



MACCAFERRI

INFORME TÉCNICO

Influencia del ambiente en la
durabilidad de los elementos de
malla hexagonal de doble torsión

Obras hidráulicas

Referencia

IT-DT-001

Desarrollado por

Paula Tayná de Lima

Revisado por

Jaime da Silva Duran

Petrucio Santos Junior

R0.2025

RESUMEN

1.	INTRODUCCIÓN	2
2.	LA MALLA METÁLICA HEXAGONAL DE DOBLE TORSIÓN.....	3
2.1.	GAVIÓN TIPO CAJA	3
2.2.	TERRAMESH®	4
2.3.	COLCHÓN RENO®	5
2.4.	GAVIÓN TIPO SACO.....	6
2.5.	RENOMAC®	7
2.6.	USO DE ELEMENTOS DE MHDT EN OBRAS HIDRÁULICAS	8
3.	INFLUENCIA DEL AMBIENTE EN LA MHDT.....	9
3.1.	INFLUENCIA DE LA VEGETACIÓN ESPONTÁNEA	9
3.2.	INFLUENCIA DE LA ATMÓSFERA	11
3.3.	INFLUENCIA DE LOS CAUCES DE AGUA	13
4.	REVESTIMIENTO METÁLICO	15
4.1.	TIPOS DE REVESTIMIENTO METÁLICO	16
4.2.	DURABILIDAD DE LOS REVESTIMIENTOS METÁLICOS.....	16
4.3.	OTROS TIPOS DE MALLA METÁLICA.....	19
5.	REVESTIMIENTO POLIMÉRICO	20
5.1.	RESISTENCIA QUÍMICA	21
5.2.	RESISTENCIA A LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA.....	23
5.3.	RESISTENCIA A BAJAS TEMPERATURAS	26
5.4.	RESISTENCIA A LA ABRASIÓN	26
6.	CONSIDERACIONES ADICIONALES PARA EL USO DE RPA	28
6.1.	EVENTOS IMPREDECIBLES Y MANTENIMIENTO	28
6.2.	HOMOGENEIDAD DE LA ESTRUCTURA.....	28
6.3.	RECUBRIMIENTO CON MORTERO U HORMIGÓN	28
6.4.	IMPORTANCIA DEL RPA EN MUROS DE SUELO REFORZADO	29
6.5.	IMPORTANCIA DEL RPA EN MUROS DE GAVIONES	29
7.	POLIMAC DE ACUERDO CON LAS NORMAS.....	31
7.1.	EN BS 10223-3:2013.....	31
7.2.	ASTM A975:2024.....	31
7.3.	ABNT NBR 8964:2024.....	32

7.4.	ANALOGÍA CON LOS PROYECTOS DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN.....	32
8.	CONCLUSIÓN.....	34
9.	REFERENCIAS.....	35

1. INTRODUCCIÓN

La red de malla metálica hexagonal de doble torsión (Figura 1) es un material muy utilizado en la fabricación de productos destinados a la construcción de obras geotécnicas e hidráulicas. Está compuesta por alambres de acero con bajo contenido de carbono que se someten a un proceso de galvanizado y, cuando se especifica, reciben un revestimiento polimérico adicional, como se ilustra en la Figura 2.



Figura 1 | Malla metálica hexagonal de doble torsión sobre piedra de cantera

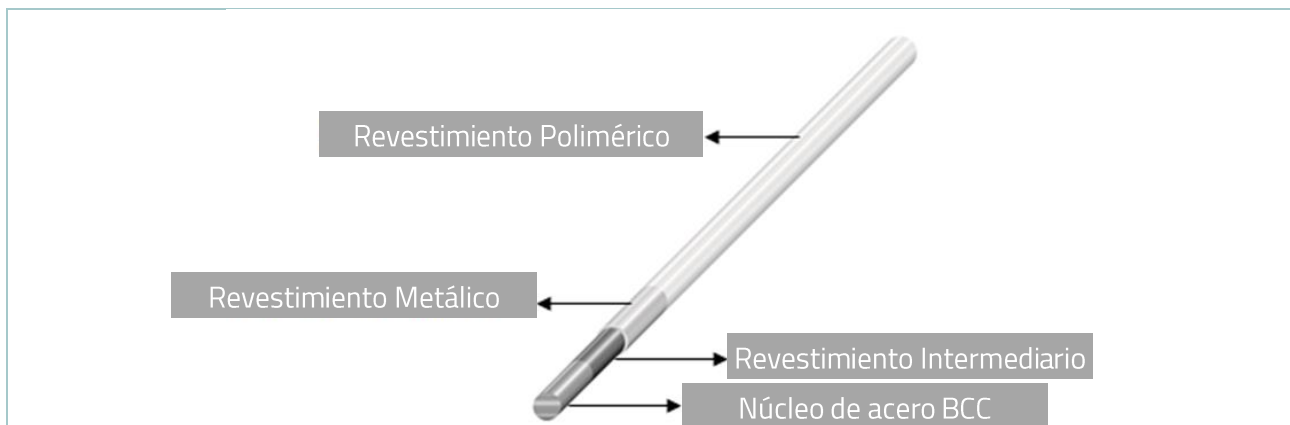


Figura 2 | Composición de alambre de malla metálica hexagonal de doble torsión con revestimiento de polímero adicional

La elección del tipo de revestimiento metálico y el revestimiento polimérico influyen directamente en cómo el producto de malla hexagonal se verá influenciado por el medio en el que se aplique. A continuación, se presentarán algunos tipos de soluciones de malla hexagonal de doble torsión y cuáles son los agentes ambientales que pueden afectar su desempeño. Más adelante, se presentará cómo cada tipo de revestimiento puede alargar la vida útil de las estructuras.

2. LA MALLA METÁLICA HEXAGONAL DE DOBLE TORSIÓN

La Malla Hexagonal de Doble Torsión (MHDT) se utiliza en la fabricación de elementos de diferentes tipos aplicados en obras hidráulicas. Algunos ejemplos son: Gavión tipo caja, Terramesh®, Colchón Reno®, Gavión tipo saco y RenoMac®.

2.1. GAVIÓN TIPO CAJA

Los Gaviones tipo caja son elementos prismáticos rectangulares producidos a partir de paneles de MHDT (Figura 3). Están subdivididos en células por diafragmas que los refuerzan y tienen bordes formados por hilos de diámetro mayor que los de la malla, reforzando su estructura y facilitando el montaje e instalación de los elementos.

Cuando se instala y se llena con material idóneo¹, los gaviones se convierten en elementos estructurales resistentes, flexibles, drenantes, con el peso adecuado para ser utilizados en la construcción de muros de contención por gravedad (Figura 4), que en el caso de las obras hidráulicas se suelen aplicar a las canalizaciones y a las protecciones de márgenes.

Además de muros, los gaviones tipo caja se pueden utilizar con otras funciones en obras hidráulicas, tales como: escalones para la disipación de la energía del agua, presas para la retención del flujo, revestimiento de cuencos de disipación o como elemento de anclaje.



Figura 3 | Gavión tipo caja



Figura 4 | Muro de contención por gravedad

¹ Material idóneo: Piedras seleccionadas, cantos, entre otros. Dichos materiales no pueden ser contaminantes o friables y deben presentar resistencia química, dimensiones y peso específico adecuados al proyecto.

2.2. TERRAMESH®

Para la construcción de estructuras de contención con mayores alturas, se pueden utilizar los elementos Terramesh® System o Terramesh® Verde para suelos reforzados (mecánicamente estabilizados). Estos elementos están formados por la asociación de un refuerzo metálico de MHDT con una cara frontal. El conjunto de cara/refuerzo está formado por una sola red de malla.

Los elementos Terramesh® System (Figura 5) tienen una cara que se asemeja a un gavión tipo caja, cuyo llenado debe realizarse con piedras (Figura 6) quienes también deben identificarse como material idóneo¹. El refuerzo metálico, que es un elemento continuo de la cara frontal, se extiende hacia el suelo y puede ir acompañado de geomallas según las condiciones previstas en el proyecto.



Figura 5 | Terramesh® System



Figura 6 | Muro de contención de Terramesh® System

O Terramesh® Verde (Figura 7), por otro lado, no tiene la cara llena de material pétreo, estando totalmente llena de suelo. Su cara está formada por una geomanta o una biomanta fijada entre la malla metálica que forma los anclajes y la cara del elemento y una segunda malla que ayuda a estructurar la cara.



Figura 7 | Terramesh® Verde

Estos elementos en conjunto confinan el suelo y contribuyen al crecimiento de la vegetación previamente seleccionada que constituirá la cara vegetada de la estructura (Figura 8).



Figura 8 | Muro de contención de Terramesh® Verde

2.3. COLCHÓN RENO®

El Colchón Reno® (Figura 9), también conocido como Gavión tipo colchón o colchogavión se subdivide en celdas por diafragmas fijadas a la base durante el proceso de fabricación, aumentando así la rigidez y la resistencia a las tensiones hidráulicas impuestas a la solución. La tapa del Colchón Reno® se entrega por separado y debe instalarse después de que se haya llenado la base.

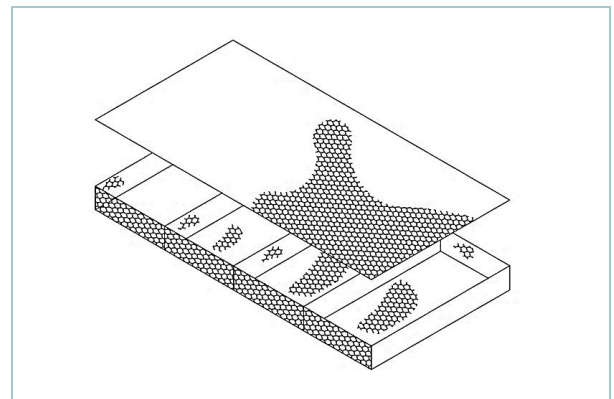


Figura 9 | Esquema del Colchón Reno®

A diferencia del Gavión tipo Caja, el Colchón Reno® tiene una altura (espesor) pequeña con relación a las demás dimensiones de la pieza. Esta característica permite su uso como revestimiento y protección superficial para evitar o mitigar el proceso erosivo, tal y como ocurre en las obras de protección de márgenes (Figura 10).



Figura 10 | Revestimiento de margen con Colchón Reno®

En muros de contención de márgenes de cauces de agua, los Colchones Reno® se aplican en toda su región inferior, por lo general (Figura 11). En estos casos, los colchones actúan como una plataforma antisocavante que protege la base de la estructura durante la ocurrencia de procesos erosivos del lecho, adaptándose a la nueva topografía.



Figura 11 | Muro con plataforma de colchón

2.4. GAVIÓN TIPO SACO

El Gavión tipo saco (Figura 12) se produce a partir de un solo panel de MHDТ, que se enrolla, se amarra, se llena y se cierra, para luego ser izado y transportado al lugar definitivo de su aplicación, lo que hace que este tipo de gavión sea ampliamente aplicado en obras de emergencia y/o en la construcción de estructuras con presencia de tirantes de agua que dificultan el uso de otras soluciones.



Figura 12 | Gavión tipo saco

El Gavión tipo saco se suele instalar en una o varias capas hasta alcanzar el nivel medio de agua durante el periodo de ejecución de la obra y, sobre estas capas, se construye el muro de contención de Gavión tipo caja (Figura 13).



