Research Club Scientia Vol. 4, No 4
Frecuencia: Octubre–Diciembre 2026
ISSN: 3103 - 1315
DOI: https://doi.org/10.65415/a1aae141

# Recubrimientos avanzados para mejorar la resistencia al desgaste y la corrosión de equipos y componentes industriales: revisión sistemática

# Advanced coatings to improve the wear and corrosion resistance of industrial equipment and components: A systematic review

# Rivestimenti avanzati per migliorare la resistenza all'usura e alla corrosione di apparecchiature e componenti industriali: revisione sistematica

Mero Morán Roberto Santiago[I]
rmerom5@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0009-9407-0467
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Pilatasig Romero Stephany Milena[I]
spilatasigr@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1472-0743
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Choez Bautista Ashley Dionisa[I]
achoezb6@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-5210-3206
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Andrade Vásquez Cristopher Josué[I]
candradev6@ubemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-9061-6053
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Holguín Anzules Jorge Tomas[I]
jholguina7@unemi.edu.ec
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4454-4184
Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

.

# Recubrimientos avanzados para equipos y componentes industriales

**Correspondencia**: robertmero24@gmail.com

**Artículo de Investigación**

**Aceptado:** 26/Noviembre/2026 **Publicado:** 27/Noviembre/2026

I.Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera Ingeniería Industrial, Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

.

**Resumen**

El desgaste y la corrosión limitan la vida útil de equipos y componentes industriales. Esta revisión sistemática, informada con base en PRISMA 2020 (Page et al., 2021), analizó estudios publicados entre 2025 y 2026 sobre recubrimientos cerámicos, metálicos, compuestos y nanoestructurados. Se incluyeron 16 fuentes de 120 registros: 14 estudios experimentales y dos revisiones. Los cermets de WC proyectados por HVOF o HVAF alcanzaron 1281–1355,7 HV y redujeron el desgaste abrasivo hasta 123 veces frente al acero sin recubrir. Las películas DLC y los sistemas dúplex cermet/DLC mostraron baja fricción y mejoras de corrosión bajo las condiciones ensayadas. Solo dos estudios midieron tribocorrosión; por ello, la evidencia sobre protección combinada y su transferencia a servicio industrial sigue siendo limitada. No se identifica un recubrimiento universal: la selección depende del sustrato, el medio y el mecanismo de daño.

**Palabras clave:** recubrimientos; desgaste; corrosión; tribología; HVOF; DLC; revisión sistemática.

**Abstract**

Wear and corrosion limit the service life of industrial equipment and components. This systematic review, reported with reference to PRISMA 2020 (Page et al., 2021), analysed studies published in 2025–2026 on ceramic, metallic, composite and nanostructured coatings. Sixteen sources were included from 120 records: 14 experimental studies and two reviews. HVOF- or HVAF-sprayed WC cermets reached 1281–1355.7 HV and reduced abrasive wear by up to 123 times compared with uncoated steel. DLC films and cermet/DLC duplex systems showed low friction and improved corrosion performance under the tested conditions. Only two studies measured tribocorrosion; therefore, evidence on combined protection and its transfer to industrial service remains limited. No universal coating was identified: selection depends on the substrate, environment and damage mechanism.

**Keywords:** coatings; wear; corrosion; tribology; HVOF; DLC; systematic review.

**Riassunto**

L’usura e la corrosione limitano la vita utile delle apparecchiature e dei componenti industriali. Questa revisione sistematica, descritta con riferimento a PRISMA 2020 (Page et al., 2021), ha analizzato studi pubblicati tra il 2025 e il 2026 sui rivestimenti ceramici, metallici, compositi e nanostrutturati. Su 120 record sono state incluse 16 fonti: 14 studi sperimentali e due revisioni. I cermet a base di WC depositati mediante HVOF o HVAF hanno raggiunto valori di durezza compresi tra 1281 e 1355,7 HV e hanno ridotto l’usura abrasiva fino a 123 volte rispetto all’acciaio privo di rivestimento. I film DLC e i sistemi duplex cermet/DLC hanno mostrato un basso attrito e una migliore resistenza alla corrosione nelle condizioni di prova. Soltanto due studi hanno misurato la tribocorrosione. Le evidenze sulla protezione combinata e sulla sua applicabilità in

condizioni di esercizio industriale restano quindi limitate. La revisione non ha individuato un rivestimento universale: la scelta dipende dal substrato, dall'ambiente e dal meccanismo di danneggiamento.

**Parole chiave:** rivestimenti; usura; corrosione; tribologia; HVOF; DLC; revisione sistematica.

## 1. Introducción

La fricción, el desgaste y la corrosión de los sustratos de acero están detrás de más del 80 % de las fallas mecánicas en aplicaciones industriales (X. Wang et al., 2025). Bombas, turbinas, válvulas, rodamientos, herramientas y estructuras marinas pierden material por abrasión, deslizamiento o erosión mientras el medio químico ataca la superficie expuesta, y ambos mecanismos se potencian entre sí en la tribocorrosión (Jin et al., 2025). Recubrir el componente con una capa de propiedades distintas a las del sustrato permite elevar la dureza y la resistencia al desgaste superficial sin sacrificar la tenacidad ni la resistencia mecánica del acero base (Y. Wang et al., 2025).

