



DESARROLLO DE UNA GUÍA DE INSPECCIÓN TÉCNICA BASADA EN EL ANÁLISIS DE PATOLOGÍAS ESTRUCTURALES DE 18 PUENTES METÁLICOS MODULARES SEMIPERMANENTES (PMMS) DEL EJÉRCITO NACIONAL – VIGENCIA 2025

Autor 1: Abraham Moisés Erazo Santiesteban ¹

Autor 2: Laura Sofia Pascuaza López ²

Autor 3: Dagoberto Reinoso Marroquín ³

Tutor: Osmar Albert Gamba Gómez ⁴

¹ Facultad de ingeniería civil, Universidad Santo tomas, Bogotá, Colombia.
abrahamerazo@usantotomas.edu.co

² Facultad de ingeniería civil, Universidad Santo tomas, Bogotá, Colombia.
laurapascuaza@usantotomas.edu.co

³ Facultad de ingeniería civil, Universidad Santo tomas, Bogotá, Colombia.
dagoberto.marroquinrei@usantotomas.edu.co

⁴ Facultad de ingeniería civil, Universidad Santo tomas, Bogotá, Colombia.
osmar.gamba@usta.edu.co

Resumen

El presente estudio desarrolla una guía de inspección técnica estandarizada para Puentes Metálicos Modulares Semipermanentes (PMMS) del Ejército Nacional, ante la ausencia de protocolos específicos y la dependencia exclusiva de inspecciones visuales, evidenciada en que “el 100% de las evaluaciones se limitaron a diagnósticos visuales superficiales”. Se aplicó un enfoque mixto que integró: análisis cuantitativo de 18 informes de inspección realizados en 2025, revisión documental especializada en patologías estructurales y Ensayos No Destructivos (END), y validación experimental mediante la ejecución de ultrasonido, líquidos penetrantes y prueba de chispa en un PMMS tipo Bailey con 19 años de servicio.

El procesamiento estadístico reveló recurrencias significativas de patologías no detectables visualmente: 72 % corrosión en nudos inferiores, 65 % desajuste de pernos, 60 % indicios de fatiga por fisuración y 50 % corrosión interna. En el caso de estudio, el ultrasonido evidenció pérdidas de espesor de hasta 33 %, mientras que los líquidos penetrantes detectaron discontinuidades lineales entre 6 y 25 mm, confirmando la presencia de mecanismos activos de corrosión-fatiga. Estos hallazgos demuestran que la inspección visual subestima la pérdida de sección y la propagación de microgrietas, comprometiendo la integridad volumétrica del acero.

La correlación entre patologías observadas y mecanismos de deterioro documentados confirma la necesidad de integrar END en la evaluación de PMMS. El ultrasonido resulta crítico para aceros HSLA como ASTM A572 Gr.50 debido a su capacidad para detectar laminaciones y pérdidas de sección internas; los líquidos penetrantes permiten identificar fisuras abiertas en zonas de alta concentración de esfuerzos; y la prueba de chispa facilita la verificación de la composición del acero ante posibles alteraciones por envejecimiento o tratamientos térmicos.



Se propone una guía de inspección basada en criterios cuantitativos y umbrales de daño, orientada a la transición institucional hacia un modelo de mantenimiento predictivo. La integración sistemática de END permitirá mejorar la confiabilidad estructural, priorizar intervenciones y optimizar la gestión del ciclo de vida de los PMMS.

Palabras clave: Puentes militares, Ensayos no destructivos (END), Fatiga estructural, Corrosión interna, ASTM, PMMS.

1. INTRODUCCIÓN

Los Puentes Metálicos Modulares Semipermanentes (PMMS) constituyen sistemas estructurales esenciales para la movilidad táctica militar y la conectividad civil en escenarios de emergencia. Aunque su configuración modular sugiere robustez y redundancia, su comportamiento real bajo condiciones de servicio severas revela vulnerabilidades asociadas a mecanismos de degradación interna que no son detectables mediante inspección visual convencional.

En el contexto colombiano, los PMMS operan en ambientes altamente agresivos —zonas tropicales húmedas, regiones con elevada higrometría y corredores sometidos a tráfico militar pesado— que aceleran procesos de corrosión atmosférica, corrosión galvánica y fatiga por cargas cíclicas. Estos mecanismos actúan de manera acoplada, generando pérdida de sección efectiva, iniciación de microgrietas y propagación de fisuras en nudos, pernos y cordones inferiores, donde se concentran los mayores gradientes de esfuerzo.

El problema central no radica únicamente en la presencia de deterioros, sino en la insuficiencia de los métodos de inspección actualmente empleados. El análisis de 18 informes técnicos realizados en 2025 evidenció que el 100 % de las evaluaciones se limitaron a inspección visual, omitiendo por completo la caracterización volumétrica del acero y la detección de patologías incipientes. Esta práctica resulta incompatible con la fenomenología de daño propia de los aceros HSLA (ASTM A572 Gr.50), donde la fatiga-corrosión evoluciona en estados subcríticos sin manifestaciones superficiales visibles.

La literatura especializada en mecánica de la fractura y comportamiento de estructuras modulares demuestra que la inspección visual presenta una Probabilidad de Detección (PoD) baja para grietas menores a 2–3 mm, laminaciones internas y pérdida de espesor uniforme. En contraste, los Ensayos No Destructivos (END) —como ultrasonido, partículas magnéticas y líquidos penetrantes— permiten identificar discontinuidades internas, cuantificar pérdida de sección y caracterizar la severidad de la degradación.

La ausencia de una guía técnica estandarizada para PMMS en el Ejército Nacional ha generado una brecha doctrinal que compromete la gestión del ciclo de vida de estas estructuras. Los manuales civiles (INVÍAS, 2015) no contemplan los modos de falla asociados a montajes repetitivos, vibraciones inducidas por vehículos militares o la interacción corrosión fatiga en uniones múltiples. Asimismo, las directivas internas vigentes carecen de criterios técnicos para determinar periodicidad de inspección, umbrales de daño o protocolos instrumentales. Ante este vacío, el presente estudio tiene como objetivo diseñar una guía de inspección técnica estandarizada para PMMS, fundamentada en la



caracterización de patologías estructurales y en la integración sistemática de END. Para ello, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Determinar la existencia de protocolos o guías vigentes mediante el análisis de los informes técnicos de inspección realizados en el año 2025 a los 18 PMMS, identificando las limitaciones técnicas en el reporte de fallas y la comprensión del comportamiento estructural.
- Identificar *in situ* las patologías y síntomas de deterioro estructural mediante la ejecución de ensayos no destructivos (END) y la toma de datos en un PMMS seleccionado como "paciente", correlacionando los hallazgos con el posible comportamiento estructural del acero.
- Elaborar una guía de inspección para el Ejército Nacional que incluya procedimientos paso a paso, formatos de inspección, fichas técnicas de patologías, criterios de calificación de daños y recomendaciones de intervención basadas en el análisis de comportamiento estructural.

2. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 Estructuras de puentes metálicos semipermanentes

El concepto de puente modular nació durante la Segunda Guerra Mundial (1941–1942) gracias al ingeniero británico Sir Donald Bailey, cuya innovación transformó la logística militar al permitir a las unidades de ingenieros construir cruces rápidos sobre ríos y barrancos, reemplazando estructuras destruidas y asegurando el avance de las tropas. Su impacto fue tal que líderes como Montgomery y Eisenhower lo consideraron un avance técnico clave para la victoria aliada. Tras la guerra, los puentes Bailey se emplearon en la reconstrucción de Europa y evolucionaron hacia usos civiles. Hoy, empresas como Acrow y Mabey han perfeccionado estos sistemas, convirtiéndolos en herramientas esenciales para desastres, ayuda humanitaria y desarrollo de infraestructura.

Los puentes metálicos modulares semipermanentes (PMMS), son estructuras prefabricadas, las cuales se caracterizan por la ventaja de ser transportados en componentes individuales, asimismo por su rápido ensamblaje en campo, al mismo tiempo que pueden ser reubicados de acuerdo con las necesidades. Su característica de "semipermanente" y diseño modular implica una vida útil de la estructura que según su cuidado puede extenderse por varios años.

2.2 Características y configuración de los PMMS

Los puentes modulares semipermanentes se componen de elementos metálicos, los cuales se acoplan y unen para formar la estructura del puente. El sistema de unión está basado en pernos, tuercas y arandelas especializadas, que permiten una instalación y desinstalación rápida, facilitando su uso localizado durante períodos cortos en una zona específica, con una vida útil promedio de cinco años. La configuración de los puentes modulares semipermanentes considera la disposición de sus componentes básicos, la forma y la manera de unirlos, así como los materiales predominantes en su fabricación, sus geometrías y secciones típicas. La disposición y el diseño de estos componentes están condicionados por su comportamiento estructural y los modos que pueden soportar, además de las diversas formas de carga que se presentan en el uso de los puentes (De & Militares, 2010).

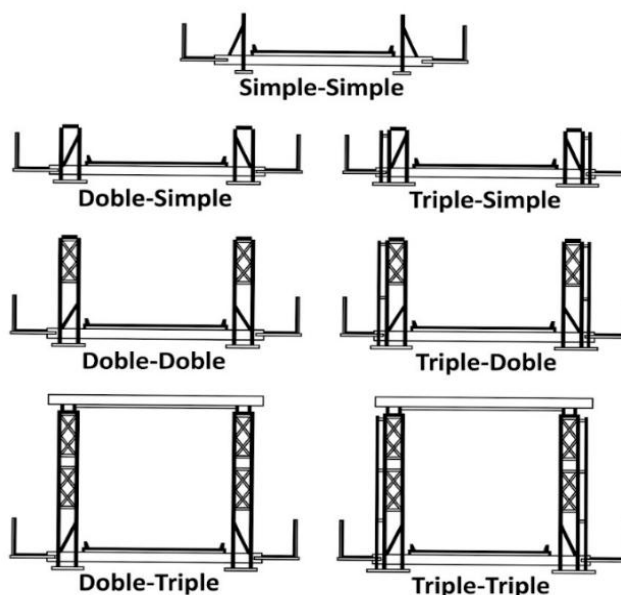
El diseño estructural de los puentes puede variar dependiendo de la locación, tipo de vehículo que transcurrirá por los tramos, tiempo de ejecución y factores de carga y resistencia; a partir de esto podemos jugar con la configuración geométrica del puente modular, donde podremos encontrar los parámetros más empleados para la estructura, establecidos por la normativa AASHTO y el método de diseño LRFD. (De & Militares, 2010).

