la alta demanda de energía existente [2]. Este tipo de plantas trabajan con termofluidos para almacenar y transportar energía térmica [3]. Actualmente algunos de los mejores termofluidos para cumplir con este propósito son las sales fundidas de cloruros, carbonatos, fluoruros y nitratos [4]. Sin embargo, 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 450°C [5].

Los aceros inoxidable son materiales que por sus propiedades tienen gran variedad de aplicaciones en industrias que involucran procesos con ambientes agresivos, por ejemplo, la industria química, aeronáutica, recipientes para trabajo a altas presiones o altas temperaturas, entre otros. Este tipo de aceros tienen una clasificación debida a su microestructura, ferríticos, martensítico, austeníticos y dúplex. El acero austenítico se caracteriza principalmente porque su segundo componente principal es el níquel, el cual le proporciona la propiedad de mantener su microestructura a altas temperaturas o temperaturas menores al ambiente [6].

Entre los aceros inoxidable austeníticos encontramos el acero 316L, su principal característica es el bajo porcentaje de carbono, el cual previene la sensibilización (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 [7].

Uno de los termofluidos más ampliamente usados en la actualidad tiene como base las sales de nitrato, esto debido a que estas mezclas logran disminuir el punto de fusión de la sal, poseen buenas propiedades de almacenamiento de calor latente, aumentando la eficiencia de la planta ya que pueden incluso trabajar sin la luz solar [8-12]. 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 [13-14].

Diferentes estudios sobre la interacción entre el acero y las sales de nitrato se han desarrollado debido a que es necesario comprender los fenómenos que ocurren en la superficie del acero al estar en contacto con estos termofluidos. Todos estos trabajos han analizado los productos de 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 su posible implementación en plantas de concentración solar, además demostraron la eficiencia de las sales de nitrato para transportar la energía térmica [15-25].

En este artículo, se analiza el efecto corrosivo de dos mezclas de sales de nitrato (48%p/p de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ + 7%p/p de NaNO_3 + 45%p/p de KNO_3 , y 20%p/p de LiNO_3 + 52%p/p de KNO_3 + 28%p/p de NaNO_3) cuyas propiedades fisicoquímicas muestran que son termofluidos potenciales para su implementación en plantas de concentración solar [13, 26].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se emplearon muestras de acero 316L (ver composición en la tabla 1) con las siguientes dimensiones 20 x 20 x 2mm. Estas muestras se desbastaron con papel de carburo de silicio no. 600 y se enjuagaron inicialmente en agua destilada y posteriormente en un baño ultrasónico con etanol durante 10 minutos en baño ultrasónico.

Las mezclas de sales empleadas en este estudio fueron 48%p/p de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ + 7%p/p de NaNO_3 + 45%p/p de KNO_3 , y 20%p/p de LiNO_3 + 52%p/p de KNO_3 + 28%p/p de NaNO_3 . Las sales se disolvieron en agua destilada. Con el fin de garantizar que sobre cada muestra de acero se formara una capa homogénea en la superficie, las muestras de acero 316L se introdujeron dentro de recipiente Petri que contenían la mezcla de sales diluidas y se llevaron a una plancha a una temperatura de 200°C para lograr una rápida evaporación del agua y de esta manera lograr la formación de la capa delgada y homogénea de sal sobre la superficie del acero.

Tabla 1: Composición química del acero inoxidable AISI 316L.

AISI 316L	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Ni	%Cr	%Mo	%N
	0,020	0,506	0,852	< 0,150	0,003	10,11	16,43	1,896	0,221

La oxidación isotérmica de las muestras de acero 316L a 600°C se realizó en un horno Carbolite 1200SWF. Los ensayos gravimétricos se realizaron tras 1, 3, 10, 30, 100, 150, 300, 450 y 600 h de exposición a las sales de nitrato. Para esto, tres muestras del acero fueron removidas del horno y enfriadas lentamente para su examinación y análisis. La ganancia de masa se determinó aplicando la ecuación 1, donde Δm representa el cambio de masa, S_0 es el área superficial de la muestra, m_i y m_f son los valores de masa inicia y final respectivamente. Para obtener un dato promedio de la ganancia de masa las muestras se pesaron 5 veces.

$$\frac{\Delta m}{S_0} = \frac{m_i - m_f}{S_0} \tag{1}$$

Los productos de corrosión formados sobre la superficie del acero AISI 316L tras los ensayos de oxidación isotérmica y corrosión por contacto con sales fundidas se observaron mediante microscopia electrónica de barrido con un microscopio FE-SEM quanta FEG 650. La identificación de los compuestos cristalinos formados sobre la superficie de las muestras se determinó mediante difracción de rayos X para lo cual se usó un difractómetro Bruker Discover D8.

