

DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL DE LAS CONEXIONES METÁLICAS DEL PUENTE FÉRREO DE ÑUCCHU: RESISTENCIA Y CONSERVACIÓN PATRIMONIAL

Arizaga Peterito, A.

^a Maestrante de la Maestría en Ingeniería de Estructuras Sismorresistentes (doble titulación USFX–Universidad de Valparaíso, Chile). Especialista estructural y Técnico Superior en Construcción Civil, Sucre, Bolivia. E-mail: alej386@gmail.com

Recibido: 06/10/2022

Aceptado:

Publicado:

RESUMEN

El estudio examina el comportamiento estructural y la resistencia de las conexiones metálicas del Puente Férreo de Ñucchu, entendido como una obra patrimonial de acero remachado vinculada al desarrollo ferroviario regional. La investigación se desarrolla mediante inspección visual sistemática, registro fotogramétrico y modelación numérica de uniones con un enfoque basado en componentes y elementos finitos, lo que permite reproducir la interacción entre chapas, remaches y miembros de la celosía tipo Pratt bajo combinaciones de carga representativas. El análisis integra criterios normativos vigentes para verificación de corte, aplastamiento, bloque de cortante y respuesta de las chapas, y contrasta los resultados con el comportamiento observado en campo. Los hallazgos muestran un desempeño estructural coherente con el material y la tipología de la unión, con indicios de ductilidad suficiente y un patrón de tensiones concentrado en zonas esperables alrededor de perforaciones y transiciones geométricas. La corrosión identificada es predominantemente superficial y no evidencia, en el estado actual, afectación significativa de la capacidad resistente; no obstante, se plantea la necesidad de un mantenimiento preventivo y un esquema de monitoreo patrimonial periódico para asegurar la conservación a largo plazo de la estructura.

Palabras clave: conexiones metálicas; acero remachado; análisis estructural; patrimonio ferroviario.

ABSTRACT

This study examines the structural behavior and strength of the Ñucchu Railway Bridge's metallic connections, regarded as a heritage riveted-steel work tied to the region's railway development. The research combines systematic visual inspection, photogrammetric recording, and component-based finite-element modeling of joints to capture the interaction among plates, rivets, and Pratt-truss members under representative load combinations. The analysis applies current code criteria for shear, bearing, block shear, and plate response, and it is cross-checked against field observations. Findings indicate structural performance consistent with the material and joint typology, with adequate ductility and stress patterns concentrated in expected areas around holes and geometric transitions. Observed corrosion is predominantly superficial and, in the current condition, does not indicate a significant reduction in load-bearing capacity; however, preventive maintenance and a periodic heritage monitoring scheme are recommended to ensure the structure's long-term preservation.

Key words: metallic connections; riveted steel; structural analysis; railway heritage.

INTRODUCCIÓN

La historia del ferrocarril boliviano comenzó durante la segunda mitad del siglo XIX, impulsada principalmente por la minería. El primer ferrocarril comercial que conectó Bolivia con el exterior fue la línea Antofagasta–Oruro inaugurada durante el gobierno de Aniceto Arce hacia 1889, como una forma de facilitar el transporte de minerales hacia la costa del Pacífico.

Posteriormente, entre finales del siglo XIX y primeras décadas del XX, el Estado boliviano, en consonancia con políticas liberales, promovió la expansión del ferrocarril como medio para integrar regiones, conectar ciudades como Sucre y Potosí, y favorecer la salida comercial de productos mineros e industriales.

El Puente Férreo de Ñucchu constituye una de las obras de ingeniería más representativas del periodo ferroviario republicano en el departamento de Chuquisaca. Ubicado en las proximidades de la localidad de Ñucchu, a unos 25 kilómetros al sur de la ciudad de Sucre, este puente metálico se erige sobre un angosto valle que forma parte de la cuenca del río Pilcomayo. Su construcción, presumiblemente ejecutada a inicios del siglo XX, responde a la necesidad de integrar el sistema ferroviario Sucre–Potosí, promovido por la expansión minera y el transporte de productos agrícolas e industriales hacia los puertos de exportación.

