



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**Evaluación de fatiga en conexiones estructurales:
Caso Puente Apilador**

POR

Franco Nicolás Oyarzo Vargas

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Rodrigo Silva

Profesional Supervisor
Gabriel Canales

Abril, 2025
Concepción (Chile)

© 2025 Franco Oyarzo Vargas

© 2025 Franco Oyarzo Vargas

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

RESUMEN

La fatiga estructural en conexiones soldadas representa una problemática crítica en estructuras sometidas a cargas cíclicas, especialmente en el contexto de la industria minera. En esta memoria se analiza el caso de un Puente Apilador, donde la aparición de grietas en las diagonales tubulares motivó la evaluación del comportamiento a la fatiga de sus conexiones. El objetivo general fue evaluar dicho comportamiento mediante herramientas numéricas y compararlo con criterios normativos.

Para ello, se desarrolló un modelo estructural en SAP2000 que permitió determinar los rangos de tensiones en las conexiones afectadas. Posteriormente, se utilizó IDEA StatiCa para analizar detalladamente el desempeño de una de las conexiones, considerando criterios establecidos en las normas AISC 360-16 y BS 7608.

Los resultados muestran que la herramienta IDEA StatiCa permite capturar con mayor precisión las concentraciones de tensiones y zonas críticas de falla, evidenciando diferencias relevantes frente a los métodos normativos tradicionales. Se concluye que la combinación de análisis global con SAP2000 y local con IDEA StatiCa permite una evaluación más robusta del riesgo de fatiga. Finalmente, se proponen recomendaciones de refuerzo para mitigar las concentraciones de tensiones, mejorar la vida útil de las conexiones y garantizar la continuidad operativa del puente.

ABSTRACT

Structural fatigue in welded connections is a critical issue in structures subjected to cyclic loads, particularly in the mining industry. This thesis analyzes the case of a Stacker Bridge, where the appearance of cracks in the tubular diagonals prompted an evaluation of the fatigue behavior of its connections. The main objective was to assess such behavior using numerical tools and compare the results with normative criteria.

A structural model was developed in SAP2000 to determine stress ranges in the affected connections. Then, IDEA StatiCa was used to analyze the detailed performance of one connection, considering design criteria established in AISC 360-16 and BS 7608 standards.

The results show that IDEA StatiCa captures stress concentrations and critical failure zones more accurately, revealing significant differences compared to traditional normative methods. It is concluded that combining global analysis with SAP2000 and local analysis with IDEA StatiCa enables a more robust assessment of fatigue risk. Finally, reinforcement recommendations are proposed to mitigate stress concentrations, extend the connection's service life, and ensure the operational continuity of the bridge.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, quienes han sido un ejemplo constante de esfuerzo, amor incondicional y convicción. Gracias por confiar en mí, por enseñarme a no rendirme, y por estar siempre presentes con una palabra de aliento o un gesto de apoyo silencioso pero inmenso.

A mi hermana, con quien he compartido más que solo una infancia. Gracias por tu apoyo, tus consejos sinceros, por aguantarme sin juzgar y por hacer más llevadero este camino.

Y a mis amigos, quienes me han acompañado en este proceso con su cercanía y paciencia. Agradezco profundamente cada conversación, cada momento de risa y también de contención.

Este logro no sería lo mismo sin ustedes.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que me acompañaron y apoyaron a lo largo del desarrollo de esta memoria de título y en esta etapa final de mi formación profesional.

En primer lugar, agradezco profundamente a mi Profesional Supervisor, Gabriel Canales, por su constante disposición, sus valiosos comentarios técnicos y por brindarme una visión práctica y aplicada que enriqueció enormemente este trabajo. Su guía fue clave para conectar la teoría con la realidad del ejercicio profesional.

A mi Profesor Guía, Rodrigo Silva, por su compromiso, cercanía y exigencia académica. Gracias por guiarme con claridad, por creer en mis capacidades, y por entregar siempre una orientación oportuna que me permitió avanzar con confianza en los momentos más complejos.

Al Profesor de Comisión, Víctor Aguilar, por su tiempo, dedicación y observaciones que contribuyeron a fortalecer la calidad de esta memoria. Aprecio profundamente su mirada crítica y su interés genuino por mejorar cada parte del trabajo.

A todos ellos, muchas gracias por su compromiso y por ser parte fundamental en la culminación de esta etapa.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	i
ÍNDICE DE TABLAS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	5
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	7
1.1. Motivación.....	7
1.2. Objetivos	8
1.2.1. Objetivo general	8
1.2.2. Objetivos específicos.....	8
1.3. Metodología.....	8
1.3.1. Revisión Bibliográfica y Normativa:	8
1.3.2. Modelación y Simulación en IDEA StatiCa:	8
1.4. Principales resultados y conclusiones	9
1.5. Organización de la memoria.....	9
CAPÍTULO 2: MARCO TEORICO	10
2.1. Introducción.....	10
2.2. Fatiga.....	10
2.2.1. Las 3 Etapas de la Falla por Fatiga.....	10
2.2.2. Fatiga Mecánica	11
2.2.3. Fatiga Térmica.....	12
2.3. Cargas cíclicas	13
2.3.1. LCF y HCF	13
2.4. Estructuras sometidas a fatiga.	14
2.4.1. Fisuras por fatiga originadas en defectos de soldadura	14
2.4.2. Detalles con cambios en la sección transversal.....	15
2.5. Puente Atirantado de Runyang.....	16

2.5.1.	Registro de fallas (2007)	16
2.5.2.	Conclusiones del caso Runyang.....	18
2.6.	Rango de Tensión.....	19
2.7.	Gráficos tiempo-historia.....	19
2.8.	Normativa.....	20
2.8.1.	Curvas S-N	21
2.9.	Obtención curva S-N BS7608	21
2.10.	Obtención curva S-N AISC 360-16.....	23
2.11.	IDEASTATICA	25
2.11.1.	Método de los componentes (CM)	25
2.11.2.	Modelo de Elementos Finitos Basado en Componentes (CBFEM)	26
2.12.	Conclusión.....	26
CAPÍTULO 3: PUENTE APILADOR Y METODOLOGÍA.....		27
3.1.	Introducción.....	27
3.2.	Estudio del caso.....	27
3.2.1.	Información disponible.....	28
3.2.2.	Descripción de la estructura	28
3.2.3.	Materiales	30
3.2.4.	Cargas	31
3.3.	Verificación a tracción perfil tubular.....	32
3.4.	Identificación del problema estructural	33
3.4.1.	Hallazgos.....	34
3.4.2.	Descripción de la grieta.....	36
3.5.	Desarrollo del modelo SAP	37
3.6.	AISC 360-16.....	40
3.7.	BS7608-14.....	42

3.8.	Fatiga IDEASTATICA	44
3.8.1.	Soldaduras en CBFEM.....	45
3.9.	Conclusión.....	45
CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....		46
4.1.	Introducción.....	46
4.2.	Análisis tiempo-historia del modelo.....	46
4.3.	Comparación de resultados entre modelo articulado y empotrado	46
4.4.	Cálculo de rangos de tensiones de las diagonales	48
4.5.	Identificación de diagonales más críticas y comparación con fallas reales.....	50
4.6.	AISC 360-16.....	52
4.7.	BS7608-14.....	55
4.8.	Modelo en IDEA StatiCa.....	58
CAPÍTULO 5: Conclusiones		60
Referencias		61
Anexo 1.1 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible		63
Anexo 4.1		64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Acero Q345	32
Tabla 3-2 Especificaciones conexión gusset	33
Tabla 3-3 Resultados	33
Tabla 3-4 Detalle de curvas S-N Categorías B, C, D, y E.	40
Tabla 3-5 Valores de D según probabilidad de fallo.....	42
Tabla 3-6 Detalle de las curvas S-N.....	43
Tabla 3-7 Detalles de clasificación.....	43
Tabla 4-1 Diferencia fuerza axial entre diagonales articuladas de la izquierda y derecha.....	47
Tabla 4-2 Diferencia fuerza axial entre diagonales empotradas de la izquierda y derecha.....	47
Tabla 4-3 Rango de esfuerzo por diagonal en modelo articulado.	48
Tabla 4-4 Rango de esfuerzo por diagonal en modelo empotrado.	49
Tabla 4-5 Porcentaje de diferencia rango de esfuerzo entre modelo articulado y empotrado.....	49
Tabla 4-6 Rango de esfuerzos diagonales en tracción.....	50
Tabla 4-7 Rango máximo para evitar la falla AISC 360-16.....	52
Tabla 4-8 Resultados análisis con Normativa AISC 360-1	53
Tabla 4-9 Rango de tensiones para las diagonales 1 y 17 en el caso empotrado AISC360-16.....	54
Tabla 4-10 Rango máximo para evitar la falla BS7608-14.....	55
Tabla 4-11 Resultados análisis con Normativa BS7608-14	56
Tabla 4-12 Rango de tensiones para las diagonales 1 y 17 en el caso empotrado BS7608-14.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Etapas del fallo por fatiga	11
Figura 2.2 Curva S-N típica mostrando regiones LCF y HCF	13
Figura 2.3 Grietas por fatiga en una viga de puente que comienzan en defectos de soldadura en un punto de intersección de soldaduras.....	15
Figura 2.4 Ejemplos de grietas radiales y tangenciales.....	16
Figura 2.5 Grietas observadas en el campo en los diafragmas longitudinales de las vigas cajón: grieta a través de toda la sección (SNYB).....	17
Figura 2.6 Grietas observadas en el campo en los diafragmas longitudinales de las vigas cajón: grieta menor a media (RCB).....	17
Figura 2.7 Dos modos típicos de fallo en las conexiones de tubo y placa de refuerzo (gusset plate).18	
Figura 2.8 Datos de prueba de fatiga curva S-N para componentes de acero con una categoría de detalle de 90 MPa.....	21
Figura 2.9 Curva S-N típica	22
Figura 2.10 Curvas de resistencia a la fatiga.....	24
Figura 2.11 Curvas para categorías C y F	24
Figura 2.12 Vista método de los componentes.....	25
Figura 3.1 Imagen referencial Puente Apilador.....	27
Figura 3.2 Sección 1 Vista transversal	28
Figura 3.3 Sección 2 Vista transversal	28
Figura 3.4 Sección 3 Vista transversal	29
Figura 3.5 Vista transversal de oruga	29
Figura 3.6 Vista del puente con los tipos de oruga.....	30
Figura 3.7 Tipología de daño registrado.....	34
Figura 3.8 Numeración de diagonales verticales en Segmento estándar.....	34
Figura 3.9 Frecuencia de hallazgos por N° de diagonal.....	35
Figura 3.10 Diagonales con mayor frecuencia de daño en tramo estándar	35
Figura 3.11 Grietas típicas detectadas en arriostramientos verticales tubulares.	36
Figura 3.12 Grieta se extiende de manera transversal, iniciando en zona de abertura.....	36
Figura 3.13 Vista 3D del modelo.....	37
Figura 3.14 Vista lateral del modelo.....	37

Figura 3.15 Ubicación del segmento 2A.....	38
Figura 3.16 Vista del segmento 2A	38
Figura 3.17 Diagonales de la derecha del puente.....	38
Figura 3.18 Diagonales de la izquierda del puente.....	38
Figura 3.19 Cargas y distancias entre ruedas del carro MH-004	39
Figura 3.20 Categoría E Caso 6.1 Tabla A 3-1	41
Figura 3.21 Miembros tubos circulares Categoría F Caso 9.1 Tabla 9	43
Figura 4.1 Relación diagonales en tracción con las fallas en terreno.....	51
Figura 4.2 Curvas S-N Categorías B, C, D, y E.	52
Figura 4.4 Diagonales 1, 5 y 10 comparadas con Categoría E.....	54
Figura 4.5 Curvas S-N Categorías B, C, D, E y F.	55
Figura 4.7 Diagonales 1, 5, 10 y 13 comparadas con Categoría F.	57
Figura 4.8 Modelo FEM.....	59

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

La aparición de grietas en las diagonales tubulares de una estructura industrial tipo Puente Apilador que operaba en un régimen cíclico las 24 horas reveló la vulnerabilidad de las conexiones estructurales frente a las cargas de fatiga. Este tipo de fallas podía comprometer la seguridad operativa y generaba altos costos de reparación y mantenimiento.

El Puente Apilador era una estructura clave en la cadena de producción de la industria minera, por lo que su detención implicaba altas pérdidas directas de producción. Cada hora de inactividad representaba toneladas de material no procesado, lo que se traducía en impactos económicos significativos y en la disminución de la eficiencia operativa del sistema.

Esto resaltaba la importancia crítica del diseño adecuado frente a la fatiga en estructuras sometidas a cargas cíclicas. Estos problemas no solo generaban costos elevados de reparación y mantenimiento, sino que también implicaban riesgos significativos de seguridad y posibles interrupciones operativas.

A través de la investigación y modelación precisa de las conexiones estructurales utilizando herramientas avanzadas como IDEA StatiCa, fue posible identificar las causas específicas de estas fallas y promover mejoras en el diseño que prolongaran la vida útil de los equipos. Este estudio estuvo motivado por la necesidad de minimizar las fallas debidas a fatiga, asegurando un rendimiento continuo y seguro de las instalaciones industriales.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Realizar una evaluación del comportamiento a la fatiga de las conexiones afectadas en el caso de estudio de un Puente Apilador.

1.2.2. Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo estructural en SAP2000 del puente apilador para determinar el rango de tensiones en las conexiones sometidas a cargas cíclicas.
- Validar los resultados obtenidos en las simulaciones con los criterios de fatiga establecidos en las normativas AISC 360-16 y BS 7608, analizando las ventajas y limitaciones de cada enfoque.
- Desarrollar un modelo detallado de la conexión afectada, utilizando el software IDEA Statica, identificando sus principales ventajas y desventajas.

1.3. Metodología

1.3.1. Revisión Bibliográfica y Normativa:

Se realizó una revisión de las normativas AISC 360 (2016), y BS 7608 (2014), con el objetivo de comprender los criterios de diseño de las conexiones sometidas a cargas cíclicas.

Se analizó el estado del arte en el diseño de estructuras de acero frente a la fatiga, con especial atención a la problemática de las uniones soldadas y los efectos de las concentraciones de tensiones.

1.3.2. Modelación y Simulación en IDEA StatiCa:

Se modeló el puente apilador en SAP2000, enfocándose en la estructura global para obtener el rango de tensiones en las diagonales tubulares y sus conexiones bajo las cargas cíclicas de operación. Este modelo permitió determinar los esfuerzos en los puntos críticos de la estructura, proporcionando datos clave para el análisis detallado de fatiga.

Posteriormente, se utilizó IDEA StatiCa para modelar específicamente las conexiones estructurales de las diagonales tubulares, aplicando las cargas obtenidas en SAP2000. Se emplearon los datos disponibles (cargas, geometría y régimen de operación) para reproducir las condiciones reales de trabajo.

1.4. Principales resultados y conclusiones

Se validó el uso del modelo articulado en el análisis de fatiga, debido a diferencias mínimas con el modelo empotrado.

Las normas AISC 360-16 y BS 7608:2014 se complementaron adecuadamente en el análisis:

- AISC: enfoque conservador y directo.
- BS 7608: enfoque probabilístico mediante curvas S-N.

El uso de IDEA StatiCa permitió:

- Detectar zonas de concentración de esfuerzos en soldaduras y placas.
- Validar con precisión los puntos críticos observados en terreno.

1.5. Organización de la memoria

Este trabajo fue estructurado en varios capítulos, que incluyeron: "Introducción", "Metodología", "Resultados" y "Conclusiones".

En el primer capítulo se expuso la motivación, los objetivos y alcances del estudio, los resultados esperados, así como una introducción a la metodología y la organización de la memoria.

El segundo capítulo estuvo dedicado a la revisión bibliográfica relacionada con el tema de investigación y el desafío a abordar.

En el tercer capítulo se describió la zona de estudio y las fuentes de información utilizadas, junto con la metodología empleada para desarrollar el trabajo.

El cuarto capítulo presentó los resultados del análisis. Finalmente, el quinto capítulo expuso las conclusiones obtenidas a partir del estudio realizado.

CAPÍTULO 2: MARCO TEORICO

2.1. Introducción

En este capítulo, se abordan los conceptos clave, teorías y enfoques previos relacionados con el análisis de la fatiga en estructuras sometidas a cargas cíclicas, específicamente en el caso de las conexiones de puentes apiladores. Se revisaron las metodologías tradicionales para la evaluación de fatiga, como las establecidas por las normativas AISC 360-16 y BS 7608-14, así como las herramientas computacionales más avanzadas, como IDEA StatiCa, que permiten una simulación precisa y detallada del comportamiento de las conexiones estructurales.

2.2. Fatiga

Según Callister Jr., William D., and Rethwisch, David G (2014), la fatiga es un mecanismo de falla que implica la fisuración de materiales y componentes estructurales debido a esfuerzos cíclicos (o fluctuantes). Aunque los esfuerzos aplicados pueden ser de tracción, compresión o torsión, la iniciación y propagación de las fisuras se deben al componente de tracción.

Uno de los factores más interesantes del desarrollo de la fatiga es que las fisuras por fatiga pueden iniciarse y propagarse a esfuerzos muy por debajo del límite de fluencia del material de construcción. Estos esfuerzos generalmente se consideran asociados a la deformación elástica, no a la deformación plástica.

Utilizando esta misma referencia, se describen tres etapas principales en el proceso de falla por fatiga:

2.2.1. Las 3 Etapas de la Falla por Fatiga

Etapa 1: Iniciación de la grieta. El desarrollo inicial de una grieta por fatiga ocurre en discontinuidades localizadas en la estructura cristalina del metal. La generación y movimiento de estas discontinuidades realmente fortalece el metal a través de la deformación plástica. A medida que el metal se endurece por trabajo, pierde su capacidad de deformarse plásticamente en el área localizada donde las tensiones cíclicas son evidentes. Una vez que el metal alcanza su límite de deformación plástica, la discontinuidad se convierte en una pequeña grieta.