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos de los ensayos gravimétricos del acero AISI 316L son comparados en la Figura 1. Como se puede apreciar la ganancia de masa en el proceso de oxidación térmica del acero es mínima comparada a la ganancia de masa que experimentó el acero expuesto a las dos sales de nitratos durante 600h a 600°C. Los resultados de los ensayos de oxidación isotérmica muestran una etapa acelerada de oxidación del material durante las primeras 100 horas de exposición. Tras esta etapa inicial, la ganancia de masa se estabiliza lo cual suele asociarse a la formación de compuesto base cromo y níquel que protegen al material de la corrosión. Por otra parte, las muestras de acero 316L expuesta a la sal de nitratos con calcio presentaron la mayor ganancia de masa, llegando a un valor de 2,5mg/cm² tras 600 horas de exposición, mientras que las muestras del acero expuestas durante el mismo intervalo de tiempo a la sal de litio tan solo lograron una ganancia de masa de 0,5mg/cm².

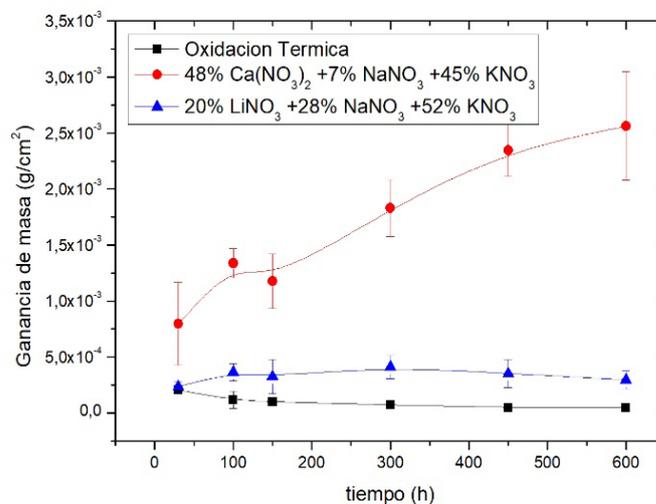


Figura 1: Comportamiento gravimétrico del acero AISI 316L.

El análisis de la morfología de los productos de corrosión formados bajo las tres condiciones de estudio se pueden observar en la Figura 2. En la Figura 2a se puede observar que la capa formada tras el proceso de oxidación isotérmica es homogénea sobre todas las superficies de la muestra del acero 316L. Por otro lado, como se aprecia en la Figura 2b, el producto de corrosión formado tras la exposición a la sal con nitrato de calcio tiene dos capas. Una capa de alta adherencia al sustrato metálico, la cual está formada principalmente por óxidos metálicos (ver Figura 4). La segunda capa es menos densa y poco adherente, y está formada por productos generados por la interacción entre la sal y el sustrato metálico. De

forma similar, en la Figura 2c se puede apreciar la doble capa de productos de corrosión formada tras la exposición del acero a la sal de nitrato de litio. Sin embargo, en este caso se puede observar que la primera capa es poco adherente, lo cual se asocia a la presencia de grietas que se observan entre el sustrato y el producto de corrosión. Los espesores promedio de los productos de corrosión observados en el estudio por microscopía electrónica de barrido fueron de 6,5µm en la muestra expuesta a la sal compuesta por 48% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ + 7% NaNO_3 + 45% KNO_3 y de 13,7µm en la muestra expuesta a la sal de 20% LiNO_3 + 52% KNO_3 + 28% NaNO_3 .

