

ENSAYOS DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO DE REFLECTORES SOLARES SOMETIDOS A RADIACIÓN UV Y CORROSIÓN**Buendía-Martínez F.*, Fernández-García A.*, Sutter F.**, Wette J.**, Valenzuela L.***

* CIEMAT-Plataforma Solar de Almería, Ctra. Senés, Tabernas, 04200, (Almería) Spain,
francisco.buendia@psa.es

** German Aerospace Center (DLR), Paseo de Almería Nr. 73, 2ª dcha, Almería, 04001, (Almería) Spain

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.2036>

RESUMEN

La energía termosolar de concentración desempeña un rol fundamental en la transición energética prevista para los próximos años. La generación energética de esta tecnología depende enormemente del comportamiento óptico de los reflectores; si éste se ve mermado, el rendimiento de toda la planta solar se verá afectado. En consecuencia, utilizar un reflector adecuado puede suponer la diferencia entre el éxito o el fracaso de un proyecto. Para ciertas aplicaciones de esta energía, es necesario situar la planta solar en zonas cercanas a la costa donde la corrosividad y la dosis de radiación UV son muy elevadas. Por lo tanto, es necesario evaluar la durabilidad de los reflectores en dichos ambientes. Para ello, se han expuesto varias muestras de reflectores en Almería (España) para identificar los principales mecanismos de degradación que tienen lugar en los materiales. Además, se han realizado con éxito varios ensayos de envejecimiento acelerado que reproducen adecuadamente los principales mecanismos de degradación observados en intemperie, pero en un tiempo mucho menor. En particular, se ensayaron en condiciones aceleradas tres tipos de reflectores para evaluar su durabilidad frente a la corrosión y degradación UV.

PALABRAS CLAVE: Energía Termosolar de Concentración, Reflector, Envejecimiento Acelerado, Degradación UV, Corrosión

ABSTRACT

Concentrating solar thermal energy plays a fundamental role in the energetic transition planned for the next years. The energetic generation of this technology hugely depends on the optical behavior of the solar reflectors; if it decreases, the performance of the whole solar plant will be affected. Consequently, the use of a proper reflector might suppose the difference between the success or the failure of a project. For some solar thermal energy applications, it is required to place the solar plant near to the coast where the corrosivity and the UV doses are extremely high. Hence, it is necessary to assess the durability of the reflectors in these climates. For that purpose, several reflector samples were exposed in Almería (Spain) in order to identify the main degradation mechanisms. Furthermore, various accelerated aging tests which suitably reproduce the degradation mechanisms observed in Almería in a short period of time, were carried out. In particular, the durability of three different reflector materials against the corrosion and the UV degradation was studied in accelerated aging conditions.

KEYWORDS: Concentrating Solar Thermal Energy, Reflector, Accelerated Aging, UV Degradation, Corrosion

INTRODUCCIÓN

El incremento de los gases de efecto invernadero y la escasez de combustibles fósiles ha originado una revolución en el sector energético en los últimos años. Para abordar la transición energética requerida, el mercado energético ha optado por el uso de fuentes de energía renovables que son menos nocivas para el medio ambiente (Montoya et al. 2014). Entre todos los tipos de energías renovables, la energía solar es considerada como la alternativa más prometedora debido a que su impacto ambiental es despreciable (Tsoutsos et al. 2005). Especialmente, la energía termosolar de concentración (TSC) cobra un papel fundamental en este nuevo mercado energético porque gracias a la eficiente capacidad de almacenar energía térmica es capaz de suministrar energía casi en cualquier momento del día (Tian et al. 2013). En la actualidad, la capacidad eléctrica instalada de energía TSC en todo el mundo es 6,2 GW, de los cuales 2,3 GW provienen de España, lo que le sitúa como líder mundial. Según las previsiones publicadas por la Agencia Internacional de la Energía (IEA, de sus siglas en inglés, *International Energy Agency*), en 2050, el 11 % de la energía total generada en el mundo provendrá de plantas TSC (IEA, 2014).