Etapa 2: Propagación de la grieta. Una vez que se inicia una grieta, las tensiones cíclicas continuas repiten el proceso, haciendo crecer lentamente la microgrieta, que se convierte en una amenaza para la integridad estructural.

Etapa 3: Falla. El evento final de falla puede ser dúctil o frágil, dependiendo del material, el grosor, la temperatura y la tensión aplicada. Las fallas por fatiga típicamente ocurren de forma repentina. Las superficies de fractura inducidas por fatiga en un componente roto suelen ser lisas y no muestran evidencia de deformación plástica.

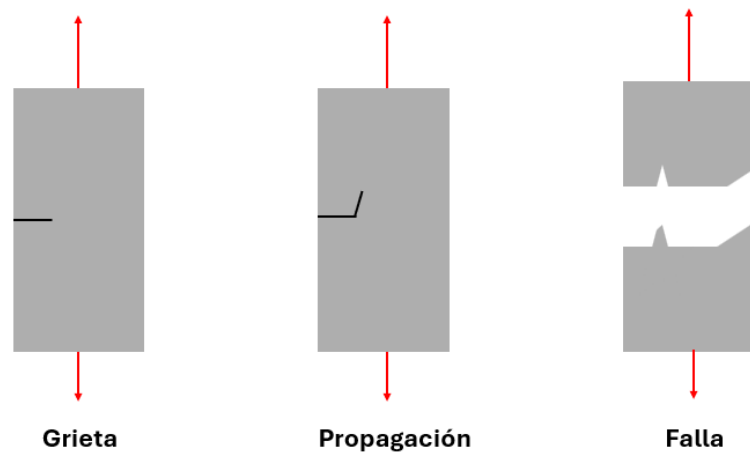


Figura 2.1 Etapas del fallo por fatiga

Fuente: Elaboración propia

Además, Callister y Rethwisch también clasifican las formas de fatiga en función del tipo de sollicitación. Generalmente pueden clasificarse en una de dos categorías: fatiga mecánica o fatiga térmica.

2.2.2. Fatiga Mecánica

Callister Jr., William D., and Rethwisch, David G (2014) proponen que es un mecanismo de falla discontinua causado por esfuerzos cíclicos repetidos en el tiempo, sin necesidad de factores térmicos o químicos.

- Cargas mecánicas excesivas o mal distribuidas.
- Operaciones transitorias (como arranques, paradas, variaciones de carga).
- Unión con geometrías deficientes (soldaduras mal ejecutadas, concentraciones de tensiones).

De manera específica, se puede mencionar las fatigas por vibración y corrosión:

2.2.2.1. Fatiga por Vibración

La fatiga por vibración es un tipo de fatiga mecánica causada por la vibración del equipo o las tuberías durante su operación. Por ejemplo, la fatiga por vibración podría ocurrir como resultado de operar un equipo más allá de las ventanas de integridad operativa designadas. El daño por fatiga inducido por vibración generalmente es causado por un diseño deficiente, falta de soporte (o amortiguadores), o un exceso de soporte o rigidez. La amplitud y la frecuencia de la vibración son factores críticos para el daño por fatiga por vibración que lleva a la iniciación y propagación de grietas.

2.2.2.2. Fatiga por Corrosión

La fatiga por corrosión ocurre debido a la acción simultánea del ataque químico y la fatiga mecánica. Los ambientes corrosivos son conocidos por deteriorar el metal. A medida que la corrosión se desarrolla, el área dañada actúa como un punto de concentración de tensiones y provoca la iniciación de una grieta. Se aplican películas delgadas y recubrimientos para proteger el equipo de la corrosión; sin embargo, la fatiga mecánica con frecuencia daña estas películas y expone el equipo a las condiciones circundantes.

2.2.3. Fatiga Térmica

Según Xin, Q. (2013), la fatiga térmica se produce normalmente a temperaturas elevadas debido a esfuerzos térmicos fluctuantes; no es necesario que existan esfuerzos mecánicos provenientes de una fuente externa. El origen de estos esfuerzos térmicos es la restricción a la expansión y/o contracción dimensional que normalmente ocurriría en un elemento estructural ante variaciones de temperatura.

2.3. Cargas cíclicas

La carga cíclica se genera cuando las estructuras están sujetas de forma repetida a diferentes fuerzas mecánicas, deformaciones, tensiones y estrés.

Según Nicholas, T. (2006), se distinguen comúnmente dos regímenes principales de fatiga: fatiga de bajo número de ciclos (Low Cycle Fatigue, LCF) y fatiga de alto número de ciclos (High Cycle Fatigue, HCF). Esta clasificación se basa principalmente en la magnitud del esfuerzo aplicado y el número total de ciclos hasta la falla.

2.3.1. LCF y HCF

La fatiga de ciclo bajo (LCF) se refiere a la situación en la que un material o componente experimenta una falla tras un número relativamente pequeño de ciclos, generalmente menos de 10,000. La LCF está asociada típicamente con altas amplitudes de deformación, deformación plástica, y la iniciación y propagación de grietas.

Por otro lado, la fatiga de ciclo alto (HCF) se refiere a la situación en la que un material o componente falla después de un gran número de ciclos, generalmente más de 10,000. La HCF está asociada con bajas amplitudes de deformación, deformación elástica, y la iniciación y crecimiento de grietas. Las pruebas de HCF se realizan aplicando una tensión o carga constante o variable a una muestra, midiendo la respuesta a la deformación y el número de ciclos hasta la falla.

La Figura 2.2 muestra una curva S-N típica de un acero dúctil mostrando las regiones donde se considerarían bajo y alto ciclo.

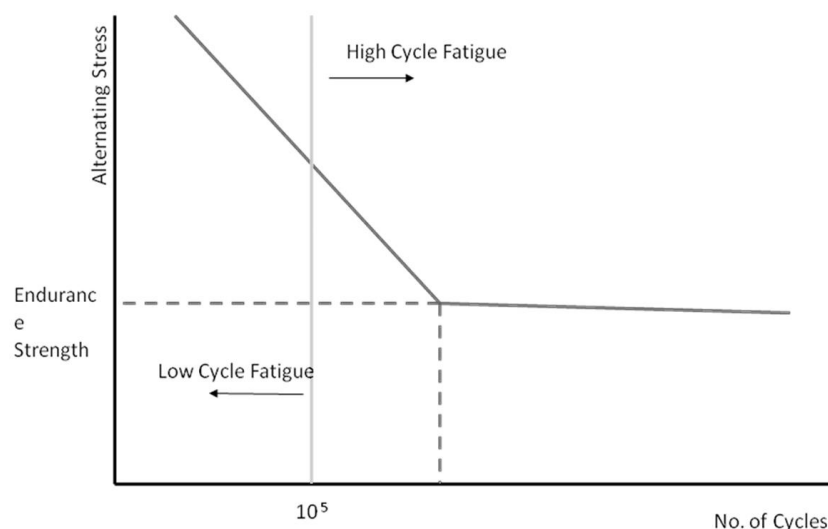


Figura 2.2 Curva S-N típica mostrando regiones LCF y HCF

Fuente: Agrawal, R. (2014). *Low cycle fatigue life prediction*.

2.4. Estructuras sometidas a fatiga.

Según el artículo por Haghani, R., Al-Emrani, M., & Heshmati, M. (2012), se revisan los resultados de una investigación exhaustiva que incluye más de 100 casos de daño por fatiga reportados en puentes de acero y mixtos (acero-hormigón). Estos casos se clasifican según el tipo de detalle estructural afectado, identificando los mecanismos detrás del daño por fatiga en cada categoría. Se encontró que más del 90% de los casos reportados corresponden a daños inducidos por deformación, causados por interacciones no intencionales u omitidas entre los diferentes elementos estructurales del puente. Además, una mala disposición de los detalles constructivos, como la falta de rigidización en espacios y los cambios abruptos en la rigidez de las conexiones, contribuyó significativamente a la aparición de fisuras por fatiga en muchos de los elementos.

2.4.1. Fisuras por fatiga originadas en defectos de soldadura

En general, los detalles soldados son más propensos a la fatiga en comparación con los elementos atornillados o remachados. Los defectos de soldadura, como socavaciones, poros atrapados y falta de fusión actúan como concentradores de esfuerzo que pueden generar grietas por fatiga. Además, las tensiones residuales producidas durante el proceso de soldadura, sumadas a las concentraciones de esfuerzo derivadas de la geometría de la soldadura y las micro fisuras inducidas por el proceso, aceleran el deterioro por fatiga en estos detalles.

Un ejemplo de este problema se encuentra en las vigas de puente con rigidizadores longitudinales soldado Figura 2.3. En varios puentes de EE. UU., se han observado fisuras que se originan en defectos de soldadura en la intersección entre las soldaduras de filete que conectan los rigidizadores longitudinales con el alma de la viga y las soldaduras a tope realizadas en los empalmes transversales de los rigidizadores. Al no considerarse estas intersecciones como detalles estructurales críticos, no fueron inspeccionadas adecuadamente, lo que permitió la propagación de fisuras desde el rigidizador hasta el alma de la viga, provocando fallas frágiles en algunos casos.



Figura 2.3 Grietas por fatiga en una viga de puente que comienzan en defectos de soldadura en un punto de intersección de soldaduras.

Fuente: *Fatigue-Prone Details in Steel Bridges* (2012)

2.4.2. Detalles con cambios en la sección transversal

Los cambios en la sección transversal de los elementos son comunes en los puentes de acero. Un ejemplo sencillo es la transición en las dimensiones del ala de una viga cajón, ya sea en ancho, espesor o ambos. Se sabe que la resistencia a la fatiga de estos detalles puede mejorar si se realiza una transición suave entre las placas conectadas, utilizando biselados o redondeos en los bordes.

Sin embargo, existen detalles más complejos donde los cambios en la sección transversal generan estados de esfuerzo adicionales que pueden alcanzar niveles lo suficientemente altos como para causar daño por fatiga. Estos esfuerzos suelen ser difíciles de predecir mediante análisis simplificados y, en ocasiones, son pasados por alto por los diseñadores.

Se han reportado casos de daño por fatiga tanto en el alma de la viga como en las soldaduras entre el alma y el ala. En las conexiones con soldaduras de filete, las grietas pueden propagarse tangencialmente a la curvatura del ala o en dirección radial, dependiendo del esfuerzo predominante en la zona Figura 2.4.

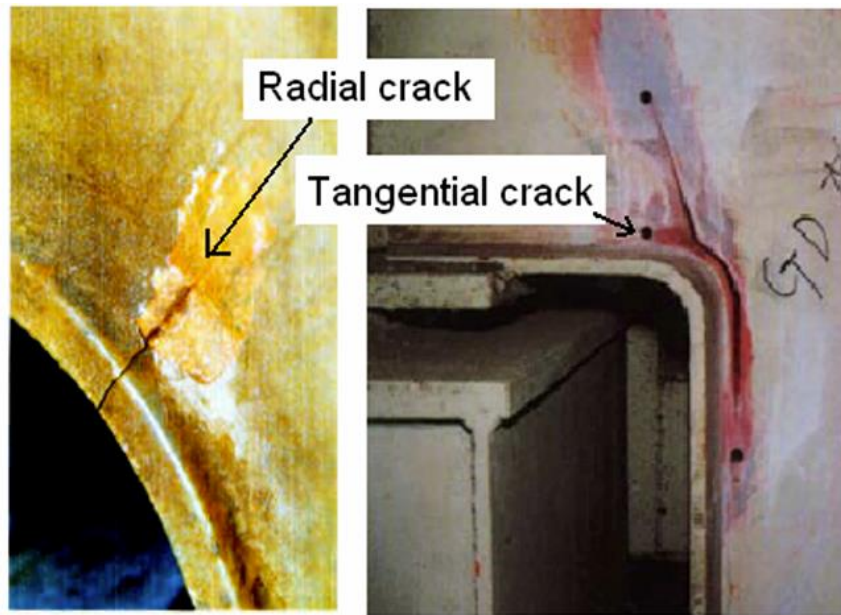


Figura 2.4 Ejemplos de grietas radiales y tangenciales.

Fuente: *Fatigue-Prone Details in Steel Bridges* (2012)

2.5. Puente Atirantado de Runyang

Un caso relevante estudiado por Guo, T., & Liu, Z. (2016) es el del Puente Atirantado de Runyang, en China. Donde se detectaron fisuras en los diafragmas longitudinales de las vigas cajón de acero después de solo unos años de servicio.

Entre 2007 y 2014, se realizaron inspecciones anuales utilizando ultrasonido, líquido penetrante y partículas magnéticas para detectar grietas en las vigas cajón.

2.5.1. Registro de fallas (2007)

La mayoría de las fisuras se desarrollaron en los diafragmas longitudinales, iniciándose desde el pie de soldadura cercano al extremo de las ranuras y propagándose posteriormente a lo largo del perímetro de los tubos, con longitudes variables que iban desde unos pocos milímetros hasta varios cientos. Algunas de estas fisuras evolucionaron hasta provocar una falla circunferencial (CF).

La ubicación crítica de estas fisuras fue identificada en la intersección entre los tubos diagonales y las placas de unión (gusset plates), donde se produce una concentración significativa de esfuerzos, facilitando el inicio y crecimiento de grietas por fatiga.

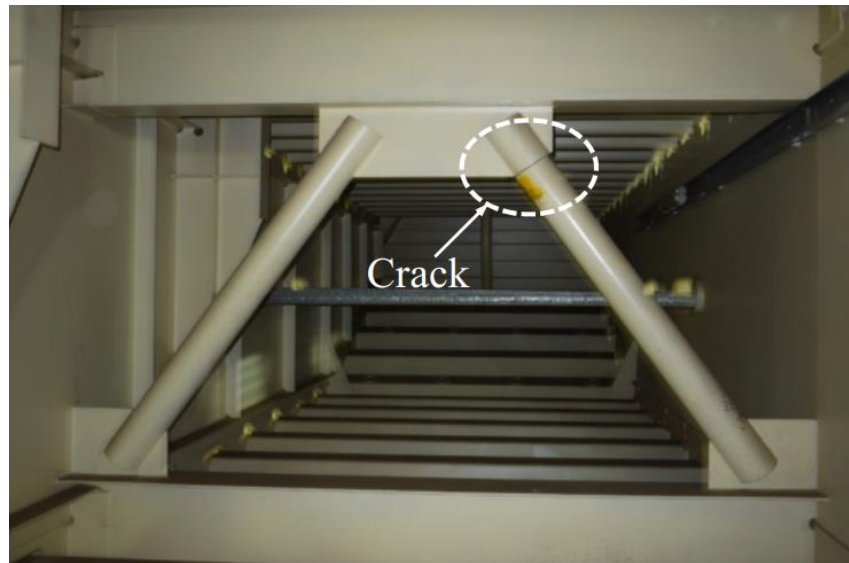


Figura 2.5 Grietas observadas en el campo en los diafragmas longitudinales de las vigas cajón: grieta a través de toda la sección (SNYB).

Fuente: *Diagnosis and mitigation of fatigue damage in longitudinal diaphragms of cable-stayed bridges*. (2016)

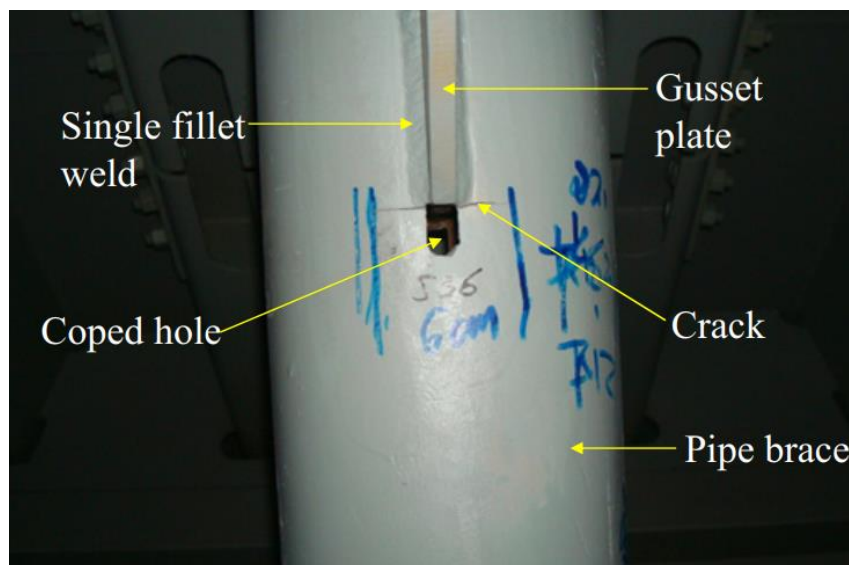


Figura 2.6 Grietas observadas en el campo en los diafragmas longitudinales de las vigas cajón: grieta menor a media (RCB)

Fuente: *Diagnosis and mitigation of fatigue damage in longitudinal diaphragms of cable-stayed bridges*. (2016)



Figura 2.7 Dos modos típicos de fallo en las conexiones de tubo y placa de refuerzo (gusset plate).

Fuente: *Diagnosis and mitigation of fatigue damage in longitudinal diaphragms of cable-stayed bridges*. (2016)

2.5.2. Conclusiones del caso Runyang

Los análisis por elementos finitos y las inspecciones en terreno identificaron que las conexiones entre diafragmas y vigas principales presentan concentraciones de esfuerzos que aceleran la fatiga. Las fisuras en las uniones tubo–placa fueron comunes, especialmente en tramos alejados de los pilonos, apareciendo pocos años después de la puesta en servicio del puente.

Se determinó que las cargas axiales inducen la fisuración, aunque los esfuerzos por flexión también contribuyen al daño. Incluso bajo cargas axiales puras, la vida útil por fatiga de los refuerzos resultó insuficiente, evidenciando una subestimación de este fenómeno en el diseño.