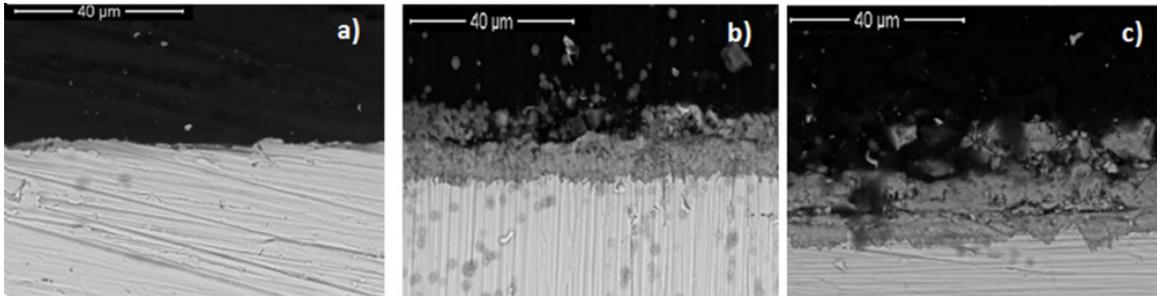


Figura 2: Sección transversal del acero AISI 316L expuesto a: a) Oxidación isotérmica, b) 48% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ + 7% NaNO_3 + 45% KNO_3 y c) 20% LiNO_3 + 52% KNO_3 + 28% NaNO_3 .

La composición de los productos de corrosión formados bajo las tres condiciones de estudio se detalla a continuación. En el difractograma de la Figura 3 se puede observar que el principal compuesto formado por el proceso de corrosión isotérmica fue carburo de cromo, junto al cromo y al níquel hierro, compuestos del mismo acero, es importante recordar que la formación de carburos de cromo en los límites de granos es la mayor responsable de la sensibilización del acero y al estar el acero expuesto a ambientes altamente oxidantes, fallará en zonas aledañas al límite de grano [7]. En la Figura 4 se puede observar la composición de los productos de corrosión generados tras la exposición del acero a la sal de nitrato de calcio, la hematita (Fe_2O_3), el óxido de calcio hierro ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_3$) y la cromatita (CaCrO_4), son los principales productos de corrosión generados bajo esta condición de estudio y demuestran la interacción de la sal con el sustrato metálico. Por otra parte, en la Figura 5 se observa la presencia de magnetita (Fe_3O_4) y hematita (Fe_2O_3) y óxido de hierro litio ($\text{Li}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{FeO}_4$) como productos de corrosión en la superficie del acero expuesto a la sal de litio.

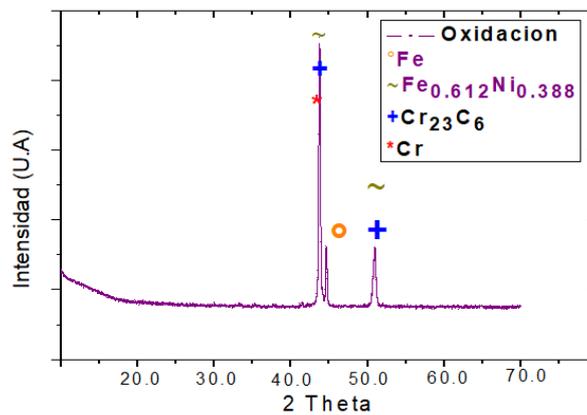


Figura 3: Difractograma del acero AISI 316L expuesto a oxidación térmica

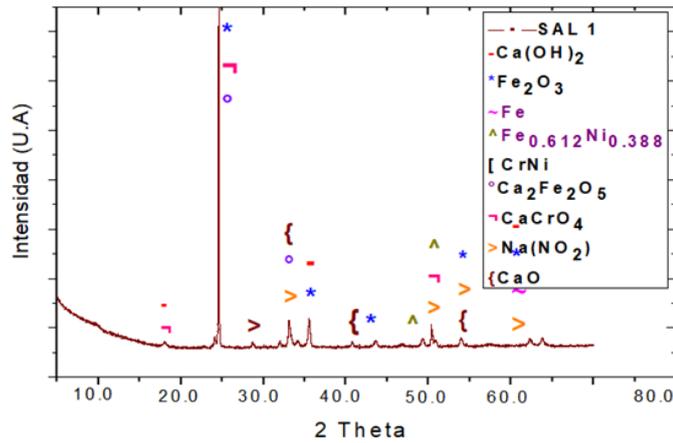


Figura 4: Difractograma del acero AISI 316L expuesto a 48% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ + 7% NaNO_3 + 45% KNO_3 .