El tiempo de vida útil para el cual se diseña una planta TSC suele ser de al menos 20 años. Por lo tanto, muchos de los componentes, cuyo replazo supone un alto coste, deben resistir durante dicho periodo de tiempo. La compra de los reflectores para el campo solar representa el 6,4 % de la inversión inicial de la planta y el replazo de dichos componentes no está contemplado (IRENA, 2012). Por ello, el material reflectante debe de preservar sus cualidades ópticas iniciales durante todo el tiempo en el que la planta esté activa. Dicho elemento es vital para el correcto funcionamiento de la una planta termosolar ya que es el encargado de dirigir y concentrar la radiación solar. Si el rendimiento óptico del reflector se ve mermado, todo el proceso de conversión de la energía de la planta solar se verá afectado (Mills, 2004). Los espejos de vidrio con plata (protegidos posteriormente con 3 capas de pintura) son los más utilizados para tecnologías TSC puesto que presentan mejor comportamiento óptico y durabilidad que sus homólogos de aluminio y poliméricos (Heller, 2017). Actualmente, se está intentando fabricar espejos de bajo coste que permitan reducir el capital destinado a la compra de éstos, pero la durabilidad de estos nuevos materiales es incierta. Para disminuir el precio de los reflectores, varios experimentados fabricantes están elaborando prototipos *low-cost* con un menor número de capas de pintura protectoras.

Las plantas TSC suelen estar emplazadas en sitios con alta irradiancia solar, lo que supone que la dosis de radiación UV a la que estarán sometidos los materiales reflectores serán muy altas. Además de para producir energía, la energía TSC se utiliza para desalinizar el agua. Para dicha aplicación, estas plantas deben estar ubicadas cerca de la costa ya que no es rentable transportar el vapor exhausto generado durante largas distancias puesto que se necesitarían diámetros de tubería excesivamente grandes (Palenzuela et al. 2015). En zonas cercanas al mar, la salinidad del ambiente es considerablemente alta y podría provocar un deterioro excesivo del material reflector en forma de corrosión. La combinación de ambos efectos (corrosión y altas dosis de UV) podría resultar fatídica para la durabilidad de los espejos. Por consiguiente, es necesario garantizar que los reflectores no se degradarán excesivamente en lugares donde ambos parámetros tengan lugar al mismo tiempo.

Para identificar posibles efectos de degradación que podrían deteriorar los reflectores durante el funcionamiento de una planta TSC en operación, se utilizan ensayos de envejecimiento acelerado que tratan de reproducir los mismos mecanismos de degradación a los que se verán sometidos, pero con unas condiciones de ensayo mucho más agresivas que las dadas durante la operación. Estos ensayos permiten obtener resultados que tendrán lugar a muy largo plazo en un tiempo razonable. Existe una norma española específica para paneles solares donde se compilan los ensayos acelerados más representativos para estudiar la durabilidad de los reflectores (UNE 206016:2018). En ella se recoge un ensayo para analizar el efecto de la radiación UV con la humedad (UV+H) y varios que pueden ser usados para reproducir ambientes corrosivos, entre los que destacan el ensayo CASS (de sus siglas en inglés, *copper-accelerated acetic acid salt spray*) y NSS (de sus siglas en inglés, *neutral salt spray*).

El objetivo de este trabajo es caracterizar los posibles mecanismos de degradación provocados por altas dosis de radiación UV y ambientes altamente salinos, que pueden afectar seriamente a la durabilidad de los reflectores, y reproducirlos mediante ensayos de envejecimiento acelerado. Para dicho fin, 3 tipos de reflectores fueron expuestos durante 2 años en un emplazamiento fuertemente corrosivo y con alta irradiancia solar anual. Además, los materiales fueron sometidos a 2 ensayos envejecimiento acelerado diferentes para verificar que los resultados obtenidos en cámara eran representativos con respecto a los de intemperie. Un ensayo individual de CASS, y un ensayo cíclico de UV+H-CASS en el que las muestras cambiaban de test semanalmente.

MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se presenta una descripción de los diferentes materiales usados en este trabajo, la metodología para exponer las muestras en intemperie, la climatología del emplazamiento y el procedimiento utilizado para ensayar los reflectores en condiciones de envejecimiento acelerado. Por último, se detalla el método de análisis utilizado para evaluar la degradación ocurrida en los reflectores solares.