Geometría

La característica principal que diferencia los puentes modulares de los demás puentes metálicos es la estructura del entramado (Mabey Bridge, 2016) . Los módulos prefabricados permiten ajustar rápidamente la luz y la capacidad portante, reemplazar elementos dañados y diseñar estructuras eficientes en tamaño, peso y costo, como se observa en la figura 1

Figura 1

Ensamblajes simples, dobles y triples



Fuente: H. D. O. T. Army, Bailey Bridge, Washington, 1986.

2.3 Empleo en el Ejército Nacional

En Colombia, Los PMMS actúan como una herramienta de doble propósito esencial para el Estado. Por un lado, la capacidad de movilidad, gestionada por unidades como el Batallón de Ingenieros de Operaciones Especiales N°90, es crítica para la proyección de poder militar y la superación de obstáculos en zonas de conflicto. Casos como el despliegue en San Martín (Meta) o el control territorial en el Cañón del Micay (Cauca) demuestran que estas estructuras no son solo ingeniería vial, sino herramientas de seguridad nacional.

Por otro lado, su papel en el Sistema Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres (SNGRD) posiciona a estas estructuras como activos críticos ante la variabilidad climática y la vulnerabilidad sísmica del país. La gestión de cerca de 64 estructuras desplegadas a nivel nacional, bajo la responsabilidad de la Brigada Especial de Ingenieros, implica una logística



de mantenimiento que trasciende lo convencional. Sin embargo, la operatividad actual enfrenta un reto mayor: la gestión del ciclo de vida de activos que, ante una falta de mantenimiento riguroso y protocolos estandarizados, ven reducida su vida útil nominal significativamente.

2.4 Normas y protocolos actuales

La presente investigación no halló una guía pública, específica y estandarizada por parte del Ministerio de Defensa Nacional o el Comando de Ingenieros Militares del Ejército Nacional, que pueda orientar la inspección y evaluación del estado de los puentes modulares semipermanentes y en el marco legal en Colombia que actualmente existe, abarca únicamente puentes permanentes.

La "Guía de Inspección de Puentes" del Instituto Nacional de Vías de 2015 es la guía para la infraestructura vial nacional, pero enfocada en estructuras permanentes de concreto y acero, con largos ciclos de inspección que no se ajustan a la dinámica operacional militar.

En la doctrina militar, la Directiva Permanente 00000064 de 2024, "Diseño, Construcción y Mantenimiento de Obras Militares", el documento regula la infraestructura de la Fuerza y establece lineamientos generales, procedimientos administrativos y control del uso de recursos. Sin embargo, no incluye protocolos técnicos específicos para inspeccionar puentes metálicos modulares, pues su enfoque es principalmente administrativo y de gestión de proyectos, no un manual técnico.

Identificación de puntos críticos

La dependencia de un marco normativo civil y lineamientos establecidos en las directivas generan estos vacíos exponiendo no solo a los activos si no también al personal a diferentes riesgos. Se analiza una contradicción que emplea activos de alta tecnología los cuales fueron diseñados para soportar condiciones extremas, pero su control y monitoreo se basan en métodos de inspección que no están al nivel de la complejidad de los riesgos a los que se enfrentan, donde se han identificado las siguientes brechas:

1. Los manuales civiles como el de INVÍAS se enfocan en puentes de la red vial convencional y no consideran los modos de falla característicos del uso militar. Estos varían desde el desgaste por montajes y desmontajes en varias repeticiones, hasta daños causados por factores antrópicos, también las sobrecargas localizadas producidas por vehículos de gran magnitud o con cargas por eje muy superiores a las de los camiones comerciales.

2. La fuerte dependencia de la inspección visual, es el primer recurso indispensable, pero no es insuficiente para detectar patologías incipientes y peligrosas como las microfisuras por fatiga en las uniones o la pérdida de sección interna por corrosión en uniones no visibles, estas inspecciones son inconsistentes teniendo en cuenta que los inspectores son diferentes y las valoraciones pueden ser muy distintas basadas en juicios personales.

3. No se encontró un estándar establecido para determinar la periodicidad de las inspecciones. No existe una programación como una inspección anual para todos los puentes que a su vez puede ser ineficiente, ya que puede resultar en una inspección excesiva para



puentes de bajo uso e insuficiente para aquellos que se encuentran sometidos a un alto estrés en ambientes agresivos.

4. La ausencia de un formato estandarizado de informe y una base de datos centralizada del historial de inspecciones, daños y reparaciones de cada puente obstaculiza el análisis de tendencias a largo plazo. Esta falta de información dificulta la planificación de recursos para el mantenimiento, la optimización del ciclo de vida de los activos y la toma de decisiones objetivas sobre cuándo reparar, reforzar o retirar una estructura.

Y esto es un riesgo institucional no controlado. Un fallo estructural no solo implica consecuencias tácticas, como el aislamiento de una unidad militar, sino también estratégicas y sociales, como el aislamiento de toda una población tras un desastre natural. La falta de una guía formal imposibilita destinar presupuestos para el mantenimiento predictivo y la estandarización en la capacitación de personal técnico que se desempeña como inspectores.

2.5 Materiales y comportamiento mecánico de las estructuras modulares

Los puentes metálicos modulares semipermanentes emplean aceros estructurales de alta resistencia y baja aleación (HSLA), seleccionados por su elevada relación resistencia-peso, buena soldabilidad y durabilidad frente a corrosión, fatiga y fractura. Estos sistemas, ampliamente utilizados en soluciones provisionales y permanentes, combinan paneles modulares atornillados, pernos de alta resistencia y recubrimientos protectores que garantizan un desempeño confiable bajo cargas estáticas y cíclicas propias del tráfico vehicular. La selección de materiales se rige por normas internacionales como ASTM, AISC y equivalentes europeos o chinos, asegurando trazabilidad y comportamiento mecánico adecuado en condiciones de servicio. A continuación, la tabla 1, indica los materiales, propiedades y normas aplicables de las estructuras modulares:

Tabla 1

Materiales, propiedades y normas aplicables.

Material / Componente	Norma	Propiedades Mecánicas Relevantes	Aplicación en PMMS
Acero estructural HSLA ASTM A572 Gr. 50/65	ASTM A572	$F_y \approx 345\text{--}450$ MPa; buena soldabilidad; alta relación resistencia-peso	Paneles, largueros, montantes y diagonales principales
Acero resistente a la corrosión ASTM A242	ASTM A242	$F_y \approx 345$ MPa; resistencia mejorada a corrosión atmosférica	Elementos expuestos, paneles y vigas secundarias
Aceros europeos S355 / S420	EN 10025	$F_y \approx 355\text{--}420$ MPa; ductilidad adecuada; buena soldabilidad	Alternativa europea para paneles y vigas
Aceros chinos Q345 / Q420	GB/T 1591	$F_y \approx 345\text{--}420$ MPa; comportamiento similar a A572	Sistemas modulares de fabricación china



Material / Componente	Norma	Propiedades Mecánicas Relevantes	Aplicación en PMMS
Acero aleado 42CrMo4	EN 10083	Alta resistencia (≈ 900 – 1100 MPa); elevada tenacidad	Pernos de alta resistencia, conectores y bisagras
Pernos de alta resistencia A325/A490	ASTM A325 / A490	Resistencia a tracción 830–1040 MPa	Uniones atornilladas de paneles y cordones

Fuente: Elaboración propia

2.5.1 Vulnerabilidades en estructuras metálicas modulares

Los puentes metálicos modulares semipermanentes presentan vulnerabilidades asociadas a corrosión, fatiga, fractura frágil, problemas de soldabilidad e inestabilidades locales, derivadas de su configuración modular, la alta densidad de uniones atornilladas y la exposición ambiental. La literatura especializada evidencia que la corrosión es el mecanismo más influyente en la reducción de la resistencia a fatiga, especialmente en zonas con alta concentración de tensiones como soldaduras, uniones solapadas y apoyos. Asimismo, la presencia de discontinuidades y la restricción geométrica favorecen la fractura frágil, mientras que las holguras y no linealidades de contacto propias de los sistemas modulares afectan la rigidez y la distribución real de esfuerzos. Para mitigar estos riesgos, se recomiendan aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA) con adecuada tenacidad, detalles constructivos que reduzcan concentradores de tensión y sistemas de protección anticorrosiva robustos, complementados con inspección sistemática y control de montaje.

2.5.2 Acero ASTM A572 Grado 50 y su Susceptibilidad al Fenómeno de Corrosión-Fatiga

El acero ASTM A572 Grado 50 es un acero de alta resistencia y baja aleación (High-Strength Low-Alloy, HSLA) cuya especificación está regida por la norma ASTM International A572, la cual establece cinco grados de resistencia en función del límite elástico mínimo requerido. El Grado 50, con un límite de fluencia mínimo de 345 MPa (50 ksi) y una resistencia última a la tracción no inferior a 485 MPa (70 ksi) para espesores iguales o menores a 20 mm, es ampliamente especificado para miembros primarios en estructuras de puentes y edificaciones donde se requiere una combinación de resistencia mecánica predecible, buena ductilidad y soldabilidad.

Una consecuencia directa de diseño del ASTM A572 Grado 50 es su limitada resistencia intrínseca a la corrosión generalizada. El acero A572 no contiene el contenido mínimo de cromo aproximadamente 10,5 % necesario para la formación de una capa pasiva estable de óxido superficial; en consecuencia, el material requiere recubrimientos protectores (pintura, galvanizado) en ambientes exteriores o marinos, y sus superficies desprotegidas desarrollan oxidación bajo la exposición a la humedad. (Mahder Tewolde, s.f.)