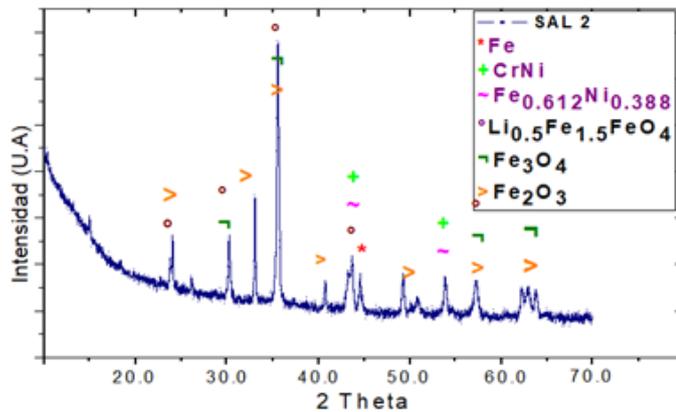


Figura 5: Difractograma del acero AISI 316L expuesto a 20% LiNO_3 + 52% KNO_3 + 28% NaNO_3 .

4. DISCUSIÓN

El comportamiento de las curvas de ganancia de masa obtenidas en nuestra investigación ha sido ampliamente reportado en diversos trabajos donde se estudio el efecto corrosivo de termofluidos basados en sales de nitratos [8, 10, 13, 14,17]. Este comportamiento de tipo parabólico se asocia a la formación de productos de corrosión que generan un efecto protector al material base.

Para nuestro caso de estudio los productos de corrosión que generan este efecto protector ante la corrosión son el $\text{Fe}_{0.612}\text{Ni}_{0.388}$ y el CrNi [20-21]. La presencia de estos compuestos se evidencia en los difractogramas obtenidos bajos las tres condiciones de estudio desarrolladas en esta investigación. Por otra parte, la presencia de Fe_2O_3 y Fe_3O_4 en los difractogramas obtenidos en las pruebas de exposición del acero a las sales de nitratos es una clara evidencia del ataque de los termofluidos sobre el acero. La formación de estas fases del oxido de hierro suele presentar en la etapa inicial (0- 100 h) de la exposición del acero al termofluido, donde, la pendiente de la curva de ganancia de masa es mayor para las muestras de acero expuestas a las sales de nitrato respecto a las muestras que experimentan únicamente oxidación isotérmica [8, 14, 17].

Diferentes trabajos de investigación sobre la resistencia a la corrosión de aceros que podrían ser empleados como materiales de construcción de termotanques o líneas de transporte de termofluidos en centrales solares han reportado que la morfología típica de las capas de los productos de corrosión es una bicapa, lo cual se debe principalmente a la diferencia entre los coeficientes de dilatación térmica del metal base y de los productos de corrosión [8, 10, 20, 21, 27]. Además, cabe resaltar que el espesor de las capas obtenidas bajo nuestras condiciones experimentales es muy similar a los datos reportados previamente en otros estudios [21, 27].

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en nuestra investigación y lo reportado previamente en la literatura podemos inferir que el acero AISI 316L es un material que ofrece las características deseadas para ser empleado como materia prima en la construcción de termotanques o líneas de transmisión de termofluidos basados en sales de nitrato. Sin embargo, queda por analizar la viabilidad económica de su implementación.

5. CONCLUSIONES

Las curvas de ganancia de masa vs el tiempo de exposición obtenidas en este estudio mostraron un comportamiento parabólico, el cual es característico en procesos de oxidación a alta temperatura. Este comportamiento junto con las micrográficas SEM obtenidas de las superficies del acero AISI 316L permitieron verificar la formación de una capa protectora en la superficie del material bajo las tres condiciones de estudio.