Materiales Reflectores

Para este trabajo fueron seleccionados 3 reflectores de vidrio plateado de 3 fabricantes diferentes. La razón por la que se utilizaron materiales de vidrio plateados y no poliméricos o de aluminio es que la gran mayoría de las plantas TSC comerciales utilizan este tipo de material debido a que sus cualidades ópticas son significativamente superiores a las del resto y muestran una excelente durabilidad (García-Segura et al. 2016). Dichos reflectores están compuestos por una delgada capa de plata protegida por la parte frontal con vidrio y por la parte posterior con cobre y diferentes capas de pintura. Se utilizaron espejos de 10x10 cm, tanto para exponerlos en intemperie como para los ensayos de envejecimiento acelerado. Las muestras fueron cortadas de una faceta real, por lo que todas ellas tenían los cuatro bordes desprotegidos.

A continuación se describen las características de los reflectores estudiados:

- RLC1: Es un reflector comercial de 4 mm de espesor con 3 capas de pintura que protegen por la parte posterior a la plata (Fig. 1). El espesor de dichas capas es 37, 33 y 30 μm , pinturas 1, 2 y 3, respectivamente.
- RLB1: Es un reflector comercial de 1 mm de espesor con 2 capas de pintura. El espesor de dichas capas es de 30 μm cada una.
- RLA4R: Es un prototipo de reflector de 2 mm de espesor compuesto por 2 capas de pintura de 37 y 32 μm , pinturas 1 y 2 respectivamente.

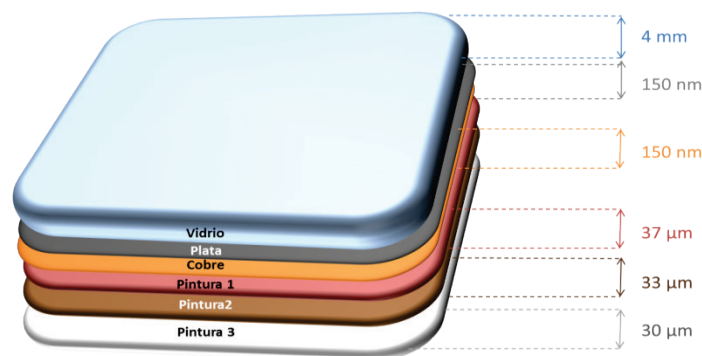


Fig. 1. Esquema de las partes de un reflector de vidrio plateado con 3 capas de pinturas protectoras (RLC1).

Exposición en Intemperie

5 muestras de los materiales RLA4R, RLB1 y RLC1 fueron expuestas en Almería (España) con el objetivo de identificar los principales mecanismos de degradación que ocurren en los reflectores cuando están sometidos a altas concentraciones de salinidad y de radiación UV. Para ello, las muestras fueron fijadas en una estructura metálica con un ángulo de inclinación de 45° (Fig. 2). Durante dos años de exposición, las muestras fueron recogidas periódicamente para ser caracterizadas en el laboratorio. Una vez que eran analizadas, se volvían a exponer. Los reflectores se encontraban a 500 m en línea recta del mar, siendo la salinidad del sitio muy significativa (C4 según la norma ISO 9223). Además, el sumatorio anual de la irradiancia horizontal global (GHI, de sus siglas en inglés, *Global horizontal Irradiance*) del emplazamiento es de 1938 $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$. Las características del sitio están resumidas en la Tabla 9:



Fig. 2. Estructura de sujeción de los espejos en Almería (España).

Tabla 1. Características del lugar de emplazamiento de los reflectores en Almería (España).

Lugar	Coordenadas	Clima	Distancia a la costa en línea recta (m)	Altitud (m)	GHI anual (kW·h/m ²)	Temperatura media (°C)	Humedad Relativa media (%)
Almería (España)	(36,8°N, 2,4°W)	Semiárido	500	0	1938	19,1	65

Ensayos de Envejecimiento Acelerado

Con el objetivo de reproducir la misma degradación observada en intemperie y analizar la resistencia de estos materiales frente a la corrosión y la radiación UV, se llevaron a cabo 2 tipos de test diferentes durante 2000 horas. En ambos, 3 muestras de cada tipo de reflector fueron analizadas semanalmente (cada 168 horas).