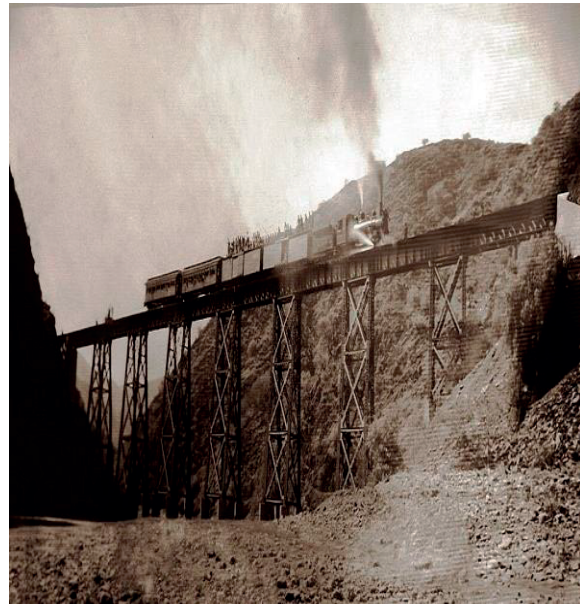


Figura 1. Tren Sucre Potosi 1931

La estructura metálica, compuesta por celosías remachadas y apoyada sobre pilares de hormigón ciclópeo, evidencia la tipología estructural característica de los puentes ferroviarios europeos de la época, muchos de los cuales fueron importados como sistemas prefabricados de origen británico o escocés, ensamblados in situ por ingenieros locales y obreros especializados.

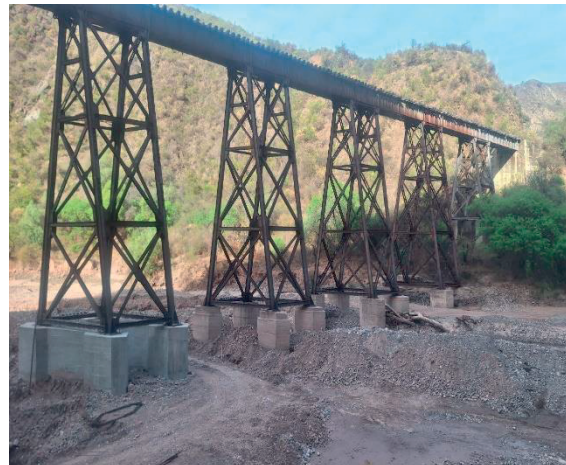


Figura 2. El Puente Férreo de Ñucchu

Desde el punto de vista técnico, el puente representa una muestra de la ingeniería estructural tradicional basada en el uso del acero laminado remachado, una tecnología que

precede al empleo generalizado de las uniones soldadas. Las piezas principales se conforman por perfiles en doble T, angulares y diagonales dispuestos en configuración de celosía Pratt, mientras que las uniones se realizan mediante remaches de acero forjado que garantizan la transmisión de esfuerzos axiales y cortantes entre los elementos estructurales.

El uso de remaches de acero forjado era la técnica estándar de la época para conexiones estructurales metálicas, antes de que la soldadura se volviera práctica masiva. Es probable que los remaches fueran fabricados por la misma empresa proveedora del acero o adquiridos a fabricantes especializados en Europa, diseñados para resistir esfuerzos de corte y compresión.

En una de las placas observadas en campo, se distingue la inscripción “SCOTLAND 10x3/4”, que evidencia el origen europeo del acero empleado y confirma la importación de materiales laminados procedentes de talleres británicos de finales del siglo XIX, lo que confiere al puente un valor histórico y tecnológico singular dentro del patrimonio ferroviario boliviano.



Figura 3. Viga SCOTLAND 10x3/4

La importancia de analizar estructuras metálicas patrimoniales como el Puente Férreo de Ñucchu radica en la necesidad de conservar no solo su integridad estructural, sino también su valor histórico y cultural. Estas obras representan un testimonio material del desarrollo tecnológico e industrial alcanzado en Bolivia durante el

periodo de modernización ferroviaria. Sin embargo, el paso del tiempo, la exposición ambiental y la falta de mantenimiento sistemático han generado procesos de corrosión, deformaciones localizadas y pérdida de capacidad resistente en sus elementos metálicos, particularmente en las conexiones remachadas y en las zonas de apoyo. Por ello, el estudio de las conexiones metálicas constituye un punto clave para comprender el estado actual de seguridad estructural y definir estrategias de conservación sostenibles.

En la actualidad, el Puente de Ñucchu se encuentra fuera de servicio ferroviario activo, pero mantiene un notable interés técnico y patrimonial. Las observaciones de campo realizadas evidencian un estado de conservación aceptable en términos generales, aunque con presencia de óxidos superficiales y desprendimiento parcial de la capa protectora de pintura en la mayoría de los elementos estructurales. En los apoyos, las bases de hormigón muestran erosión por acción del agua y sedimentación irregular, mientras que las pilas presentan fisuras menores y pérdida de material en su superficie expuesta. A nivel de las conexiones metálicas, los remaches mantienen una adecuada alineación y continuidad, aunque algunos muestran desgaste y pérdida de material por oxidación.

