

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v9i18.0351>

PATOLOGÍAS AMBIENTALES EN PUENTES METÁLICOS: EVALUACIÓN TEÓRICA Y ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN

ENVIRONMENTAL PATHOLOGIES IN STEEL BRIDGES: THEORICAL EVALUATION AND MITIGATION STRATEGIES

Guerra-Valladares Marcelo David ¹; Zárate-Villacrés Andrea Natalí ²; Marcillo-Zapata Cristian Andrés ³; Pino-Arguello Jennifer Elizabeth ⁴; Fiallos-Iglesias Julio Andrés ⁵

¹ Universidad Nacional de Chimborazo – Facultad de Ingeniería, Riobamba, Ecuador.
Correo: marcelo.guerra@unach.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4119-4959>

² Universidad Nacional de Chimborazo – Facultad de Ingeniería, Riobamba, Ecuador.
Correo: andrea.zarate@unach.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7183-2862>.

³ Universidad Nacional de Chimborazo – Facultad de Ingeniería, Riobamba, Ecuador.
Correo: cristian.marcillo@unach.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-2552-903X>.

⁴ Universidad Nacional de Chimborazo – Facultad de Ingeniería, Riobamba, Ecuador.
Correo: jennifer.pino@unach.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-8386-5786>.

⁵ Universidad Nacional de Chimborazo – Facultad de Ingeniería, Riobamba, Ecuador.
Correo: julio.fiallos@unach.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-2145-5809>.

Resumen

En este artículo se analiza cómo el clima y la contaminación —como la humedad, el viento y los cambios bruscos de temperatura— dañan los puentes metálicos. El día a día a la intemperie desgasta estas estructuras; de hecho, el óxido y la fatiga causada por el paso constante de vehículos son sus peores enemigos, ya que les quitan fuerza y capacidad de carga. A esto se suman las vibraciones aerodinámicas y los problemas cuando el metal se calienta y no tiene espacio para expandirse, lo que termina agrietando conexiones importantes. También se tiene claro que revisar un puente a simple vista ya no es suficiente. Se necesita el apoyo de la tecnología, utilizando sensores y pruebas no destructivas, para descubrir los problemas a tiempo. Para proteger estas obras, se recomienda utilizar aceros especiales (como galvanizado o COR-TEN), aplicar buenas pinturas anticorrosivas y pensar el diseño estratégicamente para que el agua no se estanque. En conclusión, si se busca que la infraestructura sea segura y duradera, la clave está en controlar los daños mediante un mantenimiento preventivo riguroso y guiado por normas internacionales.

Palabras clave: Puentes Metálicos, corrosión, fatiga, mantenimiento, condiciones ambientales.

Abstract

This article analyzes how climate and pollution—such as humidity, wind, and sudden temperature changes—damage metal bridges. Day-to-day exposure to the elements wears down these structures; in fact, rust and the fatigue caused by the constant passage of vehicles are their worst enemies, as they strip away their strength and load-bearing capacity. Added to this are aerodynamic vibrations and the problems that arise when the metal heats up and has no room to expand, which ends up cracking important connections. It is also clear that visually inspecting a bridge is no longer enough. The support of technology is needed, using sensors and non-destructive testing, to discover problems in time. To protect these structures, it is recommended to use special steels (such as galvanized or COR-TEN), apply high-quality anti-corrosive paints, and approach the design strategically so that water does not pool. In conclusion, if the goal is for

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 09 de abril de 2026.

Fecha de aceptación: 19 de junio de 2026.

Fecha de publicación: 10 de julio de 2026.



the infrastructure to be safe and durable, the key lies in controlling damage through rigorous preventive maintenance guided by international standards.

Keywords: Metal bridges, corrosion, fatigue, maintenance, Environmental conditions.

1. Introducción

Los puentes metálicos constituyen componentes fundamentales dentro de la infraestructura vial, ferroviaria y peatonal a nivel global, permitiendo garantizar la unión territorial, el desarrollo económico y la integración de las regiones. El acero estructural ha sido históricamente el material adecuado para estas obras debido a sus grandes ventajas mecánicas, destacando su relación resistencia-peso, su versatilidad constructiva y su capacidad para salvar grandes luces con geometrías esbeltas. Sin embargo, a pesar de su innegable eficiencia y resistencia estática inicial, estos sistemas estructurales se encuentran permanentemente sometidos a la intemperie y, por ende, expuestos a un continuo grupo de condiciones ambientales severas que influyen en su desempeño a lo largo del tiempo.