Como medidas de mitigación, se recomendó el uso de tubos de mayor espesor o sección, y soldaduras más robustas. Además, se observó que los orificios de alivio (cope holes) generan concentraciones críticas de esfuerzo, por lo que su diseño debe ser optimizado para evitar el inicio de fisuras.

2.6. Rango de Tensión

La evaluación de fatiga generalmente se basa en el rango de tensiones o en el rango del factor de intensidad de tensión. Por lo tanto, las cargas de fatiga (acciones) deben expresarse en estos términos:

Las tensiones máximas y mínimas deben calcularse considerando la superposición de todas las cargas no permanentes, es decir, aquellas que fluctúan:

- Fluctuaciones en la magnitud de las cargas
- Movimiento de las cargas sobre la estructura
- Cambios en las direcciones de carga
- Vibraciones estructurales debido a cargas y respuesta dinámica
- Transitorios de temperatura

El análisis de fatiga se fundamenta en el efecto acumulativo de todas las ocurrencias del rango de tensión durante la vida útil estimada de la estructura.

2.7. Gráficos tiempo-historia

Es una representación de las variaciones de fuerza axial a lo largo del tiempo de servicio previsto de un componente. Se define mediante los valores máximos y mínimos sucesivos de la tensión inducida por estas acciones, con el objetivo de registrar de manera conservadora todos los eventos de carga y su respuesta dinámica.

En la mayoría de los casos, el historial de tensiones es estacionario y ergódico, lo que permite:

- Determinar un rango medio y su varianza.
- Elaborar un histograma y una distribución estadística.
- Obtener un espectro de energía.
- Estimar una distribución probabilística de valores máximos a partir de un período limitado de observación.

Por lo tanto, los datos necesarios para un análisis de fatiga pueden derivarse de mediciones de carga en servicio o de observaciones realizadas en un tiempo acotado, siempre que estas sean representativas de las condiciones que enfrentará el componente a lo largo de su vida útil.

2.8. Normativa

En el diseño de estructuras metálicas sometidas a cargas cíclicas, existen múltiples normativas internacionales que abordan la evaluación de la fatiga, cada una con enfoques y alcances particulares. En Chile, sin embargo, no se dispone de una normativa específica que regule este tipo de análisis en estructuras sometidas a cargas cíclicas variables, lo que obliga a adoptar referencias extranjeras como AISC 360, BS 7608, AASHTO y el Eurocódigo, cuyas aplicaciones varían según el tipo de estructura considerada.

La AISC 360, a través de su Apéndice 3, entrega un marco técnico preciso para evaluar la fatiga en uniones soldadas y empernadas, siendo especialmente útil para estructuras como los puentes apiladores, expuestas a cargas repetitivas. Esta normativa permite estimar la vida útil de los elementos estructurales mediante curvas de fatiga clasificadas por categorías de detalle, considerando además los efectos de concentración de tensiones en zonas críticas, aspecto clave para evaluar la durabilidad de uniones en equipos de transporte continuo.

Por su parte, la norma BS 7608 se enfoca en el comportamiento a fatiga de uniones soldadas, ofreciendo curvas S-N detalladas para distintas configuraciones geométricas y calidades de soldadura. Esta especificidad la hace particularmente valiosa en entornos industriales exigentes como la minería, donde las condiciones operativas intensifican los efectos de la fatiga estructural.

En cambio, normativas como AASHTO y el Eurocódigo presentan ciertas restricciones para su aplicación directa en puentes apiladores. AASHTO se orienta principalmente a infraestructuras sometidas a cargas vehiculares o ferroviarias, cuyas características dinámicas difieren de aquellas generadas por el movimiento de materiales y mecanismos en instalaciones mineras. El Eurocódigo, si bien incorpora criterios de fatiga en estructuras de acero, adopta un enfoque más general y menos adaptado a sistemas estructurales sometidos a sollicitaciones cíclicas intensas y constantes, como ocurre en este tipo de equipos industriales.

2.8.1. Curvas S-N

En base a lo expuesto en el libro Atlas of fatigue curves Boyer, H. E. (Ed.). (1986), las curvas S-N son una herramienta clave en el análisis de fatiga de materiales y estructuras sometidas a cargas cíclicas. Estas curvas representan la relación entre la tensión (S) aplicada y el número de ciclos (N) que un material puede soportar antes de fallar debido a la fatiga.

- Eje vertical (S): Representa la tensión máxima o el estrés alternante aplicado al material. Generalmente, se usa la tensión media o tensión alternante, dependiendo del tipo de carga cíclica.
- Eje horizontal (N): Representa el número de ciclos que el material puede resistir bajo una determinada carga sin experimentar fallo.

2.9. Obtención curva S-N BS7608

Las relaciones Sr-N para las diversas clases de detalles estructurales se han basado en análisis estadísticos de datos experimentales disponibles obtenidos bajo cargas de tracción o corte. Según la normativa, los análisis se llevaron a cabo mediante regresión lineal de $\log S_r$ y $\log N$, utilizando las pendientes de las curvas previamente establecidas. Asimismo, se realizaron ajustes empíricos menores con el fin de asegurar la compatibilidad de los resultados entre las diferentes clases, se muestra como ejemplo la obtención de acero detalle 90MPa en la Figura 2.8.

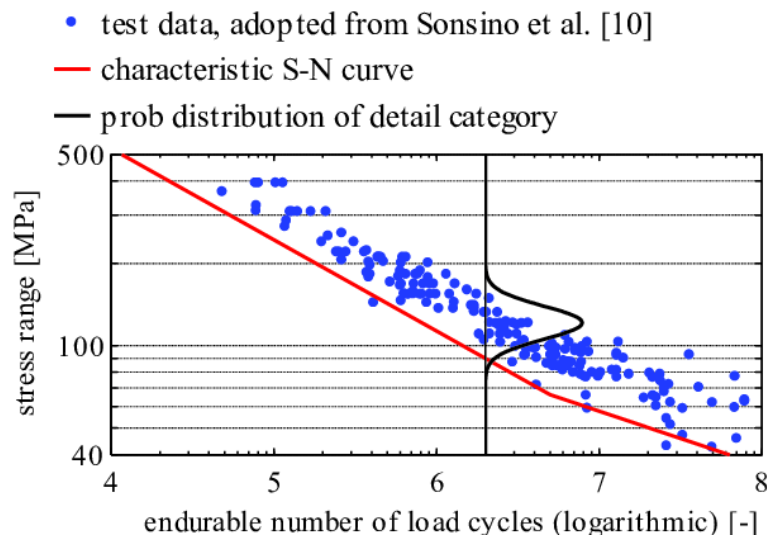


Figura 2.8 Datos de prueba de fatiga curva S-N para componentes de acero con una categoría de detalle de 90 MPa.

Fuente: Kelma, S., & Schaumann, P. (2015).

El uso varía dependiendo de los requerimientos, a continuación, en la Figura 2.9 se muestra la curva típica donde en el eje X se representa los ciclos de resistencia N y en el eje Y el rango de tensiones Sr

$(\frac{N}{mm^2})$, la:

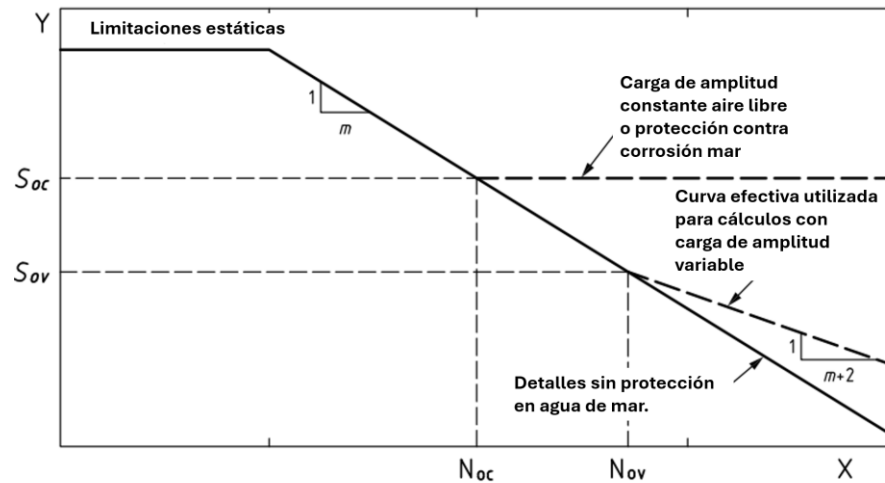


Figura 2.9 Curva S-N típica

Fuente: BS 7608:2014. (2014)

En lo que respecta a las uniones soldadas, se ha demostrado experimentalmente que, cuando hay tensiones residuales de tracción elevadas, la resistencia a la fatiga depende únicamente del rango de tensiones; el esfuerzo medio y la razón de tensiones no tienen un efecto significativo. En general, es imposible predecir qué tensiones residuales estarán presentes en una estructura específica; por lo tanto, las reglas de diseño se basan en la suposición de que es probable la presencia de tensiones residuales de tracción elevadas. Para simplificar, se ha aplicado la misma suposición en los detalles no soldados.

2.10. Obtención curva S-N AISC 360-16

La resistencia a la fatiga se ha derivado de una relación exponencial entre el número de ciclos hasta la falla (N) y el rango de tensión (S_r), denominada relación S-N, de la forma:

$$N = \frac{C_f}{S_r^n} \quad (2.1)$$

Esta relación general se representa comúnmente como una función logarítmica lineal. La Figura 2.10 muestra la familia de curvas de resistencia a la fatiga, identificadas según las categorías de tensión A, B, B', C, D, E, E' y G. Estas relaciones fueron establecidas a partir de una base de datos extensa, desarrollada en Estados Unidos y otros países (Keating y Fisher, 1986).

El rango de tensión admisible se ha determinado ajustando el coeficiente C_f , de manera que la curva de diseño se ubique dos desviaciones estándar por debajo de la media de la relación S-N obtenida de los datos de prueba reales. Estos valores de C_f corresponden a una probabilidad de falla del 2.5% sobre la vida útil de diseño.

El número de fluctuaciones de rango de tensión durante la vida útil de diseño (n_{SR}) en la ecuación se puede calcular mediante la ecuación:

$$n_{SR} = (n^{\circ} \text{ de fluctuaciones de tensiones por día}) * (365 \text{ días}) \\ * (\text{años vida útil diseño}) \quad (2.2)$$

La categoría de tensión F se muestra en la Figura 2.11 y presenta una pendiente diferente a las demás categorías. La resistencia a la fatiga de los detalles de la categoría de tensión C' o C'' se determina aplicando un factor de reducción al rango de tensión de la categoría C.

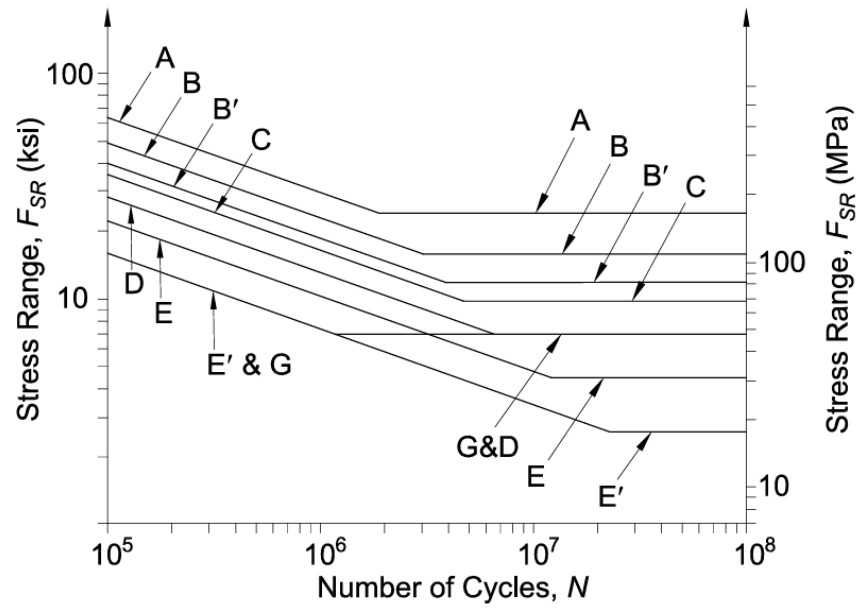


Figura 2.10 Curvas de resistencia a la fatiga

Fuente: *AISC 360-16*. (2016)

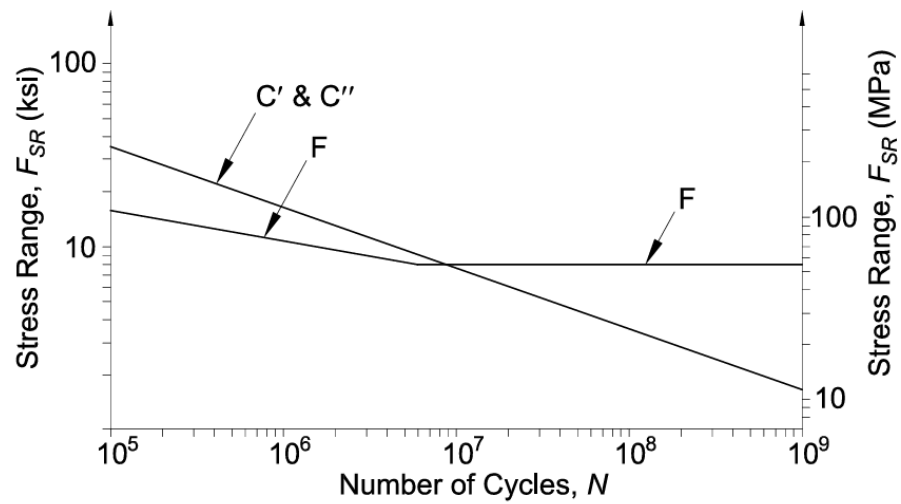


Figura 2.11 Curvas para categorías C y F

Fuente: *AISC 360-16*. (2016)

2.11. IDEASTATICA

IDEA StatiCa es una herramienta avanzada, versátil e intuitiva que facilita la resolución de modelos numéricos complejos con una relativa facilidad. Su interfaz de usuario permite un trabajo eficiente, incluso para modelos de baja complejidad, y su potente solver de procesamiento optimiza significativamente el tiempo durante la fase de preprocesamiento. Esto permite trabajar con modelos ya preestablecidos, agilizando el trabajo y permitiendo un análisis más rápido.

Debido a que existen múltiples zonas dentro de una estructura donde la teoría no es aplicable, como uniones soldadas, conexiones atornilladas, cimentaciones, perforaciones en muros, variaciones en la altura de la sección transversal y cargas puntuales, el análisis estructural en estas áreas se vuelve considerablemente más complejo.

El comportamiento en estos puntos es no lineal, por lo que es crucial considerar las no linealidades estructurales, como la plastificación del material en placas, el contacto entre placas de extremo o entre la base y el bloque de hormigón, la acción unidireccional de pernos y anclajes, y el comportamiento de las soldaduras.

2.11.1. Método de los componentes (CM)

El método de los componentes (CM) resuelve la unión tratándola como un sistema de elementos interconectados, denominados componentes. Se construye un modelo específico para cada tipo de unión con el fin de determinar las fuerzas y tensiones en cada componente, como se muestra en la Figura 2.12.

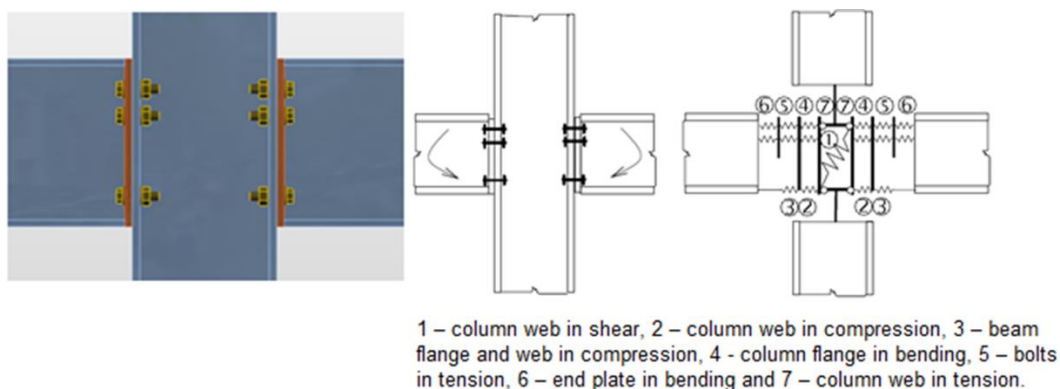


Figura 2.12 Vista método de los componentes

Fuente: IDEASTICA

En el análisis de estructuras de acero, las uniones con placas de extremo atornilladas pueden modelarse mediante resortes, considerando cada componente de la unión de forma independiente a través de ecuaciones específicas. Sin embargo, el método de los componentes (CM) tiene limitaciones cuando se trata de uniones de formas complejas y cargas generales, ya que requiere modelos específicos para cada tipo de unión.

Para superar estas limitaciones, IDEA StatiCa, en colaboración con instituciones académicas desarrolló el método Component-Based Finite Element Model (CBFEM).

2.11.2. Modelo de Elementos Finitos Basado en Componentes (CBFEM)

El CBFEM combina lo mejor del método de componentes con la potencia del Método de los Elementos Finitos (FEM) para el análisis de uniones estructurales, ofreciendo:

- Generalidad: Puede aplicarse a la mayoría de las uniones, cimentaciones y detalles utilizados en la ingeniería estructural.
- Rapidez y simplicidad: Su uso en la práctica diaria permite obtener resultados en tiempos comparables con los métodos tradicionales.
- Información detallada: Proporciona datos claros sobre el comportamiento de la unión, tensiones, deformaciones y factores de seguridad de cada componente.

El FEM es ampliamente utilizado en análisis estructural y resulta ideal para modelar uniones de cualquier forma (Virdi, 1999). Dado que el acero suele experimentar fluencia, es necesario realizar un análisis elástico-plástico, ya que un análisis lineal no proporciona resultados útiles para el diseño de uniones.