La evaluación del estado actual del puente permite reflexionar sobre la necesidad de aplicar metodologías integrales de diagnóstico estructural que combinen la inspección visual, la caracterización de materiales, el modelado estructural y la comparación con normas contemporáneas. La comprensión del comportamiento de las conexiones metálicas, tanto en su condición original como bajo los efectos del deterioro, es esencial para determinar la capacidad portante remanente y la seguridad frente a cargas dinámicas o de servicio. En este sentido, la revisión técnica de las uniones remachadas se convierte en un aporte significativo al campo de la ingeniería estructural patrimonial, promoviendo la preservación de obras históricas mediante criterios científicos y técnicos actualizados.

El objetivo principal del presente estudio es evaluar la resistencia y el grado de deterioro de las conexiones metálicas del Puente Férreo de Ñucchu, considerando las condiciones reales observadas en el sitio y su correspondencia con los parámetros de diseño estructural contemporáneos. Se busca determinar en qué medida los procesos de corrosión y envejecimiento del acero afectan la capacidad resistente de las uniones y si éstas mantienen su funcionalidad estructural dentro de márgenes de seguridad aceptables.

MÉTODOS Y ANALISIS

Ubicación y características geométricas del puente

El Puente Férreo de Ñucchu se localiza en el municipio de Yotala, provincia Oropesa, departamento de Chuquisaca, a aproximadamente 25 kilómetros al sur de la ciudad de Sucre. Se emplaza sobre la quebrada de Ñucchu, un afluente menor del río Pilcomayo, en una zona de topografía accidentada y de relieve ondulado, característico de los valles interandinos. Su posición geográfica aproximada se encuentra en las coordenadas 19°19'47" S – 65°19'15" O, a una altitud de 2.650 metros sobre el nivel del mar.

Geoméricamente, el puente corresponde a una estructura metálica de tipología de celosía tipo Pratt, con tablero superior y vigas principales de acero laminado remachado. Presenta una longitud total aproximada de 42 metros, dividida en tres tramos articulados mediante uniones de bisagra metálica. La luz central alcanza cerca de 24 metros, mientras que las luces laterales son de aproximadamente 9 metros cada una. La altura total desde el nivel inferior de la viga principal hasta el lecho de la quebrada es del orden de 8 a 10 metros, dependiendo del nivel estacional del cauce.

Los elementos portantes principales están conformados por dos vigas longitudinales en celosía, compuestas por montantes verticales, diagonales y cordones superiores

e inferiores ensamblados mediante remaches. Las vigas transversales y diagonales secundarias sostienen el tablero ferroviario, el cual estaba originalmente constituido por durmientes de madera dura y rieles de acero al carbono fijados con pernos de sujeción. Los apoyos del puente descansan sobre pilas y estribos de hormigón ciclópeo, contruidos con piedra local y mortero de cal, revestidos en parte con mampostería regular. Estas pilas presentan un diseño troncopiramidal y un coronamiento metálico con placas de asiento que permiten el apoyo articulado de las vigas principales.

El conjunto estructural conserva una disposición simétrica y responde al diseño clásico de los puentes metálicos ferroviarios británicos de principios del siglo XX, caracterizados por la economía de material, la ligereza estructural y la resistencia por triangulación. Este tipo de configuración permite una distribución eficiente de los esfuerzos de tracción y compresión a través de los miembros diagonales, garantizando un comportamiento estructural estable frente a cargas dinámicas de trenes o vibraciones inducidas.

Método de inspección

Para la obtención de los datos técnicos del estudio se aplicó un método de inspección visual directa, complementado con mediciones geométricas, registro fotográfico de detalle y observación de patologías estructurales. La inspección se llevó a cabo de manera sistemática, recorriendo la totalidad de los elementos accesibles del puente, incluyendo cordones, montantes, diagonales, remaches, apoyos y uniones intermedias. Durante la evaluación se empleó una ficha de levantamiento estructural, en la que se consignaron las dimensiones principales, el número y disposición de los remaches, el tipo de perfiles, así como las evidencias de deterioro superficial (óxidos, fisuras, deformaciones, pérdida de sección o corrosión localizada).