La interacción entre el acero y el medio ambiente desencadena una serie de mecanismos de deterioro progresivo que, si no son

gestionados adecuadamente, comprometen drásticamente la vida útil y la seguridad de la estructura. Entre los factores ambientales más perjudiciales se identifican la humedad relativa elevada, las precipitaciones (incluyendo lluvia ácida), la exposición sostenida a la radiación solar intensa, los ciclos de congelación y descongelación, y la presencia de agentes contaminantes y salinidad. La agresividad de este entorno varía geoespacialmente; por ejemplo, las estructuras ubicadas en regiones costeras o en polos industriales enfrentan tasas de degradación significativamente mayores debido a la alta concentración de cloruros, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno en la atmósfera, compuestos que activan las reacciones electroquímicas destructivas (Chen & Duan, 2014; Zhang et al., 2024)

El fenómeno de degradación más crítico en la infraestructura metálica es la corrosión, un proceso electroquímico inevitable mediante el cual el acero, un material

termodinámicamente inestable en condiciones ambientales normales, tiende a regresar a su estado natural de óxido. La normativa internacional, como la ISO 9223, clasifica la corrosividad atmosférica en categorías que van desde muy baja (C1) hasta muy alta (C5) (ISO, 2012), mostrando que un puente en un entorno salino puede experimentar tasas de pérdida de masa de acero superiores a 650 gramos por metro cuadrado al año. Esta degradación se presnet a en diversas tipologías, incluyendo la corrosión uniforme, la corrosión galvánica generada por la incompatibilidad de metales en conexiones, y la corrosión localizada o por picaduras, siendo esta última muy peligrosa por su capacidad para crear concentradores de esfuerzos severos de forma indirecta.

El efecto de la corrosión es la pérdida de sección transversal neta de los elementos portantes (vigas, almas, alas y placas de conexión), lo que reduce considerablemente la capacidad resistente y la rigidez de la estructura. Desde el punto de vista de la mecánica de materiales, este debilitamiento incrementa los

esfuerzos internos bajo el mismo estado de cargas operativas.

A la corrosión química se suma la acción de los esfuerzos mecánicos repetitivos, dando lugar al fenómeno de la fatiga. Las cargas dinámicas y cíclicas generadas por el flujo constante del tráfico vehicular provocan micro fisuras en las conexiones, soldaduras y discontinuidades geométricas. Cuando estas cargas cíclicas actúan en unión con un ambiente corrosivo, se desarrolla la corrosión-fatiga, un estado donde la oxidación destruye continuamente la capa en la punta de la grieta, acelerando de manera considerable su tasa de propagación. La historia de la ingeniería civil documenta fallas catastróficas atribuidas a este fenómeno, como el colapso del puente Wootton en Inglaterra, donde vigas de hierro fundido fracturaron tras la acumulación silenciosa de daño por fatiga bajo cargas ferroviarias (Liu et al., 2020; Quezada Salazar & Viracocha German, 2021; Silva Vásquez, 2018).

Figura 1. Corrosión en estructura de puente

Fuente: (ISOSTATIKA, 2021)

Los efectos climáticos trascienden la química de los materiales y afectan el comportamiento estructural mediante la interacción aerodinámica y térmica. La radiación solar y las variaciones de temperatura generan contracciones y expansiones volumétricas en el acero. Si las juntas de dilatación se encuentran colmatadas por escombros o si los apoyos móviles fallan debido a la falta de lubricación y presencia de óxido, el movimiento natural de la estructura queda restringido. Esta restricción cinemática introduce esfuerzos adicionales de compresión o tracción que pueden inducir pandeo, fractura de pernos de anclaje o la falla prematura de los neoprenos. Por su

parte, la acción del viento sobre tableros esbeltos, especialmente en puentes colgantes o atirantados, puede generar inestabilidad y desprendimiento de vórtices, induciendo oscilaciones violentas como las que provocaron el emblemático colapso del puente de Tacoma Narrows (Hesaminia & Zuniga, 2020; Wang et al., 2024).

Las conexiones atornilladas de alta resistencia por fricción, fundamentales para la integridad monolítica del puente, son altamente susceptibles a las condiciones ambientales. La infiltración de humedad en los intersticios confinados de estas uniones promueve la corrosión por grietas y

la corrosión galvánica, ocasionando la pérdida gradual del esfuerzo de apriete (precarga) de los pernos. Sin la precarga adecuada, las placas de acero pierden su fricción interfacial y la conexión comienza a deslizarse, alterando la rigidez global de la estructura y sometiendo los pernos a esfuerzos de corte no contemplados en el diseño original.

En este escenario de múltiples amenazas, resulta evidente que los protocolos de inspección visual convencionales son insuficientes para garantizar la seguridad operativa, ya que los daños más críticos suelen ser microscópicos o estar ocultos bajo capas de pintura y óxido. La ingeniería moderna exige la adopción de programas de mantenimiento basados en la Evaluación de Ciclo de Vida (LCA) y el monitoreo de la salud estructural (SHM), integrando Ensayos No Destructivos (END) como la medición de espesores por ultrasonido, la termografía infrarroja y la inspección mediante corrientes de Foucault (Monteiro & Nanni, 2021; Al-Rashid et al., 2025; Silva et al., 2026).