2.12. Conclusión

En este capítulo se presentó la importancia del análisis de fatiga en conexiones estructurales sometidas a cargas cíclicas, destacando el rol fundamental de las curvas S-N para estimar la vida útil de los materiales. Se compararon las normativas, mientras que la normativa AISC 360-16 se enfoca en detalles específicos de conexiones soldadas, la BS 7608-14 adopta un enfoque probabilístico más generalizado, lo que permite un análisis complementario y robusto del desempeño estructural frente a la fatiga.

CAPÍTULO 3: PUENTE APILADOR Y METODOLOGÍA

3.1. Introducción

El análisis de la fatiga en estructuras sometidas a cargas cíclicas requiere una metodología integral que combine herramientas de modelado estructural, simulaciones avanzadas y verificación normativa. En este estudio, se utilizó SAP2000 para la obtención de los rangos de tensiones en la estructura global e IDEA StatiCa para el análisis detallado de las conexiones, permitiendo identificar las concentraciones de tensiones críticas. A través de esta combinación de software, se busca evaluar con precisión el impacto de la fatiga en las diagonales tubulares del puente apilador y validar los resultados con las normativas AISC 360-16 y BS 7608-14.

3.2. Estudio del caso

En el presente documento se presenta la modelación y verificación estructural del puente apilador, perteneciente a la operación minera, ante las solicitaciones de diseño. La modelación y verificación fueron realizadas de acuerdo con los planos de diseño y fabricación disponibles. No se consideran en la modelación las modificaciones realizadas en terreno durante la vida útil de la estructura.

Este informe detalla los aspectos más relevantes de la modelación estructural, las cargas consideradas en el análisis, la verificación de la resistencia de los elementos principales de acero en la estructura del puente.



Figura 3.1 Imagen referencial Puente Apilador

3.2.1. Información disponible

- Plano Disposición General Puente de Apilamiento.
- Planos de fabricación y montaje de segmentos.
- Reportes de cálculo estructural

3.2.2. Descripción de la estructura

El puente apilador es una estructura móvil diseñada para el transporte de mineral, conformada con acero estructural. Esta estructura está compuesta por siete segmentos diferenciados según su ubicación y diseño:

- Segmento inicial (tipo 1): Ubicado al inicio del puente, con un diseño específico adaptado a las condiciones de carga y conexión inicial.
- Segmentos intermedios (tipo 2): Cinco segmentos idénticos entre sí, que conforman la mayor parte del puente y proveen continuidad estructural.
- Segmento final (tipo 3): Situado al extremo del puente, con características estructurales únicas que difieren del segmento inicial y de los intermedios.

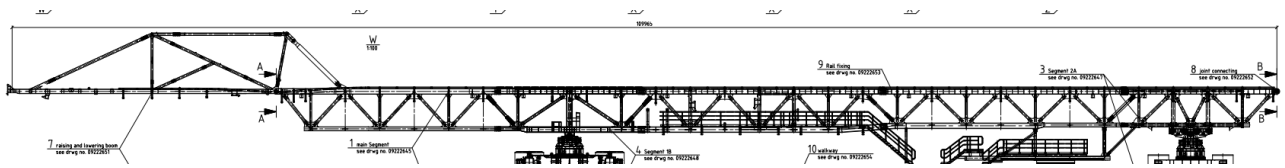


Figura 3.2 Sección 1 Vista transversal

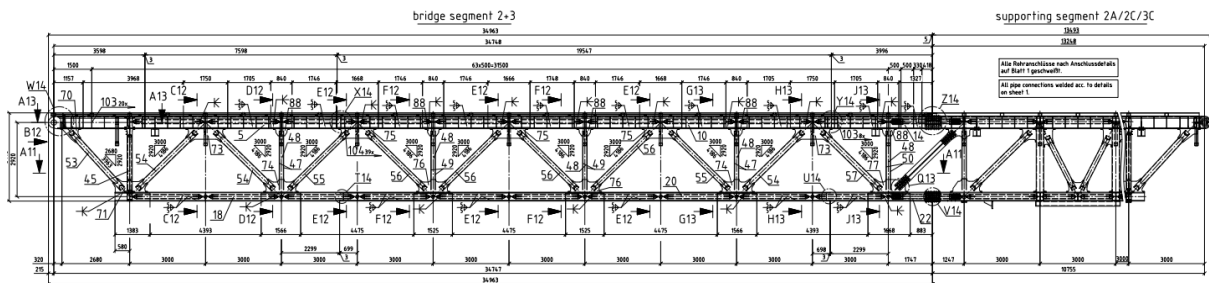
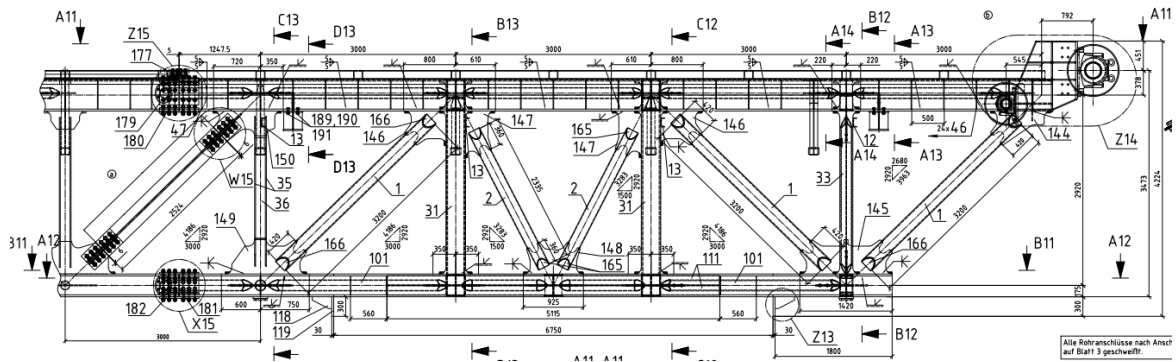


Figura 3.3 Sección 2 Vista transversal



La estructura está diseñada para soportar un sistema de rieles instalados en la viga principal superior, sobre los cuales se desplaza un carro tripper encargado de la distribución del material. Este carro recorre toda la longitud del puente, lo que permite una operación eficiente y flexible.

El puente apilador se moviliza mediante 8 orugas, distribuidas a lo largo de la estructura con una separación estándar de 48,0 metros entre cada par de orugas, proporcionando estabilidad y capacidad de maniobra durante la operación.

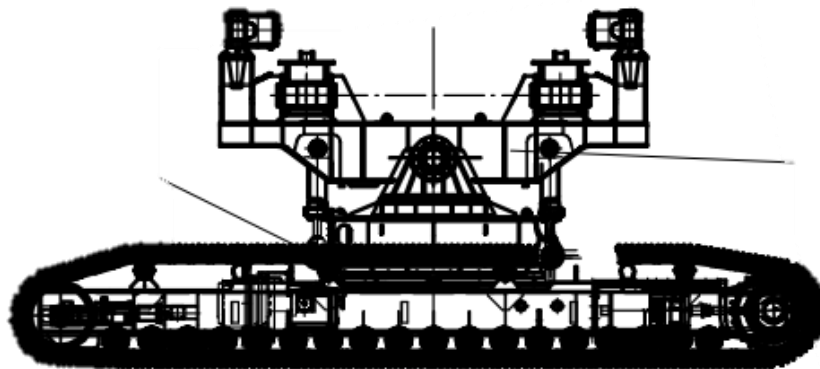


Figura 3.5 Vista transversal de oruga

El puente está soportado por tres tipos de orugas:

- Oruga B: Fija en todas las direcciones y restringe giro (empotrada en todas las direcciones).
- Oruga A: Fija en la dirección Z y restringe el giro (empotrada en Z). En caso de sismo, se fija en la dirección Y después de un desplazamiento de 250 mm.
- Oruga C: Fija en las direcciones Y y Z y restringe el giro (empotrada en Y y Z).

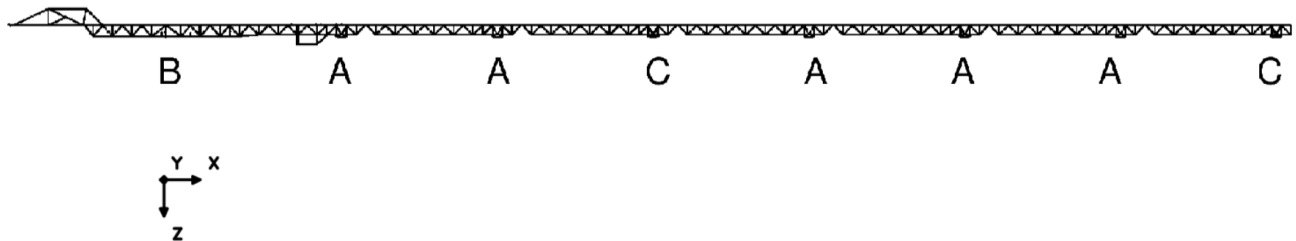


Figura 3.6 Vista del puente con los tipos de oruga

En resumen, el puente apilador combina elementos estructurales modulares y un diseño móvil, adaptado para operaciones de transporte de mineral con alta eficiencia y versatilidad.

3.2.3. Materiales

Se consideró acero de calidad Q345D para los elementos estructurales del equipo, conforme a los planos de fabricación. Este material, clasificado bajo la norma GB/T 1591-2018, presenta las siguientes propiedades mecánicas:

- Módulo de elasticidad (E): 200 000 N/mm²
- Coeficiente de Poisson (ν): 0,3
- Tensión de fluencia mínima (f_y): 345 MPa (para espesores ≤ 16 mm)
- Resistencia a la tracción (f_u): 470–630 MPa (dependiendo del espesor)

3.2.4. Cargas

El diseño estructural del puente apilador debe considerar múltiples cargas actuantes que influyen directamente en su comportamiento mecánico y en su respuesta frente a la fatiga. Entre las cargas consideradas se encuentran:

- Peso propio de los perfiles, determinado a partir del modelo estructural desarrollado en SAP2000.
- Peso de la cinta transportadora (ida y vuelta): $2 \times 60 \text{ kg/m}$
- Peso de los polines de carga: 40 kg/m
- Peso de los polines de retorno: 15 kg/m
- Peso de las poleas: 3500 kg c/u

Adicionalmente, se incorporó la carga correspondiente al material transportado sobre el tripper, el cual presenta un flujo de $4,125 \text{ t/h}$, con una densidad de $1,6 \text{ t/m}^3$, una velocidad de $4,07 \text{ m/s}$ y un factor dinámico de $1,1$. A partir de estos parámetros, se calculó la carga distribuida equivalente generada por el material transportado, la cual fue incluida en el análisis estructural.

$$q_{F,Fatiga} = \frac{4.125 \frac{t}{h} * \frac{10kN}{m}}{\frac{3600s}{h} * \frac{4.07m}{s}} = \frac{2.82kN}{m}$$

$$q_{F,dym} = 1.1 * \frac{2.82kN}{m} = \frac{3.1kN}{m}$$

El sistema de transporte cuenta con una carga móvil representada por el carro Tripper, el cual se desplaza a lo largo del puente apilador para distribuir el material en diferentes puntos del sistema. Esta carga móvil introduce efectos dinámicos adicionales y variaciones en las solicitaciones de la estructura, lo que debe ser considerado en el análisis estructural para evaluar adecuadamente su impacto en la fatiga de las conexiones y elementos principales.

El equipo se desplaza sobre seis boogies de dos ruedas apoyados en los rieles del puente y es impulsado por 12 motorreductores. Para garantizar su estabilidad durante las detenciones, el sistema cuenta con abrazaderas de carril. Además, el transportador transversal puede ajustarse en tres posiciones, siendo la configuración estándar para un acopio de 6 m a -7° .

3.3. Verificación a tracción perfil tubular

La resistencia a tracción de diseño (ϕP_n en LRFD) y la resistencia permisible a tracción de los miembros sometidos a tracción será el menor valor obtenido entre:

- El estado límite de fluencia en la sección bruta.
- El estado límite de ruptura en la sección neta.

Para fluencia en la sección bruta:

Se aplica un factor de resistencia $\phi = 0.90$

$$\phi P_n = 0.90 \cdot F_y \cdot A_g < P_u \quad (3.1)$$

- F_y : esfuerzo de fluencia del acero
- A_g : área bruta de la sección

Para ruptura en la sección neta:

Se aplica un factor de resistencia $\phi = 0.75$

$$\phi P_n = 0.75 \cdot F_u \cdot A_e < P_u \quad (3.2)$$

- F_u : esfuerzo último del acero
- A_e : área neta efectiva

En el presente análisis se evalúa la resistencia a tracción de un miembro estructural tubular tipo CHS 219,1×12,5 mm que es representativa para los demás casos, fabricado en acero Q345 visto en la Tabla 3-1, conforme a los lineamientos establecidos por la normativa AISC 360-16. El perfil está conectado mediante una placa de conexión tipo gusset plate de espesor 20 mm, configurando un detalle típico en sistemas de arriostramiento estructural vista en la Tabla 3-2.

f_y	470,00	Mpa
f_u	345,00	Mpa

Tabla 3-1 Acero Q345

D	219,10	mm	Diámetro exterior del tubo CHS
t	12,50	mm	Espesor de pared del tubo CHS
tp	20,00	mm	Espesor de la placa gusset
U	1,00		Factor de reducción de área neta
Ag	8113,16	mm ²	Área bruta de la sección transversal
An	7613,16	mm ²	Área neta efectiva de la sección transversal

Tabla 3-2 Especificaciones conexión gusset

Además, se considera que la fuerza axial de diseño P_u corresponde al valor máximo obtenido a partir del análisis de cargas móviles, siendo este el valor que demanda el elemento en condiciones de operación normal. De esta manera se verifica el perfil:

$P_u (Movil)$	794,56	kN	
$0.90 \cdot F_y \cdot A_g$	3431,87	kN	Cumple
$0.75 \cdot F_u \cdot A_e$	1969,91	kN	Cumple

Tabla 3-3 Resultados

3.4. Identificación del problema estructural

Desde el año 2021, se detectaron grietas en las diagonales tubulares de los arriostramientos verticales de la estructura Puente Apilador. Estas fallas han presentado una evolución progresiva, tanto en su severidad como en su número, lo que evidencia un deterioro acumulativo asociado a mecanismos de fatiga estructural.

A la fecha del análisis, se ha registrado agrietamiento en los siete segmentos que componen el puente apilador, afectando conexiones similares entre diagonales y elementos de rigidez. Esta distribución generalizada de fallas pone de manifiesto un problema estructural recurrente.

3.4.1. Hallazgos

De los hallazgos analizados se destacan 4 categorías de daño estructural en diagonales vistas en la Figura 3.7:

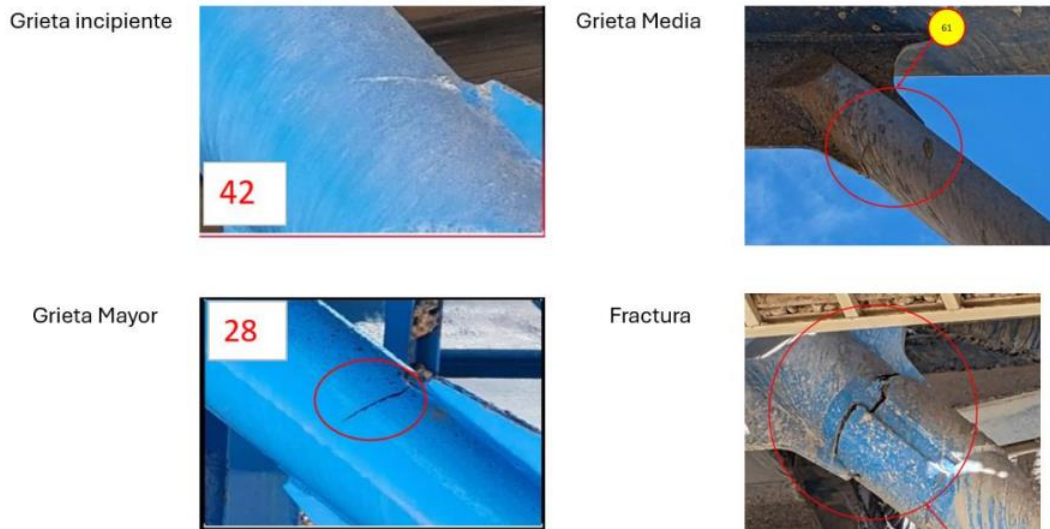


Figura 3.7 Tipología de daño registrado

Descripción de categorías de daño:

- Grieta incipiente: Grieta que no ha traspasado el espesor total del perfil
- Grieta Media: Pérdida parcial ($< 30\%$) de capacidad de transmisión de esfuerzos.
- Grieta Mayor: Pérdida significativa ($> 30\%$) de capacidad de transmisión de esfuerzos.
- Fractura: Pérdida total de la capacidad de transmisión de esfuerzos.

Además, se define la siguiente numeración de segmentos y diagonales, con el fin de identificar el elemento afectado:

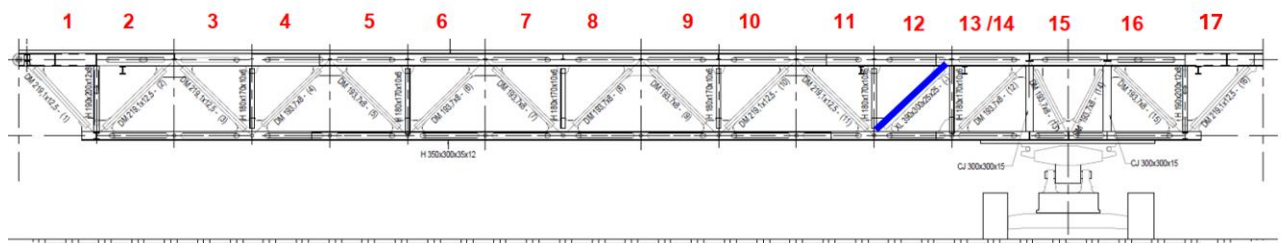


Figura 3.8 Numeración de diagonales verticales en Segmento estándar

Cabe destacar que, tal como se muestra en la Figura 3.8, la diagonal 12 presenta una configuración distinta respecto del resto de las diagonales evaluadas, una sección con forma de XL, a diferencia de las demás, que son de sección tubular. Esta diferencia geométrica resultó relevante, ya que la diagonal 12 no presentó signos de agrietamiento, lo que sugiere que su configuración estructural permite una mejor distribución de tensiones y reduce la susceptibilidad a concentraciones críticas, a diferencia de las conexiones tubulares que mostraron fallas por fatiga.