Figura 13 | Muro de contención de Gaviones tipo caja apoyado sobre una base de Gaviones tipo saco

2.5. RENOMAC®

El RenoMac® (Figura 14) es un material similar al Colchón Reno®, también con base y tapa separadas, pero con la adición de otros elementos durante la etapa de producción, lo que lo hace apto para la instalación con presencia de tirante de agua, es decir, su montaje y relleno se realizan en el sitio de construcción y posteriormente este material se iza e instala en la ubicación final determinada en el proyecto. Para operaciones de izaje (Figura 15), el RenoMac® ya se entrega de fábrica con asas de acero incorporadas en las paredes y diafragmas de la pieza.

El geotextil no tejido ya está incorporado en la base del RenoMac® además de un panel de MHDT adicional que, junto con el geotextil, tiene dimensiones superiores a la base del colchón con el fin de permitir el traslape entre diferentes piezas, asegurando la continuidad del revestimiento.

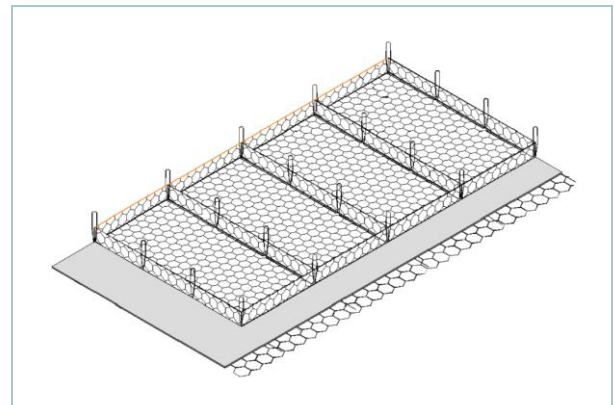


Figura 14 | Esquema de la base del RenoMac®



Figura 15 | RenoMac® izado para instalación

2.6. USO DE ELEMENTOS DE MHDT EN OBRAS HIDRÁULICAS

Combinados entre sí, los diferentes elementos de MHDT pueden componer varios tipos de estructuras hidráulicas para la mitigación o recuperación de procesos erosivos y/o control de inundaciones, como se ejemplifica en la Figura 16.



Para el correcto funcionamiento de los elementos de MHDT en obras hidráulicas, además de realizar los análisis geotécnicos e hidráulicos adecuados, es necesario verificar su composición y resistencia frente a los agentes agresivos de los ambientes de este tipo de aplicación.

3. INFLUENCIA DEL AMBIENTE EN LA MHDT

Se presentarán los principales agentes que pueden influir en la durabilidad de los elementos de MHDT: vegetación espontánea, atmósfera (agresividad atmosférica) y flujos en cauces de agua (agresividad hidráulica).

3.1. INFLUENCIA DE LA VEGETACIÓN ESPONTÁNEA

Los elementos de MHDT son permeables por sus características intrínsecas y su material de llenado, que los hace autodrenantes. La permeabilidad de las soluciones de MHDT permite el alivio del empuje hidrostático además de la comunicación del cauce de agua con su planicie. Esta última característica, además de permitir la infiltración del agua del cauce en el suelo o viceversa, puede ayudar en la amortización del caudal al inicio de la crecida, mitigando o retrasando la ocurrencia de inundaciones.

Además de las ventajas mencionadas anteriormente, las características relacionadas con la permeabilidad/porosidad de los elementos de MHDT hacen con que ellos presenten condiciones favorables para el crecimiento de la vegetación (Figura 17). El viento y la propia escorrentía superficial del agua pueden transportar partículas de suelo y semillas que se depositan en los vacíos entre las piedras, provocando el crecimiento espontáneo de la vegetación, especialmente en regiones con climas tropicales, como ejemplifica la Figura 18.



Figura 17 | Ilustración del Colchón Reno® vegetado con flujo de agua a través del sistema



Figura 18 | Fotos de un canal revestido con Colchón Reno® en Jundiaí-SP, Brasil en (a)2014 y (b)2017

A diferencia de las estructuras altamente rígidas, las soluciones de MHDT se benefician del crecimiento de la vegetación, en términos de aumento de su estabilidad hidráulica (mayor confinamiento de las piedras) y mayor estabilidad geotécnica (refuerzo natural de la estructura), lo que favorece su funcionamiento a largo plazo. Debido al aumento de la rugosidad, la vegetación ayuda a reducir la velocidad y mitigar los problemas de inundación aguas abajo, sin embargo, puede favorecer la ocurrencia de inundaciones en la región donde está presente, y aguas arriba. Para verificar tal riesgo, es importante realizar los análisis hidráulicos, comparando las diferentes rugosidades. Si la alta rugosidad es problemática para la obra en cuestión, es posible cortar o eliminar la vegetación, o incluso, aplicar mortero en la cara expuesta de los gaviones para evitar el crecimiento de la vegetación y fijar la rugosidad.

Además de aumentar la estabilidad hidráulica y geotécnica de la estructura del elemento de MHDT, la vegetación puede contribuir a aumentar su durabilidad al reducir la exposición del alambre a agentes agresivos del ambiente. Esta condición se puede observar en la primera obra de gaviones modernos que forma parte de la historia de Maccaferri: la obra para contener la margen del Río Reno después de su desbordamiento a finales del siglo XIX (Figura 19). Después de más de un siglo, el margen sigue estable e integrado con el ambiente (Figura 20a), con la presencia de malla metálica de esta época (Figura 20b), todavía de simple torsión, aún con una tecnología de protección mucho menor que de la actualidad.

En resumen, es posible afirmar que, en general, la vegetación aumenta la resistencia de los elementos de MHDT, contribuyendo a su vida útil.



Figura 19 | Obra del Río Reno con gaviones en 1894



(a)

(b)

Figura 20 | (a) Obra del Río Reno con gaviones en 2016; (b) Presencia de malla en la obra del Río Reno

3.2. INFLUENCIA DE LA ATMÓSFERA

A diferencia de la vegetación espontánea, se puede decir que la atmósfera aporta más daño que beneficio a la vida útil de las obras de ingeniería con productos de MHDT. Ella es la gruesa capa de aire que rodea la tierra y está compuesta por una mezcla de gases, vapor de agua y material particulado en suspensión (MIRANDA, 2012). Cada uno de estos componentes puede afectar la vida útil de los materiales metálicos a través del proceso de corrosión.

Según PANNONI (2015), la corrosión es un fenómeno natural en el que se produce el deterioro de un material, como resultado de reacciones químicas y electroquímicas con su entorno. Este proceso ocurre con los materiales metálicos por razones energéticas: al transformar los minerales en elementos metálicos de uso general, se produce un gran consumo de energía, por lo tanto, cuando estos metales se exponen al medio ambiente, tienden a volver a su estado natural de menor energía con la oxidación del metal (en el caso del acero, ocurre la formación de óxido).

La corrosión atmosférica (Figura 21), la forma más importante de corrosión uniforme, provoca una pérdida de masa uniforme en toda la superficie metálica (PANNONI, 2015), la cual está influenciada por factores condicionantes del clima local y elementos aéreos, como gases y sales.

Los factores climáticos son los que influirán en el tiempo de humectación del metal, que es el tiempo que el metal se queda cubierto por una película de agua capaz de corroer el material. Algunos de ellos son: la humedad relativa, la lluvia, la niebla, el rocío, la temperatura (del aire y de la superficie metálica), el viento y la luz solar. Se puede decir que cuanto mayor sea la humedad relativa, mayor será el potencial de corrosión del metal (PANNONI, 2015).



Figura 21 | Vehículo con carrocería metálica en proceso de corrosión atmosférica

Cuando se trata de gases, el oxígeno en sí (O_2) presente en la atmósfera es un electrolito fundamental para la mayoría de los procesos de corrosión (PANNONI, 2015). Sin embargo, hay otros gases importantes en el proceso corrosivo, uno de ellos es el dióxido de azufre (SO_2), que es adsorbido por el metal (deposición seca) o eliminado por precipitación (deposición húmeda). El dióxido de azufre se origina principalmente en la quema de combustibles fósiles y, por lo tanto, está generalmente presente en las regiones industrializadas y en las grandes ciudades, como se puede ver en la Tabla 1.

TABLA 1 – TASAS DE DEPOSICIÓN DE SO₂ EN DIFERENTES ATMÓSFERAS (PANNONI, 2015)

TIPO DE ATMOSFERA	VELOCIDAD DE DEPOSICIÓN ($\mu\text{g SO}_2 \text{ m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$)
Rural	< 10
Urbana	10 – 100
Industrial	≤ 200

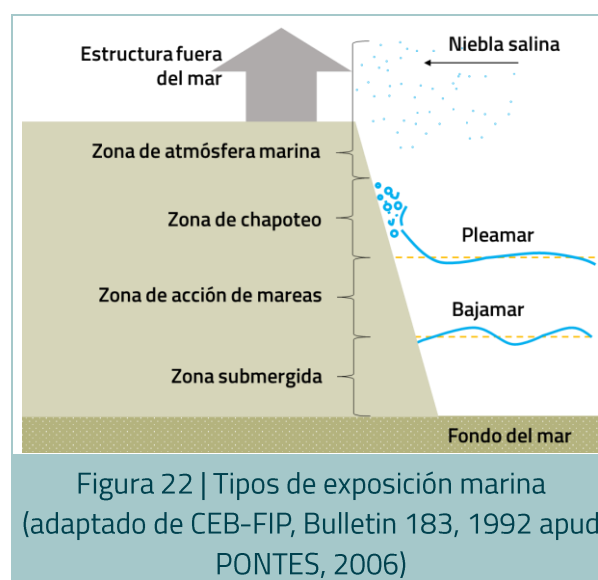
Otros gases pueden influir en la corrosión de los materiales metálicos, como el NO₂ (Ej.: emisiones de tráfico vehicular), CO₂ (Ej.: quema de combustibles fósiles, etc.), H₂S (Ej.: agricultura, industria de papel y celulosa, etc.), entre otros.

En las regiones costeras, existe otra cuestión que debe ser tomada en cuenta en los proyectos con materiales metálicos: la mayor presencia de cloruros (Cl⁻) (PANNONI, 2015). Los cloruros son transportados a través de gotas o cristales formados por el mar (Figura 22), por el rompimiento de las olas o por la evaporación de la niebla salina transportada por el viento y se depositan por gravedad sobre superficies metálicas, cuando no son retenidos por obstáculos en la región de la costa, como edificios, árboles o el propio relieve topográfico.

Cuando llegan a las superficies metálicas, los cloruros promueven un aumento considerable en la tasa de corrosión. La tasa de deposición de cloruro tiene una amplia variación relacionada con varios factores (posición geográfica, viento, etc.).

Para proteger el acero de la MHDT de la corrosión atmosférica, el alambre debe recibir un revestimiento metálico protector.

Los diferentes revestimientos metálicos tienen diferentes tiempos de vida útil, como se presentará en el ítem 4. En algunos casos, la agresividad atmosférica puede ser tan alta que requiere un revestimiento polimérico adicional.



El ítem 5 presenta los diferentes revestimientos poliméricos y cómo cada uno puede influir en el desempeño a largo plazo de los elementos MHDT.

3.3. INFLUENCIA DE LOS CAUCES DE AGUA

La presencia de diferentes factores hace que las aguas en contacto con las obras hidráulicas tengan una constitución química compleja, algunos de los cuales son: gases disueltos, materia orgánica, sustancias químicas y sedimentos abrasivos (Figura 23).