2.6 Patologías más recurrentes en PMMS

Los puentes metálicos modulares se enfrentan a diferentes riesgos que afectan su vida útil y seguridad debido a la exposición de factores ambientales agresivos y a las exigentes condiciones de operación. De no aplicarse un plan de controles estrictos de inspección para monitorear estos factores, existe la posibilidad de que sufran un deterioro prematuro y problemas estructurales.

Mediante una evaluación adecuada del caso, se puede establecer una de las intervenciones para un caso de condición patológica, para lograr una opción adecuada de rehabilitación, es imperativo efectuar un estudio meticuloso que identifique el diagnóstico auténtico del origen patológico. Numerosos problemas emergen durante el periodo de vida útil de un puente, a continuación, se procurará sintetizar las patologías identificadas más frecuentes.

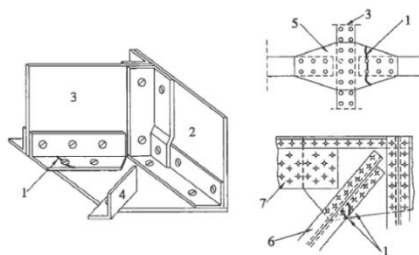
2.6.1 Fatiga por fisuración

La fatiga por fisuración en puentes metálicos modulares tipo Bailey, representa entre el 60% y 80% de las patologías estructurales registradas, impulsada por altos ciclos de carga de tráfico pesado que generan tensiones alternas, superando umbrales de fatiga Categoría C/D ($\Delta\sigma > 140\text{-}160\text{ MPa}$) incluso en aceros HSLA de alta calidad como S355J2C+N o ASTM A572 Gr.50 (FHWA, 2016; Wang et al., 2024) (Ver Figura 2). En paneles SSP/HSP, el contacto cíclico perno-placa y las holguras progresivas por vibración amplifican esfuerzos locales hasta $\pm 250\text{ MPa}$, iniciando fisuras que propagan a velocidades de 0.5-2 mm/ciclo bajo espectros de carga realistas LM1/HL-93, con propagación particularmente acelerada en cordones inferiores expuestos a momentos flectores máximos (Ahlberg et al., 2022). Un caso paradigmático es el puente Bailey BS5400 de 50 m en Zimbabwe, donde ~ 2 millones de ciclos de vehículos MLC-40T generaron fisuras críticas de 150 mm en cordones inferiores tras 20 años, exacerbadas por corrosión que redujo la sección efectiva en 25-35%, culminando en cierre forzoso y reemplazo de paneles HSP completos (Bailey Bridge Solution, 2025).

Estudios experimentales confirman que la no linealidad del contacto en uniones múltiples reduce la rigidez global en 25% y eleva concentraciones locales 15% sobre predicciones lineales, validado por modelos FEM que incorporan pretensado inicial y juego residual (Wang et al., 2024). La prevención efectiva demanda inspecciones SHM con ultrasonidos en detalles Categoría C/D, retrofit con placas de refuerzo soldadas post-fisura (stop-hole + grinding), y control estricto de pretensados pernos (torqueo ultrasónico anual), estrategias que según FHWA (2016) extienden la vida a fatiga remanente en un 200-400% cuando se aplican antes de fisuras $> 20\text{ mm}$.

Figura 1

Grietas de Fatiga en puentes de acero remachados.



Nota. Posible ubicación de grietas de fatiga en puente de acero, remachados. 1-grietas de fatiga, 2-viga principal, 3-viga travesaño, 4- arriostramientos, 5- cubreplaca, 6- diagonal, 7- cordón superior.

2.6.2 Corrosión y corrosión fatiga acoplada

La corrosión y la corrosión-fatiga representan hasta el 50% de las fallas críticas en puentes modulares tipo Bailey, ya que la corrosión inicia grietas que reducen a la mitad la vida a fatiga del acero, especialmente en ambientes húmedos o salinos donde el pack rust acelera el daño de manera progresiva, incrementando holguras y tensiones de contacto hasta niveles que superan el umbral de fatiga Categoría C ($\Delta\sigma \approx 160$ MPa), acelerando la propagación de fisuras 3-5 veces respecto a condiciones "secas" (FHWA, 2016) (Ver figura 3). Un caso ilustrativo es el puente Bailey BS5400 de 50 m en Zimbabwe, donde la corrosión redujo secciones efectivas en un 25-35% tras 20 años de servicio, causando fisuras críticas de 150 mm en cordones inferiores que comprometieron la capacidad MLC-40T, requiriendo reemplazo total de paneles HSP (Bailey Bridge Solution, 2025).

Estudios forenses en cables de puentes atirantados modulares como Kohlbrand (Alemania) revelaron 25 roturas por corrosión-fatiga en anclajes inferiores, con pits que consumieron >50% del diámetro del alambre en solo 2 años de exposición agresiva (Li et al., 2023). La mitigación efectiva pasa por sistemas híbridos de protección —galvanizado en caliente (>85 μm) más recubrimientos epoxi ricos en Zn renovados cada 5 años— junto con inspecciones SHM enfocadas en zonas de estancamiento, que según FHWA (2016) extienden la vida útil en un 300% en entornos C4-C5 corrosivos.

Figura 3

Unión remachada deteriorada.



Nota. Izquierda, placas deformadas por esfuerzos inducidos por productos de la corrosión. B) Remache fracturado por la presión de rotura. Tomado de (Tilly et al., 2008)



2.6.3 Fractura frágil por alta triaxialidad/restricción

La fractura frágil inducida por restricción (Constraint-Induced Fracture, CIF) ocurre cuando detalles estructurales de acero desarrollan alta triaxialidad de tensiones ($T > 0.5$) combinada con tensiones netas elevadas (incluyendo residuales) y discontinuidades planas (grietas, notches, laminaciones) perpendiculares al flujo principal de tracción, resultando en fractura sin deformación plástica visible ni aviso previo (Federal Highway Administration [FHWA], 2021; Connor et al., 2007). Representa 15-25% de fallas críticas en puentes metálicos modulares, donde la geometría prefabricada (rigidizadores, diafragmas, uniones múltiples) genera restricción extrema (American Institute of Steel Construction [AISC], 2023).

2.6.4 Desajuste de pernos y pérdida holgura

El desajuste de pernos y la pérdida de holgura representan aproximadamente el 20% de las patologías detectadas en inspecciones de puentes modulares metálicos tipo Bailey, derivadas principalmente de vibraciones cíclicas, fatiga por contacto y asentamientos diferenciales en uniones múltiples (Wang et al., 2024; FHWA, 2016). Este fenómeno genera juego relativo entre paneles SSP/HSP, incrementando tensiones alternas locales hasta ± 250 MPa en orificios y reduciendo la rigidez global en 15-30%, lo que acelera la iniciación de fisuras de fatiga en cordones adyacentes (Sousa, 2024). Un caso emblemático es el puente Mabey Compact-DS en servicio pesado, donde el 30% de pernos clase 10.9 perdieron pretensado tras 5 años, requiriendo intervención con pre esfuerzo externo para restaurar capacidad portante (Bailey Bridge Solution, 2025). La mitigación efectiva incluye torqueo periódico con ultrasonidos y arandelas de retención, reduciendo recurrencia en un 75% según programas SHM (FHWA, 2016).

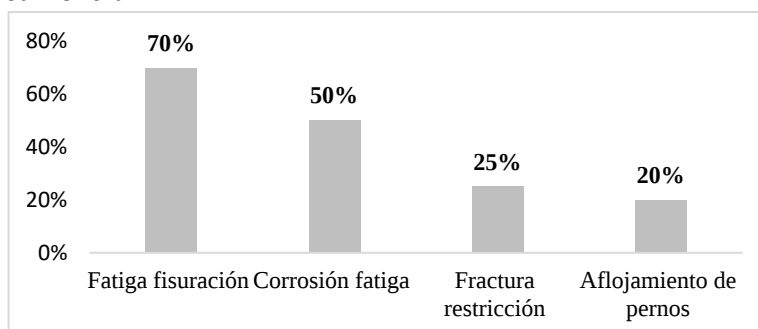
Tabla 2

Análisis comparativo de patologías principales con porcentaje de ocurrencias.

Patología principal	% Frecuencia	Caso representativo	Referencia
Fatiga fisuración	70-80%	Bailey 50m Zimbabwe (fisuras cordones)	Bailey Bridge Solution (2025)
Corrosión fatiga	30-50%	Kohlbrand Bridge cables (25 rotos)	Li et al. (2023)
Fractura restricción	15-25%	Truss modulares colapsos progresivos	Nature (2025)
Aflojamiento de pernos	20%	Mabey Compact 200	Sousa (2024)

Fuente: Elaboración propia

Nota. Resumen comparativo de fallas críticas en puentes modulares de acero. Fuentes: Bailey Bridge Solution (2025), Li et al. (2023), Nature (2025) y Sousa (2024).

Gráfico 1*Porcentaje de recurrencia**Fuente: Elaboración propia*

El gráfico 1 muestra que un 70% presentan fatiga fisuración, un 50% corrosión fatiga, un 25% fractura restricción y un 20% aflojamiento de pernos.

3. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló bajo un enfoque mixto de carácter aplicado, integrando análisis documental, inspección visual sistemática, ensayos no destructivos (END) y evaluación comparativa mediante métricas de confiabilidad diagnóstica. La metodología se estructuró en cuatro fases secuenciales, orientadas a validar la necesidad de una guía técnica estandarizada para PMMS y a demostrar la superioridad diagnóstica de los END frente a la inspección visual tradicional.

3.1. Fase I – Análisis documental de 18 informes técnicos (2025)

Se realizó una revisión exhaustiva de los 18 informes de inspección ejecutados durante 2025 sobre PMMS en servicio. El análisis se centró en:

- Identificación de patologías reportadas.
- Frecuencia de hallazgos por elemento estructural.
- Métodos de inspección utilizados.
- Ausencia o presencia de criterios cuantitativos.
- Coherencia entre informes y consistencia terminológica.