En consecuencia, el presente artículo científico tiene como

propósito central evaluar los mecanismos de falla inducidos por las condiciones ambientales en los puentes metálicos. A través de la correlación entre los factores climáticos, el comportamiento mecánico del acero y los códigos de diseño internacionales (como AASHTO y Eurocódigo), se busca proponer directrices técnicas avanzadas para el diagnóstico, mitigación y prolongación de la vida útil de estas infraestructuras vitales (AASHTO, 2020).

En este contexto, el presente artículo no solo consolida el estado del arte sobre las patologías de origen ambiental en puentes de acero, sino que propone un marco integral de soluciones técnicas aplicables y estratégicamente viables. Mediante la integración de normativas internacionales vigentes y la adaptabilidad a los rigurosos códigos de construcción locales, el estudio trasciende el diagnóstico teórico para fundamentar metodologías de mantenimiento preventivo, selección de materiales resistentes y diseño estructural orientado a la durabilidad. Esta investigación busca proporcionar a la comunidad de ingenieros y gestores de

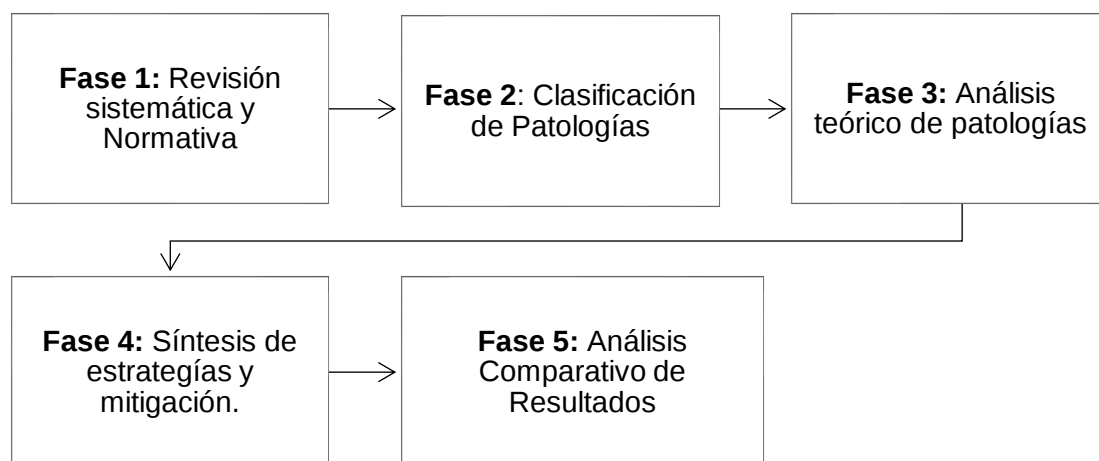
infraestructura una herramienta analítica sustentada que permita optimizar el ciclo de vida de las obras, mitigando la vulnerabilidad del acero y garantizando que la confiabilidad mecánica de estas estructuras prevalezca frente a las innegables exigencias de su entorno natural.

2. Metodología

El estudio se enmarca como investigación cualitativa, adoptando un diseño no experimental, transversal y de alcance descriptivo y documental. El objeto de estudio se aborda a través de la recopilación, análisis, clasificación y síntesis

crítica de información secundaria proveniente de bases de datos científicas, normativas de diseño estructural, manuales de inspección técnica y estudios de caso previamente documentados en la literatura académica. Este diseño metodológico permite construir un marco de comprensión profundo sobre la fenomenología del deterioro en puentes metálicos sin depender de la experimentación directa, estableciendo correlaciones teóricas entre los agentes ambientales y la respuesta mecánica del acero estructural. En la figura 2 se muestra un diagrama de flujo con las actividades a realizar en el desarrollo de la metodología.

Figura 2. Metodología de la investigación



El proceso investigativo consiste en la identificación y recolección de la literatura relevante mediante una revisión sistemática estructurada.

Para garantizar la validez, actualidad y pertinencia de los datos teóricos, se establecen protocolos de búsqueda en repositorios

académicos de alto impacto (Scopus, Web of Science, ASCE Library, IEEE Xplore) y en bibliotecas de instituciones normativas como AASHTO, AISC, FHWA, y códigos locales como la NEC-15 (AISC, 2022; AASHTO, 2020).

La búsqueda se ejecuta utilizando operadores booleanos y cadenas de palabras clave específicas, tales como: ("steel bridge" OR "metallic bridge") AND ("environmental degradation" OR "corrosion" OR "fatigue") AND "mitigation strategies".