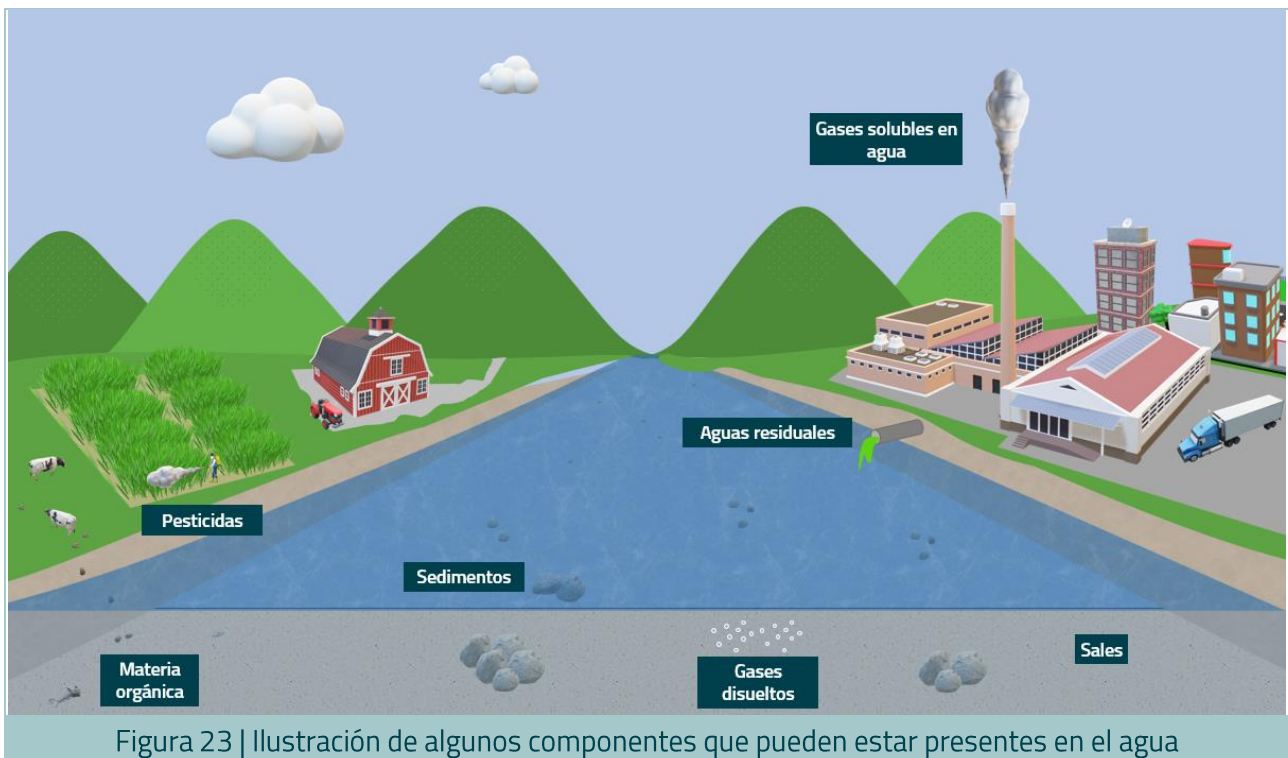


Figura 23 | Ilustración de algunos componentes que pueden estar presentes en el agua

Entre los gases disueltos, se puede encontrar el propio dióxido de azufre (SO_2) que es altamente soluble en agua y está presente en la atmósfera debido a la quema de combustibles fósiles (PANNONI, 2015). Otro gas es el dióxido de carbono (CO_2) que también tiene una alta solubilidad en agua, y además de estar presente en la propia atmósfera, puede llegar al agua a través de la presencia de materia orgánica de origen vegetal o animal, ya sea producida en el propio medio acuático, o sea introducida por vertido (por ejemplo, aguas residuales domésticas) o arrastrada por escorrentía superficial. Estos y otros gases disueltos influyen en el proceso corrosivo de los metales.

Son varias las fuentes de sustancias químicas que también forman parte de este complejo compuesto que es el agua de cauces naturales y suelen estar relacionadas con actividades industriales, agrícolas o de consumo humano, aunque el agua reciba tratamiento. De acuerdo con TORDIN (2018), en 2012 se hicieron más comunes en Brasil los estudios sobre contaminantes emergentes, que son productos tóxicos que no se remueven mediante procesos tradicionales de tratamiento del agua para consumo humano, tales como: medicamentos de diversas composiciones, bactericidas, insecticidas, alguicidas, herbicidas, productos de limpieza e higiene personal, productos de cloración, entre otros materiales que, además de empeorar la calidad del

agua para el consumo humano, pueden convertirla en un medio más desafiante para los materiales de ingeniería en general.

Según ALFREDINI et al. (2009), el transporte de sólidos depende de las condiciones hidráulicas, hidrometeorológicas, sedimentológicas, geomorfológicas, de la cobertura vegetal de las cuencas hidrográficas y de la influencia antropogénica. La acción del agua (que varía el clima) y la acción antrópica son los elementos que provocan o influyen directamente en la erosión que moviliza los sedimentos disponibles para el transporte (Figura 24).



Figura 24 | Ejemplo de un cauce de agua natural con sedimentos de diferentes tamaños que pueden ser transportados por el flujo

Los sedimentos que pueden ser limo, arena o roca causan abrasión hidráulica, desgastando la superficie de los materiales que encuentran en el camino durante su transporte (PINHO, 2006). Vale la pena enfatizar que el proceso abrasivo no es exclusivo de los elementos de MHDT. El hormigón, por ejemplo, es un material que puede soportar altas velocidades de flujo de agua solo durante varios años sin ningún problema. Sin embargo, con la presencia de sólidos en suspensión que impactan en su superficie, el hormigón tiene una vida útil reducida dependiendo de las condiciones hidráulicas y de los materiales transportados (PINHO, 2006). AGUIAR et al. (2011) presentan la situación de varias estructuras de hormigón utilizadas en galerías de agua de lluvia deterioradas por diversos procesos, uno de ellos es la abrasión.

En resumen, en los ambientes acuáticos puede haber diferentes agentes de degradación química y mecánica que hacen que los ambientes hidráulicos sean generalmente más agresivos que la atmósfera, haciendo que solo la protección metálica de los elementos de MHDT sea insuficiente, lo que lleva a la necesidad de del revestimiento polimérico adicional del alambre. En el ítem 5 se presentan los diferentes revestimientos poliméricos y cómo se comporta cada uno frente a diferentes agentes ambientales, influyendo en el desempeño a largo plazo de los elementos de MHDT.

4. REVESTIMIENTO METÁLICO

El revestimiento metálico del alambre (Figura 25) utilizado en la fabricación de elementos de MHDT tiene como principal objetivo protegerlos, retrasando el proceso corrosivo y aumentando su vida útil.



Figura 25 | Malla hexagonal de doble torsión compuesta de alambre de acero galvanizado con bajo contenido de carbono

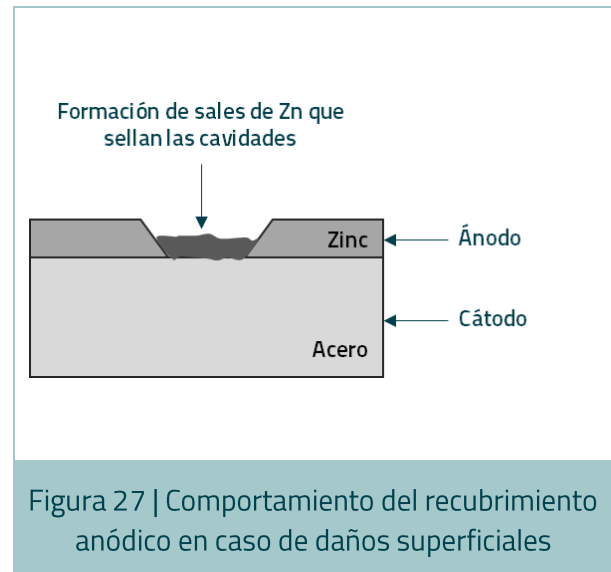
Antes del proceso de fabricación de la MHDT, entre otros pasos de producción, el alambre pasa por un proceso de galvanizado en caliente y se recubre con un metal o aleación metálica con una composición diferente a la del núcleo.

Diferentes metales tienen diferentes potenciales de corrosión. La Figura 26 presenta una serie de metales ordenados desde el menos noble (más anódico) hasta el más noble (más catódico). Es decir, un material es siempre menos noble y más anódico (o menos noble y catódico) y más propenso a la corrosión que los materiales colocados a su derecha en la Figura 26.

Mg y sus aleaciones	Zinc	Al comercialmente puro	Cadmio	Acero-carbono Aluminio 2024	Acero patinable	Hierro fundido	Plomo	Estaño	Níquel	Plata	Titanio	Grafito	Oro
← Menos nobles							Más nobles →						

Figura 26 | Serie galvánica en agua marina (PANNONI, 2015)

Por lo tanto, para que el recubrimiento metálico del alambre funcione eficazmente como protección contra la corrosión en un par galvánico, debe estar hecho de un metal o aleación metálica que sea menos noble que el acero en el núcleo. Un ejemplo de un metal ampliamente utilizado como revestimiento protector es el zinc (Zn). El zinc funciona precisamente como un ánodo de sacrificio, es decir, se corroe para preservar el núcleo de acero. Los productos densos y adherentes que se originan en la corrosión del zinc cubren las porosidades y los pequeños defectos del revestimiento (Figura 27).



Es posible decir que cuanto mayor sea el gramaje, es decir, el espesor del revestimiento metálico protector, mayor será la durabilidad del material.

4.1. TIPOS DE REVESTIMIENTO METÁLICO

El uso del zinc como revestimiento metálico es una técnica antigua presente en la industria (desde principios del siglo XX) y ha sufrido un proceso de mejora a lo largo del tiempo con el objetivo de aumentar aún más su durabilidad. Alrededor de los años 90, Maccaferri comenzó a utilizar el revestimiento metálico compuesto por 95% de zinc y 5% de aluminio con la adición de tierras raras (*mischmetal*).

El aluminio funciona como barrera de pasivación, es decir, en contacto con el aire produce una película protectora para el alambre. Las tierras raras se utilizan como aditivo de aleación para el zinc y el aluminio. Combinados entre sí, estos elementos aportaron un gran avance en la resistencia de las soluciones de MHDT frente a la agresividad atmosférica.

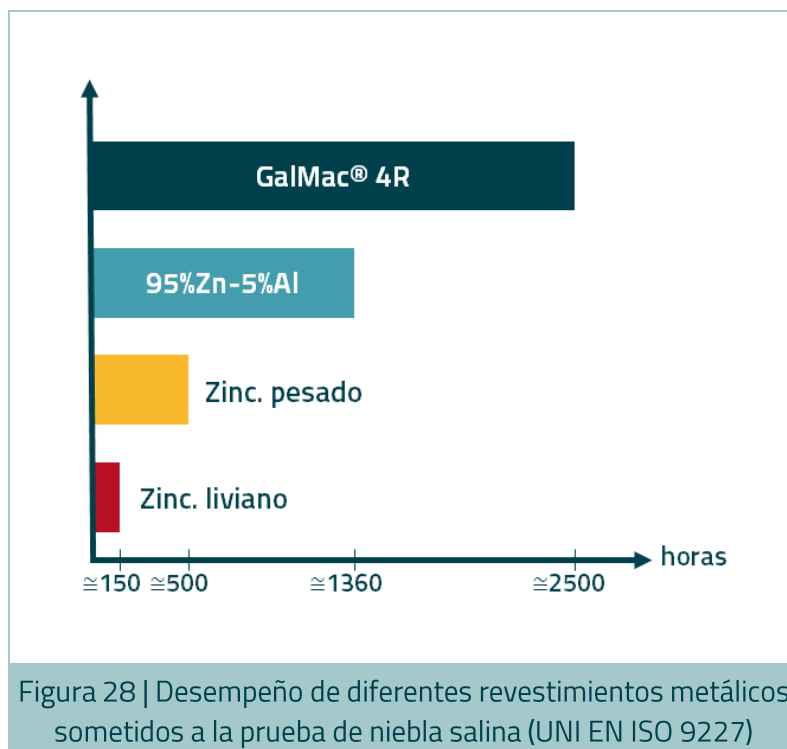
En 2015, después de un continuo proceso de investigación y desarrollo, Maccaferri lanzó un revestimiento metálico aún más resistente: GalMac® 4R, compuesto por 90% de zinc y 10% de aluminio más tierras raras.