La oferta tecnológica es amplia. Los recubrimientos se agrupan por su naturaleza en metálicos y aleaciones, cerámicos, compuestos y nanoestructurados, y se depositan por proyección térmica (plasma, HVOF y HVAF), revestimiento láser, deposición física o química en fase vapor (PVD y CVD), deposición química sin corriente y procesos electroquímicos como la oxidación por microarco (MAO). (X. Wang et al., 2025) Cada familia protege por mecanismos diferentes —alta dureza y tribopelículas, baja fricción, efecto barrera, pasivación o protección de sacrificio—, de modo que la elección exige comparar su desempeño frente a ambos fenómenos y no solo frente a uno.

Sin embargo, los estudios suelen informar el desgaste o la corrosión por separado, con ensayos, sustratos y unidades distintos, lo que dificulta decidir qué recubrimiento conviene a cada condición de servicio. El objetivo de este trabajo fue analizar, mediante una revisión sistemática de la literatura (RSL), la evidencia de 2025 y 2026 sobre recubrimientos avanzados para la protección de equipos y componentes industriales, respondiendo a la pregunta: ¿qué recubrimientos proporcionan una mayor protección frente al desgaste y la corrosión en condiciones industriales? Se plantearon tres preguntas específicas: (P1) ¿qué técnicas de deposición y de ensayo aplican los estudios?; (P2) ¿qué resultados de dureza, adherencia, tribología y corrosión informan?, y (P3) ¿qué compromisos y vacíos condicionan la selección industrial?

## 2. Metodología

### *Diseño, fuentes y estrategia de búsqueda*

El 22 de noviembre de 2026 se ejecutó en Scopus una estrategia de búsqueda compuesta por 12 consultas temáticas en inglés, organizadas por familias de recubrimientos, técnicas de deposición y fenómenos de desgaste, corrosión y tribocorrosión. Para documentar la estrategia, la Tabla S3

del material suplementario presenta las consultas en una formulación normalizada, con los campos de título, resumen y palabras clave, los operadores booleanos y los filtros por periodo de publicación (2025–2026), tipo de documento (artículo o revisión), fuente tipo revista e idioma (inglés o español). Esta presentación sistematiza los conceptos de búsqueda empleados y facilita su repetición. Los registros seleccionados se rastrearon hasta sus plataformas de publicación (MDPI, Nature Portfolio, AIMS Press, ScienceDirect, PubMed Central y DOAJ).

***Criterios de elegibilidad***

Se incluyeron artículos arbitrados, originales o de revisión, publicados entre enero de 2025 y noviembre de 2026 en inglés o español, recuperados en Scopus, que evaluaran cuantitativamente el desgaste, la corrosión o ambos en recubrimientos sobre sustratos metálicos de interés industrial, o revisaran comparativamente esas familias. La indexación se verificó mediante la recuperación del registro bibliográfico en Scopus; título, autores y revista se consignaron en la matriz para facilitar su identificación. Se excluyeron patentes, preprints, capítulos, informes técnicos, páginas comerciales, estudios de oxidación a alta temperatura sin desgaste ni corrosión acuosa, recubrimientos biomédicos y textos no recuperables.

***Selección, extracción y síntesis***

Una sola persona cribó títulos y resúmenes, evaluó los textos completos y realizó una segunda lectura para verificar los datos; esta segunda lectura fue una comprobación del mismo revisor y no una evaluación independiente. La matriz de extracción se resume en la Tabla 1 y se acompaña como material suplementario con los datos recuperados de las fuentes. Dada la heterogeneidad de ensayos y unidades, no se realizó metaanálisis; la síntesis narrativa agrupó los estudios en cinco familias: cermets proyectados (n = 3), aleaciones de alta entropía (HEA) por láser (n = 3), películas PVD y DLC (n = 5, incluido un dúplex), recubrimientos químicos y electroquímicos (n = 2) y cerámicos por plasma (n = 1), además de dos revisiones. La calidad metodológica de los 14 estudios experimentales se valoró cualitativamente, sin calcular una puntuación, en cuatro dominios: descripción reproducible del proceso de deposición, declaración de normas o protocolos de ensayo, presencia de un comparador sin recubrir y medición de desgaste y corrosión en el mismo recubrimiento. Los resultados por estudio y la base documental de la valoración se presentan en el material suplementario.