Para la depuración de la información, se aplican estrictos criterios de inclusión y exclusión:

- **Criterios de inclusión:** Artículos científicos publicados en los últimos años, manuales técnicos de mantenimiento vigentes, códigos normativos de diseño en acero y estudios que presenten análisis teóricos sobre mecanismos de falla ambiental.
- **Criterios de exclusión:** Investigaciones centradas exclusivamente en puentes de hormigón armado, estudios de viabilidad financiera y artículos que no ofrezcan alternativas de

mitigación o análisis mecanicista de las fallas.

Una vez consolidada la base documental, se procede a la lectura y la interpretación de la literatura para clasificar las patologías. La metodología teórica propone estructurar los tipos de fallas en puentes metálicos en cuatro ejes categóricos fundamentales, según el agente ambiental detonante:

- **Deterioro Electroquímico:** Análisis de la corrosión uniforme, corrosión por picaduras (pitting), corrosión galvánica y corrosión por hendiduras, enfatizando cómo la salinidad y la humedad relativa actúan como electrolitos.
- **Deterioro Termodinámico:** Estudio de los esfuerzos inducidos por la expansión y contracción térmica restringida debido a la incidencia de la radiación solar y los gradientes de temperatura estacionales.
- **Deterioro Aerodinámico:** Evaluación de las vibraciones inducidas por el viento (desprendimiento de vórtices e inestabilidad aeroelástica) en tableros esbeltos (López & Torres, 2026).

- **Deterioro Mecánico-Ambiental:** Análisis de la corrosión-fatiga y el agrietamiento por tensión, donde la acción cíclica de las cargas de tráfico se combina sinérgicamente con el ataque químico del entorno.

La investigación trasciende la mera descripción y aplica los principios de la mecánica de materiales y la resistencia de elementos estructurales para explicar cómo y por qué suceden las fallas. Dado el carácter documental del estudio, el análisis se apoya en modelos matemáticos teóricos universalmente aceptados que describen la degradación progresiva de la capacidad portante.

Uno de los modelos teóricos analizados en la investigación para evaluar la falla por cargas cíclicas combinadas con deterioro ambiental es la regla de daño acumulado de Palmgren-Miner. Esta ley lineal establece que la falla por fatiga ocurre cuando la suma de las fracciones de vida consumidas por diferentes rangos de esfuerzo alcanza la unidad (Pipinato, 2021; Chung et al., 2020).

La ecuación se expresa como:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

Donde:

- D : representa el índice de daño acumulado ($D > 1$ implica falla)
- n_i : es el número de ciclos aplicados bajo un rango de esfuerzo específico i
- N_i : es el número de ciclos máximos tolerables teóricos para ese mismo rango de esfuerzo, obtenidos de las curvas S-N (Esfuerzo-Ciclos) de las normativas de diseño.

Finalmente, se cierra con el desarrollo de un marco analítico de soluciones. Esta etapa teórica evalúa comparativamente la eficacia de diversas intervenciones, tales como:

- **Selección de Materiales:** Viabilidad teórica del acero patinable (Corten) o aceros inoxidable en ambientes de alta corrosividad (Categorías C4 y C5).
- **Protección Activa y Pasiva:** Análisis del desempeño de sistemas de recubrimientos

- multicapa (zinc-epoxi-poliuretano) frente a la implementación de sistemas de protección catódica (ánodos de sacrificio o corriente impresa).
- **Optimizaciones de Diseño:** Recomendaciones geométricas normativas (AASHTO / AISC) para evitar la retención de agua, garantizar la correcta ventilación de las conexiones, optimizar las juntas de expansión térmica y aplicar perfiles aerodinámicos para mitigar vibraciones inducidas por el viento.

Tabla 1. Normativas para diseño y evaluación de puentes

Normativa / Estándar	Ámbito de Aplicación	Enfoque Principal en la Evaluación Ambiental y Estructural
ISO 9223	Corrosión Atmosférica	Clasifica la corrosividad del entorno en categorías (de C1 a CX) evaluando factores como el tiempo de humectación, concentración de cloruros y dióxido de azufre.
ISO 12944	Protección Anticorrosiva	Establece los lineamientos para la selección y aplicación de sistemas de pintura y recubrimientos protectores según la categoría de agresividad ambiental.
AASHTO LRFD	Diseño y Evaluación General	Define los estados límite de fatiga (Categorías A a E'), fractura, y cuantifica las deformaciones impuestas por variaciones térmicas para el diseño de apoyos y juntas.
ASTM A709 / A709M	Especificaciones de Materiales	Regula los grados de acero estructural para puentes, incluyendo los aceros de alto desempeño (HPS) y aceros patinables (tipo Corten) resistentes a la intemperie.
ASTM A325 / A490	Pernería Estructural	Especifica los requisitos mecánicos de los pernos de alta resistencia, limitando la dureza para reducir la susceptibilidad al agrietamiento por corrosión bajo tensión.
ISO 13822:2010	Estructuras Existentes	Establece los principios y requisitos para la evaluación de estructuras en servicio, enfocándose en la inspección de procesos de deterioro interno causados por el entorno.
AISC / NCHRP	Componentes Específicos	Directrices para la instalación y evaluación de dispositivos de apoyo (para expansión térmica) y metodologías para identificar problemas de vibración en el tablero.