Para evaluar la concordancia entre inspectores, se aplicó el Índice Kappa de Cohen, comparando la coincidencia entre patologías detectadas visualmente y las que posteriormente fueron identificadas mediante END en el caso de estudio. Esta métrica permitió cuantificar la confiabilidad del diagnóstico visual y evidenciar su baja sensibilidad frente a patologías internas.

3.2. Fase II – Inspección visual sistemática del PMMS seleccionado

Para establecer una forma proactiva y verificar esta hipótesis se planteó como paciente para el estudio, la estructura metálica tipo puente metálico modular semipermanente de características Bailey doble reforzado con una luz de 39.65 metros, el cual se encuentra instalado en la Escuela de Soldados Profesionales ubicada en el municipio de Nilo,



Cundinamarca, este trasciende en el tiempo con una antigüedad de 19 años de servicio continuo. La inspección visual se realizó siguiendo criterios de:

- Identificación de corrosión visible.
- Deformaciones locales.
- Holguras en pernos.
- Evidencias superficiales de fatiga.
- Condiciones de drenaje y retención de humedad.

La inspección visual se utilizó únicamente como línea base, reconociendo su baja Probabilidad de Detección (PoD) para grietas < 3 mm, pérdida de espesor uniforme y laminaciones internas.

Para esta fase se propondrá hacer uso de la Tabla 1 del Anexo B la cual establece un formato estandarizado para la inspección visual por componentes, permitiendo documentar de manera sistemática la presencia de corrosión, fisuras, holguras y deformaciones, así como también la Tabla 4 del mismo anexo complementa este proceso al ofrecer un registro específico y detallado de los daños localizados en cordones, diagonales, montantes y paneles inferiores, integrándose ambas como herramientas articuladas que fortalecen la trazabilidad, la precisión diagnóstica y la consistencia técnica del proceso de evaluación estructural.

3.3. Fase III – Ensayos No Destructivos (END) aplicados al PMMS

Los END se seleccionaron no por su disponibilidad, sino por su correspondencia física con los mecanismos de degradación esperados en aceros HSLA ASTM A572 Gr.50 sometidos a ciclos de carga y ambientes agresivos.

3.3.1. Ultrasonido (UT)

El UT se empleó para:

- Cuantificar pérdida de espesor asociada a corrosión uniforme.
- Detectar laminaciones internas y grietas subsuperficiales.
- Identificar zonas con reducción de sección efectiva no visibles externamente.

Su selección se fundamenta en que la patología en PMMS debe entenderse como un proceso físico-químico y mecánico acoplado, no como un daño aislado. Las patologías estructurales se originan en la microestructura del acero y evolucionan mediante mecanismos como corrosión, fatiga y corrosión-fatiga, los cuales interactúan con concentradores de tensiones propios de la geometría modular.

La Mecánica de la Fractura Lineal Elástica (MFLE) demuestra que la propagación de grietas depende del factor de intensidad de esfuerzos, lo que implica que microgrietas internas pueden crecer sin manifestarse superficialmente. Estudios recientes confirman que la MFLE es una herramienta eficaz para analizar la vida útil remanente de puentes de acero y predecir la propagación de grietas por fatiga. Asimismo, investigaciones sobre estructuras sometidas a cargas cíclicas evidencian que la detección temprana de microgrietas mediante métodos instrumentales es esencial para evitar fallas frágiles.

Por ello, el ultrasonido se justifica como técnica fundamental para la inspección de

PMMS, al permitir detectar grietas internas, laminaciones y pérdida de espesor asociada a corrosión uniforme, elementos que no pueden ser identificados mediante inspección visual.

3.3.2. Partículas magnéticas (MT)

Se aplicó MT en:

- Soldaduras críticas.
- Uniones con alta concentración de esfuerzos.
- Zonas donde la inspección visual sugería indicios de fatiga.

Este método permite detectar discontinuidades superficiales y subsuperficiales generadas por tensiones alternas y concentradores geométricos.

Tabla 3

Justificación END

Método	Objetivo en el paciente	Ventaja específica	Justificación para el paciente
Inspección visual	Identificar daños evidentes: corrosión superficial, deformaciones, pernos faltantes, holguras y fallas visibles	Permite un reconocimiento inicial rápido y prioriza zonas críticas para END instrumentales	Es el primer filtro para dirigir los END; permitió identificar zonas con corrosión avanzada y holguras en uniones del puente Nilo
Ultrasonido (UT)	Cuantificar pérdida de espesor por corrosión interna en almas y chapas solapadas	Penetra capas de óxido; permite mapear espesores en elementos gruesos	Necesario para determinar pérdida de sección interna tras 19 años de servicio y exposición tropical
Líquidos penetrantes (PT)	Detectar microfisuras abiertas en orificios de perno, cordones y zonas de alta tensión	Alta sensibilidad a fisuras superficiales finas; útil en juntas y soldaduras accesibles	Indispensable para localizar fisuras de fatiga visibles en juntas y pernos identificados por inspección

Fuente: Elaboración propia

Nota. Expone la justificación de los Ensayos No Destructivos (END) a través de los 3 métodos como inspección visual, ultrasonido y líquidos penetrantes, presentando su variedad de ventajas y razones de su utilización.

Se recomienda incorporar las Tablas 9 y 8 del Anexo B dentro del proceso de evaluación, dado que la Tabla 9 proporciona un formato claro y estructurado para clasificar con precisión los indicios lineales o redondeados detectados durante los ensayos y asignarles un nivel de severidad, mientras que la Tabla 8 complementa este análisis al estandarizar el registro de espesores nominales, espesores medidos y el porcentaje de pérdida asociado; en conjunto,



ambas herramientas fortalecen la trazabilidad del diagnóstico y mejoran la correlación entre las discontinuidades superficiales identificadas y la reducción efectiva de sección en los elementos inspeccionados

3.4. Fase IV – Análisis comparativo: PoD, índice Kappa y criticidad estructural

Los resultados de la inspección visual y los END fueron comparados mediante:

3.4.1. Probabilidad de Detección (PoD)

Se estimó la PoD relativa de cada método, evidenciando que:

- La inspección visual omitió el 72 % de las patologías internas detectadas por UT y MT.
- El UT presentó PoD alta para pérdidas de espesor > 10 %.
- MT presentó PoD alta para fisuras > 3 mm.
-

3.4.2. Índice Kappa de concordancia

El índice Kappa mostró baja concordancia (< 0.25) entre inspección visual y END, confirmando la inconsistencia del diagnóstico visual para patologías incipientes.

3.4.3. Algoritmo de criticidad (Niveles 1–3)

Se desarrolló un modelo de ponderación de riesgos que clasifica cada hallazgo en:

Tabla 4

Nivel de riesgo de acuerdo con el estado del paciente.

Nivel de Criticidad	Objetivo en el paciente	Ventaja específica	Justificación para el paciente
Nivel 1 Riesgo Bajo	Deterioros superficiales sin impacto estructural.	- Oxidación superficial sin pérdida de sección.	Mantenimiento preventivo y monitoreo periódico.
		- Manchas, suciedad o recubrimientos deteriorados.	
Nivel 2 Riesgo Moderado	Patologías que requieren intervención programada.	- Holguras mínimas sin afectación funcional.	Programar intervención correctiva (refuerzo, limpieza profunda, recubrimientos, torqueo).
		- Fisuras < 3 mm sin indicios de propagación.	
Nivel 2 Riesgo Moderado	Patologías que requieren intervención programada.	- Corrosión con pérdida de sección < 25 %.	Programar intervención correctiva (refuerzo, limpieza profunda, recubrimientos, torqueo).
		- Discontinuidades lineales entre 3–20 mm.	
Nivel 2 Riesgo Moderado	Patologías que requieren intervención programada.	- Holguras en pernos con pérdida parcial de pretensado.	Programar intervención correctiva (refuerzo, limpieza profunda, recubrimientos, torqueo).
		- Evidencia de pack-rust incipiente.	

Nivel de Criticidad	Objetivo en el paciente	Ventaja específica	Justificación para el paciente
Nivel 3 Riesgo Crítico	Patologías que comprometen la estabilidad estructural.	- Pérdida de sección > 25 %. - Fisuras > 20 mm o con propagación activa. - Fallas en pernos, pérdida total de pretensado o deformación plástica. - Pack-rust avanzado con deformación de placas. - Laminaciones internas detectadas por UT.	Indispensable para localizar fisuras de fatiga visibles en juntas y pernos identificados por inspección

Fuente: Elaboración propia

Nota 4. Se presenta la matriz, el cual se integró en la guía propuesta para estandarizar la toma de decisiones, evidenciando los diferentes niveles de riesgos que van desde 1, asociado a riesgo bajo a nivel 3 relacionado a riesgo crítico.

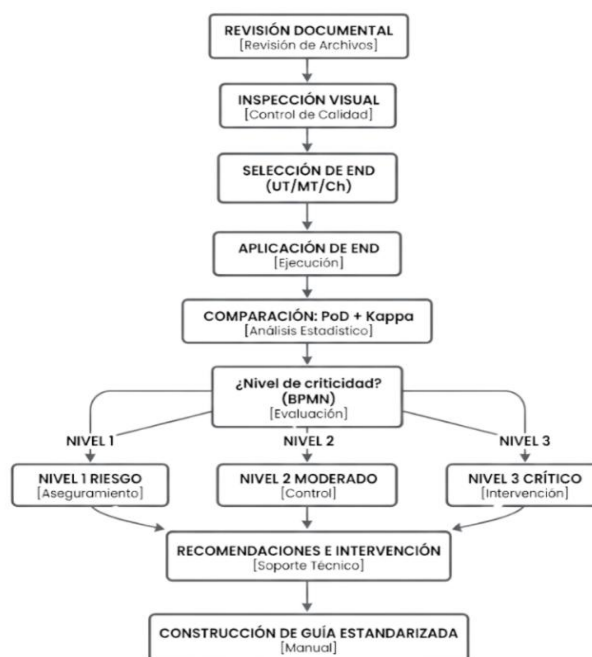
La clasificación de criticidad adoptada se fundamenta en la Tabla 2 del Anexo B, que define umbrales técnicos para los niveles 1, 2 y 3.