4.2. DURABILIDAD DE LOS REVESTIMIENTOS METÁLICOS

Para comparar la resistencia a la corrosión de diferentes revestimientos metálicos, es posible realizar la prueba según la norma UNI EN ISO 9227 - *Corrosion tests in artificial atmospheres. Salt spray tests* (Ensayos de corrosión en atmósferas artificiales. Pruebas de niebla salina). En esta prueba, el material recubierto con un determinado metal o aleación metálica se expone a un ambiente húmedo y se contamina mediante un rociado de agua con cloruro de sodio

(niebla salina) y se mide el número de horas necesarias para obtener una cierta proporción de la superficie del material ensayado, con señales de corrosión.

La Figura 28 presenta la diferencia de comportamiento entre las cuatro generaciones de revestimientos metálicos de Maccaferri. Es posible observar que el GalMac® 4R (90%Zn-10%Al) es, actualmente, el revestimiento metálico de mayor durabilidad para soluciones de MHDT contra la agresividad atmosférica. Otro modo de confirmar esa afirmación es a través de la norma BS EN 10223-3:2013 – *Steel wire and wire products for fencing and netting – Part 3: Hexagonal steel wire mesh products for civil engineering purposes*.



La norma BS EN 10223-3:2013 especifica las dimensiones, las propiedades de los revestimientos de alambre, los métodos de prueba y las condiciones de entrega de los productos de MHDT. Entre sus anexos, la citada norma presenta la variación de la vida útil según el tipo de protección del alambre y el nivel de agresividad atmosférica del ambiente, en base a otra norma, a UNI EN ISO 9223:2012 – *Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation*.

La norma UNI EN ISO 9223:2012, a su vez, establece un sistema de clasificación de la corrosividad de los ambientes atmosféricos. A partir de la velocidad de corrosión obtenida a partir de muestras de diferentes metales expuestas durante un año a una atmósfera determinada y con funciones matemáticas para proyectar la velocidad de corrosión en los años siguientes, la norma permite categorizar la corrosividad de un ambiente determinado, clasificando su nivel de agresividad que varía de muy bajo a extremo. Las variables atmosféricas consideradas en esta clasificación son: temperatura, humedad, concentración de dióxido de azufre y salinidad del aire.

Ciertamente, la norma BS EN 10223-3:2013 proporciona una base para estimar la vida útil del producto válida solo para una parte de las posibles aplicaciones de gaviones (obras no hidráulicas) y considera solo el dióxido de azufre como gas corrosivo, mientras que existen otros gases que pueden influir en el proceso de corrosión, como se menciona en el ítem 3.2. Sin embargo, es una buena referencia para verificar la diferencia de desempeño entre revestimientos metálicos, como se muestra en la Tabla 2, según las normas BS EN 10223-3:2013 y UNI EN ISO 9223:2012.

TABLA 2 – VIDA ÚTIL ESPERADA PARA EL PRODUCTO EN FUNCIÓN DEL NIVEL DE AGRESIVIDAD ATMOSFÉRICA DEL AMBIENTE DE APLICACIÓN DE LA OBRA (NO HIDRÁULICA) – SEGÚN LAS NORMAS BS EN 10223-3:2013 Y UNI EN ISO 9223:2012

NÍVEL DEL AMBIENTE	REVESTIMIENTO ¹	VIDA ÚTIL ESPERADA PARA EL PRODUCTO (AÑOS) ²
Agresividad baja (C2) Zona templada, ambiente atmosférico con baja polución ($\text{SO}_2 < 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ej.: zonas rurales, pequeñas ciudades (más de 100 m sobre el nivel del mar). Zona seca o fría, ambiente atmosférico con un corto período de humedad, ej.: desiertos, zonas subárticas.	Zinc Aleación 95%Zn-5%Al Aleación 90%Zn- 10%Al (GalMac® 4R)	25 > 50 > 120
Agresividad media (C3) Zona templada, ambiente atmosférico con polución media (SO_2 : $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$) o algún efecto de los cloruros, ej.: zonas urbanas, zonas costeras con baja deposición de cloruros. Zona subtropical y tropical, atmósfera con baja polución ($\text{SO}_2 < 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$).	Zinc Aleación 95%Zn-5%Al Aleación 90%Zn- 10%Al (GalMac® 4R)	10 25 > 50
Agresividad alta (C4) Zona templada, ambiente atmosférico con alta polución (SO_2 : $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$) o efecto sustancial de los cloruros, ej.: zonas urbanas contaminadas, zonas industriales, zonas costeras sin <i>spray</i> de agua salada, exposición a fuertes efectos de sales de deshielo. Zona subtropical y tropical, atmósfera con polución media (SO_2 : $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$).	Aleación 95%Zn-5%Al Aleación 90%Zn- 10%Al (GalMac® 4R)	10 25
Agresividad muy alta (C5) Zona templada y subtropical, ambiente atmosférico con muy alta polución (SO_2 : $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y/o efecto importante de los cloruros, ej.: zonas industriales, zonas costeras, posiciones protegidas en la zona costera.	Está indicado el uso de revestimiento metálico de aleación zinc-aluminio con revestimiento polimérico adicional	
Agresividad extrema (CX) Zona subtropical y tropical (período de humedad muy alto), ambiente atmosférico con polución muy alta de SO_2 (superior a $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y/o fuerte efecto cloruro, por ejemplo, zonas extremadamente industrializadas, zonas costeras de contacto ocasional con niebla salina.		

Notas:

¹: Revestimiento de clase A que respeta el gramaje mínimo establecido en la norma BS EN 10224-2 (ej.: $230 \text{ g}/\text{m}^2$ para alambre de 2,4 mm de diámetro y $245 \text{ g}/\text{m}^2$ para alambre de 2,7 mm de diámetro). Para gramajes más pequeños, se pueden esperar tiempos de vida útil más cortos.

²: Tiempo referido al material en función de sus características técnicas sin considerar la influencia del análisis del proyecto, lugar de uso, procedimientos de instalación y mantenimiento, y por lo tanto no puede interpretarse como una garantía del tiempo de uso del producto en obra.

Con base en la Tabla 2, es posible afirmar que cuando los diferentes revestimientos metálicos están expuestos a las mismas condiciones:

- ✓ El revestimiento de zinc puro solo se considera para ambientes de agresividad baja a media;
- ✓ El GalMac® 4R es al menos dos veces más duradero que la aleación 95%Zn-5%Al;
- ✓ El GalMac® 4R es, aproximadamente, cinco veces más duradero que el revestimiento de zinc puro;
- ✓ Regiones tropicales, aunque estén alejadas de la urbanización y de las zonas industriales, se consideran automáticamente, como mínimo, como ambientes de agresividad media (C3)
- ✓ Los ambientes de agresividad muy alta (C5) y agresividad extrema (CX) requieren un revestimiento polimérico adicional.

Atención



Para que el producto funcione de manera uniforme y tenga la durabilidad esperada, hay la necesidad de que los dispositivos de conexión (alambre de amarre o anillos de cierre) utilizados para ensamblar y unir las piezas tengan la misma composición que la malla.

4.3. OTROS TIPOS DE MALLA METÁLICA

Se puede afirmar que las propiedades intrínsecas del alambre, relevantes para su durabilidad frente a la corrosión atmosférica, son la composición y cantidad de revestimiento protector, independientemente si la malla es hexagonal de doble torsión, u otro formato, como la malla de simple torsión y la malla electrosoldada. Asimismo, los agentes agresivos mencionados en el ítem 3 influyen en el desempeño de cualquier malla metálica, independientemente de su formato. Esta información está confirmada por la norma BS EN 10223-8:2013 – *Steel wire and wire products for fencing and netting - Part 8: Welded mesh gabion products* que presenta la variación de la vida útil según el tipo de protección del alambre y el nivel de agresividad atmosférica del ambiente para mallas electrosoldadas. Se puede observar que la malla electrosoldada protegida con la aleación 95%Zn-5%Al, por ejemplo, presenta los mismos tiempos de vida útil que la MHDT, de acuerdo con los ambientes de aplicación, presentados en la Tabla 2.

Sin embargo, desde el punto de vista estructural y de comportamiento en relación con los esfuerzos derivados de las acciones de las cargas y fuerzas que actúan sobre la estructura construida, cada malla presenta su propio comportamiento, con una marcada ventaja para la MHDT debido a su flexibilidad y comportamiento homogéneo, frente a diferentes tipos de esfuerzos de tracción.

5. REVESTIMIENTO POLIMÉRICO

El alambre galvanizado, una vez terminado, puede ser dirigido directamente a la producción de la MHDT o puede pasar por un proceso de extrusión para recibir el recubrimiento (Figura 29) de un revestimiento polimérico adicional (RPA) el cual tiene como objetivo aumentar la vida útil de las piezas, retrasando su proceso corrosivo y abrasivo. La práctica del uso de revestimientos poliméricos tradicionales comenzó alrededor de los años 60, especialmente en obras hidráulicas, debido a la mayor velocidad de corrosión del alambre en tales condiciones.



Figura 29 | Elemento de MHDT con revestimiento adicional polimérico instalado en obra (llenado con piedras)

Actualmente, la norma BS EN 10223-3:2013 indica la necesidad de RPA para determinados ambientes, aunque no sean hidráulicos, con el fin de aumentar la durabilidad del alambre. A partir del nivel de agresividad media (C3), la norma BS EN 10223-3:2013 estima una vida útil de alrededor de 120 años para el material (obras no hidráulicas) con el uso de RPA. Es importante destacar que, tras la publicación de esta norma, el RPA también ha pasado por un proceso de evolución y su selección también debe tener en cuenta factores relacionados con el ambiente.

Durante varias décadas, el PVC flexible (cloruro de polivinilo) fue el RPA más utilizado en los elementos de MHDT. Sin embargo, como ya se ha comentado sobre la evolución del revestimiento metálico, el revestimiento polimérico también requería una nueva formulación para mejorar su comportamiento. Desde hace algunos años, Maccaferri ha estado reemplazando el PVC por el PoliMac®, una nueva tecnología de protección con mejor desempeño. El PoliMac® es un revestimiento cuya matriz polimérica está compuesta principalmente por polietileno de alta densidad (PEAD) modificado y presenta por lo general mayor resistencia que el PVC frente a agentes agresivos del ambiente.

Al evaluar inicialmente la principal materia prima utilizada en cada tipo de RPA, es posible analizar su morfología. Según NUNES et al. (2006), el PVC se considera un polímero amorfo (ausencia total de orden entre las moléculas) o de baja cristalinidad. El polietileno (PE), por su parte, se considera un polímero de alta cristalinidad, es decir, con moléculas alineadas (VERTEMATTI, 2004).