- CASS: en este ensayo los reflectores son rociados con una disolución acuosa que contiene 50 g/l de NaCl y 0,26 g/l de CuCl₂. El pH de la disolución oscila entre 3,1 y 3,3. La temperatura y humedad relativa durante todo el ensayo están controladas a 50 °C y 100 %, respectivamente.
- UV+H-CASS: es un ensayo cíclico que combina el ensayo UV+H con el test CASS, explicado anteriormente. El test UV+H consiste en un test de radiación UV más humedad que comprende dos fases cíclicas de 4 horas cada una. En la primera etapa, una lámpara fluorescente emite radiación UV con una intensidad máxima de 0,83 W/m²/nm, entre 290 y 400 nm a 60 °C. En la segunda etapa, no se emite radiación UV y se crean condiciones de condensación a 100 % de humedad relativa y 50 °C. Los reflectores fueron colocados en la cámara de manera que la radiación incidía primero en el vidrio y luego en la plata. El ensayo comenzó con un ciclo UV+H y cada semana fueron transferidos de una cámara a otra.

Método de Análisis

Periódicamente, tanto las muestras expuestas en intemperie como las ensayadas en cámaras de envejecimiento eran retiradas de los respectivos ensayos para ser analizadas. Se cuantificó tanto la calidad óptica la capa reflectante como el número de defectos que iban apareciendo en toda la superficie de los reflectores.

El parámetro que mejor determina la calidad óptica de un espejo es la reflectancia. En este trabajo se ha medido el valor de dicho parámetro mediante la utilización de un reflectómetro portátil fabricado por la empresa D&S en colaboración con los laboratorios de Sandia. Este instrumento es capaz de medir directamente la reflectancia especular en el rango de 635-685 nm, con un pico a 660 nm (Buendía-Martínez et al. 2020). Gracias a los tornillos regulables que soportan al dispositivo, es muy sencillo poder medir reflectores con diferentes curvaturas y espesores de vidrio. Todas las medidas se realizaron con un ángulo de aceptación de 12.5 mrad y un ángulo de incidencia de 15°.

Adicionalmente, se realizaron estudios microscópicos de la superficie de la plata con un microscopio óptico modelo Axio XSM 700, fabricado por Zeiss, con el objetivo de encontrar posibles imperfecciones ocasionadas por los agentes ambientales a los que estaban expuestos. Asimismo, se cuantificaron los puntos de corrosión que aparecían en la capa de plata y las burbujas que afloraban en la parte más externa de las pinturas. Ambas imperfecciones eran originadas por la penetración de la humedad a través de las pinturas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se incluyen tanto los resultados de los reflectores expuestos en intemperie como los ensayados en cámaras de envejecimiento acelerado, poniendo de manifiesto y cuantificando los principales mecanismos de degradación. Para ello, se realizó un conteo de defectos aparecidos en la plata y en las pinturas, y se midió la reflectancia especular durante todo el tiempo de ensayo.

Exposición en Intemperie

Tras 2 años de exposición en intemperie de los materiales RLA4, RLB1 y RLC1 se ha percibido que el principal mecanismo de degradación que existe en Almería es la corrosión de la capa reflectora de plata. Se ha observado la aparición de puntos de corrosión en la plata en las muestras RLA4R y RLB1 (**Fig. 3**). Dichos defectos suelen aparecer debido a que la humedad ambiental, que posee una gran concentración salina, penetra a través de las capas de pintura, alcanzando el material reflector y finalmente provocando la corrosión del mismo. Mientras que en los reflectores RLC1 no se percibieron puntos de corrosión, tanto en el material

RLA4R como en el RLB1 surgieron 2 puntos de corrosión por año en muestras de 10x10 cm, siendo el número de éstos 2 en el primer año y 4 en el segundo (Tabla 10). En la Tabla 10 también se muestra la evolución de la reflectancia en todos los materiales. Como se puede apreciar, la caída de la reflectancia es muy similar entre estos 3 tipos de reflectores, alcanzando una caída máxima tras 2 años de exposición en intemperie de 0,005 para el RLA4R y 0,004 para el RLB1 y RLC1. Las similares caídas de reflectancia son debidas a que en todos los materiales se adhirieron residuos en el vidrio que son complicados de eliminar.