***Métodos y técnicas aplicados en los estudios revisados***

En la proyección térmica,(Liu et al., 2025) optimizaron el HVOF de WC-10Co-4Cr con un diseño ortogonal L9 (flujos de queroseno y oxígeno, alimentación de polvo y distancia de proyección); (Zhang et al., 2026) variaron la relación aire-combustible del HVAF de WC con aglutinante (Staszuk et al., 2025) compararon polvo convencional con polvo reciclado de filtros HVOF. El revestimiento láser se aplicó con polvo predepositado y láser de fibra a 800 W (Ao et al., 2025),

con alimentación coaxial entre 1750 y 2500 W (Li et al., 2025) o en cámara de argón con menos de 10 ppm de oxígeno (Lu et al., 2025). Las películas delgadas se obtuvieron por pulverización catódica reactiva con distintas relaciones $Ar/N_2$ (Rakhadilov et al., 2025), por arco catódico más pulverización (Staszuk et al., 2025), por plasma de arco con intercapa de Ti (Jin et al., 2025) y por CVD asistida por plasma a menos de 250 °C (Piotrowska et al., 2025); el dúplex combinó HVOF de WC-$Cr_3C_2$-Ni y DLC con fuente lineal de iones (Y. Wang et al., 2026). Completaron el conjunto la deposición sin corriente de Ni-P con nanopartículas de $Y_2O_3$ (Ahmad et al., 2025), la MAO con nanopartículas de $TiO_2$ (Huang et al., 2026) y la proyección por plasma de $Al_2O_3$-$TiO_2$ sobre capa de anclaje NiCr (Grigaitienė et al., 2025).

La dureza se midió por microindentación Vickers o nanoindentación y la adherencia por tracción según ASTM C633 (Liu et al., 2025), por rayado progresivo de 0 a 200 N (Staszuk et al., 2025) o de forma cualitativa (Lu et al., 2025). El desgaste se evaluó con rueda de goma y arena húmeda según ASTM G105 , con tribómetros de bola sobre disco o alternativos con contracuerpos de $Si_3N_4$, $Al_2O_3$ o WC, con erosión por lodos (Zhang et al., 2026) y, en un caso, en un rodamiento de transportador de banda en servicio (Piotrowska et al., 2025). La corrosión se estudió casi siempre en NaCl al 3,5 % mediante polarización potenciodinámica con extrapolación de Tafel y espectroscopía de impedancia (EIS), y la tribocorrosión, acoplando el tribómetro a un potenciostato.(Jin et al., 2025)

Tabla I. Matriz bibliográfica de los estudios incluidos

| N.º | Autores y tema | Revista | Objetivo | Método |
|---|---|---|---|---|
| **1** | Liu et al. (2025), WC-10Co-4Cr | Lubricants | Optimizar HVOF | L9; HV1; ASTM; Tafel |
| **2** | Zhang et al. (2026), WC-HEA | Materials | Evaluar AFR HVAF | AFR; HV0,2; erosión |
| **3** | Woelk et al. (2025), cermets | Applied Sciences | Comparar polvos | HVOF; HV; desgaste; Tafel |
| **4** | Ao et al. (2025), HEA + B | Materials | Medir efecto del boro | Láser; XRD; desgaste; EIS |
| **5** | Li et al. (2025), CoCrFeNiMo | Materials | Potencia láser óptima | Láser 1750–2500 W; HV; COF |
| **6** | Lu et al. (2025), HEA CrMnFeCoNi | Sci. Reports | Caracterizar HEA | Láser-Ar; SEM; adherencia |

| N.º | Autores y tema | Revista | Objetivo | Método |
|---|---|---|---|---|
| **7** | Rakhadilov (2025), CrN | AIMS Mater. Sci. | Efecto Ar/$N_2$ en CrN | PVD; nanoindentación; Tafel |
| **8** | Staszuk et al. (2025), PVD/DLC | Materials | Comparar PVD/DLC | Arco/PVD; rayado; COF |
| **9** | Jin et al. (2025), DLC multicapa | Nanomaterials | Ajustar periodos DLC | DLC; dureza; tribocorrosión |
| **10** | Piotrowska (2025), DLC | Materials | Validar DLC en planta | PACVD; prueba en planta |
| **11** | Y. Wang et al. (2026), cermet/DLC | Coatings | Evaluar capa dúplex | HVOF+DLC; EIS; desgaste |
| **12** | Ahmad et al. (2025), Ni-P/$Y_2O_3$ | Sci. Reports | $Y_2O_3$ en Ni-P | Ni-P/$Y_2O_3$; HV; Tafel/EIS |
| **13** | Huang et al. (2026), MAO/$TiO_2$ | Molecules | $TiO_2$ en MAO | MAO/$TiO_2$; EIS; inmersión |
| **14** | Grigaitienė (2025), $Al_2O_3$ | Crystals | $TiO_2$ en $Al_2O_3$ | Plasma; XRD; corrosión |
| **15** | X. Wang et al. (2025), revisión | Coatings | Desgaste y corrosión | Técnicas y mecanismos |
| **16** | Y. Wang et al. (2025), revisión | Metals | Revisión antidesgaste | Familias y técnicas |

Nota. Los estudios 1–14 son experimentales y los estudios 15–16 son revisiones de literatura. AFR = relación aire-combustible; EIS = espectroscopía de impedancia electroquímica; HEA = aleación de alta entropía; MAO = oxidación por microarco. La matriz ampliada y la valoración cualitativa por estudio se presentan como material suplementario. Elaboración propia.