Cuanto mayor sea la cristalinidad del polímero, más aumentarán algunas de sus propiedades, como la resistencia química y la resistencia a la abrasión (VERTEMATTI, 2004).

A continuación, serán presentadas las principales diferencias entre PVC y PoliMac® en términos de: resistencia química, resistencia a la radiación UV, resistencia a las bajas temperaturas y resistencia a la abrasión.

5.1. RESISTENCIA QUÍMICA

Como se presentó en los ítems 3.2 y 3.3, hay varios componentes presentes en la atmósfera y el agua que pueden influir en el proceso corrosivo del alambre de los elementos de MHDT. El uso del RPA es una técnica utilizada para aumentar la protección del alambre como una barrera adicional contra los agentes químicos y su composición influirá en su resistencia química.

Al comparar los polímeros de los RPAs utilizados para proteger los elementos de MHDT, es posible observar que el polietileno (PE), utilizado en la producción del PoliMac®, tiene en general mayor resistencia contra agentes químicos y microorganismos en comparación con el PVC (Tabla 3).

Además de la resina básica, los revestimientos poliméricos pueden contener otros componentes.

TABLA 3 –RESISTENCIA QUÍMICA DE ALGUNOS POLÍMEROS – DURANTE SU USO (ADAPTADO DE VAN ZANTEN, 1986 APUD VERTEMATTI 2004)

POLÍMERO	PE	PVC*
Ácidos diluidos	++	0
Ácidos concentrados	+	-
Álcalis diluidos	++	+
Álcalis concentrados	++	0
Microrganismos	++	0

Grado de resistencia: (-) no resistente; (0) moderado; (+) aceptable; (++) bueno.

* dependiente del tipo de plastificante y de la humedad relativa alta.

El PVC requiere la adición de plastificante en su composición para que sea flexible y aplicable en la protección de los alambres utilizados en la fabricación de productos de MHDT. Según BRASKEM (2002), los plastificantes tienen menor resistencia química que la propia resina de PVC y, por lo tanto, cuanto mayor es su contenido, menor es la resistencia química del compuesto. Los ácidos y álcalis pueden causar hidrólisis o extracción del plastificante, dependiendo de la concentración y la temperatura. Los líquidos orgánicos también pueden provocar la extracción parcial del plastificante, provocando un aumento de la rigidez del material y, en consecuencia, de su fragilidad y, en algunos casos, puede producirse un reblandecimiento e hinchazón del compuesto.

Para evaluar la resistencia de los RPAs a sustancias específicas de una manera más puntual, es importante conocer cuáles son los presentes en el ambiente de aplicación de la obra, lo cual es una tarea compleja ya que las pruebas que se realizan para el control de la calidad del agua suelen tener como objetivo monitorear elementos con un enfoque en la salud humana (e.g., nitrógeno, potasio, hierro, etc.) y que, por lo general, no afectan a la resistencia del RPA. Aunque se proponga testar la presencia de sustancias en un cauce de agua, hay cientos de sustancias que pueden estar presentes y que pueden afectar o no al RPA.

En vista de la complejidad de la composición química del agua en diferentes tipos de obra y con el fin de tener una orientación general, la Tabla 4 presenta sustancias típicamente presentes en algunas situaciones de aplicación con base en información de CETESB (2020-2023) y OLIVEIRA et al. (2017) y la respectiva resistencia de los RPAs.

TABLA 4 – SUBSTANCIAS TÍPICAS EN ALGUNAS SITUACIONES DE APLICACIÓN DE PRODUCTOS MHDT Y LA RESISTENCIA RESPECTIVA DE CADA RPA

SITUACIÓN	SUBSTANCIA TÍPICA	OBSERVACIÓN	POLIMAC®	PVC
En las proximidades de vías de automóviles	Acetaldehído	Quema de combustibles fósiles	S	I
	Tolueno	Gases de escape de vehículos	S	I
En las cercanías de plantaciones	Amoníaco	Fabricación de fertilizantes	S	I
	Ácido benzoico	Frutas	S	I
Cauces de agua en general	Acetaldehído	Desechos animales	S	I
	Amoníaco	Descomposición de materia orgánica y excrementos	S	I
	Ácido benzoico	Corteza de árboles	S	I
	Agua clorada	Tratamiento de agua	S	I

Resistencia: S (Satisfactoria); (I) Insatisfactoria

Debido a la incertidumbre de qué sustancias están presentes o pueden introducirse en el ambiente hidráulico, para una mayor seguridad de la obra, se recomienda elegir el PoliMac®, debido a su mayor resistencia según las Tablas 3 y 4. Además de su alta resistencia química, PoliMac® garantiza que la propagación de la corrosión en los extremos del alambre, en la interfaz entre el acero y el RPA, sea menor que la distancia entre la repetición de la malla que cumple con la norma ASTM A 975-24 - *Standard Specification for Double-Twisted Hexagonal Mesh Gabions and Revet Mattresses (Metallic-Coated Steel Wire or Metallic-Coated Steel Wire With Polymer Coating)*.

Las sales, presentes principalmente en las regiones costeras, también son agentes que potencian la corrosión de los metales. Tanto el PoliMac® como el PVC tienen una resistencia satisfactoria contra el cloruro de sodio y otras sales. Sin embargo, es necesario que la estanqueidad del RPA esté intacto, sin que se haya visto afectada por otros mecanismos de degradación para mantener la eficacia de la protección de la parte metálica. En los ítems 5.2 a 5.4 se presentarán otros mecanismos que pueden generar la apertura de brechas y provocar la exposición de la parte metálica del alambre independientemente de la resistencia química del RPA.

5.2. RESISTENCIA A LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

Segundo GÓMEZ et al. (2018) a radiação solar é o fluxo de energia emitida pelo Sol e é transmitida sob a forma de radiação eletromagnética que, por sua vez, pode ocorrer em diferentes faixas espectrais. A radiação ultravioleta (UV) ocorre em uma faixa não visível pelos olhos humanos cujo comprimento de onda varia de 200 nm a 400 nm (JUNCHEM et al. 1998).

Os revestimentos poliméricos em geral estão sujeitos a um processo de fotodegradação desencadeado pela radiação ultravioleta.

Según CARLSSON et al. (1976 apud FECHINE, 1998), la fotodegradación implica un mecanismo de absorción de radiación ultravioleta y posteriores reacciones oxidativas en procesos autocatalíticos del material. Durante el proceso de fotodegradación, se producen cambios físicos y químicos en el polímero, lo que conduce a la decoloración, pérdida de brillo, disminución de la resistencia mecánica y agrietamiento (FECHINE, 1998), como ejemplificado en la Figura 30.

Cuando el revestimiento polimérico se agrieta, el revestimiento metálico queda expuesto directamente al medio ambiente, sujeto al ataque de sustancias químicas que pueden acelerar su proceso de corrosión (Figura 31).



Figura 30 | Deterioro del revestimiento de PVC causado por la fotodegradación

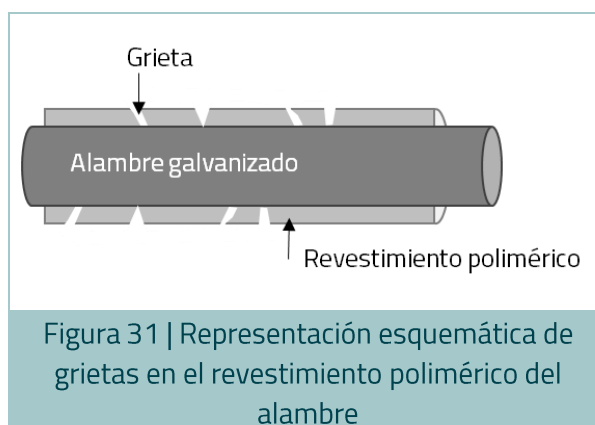


Figura 31 | Representación esquemática de grietas en el revestimiento polimérico del alambre

Durante la incidencia de la radiación UV, los fotones de luz pueden romper los enlaces químicos de los polímeros dependiendo de la longitud de onda de la radiación y del tipo de polímero utilizado (KOERNER, 2005). Comparando inicialmente diferentes polímeros, es posible observar que cada uno tiene una longitud de onda límite para ser afectado por la radiación UV (Tabla 5). Cuanto menor sea el valor límite, más resistente será un determinado polímero.

TABLA 5 –LONGITUD DE ONDA EN QUE ALGUNOS POLÍMEROS DEMUESTRAN SENSIBILIDAD A LA RADIACIÓN UV (KOERNER, 2005)

POLÍMERO	ACRÓNIMO	LONGITUD DE ONDA [nm]
Polietileno	PE	300
Cloruro de polivinilo	PVC	312
Poliestireno	PS	315
Poliéster	PET	325
Polipropileno	PP	370

Como se puede observar en la Tabla 5, entre los polímeros presentados, el PE tiene un límite de longitud de onda más corto, soportando un mayor rango del espectro de radiación solar. En otras palabras, cualquier radiación con una onda superior a 300 nm no afectaría al PE, pero rompería las cadenas de todos los demás polímeros mencionados en la Tabla 5.

Aunque la diferencia de 12 nm entre el límite de PE y PVC parece pequeña, existe una sensibilidad relevante en esta variación. Un monitoreo de la radiación solar realizado durante el invierno y el verano en la ciudad de Cleveland, Ohio, EE.UU., muestra que esta diferencia sería suficiente para hacer que el PVC sea más susceptible a la rotura de la cadena, especialmente en el verano (Figura 32).

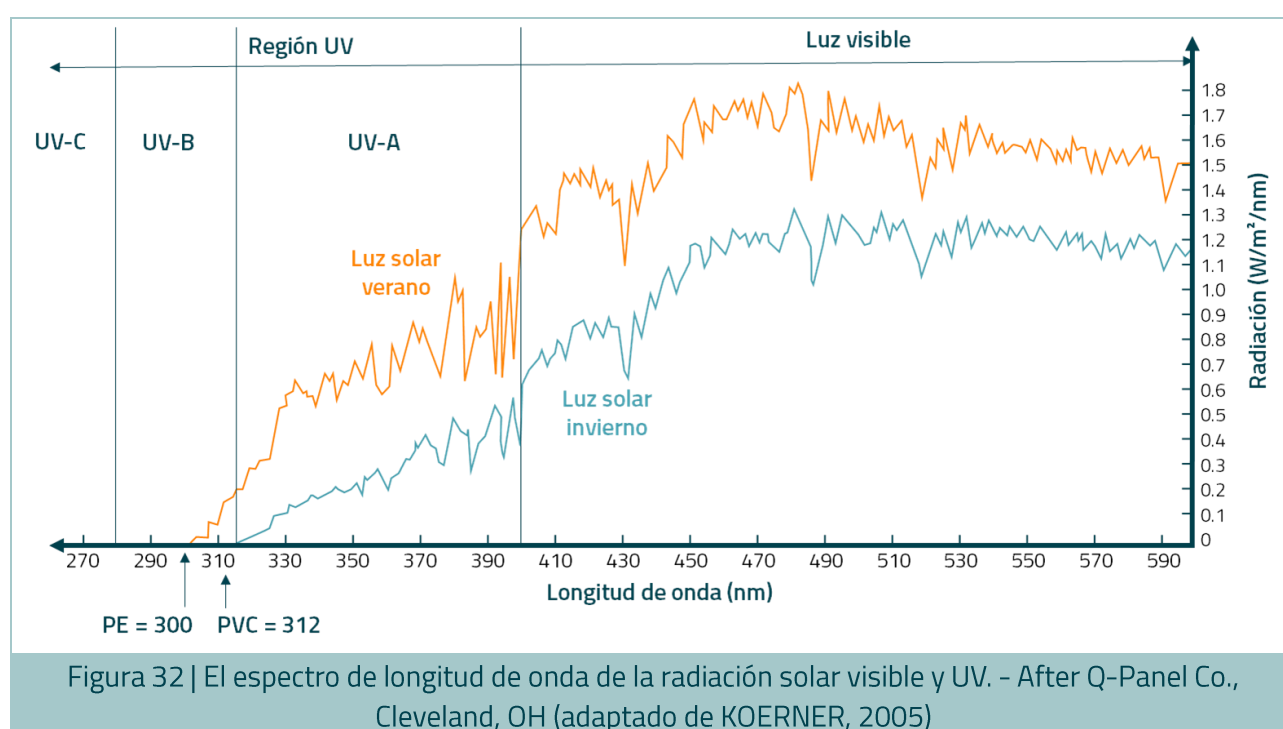


Figura 32 | El espectro de longitud de onda de la radiación solar visible y UV. - After Q-Panel Co., Cleveland, OH (adaptado de KOERNER, 2005)