Fuente: (Propia)

3. Resultados y discusión

A partir del análisis de la literatura científica, se han consolidado

resultados teóricos fundamentales que describen el comportamiento de las superestructuras metálicas frente

a condiciones ambientales adversas, así como las alternativas tecnológicas y de diseño para su mitigación. Al tratarse de una investigación de carácter documental y descriptivo, estos resultados representan el consenso analítico de la ingeniería estructural respecto a las tasas de degradación, la alteración de la capacidad resistente y las estrategias de control preventivo, descartando enfoques empíricos de campo para centrarse en los fenómenos que causan daño en el material.

El resultado principal derivado de los estudios de deterioro electroquímico indica que la pérdida de sección transversal por corrosión no es un fenómeno constante, sino que obedece a un proceso asintótico dependiente de la disponibilidad de un electrolito (humedad) y agentes catalizadores (cloruros, sulfatos). La literatura clasifica la agresividad del entorno según la norma ISO 9223, evidenciando que en ambientes marinos o de alta contaminación industrial (Categoría C5), las tasas de pérdida de masa superan con creces los límites tolerables para perfiles esbeltos.

El impacto de esta pérdida del acero estructural trasciende la simple pérdida de área. A nivel fenomenológico, la reducción del espesor en las alas o almas de perfiles laminados y armados disminuye exponencialmente sus propiedades inerciales. Esto incrementa de manera drástica la susceptibilidad de los elementos a la inestabilidad elástica. La investigación documenta que secciones originalmente compactas pueden transitar a un estado de secciones no compactas o esbeltas a lo largo de las décadas de exposición, generando modos de falla como el pandeo local del ala comprimida o el pandeo lateral torsional antes de alcanzar el límite de fluencia del material bajo cargas de servicio (Chen & Duan, 2014; AISC, 2022).

La sinergia destructiva entre el deterioro ambiental y las cargas vehiculares cíclicas constituye uno de los mecanismos de colapso más críticos identificados en la revisión de la literatura. El acero, en condiciones ideales de laboratorio, presenta un límite de fatiga definido; sin embargo, en presencia de un medio corrosivo, las micro picaduras actúan

como concentradores de esfuerzos severos, anulando teóricamente este límite y permitiendo que la grieta se inicie de forma prematura (Liu et al., 2020; Chung et al., 2020).

Para modelar matemáticamente este fenómeno de agotamiento estructural bajo espectros de carga de amplitud variable, la investigación

considera la Regla de Daño Acumulado de Palmgren-Miner.

La ecuación fundamental se expresa como:

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$

La tabla 2 presenta un resumen de la forma como se considera el cálculo del deterioro por corrosión y fatiga:

Tabla 2. Modelación teórica del índice de daño acumulado

Escenario de Evaluación	Condición Ambiental (ISO 9223)	Ciclos de Tráfico Pesado (n1/N1)	Ciclos de Tráfico Ligero (n2/N2)	Índice de Daño Acumulado (D)	Estado Estructural Teórico
1. Ideal (Referencia)	C1/C2 (Sin corrosión significativa)	500,000/3,000,000	2,000,000/10,000,000	0.36	Seguro. Amplio margen de vida útil a fatiga restante (64%).
2. Degradación Moderada	C3 (Entorno urbano/industrial leve)	500,000/2,250,000	2,000,000/7,500,000	0.48	Seguro. Reducción del 25% en la capacidad Ni por inicio de picaduras.
3. Degradación Severa	C5 (Ambiente marino / Alta polución)	500,000/1,200,000	2,000,000/4,000,000	0.91	Crítico. Consumo del 91% de la vida útil. Falla inminente a corto plazo.
4. Severo + Incremento de Carga	C5 + (Aumento del 20% en volumen de tráfico)	600,000/1,200,000	2,400,000/4,000,000	1.10	Colapso Teórico. La demanda supera la capacidad degradada (D≥1.0).

Fuente: (Fatigue reliability assessment of steel bridge details integrating weigh-in-motion data and probabilistic corrosion models, 2018).

El análisis de los gradientes térmicos estacionales y diarios evidencia que las dilataciones y contracciones coartadas constituyen una fuente

primaria de falla en puentes metálicos. La investigación señala que la acumulación de detritos, humedad y la posterior oxidación

expansiva en los apoyos móviles (rodillos o placas de deslizamiento elastoméricas) tienden a "congelar" cinemáticamente la superestructura. Al restringirse la expansión térmica natural del acero, se generan grandes esfuerzos axiales de compresión o tracción que no fueron previstos en los modelos estáticos originales. Estos esfuerzos secundarios incrementan significativamente la demanda sobre la subestructura, induciendo a menudo el corte de pernos de anclaje, grietas en los pedestales de hormigón armado y, en casos extremos, pandeo global del puente en días de máxima radiación solar (Rodríguez & Gómez, 2024).