## 3. Resultados

### *Selección y características de los estudios*

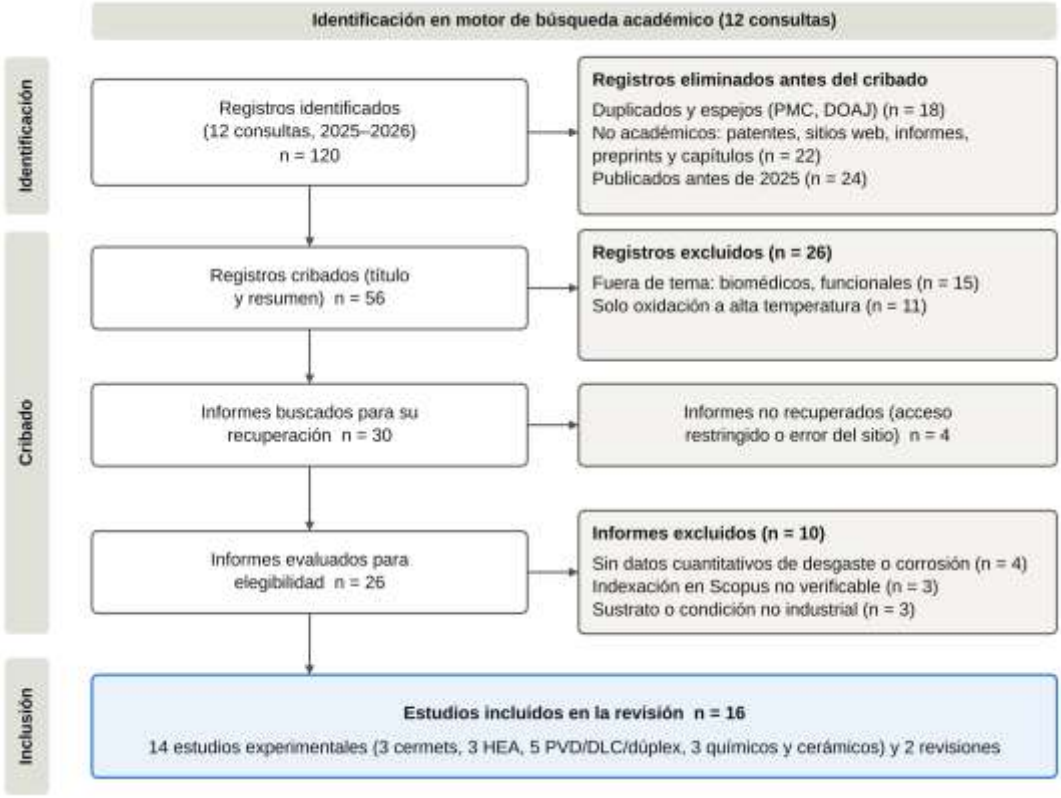
Se identificaron 120 registros; tras eliminar duplicados, registros no académicos y publicaciones anteriores a 2025, cribar títulos y resúmenes y evaluar los textos completos, se incluyeron 16 fuentes (Figura 1): 14 estudios experimentales y dos revisiones; 13 fueron publicados en 2025 y tres en 2026. Las fuentes aparecieron en 10 revistas, con predominio de Materials (cinco artículos). Los sustratos reportados en los estudios primarios incluyeron aceros al carbono y de baja aleación

(Q235, Q355, A36, AISI 1020, P265GH, 45 y HSLA-100), aceros inoxidables y para herramientas, una aleación de circonio, Ti6Al4V y aluminio 6061.

***Dureza y adherencia***

Los cermets alcanzaron las durezas más altas entre los recubrimientos gruesos: 1281 HV1 con 0,32 % de porosidad en WC-10Co-4Cr (Liu et al., 2025) y 1355,7 HV0,2 en WC-CoCrNiAlTi, frente a cerca de 320 HV0,2 del sustrato (Zhang et al., 2026); el polvo reciclado quedó en 678 HV frente a 1042 HV del polvo convencional de referencia (Woelk et al., 2025). El dúplex cermet/DLC llegó a 1795,8 HV0,1 (Y. Wang et al., 2026), y las HEA de CoCrFeNiMo, a 727–738 HV0,2. La adherencia por tracción del cermet superó 75,6 MPa con falla en el adhesivo (Liu et al., 2025); en películas PVD, la carga crítica varió de 76 N en DLC puro a 127 N en TiAlCN (Staszuk et al., 2025), y en la HEA de CrMnFeCoNi la fractura se inició en el sustrato, sin falla interfacial (Lu et al., 2025). Las cargas de indentación se conservan cuando fueron informadas; no se comparan directamente valores medidos con cargas distintas.

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020 de la identificación, el cribado y la inclusión de estudios




*Nota.* Elaboración propia según la plantilla PRISMA 2020 (Page et al., 2021).