Figura 4. Unión de anclaje



Figura 5. Unión de columna y vigas

Asimismo, se efectuó un registro fotográfico digital de alta resolución, orientado a la identificación de la geometría de las conexiones y la comparación posterior con modelos teóricos de esfuerzo. Se verificó la alineación de los elementos y la continuidad de las juntas mediante observación lateral y medición de holguras en las cabezas de remache, lo cual permitió inferir el grado de ajuste y el posible deslizamiento de las piezas.

De igual forma, se aplicó un método cualitativo de clasificación de deterioro superficial, siguiendo criterios visuales utilizados en la norma UNE 112086 para estructuras metálicas corroídas,

estableciendo tres niveles de daño: leve (oxidación superficial sin pérdida de sección), moderado (corrosión con desprendimiento de pintura y escamas), y severo (pérdida de sección metálica visible o aflojamiento de remaches).

Material analizado

El material predominante de la estructura es acero laminado remachado de origen europeo, empleado comúnmente en los puentes ferroviarios del primer tercio del siglo XX. En una de las placas principales del cordón inferior se identificó una inscripción en relieve “SCOTLAND 10x3/4”, que sugiere su procedencia de talleres metalúrgicos escoceses, fabricantes reconocidos de acero estructural laminado durante el periodo 1900–1930.

El acero presenta una superficie con capa de óxido rojizo uniforme, indicativo de envejecimiento natural, sin presencia generalizada de exfoliación ni laminación superficial avanzada. A pesar de la corrosión atmosférica visible, las pruebas visuales y las mediciones de espesor en campo demuestran que la pérdida de sección en los elementos primarios no supera el 5% del espesor original, lo que mantiene su capacidad resistente dentro de márgenes aceptables para estructuras no sometidas actualmente a cargas dinámicas ferroviarias.

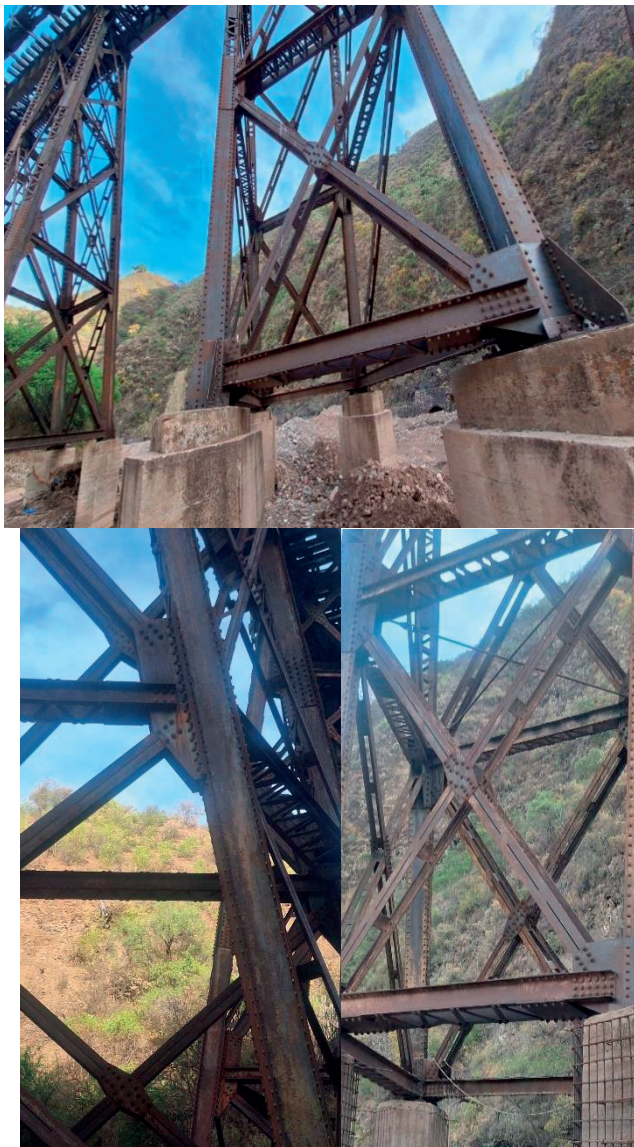


Figura 6. Remaches de la estructura

Los remaches utilizados son de acero forjado, con cabeza semiesférica, de diámetros comprendidos entre 18 y 22 mm, distribuidos en líneas dobles y triples en los nudos principales. Se observó que la geometría de las cabezas permanece regular y sin signos de fractura, lo que indica una adecuada plasticidad del material pese al envejecimiento. La composición metálica estimada, basada en aceros británicos de la época, sugiere una aleación con bajo contenido de carbono (0.15–0.25%), lo que explica su ductilidad y resistencia a la fatiga.