En el ámbito de la resistencia a fuerzas cortantes, la literatura demuestra la alta vulnerabilidad geométrica de las vigas armadas de gran peralte expuestas a ambientes húmedos. La teoría del campo de tensiones diagonales depende estrictamente de la geometría del panel del alma y, más específicamente, de la distancia "a", definida como la distancia libre horizontal entre los rigidizadores transversales (Sharma & Singh, 2025).

La degradación ambiental ataca considerablemente la intersección entre estos rigidizadores, el alma y el ala inferior, zonas propensas al estancamiento de agua. La formación de capas gruesas de óxido en estos intersticios genera una gran presión expansiva que deforma los rigidizadores, alterando físicamente la distancia libre entre ellos y comprometiendo su rigidez a flexión. Al perderse el anclaje perimetral efectivo del panel, la capacidad teórica a cortante de la viga colapsa, propiciando un mecanismo de falla inelástico.

La discusión en torno a los aceros patinables revela una división importante entre el desempeño teórico y la realidad operativa. Si bien estos materiales prometen puentes "libres de mantenimiento", su éxito es altamente dependiente del microclima local. En entornos con humedad perpetua o frente al escurrimiento constante de agua con sales de deshielo, el ciclo necesario de secado y humedecimiento para formar la pátina se interrumpe (Liu et al., 2025). En estos escenarios, el acero patinable se comporta de manera análoga al acero al carbono simple, exfoliándose en láminas

gruesas y sufriendo tasas de corrosión inadmisibles. Esta limitación subraya que la especificación de materiales avanzados no puede ser un acto reflejo, sino que requiere un mapeo ambiental riguroso del sitio de emplazamiento.

De igual forma, la efectividad de los esquemas de pintura multicapa está íntimamente supeditada a las tolerancias de ejecución. La literatura es concluyente al indicar que más del 70% de las fallas prematuras de los recubrimientos se deben a una deficiente preparación del sustrato. Alcanzar los estándares de limpieza abrasiva a metal blanco o casi blanco en trabajos de rehabilitación en campo (a gran altura y expuestos a los elementos) representa un desafío logístico y económico mayúsculo (ISO, 2018). Esto significa que la vida útil de barrera, proyectada teóricamente a 25 años, se reduce frecuentemente a menos de la mitad en la práctica, exigiendo inversiones recurrentes en mantenimiento correctivo.

Uno de los puntos de discusión más relevantes surge al cruzar el fenómeno progresivo de la corrosión con las directrices determinísticas de

los códigos internacionales de diseño, como la especificación AISC 360-22 aplicable al acero estructural.

Al analizar las conexiones soldadas, la norma establece en sus prescripciones que el tamaño mínimo permitido para un filete de soldadura debe determinarse siempre basándose en el espesor de la parte más delgada de la unión conectada (AISC, 2022). La justificación de este requerimiento es limitar el rápido enfriamiento de la soldadura que ocurre en placas delgadas, previniendo la formación de microestructuras frágiles y controlando las tensiones residuales de contracción térmica.

Sin embargo, frente a un ambiente agresivo sostenido a lo largo de décadas, se desencadena un conflicto de compatibilidad mecánica. Consideremos una conexión donde una placa de unión o cartela delgada sufre una corrosión atmosférica severa, perdiendo, por ejemplo, el 30% de su espesor original, mientras que el filete de soldadura permanece protegido o tiene una masa térmica mucho mayor que se corroe a menor velocidad. En este estado degradado, el filete de soldadura

existente se vuelve masivo y rígido en comparación con la placa base que, debido a su nuevo espesor residual, es sustancialmente más delgada que el mínimo de diseño inicial contemplado. Esta desproporción geométrica transforma la junta; la rigidez concentrada del filete induce severos concentradores de esfuerzos locales en la Zona Afectada por el Calor, incrementando el riesgo de desgarro y propiciando un mecanismo de fractura frágil ante la demanda cíclica del tráfico vehicular.

Esta información evidencia que, en climas hostiles, no se debe limitar el diseño estático a las cargas iniciales. Es imperativo integrar un "espesor de sacrificio" preventivo en las cartelas y placas conectoras, garantizando que, incluso tras 50 años de degradación proyectada, la parte más delgada residual siga manteniendo la compatibilidad mecánica mínima requerida con la masa del metal de aporte de la soldadura.

De manera análoga, la vulnerabilidad geométrica de las vigas maestras impone una revisión rigurosa del diseño a cortante. El campo de tensiones diagonales está

condicionado por la rigidez y disposición de los atiesadores transversales. La distancia libre entre rigidizadores transversales influye directamente en el cálculo de la resistencia post-pandeo.

