

C-02-2021

Comunicación científico-técnica

Aumento de la durabilidad de láminas de PVC-P utilizadas para la impermeabilización de balsas de riego con tecnologías de lacado

Climent Vicent, Pau, Moreno Marín, Francisco José, Murillo Silva, Claudio, Hans Tanghe

¹ Renolit Ibérica S.A.; Pau.Climent@renolit.com

Resumen: Las geomembranas de PVC-P se han utilizado para impermeabilizar obras hidráulicas desde los años 40 del siglo XX. En España, las balsas para riego agrícola han sido uno de los campos en los que se ha utilizado este material con mayor profusión. Las barreras geosintéticas han permitido construir balsas impermeables con unos costes muy competitivos y unos niveles de seguridad elevados, pero en ciertos casos con una vida útil limitada, por lo que la durabilidad de los materiales se ha convertido en una cuestión clave a la hora de asegurar la viabilidad de los proyectos de construcción de balsas. A día de hoy, existe un stock importante de láminas instaladas en balsas con 30 y 40 años de antigüedad, lo cual ha permitido (1) conocer los principales procesos de degradación de estos materiales e (2) introducir mejoras en el diseño y fabricación de estos materiales. La tecnología de lacado, consistente en la aplicación de una fina película en la superficie de la lámina, ha permitido aumentar la durabilidad de las geomembranas de PVC de manera radical. Ensayos de envejecimiento acelerado demuestran que la aplicación de estas lacas puede llegar a doblar la vida útil de la lámina, ya que son capaces de desacelerar distintos procesos de degradación. Las balsas de Llanos de Mesa y Valle Molina, en la isla de Tenerife, han adoptado esta tecnología, lo cual ha permitido a sus propietarios disponer de garantías de hasta 20 años de duración, maximizando el retorno de la inversión y resultando en una mayor eficiencia en el uso de recursos.

Palabras clave: impermeabilización, geomembranas, láminas, balsas, durabilidad, lacado

C-02-2021

Scientific-technical communication

Durability extension in PVC-P liners used for waterproofing irrigation reservoirs with lacquering technology

Climent Vicent, Pau, Moreno Marín, Francisco José, Murillo Silva, Claudio, Hans Tanghe

¹ Renolit Ibérica S.A.; Pau.Climent@renolit.com

Abstract: PVC-P geomembranes have been used to waterproof hydraulic works since the 1940s. In Spain, agricultural irrigation reservoirs has been one of the fields in which this material has been used with greatest profusion. Geosynthetic barriers have enabled the construction of watertight reservoirs with very competitive costs and high levels of safety, but in certain cases with a limited service life, so the durability of the materials has become a key issue when appraising the viability of reservoir construction projects. To date, there is an important stock of liners installed in rafts 30 and 40 years old, which has allowed (1) to understand the main degradation processes of these materials and (2) to introduce improvements in the design and manufacturing of these materials. Lacquering technology, consisting of the application of a thin film on the surface of the sheet, has made it possible to radically increase the durability of PVC geomembranes. Accelerated aging tests show that the application of these lacquers can double the useful life of the sheet, since they are capable of slowing down different degradation processes. The Llanos de Mesa and Valle Molina rafts, on the island of Tenerife, have adopted this technology, which has allowed their owners to have guarantees of up to 20 years, maximizing the return on investment and resulting in a greater efficiency in the use of resources.

Keywords: waterproofing, geomembranes, liners, ponds, reservoirs, durability, lacquering, coating

1. Geomembranas para impermeabilización de balsas: cómo y por qué se degradan

La construcción de balsas ha acompañado el desarrollo humano desde el neolítico, con los primeros asentamientos humanos en comunidades agrícolas y ganaderas. El motivo fundamental de la construcción de balsas es la gestión del recurso hídrico: almacenar agua permite disponer de ella dónde y cuándo se necesita, con independencia de los regímenes fluviales, pluviales o cualquiera sea la fuente de aportación. En la actualidad la razón de ser de las balsas sigue siendo la misma, aunque la manera de construirlas es completamente distinta. La aparición de los materiales plásticos, capaces de crear una barrera impermeable con muy poco espesor, revolucionó la construcción de balsas, ya que permitió construir balsas sin necesidad de emplazarlas en terrenos de baja permeabilidad o de utilizar soluciones de impermeabilización complejas con materiales naturales, como la argamasa o los paquetes de arcilla [1]. El uso de materiales sintéticos, producidos en condiciones controladas, permitió también un control de calidad más exhaustivo y suprimió la heterogeneidad de prestaciones asociada al uso de materiales naturales como las arcillas, que eventualmente resultó en mayores niveles de seguridad para la balsa.