Al evaluar un lugar más cercano a la línea ecuatorial, es decir, que geográficamente tiende a recibir una mayor incidencia de radiación solar, la situación se vuelve más crítica. Un ejemplo es la medición de la radiación UV realizada en la ciudad de Natal-RN, Brasil, por MARINHO et al. (2013) a lo largo del año en el período de 2001 a 2007. Mientras que en la ciudad de Cleveland sólo se registró radiación UV con una longitud de onda de 305 nm en el período estival y con una intensidad inferior a $0,05 \text{ W/m}^2/\text{nm}$ (Figura 32), en la ciudad de Natal se registró radiación de la misma longitud de onda en todas las estaciones, con intensidades superiores a $0,05 \text{ W/m}^2/\text{nm}$ en invierno y superiores a $0,08 \text{ W/m}^2/\text{nm}$ en verano, y puede alcanzar hasta $0,10 \text{ W/m}^2/\text{nm}$. En otras palabras, el PVC se vería afectado en todas las estaciones del año y en mayor intensidad en comparación con Cleveland. Además de la posición geográfica, otros factores influyen en la intensidad de la radiación UV, como la temperatura, la humedad, los vientos y las nubes, y los ejemplos mencionados no se pueden utilizar de forma generalizada.

Además de comparar el desempeño de los polímeros base, es posible hacerlo con los propios RPAs. El plastificante presente en el PVC flexible también influye en la resistencia del RPA. LODI (2003) afirma que, durante el aumento de temperatura del material de PVC flexible debido a la recepción de radiación solar, el PVC puede perder componentes volátiles (plastificantes), haciendo que el material sea rígido y quebradizo.

A través de la prueba de la norma ISO 4892-3 - *Plastics — Methods of exposure to laboratory light sources — Part 3: Fluorescent UV lamps* en el que las muestras de los RPAs se exponen a lámparas fluorescentes UV en condiciones controladas (temperatura, humedad y/o agua), dentro de dispositivos diseñados para simular condiciones reales de campo, es posible observar que después de 2500 horas de prueba, PoliMac® tiene mayor resistencia mecánica (Figura 33) y cuatro veces más elongación que el PVC a la rotura (Figura 34).

La mayor elasticidad de PoliMac® permite una mejor absorción de impactos por parte del revestimiento polimérico presentando una mayor tendencia a deformarse sin ser removido del alambre protegido (más dúctil, menos frágil), manteniendo su protección contra agentes corrosivos y prolongando su protección contra la resistencia a la abrasión en comparación con el PVC.

Es posible concluir que el endurecimiento y la pérdida de propiedades mecánicas pueden dar lugar a grietas en el RPA, permitiendo la entrada de agentes químicos que atacarán directamente la parte metálica del alambre.

Además de los ambientes hidráulicos, las obras no hidráulicas ubicadas en zonas altamente industrializadas o costeras, y/o sujetas a la acción de la niebla salina, requieren el uso de un RPA que alargue la durabilidad de los productos de MHDT.

Para cualquiera de los casos mencionados, además de presentar un RPA satisfactorio a las sustancias químicas presentes en el agua y la atmósfera, también es necesario presentar una alta resistencia a la radiación UV para asegurar el mantenimiento de las propiedades iniciales del revestimiento y asegurar el aislamiento de la parte metálica del alambre, lo que convierte a PoliMac® en un RPA más seguro que el PVC.

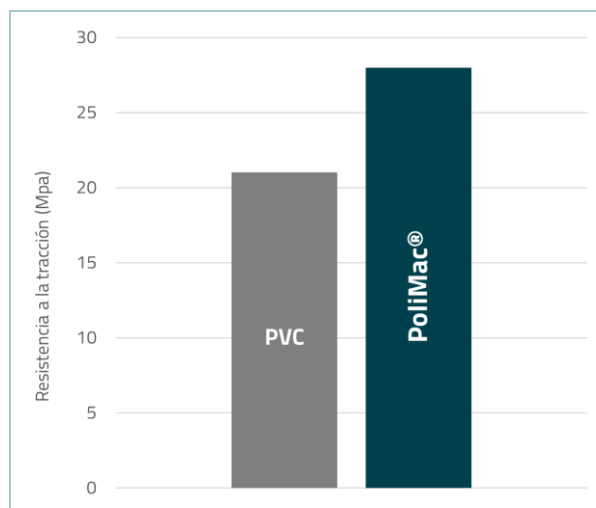


Figura 33 | Resistencia de los RPAs después de 2500h de exposición a la radiación UV según el método de ensayo ISO 4892-3

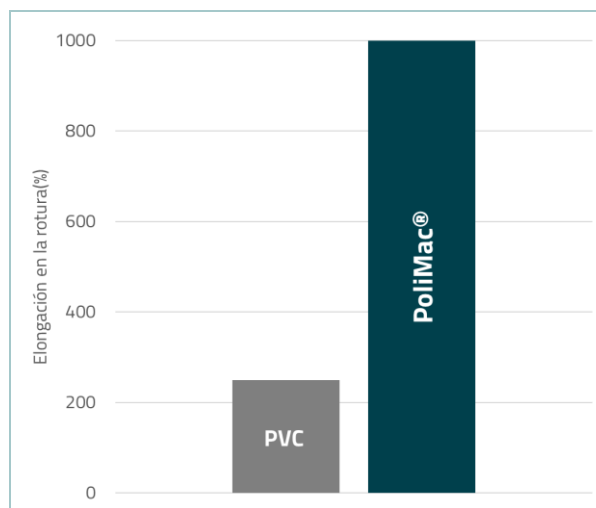


Figura 34 | Elongación de los RPAs después de 2500 horas de exposición a la radiación UV según el método de ensayo ISO 4892-3

5.3. RESISTENCIA A BAJAS TEMPERATURAS

Los ambientes con temperaturas muy bajas pueden provocar la fragilización del polímero, haciéndolo totalmente quebradizo. Este mecanismo es relevante en la elección del revestimiento polimérico de los productos de MHDT cuando se aplica a construcción de obras ubicadas en regiones sujetas a temperaturas negativas (Figura 35). Mientras que el revestimiento polimérico de PVC se fragiliza a temperaturas inferiores a -9°C , PoliMac® se puede aplicar en ambientes más fríos con una temperatura de fragilización de hasta -35°C .



Figura 35 | Producto de MHDT en contacto con hielo en un ambiente de temperatura negativa

5.4. RESISTENCIA A LA ABRASIÓN

Como se presenta en el ítem 3.3, el transporte de sólidos presente en los cauces de agua puede afectar los materiales utilizados en las obras hidráulicas a través del fenómeno de la abrasión.

El uso del RPA es una técnica utilizada para aumentar la protección del alambre de los productos de MHDT contra el daño mecánico causado por la fricción y el impacto de sólidos, como lo ilustra la representación esquemática del alambre de un gavión sometido a un flujo de transporte de sólidos, en la Figura 36.

Como se mencionó anteriormente, el PE, debido a su alta cristalinidad, tiende naturalmente a tener una mayor resistencia a la abrasión que el PVC, que se considera un polímero amorfo.

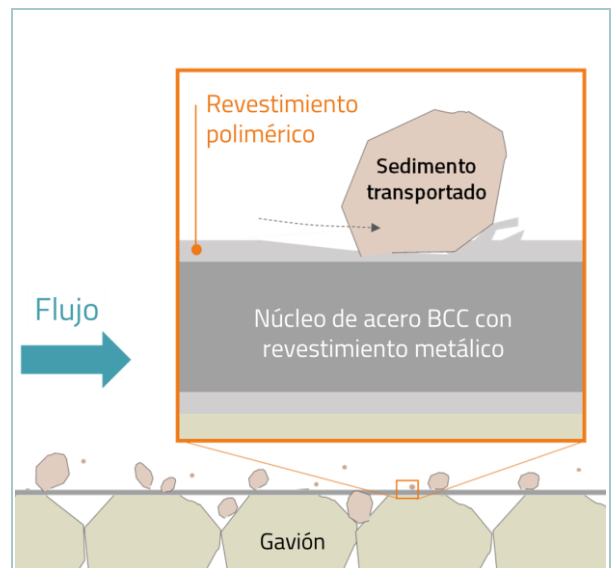


Figura 36 | Efecto de la abrasión por transporte de sedimentos en el revestimiento polimérico de gaviones

Durante el desarrollo del PoliMac®, se llevaron a cabo diferentes ensayos para comprobar la resistencia a la abrasión de los diferentes RPAs, incluyendo el ensayo adaptado de abrasión de cable eléctrico (ABNT NBR 7577/BS EN 60229). A partir de 2021, en la norma estadounidense ASTM A 975, y a partir de 2024, en la norma ABNT NBR 8964, apareció oficialmente el método de prueba de abrasión lineal de alambre recubierto con RPA, conocido como "Taber Test".

Figura 37 se muestra parte del equipo del "Taber Test" y el ensayo consiste en hacer pasar un hilo abrasivo a lo largo del alambre rozando directamente su RPA generando una acción de fricción lineal.

A partir de un punto de partida, cada vez que el hilo abrasivo va y viene, se cuenta automáticamente un ciclo.

Cuando se produce el desgaste completo del RPA, la prueba se detiene automáticamente y se comprueba el número total de ciclos.

En la Figura 38 se muestra una prueba realizada con el alambre de 2,70 mm de diámetro más RPA, comparando el desempeño de PoliMac® con 491 ciclos y PVC con solo 31 ciclos (ELI CUELHO, 2021). Los resultados obtenidos demuestran que PoliMac® proporciona una resistencia a la abrasión considerablemente mayor en comparación con el PVC.

En el caso de obras en regiones montañosas con el transporte de grandes sedimentos, se espera una mayor necesidad de mantenimiento, independientemente del tipo de revestimiento aplicado. Para estos casos, se debe buscar el apoyo del fabricante en la etapa de especificación para verificar cuáles son las medidas factibles para mitigar posibles daños en la estructura. Este tipo de obra también requiere una mayor atención en el seguimiento a lo largo de su vida útil.