La literatura evidencia que la corrosión expansiva en el encuentro alma-ala-rigidizador no solo disminuye el área transversal, sino que ejerce fuerzas transversales extremas que pandean los rigidizadores y desprenden los cordones de soldadura de anclaje. Cuando el rigidizador pierde verticalidad o su fijación al ala, la distancia libre efectiva a efectos de diseño se incrementa exageradamente (saltando al siguiente rigidizador). Al sobrepasar la relación máxima permitida de espaciamiento, la teoría del campo de tensiones colapsa por completo y la estructura transita silenciosamente hacia un estado de inminente pandeo por cortante, demostrando cómo una falla de protección ambiental en un detalle localizado cataliza un colapso mecánico global.

La síntesis de estas patologías adquiere particular relevancia cuando se extrapolan los hallazgos a

regiones con topografías complejas y altos cambios de temperatura, características de zonas andinas como las reguladas por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15). En locaciones con variabilidad climática extrema diaria—donde la superestructura absorbe radiación solar intensa al mediodía y enfrenta temperaturas gélidas durante la madrugada—la probabilidad de falla por esfuerzos térmicos debido a apoyos oxidados se multiplica. En estos escenarios, el espectro de daño de la regla de Palmgren-Miner se ve retroalimentado no solo por el tráfico, sino por ciclos severos de fatiga térmica de bajo número de ciclos.

Finalmente, se pone en evidencia la limitación del enfoque de diseño determinista tradicional en puentes. Asumir un solo valor estático para las propiedades geométricas de la sección a lo largo de una vida útil de 75 a 100 años carece de sustento en la realidad climática. La academia y las metodologías de Evaluación del Ciclo de Vida sugieren transitar hacia esquemas de modelación probabilística. Tratar las pérdidas por corrosión y el daño acumulado por fatiga como variables dependientes

del tiempo, permitiría a las agencias administradoras de infraestructura trazar curvas de degradación proyectada, planificando el presupuesto de intervenciones preventivas décadas antes de alcanzar el umbral crítico de colapso teórico, salvaguardando así las arterias vitales del desarrollo territorial de manera proactiva y económicamente sostenible (Guo et al., 2018; Ye et al., 2024; Rabi et al., 2025).

4. Conclusiones

El entorno climático actúa como una carga dinámica continua que altera severamente las propiedades mecánicas intrínsecas del acero. El análisis teórico mediante la regla de daño acumulado de Palmgren-Miner demuestra que la presencia de un medio corrosivo no solo reduce la sección transversal, sino que anula el límite de fatiga del material. Esta degradación desplaza las curvas S-N, consumiendo la vida útil de los elementos estructurales de forma acelerada y provocando colapsos teóricos incluso bajo volúmenes de tráfico constante y no incrementado. La aplicación estricta y estática de códigos de diseño normativos (como

AISC y AASHTO) resulta insuficiente frente a la variable temporal del deterioro. La investigación evidencia que directrices fundamentales, como la determinación del tamaño mínimo de la soldadura en función de la placa más delgada, pueden generar incompatibilidades mecánicas peligrosas a largo plazo. La pérdida asimétrica de espesor por corrosión transforma juntas dúctiles en nodos con alta concentración de esfuerzos térmicos y mecánicos, lo que impone la necesidad ineludible de incorporar "espesores de sacrificio ambiental" desde la etapa de concepción del proyecto.

El comportamiento evolutivo del daño ambiental y la introducción de cargas adicionales (como los inmensos esfuerzos de compresión generados por el trabamiento térmico de los apoyos oxidados) evidencian la obsolescencia de los enfoques de diseño determinísticos a largo plazo. Es ineludible que la ingeniería estructural contemporánea adopte metodologías basadas en la confiabilidad y la Evaluación del Ciclo de Vida, tratando la pérdida de sección geométrica y la degradación del material como variables

dependientes del tiempo, permitiendo predecir la probabilidad de falla y optimizar las inversiones preventivas.

Se determina que no existe una solución de protección universal. La eficacia teórica de los aceros patinables y los recubrimientos multicapa está estrictamente subordinada a la estabilidad del microclima local y a la rigurosidad en la preparación del sustrato. En ambientes de alta humedad retenida o fallas de mantenimiento, estas tecnologías pierden su valor, comportándose análogamente al acero al carbono convencional. En consecuencia, el detallamiento geométrico preventivo —como la provisión de sistemas de autodrenaje y la eliminación de intersticios— se erige como la medida de mitigación más confiable y costo-efectiva.