El análisis de composición obtenido mediante difracción de rayos x, nos permitió determinar cuáles compuestos fueron responsables de la ralentización del proceso de oxidación a alta temperatura. En este caso se trató de la formación de compuestos de Carburo de Cromo en el proceso de oxidación térmica en ausencia de sales nitrato y de un compuesto de Cromo Níquel en presencia de las sales de nitrato. Además, se encontró que la exposición a las sales de nitrato genera un ataque al metal base la cual se sustenta en la presencia de los compuestos de hematita y magnetita.

Adicionalmente, se encontró que la mezcla compuesta por 48% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ + 7% NaNO_3 + 45% KNO_3 , es la sal que produce una mayor daño a la superficie del acero AISI 316L, lo cual es claramente evidente en las curvas de ganancia de masa. Sin embargo, según los resultados de nuestra investigación podemos considerar que la implementación del acero AISI 316L es viable para la fabricación de elementos o dispositivos en plantas de concentración solar.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] GUO, S., LIU, Q., SUN, J., JIN, H., “A review on the utilization of hybrid renewable energy”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 91, pp.1121-1147, August. 2018.
- [2] SESHIE, Y. M., N'TSOUKPOE, K. E., NEVEU, P., *et al.* “Small Scale concentrating solar plants for rural electrification”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 90, pp. 195-209, July. 2018.
- [3] CONROY, T., COLLINS, M. N., FISHER J., *et al.* “Thermohydraulic analysis of single-phase heat transfer fluids in CPS solar receivers”, *Renewable Energy*, v. 129, Part A, pp. 150-167, December. 2018.
- [4] ZHU, M., ZENG, S., ZHANG, H., LI J., CAO, B., “Electrochemical study on the corrosion behaviors of 316 SS in HITEC molten salt at different temperatures”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v.186, pp. 200-207, July. 2018.
- [5] WALCZAK, M., PINEDA, F., FERNANDEZ, A.G., *et al.* “Materials corrosion for thermal energy storage systems in concentrated solar power plants”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 86, pp. 22-44, March. 2018.
- [6] GEOGY, G., HASAN, S., “Introduction to austenitic stainless steel” In: Khatak H. S, Raj B., (eds), *Corrosion of Austenitic Stainless Steels - Mechanism, Mitigation and Monitoring*, Chapter 1, Cambridge, England, Woodhead Publishing Limited, 2002.
- [7] PARVATHAVARTHINI, N., “Sensitization and testing for intergranular corrosion”, In: Khatak H. S, Raj B., (eds), *Corrosion of Austenitic Stainless Steels - Mechanism, Mitigation and Monitoring*, Chapter 5, Cambridge, England, Woodhead Publishing Limited, 2002.
- [8] FERNANDEZ, A.G., MUÑOZ-SANCHEZ, B., NIETO-MAESTRE, J., *et al.* “High temperature corrosion behavior on molten nitrate salt-based nanofluids for CSP plants”, *Renewable Energy*, v. 130, pp. 902-909. July. 2018.
- [9] DELISE, T., TIZZONI, A.C., FERRARA, *et al.* “Thermophysical, environmental and compatibility properties of nitrate and nitrite containing molten salts for medium temperature CSP applications: A critical review”, *Journal of the European Ceramic Society*, v. 39, no. 1, pp. 92-99, January. 2019.
- [10] FERNANDEZ, A.G., GRAGEDA, M., GALLEGUILLOS, H., “Impurity influence in physico-chemical and corrosion properties of Chilean solar nitrates”, *Energy Procedia*, v. 49, pp. 607-616. June. 2014.
- [11] VILLADA, C., BONK, A., BAUER, T., *et al.* “High-temperature stability of nitrate/nitrite molten salt mixtures under different atmospheres” *Applied Energy*, v. 226, pp. 107-115. May. 2018.
- [12] USHAK, S., FERNANDEZ, A.G., GRAGEDA., “Using molten salts and other liquid sensible storage media in thermal energy storage (TES) systems”, In: CABEZA L.F., (ed), *Advanced in Thermal Energy Storage Systems*, Chapter 3, Cambridge, England, Woodhead Publishing Series in Energy, 2015.
- [13] FERNANDEZ, A.G., USHAK, S., GALLEGUILLOS, H., *et al.* “Development of new molten salts with LiNO_3 and $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ for energy storage in CSP plants” *Applied Energy*, v. 119, pp. 131-140. June. 2014.
- [14] FERNANDEZ, A.G., GALLEGUILLOS, H., FUENTEALBA, E., *et al.* “Corrosion of stainless steel and low-Cr steel in molten $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ - NaNO_3 - KNO_3 eutectic salt for direct energy storage in CSP plants”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 141, pp. 7-13. May. 2015.