Con el fin de identificar aquellas diagonales con mayor frecuencia se falla, se realiza un gráfico de frecuencia, como el que se muestra a continuación en la Figura 3.9:

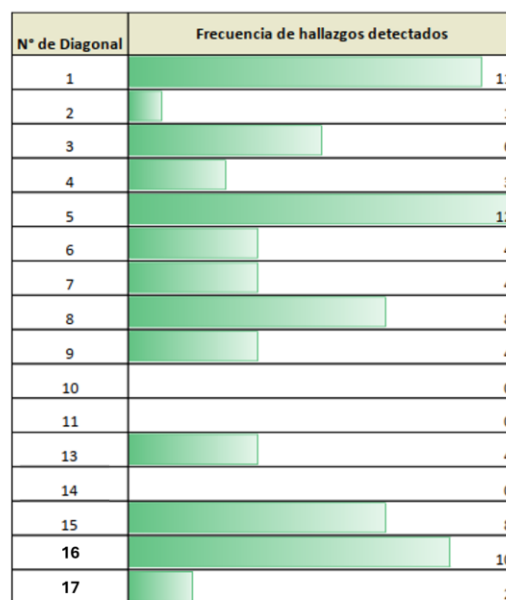


Figura 3.9 Frecuencia de hallazgos por N° de diagonal

Por tanto, se tiene que las diagonales con mayor frecuencia de falla corresponden a las diagonales 1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 15 y 16, vistas en la Figura 3.10.

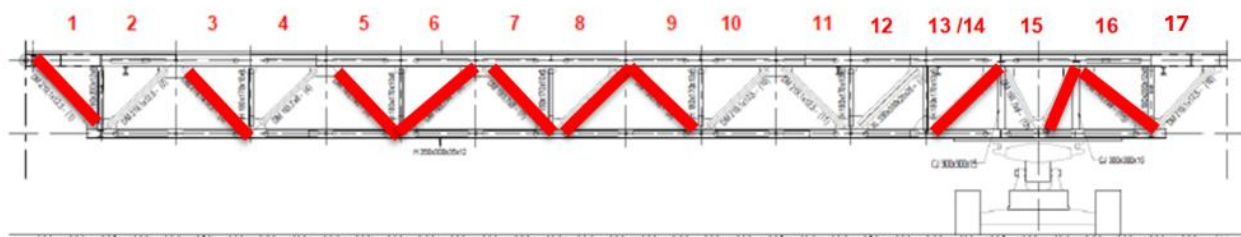


Figura 3.10 Diagonales con mayor frecuencia de daño en tramo estándar

3.4.2. Descripción de la grieta

La grieta ocurre en la zona de interacción entre el gusset de conexión y el perfil tubular. Cabe señalar que el detalle de conexión posee un agujero en el perfil tubular, el cual es sellado posteriormente con Sikaflex. El punto exacto de iniciación de la grieta corresponde al borde de este agujero, extendiéndose de manera transversal en el perfil diagonal.

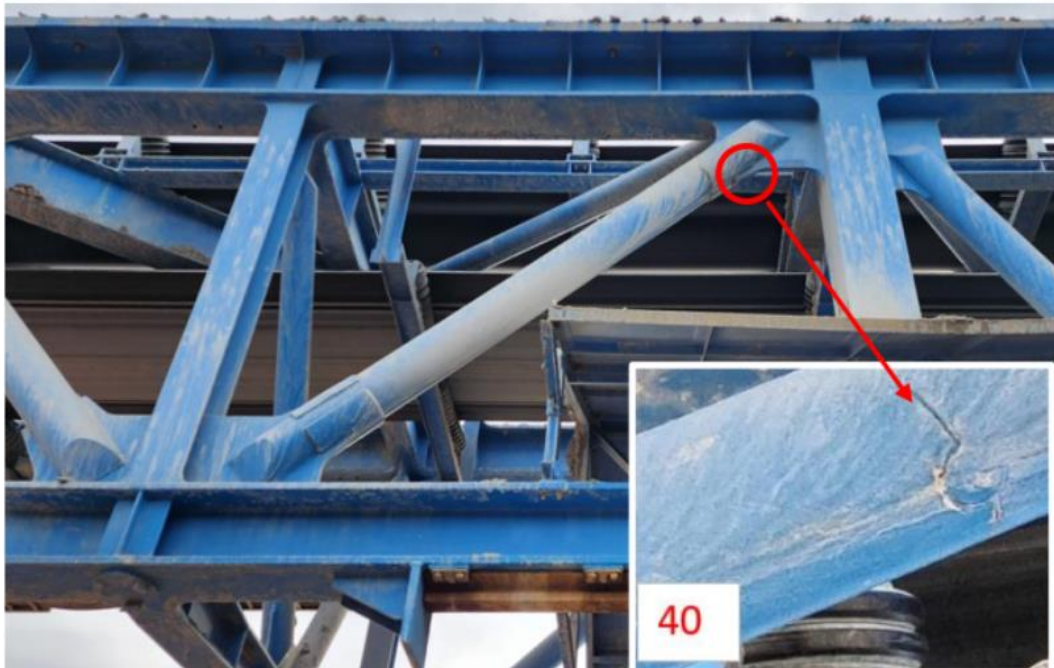


Figura 3.11 Grietas típicas detectadas en arriostramientos verticales tubulares.

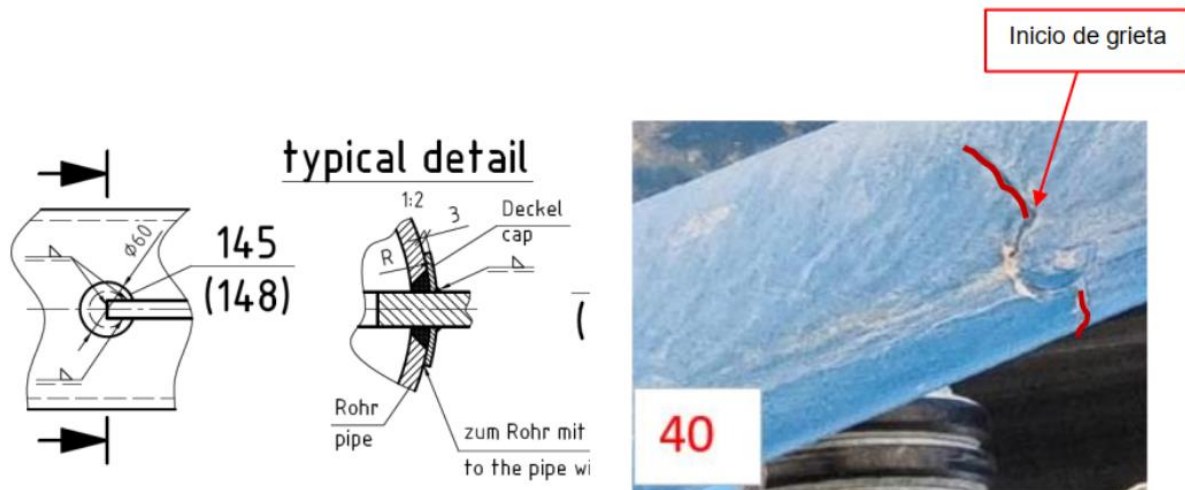


Figura 3.12 Grieta se extiende de manera transversal, iniciando en zona de abertura

3.5. Desarrollo del modelo SAP

El modelo del puente apilador de acero fue desarrollado utilizando el software SAP2000, con el ingreso de los perfiles estructurales y las distintas secciones proporcionadas en los planos disponibles. A lo largo del proceso, se respetaron los apoyos definidos en la estructura, como los apoyos rotulados y empotrados en los diferentes ejes, según lo indicado en el diseño original.

Una vez completada la simulación del modelo global, se aisló un tramo específico del puente apilador para un análisis más detallado. Este tramo constó de 34 diagonales, las cuales fueron sometidas a un análisis del rango de tensiones. Se identificaron aquellas diagonales que presentaron los valores de tensión más altos, ya que estas fueron las más susceptibles a fallas debido a fatiga.

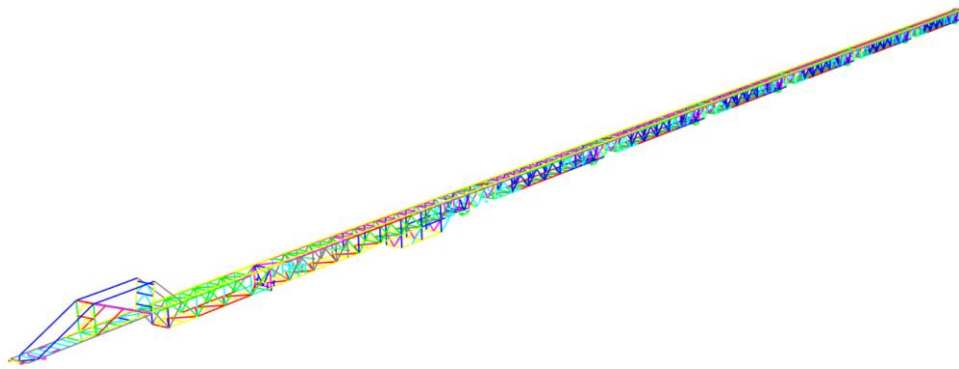


Figura 3.13 Vista 3D del modelo



Figura 3.14 Vista lateral del modelo

En la Figura 3.15 se muestra la sección elegida del modelo, específicamente el segmento 2A del puente apilador, con el fin de ilustrar el tramo seleccionado para el análisis detallado. Además, se visualizaron las diagonales que conformaban esta sección, permitiendo una identificación clara de las 34 diagonales que fueron analizadas en términos de su rango de tensiones.

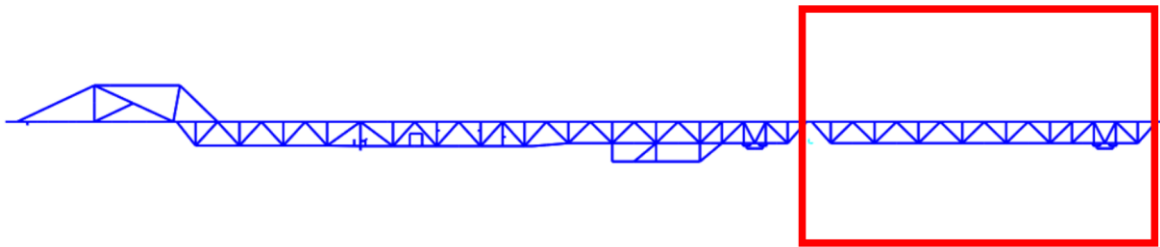


Figura 3.15 Ubicación del segmento 2A

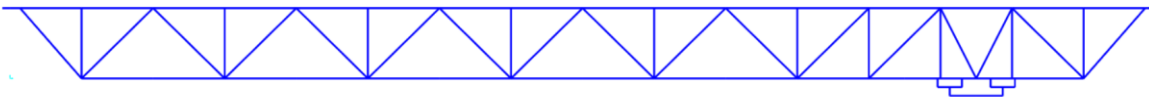


Figura 3.16 Vista del segmento 2A



Figura 3.17 Diagonales de la derecha del puente



Figura 3.18 Diagonales de la izquierda del puente

Al generar un modelo estructural, como el de un puente apilador, diferenciar entre diagonales articuladas y diagonales empotradas es fundamental para reflejar correctamente el comportamiento de la estructura bajo carga.

Las diagonales articuladas permiten rotación en sus extremos, lo que significa que no resisten momentos significativos, sino que solo transfieren fuerzas axiales, como compresión o tracción. Esta flexibilidad en las articulaciones resulta en una distribución más eficiente de los esfuerzos, pero también implica una menor rigidez en esas zonas, lo que puede afectar la forma en que la estructura se comporta globalmente.

Por otro lado, las diagonales empotradas están fijas en sus extremos, lo que les permite resistir tanto fuerzas axiales como momentos. Este tipo de conexión aumenta la rigidez local, lo que puede generar momentos significativos en esos puntos de soporte. Esto provoca una mayor rigidez en la estructura, lo que puede resultar en menores desplazamientos globales, pero también aumenta la concentración de tensiones en las zonas de apoyo.

En la modelación realizada en SAP2000, se representaron las condiciones estructurales reales del puente apilador, incluyendo la distribución de cargas móviles asociadas al flujo de material transportado. En la Figura 3.19 se muestra las distancias entre las cargas aplicadas.

The screenshot shows the 'Vehicle name' field set to 'VEHR' and 'Units' set to 'Kgf, m, C'. Under 'Load Elevation', there is a diagram of a horizontal beam with three downward-pointing arrows representing point loads. Below this is a table titled 'Loads'.

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Axle Load
Leading Load	Infinite		0,	11000,005
Leading Load	Infinite		0,	11000,005
Fixed Length	9,		0,	29999,999
Fixed Length	7,		0,	27999,999

Figura 3.19 Cargas y distancias entre ruedas del carro MH-004

Esta representación permite capturar de forma más precisa el efecto real de operación del equipo bajo condiciones cíclicas.

3.6. AISC 360-16

Se utilizará el Apéndice 3 de la norma AISC 360-16, el cual se aplica a miembros y conexiones sujetos a cargas de alto ciclo, dentro del rango elástico de tensiones, con una frecuencia y magnitud suficientes para iniciar la formación de grietas y una eventual falla progresiva. Este apéndice proporciona los lineamientos necesarios para evaluar la fatiga en estructuras, permitiendo diseñar conexiones y miembros que resistan efectivamente estas condiciones de carga.

Para las categorías de esfuerzo A, B, B', C, D, E y E', el rango de esfuerzo admisible debe calcularse según la Ecuación:

$$FSR = 6900 * \left(\frac{C_f}{n_{SR}} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (3.3)$$

Donde:

- C_f = constante determinada en la *Tabla A-3.1* para la categoría de fatiga.
- FSR = rango de esfuerzo admisible, en MPa.
- FTH = rango de esfuerzo umbral, es decir, el máximo rango de esfuerzo que permite una vida útil indefinida, tomado de la *Tabla A-3.1* del AISC 360-16.
- n_{SR} = número de fluctuaciones de esfuerzo en la vida útil de diseño.

En este caso, se utilizará la sección correspondiente a Base Metal at Welded Transverse Member Connections de la normativa, los datos de esta se ven en la Tabla 3-4, está orientada a la evaluación de la fatiga en las conexiones transversales de miembros soldados. Esta sección proporciona criterios específicos para la evaluación de las tensiones y la identificación de posibles puntos críticos en las uniones soldadas.

Categoría	Cf	FTH (Mpa)
B	12	165
C	4,4	110
D	2,2	69
E	1,1	31

Tabla 3-4 Detalle de curvas S-N Categorías B, C, D, y E.

Fuente: *AISC 360-16*. (2016)

Estas categorías dependen del radio de transición R , el cual suaviza el cambio entre dos secciones estructurales, ayudando a reducir las concentraciones de tensiones que podrían originar fisuras bajo la acción de cargas cíclicas.

Sin embargo, debido a limitaciones de la norma, no se encontró un caso específico aplicable directamente a la geometría de la conexión evaluada. Por esta razón, fue necesario tantear entre las categorías disponibles, considerando las condiciones geométricas observadas y el comportamiento esperado de la conexión.

Inicialmente, se evaluó la categoría D como representativa, pero con el fin de incorporar un criterio más conservador, se optó finalmente por la categoría E caso 6.1 vista en la Figura 3.20 Categoría E, permitiendo así evaluar el desempeño estructural bajo un escenario más desfavorable desde el punto de vista de la fatiga.

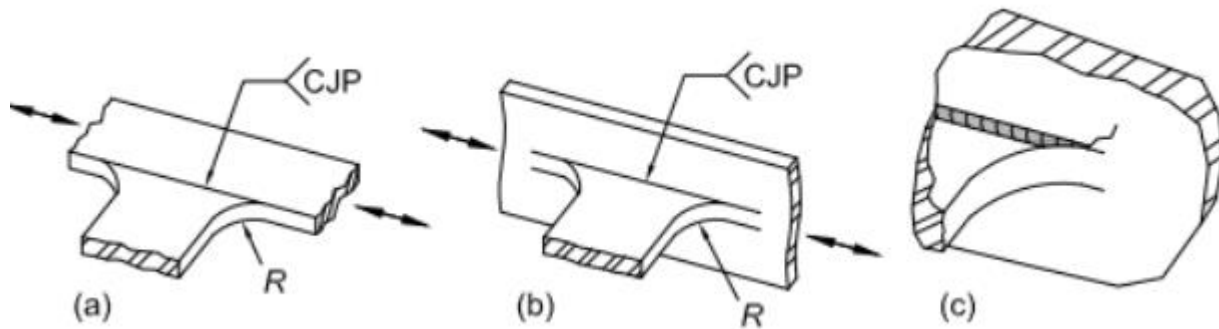


Figura 3.20 Categoría E Caso 6.1 Tabla A 3-1

Fuente: *AISC 360-16*. (2016)

3.7. BS7608-14

La norma BS 7608 es posiblemente la referencia más actualizada y completa para el diseño de componentes sometidos a fatiga.

La curva S-N se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\log N = \log C_o - d \cdot SD - m \cdot \log \sigma \quad (3.4)$$

Donde:

- $\log C_o$ representa el intercepto de las curvas S-N media.
- m es la pendiente de la parte inclinada de la curva S-N.
- SD es la desviación estándar de los resultados experimentales con los que se obtuvieron las curvas S-N de la norma.
- d se define como factor nominal de probabilidad y tiene en cuenta el nivel de seguridad de la curva de diseño.