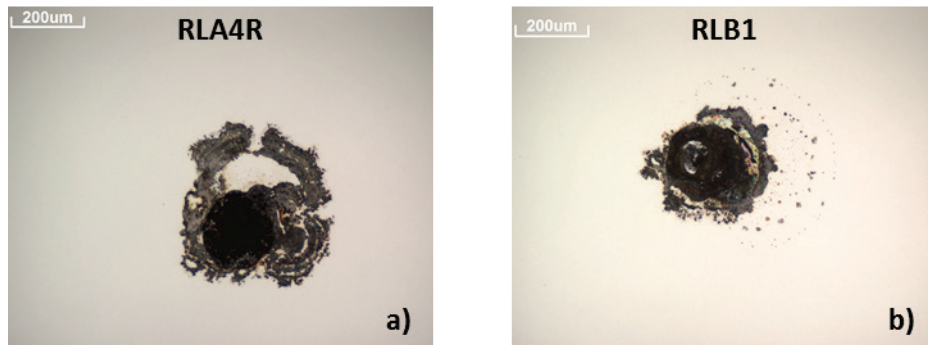


Fig. 3. Puntos de corrosión aparecidos tras 2 años de exposición en Almería en los reflectores a) RLA4R y b) RLB1.

Tabla 2. Evolución del número de puntos de corrosión y de la reflectancia en los reflectores RLA4R, RLB1 y RLC1 expuestos en Almería.

Material	Tiempo (Meses)	Número de puntos de corrosión (-)	Reflectancia (-)
RLA4R	0	0	0,964
	12	2	0,963
	24	4	0,959
RLB1	0	0	0,966
	12	2	0,963
	24	4	0,962
RLC1	0	0	0,948
	12	0	0,948
	24	0	0,944

Ensayos de Envejecimiento Acelerado

Todos los tipos de reflectores (RLA4R, RLB1 y RLC1) fueron sometidos a 2 ensayos diferentes de envejecimiento acelerado con el objetivo de conocer qué ensayo se asemejaba más a los resultados obtenidos en intemperie, cuál es el principal mecanismo de degradación y qué material resiste mejor en ambientes con alta salinidad y radiación solar. Todos los materiales se analizaron de la misma forma y al mismo tiempo para garantizar la homogeneidad de los resultados logrados.

Tanto en el ensayo CASS como en el UV+H-CASS se observaron un gran número de puntos de corrosión, de aspecto muy similar a los que se originaron en intemperie. En la Fig. 4, las imágenes de los puntos de corrosión a, b y c se corresponden al ensayo CASS, después de 1 semana de ensayo, y las imágenes d, e y f pertenecen al ensayo UV+H-CASS tras 2 semanas de test. Debido a la gran semejanza entre los defectos observados en Almería (Fig. 3) y los aparecidos en los ensayos de envejecimiento acelerado CASS y UV+H-CASS, se puede afirmar que ambos experimentos de envejecimiento acelerado reproducen los mismos mecanismos de degradación ocurridos en Almería.