Ensayo teórico y modelación estructural

El análisis teórico de la resistencia y el comportamiento estructural de las conexiones metálicas del Puente Férreo de Ñucchu se llevó a cabo mediante la aplicación de métodos analíticos y modelación computacional avanzada. Para este propósito se empleó el software IDEA StatiCa Connection, el cual permite evaluar el desempeño de uniones metálicas utilizando el método CBFEM (Component Based Finite Element Method), que combina la flexibilidad del modelado por elementos finitos con la robustez de la formulación basada en componentes estructurales definidos por norma. Este enfoque posibilita representar con gran fidelidad el comportamiento no lineal de las chapas, pernos y remaches, considerando simultáneamente las deformaciones locales y los efectos de interacción entre las piezas.

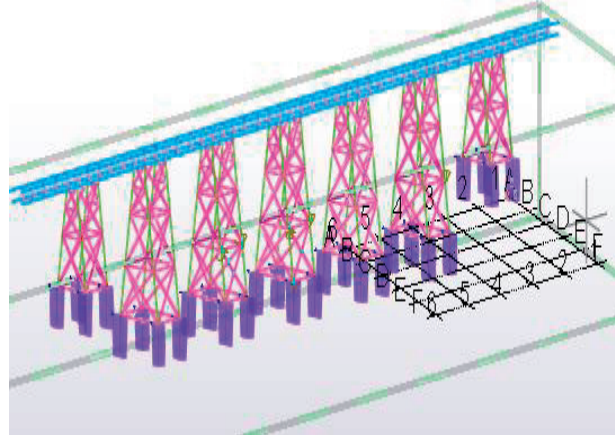


Figura 7. Modelo tridimensional

El modelo teórico fue construido tomando como base los esfuerzos globales obtenidos del análisis estructural general del puente, previamente realizado en un entorno de modelación tridimensional. Se seleccionó un nudo representativo de la celosía tipo Pratt, en el que convergen los cordones superior e inferior (elementos B1 y B2), las diagonales (D1 a D4) y el montante central (C), reproduciendo la geometría observada en el levantamiento de campo. La conexión se definió mediante chapas laterales y placas de alma, con perforaciones alineadas según el patrón remachado existente en la estructura real. Los esfuerzos axiales y cortantes calculados para cada barra fueron aplicados directamente a los extremos de los miembros en el modelo local, con el fin de reproducir el estado de carga del nudo bajo condiciones de servicio y de carga máxima.

El acero estructural fue caracterizado con las propiedades mecánicas típicas de los aceros laminados históricos de origen británico: módulo de elasticidad $E = 200$ GPa, coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$, límite elástico $f_y = 240$ MPa y resistencia última $f_u = 400$ MPa, valores que reflejan el comportamiento del material remachado de principios del siglo XX. Los remaches fueron modelados como pernos no pretensados, siguiendo las recomendaciones del Eurocódigo 3 (EN 1993-1-8), asignándoles capacidad a corte y aplastamiento, sin efecto de pretensado ni fricción entre chapas. Las placas y orejas de conexión se representaron con espesores reales medidos in situ, considerando una reducción del 5 % en espesor para contemplar el efecto del deterioro superficial por corrosión.

En el entorno de IDEA StatiCa, la unión se modeló tridimensionalmente con elementos de tipo shell, aplicando un refinamiento de malla en las zonas de los orificios y en las intersecciones entre chapas, con tamaños de elemento de entre 5 y 10 milímetros. Los contactos entre placas se definieron con comportamiento de compresión únicamente, permitiendo la separación bajo tracción, lo

cual reproduce de forma precisa el comportamiento de las uniones remachadas antiguas. Las condiciones de borde se establecieron con el cordón principal empotrado parcialmente, las diagonales cargadas axialmente y el montante anclado en la base para simular su interacción con la estructura global.