***Comportamiento tribológico***

Frente al desgaste abrasivo, el WC-10Co-4Cr optimizado redujo la tasa de 69,99 a 0,569 $mm^3/(N·m)$, unas 123 veces respecto del acero sin recubrir (Liu et al., 2025); el WC-CoCrNiAlTi presentó una tasa de desgaste por deslizamiento 34,85 veces menor y una erosión por lodos 24 veces menor que el sustrato (Zhang et al., 2026). En las HEA, añadir boro redujo el coeficiente de fricción de 0,36 a 0,16 y la tasa de desgaste 5,8 veces frente a la aleación sin boro (Ao et al., 2025), mientras que en CoCrFeNiMo la potencia de 2250 W dio la menor fricción (0,084) y a 2500 W el desgaste aumentó casi 30 veces respecto de la condición de menor desgaste (Li et al., 2025). Las películas de carbono ofrecieron la menor fricción: 0,08–0,10 en DLC multicapa, cuya tasa en seco bajó de $2,09 \times 10^{-6}$ a $1,39 \times 10^{-7}$ $mm^3/(N·m)$ frente al acero sin recubrir (Jin et al., 2025); 0,10–0,14 en híbridos PVD/DLC, con desgaste no medible para AlCrTiN/DLC bajo el protocolo del estudio (Staszuk et al., 2025); y 0,15 en seco y 0,07 con grasa en DLC sobre 100Cr6, cuyo rodamiento recubierto funcionó 18 meses frente a seis meses para el convencional (Piotrowska et al., 2025) (Tabla 2).

Tabla II. Resultados más relevantes de los trabajos seleccionados

| N.º | Autores (año) | Revista | Resultados clave |
|---|---|---|---|
| **1** | Experimental · Liu et al. (2025) | Lubricants | 1281 HV1; porosidad 0,32 %; tasa 69,99→0,569 $mm^3/(N·m)$, 123× menor que acero sin recubrir; adherencia ≥75,6 MPa. |
| **2** | Experimental · Zhang et al. (2026) | Materials | 1355,7 HV0,2; desgaste por deslizamiento 34,85× y erosión 24× menores que el sustrato; corrosión no evaluada. |
| **3** | Experimental · Woelk et al. (2025) | Applied Sciences | Polvo reciclado: 678 frente a 1042 HV del polvo convencional; corriente 11→37,1 $\mu A/cm^2$ en medio ácido frente al convencional. |
| **4** | Experimental · Ao et al. (2025) | Materials | Con boro: desgaste 5,8× menor que aleación sin B; mejora de corrosión solo con baja proporción. |
| **5** | Experimental · Li et al. (2025) | Materials | A 2250 W: COF 0,084; a 2500 W aumentan desgaste y corrosión respecto de la condición de menor desgaste. |
| **6** | Experimental · Lu et al. (2025) | Sci. Reports | Ecorr −1,074→−0,775 V; adherencia sin falla interfacial; comparador y protocolo según condiciones del estudio. |

| N.º | Autores (año) | Revista | Resultados clave |
|---|---|---|---|
| 7 | Experimental · Rakhadilov (2025) | AIMS Mater. Sci. | Con mayor fracción de $N_2$: corrosión 0,054→0,0024 mm/año entre composiciones de CrN. |
| 8 | Experimental · Staszuk et al. (2025) | Materials | COF 0,10–0,14; AlCrTiN/DLC sin desgaste medible bajo el protocolo; Lc 76–127 N entre recubrimientos. |
| 9 | Experimental · Jin et al. (2025) | Nanomaterials | COF 0,08–0,10; desgaste y tribocorrosión menores que en acero sin recubrir. |
| 10 | Experimental · Piotrowska (2025) | Materials | COF 0,07–0,15; desgaste 87 % menor y rodamiento 18 frente a 6 meses: recubierto vs. convencional. |
| 11 | Experimental · Y. Wang et al. (2026) | Coatings | 1795,8 HV0,1; COF 0,08; icorr $1{,}08\times10^{-6}$ (HVOF)→$3{,}54\times10^{-8}$ A/cm² (dúplex); tribocorrosión frente a Ti6Al4V sin recubrir. |
| 12 | Experimental · Ahmad et al. (2025) | Sci. Reports | 764,7 HV; icorr 7,41 µA/cm² frente a 43,0 µA/cm² del acero y 23,6 µA/cm² de Ni-P. |
| 13 | Experimental · Huang et al. (2026) | Molecules | Porosidad 2,29 %; Jcorr $2{,}45\times10^{-5}$ (sustrato)→$1{,}13\times10^{-6}$ A/cm² (MAO/$TiO_2$); Rp $3{,}56\times10^{4}$ Ω·cm². |
| 14 | Experimental · Grigaitienė (2025) | Crystals | Corrosión menor que el acero en las condiciones del ensayo; más de 3 % $TiO_2$ debilitó la barrera. |
| 15 | REVISIÓN · X. Wang et al. (2025) | Coatings | Revisión: rangos resumidos por fuente secundaria; antidesgaste 1000–2000 HV y baja fricción COF 0,1–0,2. |
| 16 | REVISIÓN · Y. Wang et al. (2025) | Metals | Revisión: síntesis secundaria de técnicas, ventajas y retos; no corresponde a un ensayo original. |

Nota. COF = coeficiente de fricción; icorr/Jcorr = densidad de corriente de corrosión; Ecorr = potencial de corrosión; Lc = carga crítica de rayado; Rct/Rp = resistencia de transferencia de carga o de polarización. La tasa de desgaste se expresa en mm³/(N·m), y la densidad de corriente en

A/cm² o µA/cm². En cada resultado se identifica el comparador cuando fue informado. HV1, HV0,2 y HV0,1 indican la carga usada en el ensayo Vickers. Las cifras de los estudios experimentales son resultados originales; las de las dos revisiones son rangos resumidos de fuentes secundarias. Elaboración propia.