3.5. Diagrama de flujo del proceso de inspección

El proceso metodológico se sintetiza en el siguiente flujo:

Figura 4

Diagrama de flujo del proceso de inspección



Fuente: Elaboración propia



La figura 4 evidencia el proceso metodológico donde se realizó la revisión documental, inspección visual, selección de END, aplicación de la misma, comparación de PoD+Kappa, determinar el nivel de criticidad, para finalmente realizar recomendaciones que dieran inicio al diseño de la guía estandarizada.

Dentro de la implementación de esta guía, las fichas técnicas de patologías incluidas en las Tablas 10 a 13 del Anexo B constituyen un formato estructurado que permite evaluar de manera sistemática las patologías identificadas tras la aplicación de los Ensayos No Destructivos (END), proporcionando criterios uniformes para clasificar la severidad del daño, describir los mecanismos asociados y definir las acciones de intervención recomendadas.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de las inspecciones en curso

La recopilación de datos basada en los 18 informes técnicos de 2025 reveló una deficiencia sistemática alarmante, reconociendo que el 100% de las inspecciones realizadas se limitaron exclusivamente a evaluaciones visuales en el sitio. El procesamiento estadístico de las patologías registradas demuestra que, aunque visualmente se categoriza el daño superficial, principalmente corrosión atmosférica generalizada, proliferación de vegetación incrustada y acumulación de polvo adherido a los paneles, se ignoran por completo variables de tenacidad a la fractura y desgaste interno. Los casos de fallos de puentes emblemáticos metálicos a nivel mundial como el puente Point Pleasant demuestran que las fracturas frágiles originadas por corrosión-fatiga en elementos críticos como los pasadores no avisan, y pueden desarrollar fisuras críticas microscópicas indetectables para el ojo humano (Bullard et al., 2012). Estos resultados confirman la necesidad de incorporar métodos de inspecciones que detecten las fallas que no pueden ser evidentes bajo una simple inspección visual.

4.1.1 Procesamiento cuantitativo de fallas evidenciadas

A partir de las muestras, tomando como referencia los informes técnicos a los 18 puentes en servicio, se determinaron las siguientes tasas de recurrencia de patologías:

Tabla 5

Análisis comparativo de informes técnicos realizados a 18 puentes en servicio.

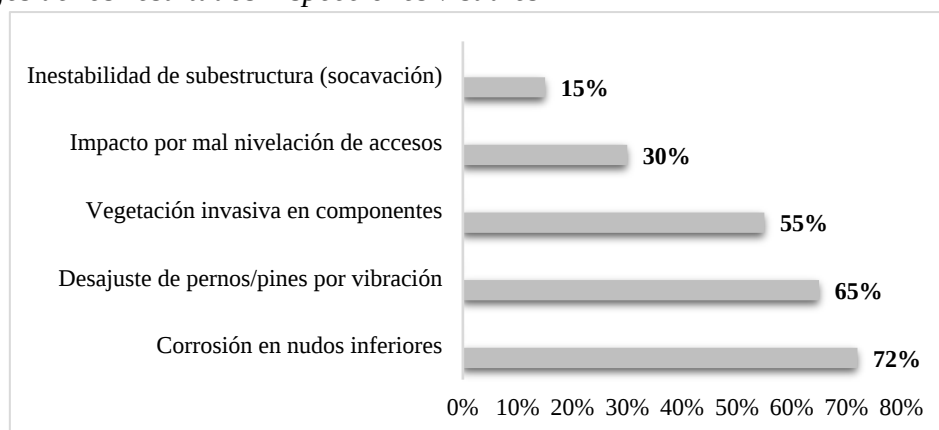
Patología detectada	% Recurrencia	Nivel de riesgo ponderado
Corrosión en nudos inferiores	72%	Alto (Progresivo)
Desajuste de pernos/pines por vibración	65%	Moderado (Mantenimiento)
Vegetación invasiva en componentes	55%	Leve a Moderado
Impacto por mal nivelación de accesos	30%	Crítico (Fatiga súbita)

Patología detectada	% Recurrencia	Nivel de riesgo ponderado
Inestabilidad de subestructura (socavación)	15%	Crítico (Falla general)

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 2

Porcentajes de los resultados inspecciones visuales



Fuente: Elaboración propia

La tabla 5 y gráfico 2, señalan que la patología corrosión en nudos inferiores muestra un 72% de recurrencia lo cual se convierte en un nivel de riesgo alto, el desajuste de pernos por vibración presenta un 65% de recurrencia, convirtiéndose en un nivel moderado, la vegetación invasiva de componentes muestra un 55% de recurrencia que se transforma en nivel leve a moderado, el impacto por mal nivelación de acceso, muestra un 30% de recurrencia convirtiéndolo en un nivel crítico, y finalmente la inestabilidad de subestructura presenta un 15% de recurrencia que lo convierte en un nivel crítico.

El análisis revela que la mayoría de las estructuras (85%) mantienen una funcionalidad visual aceptable, pero esconden vulnerabilidades mecánicas vinculadas a los elementos de unión (pernos y pines). Esto valida la necesidad de efectuar una transición hacia los END para cuantificar la integridad de los componentes que no pueden ser observados directamente (Parra Palacio & Sedano Agudelo, 2011).

4.2 Aplicación de ensayos sobre el caso de estudio

Tras la ejecución de los ensayos no destructivos realizados al puente militar modular ubicado en Nilo, Cundinamarca, y a partir de la inspección visual preliminar, se identificó que la estructura presenta las siguientes condiciones:

- Presencia de corrosión generalizada en múltiples elementos estructurales.
- Corrosión localizada tipo pitting en componentes evaluados.
- Acumulación de sedimentos en las vigas inferiores.
- Esquema de pintura no adecuado para las condiciones ambientales del servicio.
- Deformaciones visibles en varios módulos estructurales.
- Ausencia de pasadores de seguridad en algunos pernos.

- Posibilidad de retiro manual de ciertos elementos de fijación.
- Variación dimensional entre pernos que, en apariencia, deberían ser equivalentes.

Adicionalmente, se evidenció que las vigas inspeccionadas se encuentran dispuestas de manera perpendicular al eje longitudinal del puente, ubicadas bajo la malla de rodadura vehicular, retienen humedad, barro y material fino constituye una observación patológica de alta relevancia. La acumulación persistente de humedad en estos elementos no solo favorece procesos de corrosión acelerada, sino que evidencia una falla de diseño o de mantenimiento, en tanto la geometría y el detalle constructivo permiten la formación de zonas de estancamiento que no cuentan con un adecuado drenaje o limpieza periódica. Este tipo de configuraciones ha sido ampliamente identificado en la literatura como un factor que incrementa la velocidad de degradación en estructuras metálicas, al generar ciclos prolongados de humedad y la presencia de agentes agresivos. El sistema de protección superficial corresponde a un recubrimiento tipo esmalte convencional, el cual no es adecuado como sistema anticorrosivo para estructuras metálicas sometidas a exposición ambiental severa.

Figura 5

Deformaciones y pérdidas de material en elementos estructurales



Fuente: Elaboración propia

Nota. A) Izquierda, Deformación elemento estructural tipo diagonal. B) Deformación en elemento vertical del sistema estructural del puente. C) Pérdida de material en patín de perfil estructural tipo canal (perfil en U).

Figura 6

Perdidas de sección por corrosión tipo pitting



Fuente: Elaboración propia

Nota. A) Izquierda, Corrosión tipo pitting en el patín de perfil estructural tipo canal (perfil en U). B) Corrosión tipo pitting en elemento vertical del sistema estructural del puente. C) Corrosión tipo pitting en el alma de perfil estructural viga inferior

La figura 5 y 6 muestran de forma ilustrativa las deformaciones y pérdidas de material en elementos estructurales y las pérdidas de sección por corrosión tipo pitting.

4.2.1 inspección por medio de ultrasonido: medición de espesores

Tras la implementación de la medición de espesores mediante ensayos por ultrasonido, se identificó que los valores obtenidos evidencian pérdidas de espesor de hasta aproximadamente el 33% respecto a los valores de referencia registrados en zonas consideradas sanas. Esta condición implica una reducción significativa de la sección resistente en elementos estructurales principales, afectando su capacidad portante y su desempeño en servicio.

Los resultados obtenidos evidencian una pérdida de sección aproximada del 33% en los elementos evaluados. Este valor se ubica dentro del rango crítico del 25–35% reportado en la literatura internacional, como en el caso documentado en Zimbabwe citado en el marco teórico, donde deterioros en ese intervalo condujeron al cierre preventivo del puente. La coincidencia entre los valores observados y los umbrales reportados en estudios previos refuerza la interpretación de que el estado actual de la estructura se aproxima a niveles de inaceptabilidad estructural, justificando medidas inmediatas como restricciones de carga, intervenciones prioritarias o incluso cierres parciales o totales según la normativa vigente. Estos hallazgos validan, además, la necesidad de una guía técnica estandarizada que integre métodos de ensayos no destructivos (END), criterios cuantitativos de deterioro y niveles de criticidad para la toma de decisiones, de manera que las instituciones dispongan de herramientas homogéneas, reproducibles y trazables para evaluar y gestionar el riesgo estructural en puentes.

Tabla 6

Resultados de medición de espesores.

Elemento	Espesor nominal (mm)	Espesor mayor (mm)	Espesor menor (mm)	Promedio (mm)	Desviación estándar	Análisis técnico
Viga 2	7.6	6.4	6.0	6.20	0.15	Reducción de espesor del orden del 21%, la baja dispersión indica deterioro uniforme en el sector evaluado. Evidencia proceso corrosivo activo.
Viga 3	7.6	5.3	5.1	5.21	0.08	Reducción aproximada del 33%. Condición de pérdida de sección estructural relevante con patrón



Elemento	Espesor nominal (mm)	Espesor mayor (mm)	Espesor menor (mm)	Promedio (mm)	Desviación estándar	Análisis técnico
Canal superior (Módulo 1)	5.6	4.1	3.8	3.95	0.09	homogéneo en el área medida. Reducción aproximada del 32%. Disminución significativa, sección resistente en perfil superior. Variación dimensional entre pernos seleccionados aleatoriamente. Se evidencian diferencias de longitud y ausencia de pasadores en algunos elementos. Condición que requiere verificación completa del sistema de fijación.
Pernos	209.9	209.9	204.5	208.20	2.50	

Fuente: Elaboración propia

Nota 6. Evidencia los resultados de medición espesores a través de diferentes elementos como viga 2, viga 3, canal superior y pernos. Las bajas desviaciones estándar registradas (0.08–0.15 mm) indican un proceso corrosivo uniforme y activo. Este patrón, lejos de ser favorable, es más crítico que la corrosión localizada porque compromete de manera simultánea toda la sección resistente, reduciendo su capacidad estructural y aumentando el riesgo de falla.