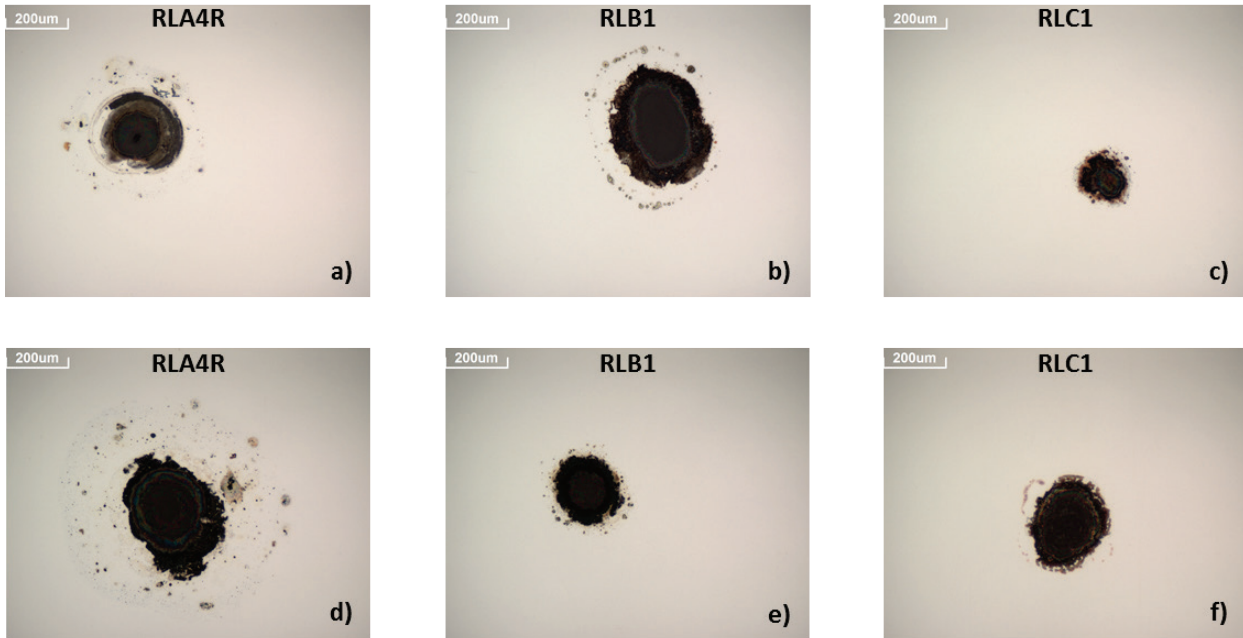


Fig. 4. Puntos de corrosión aparecidos en las muestras RLA4R, RLB1 y RLC1 tras 1 semana de ensayo en CASS (a, b y c) y 2 semanas en el test UV+H-CASS (d, e y f).

En la Fig. 5 se muestra la evolución de la reflectancia y del número de puntos de corrosión a lo largo del tiempo para el test CASS. Con cuadrados azules se representan los valores del material RLB1, con triángulos violetas los del RLA4R y con círculos rojos los del RLC1. Mientras que los colores más intensos se corresponden con el número de puntos de corrosión, los más claros se atañen a los valores de reflectancia. Se aprecia claramente que hay una relación inversa entre el número de puntos de corrosión y la reflectancia, es decir, cuando aumenta el número de puntos de corrosión, la reflectancia decrece. En cuanto a los materiales, se observa que el material RLA4R (prototipo con 2 capas de pintura) y RLB1 (comercial con 2 capas de pintura) poseen comportamientos muy similares y que la reflectancia decrece significativamente a partir de las 1000 horas. Por el contrario, el material RLC1 (comercial con 3 capas de pintura) muestra una gran resistencia a la corrosión, siendo el número de puntos de corrosión mucho menor y mostrando una reflectancia significativamente mayor durante todo el ensayo.

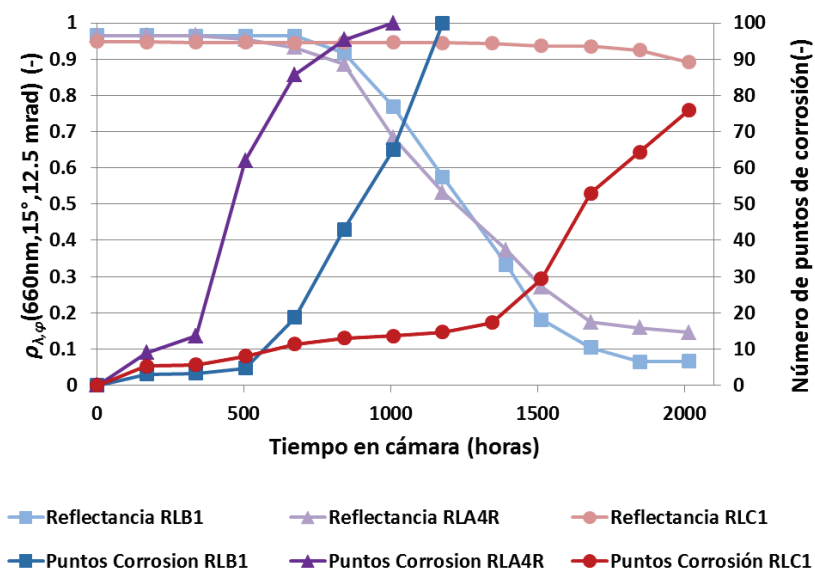


Fig. 5. Evolución de la reflectancia y del número de puntos de corrosión de las muestras RLB1, RLC1 (reflectores solares comerciales) y RLA4R (nuevo prototipo de reflector solar) tras 2000 horas en el ensayo CASS.