Alrededor de 1940 se empezaron a utilizar láminas de PVC plastificado (PVC-P) y otros polímeros como elemento impermeable en la construcción y renovación de obras hidráulicas [2]. Desde entonces el uso de dichos materiales, conocidos en la actualidad como geomembranas, se ha perfeccionado y tecnificado hasta convertirse en un elemento fundamental en las obras hidráulicas modernas, con infinidad de casos de éxito en los que las láminas llevan décadas en uso con un perfecto funcionamiento [3-5].

Las geomembranas pueden estar formuladas con distintos polímeros, pero todos ellos comparten una problemática: son compuestos orgánicos que se degradan y pierden propiedades con el tiempo [6]. En el caso de las geomembranas de PVC, el proceso de degradación es más complejo que en otros materiales, puesto que su envejecimiento no depende solamente de la degradación del polímero, sino también de la pérdida de plastificante [7]. Cuando hablamos de geomembranas de PVC, en realidad nos referimos a geomembranas de PVC plastificado (PVC-P), en contraposición al PVC rígido o no plastificado (PVC-U) utilizado en múltiples aplicaciones de uso común, como las cañerías domésticas. Con la adición de los plastificantes se consigue un producto flexible, con gran capacidad de adaptación al soporte y excelentes propiedades mecánicas, pero cuando éste se pierde el PVC recupera su estado rígido. Así pues, la degradación de las láminas de PVC depende de:

- Degradación de la resina de PVC: en el caso del PVC se trata de una deshidrocloración, y para que este proceso tenga lugar debe haber aporte de oxígeno y energía. En geomembranas utilizadas en balsas, esto puede suceder durante la soldadura de la lámina si la temperatura es excesiva, pero sobretodo como consecuencia de la exposición a la radiación solar de la parte de la lámina que queda expuesta en los taludes de la balsa. Durante este proceso, se produce una escisión de las cadenas poliméricas, por lo que el polímero pierde peso molecular y reduce sus prestaciones. La manifestación más clara de este proceso es la aparición de fisuras superficiales en la lámina, así como un cambio de color hacia tonos más amarillentos. El remedio típico utilizado en la industria para mitigar este fenómeno ha sido la aditivación con estabilizantes.
- Pérdida de plastificante: el proceso general consiste en una migración del plastificante desde el interior de la lámina hacia el medio externo, que en una balsa puede ser el agua (parte sumergida) o el aire (parte emergida). Además, ciertos microorganismos pueden también extraer el plastificante. La velocidad con la que se da este fenómeno depende de varios factores, entre ellos el tipo de plastificante, las condiciones ambientales, el espesor de la lámina, etc. La principal consecuencia, como se ha comentado, es la rigidización de la

lámina, que se vuelve más frágil y más susceptible a la rotura; aunque también da lugar a una retracción isotrópica por la pérdida de masa asociada a la pérdida de plastificante. Para reducir la pérdida de plastificante la solución tradicional ha sido una buena selección de plastificantes, buscando por un lado una baja solubilidad y por otro una tipología poco proclive a la extracción por microorganismos.

Aunque se trata de mecanismos de degradación distintos, estos dos procesos ocurren de manera simultánea en láminas utilizadas en balsas de riego, que es el objeto de este artículo. La experiencia ha demostrado que, en la mayoría de casos, la degradación de las partes emergida y sumergida tiene un comportamiento distinto:

- En la parte sumergida el agua reduce el aporte de radiación solar, por lo que el polímero prácticamente no sufre degradación, pero sí tiene lugar una pérdida de plastificante. En plastificantes lineales utilizados por algunos fabricantes en el pasado sí se observaron pérdidas importantes por solubilidad [9], pero hoy en día no suele ser un mecanismo dominante. Los estudios realizados en aplicaciones no expuestas demuestran que láminas de PVC correctamente formuladas con plastificantes de alto peso molecular pueden retener concentraciones de plastificante elevadas durante cientos de años [10], manteniendo su flexibilidad y prestaciones. No obstante, en la parte sumergida de balsas sí cobra mayor importancia la extracción de plastificante por microorganismos.
- En la parte emergida, cercana a la coronación de taludes, es donde la lámina acostumbra a presentar mayor nivel de degradación. Esto se debe a que en esta zona sí tiene lugar ambos procesos de degradación simultáneamente. La radiación solar aporta energía necesaria para la degradación del polímero y a la vez hace que la lámina alcance mayor temperatura, lo cual acelera la pérdida de plastificante por evaporación. La temperatura es un factor que influye drásticamente en la velocidad a la que se dan estas reacciones [11].

2. La tecnología de lacado y su efecto en geomembranas de PVC-P

El uso de láminas sintéticas para impermeabilización no es ni mucho menos exclusivo de las balsas de riego. La experiencia adquirida por RENOLIT en la impermeabilización de otras aplicaciones expuestas como piscinas y cubiertas, ha permitido aplicar al campo de las balsas el uso de tecnologías innovadoras para aumentar la durabilidad de las geomembranas de PVC.

Los mecanismos de degradación arriba expuestos han sido ampliamente estudiados y la industria ha ido encontrando soluciones, principalmente incorporando aditivos a la formulación: estabilizantes térmicos para evitar la degradación, pigmentos para modificar la temperatura de la lámina, biocidas, etc. Aunque estos aditivos sin duda consiguen efectos beneficiosos, su introducción lleva aparejada un aumento de coste y en ocasiones efectos secundarios en forma de pérdida de prestaciones, por lo que la cantidad de aditivos siempre ha tenido unas concentraciones máximas admisibles. Otra solución clásica para aumentar la durabilidad de las láminas ha sido aumentar su espesor. Como regla general, doblar el espesor de una lámina doblaría también su vida útil, pero esto también tiene un impacto significativo en el coste del producto.

En este contexto, en el que la limitación en el uso de aditivos impedía obtener grandes mejoras en la durabilidad de las láminas, RENOLIT desarrolló el uso de lacas. La tecnología de lacado consiste en la aplicación de una fina capa en la superficie de la lámina durante su producción, quedando ésta permanentemente unida a la lámina de PVC propiamente dicha. Esta capa, al ser de un material diferente al de la lámina, permite la utilización de materiales con propiedades distintas, que mejoran las prestaciones de esta.

En lo que concierne a la durabilidad de la lámina, los principales efectos de las lacas desarrolladas por RENOLIT son tres:

1. Efecto barrera: al estar aplicada en la superficie, la laca crea una barrera que permite alterar las condiciones con las que la lámina interactúa con el medio. Este aspecto es fundamental, ya que todos los mecanismos de degradación expuestos arriba tienen lugar siempre a través de la interface que supone la superficie de la lámina.
2. Absorción de UV: debido a la composición del material de base de la laca, es posible añadir una mayor concentración de pigmento, que permiten aumentar la protección contra la radiación ultravioleta (UV). Dentro del espectro de la radiación solar, la radiación UV es la que aporta mayor cantidad de energía, por lo que es la parte del espectro que más influye en el proceso de degradación.
3. Reducción de la temperatura: el material con el que se producen estas lacas permite no sólo aumentar la concentración de pigmento, sino además utilizar otros tipos más innovadores. Para conseguir una buena absorción de UV la solución tradicional pasaba por el uso de negro de humo. Este pigmento, utilizado también en otras geomembranas como las de polietileno o polipropileno, permite absorber gran cantidad de UV, pero debido a su color oscuro aumenta también la temperatura de la lámina. Por el contrario, el uso de pigmentos minerales alternativos ha permitido mantener las propiedades de absorción de UV a la vez que aumentar la reflexión de la parte infrarroja (IR) del espectro solar, mejorando así la capacidad de reflexión y reduciendo la temperatura de la lámina. Ante el ojo humano, una lámina gris claro clásica y una lámina gris claro lacada tienen exactamente la misma apariencia pero, a igualdad de condiciones, la temperatura de la lámina lacada es significativamente inferior (hasta 10°C en horas centrales del día en Barcelona). Esta reducción de la temperatura tiene un efecto claro: la lámina se degrada más lentamente.