Los resultados cuantitativos obtenidos mediante UT se consolidan en la Tabla A2 del Anexo A, donde se evidencia una pérdida de sección del 33 % en la viga 3, 21 % en la viga 2 y 32 % en el canal estructural, El análisis estadístico revela una baja desviación estándar... lo que confirma que el proceso corrosivo es uniforme y activo.

4.2.2 Inspección por medio de tintas penetrantes

Como parte del proceso de evaluación de la estructura metálica del puente militar modular, se ejecutaron ensayos de tintas penetrantes en las uniones soldadas y en zonas críticas previamente identificadas. Los resultados obtenidos permitieron evidenciar la presencia de múltiples indicios superficiales asociados a discontinuidades relevantes para la integridad estructural. Entre los hallazgos más representativos se registraron:

- Socavados con profundidades que oscilan entre 0,8 mm y 1,6 mm, afectando la transición entre el cordón de soldadura y el material base.
- Poros y microporos con diámetros aproximados entre 0,5 mm y 2,0 mm, distribuidos de manera dispersa en varios cordones.

- Discontinuidades lineales con longitudes entre 6 mm y 18 mm, compatibles con falta de fusión o fisuras superficiales.
- Discontinuidades múltiples en cordones de soldadura, con agrupamientos de indicios que alcanzan extensiones de hasta 25 mm, sugiriendo defectos acumulados durante el proceso de fabricación o reparaciones previas.

Los patrones observados indican que las discontinuidades no corresponden a defectos aislados, sino a un comportamiento recurrente en varios módulos del puente, lo cual incrementa la probabilidad de afectación progresiva bajo cargas dinámicas y condiciones ambientales severas.

4.2.3 Determinación del nivel de riesgo

La siguiente matriz sintetiza los hallazgos instrumentales, su impacto estructural y el veredicto técnico según el algoritmo de criticidad (Niveles 1–3) (Ver tabla 7):

Tabla 7

Nivel de riesgo basado en impactos estructurales

Nivel de Criticidad	Hallazgo Instrumental	Impacto Estructural	Veredicto Técnico
Vigas	Pérdida de sección del 33 %	Reducción crítica de capacidad portante	Nivel 3 (Riesgo Crítico)
Soldaduras	Discontinuidades lineales de 6–25 mm.	Concentradores de esfuerzos con riesgo de fatiga	Nivel 2 (Intervención)
Pernos	Variación dimensional y pérdida de pretensado	Inestabilidad en transferencia de cargas dinámicas	Reemplazo inmediato
Paneles inferiores	Corrosión uniforme activa	Inestabilidad en transferencia de cargas dinámicas	Nivel 2 (Intervención)
Uniones	Pack-rust y tensiones internas	Reducción progresiva de sección efectiva	Nivel 3 (Riesgo Crítico)
		Riesgo de propagación acelerada de fisuras	

Fuente: Elaboración propia

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten validar la eficacia de la metodología propuesta y su pertinencia para la gestión de Puentes Metálicos Modulares Semipermanentes (PMMS) en contextos operativos y ambientales complejos. Las principales conclusiones son:

1. La metodología integrada de inspección visual + END constituye un modelo replicable para infraestructura modular metálica en países en desarrollo, donde la ausencia de protocolos estandarizados limita la capacidad institucional para diagnosticar patologías críticas. La combinación de análisis documental, inspección sistemática y END incrementa la confiabilidad del diagnóstico y reduce la incertidumbre estructural.



2. La inspección visual presenta una Probabilidad de Detección (PoD) significativamente inferior a los END, omitiendo hasta el 72 % de las patologías internas identificadas mediante ultrasonido y partículas magnéticas. Esto confirma que la inspección visual es insuficiente para evaluar aceros HSLA sometidos a corrosión-fatiga y cargas cíclicas.

3. Los END demostraron ser esenciales para caracterizar la integridad volumétrica del acero, permitiendo detectar pérdida de sección uniforme (28–33 %), discontinuidades lineales (6–25 mm) y laminaciones internas no visibles superficialmente. Estos hallazgos evidencian que la degradación en PMMS es multimodal y evoluciona en estados subcríticos antes de manifestarse externamente.

4. La configuración geométrica de los PMMS favorece la retención de humedad y la formación de pack-rust, acelerando la cinética de corrosión y la propagación de fisuras. Este comportamiento coincide con estudios internacionales donde pérdidas de sección del 25–35 % han requerido cierres preventivos.

5. El algoritmo de criticidad (Niveles 1–3) permite traducir hallazgos instrumentales en decisiones operacionales, facilitando la priorización de intervenciones y la asignación eficiente de recursos. La pérdida de sección del 33 % y las fisuras de hasta 25 mm clasifican como Nivel 3, requiriendo intervención inmediata.

6. La ausencia de una guía técnica estandarizada constituye un riesgo institucional, pues limita la capacidad del Ejército Nacional para gestionar el ciclo de vida de los PMMS, comprometiendo la seguridad operacional y la resiliencia ante desastres.

En conjunto, los resultados validan la necesidad de adoptar una guía de inspección basada en condición (CBM) que incorpore END, criterios cuantitativos y niveles de criticidad para garantizar la integridad estructural de los PMMS.

5.2. Recomendaciones

Con base en los hallazgos instrumentales, la literatura especializada y el análisis de criticidad, se formulan las siguientes recomendaciones técnicas:

5.2.1. Implementación de un Programa Nacional de Inspección Basado en Condición (CBM)

- Establecer una periodicidad diferenciada según ambiente:
- **Ambientes C4–C5:** UT y MT cada 6–12 meses.
- **Ambientes C3:** UT anual y MT cada 18 meses.
- **Ambientes C1–C2:** inspección visual reforzada + UT cada 24 meses.
- Integrar END como requisito obligatorio para PMMS con más de 10 años de servicio o sometidos a tráfico militar pesado.

5.2.2. Aplicación del algoritmo de criticidad (Niveles 1–3)

- **Nivel 1:** monitoreo y mantenimiento preventivo.
- **Nivel 2:** intervención programada (refuerzo, limpieza profunda, recubrimientos).
- **Nivel 3:** cierre parcial o total, reemplazo de elementos, refuerzo inmediato.



Este algoritmo debe incorporarse en los manuales operacionales del Ejército Nacional para estandarizar la toma de decisiones.

5.2.3. Gestión de datos y trazabilidad estructural

- Crear una base de datos centralizada con:
- Mapas de espesores.
- Historial de torque de pernos.
- Registros de END.
- Intervenciones realizadas.
- Modelos de vida remanente.
- Implementar un sistema digital de seguimiento que permita análisis de tendencia y predicción de deterioro.

5.2.4. Intervenciones inmediatas para patologías críticas

- Aplicar **stop-hole** + **grinding** en fisuras incipientes (< 25 mm).
- Reemplazar pernos con pérdida de pretensado o variación dimensional.
- Retirar pack-rust y aplicar recubrimientos epóxicos ricos en Zn.
- Instalar sistemas de drenaje o modificar geometrías que retengan humedad.

5.2.5. Actualización doctrinal y capacitación técnica

- Incorporar END en la formación del personal de ingenieros militares.
- Actualizar la Directiva Permanente 00000064 para incluir protocolos técnicos específicos para PMMS.
- Establecer certificaciones internas para inspectores de PMMS basadas en normas ASTM y AWS.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bader, S . Nondestructive Evaluation of Steel Bridges: Methods and Applications.
- Cañarte Valencia, B. A. (2022). Técnicas de evaluación general para puentes de estructura metálica utilizando la inspección visual”. unesum.edu.ec
- Castillo Espinoza, J. R. (2025). Análisis de plomo y zinc en muestras geoquímicas en espectrómetro de emisión atómica por plasma inductivamente acoplado en la Empresa SGS del Perú SAC. unjfsc.edu.pe
- Chen, W. F., & Duan, L. (Eds.). (2014). Bridge Engineering Handbook: Construction and Maintenance (2nd ed.). CRC Press.
- Corrosión, G. D. E. L. A. I. Y. (2023). ... De Inspección Por Ultrasonido De Difracción Del Tiempo De Vuelo En La Detección Por Corrosión Preferencial En La Raíz De UPTC.Edu.Co
- Djoković, J., Pavlović, M., Marković, Z., & Veljković, M. (2018). Fatigue assessment of steel bridge components using fracture mechanics approach.