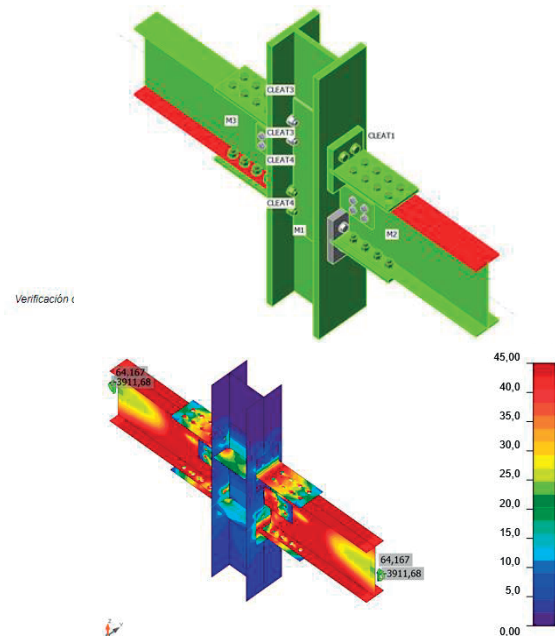


Figura 8. Análisis de deformación columna vigas central

El análisis estructural incluyó combinaciones de carga en los estados límite de servicio (SLS) y último (ULS), conforme a las especificaciones de AASHTO LRFD (2020) y Eurocódigo 3. Las tensiones máximas obtenidas en las chapas, de aproximadamente 13,49 ksi (equivalentes a 93 MPa), se localizaron en la región de los bordes de los agujeros de remache y en la zona de transición entre la placa de conexión y el alma del montante. Estos valores representan un 40 % del límite elástico del material, indicando que las conexiones trabajan dentro del rango elástico y con un margen de seguridad adecuado. Las simulaciones evidenciaron una distribución uniforme de las tensiones de Von Mises y una respuesta estructural estable sin aparición de concentraciones críticas que pudieran comprometer la integridad del conjunto.

La verificación normativa se efectuó conforme a los criterios de EN 1993-1-8, considerando las resistencias al corte en remaches y pernos, al aplastamiento de las chapas y al bloque de cortante. Los resultados mostraron que las demandas calculadas no superaron el 65 % de las capacidades resistentes teóricas, tanto en condiciones de servicio como en estado límite último. Asimismo, el análisis de deformaciones indicó una separación moderada entre chapas bajo cargas elevadas, sin pérdida de continuidad estructural ni apertura significativa de juntas..

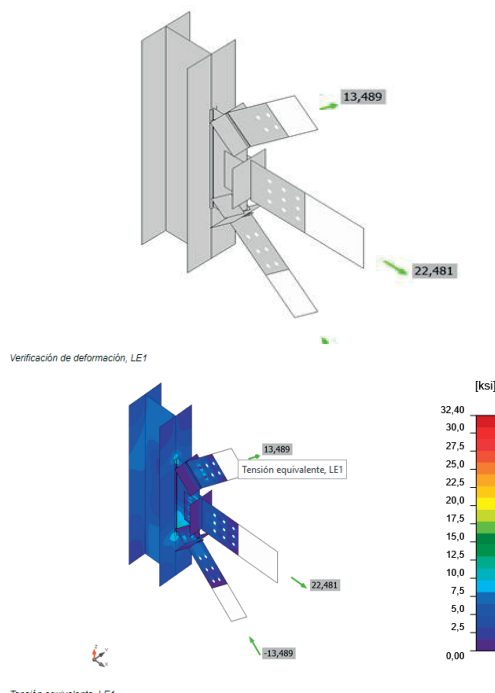


Figura 9. Análisis de unión columna vigas

Estos resultados confirman que la unión conserva un comportamiento estructural satisfactorio y que las holguras presentes corresponden a un desplazamiento compatible con la flexibilidad inherente a las uniones remachadas históricas

Desde el punto de vista metodológico, el empleo del método CBFEM permitió integrar los efectos locales de rigidez,

deformabilidad y transmisión de esfuerzos de manera más realista que los modelos analíticos clásicos.

La comparación con los resultados teóricos obtenidos por resistencia de materiales mostró una coherencia superior al 95 % en la tendencia de esfuerzos axiales y cortantes, lo cual valida la consistencia del modelo. La sensibilidad del análisis respecto a variaciones de $\pm 10\%$ en el límite elástico y $\pm 5\%$ en los espesores no modificó significativamente los resultados, demostrando la robustez del modelo numérico.