Los resultados obtenidos en el test cíclico UV+H-CASS se exponen en la Fig. 6. Los colores y formas geométricas representan los mismos valores que en la Fig. 5. Al igual que en la gráfica anterior, se observa que al aumentar el número de puntos de corrosión, la reflectancia disminuye. En cuanto a los materiales, RLA4R y RLB1 son los reflectores que más se degradan y ambos muestran un comportamiento muy parecido entre ellos. De la misma manera que en la Fig. 5, el material con 3 capas de pintura (RLC1) logra los mejores resultados tanto en la reflectancia especular como en el número de puntos de corrosión. Respecto a los materiales con dos capas de pintura, el reflector RLA4R muestra un comportamiento ligeramente mejor que su homólogo RLB1. El motivo de dicha mejora podría residir en el mayor espesor de las capas de pintura (ver sección Materiales Reflectores). Por consiguiente, se puede intuir que el número de capas de pintura que protegen la capa reflectora y su espesor podrían ser 2 de los principales factores a tener en cuenta para garantizar la durabilidad de los reflectores en ambientes salinos.

Comparando las Fig. 5 y Fig. 6 se aprecia claramente que el test CASS produce una mayor degradación, tanto en número de puntos de corrosión como en caída de la reflectancia, que el ensayo combinado de UV+H-CASS. Estas diferencias entre ambos ensayos son debidas a que durante la etapa de UV+H, los reflectores se afectan mucho menos que en CASS. Visualmente, esta menor contribución se puede percibir al examinar la tendencia exponencial del número de puntos de corrosión y la caída de reflectancia durante los ensayos CASS (Fig. 5) y UV+H-CASS (Fig. 6). En la Fig. 5 se puede apreciar que la reflectancia decrece y que el número de puntos de corrosión aumentan exponencialmente durante todo el ensayo (especialmente en los materiales RLA4R y RLB1). Sin embargo, durante el UV+H-CASS test se observa que existen periodos en los que los puntos de corrosión no aumentan o aumentan escasamente (por ejemplo, desde 1008 a 1176 horas o desde 1344 a 1512 horas), y que la reflectancia disminuye más lentamente (por ejemplo, desde 1680 a 1848 horas). Durante estos periodos de tiempo tuvo lugar una etapa de UV+H. Por lo tanto, se puede concluir que la degradación mayoritaria en ambientes salinos provendrá de la corrosión de la plata provocada por la penetración de agentes corrosivos a través de las pinturas y no por efectos causados por la radiación UV+H. En consecuencia, si se va a analizar la durabilidad de reflectores que se van a exponer en sitios próximos a la costa, es recomendable realizar el ensayo CASS individual ya que la degradación por UV+H es despreciable en comparación con la causada por la corrosión. Asimismo, los reflectores solo estuvieron sometidos a radiación UV durante 504 horas en el ensayo UV+H-CASS, siendo la dosis total de radiación UV que recibieron las muestras 24 kW/m^2 (entre 290 y 400 nm). Esta cifra es muy inferior a la alcanzada en Almería tras 1 año de exposición (70 kW/m^2 (entre 290 y 400 nm)), por consiguiente, para simular la radiación que recibirán los reflectores durante 20 años de exposición en Almería, serían necesarias demasiadas horas de ensayo UV+H-CASS.