Los valores de estos términos dependen de la categoría que se requiera.

Para definir la curva S-N de diseño, es necesario seleccionar un valor para el parámetro d , el cual depende de la probabilidad de fallo elegida, vista en la Tabla 3-5. Como resultado, la curva S-N de diseño actúa como un límite de predicción.

La norma ofrece distintos valores de d según la probabilidad de fallo, aunque lo más común es utilizar $d = 2$, lo que equivale a una probabilidad de supervivencia del 97.7%.

Reliability (%)	Nominal probability of failure (%)	d
50	50	0
61	31	0.5
84	16	1.0
97.7	2.3	2.0
99.86	0.14	3.0

Tabla 3-5 Valores de D según probabilidad de fallo

Fuente: BS 7608:2014. (2014)

Es importante destacar que el uso de las curvas S-N está restringido a situaciones en las que el esfuerzo no supere el 60% del límite elástico en condiciones normales y el 80% en condiciones extremas.

Clase	Co	m	Log C0	SD
B	2,343E+15	4	15,3697723	0,1821
C	1,082E+14	3,5	14,0342273	0,2041
D	3,988E+12	3	12,6007551	0,2095
E	3,289E+12	3	12,5170639	0,2509
F	1,726E+12	3	12,2370408	0,2183

Tabla 3-6 Detalle de las curvas S-N

Fuente: BS 7608:2014. (2014)

De acuerdo con lo establecido en la norma BS 7608, para el análisis de detalles sometidos a fatiga en uniones tubulares tipo diagonal, se recomienda considerar un valor de $d = 2$ como parámetro de diseño conservador. Asimismo, se adopta la categoría de detalle F Caso 9.1 detallado en la misma norma.

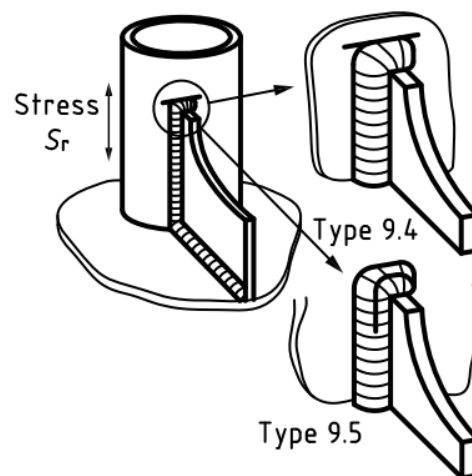


Figura 3.21 Miembros tubos circulares Categoría F Caso 9.1 Tabla 9

Fuente: BS 7608:2014. (2014)

Table 9 Classification of details: circular tubular members ^{A)}

Type no.	Product form	Location of potential crack initiation	Detail	Manufacturing requirements	Special treatments or requirements	Design stress area	Class		Thickness and bending correction (see 16.3.2)	Notes
							Nominal stress	Hot-spot stress		
9.4	Steel tubes	At weld toe in tube	Welded gusseted connections	Butt or fillet welded	Weld toe improvement techniques applicable but gusset shape should also be tapered to provide smooth transition from gusset edge to tube surface.	Minimum transverse cross-section of tube at weld toe	F	D	Ⓔ Applicable assuming $b = 0.25$ Ⓒ	The design stress has to include any local bending stress adjacent to the weld end.
9.5		At weld root		Fillet welded	Weld toe improvement techniques not applicable	Effective weld throat area. (see 15.3)	W1 if $\Delta\sigma_w < 0.3\Delta\sigma_w$ (see 15.3) S ₂ if $\Delta\sigma_w \geq 0.3\Delta\sigma_w$ (see 15.3)	Not applicable	Not applicable	For failure in the weld throat of fillet welded joints.

Tabla 3-7 Detalles de clasificación

Fuente: BS 7608:2014. (2014)

3.8. Fatiga IDEASTATICA

El análisis de fatiga tiene como objetivo determinar el rango de tensiones normales y cortantes entre dos estados de carga. Estas tensiones corresponden a tensiones nominales y deben evaluarse posteriormente utilizando los métodos de diseño especificados en las normativas. Este tipo de análisis está destinado al diseño de detalles sometidos a fatiga de alto ciclo, donde no se espera fluencia del material.

Es importante señalar que el análisis de fatiga no proporciona directamente la resistencia final ni el número de ciclos que puede soportar el detalle, sino que genera los valores de entrada para cálculos adicionales según las normativas aplicables.

Para realizar el análisis, se deben definir al menos dos estados de carga:

- El primer estado de carga es la referencia y suele representar el peso propio de la estructura. Puede incluso contener cargas nulas.
- Los otros estados de carga simulan las acciones de fatiga.

Las tensiones nominales normales y cortantes proporcionadas por IDEA StatiCa corresponden al rango de tensiones entre la acción de fatiga y el estado de carga de referencia.

El análisis por software puede identificar áreas críticas donde la fatiga representa un problema potencial. Esto permite rediseñar la estructura, por ejemplo:

- Reubicar concentraciones de tensiones en zonas menos críticas.
- Modificar dimensiones y la disposición de perforaciones.

3.8.1. Soldaduras en CBFEM

En el modelo CBFEM, las soldaduras se representan mediante un elemento de soldadura con restricciones multipunto que conectan las placas. Debido a estas restricciones, la distribución de tensiones en la soldadura se ve afectada. Para obtener valores representativos, las tensiones se toman a una distancia de 1.5 veces el tamaño del cordón de soldadura desde el inicio del filete.

Para una soldadura de filete de doble cara, se crean tres secciones de análisis. Dos de estas secciones corresponden a la misma categoría de detalle, pero solo se muestra la más solicitada. Se presentan los siguientes valores:

- Tensión normal máxima y la tensión cortante correspondiente en la misma ubicación.
- Tensión cortante máxima y la tensión normal correspondiente en la misma ubicación.

Este enfoque permite evaluar la distribución de tensiones y garantizar la seguridad del diseño según los criterios normativos.

3.9. Conclusión

El presente capítulo permitió establecer de manera estructurada el enfoque metodológico para evaluar la respuesta a fatiga de las conexiones estructurales en el caso del Puente Apilador. Se definieron las etapas clave del estudio, incluyendo la caracterización geométrica de la estructura, la obtención y análisis de cargas vehiculares de servicio, el modelado estructural con software especializado, y la verificación mediante un análisis detallado en elementos finitos.

Cada una de estas fases fue seleccionada con el propósito de replicar con precisión las condiciones reales de operación del puente, garantizando así que los resultados obtenidos sean representativos del comportamiento estructural observado en terreno. En particular, el uso combinado de SAP2000 para el análisis global e IDEA StatiCa para la evaluación local de detalles permitió capturar tanto los efectos globales como los locales en las conexiones sometidas a cargas cíclicas.

La metodología definida en este capítulo sentó las bases para los análisis posteriores y fue fundamental para cumplir con los objetivos específicos planteados en el Capítulo 1, especialmente aquellos relacionados con la evaluación del daño acumulado por fatiga y la identificación de los elementos críticos dentro de la estructura. Los resultados derivados de su aplicación se presentan y analizan en los capítulos siguientes.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1. Introducción

Este capítulo presenta y analiza los resultados obtenidos a partir de la metodología previamente descrita. Considerando las etapas de modelación estructural, caracterización de cargas y verificación por fatiga desarrolladas en el capítulo anterior, se exponen los principales hallazgos asociados al comportamiento estructural del Puente Apilador frente a sollicitaciones cíclicas.

4.2. Análisis tiempo-historia del modelo

Los gráficos fueron generados a partir de los modelos articulados y empotrados en SAP2000 y están incluidos en el Anexo 4.1 de esta memoria. En ellos se observa la evolución de las fuerzas normales (de tracción y compresión) a lo largo del tiempo, lo cual permite identificar los rangos de carga a los que están sometidas las distintas diagonales. Esta información constituye la base para el análisis de fatiga posterior según los criterios de las normativas AISC 360-16 y BS 7608.

4.3. Comparación de resultados entre modelo articulado y empotrado

En el caso de las diagonales rotuladas, los extremos fueron modelados como articulaciones que no transmiten momentos, permitiendo únicamente fuerzas axiales. Esta condición refleja un comportamiento más flexible, resultando en menores concentraciones de momento, pero mayores desplazamientos relativos.

En contraste, las diagonales empotradas presentan una mayor rigidez al restringir rotaciones, lo que permite transmitir momentos además de fuerzas axiales. Esta configuración genera mayores concentraciones de tensiones en los extremos, lo que puede favorecer la aparición de fisuras por fatiga, especialmente en conexiones soldadas.

Se optó por concentrar el análisis en un solo lado del puente, considerando que, al comparar las diagonales del lado derecho, diagonales 1 a 17 vistas en la Figura 3.17, con las diagonales del lado izquierdo, diagonales 18 a 34 vistas en la Figura 3.18, las diferencias en comportamiento estructural y en los rangos de fuerzas axiales (tracción y compresión) resultaron ser mínimas. Esta conclusión se respalda en la tabla comparativa correspondiente, donde se evidencia que las variaciones entre ambos conjuntos de elementos son estructuralmente insignificantes, mostradas en las Tabla 4-1 y Tabla 4-2.

	% Diferencia	
	P max	P min
Diag. 1 v/s Diag. 18	1,017%	0,989%
Diag. 2 v/s Diag. 19	0,993%	1,016%
Diag. 3 v/s Diag. 20	1,016%	0,994%
Diag. 4 v/s Diag. 21	0,994%	1,012%
Diag. 5 v/s Diag. 22	1,010%	0,993%
Diag. 6 v/s Diag. 23	0,995%	1,007%
Diag. 7 v/s Diag. 24	1,003%	0,962%
Diag. 8 v/s Diag. 25	0,977%	1,001%
Diag. 9 v/s Diag. 26	0,998%	0,989%
Diag. 10 v/s Diag. 27	0,994%	0,997%
Diag. 11 v/s Diag. 28	0,976%	0,999%
Diag. 12 v/s Diag. 29	1,000%	0,995%
Diag. 13 v/s Diag. 30	0,999%	0,979%
Diag. 14 v/s Diag. 31	1,009%	1,034%
Diag. 15 v/s Diag. 32	1,018%	1,008%
Diag. 16 v/s Diag. 33	1,003%	0,970%
Diag. 17 v/s Diag. 34	0,986%	1,017%
PROM	0,999%	0,998%

Tabla 4-1 Diferencia fuerza axial entre diagonales articuladas de la izquierda y derecha.

	% Diferencia			
	P max	P min	Mmax	Mmin
Diag. 1 v/s Diag. 18	1,020%	0,992%	1,020%	1,023%
Diag. 2 v/s Diag. 19	0,991%	1,013%	0,995%	1,001%
Diag. 3 v/s Diag. 20	1,011%	0,991%	1,010%	1,018%
Diag. 4 v/s Diag. 21	0,991%	1,009%	1,004%	1,008%
Diag. 5 v/s Diag. 22	1,008%	0,991%	1,008%	1,016%
Diag. 6 v/s Diag. 23	0,993%	1,006%	1,002%	1,005%
Diag. 7 v/s Diag. 24	1,003%	0,958%	1,005%	0,991%
Diag. 8 v/s Diag. 25	0,971%	1,001%	0,992%	1,075%
Diag. 9 v/s Diag. 26	0,999%	0,984%	1,000%	0,982%
Diag. 10 v/s Diag. 27	0,989%	0,993%	0,997%	1,046%
Diag. 11 v/s Diag. 28	0,945%	0,996%	1,009%	0,997%
Diag. 12 v/s Diag. 29	0,999%	1,001%	1,000%	1,001%
Diag. 13 v/s Diag. 30	0,999%	0,991%	0,997%	1,002%
Diag. 14 v/s Diag. 31	1,014%	1,036%	1,025%	0,995%
Diag. 15 v/s Diag. 32	1,022%	1,013%	1,007%	1,004%
Diag. 16 v/s Diag. 33	1,007%	0,977%	0,995%	0,997%
Diag. 17 v/s Diag. 34	0,990%	1,020%	1,000%	1,020%
PROM	0,997%	0,998%	1,004%	1,011%

Tabla 4-2 Diferencia fuerza axial entre diagonales empotradas de la izquierda y derecha.

4.4. Cálculo de rangos de tensiones de las diagonales

Para cada diagonal, se obtuvo el rango de tensiones, definido como la diferencia entre la tensión máxima y mínima durante un ciclo operativo completo. Este valor fue determinado a partir del análisis de cargas cíclicas extraídas del modelo en SAP2000.

Los resultados se organizaron en las Tabla 4-3 y Tabla 4-4, permitiendo visualizar los rangos por cada diagonal y priorizar aquellas con mayores exigencias.

	Esfuerzo Max (MPa)	Esfuerzo Min (MPa)	Rango de esfuerzo (MPa)
Diag. 1	190,21	-38,24	228,45
Diag. 2	34,84	-160,04	194,87
Diag. 3	141,04	-36,32	177,36
Diag. 4	59,09	-210,06	269,15
Diag. 5	178,96	-61,82	240,78
Diag. 6	61,47	-158,95	220,42
Diag. 7	119,81	-94,27	214,08
Diag. 8	112,07	-100,95	213,02
Diag. 9	62,40	-147,70	210,09
Diag. 10	101,71	-28,28	129,98
Diag. 11	7,42	-121,80	129,22
Diag. 12	51,77	-2,57	54,34
Diag. 13	138,35	-2,84	141,19
Diag. 14	87,97	-107,04	195,01
Diag. 15	64,60	-114,10	178,71
Diag. 16	183,29	-31,65	214,94
Diag. 17	36,69	-204,55	241,24

Tabla 4-3 Rango de esfuerzo por diagonal en modelo articulado.

	Esfuerzo Max (MPa)	Esfuerzo Min (MPa)	Rango de esfuerzo (MPa)
Diag. 1	234,19	-38,21	272,40
Diag. 2	43,32	-158,82	202,14
Diag. 3	159,49	-36,20	195,68
Diag. 4	72,06	-209,14	281,21
Diag. 5	197,84	-61,61	259,46
Diag. 6	73,98	-158,54	232,52
Diag. 7	134,60	-93,88	228,48
Diag. 8	127,09	-100,59	227,67
Diag. 9	73,55	-146,94	220,49
Diag. 10	117,08	-28,17	145,25
Diag. 11	17,56	-121,12	138,67
Diag. 12	84,44	-2,59	87,03
Diag. 13	149,01	-2,88	151,88
Diag. 14	101,86	-106,36	208,22
Diag. 15	79,23	-113,69	192,92
Diag. 16	193,17	-31,41	224,58
Diag. 17	65,44	-204,28	269,72

Tabla 4-4 Rango de esfuerzo por diagonal en modelo empotrado.

	% Diferencia
	Esfuerzo
Diag. 1	1,192%
Diag. 2	1,037%
Diag. 3	1,103%
Diag. 4	1,045%
Diag. 5	1,078%
Diag. 6	1,055%
Diag. 7	1,067%
Diag. 8	1,069%
Diag. 9	1,049%
Diag. 10	1,117%
Diag. 11	1,073%
Diag. 12	1,602%
Diag. 13	1,076%
Diag. 14	1,068%
Diag. 15	1,080%
Diag. 16	1,045%
Diag. 17	1,118%
PROM	1,110%

Tabla 4-5 Porcentaje de diferencia rango de esfuerzo entre modelo articulado y empotrado.

Como se observa en la Tabla 4-5, las diferencias entre los modelos articulado y empotrado es debido a que el momento también induce tensión, por lo tanto, se concluye que es necesario considerar ambos modelos en el análisis de fatiga estructural. Si bien las diferencias en las fuerzas axiales entre las configuraciones articulada y empotrada son mínimas, los momentos flectores generados en los extremos del modelo empotrado tienen una influencia no despreciable, incrementando los esfuerzos totales en aproximadamente un 12%. Este aumento puede afectar significativamente la evaluación de la vida útil de los elementos según los criterios establecidos por las normativas AISC 360-16 y BS 7608, por lo que su consideración resulta indispensable.

4.5. Identificación de diagonales más críticas y comparación con fallas reales

Para el análisis de fatiga en elementos de acero, solo se consideran las diagonales que trabajan predominantemente a tracción, ya que las solicitaciones a compresión no generan el mismo mecanismo de daño por propagación de grietas asociado a cargas cíclicas.

En la Tabla 4-6, se muestran las diagonales que presentaron esfuerzos a tracción durante las condiciones de operación simuladas.

Modelo articulado	Rango de esfuerzo (MPa)
Diag. 1	228,45
Diag. 3	177,36
Diag. 5	240,78
Diag. 7	214,08
Diag. 8	213,02
Diag. 10	129,98
Diag. 13	141,19
Diag. 15	178,71
Diag. 16	214,94

Tabla 4-6 Rango de esfuerzos diagonales en tracción.

La Figura 4.1 presenta un esquema representativo de las 17 diagonales que componen el segmento analizado del puente apilador, donde se han identificado mediante círculos rojos aquellas diagonales que, según el modelo articulado, trabajan predominantemente a tracción. Las flechas rojas indican la

correspondencia directa entre estas diagonales sometidas a tracción y las zonas donde se observaron fisuras reales durante las inspecciones en terreno.

Sin embargo, también se identificaron situaciones que ponen de manifiesto la complejidad del fenómeno de fatiga. Por ejemplo, las diagonales 6 y 9, que según el modelo trabaja predominantemente en compresión, presentó daños visibles. Esto sugiere que además de las solicitaciones axiales principales, pueden existir otros factores que influyen significativamente en el desarrollo de daño por fatiga, tales como imperfecciones geométricas, errores de montaje, efectos de carga secundaria, rigideces locales no modeladas o incluso condiciones de servicio no contempladas como la calidad del acero.