***Resistencia a la corrosión y tribocorrosión***

En NaCl al 3,5 %, el sistema dúplex cermet/DLC redujo la densidad de corriente de corrosión de $1{,}08 \times 10^{-6}$ A/cm² (capa HVOF sin DLC) a $3{,}54 \times 10^{-8}$ A/cm². Su tasa de tribocorrosión fue $5{,}64 \times 10^{-8}$ mm³/(N·m), frente a $2{,}74 \times 10^{-4}$ mm³/(N·m) para Ti6Al4V sin recubrir (Y. Wang et al., 2026). El DLC de 10 periodos rebajó la corriente del acero de $1{,}43 \times 10^{-5}$ a $2{,}15 \times 10^{-6}$ A/cm² y la tribocorrosión de $5{,}68 \times 10^{-5}$ a $4{,}53 \times 10^{-7}$ mm³/(N·m), comparando acero sin recubrir con acero recubierto (Jin et al., 2025). El Ni-P-$Y_2O_3$ con 0,75 g/L de nanopartículas redujo la corriente de 43,0 µA/cm² del acero y 23,6 µA/cm² del Ni-P a 7,41 µA/cm² (Ahmad et al., 2025); la MAO con 1 g/L de $TiO_2$ redujo la corriente del aluminio de $2{,}45 \times 10^{-5}$ a $1{,}13 \times 10^{-6}$ A/cm² (Huang et al., 2026), y el CrN con mayor fracción de $N_2$ redujo la velocidad de corrosión de 0,054 a 0,0024 mm/año al comparar composiciones de recubrimiento (Rakhadilov et al., 2025). En cambio, el boro mejoró la corrosión de la HEA solo en baja proporción (Ao et al., 2025), el cermet reciclado elevó su corriente de 11 a 37,1 µA/cm² frente al polvo convencional en medio acidificado (Woelk et al., 2025) y añadir más de 3 % de $TiO_2$ a la alúmina por plasma debilitó su efecto barrera (Grigaitienė et al., 2025).

***Síntesis comparativa por familia de recubrimiento***

Al ordenar los resultados por familia se observa una especialización clara. Los cermets de WC encabezaron la dureza y la resistencia al desgaste abrasivo y erosivo, pero solo uno de los tres estudios reportó simultáneamente una mejora de corrosión. Las HEA por láser lograron reducciones de desgaste y corrosión sensibles a la composición y a la potencia. Las películas DLC y PVD/DLC dieron coeficientes de fricción bajos (0,07–0,15) y menores tasas de desgaste por deslizamiento. Los recubrimientos químicos, electroquímicos y cerámicos redujeron la corriente de corrosión en los ensayos disponibles, aunque la mayoría no midió desgaste. Solo dos estudios evaluaron tribocorrosión; uno examinó un sistema dúplex cermet/DLC. Por tanto, el resultado favorable de esa arquitectura se limita a las combinaciones de sustrato, comparador, medio y protocolo de esos ensayos, y no demuestra superioridad general en todas las condiciones industriales.

## 4. Discusión

***Discusión de la revisión sistemática de la literatura***

La evidencia reciente confirma que ninguna familia domina en todas las propiedades, como ya advertían las revisiones incluidas: los recubrimientos antidesgaste dependen de durezas de 1000–

2000 HV pero se fragilizan con el aporte térmico, los de baja fricción (0,1–0,2) tienen capacidad de carga limitada y los autolubricantes se agotan con el servicio (X. Wang et al., 2025). Los estudios primarios reproducen ese patrón: el cermet más duro no fue el más resistente a la corrosión, y la adición que optimizó el desgaste de una HEA empeoró su pasivación (Woelk et al., 2025).

La comparabilidad entre estudios fue limitada. Seis de los 14 trabajos experimentales midieron desgaste y corrosión en el mismo recubrimiento, y solo dos integraron ambos fenómenos en ensayos de tribocorrosión. Varios informaron solo uno de ellos. Se detectaron además inconsistencias internas, como la asignación de la dureza máxima a potencias distintas (Li et al., 2025), y la única validación en servicio se basó en un rodamiento por condición (Piotrowska et al., 2025). La selección y la extracción fueron realizadas por una sola persona; la segunda lectura fue una verificación del mismo revisor, por lo que no permite estimar ni descartar sesgo entre evaluadores. También limitan la revisión la ventana temporal corta, los términos de búsqueda en inglés y cuatro textos no recuperados. La estrategia se reporta mediante consultas normalizadas para que sus términos y filtros puedan identificarse; al contrastar el diagrama de flujo, el total de 120 registros corresponde al proceso de selección documentado para esta revisión.