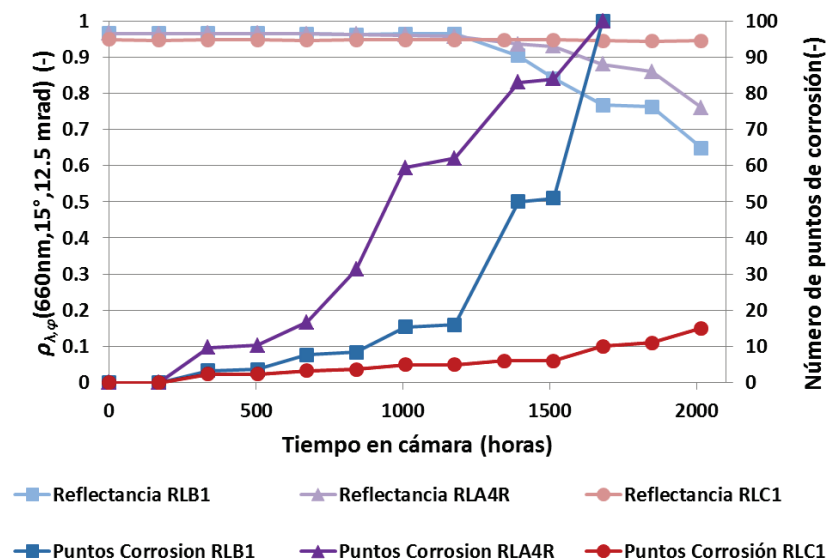


Fig. 6. Evolución de la reflectancia y el número de puntos de corrosión de las muestras RLB1, RLC1 (reflectores solares comerciales) y RLA4R (nuevo prototipo de reflector solar) tras 2000 horas en el ensayo UV+H-CASS.

CONCLUSIONES

En este artículo se ha puesto de manifiesto que el principal mecanismo de degradación ocurrido en reflectores expuestos en ambientes salinos es la corrosión de la capa de plata. Se han abordado diferentes ensayos de

envejecimiento acelerado para tratar de reproducir los mismos defectos observados en intemperie, siendo el ensayo CASS el más apropiado. De igual manera, se ha evaluado la durabilidad de 3 tipos de reflectores (con un número de capas de pintura protectoras y espesores diferentes) para conocer cuál de los reflectores es más resistente frente a la corrosión. De este ensayo, se ha deducido que el espesor de las pinturas y el número de capas de pintura utilizadas en los reflectores solares podrían ser 2 parámetros a tener en cuenta para aumentar la durabilidad de éstos en lugares con alta corrosión, aumentando su vida útil cuanto mayor es el número de capas y su espesor.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto español SOLTERMIN (Ref. ENE2017-83973-R) financiado por el Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación orientada a los Retos de la Sociedad (National Program of Research, Development and Innovation oriented to Society's Challenges) del Ministerio de Economía y Competitividad (Spanish Ministry of Economy and Competitiveness) que ha permitido la realización del trabajo incluido en este artículo.

REFERENCIAS

- Montoya F.G., Aguilera M.J. and Manzano-Agugliaro F. (2014). Renewable energy production in Spain: a review. *Renew. Sustain. Energy. Rev.* 33, 509-531. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.091>
- Tsoutsos T., Frantzeskaki N., Gekas V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy.* 33, 289-296. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00241-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00241-6)
- Tian Y., Zhao C.Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal. *Appl. Energy.* 104, 538–553. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051>
- IEA. (2014). Technology Roadmap: Solar Thermal Electricity. Available online: <https://webstore.iea.org/technology-roadmap-solar-thermal-electricity-2014>.
- IRENA. (2012). International Renewable Energy Agency, Renewable energy technologies: cost analysis series. Concentrating solar power. 1-17.
- Mills D. (2004). Advances in solar thermal electricity technology. *Sol Energy.* 76(1–3), 19–31. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00102-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00102-6).
- Heller P. (2017). The performance of concentrated solar power (CSP) systems: analysis, Chap 3: Mirrors, Measurement and Assessment, pp.67–98.
- Palenzuela P., Alarcón-Padilla D.C., Zaragoza G. (2015). Large-scale solar desalination by combination with CSP: Techno-economic analysis of different options for the Mediterranean Sea and the Arabian Gulf. *Desalination.* 366, 130-138. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.037>
- UNE 206016:2018. Paneles reflectantes para tecnologías de concentración solar.
- García-Segura A., Fernández-García A., Ariza M.J., Sutter F., Valenzuela L. (2016). Durability studies of solar reflectors: A review, *Renew Sustain Energy Rev.* 62, 453-467. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.060>
- ISO 9223:2012. Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification, determination and estimation.
- Buendía-Martínez F., Fernández-García A., Sutter F., Martínez-Arcos L., Reche-Navarro T., Garcia-Segura A., Valenzuela L. (2020). Uncertainty study of reflectance measurements for concentrating solar reflectors. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 69, 7218-7232. doi: 10.1109/TIM.2020.2975387.