De manera inversa, la diagonal 10, identificada como sometida a tracción y por tanto con alto riesgo según el modelo, no presentó fisuras visibles hasta la fecha. Este comportamiento refuerza el carácter probabilístico y multifactorial de la fatiga, donde la presencia de tensiones cíclicas es una condición necesaria pero no siempre suficiente para la aparición de daño.

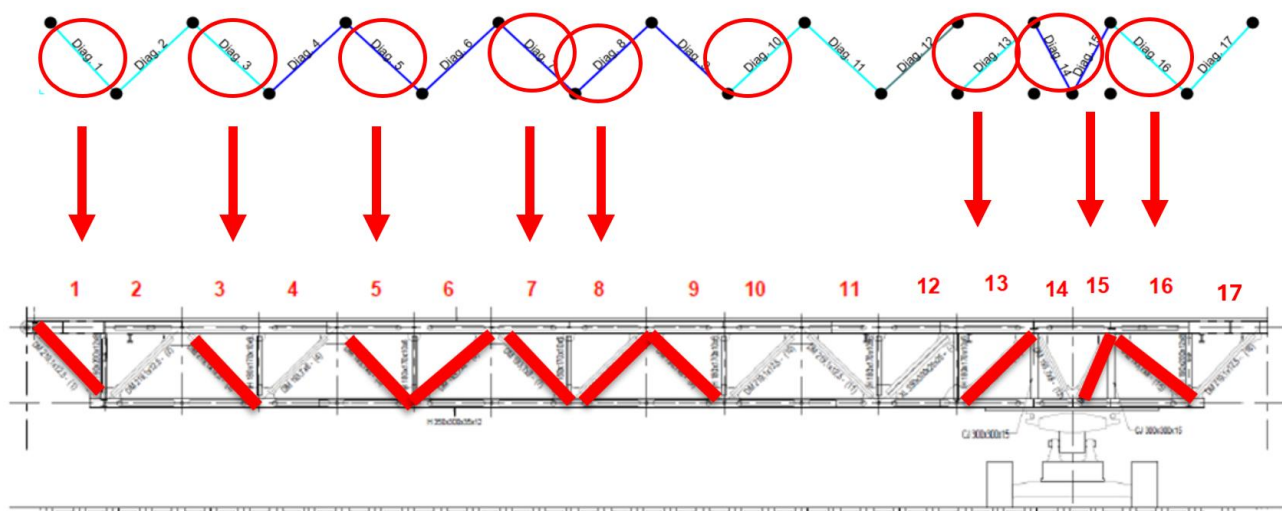


Figura 4.1 Relación diagonales en tracción con las fallas en terreno.

4.6. AISC 360-16

En la Figura 4.2, se presentan las curvas de fatiga correspondientes a las diferentes categorías de la norma. Estas curvas permiten comparar los rangos de esfuerzo calculados para cada diagonal con los valores admisibles según las categorías normativas.

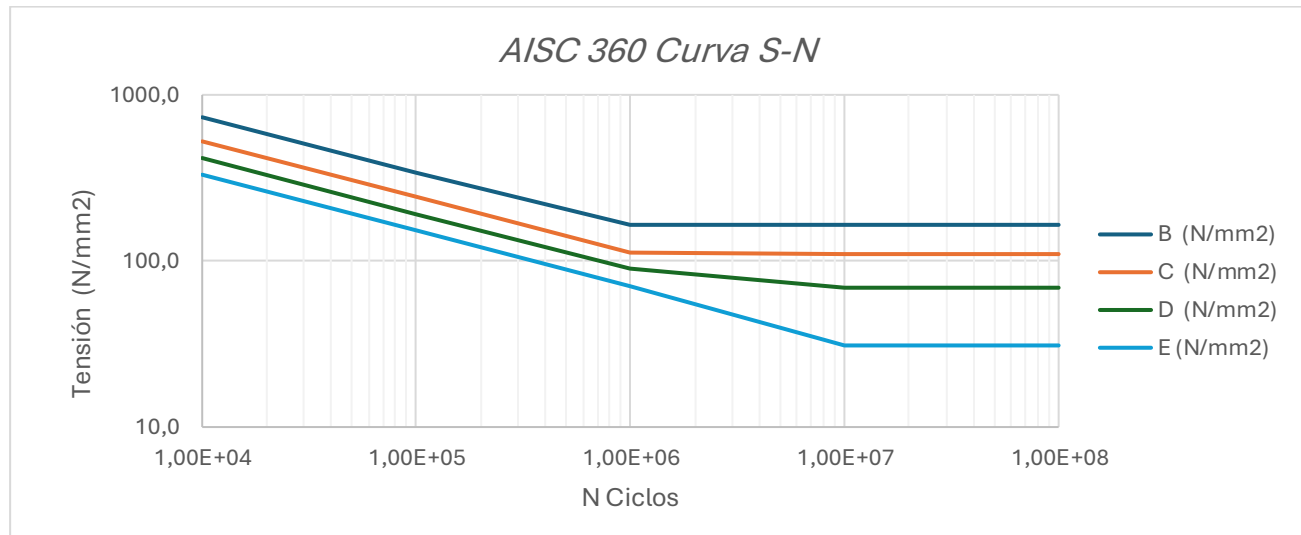


Figura 4.2 Curvas S-N Categorías B, C, D, y E.

En la Tabla 4-7 se presenta el cálculo del esfuerzo máximo admisible para cada diagonal, determinado conforme a los lineamientos establecidos por la normativa AISC360-16, considerando una vida útil de 11 años y una frecuencia de carga estimada en 14.000 ciclos por año.

Ciclos por año	14000
Años para evaluar	11
N	154000
Esfuerzo admisible (MPa)	132,88

Tabla 4-7 Rango máximo para evitar la falla AISC 360-16

En la Tabla 4-8 se muestran los resultados del esfuerzo real obtenido para cada una de las diagonales del modelo estructural. Estos valores son comparados directamente con el esfuerzo máximo admisible calculado, con el fin de verificar si cada diagonal cumple o no con los requisitos de fatiga establecidos en la normativa.

Modelo articulado	Rango de esfuerzo (MPa)	Esfuerzo admisible (MPa)	
Diag. 1	228,45	132,88	No cumple
Diag. 3	177,36	132,88	No cumple
Diag. 5	240,78	132,88	No cumple
Diag. 7	214,08	132,88	No cumple
Diag. 8	213,02	132,88	No cumple
Diag. 10	129,98	132,88	Cumple
Diag. 13	141,19	132,88	No cumple
Diag. 15	178,71	132,88	No cumple
Diag. 16	214,94	132,88	No cumple

Tabla 4-8 Resultados análisis con Normativa AISC 360-1

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis normativo, se concluye que la única diagonal que no presentaría daño por fatiga a la fecha de operación actual (154.000 ciclos acumulados) es la diagonal 10. Según los rangos de esfuerzo calculados y las curvas de la norma AISC 360-16, esta diagonal no supera el límite admisible de fatiga establecido por la Categoría E, manteniéndose dentro de los márgenes de seguridad.

Las diagonales 1 y 5 son las más críticas, con mayores rangos de esfuerzo, y la diagonal 10 la que se encuentra dentro del rango admisible, se presentan de manera separada en la Figura 4.3. Esta figura resalta la evaluación detallada de estas diagonales frente a las condiciones de fatiga establecidas en la Categoría E.

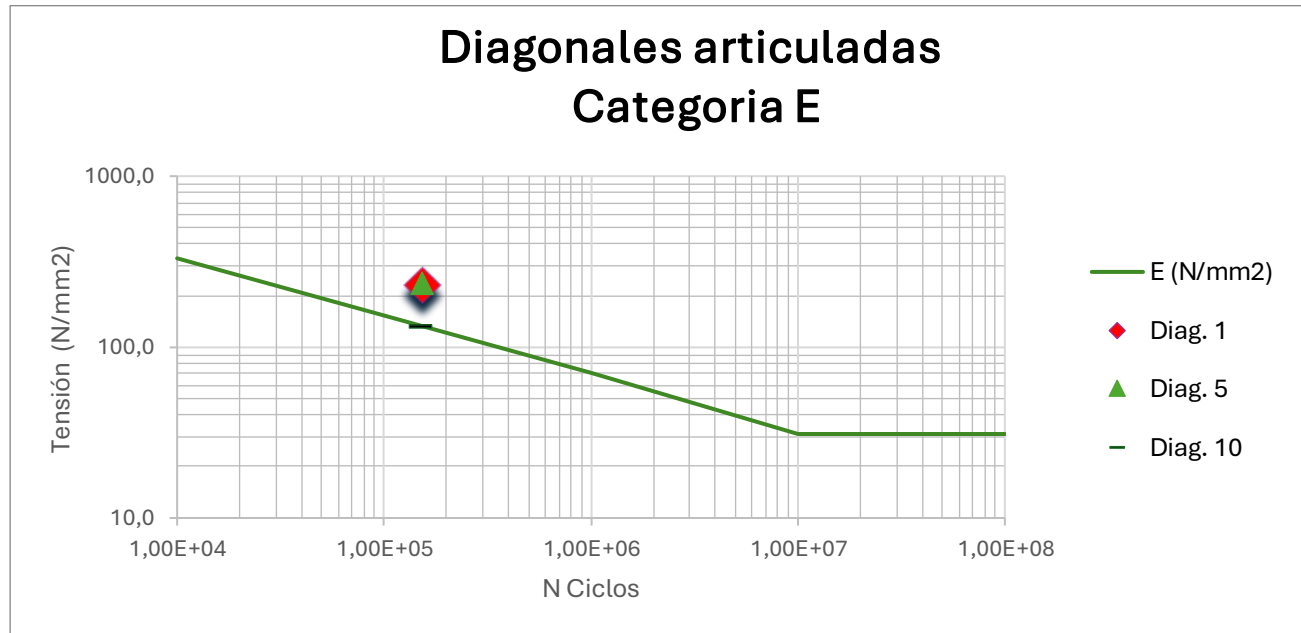


Figura 4.3 Diagonales 1, 5 y 10 comparadas con Categoría E.

Como se mencionó en el punto 4.4 las diagonales 1 y 17 experimentaron un momento mayor en el análisis del modelo empotrado, por lo tanto, también se le calculó el rango de tensiones y se aplicó la normativa correspondiente para tenerlo en consideración, vista en la Tabla 4-9:

Empotradas	Rango de esfuerzo (MPa)	Esfuerzo admisible (MPa)	
Diag. 1	272,40	132,88	No cumple
Diag. 17	269,72	132,88	No cumple

Tabla 4-9 Rango de tensiones para las diagonales 1 y 17 en el caso empotrado AISC360-16

4.7. BS7608-14

En la Figura 4.4, se presentan las curvas de fatiga correspondientes a las diferentes categorías de la norma BS7608-14. Estas curvas permiten comparar los rangos de esfuerzo calculados para cada diagonal con los valores admisibles según las categorías normativas.

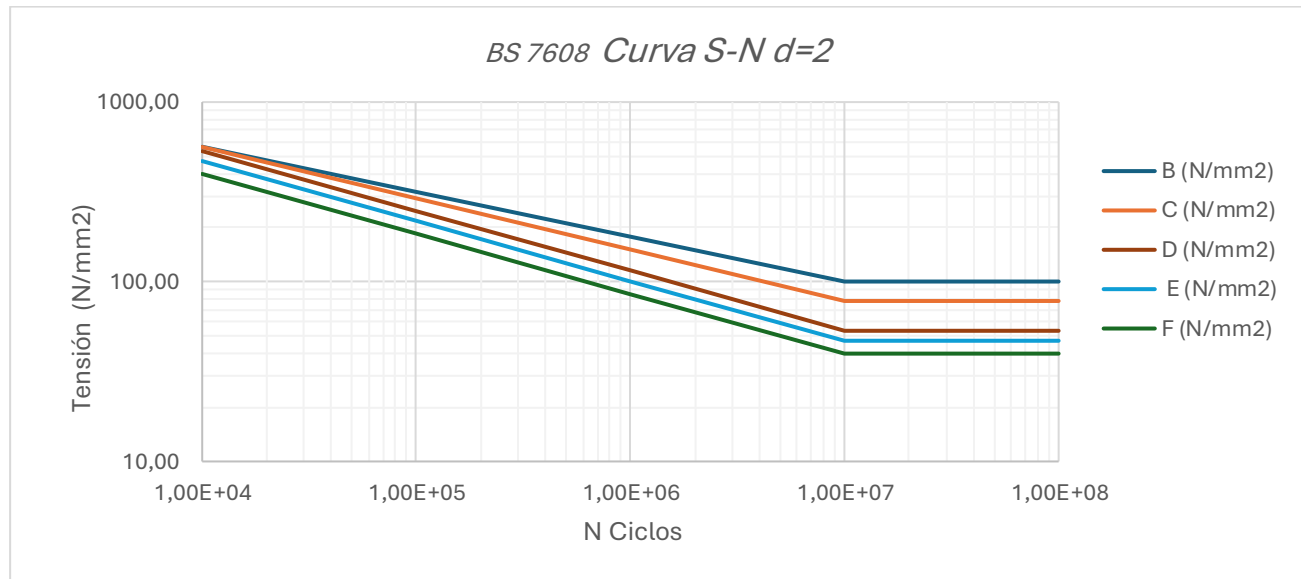


Figura 4.4 Curvas S-N Categorías B, C, D, E y F.

En la Tabla 4-10 se presenta el cálculo del esfuerzo máximo admisible para cada diagonal, determinado conforme a los lineamientos establecidos por la normativa BS7608-14, considerando una vida útil de 11 años y una frecuencia de carga estimada en 14.000 ciclos por año.

Ciclos por año	14000
Años para evaluar	11
N	154000
Esfuerzo admisible (MPa)	160,07

Tabla 4-10 Rango máximo para evitar la falla BS7608-14

En la Tabla 4-11 se muestran los resultados del esfuerzo real obtenido para cada una de las diagonales del modelo estructural. Estos valores son comparados directamente con el esfuerzo máximo admisible calculado, con el fin de verificar si cada diagonal cumple o no con los requisitos de fatiga establecidos en la normativa.

Modelo articulado	Rango de esfuerzo (MPa)	Esfuerzo admisible (MPa)	
Diag. 1	228,45	160,07	NO CUMPLE
Diag. 3	177,36	160,07	NO CUMPLE
Diag. 5	240,78	160,07	NO CUMPLE
Diag. 7	214,08	160,07	NO CUMPLE
Diag. 8	213,02	160,07	NO CUMPLE
Diag. 10	129,98	160,07	CUMPLE
Diag. 13	141,19	160,07	CUMPLE
Diag. 15	178,71	160,07	NO CUMPLE
Diag. 16	214,94	160,07	NO CUMPLE

Tabla 4-11 Resultados análisis con Normativa BS7608-14

Para el análisis de fatiga según la norma BS 7608 (2014), se adopta un enfoque probabilístico basado en curvas S-N, que relacionan el número de ciclos con el rango de esfuerzo aplicado. Se utilizó una categoría de detalle F tipo 9.1 según la normativa, correspondiente a uniones soldadas con concentración moderada de tensiones, y un parámetro de diseño $d = 2$, que implica un nivel de confiabilidad del 97,7%.

Las diagonales 1 y 5 son las más críticas, con mayores rangos de esfuerzo, y las diagonales 10 y 13 se encuentra dentro del rango admisible, se presentan de manera separada en la Figura 4.5. Esta figura resalta la evaluación detallada de estas diagonales frente a las condiciones de fatiga establecidas en la Categoría F.

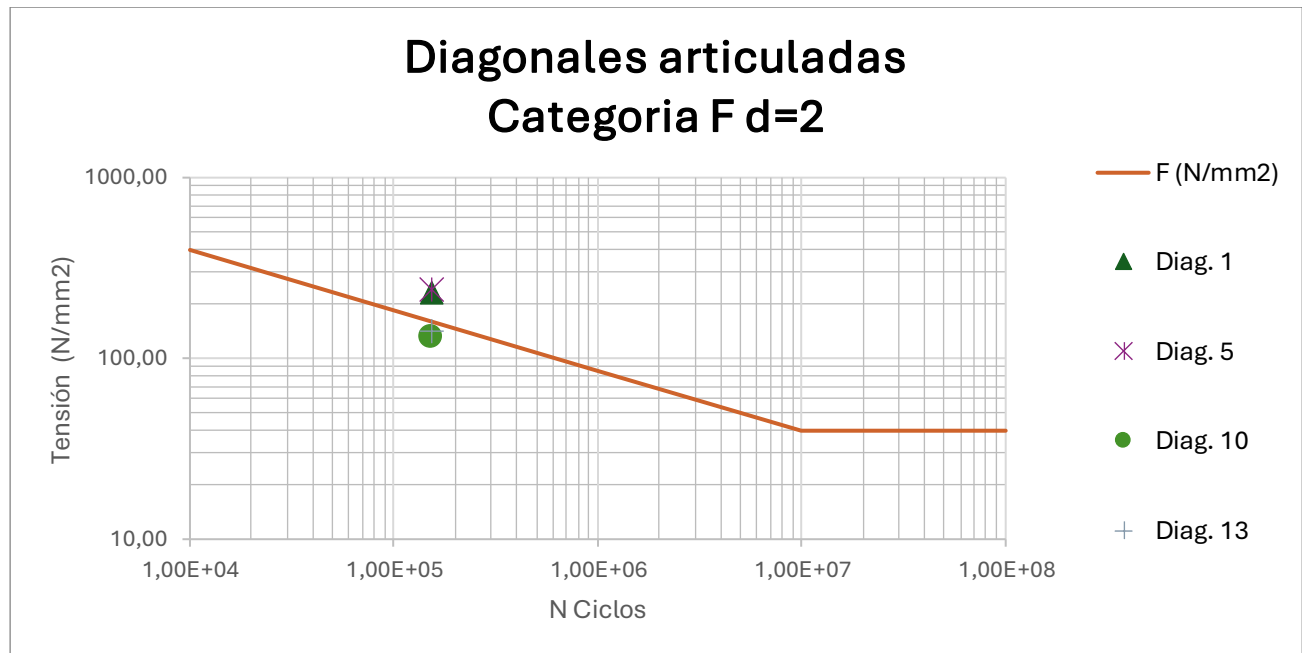


Figura 4.5 Diagonales 1, 5, 10 y 13 comparadas con Categoría F.