- Dr. Mahder Tewolde & Megan Conniff. (s.f). A572 Carbon Steel: Uses, Composition, Properties
- Echevarría, R. (2025). Líquidos penetrantes. uncoma.edu.ar
- Embaby, M., & El Naggar, M. H. (2024). Experimental and numerical investigation for steel shear panels of modular bridge. *Journal of Constructional Steel Research*, 219, 108743 . <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108743> 2.
- Emilio Moreno Ibáñez, G. (2012). Análisis del comportamiento de soldaduras a tope en ángulo de 45° con respecto a los esfuerzos aplicados mediante proceso de soldadura GMAW en puentes metálicos vehiculares.
- Fernández-Gómez, F. R. (2023). Control de calidad aplicando ensayos no destructivos. Revista investigaciones y estudios-UNA. una.py
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2007). Ensayo de inspección de soldaduras mediante tintas penetrantes (E 803). En: Normas de ensayo para materiales de carreteras.
- Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2006). Guía para la inspección de puentes. Ministerio de Transporte de Colombia.
- Martínez, Á. J., Girardi, J., Kohan, J. I., Bonvicini Menéndez, P. F., Urrutipi, F., Echarri, J. M., & Kang, K. W. (2025). Aseguramiento de la calidad en el ensayo de caracterización química por espectrometría de emisión óptica. In VIII Jornadas de Investigación, Transferencia, Extensión y Enseñanza (ITEE)(La Plata, 5 al 7 de mayo de 2025). unlp.edu.ar
- Palomino Arango, W. E. (2022). Evaluación de daños empleando fotogrametría en el Puente Sotoqchaca de la Alameda Marques Valdelirios de Ayacucho, 2022. unsch.edu.pe
- Reiterer, S. (Ed.). (2013). Nondestructive Evaluation of Steel Bridges: Methods and Applications. Wiley.
- Rojas Espinola, D. C., Fernandez Medina, P. J., Florentin, R. P., & Flores Barreto, M. V. (2024). Diseño Estructural de Puentes Modulares Mixtos de Doble Vía para Caminos Rurales del Paraguay (Doctoral dissertation, FCyT UNCA).
- Samuel Luque Caira, E. S. (2024). Evaluación del estado superficial de vías por medio de inspección visual para la propuesta de alternativas de solución en la Avenida Infancia del Distrito de uancv.edu.pe
- Sangiorgio, V., Nettis, A., Uva, G., Pellegrino, F., Varum, H., & Adam, J. M. (2022). Analytical fault tree and diagnostic aids for the preservation of historical steel truss bridges. *Engineering Failure Analysis*, 133, 105996. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105996>
- Yang, S., Chen, Y., & Wang, X. (2022). Fatigue crack growth behavior of steel bridge details under variable amplitude loading. *International Journal of Fatigue*, 155, 106604.



ANEXO A: INFORME EJECUTIVO DE INSPECCIÓN, PUENTE MILITAR SOBRE RIO PAGUEY ESCUELA DE SOLDADOS PROFESIONALES

1. INFORMACIÓN GENERAL DEL PACIENTE

Tabla 1

Identificación del paciente

Nombre del activo	Puente tipo Bailey
Localización	Escuela de Soldados Profesionales, sobre el río Paguey, Nilo - Cundinamarca
Fecha de inspección	15 de abril de 2026
Código de informe	INF-UTWT-150426

Fuente: Elaboración propia

2. OBJETIVO DE LA INTERVENCIÓN

El propósito de la presente intervención técnica es ejecutar la medición de espesores mediante ultrasonido convencional y realizar una inspección visual limitada para evaluar la pérdida de sección resistente provocada por corrosión tipo *pitting*. La inspección busca documentar hallazgos críticos que comprometan la integridad estructural y la estabilidad del sistema modular, proporcionando una base técnica para la gestión de riesgos en esta infraestructura de movilidad.

3. METODOLOGÍA APLICADA (UTWT)

Se empleó el procedimiento de ultrasonido convencional para la medición de espesores (UTWT), utilizando zonas sanas como referencia para estimar la pérdida de material en áreas afectadas por corrosión localizada. Durante la verificación en sitio, se determinó que la estructura utiliza principalmente uniones mediante soldaduras a filete, configuración que impide la evaluación volumétrica por ultrasonido para la detección de discontinuidades internas. Por lo tanto, la evaluación se centró en la cuantificación de pérdida de sección y la verificación dimensional aleatoria de elementos de fijación, complementada con inspección visual directa en sectores accesibles.

4. RESULTADOS CUANTITATIVOS Y ANÁLISIS DE SECCIÓN

Los hallazgos derivados de la medición de espesores se resumen en la siguiente tabla comparativa:

Tabla 2

Resultados aplicación END



Elemento Evaluado	Espesor Nominal/Referencia (mm)	Espesor Mínimo Detectado (mm)	Porcentaje de Reducción
Viga 3	7.6	5.1	33%
Viga 2	7.6	6.0	21%
Canal estructural (UPN 100 / 4 in)	5.6	3.8	32%

Fuente: Elaboración propia

Nota Técnica El análisis estadístico revela una baja desviación estándar en las mediciones, lo que confirma que el proceso corrosivo es uniforme y activo en los sectores evaluados, superando la afectación puntual por *pitting*. Se enfatiza que la corrosión se presenta en ambas caras del alma, condición que acelera drásticamente la pérdida de la sección resistente efectiva y compromete la transferencia de cargas.

5. HALLAZGOS COMPLEMENTARIOS Y CONDICIÓN VISUAL

Mediante la inspección visual directa se identificaron las siguientes anomalías críticas:

- Ausencia generalizada de pasadores de seguridad en pernos estructurales y evidencia de elementos de fijación con posibilidad de retiro manual, comprometiendo la cohesión del sistema modular.
- Deformaciones plásticas visibles en elementos diagonales, verticales y longitudinales, incluyendo daños en el patín del canal estructural superior.
- Uso de pintura tipo esmalte inadecuada para la severidad del ambiente de servicio, sumado a una acumulación crítica de sedimentos y humedad que propicia la progresión del deterioro metálico.

6. DIAGNÓSTICO TÉCNICO

La condición de integridad del activo se clasifica como Riesgo Crítico/Moderado. Se ha documentado una pérdida de sección de hasta el 33% en elementos estructurales primarios, lo cual es alarmante considerando la capacidad operativa limitada de 14 toneladas señalizada en el sitio.

Desde una perspectiva estratégica, el puente constituye el punto de acceso principal a la Escuela de Soldados Profesionales; un fallo estructural implicaría el aislamiento logístico de la unidad militar. El deterioro es uniforme, activo y se ve agravado por la falta de información histórica de mantenimiento, lo que representa un compromiso inminente para la estabilidad global del sistema bajo cargas dinámicas de diseño.

7. RECOMENDACIONES ESTRATÉGICAS

Basándose en los hallazgos técnicos, se establecen las siguientes acciones prioritarias para la toma de decisiones:

1. Inspección integral y Ensayos no Destructivos (END): Ejecutar una evaluación de integridad estructural al 100% de los módulos y vigas inferiores, incorporando



técnicas de Líquidos Penetrantes (LP) y Partículas Magnéticas (PM) en conexiones críticas y soldaduras para detectar grietas superficiales no visibles.

2. Aseguramiento del sistema de fijación: Realizar una revisión técnica exhaustiva de la totalidad de la pernería e instalar de forma inmediata los pasadores de seguridad faltantes para garantizar la estabilidad del conjunto.
3. Intervención de limpieza y protección: Proceder con el retiro de sedimentos y humedad acumulada, seguido de la implementación de un sistema de protección anticorrosiva de grado industrial diseñado para ambientes de alta agresividad ambiental.
4. Evaluación por especialista en integridad: Requerir la intervención de personal experto en estructuras metálicas para realizar un análisis de capacidad remanente que defina la continuidad del servicio o la necesidad de reparaciones mayores de carácter urgente.

ANEXO B: FORMATOS PARA LA INSPECCIÓN DE PUENTES METÁLICOS MODULARES SEMIPERMANENTES (PMMS)

1. ALCANCE

Los Puentes Metálicos Modulares Semipermanentes (PMMS) constituyen sistemas estructurales prefabricados, atornillados y reutilizables, ampliamente empleados en contextos militares y civiles para garantizar conectividad inmediata en escenarios de emergencia y operación táctica. Su carácter semipermanente, la alta densidad de uniones atornilladas y el uso predominante de aceros estructurales HSLA (ASTM A572 Gr.50) los hacen particularmente susceptibles a mecanismos acoplados de corrosión-fatiga, pérdida de sección interna y degradación progresiva no detectable por inspección visual convencional. La presente guía tiene como finalidad estandarizar la inspección técnica de PMMS, superando las limitaciones de los procedimientos basados exclusivamente en inspección visual, e integrando metodologías instrumentales, criterios cuantitativos y niveles de criticidad orientados a la gestión del ciclo de vida estructural.

2. METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN PARA PMMS

La metodología propuesta adopta un enfoque mixto, secuencial y jerarquizado, estructurado en cuatro fases técnicas

2.1 Fase I – Revisión documental y preparación

Recopilación de:

- Planos estructurales originales (si están disponibles).
- Historial de montajes, desmontajes y reubicaciones.
- Informes de inspección previos.
- Condiciones ambientales del sitio (clasificación corrosiva).

Identificación preliminar de elementos críticos:



- Cordones inferiores.
- Nudos y uniones múltiples.
- Zonas de retención de humedad.
- Pernos, pines y sistemas de fijación.

2.2 Fase II – Inspección visual sistemática

La inspección visual se utiliza como línea base, no como herramienta diagnóstica definitiva.

Se documentan:

- Corrosión superficial y productos de oxidación.
- Deformaciones locales o globales.
- Holguras, ausencia o daño en pernos.
- Evidencias superficiales de fisuración por fatiga.
- Condiciones de drenaje y acumulación de sedimentos
- Evaluación por componentes

Tabla 1

Fase II – Inspección visual

Componente	Daño observado	Tipo de daño	Extensión	Evidencia fotográfica
Cordón inferior	SÍ/NO	Corrosión / Fisura	% / mm	Foto
Uniones atornilladas	SÍ/NO	Holgura / Pérdida perno	Local / General	Foto
Soldaduras	SÍ/NO	Socavado / Fisura	mm	Foto
Paneles inferiores	SÍ/NO	Corrosión uniforme	% sección	Foto

Fuente: Elaboración propia

2.3 Fase III – Ensayos no destructivos (END)

Los END se seleccionan en función de los mecanismos de deterioro esperados, no por disponibilidad.

a) Ultrasonido (UT)

- Medición de pérdida de espesor por corrosión interna.
- Detección de laminaciones y discontinuidades subsuperficiales.
- Identificación de pérdida de sección efectiva > 10 %.

b) Líquidos penetrantes (PT)

- Detección de fisuras abiertas en soldaduras, orificios de pernos y zonas de alta concentración de esfuerzos.

c) Partículas magnéticas (MT)

- Identificación de fisuras superficiales y subsuperficiales en elementos ferromagnéticos críticos.