La valoración metodológica fue cualitativa y no produjo una puntuación. Para cada estudio experimental se registró si el método de deposición se describía de manera reproducible, si se declaraba una norma o protocolo de ensayo, si se incluía un comparador sin recubrir y si se medían desgaste y corrosión en el mismo recubrimiento. La matriz de valoración, con las categorías cumple, parcial o no informado y su justificación, se incluye como Tabla S2 del material suplementario. Esta valoración debe leerse como una apreciación descriptiva, no como una clasificación global de calidad.

***Discusión de resultados***

Frente al desgaste abrasivo y erosivo severo —minería, bombas de lodos, turbinas hidráulicas—, los cermets de WC por HVOF o HVAF son la opción más robusta por su dureza, baja porosidad y adherencia (Zhang et al., 2026), pero su protección contra la corrosión depende de que el aglutinante contenga cromo y de una porosidad baja, pues los poros interconectados permiten que el electrolito alcance el sustrato (Woelk et al., 2025). Para contactos deslizantes con lubricación escasa —rodamientos, guías, herramientas—, las películas DLC y los híbridos PVD/DLC ofrecen la menor fricción y desgaste (Staszuk et al., 2025), aunque su espesor de 1–2 µm las hace vulnerables si un defecto expone el sustrato y activa el par galvánico (Jin et al., 2025).

La arquitectura dúplex es prometedora dentro de la evidencia revisada, pero su ventaja debe delimitarse a lo realmente ensayado. Un estudio de cermet WC/DLC comparó la capa HVOF sola con la capa dúplex y reportó menor densidad de corriente en NaCl al 3,5 %; también comparó la tasa de tribocorrosión del sistema con Ti6Al4V sin recubrir (Y. Wang et al., 2026). Este resultado

respalda el beneficio del DLC como capa de sellado para ese sistema y esos comparadores, pero no establece que cualquier arquitectura dúplex sea superior ni que el resultado se mantenga en otros sustratos, medios o cargas. En el conjunto incluido, solo dos estudios hicieron pruebas de tribocorrosión. Las HEA por láser son una alternativa metalúrgicamente unida para las aleaciones ensayadas si se controlan la potencia y la fracción de fases secundarias (Li et al., 2025). Cuando domina la corrosión, el Ni-P nanocompuesto, el CrN, la MAO dopada y la alúmina con $TiO_2$ son opciones que mostraron mejoras en sus condiciones específicas de ensayo (Ahmad et al., 2025).

Los mecanismos que explican estas diferencias son coherentes entre familias. La porosidad interconectada es el principal camino del electrolito hacia el sustrato, por lo que los aditivos que sellan poros —$Y_2O_3$ en el Ni-P, $TiO_2$ en la MAO o una película DLC sobre el cermet— mejoran la corrosión con independencia de su efecto sobre la dureza (Huang et al., 2026). A su vez, las segundas fases duras ($TiB_2$, fase σ, carburos) elevan la resistencia al desgaste, pero crean pares galvánicos y defectos en la película pasiva cuando su fracción o tamaño crecen (Li et al., 2025). El diseño óptimo equilibra, por tanto, densidad, química del aglutinante y contenido de fases de refuerzo.

Para aplicaciones industriales, la selección debe partir del mecanismo dominante, del material del sustrato y del medio de servicio. Los datos de laboratorio orientan la selección, pero requieren validación bajo cargas, lubricación, geometría y ambiente reales. La revisión encontró pocos ensayos de tribocorrosión y una sola validación reportada en servicio; por ello, no permite ordenar de forma general las arquitecturas por desempeño industrial. También faltan estudios de durabilidad a largo plazo, costo del ciclo de vida y alternativas libres de cobalto y de cromo duro electrolítico.

## 5. Conclusiones

La evidencia de 2025–2026 indica que no existe un recubrimiento universal frente al desgaste y la corrosión. En los estudios revisados, los cermets de WC por HVOF o HVAF ofrecieron los mejores resultados ante desgaste abrasivo y erosivo; las películas DLC y PVD/DLC presentaron baja fricción en contactos deslizantes, mientras que los recubrimientos Ni-P nanocompuestos, CrN y MAO dopada mejoraron principalmente la corrosión. Un sistema dúplex cermet/DLC mostró una mejora combinada en los ensayos reportados frente a sus comparadores específicos; como solo dos estudios midieron tribocorrosión, este resultado no puede generalizarse a todos los sustratos ni a condiciones industriales distintas de las evaluadas.

El aporte de esta revisión es mostrar que el desempeño depende del control de la porosidad, la composición del aglutinante, los parámetros de deposición y las condiciones de servicio. Para fortalecer la evidencia, se recomienda normalizar protocolos que midan dureza, adherencia, desgaste y corrosión en un mismo recubrimiento, realizar la selección y extracción con revisores



Research Club Scientia Vol. 4, No 4, Octubre - Diciembre, pp. 1731-1743, ISSN: 3103 – 1315

independientes, conservar las cadenas y fechas exactas de búsqueda, y validar en servicio las arquitecturas dúplex antes de recomendar su aplicación industrial.