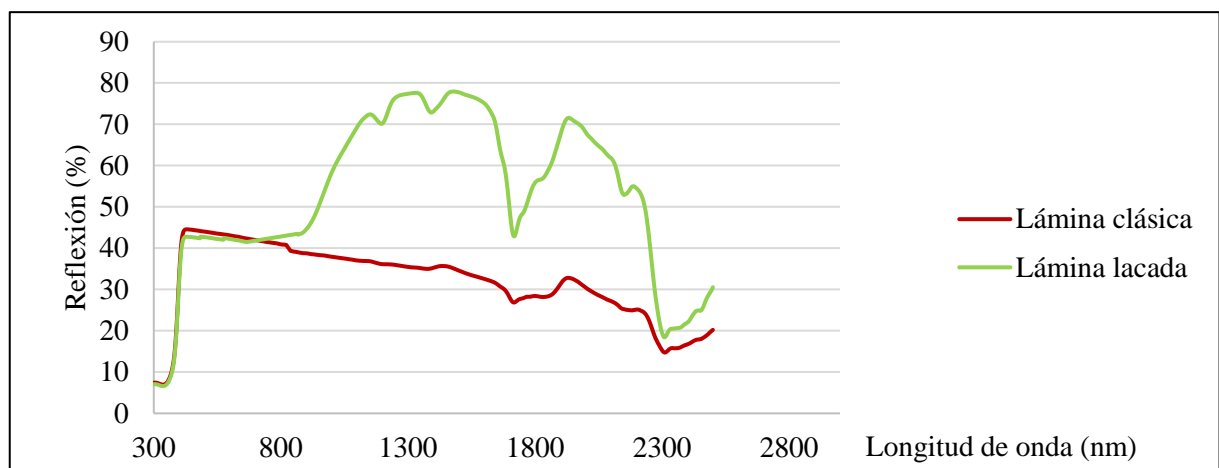


Figura 1. Espectros de reflexión de una lámina clásica de color gris claro y una equivalente con laca

Además, cabe destacar que las lacas se aplican en condiciones controladas en fábrica, no necesitan ningún tipo de mantenimiento (más allá del de la propia lámina) y no afectan las condiciones ni la calidad de la soldadura.

3. Resultados

3.1. Envejecimiento acelerado en laboratorio

La degradación de las geomembranas utilizadas en la impermeabilización de balsas es un proceso que, si se trata de productos adecuadamente formulados, tiene lugar durante décadas hasta que el producto alcanza el final de su vida útil. Existe abundante bibliografía que recoge casos de éxito en los que las geomembranas han estado (o siguen estando) en uso después de 40 años [3-5].

Para poder simular estos procesos en un intervalo de tiempo más reducido, se han venido desarrollando ensayos de laboratorio de envejecimiento acelerado. Estos ensayos tratan de simular las condiciones de degradación que ocurren en el medio natural mediante la aplicación intensificada de alguno/s de los factores que originan la degradación (p.e. temperatura, humedad, espectro de la radiación,...). La última versión de la norma EN 13361, que regula el marcado CE para geomembranas utilizadas en balsas [12], recoge en su Anexo A un resumen de los ensayos más adecuados para cada tipo de geomembrana. Cabe mencionar que, aunque los ensayos de envejecimiento acelerado permiten conocer en un menor tiempo el comportamiento del producto frente a ciertas acciones, dicha intensificación los hace más agresivos que la realidad, alterando en ocasiones los procesos de degradación. Así pues, los resultados siempre deben interpretarse con cautela y en base a un análisis crítico, idealmente contrastado y calibrado con casos reales.

El ensayo de proliferación de microorganismos según la norma EN 12225, permite conocer la velocidad con la que ciertos microorganismos pueden extraer el plastificante. En la figura de abajo se compara la efectividad del uso de biocidas con la de la aplicación de una laca de tan sólo 5 µm de espesor a la hora de prevenir este proceso, y se comprueba que la laca es mucho más efectiva en el largo plazo, ya que reduce la pérdida de peso por extracción de plastificante al crear un efecto barrera.