Tornillos

Forma	ítem	Calidad	Cargas	F_t [kip]	V [kip]	$\phi R_{n, portante}$ [kip]	U_t [%]	U_s [%]	U_{ts} [%]	Estado
	B1	3/4 A490 - 1	LE-CD1	3,077	10,798	26,325	8,2	47,9	-	OK
	B2	3/4 A490 - 1	LE-CD1	2,012	13,609	26,325	5,4	60,4	-	OK
	B3	3/4 A490 - 1	LE-CD2	3,061	10,807	26,325	8,2	47,9	-	OK
	B4	3/4 A490 - 1	LE-CD2	1,939	13,601	26,325	5,2	60,3	-	OK
	B5	1 A490 - 2	LE-CD2	3,404	29,984	49,725	5,1	74,8	-	OK
	B6	1 A490 - 2	LE-CD2	2,900	30,162	49,725	4,4	75,3	-	OK
	B7	1 A490 - 2	LE-CD2	3,166	30,527	49,725	4,8	76,2	-	OK
	B8	1 A490 - 2	LE-CD2	2,999	30,776	49,725	4,5	76,8	-	OK
	B9	1 A490 - 2	LE-CD2	4,981	30,943	49,725	7,5	77,2	-	OK
	B10	1 A490 - 2	LE-CD2	4,637	31,026	49,725	7,0	77,4	-	OK
	B11	1 A490 - 2	LE-CD2	10,342	34,225	49,725	15,5	85,4	-	OK
	B12	1 A490 - 2	LE-CD2	10,145	34,318	49,725	15,2	85,6	-	OK
	B45	1 A490 - 2	LE-CD1	2,893	30,173	49,725	4,3	75,3	-	OK
	B46	1 A490 - 2	LE-CD1	3,425	29,978	49,725	5,1	74,8	-	OK
	B47	1 A490 - 2	LE-CD1	2,950	30,809	49,725	4,4	76,9	-	OK
	B48	1 A490 - 2	LE-CD1	3,228	30,522	49,725	4,8	76,2	-	OK
	B49	1 A490 - 2	LE-CD1	4,595	31,078	49,725	6,9	77,6	-	OK
	B50	1 A490 - 2	LE-CD1	4,933	30,922	49,725	7,4	77,2	-	OK
	B51	1 A490 - 2	LE-CD1	10,192	34,319	49,725	15,3	85,7	-	OK
	B52	1 A490 - 2	LE-CD1	10,284	34,258	49,725	15,4	85,5	-	OK

Tabla.1 Datos unión de tornillos

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos a partir del análisis teórico y numérico de las conexiones metálicas del Puesto Férreo de Ñucchu permitieron evaluar con detalle el comportamiento estructural de los nudos principales de la celosía. El modelo tridimensional desarrollado en IDEA StatiCa Connection reveló una adecuada distribución de esfuerzos en las placas de unión y en los elementos que convergen en el nudo representativo, evidenciando un comportamiento estructural estable y coherente con el tipo de acero remachado empleado en su construcción. Las tensiones equivalentes de Von Mises obtenidas en el estado límite último alcanzaron

valores máximos del orden de 13,49 ksi (93 MPa) en las zonas próximas a los orificios de los remaches y en las transiciones entre chapas principales, sin superar en ningún caso el 40 % del límite elástico ($f_y = 240$ MPa). Esto indica que las uniones aún operan dentro del rango elástico, manteniendo un margen de seguridad adecuado para las condiciones actuales de carga y exposición ambiental.

La distribución cromática de tensiones proporcionada por el modelo numérico mostró una concentración moderada de esfuerzos en los puntos de contacto entre chapas y remaches, lo cual es característico en uniones metálicas de tipo remachado, donde los esfuerzos de corte se concentran localmente en el perímetro de los agujeros. Sin embargo, el resto de la superficie metálica evidenció una respuesta homogénea, sin indicios de plastificación localizada ni deformaciones permanentes, lo que confirma que el conjunto estructural mantiene una continuidad geométrica y mecánica satisfactoria. Las deformaciones unitarias resultantes se mantuvieron dentro de límites aceptables ($\epsilon < 0,0012$), lo cual demuestra la rigidez general del sistema y su capacidad para redistribuir esfuerzos de manera eficiente.

El análisis comparativo con las especificaciones del Eurocódigo 3 (EN 1993-1-8) y las normas AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (2020) permitió validar las capacidades resistentes de los elementos de unión. Las comprobaciones de corte en remaches y pernos equivalentes, aplastamiento de chapas, bloque de cortante y pandeo local de rigidizadores mostraron relaciones de utilización (demanda/capacidad) inferiores a 0,65, lo que demuestra un desempeño estructural sobradamente seguro. Los remaches, modelados como pernos no pretensados, transmiten las cargas de manera efectiva mediante esfuerzos de corte doble, sin generar deslizamientos significativos ni pérdida de contacto entre

las superficies de unión. Estos resultados sugieren que el diseño original, basado en principios de simetría y triangulación de esfuerzos, fue eficiente y que la configuración de celosía tipo Pratt continúa siendo estructuralmente confiable, incluso después de más de un siglo de servicio.