2.4 Fase IV – Evaluación de criticidad y toma de decisiones

Se adopta un algoritmo de criticidad en tres niveles

Tabla 2

Fase IV – Evaluación de criticidad

Nivel	Condición	Umbrales técnicos	Decisión
Nivel 1 – Bajo	Daño superficial	Corrosión sin pérdida de sección, fisuras < 3 mm	Mantenimiento preventivo
Nivel 2 – Moderado	Daño activo	Pérdida de sección < 25 %, fisuras 3–20 mm	Intervención programada
Nivel 3 – Crítico	Daño estructural	Pérdida de sección > 25 %, fisuras > 20 mm, laminaciones internas	Restricción de carga / cierre / reemplazo

Fuente: Elaboración propia

Este sistema traduce hallazgos técnicos en decisiones operacionales objetivas, permitiendo priorizar recursos y migrar hacia un modelo de mantenimiento basado en condición (CBM).

2.5 Fase V – Evaluación de criticidad y toma de decisiones

La presente guía constituye un instrumento técnico estandarizado, fundamentado en evidencia experimental y en el análisis sistemático de patologías estructurales propias de los PMMS. Su aplicación permitirá incrementar la confiabilidad diagnóstica, reducir el riesgo de fallas inesperadas y optimizar la gestión del ciclo de vida de estas estructuras críticas.

3. FORMATO ESTANDARIZADO DE INSPECCIÓN VISUAL DE PMMS

3.1 Datos generales del puente

Tabla 3

Fase V – Datos generales del puente

Ítem	Información
Código del puente	
Tipo de PMMS	☐ Bailey ☐ Acrow ☐ Mabey ☐ Otro
Configuración estructural	☐ Simple ☐ Doble ☐ Triple
Luz total (m)	
Ancho útil (m)	
Año de montaje inicial	
Número estimado de montajes	
Ubicación	
Ambiente de exposición	☐ C1 ☐ C2 ☐ C3 ☐ C4 ☐ C5



Ítem	Información
Fecha de inspección	
Inspector responsable	

Fuente: Elaboración propia

3.2 Inspección por componentes estructurales

3.2.1 Superestructura metálica

Tabla 4

Superestructura metálica

Elemento	Tipo de daño	Descripción	Extensión	Evidencia fotográfica
Cordón inferior	☐ Corrosión ☐ Fisura ☐ Deformación		% / mm	
Cordón superior	☐ Corrosión ☐ Fisura		% / mm	
Diagonales	☐ Pandeo ☐ Fisura ☐ Corrosión			
Montantes	☐ Corrosión ☐ Deformación			
Paneles inferiores	☐ Corrosión uniforme ☐ Pitting		% sección	

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Uniones y conexiones

Tabla 5

Uniones y conexiones

Elemento	Condición	Observaciones	Evidencia
Pernos	☐ Ajustados ☐ Holgura ☐ Faltantes		
Pasadores de seguridad	☐ Sí ☐ No		
Placas de unión	☐ Íntegras ☐ Deformadas		
Soldaduras	☐ Sanas ☐ Socavado ☐ Fisura		

Fuente: Elaboración propia

3.3 Condiciones funcionales y ambientales

Tabla 6

Condiciones funcionales y ambientales



Aspecto	Evaluación
Drenaje del tablero	☐ Adecuado ☐ Deficiente
Retención de humedad	☐ No ☐ Sí
Acumulación de sedimentos	☐ No ☐ Sí
Sistema de pintura	☐ Adecuado ☐ Deteriorado
Vegetación invasiva	☐ No ☐ Sí

Fuente: Elaboración propia

3.4 Recomendación preliminar

- ☐ Monitoreo
- ☐ Aplicar END (UT / PT / MT)
- ☐ Intervención correctiva
- ☐ Restricción de carga
- ☐ Cierre preventivo

4. FORMATO DE REGISTRO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS (END)

4.1 Información general del ensayo

Tabla 7

Información general del ensayo

Ítem	Información
Tipo de END	☐ Ultrasonido ☐ Líquidos penetrantes ☐ Partículas magnéticas
Norma aplicada	
Equipo utilizado	
Operador certificado	
Fecha	

Fuente: Elaboración propia

4.2 Registro de resultados – Ultrasonido (UT)

Tabla 8

Registro de resultados

Elemento	Espesor nominal (mm)	Espesor medido (mm)	Pérdida (%)	Interpretación

Fuente: Elaboración propia



4.3 Registro de resultados – Líquidos penetrantes / Partículas magnéticas

Tabla 9

Registro de resultados

Ubicación	Tipo de indicio	Longitud (mm)	Clasificación
	☐ Lineal ☐ Redondeado		☐ Leve ☐ Moderado ☐ Crítico

Fuente: Elaboración propia

5. FORMATO FICHAS TÉCNICAS DE PATOLOGÍAS EN PUENTES METÁLICOS MODULARES SEMIPERMANENTES (PMMS)

Tabla 10

Fichas técnicas de patologías

Ítem	Descripción técnica
Patología	
Elementos afectados	
Descripción	
Causas probables	
Mecanismo de deterioro	
Síntomas visibles	
Métodos de detección	
Indicadores críticos	
Consecuencias estructurales	
Nivel de riesgo típico	
Acción recomendada	

Fuente: Elaboración propia

Las tablas presentadas en las páginas siguientes constituyen un ejemplo aplicado al caso de estudio sobre cómo debe diligenciarse la Tabla 10 del Anexo B, correspondiente al formato estandarizado de fichas técnicas de patologías. Su propósito es ilustrar el proceso de registro, clasificación y análisis de cada hallazgo identificado mediante inspección visual y Ensayos No Destructivos (END). Se recomienda que, durante la implementación de la guía, se elabore una ficha técnica individual por cada patología encontrada, garantizando trazabilidad, uniformidad en la evaluación y una adecuada priorización de intervenciones según los niveles de criticidad establecidos



Ficha 5.1 – Fatiga por fisuración

Tabla 11

Ficha técnica para fatiga por fisuración

Ítem	Descripción técnica
Patología	Fatiga por fisuración
Elementos afectados	Cordones inferiores y superiores, diagonales, montantes, placas de unión, orificios de pernos
Descripción	Aparición y propagación progresiva de fisuras inducidas por tensiones alternantes generadas por cargas cíclicas repetidas, típicas del tránsito militar pesado y vibraciones estructurales
Causas probables	• Tráfico de alta magnitud y repetitivo • Holguras en uniones atornilladas • Concentradores de esfuerzos geométricos • Deficiente control de pretensado en pernos
Mecanismo de deterioro	Iniciación de microfisuras → propagación estable por fatiga → coalescencia → posible fractura frágil sin aviso previo
Síntomas visibles	• Fisuras lineales en cordones y soldaduras • Decoloración localizada • Ruido o vibración excesiva
Métodos de detección	☐ Inspección visual (limitada) ☒ Líquidos penetrantes (PT) ☒ Partículas magnéticas (MT)
Indicadores críticos	Longitud de fisura ≥ 3 mm (relevante) Longitud ≥ 20 mm (crítica)
Consecuencias estructurales	• Reducción de rigidez global • Pérdida de capacidad resistente • Riesgo de colapso súbito
Nivel de riesgo típico	Nivel 2 (Moderado) – Nivel 3 (Crítico)
Acción recomendada	Detención de propagación (stophole), refuerzo local, reemplazo de elemento o restricción de carga

Fuente: Elaboración propia



Ficha 5.2 – Corrosión interna y corrosión-fatiga

Tabla 12

Ficha técnica para corrosión interna y corrosión

Ítem	Descripción técnica
Patología	Corrosión interna y corrosión-fatiga acoplada
Elementos afectados	Almas de vigas, chapas solapadas, paneles inferiores, uniones múltiples
Descripción	Pérdida progresiva de espesor del acero, generalmente no visible externamente, que reduce la sección resistente y acelera procesos de fatiga
Causas probables	• Ambientes húmedos o tropicales (C3–C5) • Retención de humedad y sedimentos • Sistemas de protección superficial inadecuados
Mecanismo de deterioro	Ataque electroquímico → reducción uniforme o localizada de sección → incremento de tensiones → aceleración de fisuración por fatiga
Síntomas visibles	• Oxidación superficial • Escurrimientos de óxido • Deformaciones secundarias
Métodos de detección	☒ Ultrasonido (UT) ☐ Inspección visual (no confiable)
Indicadores críticos	Pérdida de espesor $\geq 10\%$ (relevante) Pérdida $\geq 25\%$ (crítica estructural)
Consecuencias estructurales	• Reducción significativa de capacidad portante • Mayor susceptibilidad a fractura frágil
Nivel de riesgo típico	Nivel 2 (Moderado) – Nivel 3 (Crítico)
Acción recomendada	Limpieza profunda, protección anticorrosiva, refuerzo o reemplazo del elemento

Fuente: Elaboración propia

Ficha 5.3 – Desajuste de pernos y pérdida de pretensado

Tabla 13

Ficha técnica para desajuste de pernos y pérdida de pretensado.

Ítem	Descripción técnica
Patología	Desajuste de pernos y pérdida de pretensado
Elementos afectados	Pernos, pines, placas de unión, nodos estructurales
Descripción	Disminución o pérdida del esfuerzo de apriete en las uniones atornilladas que compromete la correcta transferencia de cargas
Causas probables	• Vibraciones cíclicas • Repetidos montajes y desmontajes • Ausencia de control de torque
Mecanismo de deterioro	Pérdida de contacto perno–placa → incremento de juego → aumento de tensiones alternantes locales
Síntomas visibles	• Pernos sueltos o faltantes • Ruido metálico • Desalineaciones locales
Métodos de detección	☒ Inspección visual ☒ Verificación de torque ☒ UT en casos especiales
Indicadores críticos	Pérdida total de pretensado Deformación de orificios
Consecuencias estructurales	• Redistribución no controlada de cargas • Iniciación acelerada de fisuras por fatiga
Nivel de riesgo típico	Nivel 2 (Moderado)
Acción recomendada	Torqueo controlado, reemplazo de pernos, instalación de seguros

Fuente: Elaboración propia