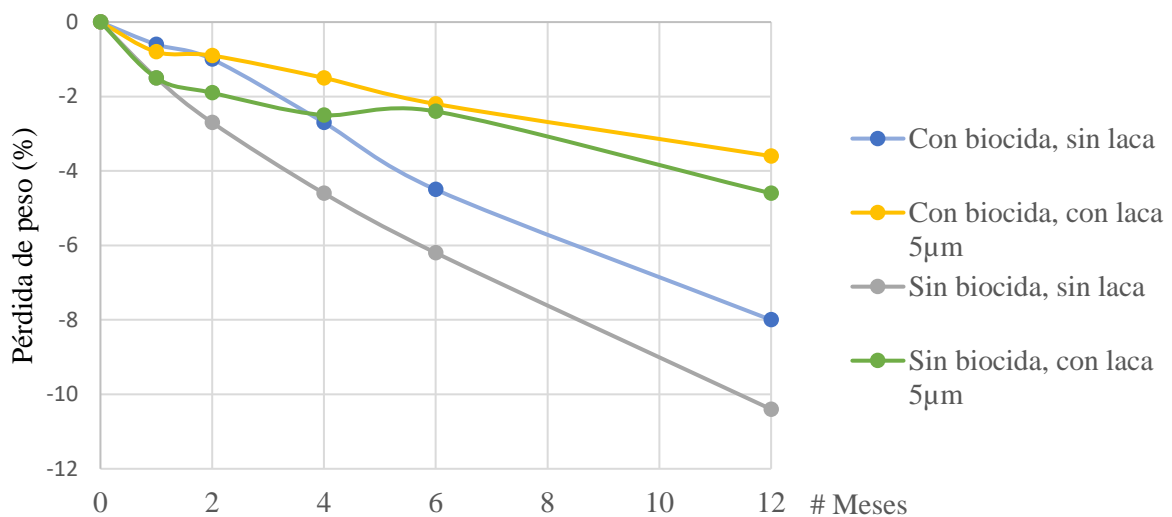


Figura 2. Pérdida de plastificante en ensayo de proliferación de microorganismos según EN 12225

Por otro lado, el ensayo 2 SUN se ha convertido en uno de los más avanzados de la industria a la hora de determinar el envejecimiento de geomembranas sometidas a la radiación solar. Este ensayo consiste en la aplicación de luz, calor y también tiene la opción de aplicar ciclos de humedad, lo cual somete a las láminas a condiciones de envejecimiento especialmente severas. En la normativa [12] se propone el ensayo EN 12224 para determinar la resistencia a la radiación UV, pero el 2 SUN presenta grandes ventajas sobre este otro ensayo, por utilizar lámparas de Xenon y por someter a la lámina a

radiación continuada. Con carácter general, se puede estimar que 1000h de exposición en el ensayo 2 SUN equivaldrían a 2-3 años de uso en una balsa en el sur de Europa.

En el gráfico inferior se comparan los resultados obtenidos para una misma lámina con y sin laca. Se observa que la laca reduce la velocidad con la que se produce la pérdida de plastificante, de manera que transcurridas 5000 horas ($\approx 10-15$ años) la pérdida de plastificante en una lámina lacada es un 40% menor respecto a una normal. Además, las lámparas Xenon utilizadas en el ensayo 2 SUN emiten menos radiación infrarroja que la radiación solar real, por lo que cabe pensar que la diferencia en condiciones de operación puede ser aún mayor.