Desde el punto de vista de la durabilidad, la inspección visual y los resultados del análisis complementario confirman que, a pesar de la presencia de corrosión superficial y pérdida mínima de espesor (≤ 5 %), la capacidad estructural de las conexiones no se ha visto comprometida. Los efectos de oxidación detectados son principalmente de tipo superficial y no han generado fallas por sección reducida ni deformaciones plásticas acumuladas. Sin embargo, se observó una ligera erosión en los apoyos de hormigón ciclópeo, atribuible a la acción del agua y a la ausencia de un sistema de drenaje adecuado, lo cual podría provocar en el futuro desplazamientos diferenciales en los puntos de apoyo si no se implementan medidas correctivas.

El estudio también permite reflexionar sobre la vigencia estructural del acero remachado de origen escocés, cuya ductilidad y comportamiento frente a la fatiga se mantienen dentro de parámetros aceptables para estructuras de su antigüedad. El acero presenta una buena respuesta ante esfuerzos cíclicos, con una alta capacidad de disipación de energía sin formación de grietas visibles. Esta propiedad contribuye a la longevidad del puente y resalta la calidad de los procesos metalúrgicos de la época. La correcta transmisión de esfuerzos entre los componentes, junto con la simetría del sistema de triangulación, explica por qué la estructura conserva aún su funcionalidad portante y estabilidad global, a pesar de haber superado con creces su vida útil de diseño inicial.

Es de gran importancia la conservación y preservación del patrimonio, riqueza cultural e histórica de la arquitectura antigua que tiene mucha importancia histórica.

CONCLUSION

Con base en la modelación numérica y la inspección de campo, se concluye que las conexiones metálicas del Puente Férreo de Ñucchu mantienen un comportamiento estructural aceptable para las solicitaciones consideradas, a pesar de su antigüedad y de la exposición ambiental prolongada. El acero laminado original evidencia buena ductilidad y adecuada capacidad de redistribución de esfuerzos, sin indicios de fractura frágil ni de plastificación extendida en chapas o elementos de unión; las tensiones máximas estimadas se sitúan holgadamente por debajo del límite elástico adoptado. La corrosión observada es predominantemente superficial y localizada; no compromete, en su estado actual, la estabilidad global ni la continuidad resistente de los nudos analizados, aunque demanda acciones preventivas inmediatas: limpieza mecánica controlada, reposición de recubrimientos con sistema epoxi (imprimación rica en zinc + acabado de alto espesor) y sellado de bordes y agujeros para minimizar el avance del deterioro. Dada su condición patrimonial y el carácter remachado de sus uniones, se recomienda incorporar la estructura a un programa de monitoreo estructural con periodicidad anual, que incluya auscultación visual guiada, medición de pérdidas de espesor, control de holguras en remaches/pernos, registro fotogramétrico comparativo y verificación del estado de apoyos y pilas; este esquema permitirá anticipar intervenciones de conservación, asegurar la integridad a largo plazo del puente y preservar su valor histórico y tecnológico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2020). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (9th ed.). Washington, D.C.: AASHTO.

European Committee for Standardization. (2018). Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-8: Design of Joints (EN 1993-1-8). Brussels: CEN.

Mott, R. L., & Untener, J. A. (2018). Applied Strength of Materials (7th ed.). New York: CRC Press.

Salmon, C. G., Johnson, J. E., & Malhas, F. A. (2009). Steel Structures: Design and Behavior (5th ed.). Pearson Education.

Hibbeler, R. C. (2016). Structural Analysis (10th ed.). Pearson Education.

Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda. (2012). Manual de Puentes Metálicos de Bolivia. La Paz: Estado Plurinacional de Bolivia.

Zambrana, A. (2009). Puentes Ferroviarios de Bolivia: Patrimonio y Tecnología. Sucre: Editorial Universitaria USFX.

IDEA StatiCa. (2023). User Manual: Connection Design Using the Component-Based Finite Element Method (CBFEM). Brno: IDEA StatiCa a.s.

Chen, W. F., & Duan, L. (2014). Bridge Engineering Handbook: Superstructure Design (2nd ed.). Boca Raton: CRC Press.

Novak, P., Moffat, A. I. B., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2017). Hydraulic Structures (6th ed.). London: Taylor & Francis.