- [15] KRUIZENGA, A., GILL, D., “Corrosion of iron stainless steel in molten nitrate salt” *Energy Procedia*, v. 49, pp. 878-887. June. 2014.
- [16] NIKETAN, S.P., VILIAM, P., MIROSLAV, B., “High-temperature corrosion behavior of superalloys in molten salts- A review”, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, v. 42, no. 1, pp. 83-97, November. 2016.
- [17] FERNANDEZ, A.G., CORTES, M., FUENTEALBA, E.F., *et al.* “Corrosion properties of a ternary nitrate/nitrite molten salt in concentrated solar technology” *Renewable Energy*, v. 80, pp. 177-183, August. 2015.
- [18] SUBARI, F., MAKSOM, H.F., ZAWAWI, A., “Corrosion behavior of eutectic molten salt solution on stainless steel 316L” *Procedia Social and Behavioral Sciences*, v. 195, pp. 2699-2708, 2015.
- [19] GARCIA-MARTIN, G., LASANTA, M.I., ENCINAS-SANCHEZ, V., *et al.* “Evaluation of corrosion resistance of A516 steel in a molten nitrate salt mixture using a pilot plant facility for application in CSP plants” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 161, pp. 226-231, January. 2017.
- [20] LI, X.L., WEI, X., LU, J., DING, J., WANG, W., “Corrosion resistance of 316L austenitic stainless steel in a quaternary molten salt for concentrating solar power”, *Energy Procedia*, v. 142, pp. 3590-3596, August 2017.
- [21] SANDOVAL-AMADOR, A., SANTANDER-VEGA, A.J., AMAYA-CACERES, C.C., *et al.* “316L stainless steel corrosion in molten salts NaNO₃ KNO₃ NaNO₂ simulating storage conditions”, *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1159, pp. 012011, 2019.
- [22] ENCINAS-SANCHEZ, V., DE MIGUEL, M.T., GARCIA-MARTIN, G., *et al.* “Corrosion resistance of Cr/Ni alloy to a molten carbonate salt at various temperatures for the next generation high-temperature CSP plants”, *Solar Energy*, v. 171, pp. 286-292, June 2018.
- [23] GROSU, Y., BONDARCHUK, O., FAIK A., “The effect of humidity, impurities and initial state on the corrosion of carbon and stainless Steel in molten HitecXI salt for CSP application”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 117, pp. 34-41, January 2018.
- [24] KHORSAND, S., SHEIKHI, A., RAEISSI, K., *et al.* “Hot corrosion behavior of inconel 625 superalloy in eutectic molten nitrate salts”, *Oxidation of Metals*, v. 90, no. 1-2, pp. 169-186, January 2018.
- [25] GUILLOT S., FIAK A., RAKHMATULLIN A., *et al.* “Corrosion effects between molten salts and thermal storage material for concentrated solar power plants”, *Applied Energy*, v. 94, pp. 174-181, February, 2012.
- [26] VILLADA, C., JARAMILLO, F., CASTAÑO, J. G., *et al.* “Design and development of nitrate -nitrite based molten salts for concentrating solar power applications”, *Solar Energy*, v. 188, pp. 291-299, August, 2019.
- [27] GOMES, A., NAVAS, M., URANGA, N., *et al.* “High-temperature corrosion performance of austenitic stainless steel type AISI 316L and AISI 321H in molten solar salt”, *Solar Energy*, v. 177, pp. 408-419, January, 2019.

ORCID

Anderson Sandoval-Amador	http://orcid.org/0000-0002-9929-121X
Angie Gimena Jaimes-Campos	https://orcid.org/0000-0001-5756-8383
Astrid Xiomara Mogollon-Sanabria	https://orcid.org/0000-0003-1856-7016
Hugo Armando Estupiñan-Duran	https://orcid.org/0000-0002-9607-3364
Dario Yesid Peña-Ballesteros	https://orcid.org/0000-0002-6193-9535