**Referencias**

Ahmad, M., Samra, A. S., Habib, S., Kahraman, R., Mansoor, B., & Shakoor, R. A. (2025). Mechanical properties and corrosion resistance of electroless deposited Ni-P-Y2O3 nanocomposite coatings for industrial applications. *Scientific Reports*, *15*, 26707. https://doi.org/10.1038/s41598-025-12319-6

Ao, S., Sun, J., Qi, Z., Wei, Y., Chen, H., & Li, Y. (2025). Enhanced wear and corrosion resistance of AlCoCrFeNiMoTi high-entropy alloy via B addition by laser cladding. *Materials*, *18*(20), 4651. https://doi.org/10.3390/ma18204651

Grigaitienė, V., Marcinauskas, L., Šuopys, A., Kėželis, R., & Griškonis, E. (2025). Effect of TiO2 content on the corrosion and thermal resistance of plasma-sprayed Al2O3-TiO2 coatings. *Crystals*, *15*(5), 439. https://doi.org/10.3390/cryst15050439

Huang, Z., Yang, S., Liao, X., Yang, S., Zhang, T., & Jiang, B. (2026). Effects of TiO2 nanoparticle doping on the micro-arc oxidation coating structure and corrosion resistance of 6061 aluminum alloy. *Molecules*, *31*(3), 468. https://doi.org/10.3390/molecules31030468

Jin, T., Feng, J.-A., Huang, Y., Wu, Z., Guo, X., Zhu, K., Dai, W., Yin, Y., & Wu, H. (2025). Period-tuned a-C/a-C:H multilayer DLC coating for tribocorrosion protection of HSLA-100 steel. *Nanomaterials*, *15*(22), 1704. https://doi.org/10.3390/nano15221704

Li, S., Nie, F., Ding, J., Mao, G., Guo, Y., Cao, T., Xiang, C., & Dong, H. (2025). Influence of laser power on CoCrFeNiMo high-entropy alloy coating microstructure and properties. *Materials*, *18*(11), 2650. https://doi.org/10.3390/ma18112650

Liu, T., Li, J., Li, H., Liu, J., Huang, Y., Wang, Q., & Ramachandran, C. S. (2025). Optimization of preparation process parameters for HVOF-sprayed WC-10Co-4Cr coatings and study of abrasive and corrosion performances. *Lubricants*, *13*(12), 516. https://doi.org/10.3390/lubricants13120516

Lu, D., Cui, X., & Zhang, J. (2025). Microstructure and properties of high entropy alloy coating obtained by laser cladding. *Scientific Reports*, *15*, 7357. https://doi.org/10.1038/s41598-025-91706-5

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, *372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Piotrowska, K., Madej, M., & Milewski, K. (2025). Tribological properties of DLC coatings in model-based and real-life tests. *Materials*, *18*(18), 4251. https://doi.org/10.3390/ma18184251

Rakhadilov, B., Muktanova, N., Buitkenov, D., Turabekov, Y., Akhmetova, E., & Dautbekov, M. (2025). Influence of gas mixture on the mechanical and physical properties of CrN coatings obtained by magnetron sputtering method. *AIMS Materials Science*, *12*(6), 1215-1240. https://doi.org/10.3934/matersci.2025056

Staszuk, M., Pakuła, D., Olszowska, M., Kloc-Ptaszna, A., Szindler, M., Wieczorek, A. N., Honysz, R., Jonda, E., & Basiaga, M. (2025). Structure and tribological properties of TiN/DLC, CrN/DLC, TiAlCN/DLC, AlTiCN/DLC and AlCrTiN/DLC hybrid coatings on tool steel. *Materials*, *18*(17), 4188. https://doi.org/10.3390/ma18174188

Wang, X., Zhao, W., Shi, T., Cheng, L., Hu, S., Zhou, C., Cui, L., Li, N., & Liaw, P. K. (2025). A review on tribological wear and corrosion resistance of surface coatings on steel substrates. *Coatings*, *15*(11), 1314. https://doi.org/10.3390/coatings15111314

Wang, Y., Feng, C., Lin, T., Zhu, R., Zhang, J., Yang, H., Yi, S., He, J., Tu, M., & Wei, G. (2025). A review of wear-resistant coatings for steel substrates: Applications and challenges. *Metals*, *15*(11), 1231. https://doi.org/10.3390/met15111231

Wang, Y., Liu, Z., & Zhang, Y. (2026). Insights into the corrosion and tribocorrosion behaviors of DLC-modified WC-based cermet duplex coatings. *Coatings*, *16*(2), 245. https://doi.org/10.3390/coatings16020245

Woelk, D., Eßler, J., Utu, I.-D., & Marginean, G. (2025). Comparative corrosion and wear behaviors of cermet coatings obtained from conventional and recycled powders. *Applied Sciences*, *15*(14), 7654. https://doi.org/10.3390/app15147654

Zhang, L., Yu, Y., Chen, X., Huo, J., Zhang, K., Wei, X., Zhang, Z., & Hui, X. (2026). Enhanced resistance to sliding and erosion wear in HVAF-sprayed WC-based cermets featuring a CoCrNiAlTi binder. *Materials*, *19*(1), 178. https://doi.org/10.3390/ma19010178