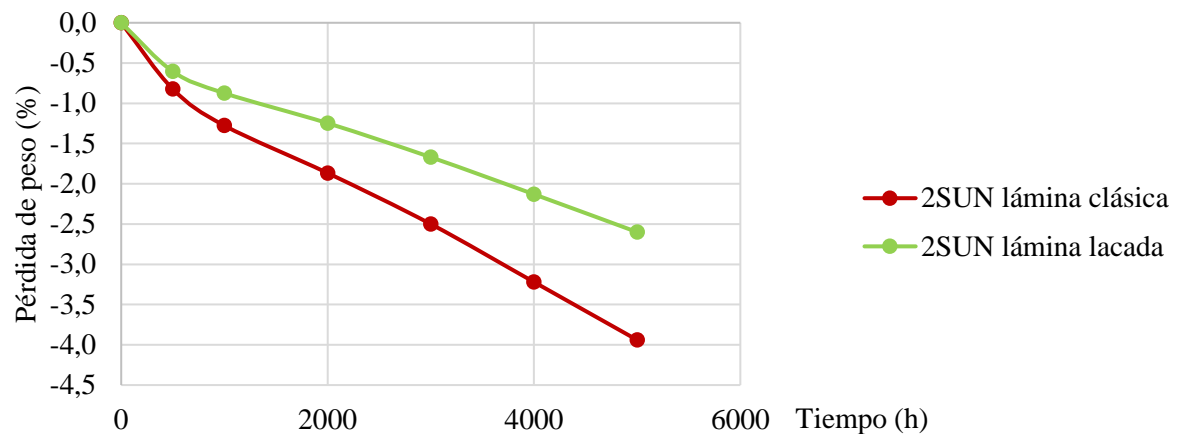


Figura 2. Pérdida de plastificante en láminas de 1.2mm de color gris claro en el ensayo de 2SUN

3.2. Resultados de campo, la experiencia en Canarias

Más allá de los resultados de laboratorio, las láminas incorporando tecnología de lacado ya han recorrido un cierto camino en aplicaciones reales. Por ejemplo, las láminas lacadas se han venido utilizando para la impermeabilización de piscinas desde hace más de 20 años, y para impermeabilización de cubiertas desde hace más de 10 años. En el ámbito de las obras hidráulicas, los primeros proyectos en incorporar dicha mejora estuvieron vinculados a centrales hidroeléctricas, en los cuales se incorporó el lacado para aumentar la durabilidad de la lámina en geografías con radiación solar severa como Oriente Medio. Este tipo de lacado se conoce como “tecnología de escudo solar” o SST por sus siglas en inglés (Solar Shield Technology).

En balsas de riego, la primera experiencia en España con tecnología SST se llevó a cabo en el año 2019, durante la re-impermeabilización de la Balsa de Valle Molina, en Tenerife. Esta balsa se construyó en 1985, contando para la impermeabilización del vaso con una lámina de PVC-P de 1,5 mm. Tras más de 30 años en servicio, la lámina instalada en la parte superior de los taludes había dado signos de envejecimiento, pero la lámina de la parte inferior de los taludes y del fondo presentaba aun unas propiedades aceptables. Así pues, la propiedad (BALTEN) decidió acometer una re-impermeabilización parcial de la balsa, conservando las zonas en buen estado y renovando únicamente las más deterioradas.

Dado que la lámina original había tenido una durabilidad muy elevada, la propiedad se interesó por las mejoras tecnológicas disponibles en el mercado para conseguir maximizar la vida útil de la nueva geomembrana. La experiencia de RENOLIT en las islas Canarias permitió desarrollar la conocida como formulación Barlovento, con una durabilidad contrastada en balsas situadas en el exigente clima subtropical del archipiélago. La combinación de la formulación Barlovento, junto con la aplicación de las lacas SST permitió ofrecer garantías extendidas con un periodo de validez de **15** años. Tal como se

aprecia en la fotografía inferior, se instalaron unos 28.000 m² de lámina RENOLIT ALKORPLAN Hydro R de 1,5 mm armada con malla de poliéster, en color gris claro y con tecnología de lacado SST en el anillo superior de la balsa.



Figura 3. Vista de la balsa de Valle Molina tras la re-impermeabilización parcial, nótese el cambio de tonalidad entre la lámina original en el fondo y la nueva en el anillo superior.

La balsa de Llanos de Mesa, también en Tenerife, tiene una capacidad de 176.000 m³ y 15 m de columna de agua, se construyó entre 1986 y 1989 y se impermeabilizó con una lámina de PVC de 1,5 mm que había llegado ya al final de su vida útil. En el año 2020 BALTEN sacó a concurso público la re-impermeabilización total de la balsa. En el lote correspondiente al suministro de material se incluyó un criterio que valoraba la extensión de la garantía desde el periodo base de 10 años. Gracias a la tecnología de lacado SST y a la experiencia adquirida, RENOLIT fue capaz de ofrecer una garantía de 20 años para sus láminas RENOLIT ALKORPLAN Hydro R y RF de 1,5 mm. En este caso, se trataba de una lámina armada con malla de poliéster en el fondo (8.000 m²) y un geocompuesto en los taludes (19.000 m²), que incorporaba un geotextil de polipropileno laminado en su parte trasera, ambas con tecnología SST.