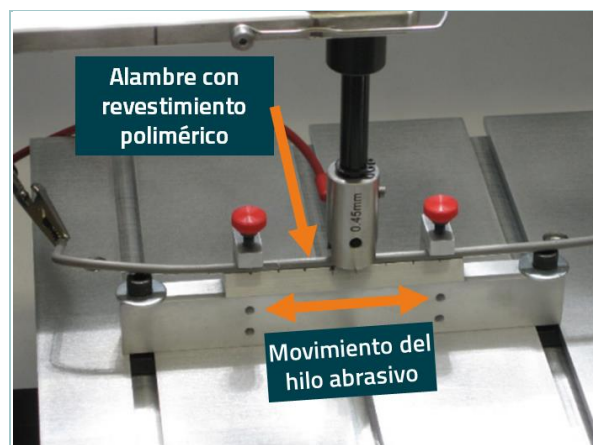


Figura 37 | Ensayo de abrasión según la ASTM A 975:2024 / ABNT NBR 8964:2024

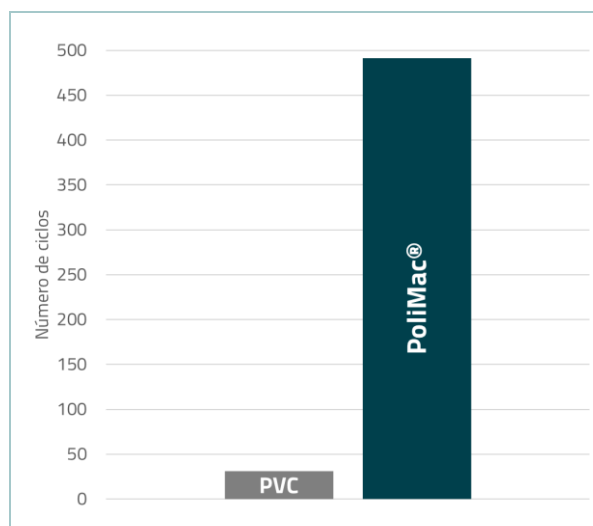


Figura 38 | Número de ciclos necesarios para el desgaste total por abrasión de los RPAs según el método de ensayo ASTM A975-21 (diámetro nominal del alambre 3,70 mm), presentado por ELI CUELHO (2021)

6. CONSIDERACIONES ADICIONALES PARA EL USO DE RPA

6.1. EVENTOS IMPREDECIBLES Y MANTENIMIENTO

Las obras hidráulicas son más susceptibles a ocurrencias imprevisibles ya que están sometidas a la acción de flujos de agua que dependen de las condiciones climáticas del lugar. Además del posible impacto de objetos flotantes que pueden venir con el flujo, ciertamente en algún momento el caudal de diseño será superado y la estructura pasará a una condición más crítica que la considerada en diseño, y puede sufrir daños durante una inundación atípica. Por lo tanto, es importante monitorear la obra, especialmente después de eventos importantes, para verificar la necesidad de mantenimiento.

Al construir una obra hidráulica, es importante seleccionar una tecnología que sea fácil de mantener, con el fin de reducir costos con reparaciones o eventuales reconstrucciones. En el caso de las estructuras de MHDT, es posible reemplazar las piezas afectadas o, si solo se ha impactado una celda, es posible rellenarla y cerrarla con una nueva pieza de panel de malla, siempre que la estructura permanezca estable.

6.2. HOMOGENEIDAD DE LA ESTRUCTURA

La homogeneidad de los materiales utilizados en la construcción de la estructura también es un factor importante para su durabilidad. Los dispositivos de conexión (alambre de amarre y/o anillos de fijación) utilizados en el montaje, tensores y unión de las piezas MHDT, deben tener la misma composición que el alambre de la malla que forma las piezas, desde el material del núcleo (acero con bajo contenido de carbono) hasta el revestimiento polimérico, precisamente porque cumple la importante función de mantener la monoliticidad de la estructura y el confinamiento del material de llenado.

También es importante que todas las piezas, incluidas las empotradas y en contacto con el terraplén, tengan la misma tecnología de protección de alambre que las piezas instaladas en la cara frontal de la estructura. Dado que las soluciones de MHDT son permeables, todas las piezas de la estructura están sujetas a la degradación química causada por el agua.

6.3. RECUBRIMIENTO CON MORTERO U HORMIGÓN

En algunas obras, es habitual aplicar un recubrimiento de mortero u hormigón debido a la necesidad del proyecto (por ejemplo, rugosidad, tipo de caudal, etc.). Incluso en estos casos, el revestimiento polimérico también debe usarse en todos los elementos, ya que las mallas aún

pueden entrar en contacto con el flujo de agua a través de las juntas de dilatación o el suelo saturado de la base.

Mismo con el RPA, la MHDT tiene una excelente adherencia al hormigón o mortero debido a su forma hexagonal.

6.4. IMPORTANCIA DEL RPA EN MUROS DE SUELO REFORZADO

El Terramesh® System y el Terramesh® Verde son soluciones que actúan como estructuras de suelo reforzado, y la composición del alambre de la MHDT influirá tanto en el desempeño del refuerzo metálico como en la cara frontal.

Durante el proceso de instalación de una obra de suelo reforzado, la compactación del terraplén se lleva a cabo en múltiples capas de suelo, colocadas entre las líneas de refuerzo de MHDT. Durante este proceso, la superficie afilada de las partículas de material del relleno roza la superficie de los alambres de malla que, si no se protegen adecuadamente, pueden exponer directamente el núcleo de acero al suelo y al agua de filtración, desencadenando un proceso corrosivo que afectará la capacidad de resistencia mecánica del refuerzo.

La cara frontal, a su vez, es la parte externa de la estructura más expuesta a los agentes agresivos del entorno, especialmente en las obras hidráulicas. Si la protección del alambre de la cara frontal es inadecuada, su función de garantizar la estabilidad local y prevenir la erosión en la cara se verá comprometida.

Debido a la importancia de la integridad del refuerzo y de la cara frontal, "los efectos de la corrosión sobre los elementos metálicos (mallas y telas) utilizados deben considerarse en el diseño frente a la vida útil del diseño." (traducido de la norma ABNT NBR 16920-1:2021, p. 41).

El PoliMac®, al tener mejor desempeño que el PVC presentado en el ítem 5, es una tecnología más segura para proteger el refuerzo y la cara frontal. Este mejor desempeño se percibe incluso en la etapa de los análisis de proyecto cuando se calcula la resistencia de diseño del refuerzo. Debido a que los factores de reducción del PoliMac® son más bajos (penalizan menos el material), su resistencia de diseño es mayor que la resistencia de diseño de las piezas revestidas de PVC.

6.5. IMPORTANCIA DEL RPA EN MUROS DE GAVIONES

De acuerdo con Santos Junior (2018), es posible afirmar que en los muros de contención la gravedad de los gaviones:

La malla hexagonal de doble torsión es el elemento encargado de asegurar el confinamiento del material de llenado y las condiciones de estabilidad

impuestas por las obras de ingeniería en las que se aplican los gaviones (traducido de Santos Junior, 2018, p. 51).

Al tener esta importante función, la resistencia mecánica de la MHDT debe mantenerse a largo plazo, de modo que también se mantenga el funcionamiento de la estructura. Así que:

[...] las propiedades mecánicas y de durabilidad de la malla hexagonal metálica deben ser conocidas y estudiadas con el fin de transmitir información técnica suficiente para la elaboración de proyectos de ingeniería, como por ejemplo, muros de contención en gaviones (traducido de Santos Junior, 2018, p. 51).

Una forma de estudiar la influencia de la durabilidad de la MHDT en los diseños de muros de gaviones es a través del análisis interno de la estructura considerando el GSC (*Gabion Serviceability Coefficient*) que es un coeficiente que evalúa el desempeño de los gaviones a lo largo del tiempo, combinando los esfuerzos mecánicos y la influencia de agentes agresivos en el ambiente de aplicación.

El PoliMac®, debido a su mayor resistencia, proporciona un GSC más alto en comparación con el PVC y los revestimientos metálicos del alambre, lo que resulta en una mayor seguridad para la estructura a largo plazo. Para el análisis GSC, se recomienda utilizar el software Gawac 3.1.

7. POLIMAC DE ACUERDO CON LAS NORMAS

El PVC aún es el principal RPA mencionado en las normas MHDT debido a su antiguo uso, generando muchas veces dudas sobre el uso de otros RPAs. Con el fin de clarificar la posibilidad de cumplir con estándares con RPAs distintos al PVC, a continuación, se presentarán algunas de ellas.

7.1. EN BS 10223-3:2013

A lo largo de la norma, el término "Organic coating" se utiliza principalmente de forma genérica, lo que ya indica apertura al uso de otros RPAs.

La mención directa del PVC se produce en la tabla que describe la agresividad de los ambientes y los respectivos requisitos para la protección del alambre. En el mismo cuadro aparece la siguiente nota a pie de página:

More advanced organic coatings with an equivalent or superior corrosion protection may be considered in order to improve the assumed working life.
(EN BS 10223-3:2013, p. 13)

En traducción libre al español:

Se pueden considerar revestimientos orgánicos más avanzados con una protección contra la corrosión equivalente o superior para mejorar la vida útil estimada.

Además de que PoliMac® es un RPA comprobadamente más avanzado que el PVC, la lista de normas referenciadas menciona la norma BS EN 10245-3 que especifica las características y requisitos para los alambres de acero revestidos con polietileno, reforzando que PoliMac® cumple con la norma EN BS 10223-3:2013.

7.2. ASTM A975:2024

Hasta la versión de 2023 de la norma americana, el PVC se mencionaba cada vez que se hacía referencia al RPA del alambre. Sin embargo, ya existía el siguiente párrafo:

Original or modified thermoplastic polymers along with their application methods can be permitted as a substitute for PVC coatings, as long as their performance is equivalent to the performance requirements of the PVC coating. (ASTM A975:2023, p. 3, tópico 6.1.3.1)

En traducción libre al español:

Polímeros termoplásticos originales o modificados, junto con sus métodos de aplicación, pueden permitirse como sustitutos de los revestimientos de PVC, siempre que su desempeño sea equivalente a los requisitos de desempeño del revestimiento de PVC.

En 2024, la norma anteriormente titulada como *Standard Specification for Double-Twisted Hexagonal Mesh Gabions and Revet Mattresses (Metallic-Coated Steel Wire or Metallic-Coated Steel Wire With Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Coating)* empezó a llamarse *Standard Specification for Double-Twisted Hexagonal Mesh Gabions and Revet Mattresses (Metallic-Coated Steel Wire or Metallic-Coated Steel Wire With Polymer Coating)*, evidenciando aún más la apertura al uso de RPAs distintos del PVC y confirmando el cumplimiento por parte del PoliMac® a la norma ASTM A975.

7.3. ABNT NBR 8964:2024

Hasta la versión de 2013 de la norma brasileña, cada vez que se hacía referencia al RPA del alambre, se mencionaba “PVC, ou outro polímero que cumpra as mesmas funções desenvolvidas pelo PVC”, o sea, en español “PVC, u otro polímero que cumpla las mismas funciones que el PVC” ya mostrando la apertura previa de la norma para el uso del PoliMac®.