El comportamiento variable de la corrosión y la aleatoriedad de las cargas climáticas (esfuerzos térmicos por trabamiento de apoyos) dictaminan que la evaluación de la integridad estructural no puede basarse en un estado binario (seguro/inseguro). Es imperativa la transición de la ingeniería hacia

metodologías de Diseño Basado en Confiabilidad y Evaluación del Ciclo de Vida. Tratar el deterioro como una variable dependiente del tiempo permite establecer curvas predictivas de daño, transformando el mantenimiento vial de una disciplina reactiva correctiva a una ciencia proactiva y financieramente sostenible.

Ante la variabilidad de las protecciones activas, el diseño geométrico preventivo y la previsión normativa se erigen como la defensa principal. Las normativas internacionales exigen condicionar parámetros críticos, como el tamaño de la soldadura de filete, al espesor de la placa más delgada. Esto hace mandatorio diseñar con un "espesor de sacrificio ambiental" desde la concepción del proyecto. Si no se prevé esta pérdida asimétrica a lo largo de las décadas, la placa residual delgada y el filete de soldadura masivo generarán incompatibilidades mecánicas y severas concentraciones de esfuerzos en la zona afectada por el Calor, transformando juntas dúctiles en puntos de fractura frágil y colapso inelástico.

Bibliografía

- AASHTO. (2020). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (9th ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AISC. (2022). Specification for Structural Steel Buildings (Number ANSI/AISC 360-22).
- Al-Rashid, M., & others. (2025). Advanced phased array ultrasonic testing (PAUT) for detecting sub-surface fatigue cracks in structural steel welds. *NDT & E International*, 143, 102980.
- Chen, W.-F., & Duan, L. (2014). *Bridge Engineering Handbook: Superstructure Design* (2nd ed.). CRC Press.
- Chung, H., Lee, S., & Kim, J. (2020). Fatigue reliability evaluation of steel bridges under combined corrosion and cyclic loads. *Journal of Bridge Engineering*, 25(8), 4020050.
- Guo, T., Caprani, C. C., & Zheng, Y. (2018). Fatigue reliability assessment of steel bridge details integrating weigh-in-motion data and probabilistic corrosion models. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(7), 876–887.
- Hesaminia, S., & Zuniga, P. A. (2020). Vortex shedding and aerodynamic stability of long-span steel bridges: A review.

- Engineering Structures, 210, 110–125.
- ISO. (2012). Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation (Number ISO 9223:2012).
- ISO. (2018). Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems (Number ISO 12944).
- Liu, Y., Meng, X., & others. (2020). Corrosion-induced fatigue in steel bridge structures. *Engineering Failure Analysis*, 115, 104512. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104512>
- Liu, Y., Zhang, K., & Zhu, W. (2025). Application of deep learning algorithms for structural health monitoring of weathering steel bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 30(5), 4025012.
- Monteiro, P. J. M., & Nanni, A. (2021). *Nondestructive Evaluation of Reinforced Concrete and Steel Structures*. ASCE Press.
- Pipinato, A. (2021). Fatigue life assessment of existing steel bridges under variable amplitude loading. *International Journal of Fatigue*, 142, 105953.
- Quezada Salazar, R. C., & Viracocha German, F. X. (2021). Evaluación estructural por fatiga y determinación del factor de seguridad por capacidad de carga de la superestructura del puente #1 sobre la Quebrada Negra de la vía Alóag - Santo Domingo km 42+950. Universidad Central del Ecuador.
- Rabi, R. R., & others. (2025). Genetic Algorithm-Based Model Updating in a Real-Time Digital Twin for Steel Bridge Monitoring. *Sensors*, 25(4), 1120.
- Rodríguez, J. M., & Gómez, P. A. (2024). Evaluación de esfuerzos parásitos térmicos en puentes de acero con apoyos degradados mediante monitoreo IoT. *Revista Ingeniería de Construcción*, 39(2), 210–225.
- Sharma, A. K., & Singh, R. (2025). Evaluation of shear buckling coefficient and clear distance between transverse stiffeners in steel plate girders. *Journal of Constructional Steel Research*, 215, 108512.
- Silva, B. L. C., Vega, L. J. C., & Huaricallo, Y. (2026). Applications of artificial intelligence in bridge structural health monitoring: A systematic review of the last decade. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 42(1), 1–25.

Silva Vásquez, P. I. (2018). Fatiga en estructuras metálicas: Evaluación de daño en un puente ferroviario de acero ubicado en Praga, República Checa. Universidad Técnica Federico Santa María.

Wang, J., Zhang, M., & Zhao, L. (2024). Aerodynamic performance and vortex-shedding monitoring of short-to-medium span cable-stayed bridges. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 245, 105632.

Ye, X., & others. (2024). Digital twin for intelligent maintenance towards sustainable bridges: A case study of corrosion fatigue in steel tied-arch bridges. *Engineering Structures*, 312, 118241.

Zhang, L., Wang, F., & Chen, H. (2024). Long-term corrosion fatigue life prediction of steel bridges in coastal environments based on dynamic Bayesian networks. *Engineering Structures*, 302, 117400