Aunque el lapso de tiempo transcurrido desde la instalación de estas geomembranas es aún demasiado corto para extraer conclusiones, la experiencia hasta el momento ha sido muy positiva y los resultados iniciales auguran un comportamiento muy favorable. Además, la propiedad puede ahora tener la confianza que la durabilidad de la lámina está avalada no sólo por los resultados de una innovación tecnológica, sino también por una garantía del fabricante.



Figura 4. Balsa de Llanos de Mesa durante su re-impermeabilización. Se aprecia como el fondo y parte de los taludes no están aún impermeabilizados.

4. Conclusiones

Tras haber sido desarrollada en otros ámbitos, la tecnología de lacado ha llegado por fin a las geomembranas de PVC-P utilizadas para la impermeabilización de obras hidráulicas. La aplicación de la laca tiene un triple efecto sobre la lámina: crea un efecto barrera, mejora la absorción de UV y reduce la temperatura. Con estos efectos se consigue tanto reducir la desplastificación en las zonas sumergidas como combatir los efectos de la radiación solar en las zonas expuestas, consiguiendo así una extensión de la vida útil de la lámina de entre un 40% y un 100% comparado con las correspondientes láminas tradicionales.

Estas mejoras en la durabilidad de la geomembrana son rápidamente aprovechables por los propietarios de las balsas donde se aplican, ya que permiten ofrecer garantías de hasta 20 años incluso en climas severos, reduciendo así el riesgo de las inversiones. Ya existen en España dos grandes balsas impermeabilizadas con láminas lacadas con tecnología SST y con su correspondientes garantías extendidas.

De cara a posibles futuras innovaciones, la protección superficial ofrecida por la tecnología de lacado podría permitir una reducción de espesor de la lámina para conseguir una misma vida útil objetivo. En cualquiera de los dos casos (i.e. mismo producto con mayor durabilidad o producto menos grueso para una misma vida útil) esta innovación representa una mayor eficiencia en el uso de recursos, en consonancia con las estrategias marcadas por los Objetivos de Desarrollo Sostenible [13], con los que tanto las balsas de riego como sus geosintéticos deberán alinearse.

Referencias

1. De Cea J C, 2021, Curso de seguridad de balsas para regadío. Proyecto, diseño, construcción, explotación y rehabilitación de balsas de tierra, CICCOP
2. Koerner R M, 2012, Designing with Geosynthetics - 6th Edition Vol. 1, Xlibris

3. Cazzuffi D and Giofrè D, 2020, Lifetime assessment of exposed PVC-P geomembranes installed on Italian dams *Geotextiles and Geomembranes* **48** (2020) 130–136
4. Blanco M et al., 2016, Evolution over time of PVC-P Geomembrane used at Barlovento Reservoir, *EuroGeo 6 Proceedings*, p 631-641
5. Blanco M et al, 2018, Durability of Reinforced PVC-P Geomembranes installed in Reservoir in Easter Spain, *Geosynthetics International*, 2018, **25**, No. 1
6. Scheirs J., 2000, *A Guide to Polymeric Geomembranes*, Wiley Series in Polymer Science
7. Fayoux D and Van Der Sype D, 2000, Durability of PVC-P Geomembranes, Assessment after very long UV Exposure, *Euro-Geo 2*
8. Blanco M et al, 2016, Performance of Geomembranes seldom used un Hydraulic Works, installed in the experimental field of El Saltadero, *EuroGeo 6 Proceedings*, p 417-426
9. Crespo M., et al. 2017, Performance throughout 30 years of the PVC-P geomembrane installed in 'La Florida' reservoir, *GeoAfrica 2017*
10. Benneton J P, 1994, PVC-P Geomembranes Behaviour in a Ten-Year Water Laboratory Test, 5th International Conference in Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapore, 5-9 September 1994
11. R. M. Koerner, Y. G. Hsuan and G. R. Koerner, 2016, Lifetime Predictions of Exposed Geotextiles and Geomembranes, *Geo-Americas 2016*
12. UNE EN 13361:2018 Barreras geosintéticas. Requisitos para su utilización en la construcción de embalses y presas.
13. Touze N, 2021, Healing the world, a geosynthetics solution, *Geosynthetics International*, **28**, No.1