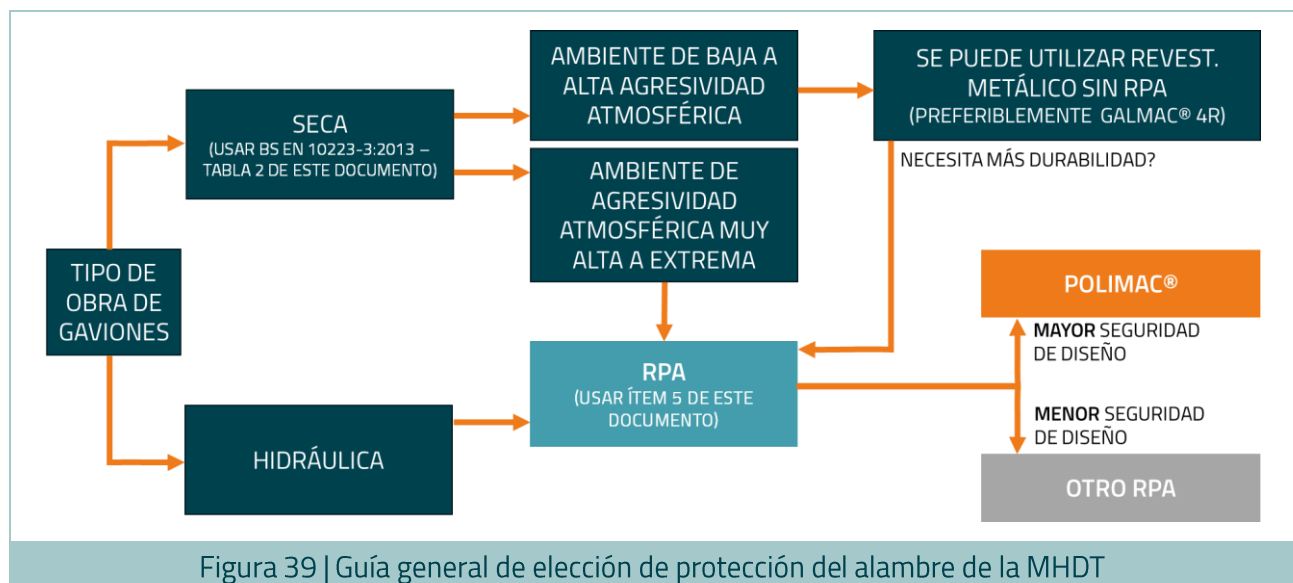
En 2024, la terminología se ha convertido simplemente en “revestimiento polimérico”, es español, “revestimiento polimérico”. Además, el polietileno pasó a formar parte directamente del escopo de las bases poliméricas termoplásticas utilizadas en la producción de RPAs, reafirmando el cumplimiento por parte de PoliMac® de la norma ABNT NBR 8964:2024.

7.4. ANALOGÍA CON LOS PROYECTOS DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

Para demostrar que existe un precedente sólido para analizar la durabilidad de materiales en un proyecto de ingeniería, se puede citar como ejemplo la norma brasileña ABNT NBR 6118:2023 – *Projeto de estruturas de concreto*, y la norma británica BS 8500-1:2023 – *Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206 – Part 1: Method of specifying and guidance for the specifier*. Ambas normas de diseño de estructuras de hormigón presentan la clasificación de diferentes tipos de ambientes de aplicación de acuerdo al riesgo de deterioro de la estructura que

influye en elementos importantes para el proyecto, tales como: relación mínima agua-cemento; clase mínima de hormigón y recubrimiento mínimo de armadura.

Del mismo modo, dado que los productos de MHDT también son materiales de construcción aplicados a proyectos de ingeniería, la durabilidad también debe formar parte del alcance del proyecto. Para la clasificación de las obras no hidráulicas de MHDT y la elección del tipo de protección del alambre, se recomienda utilizar la Tabla 2. Para obras hidráulicas en general, o para obras no hidráulicas en ambientes de muy alta o extrema agresividad, el uso de RPA es mandatorio. El ítem 5 de este documento puede utilizarse, finalmente, para la elección más adecuada del RPA. En la Figura 39 se muestra una guía resumida.



8. CONCLUSIÓN

Los tipos de revestimientos metálicos y poliméricos del alambre de la MHDT influyen en cómo los agentes de degradación presentes en el aire y el agua del ambiente de aplicación de los gaviones y elementos Terramesh® influirán en la durabilidad de las estructuras y su desempeño a largo plazo. Por lo tanto, durante la elaboración de un proyecto, es necesario conocer la agresividad del ambiente para la elección más adecuada de la protección del alambre.

Ambientes no hidráulicos cuya agresividad atmosférica no tiene una agresividad muy alta o extrema, es posible utilizar solo el revestimiento metálico.

El revestimiento metálico tiene la importante función de proteger el acero del alambre de la MHDT contra el proceso corrosivo causado por la atmósfera. La aleación GalMac® 4R es actualmente el revestimiento metálico más duradero, independientemente del formato de malla (MHDT o electrosoldada).

Los ambientes hidráulicos en general, los ambientes no hidráulicos con una atmósfera muy agresiva y las aplicaciones en las que la malla sufre daños directos por abrasión (por ejemplo, malla de refuerzo entre capas de suelo compactado) siempre requieren el uso del RPA sobre el revestimiento metálico. El RPA también se puede utilizar en obras no hidráulicas cuya atmósfera no es muy agresiva con el simple objetivo de aumentar aún más la durabilidad de la MHDT.

Durante varias décadas se utilizó el RPA de PVC, sin embargo, tanto el avance tecnológico de la industria como la variabilidad climática requirieron una evolución del RPA. Un punto débil del RPA de PVC es el plastificante, presente en su composición, que afecta a su resistencia química y a la radiación UV por ser un componente volátil, y que puede ser extraído, debilitando el material, formando grietas y permitiendo la exposición directa de la parte metálica del alambre a agentes químicos.

Después de años de investigación, Maccaferri desarrolló el PoliMac®. El polímero base del PoliMac®, el polietileno (PE), tiene una mayor cristalinidad, lo que lo hace más resistente a los ataques químicos y a la abrasión, en comparación con el PVC. Varias pruebas de laboratorio demuestran la superioridad del revestimiento PoliMac® sobre el de PVC flexible en términos de resistencia a la abrasión, la radiación UV, las bajas temperaturas y los ataques químicos.

El PoliMac®, por lo tanto, es el revestimiento de protección de alambre disponible capaz de garantizar una mayor durabilidad de los productos de MHDT en obras hidráulicas y otras aplicaciones.

9. REFERENCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2010). NBR 7577: Fios e cabos elétricos – Ensaio de abrasão da cobertura. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2021). NBR 16920-1: Muros e taludes em solos reforçados – Parte 1: Solos reforçados em aterros. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2013). NBR 8964: Arames de aço de baixo teor de carbono, revestidos, para gaviones e demais produtos fabricados com malha hexagonal de dupla torção. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2024). NBR 8964: Arames de aço de baixo teor de carbono, revestidos, para gaviones e demais produtos fabricados com malha hexagonal de dupla torção. Rio de Janeiro.
- AGUIAR, J. E., & BAPTISTA, M. B. (2011). Erosões nas estruturas de concreto das galerias de águas pluviais urbanas (Vol. 4). Online: Rev. IBRACON Estrut. Mater.
- ALFREDINI, P., & ARASAKI, E. (2009). Obras e gestão de portos e costas. São Paulo: Blucher.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2021). ASTM A975: Standard Specification for Double-Twisted Hexagonal Mesh Gabions and Revet Mattresses (Metallic-Coated Steel Wire or Metallic-Coated Steel Wire With Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Coating). West Conshohocken.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2024). ASTM A975: Standard Specification for Double-Twisted Hexagonal Mesh Gabions and Revet Mattresses (Metallic-Coated Steel Wire or Metallic-Coated Steel Wire With Polymer Coating). West Conshohocken.
- BRASKEM. (2002). Resistência química dos compostos de PVC - Boletim técnico nº2. Acesso em 2021, disponível em https://www.braskem.com.br/Portal/Principal/Arquivos/html/boletm_tecnico/Tabela_de_Resistencia_Quimica_dos_Compostos_de_PVC.pdf Braskem:
- BRITISH STANDARD. (2008). EN 60229: Electric cables - Tests on extruded oversheaths with a special protective function. Brussels.
- BRITISH STANDARD. (2013). EN 10223-3: Steel wire: Steel wire and wire products for fencing and netting - Part 3: Hexagonal steel wire mesh products for civil engineering purposes. Brussels.
- BRITISH STANDARD. (2013). EN 10223-8: Steel wire and wire products for fencing and netting - Part 8: Welded mesh gabion products. Brussels.
- CETESB (2020) Ficha de Informação toxicológica – Acetaldeído, Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental, CETESB.
- CETESB (2021) Ficha de Informação toxicológica – Amônia, Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental, CETESB.
- CETESB (2022) Ficha de Informação toxicológica – Cloro, Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental, CETESB.
- CETESB (2023) Ficha de Informação toxicológica – Tolueno, Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental, CETESB.
- ELI CUELHO, P.E. (2021) Report MAPP-64264-21-002: PoliMac Compliance Report. Austin: TRI Environmental.

- FECHINE, G. (1998). Fotodegradação de termoplásticos semicristalinos. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba.
- GÓMEZ, J., CARLESSO, F., VIEIRA, L., & DA SILVA, L. (2018). A irradiância solar: conceitos básicos. Rev. Bras. Ensino Fís.
- JUNCHEM, P., WINOGRON, A., ARDENGHY, M., & ENGLISH, R. (1998). Riscos à saúde da radiação ultravioleta. Rev. Bras. Cir. Plást.
- KOERNER, R. (2005). Designing with geosynthetics (5th ed.). Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall.
- LODI, P. (2003). Aspectos de degradação de geomembranas poliméricas de polietileno de alta densidade (PEAD) e de poli(cloreto de vinila)(PVC). São Carlos: Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia.
- MARINHO, G., & SILVA, F. (2013). Aspectos da radiação ultravioleta solar em Natal/RN. Sociedade e Território, p. 2.
- MIRANDA, R. A. (2012). Climatologia Geográfica (Vol. 1). Rio de Janeiro: Fundação CECIERJ.
- NUNES, L., RODOLFO JR, A., & ORMANJI, W. (2006). Tecnologia do PVC. São Paulo: BRASKEM S.A.
- OLIVEIRA, P. H. R., REIS, R. R. (2017) Métodos de Preparação Industrial de Solventes e Reagentes Químicos - Ácido Benzoico (CAS 65-85-0). Revista Virtual de Química, Vol. 9
- PANNONI, F. D. (2015). Princípios da proteção de estruturas metálicas em situação de corrosão e incêndio. GERDAU.
- PINHO, J. R. (2006). Avaliação de sistemas de reparo para o problema de abrasão do concreto de superfícies úmidas em usinas hidrelétricas. Belém: Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.
- PONTES, R. (2006). Disseminação de íons cloreto na orla marítima do Bairro de Boa Viagem, Recife-PE. Recife: Universidade Católica de Pernambuco. Departamento de Engenharia Civil.
- TORDIN, C. (2018). Contaminantes emergentes podem ser uma ameaça na água para consumo humano água para consumo humano. Fonte: EMBRAPA: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/32796742/contaminantes-emergentes-podem-ser-uma-ameaca-na-agua-para-consumo-humano>
- UNI. (2012). EN ISO 9223: Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation. Brussels.
- UNI. (2016). EN ISO 4892-3: Plastics – Methods of exposure to laboratory light sources – Part 3: Fluorescent UV lamps. Brussels.
- UNI. (2017). ISO 9227: Corrosion tests in artificial atmospheres – Salt spray tests. Brussels.
- VERTEMATTI, J. C. (2004). Manual brasileiro de geossintéticos. São Paulo: Edgard Blücher.

Maccaferri do Brasil

Matriz LATAM

Avenida José Benassi, 2601, Distrito Industrial FazGran, Jundiaí – SP, Brasil

maccaferri.com/latam/

MACCAFERRI