Como se mencionó en el punto 4.4 las diagonales 1 y 17 experimentaron un momento mayor en el análisis del modelo empotrado, por lo tanto, también se le calculó el rango de tensiones y se aplicó la normativa correspondiente para tenerlo en consideración:

Empotradas	Rango de esfuerzo (MPa)	Esfuerzo admisible (MPa)	
Diag. 1	272,40	160,07	NO CUMPLE
Diag. 17	269,72	160,07	NO CUMPLE

Tabla 4-12 Rango de tensiones para las diagonales 1 y 17 en el caso empotrado BS7608-14

4.8. Modelo en IDEA StatiCa

Otro factor relevante para la evaluación de fallas por fatiga es la presencia de puntos de concentración de esfuerzos, los cuales corresponden a regiones dentro de la estructura donde las tensiones se amplifican significativamente debido a discontinuidades geométricas, cambios abruptos de sección, uniones o detalles soldados, muescas o variaciones en el material.

En estos puntos, las tensiones locales pueden superar ampliamente las tensiones nominales, llegando incluso a exceder el límite de resistencia a la fatiga del material. Esto implica que, aunque la estructura en general opere dentro de un rango seguro de esfuerzo, estos puntos críticos pueden experimentar condiciones mucho más severas, transformándose en los principales candidatos para la iniciación de grietas por fatiga.

Dado que estas concentraciones de tensión pueden reducir drásticamente la vida útil de la estructura, se realizó un análisis detallado mediante un modelo local de elementos finitos utilizando el software IDEA StatiCa. El modelo corresponde a una conexión típica de diagonal en la zona donde se ha observado iniciación de grietas en terreno, en específico las diagonales 1 y 2, ambas con sección tubular circular CHS 291,1×12,5 mm.

Estas diagonales fueron identificadas como críticas debido a los altos rangos de esfuerzo a tracción registrados durante el análisis numérico bajo condiciones operativas simuladas, a continuación, se muestra en la Figura 4.6 el modelo realizado.

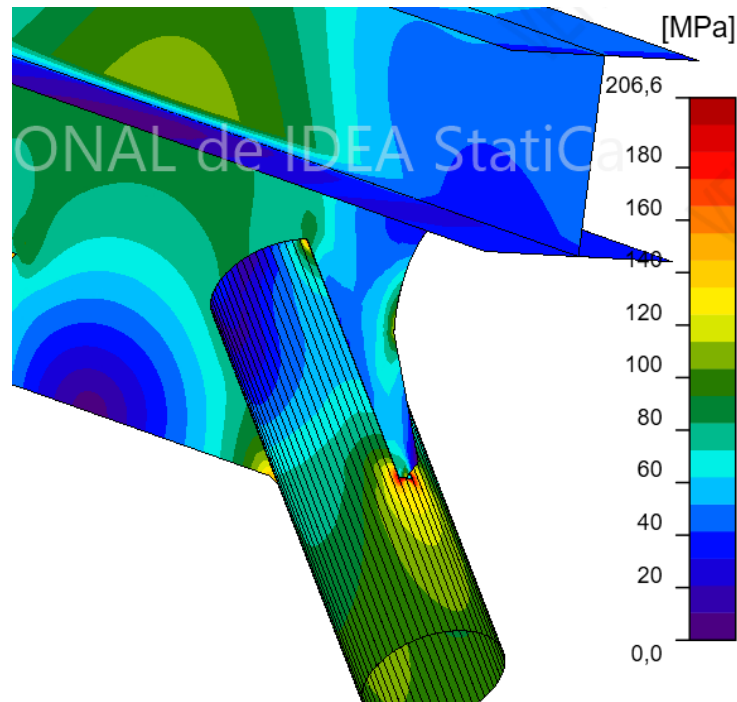


Figura 4.6 Modelo FEM

Los resultados obtenidos permiten visualizar las zonas de mayor concentración de esfuerzos, especialmente en el perímetro de la soldadura y la interfaz entre la diagonal tubular y la placa de conexión. Se identifican zonas de plastificación localizada, así como valores de tensión que podrían superar el umbral de daño por fatiga, lo cual concuerda con los patrones de fisuración observados en terreno. Estos resultados refuerzan la necesidad de considerar modificaciones geométricas, mejoras en el detalle soldado o medidas de refuerzo local como estrategias para mitigar el riesgo de fa

CAPÍTULO 5: Conclusiones

La comparación entre modelos con diagonales articuladas y empotradas mostró que las diferencias en los rangos de esfuerzo son mínimas y despreciables desde el punto de vista del análisis de fatiga. Esto permitió adoptar el modelo articulado como base para el resto del estudio, sin comprometer la precisión del análisis.

Por un lado, la AISC 360-16, a través de su Apéndice 3, permite realizar una evaluación directa del rango admisible de esfuerzo, comparando los valores obtenidos con umbrales normativos según la categoría de detalle estructural. Por otro lado, la BS 7608 entrega un enfoque más detallado desde el punto de vista probabilístico, mediante el uso de curvas S-N que relacionan el rango de esfuerzo con el número de ciclos admisibles, considerando además niveles de confiabilidad estadística.

Adicionalmente, se detectaron fisuras en diagonales que, según el modelo global, trabajan en compresión, como las diagonales 6 y 9. Este hecho evidencia que la fatiga es un fenómeno multifactorial y aleatorio, influenciado no solo por el tipo de sollicitación, sino también por factores como el detallamiento constructivo, imperfecciones geométricas locales, condiciones de operación fuera de tolerancia y desviaciones respecto al diseño original.

El modelo local desarrollado en IDEA StatiCa confirmó la presencia de altas concentraciones de esfuerzos en la zona de conexión entre la placa gusset y la diagonal tubular, especialmente cerca del detalle constructivo del agujero. Estos resultados son consistentes con los puntos de iniciación de grietas observados en las inspecciones de terreno.

En conjunto, los resultados obtenidos validan tanto el enfoque metodológico como el uso complementario de distintas normativas, y permiten generar criterios técnicos sólidos para el diseño de refuerzos, mejora de conexiones y definición de estrategias de mantenimiento en equipos sometidos a cargas cíclicas.

Referencias

Agrawal, R. (2014). Low cycle fatigue life prediction.

American Institute of Steel Construction. (2016). Specification for structural steel buildings (AISC 360-16).

Baptista, C., Borges, L., Yadav, S., & Nussbaumer, A. (s.f.). Fatigue behaviour and detailing of slotted tubular connection. ICOM – Steel Structures Laboratory, EPFL.

Bandara, C. S. (2022, octubre). Fatigue damage assessment of steel structures. The Official E-Newsletter of the Institution of Engineers Sri Lanka, 60. https://iesl.lk/SLEN/60/Fatigue_Damage_Assessment_of_Steel_Structures.php

Boyer, H. E. (Ed.). (1986). Atlas of fatigue curves. ASM International.

British Standards Institution. (2015). BS 7608:2014+A1:2015 - Guide to fatigue design and assessment of steel products.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). Materials science and engineering: An introduction (9th ed.). John Wiley & Sons.

Det Norske Veritas (DNV). (2008). DNV-RP-C203: Fatigue design of offshore steel structures.

Fisher, J. W., & Pense, A. W. (2009). On the fatigue strength of welded details. Journal of Structural Engineering, ASCE.

Guo, T., Liu, Z., Pan, S., & Pan, Z. (2015). Cracking of longitudinal diaphragms in long-span cable-stayed bridges. Journal of Bridge Engineering, 20(11), 04015011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000771](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000771)

Guo, T., Liu, Z., Liu, J., & Han, D. (2016). Diagnosis and mitigation of fatigue damage in longitudinal diaphragms of cable-stayed bridges. Journal of Bridge Engineering, 21(9), 04016046. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000946](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000946)

Haghani, R., Al-Emrani, M., & Heshmati, M. (2012). Fatigue-prone details in steel bridges. International Journal of Steel Structures, 12(4), 483–493.

- Hobbacher, A. F. (2016). Recommendations for fatigue design of welded joints and components (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23757-2>
- ISO. (1994). ISO 5049-1:1994. Mobile equipment for continuous handling of bulk materials – Part 1: Rules for the design of steel structures. International Organization for Standardization.
- Liu, Y., Dawe, J. L., & Li, L. (2006). Experimental study of gusset plate connections for tubular bracing. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(2), 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2005.04.013>
- Nicholas, T. (2006). High cycle fatigue: A mechanics of materials perspective. Elsevier.
- Nussbaumer, A., Borges, L., & Baptista, C. (2014). Fatigue of slotted tubular joints. EPFL.
- Puente Apilador de División Radomiro Tomic opera de forma automática aportando seguridad y productividad | CODELCO - Corporación Nacional del Cobre, Chile. https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20130408/pags/20130408103238.html
- Xin, Q. (2013). Diesel engine system design. Woodhead Publishing.

Anexo 1.1 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ☐ ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ☐ ODS-2 : Hambre cero.
- ☐ ODS-3 : Salud y bienestar.
- ☐ ODS-4 : Educación de calidad.
- ☐ ODS-5 : Igualdad de género.
- ☐ ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ☐ ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ☐ ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ☐ ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ☐ ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ☐ ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ☐ ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ☐ ODS-13 : Acción por el clima.
- ☐ ODS-14 : Vida Submarina.
- ☐ ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ☐ ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ☐ ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación
El presente trabajo se vincula principalmente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS-8, ODS-9 y ODS-12. A través del análisis estructural y evaluación de fatiga en conexiones críticas de un puente apilador, se contribuye a la seguridad operativa y a la eficiencia productiva de una instalación minera, promoviendo condiciones de trabajo seguras y sostenidas (ODS-8). La utilización de herramientas de modelación avanzada y el enfoque en la mejora del diseño estructural fortalecen la innovación y la infraestructura industrial (ODS-9). Finalmente, al proponer soluciones que extienden la vida útil de las estructuras, se impulsa una gestión más responsable de los recursos estructurales, alineándose con el objetivo de producción y consumo responsables (ODS-12).

Anexo 4.1

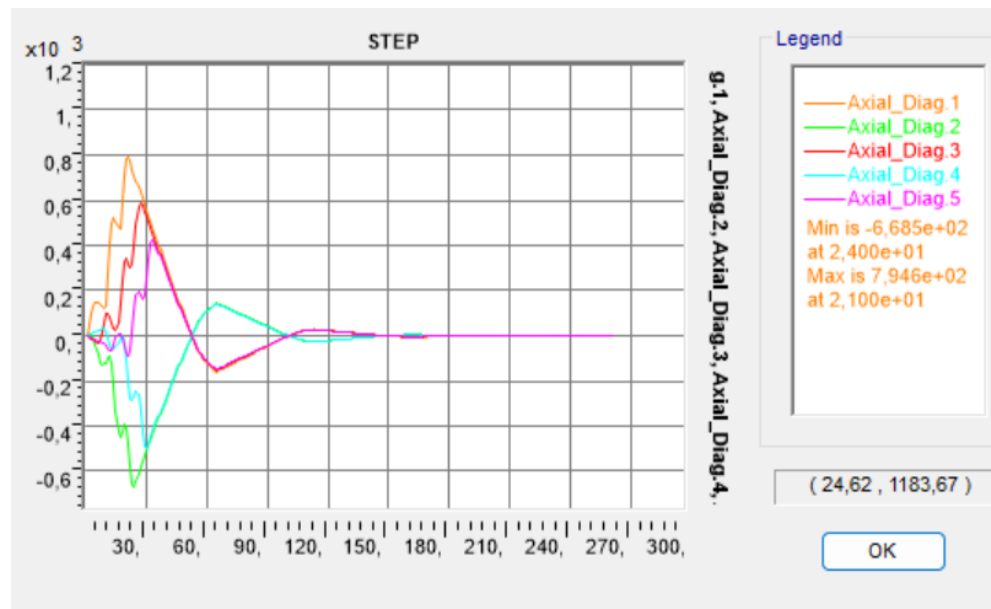


Figura A.4.1 Diagonales articuladas (1-5) Paso de tiempo v/s Carga Axial (kN)

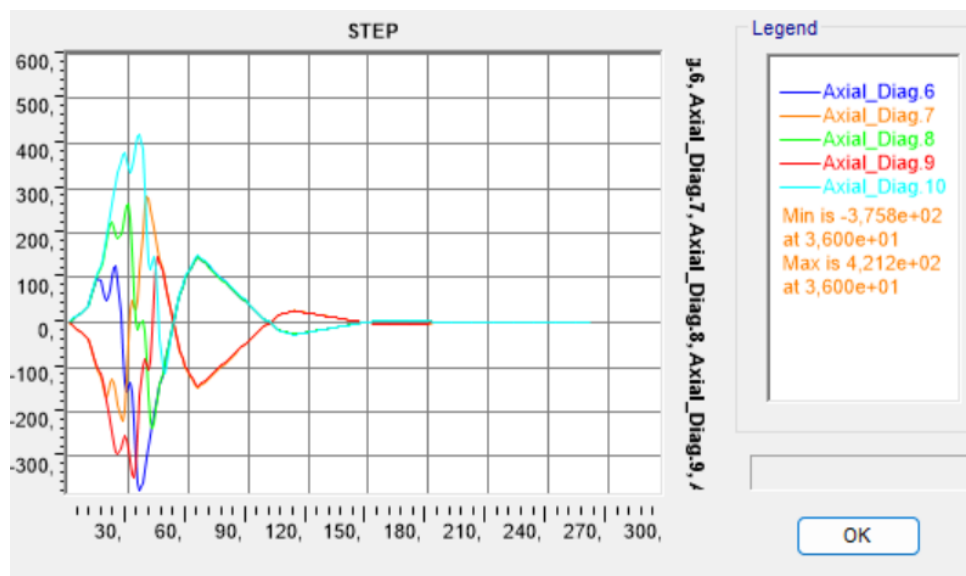


Figura A.4.2 Diagonales articuladas (6-10) Paso de tiempo v/s Carga Axial (kN)

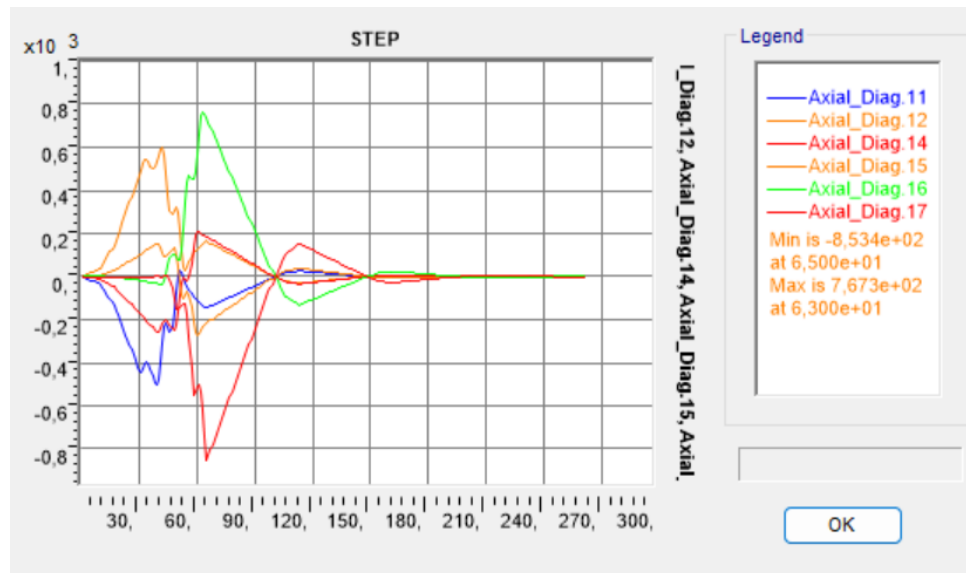


Figura A.4.3 Diagonales articuladas (11-17) Paso de tiempo v/s Carga Axial (kN)

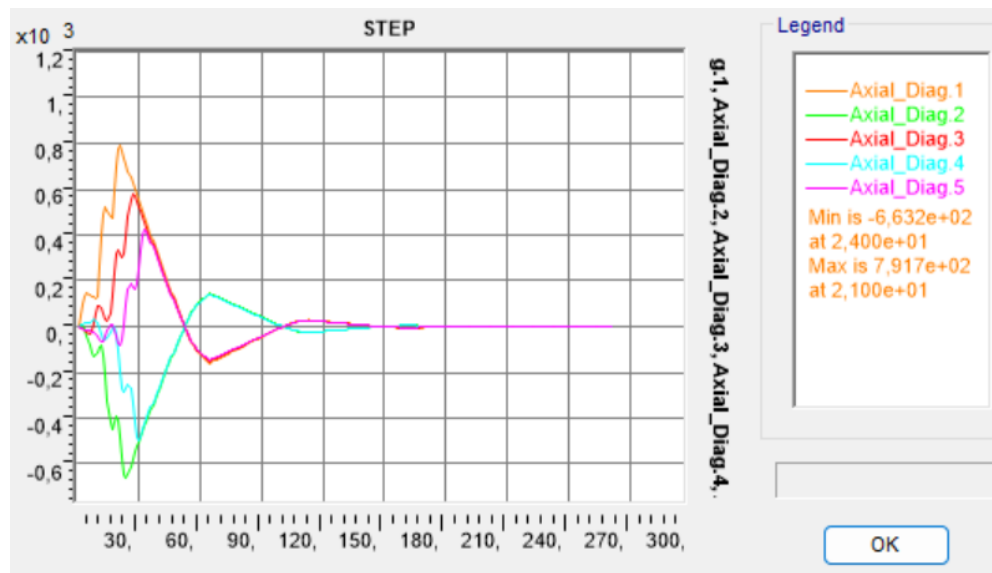


Figura A.4.4 Diagonales empotradas (1-5) Paso de tiempo v/s Carga Axial (kN).

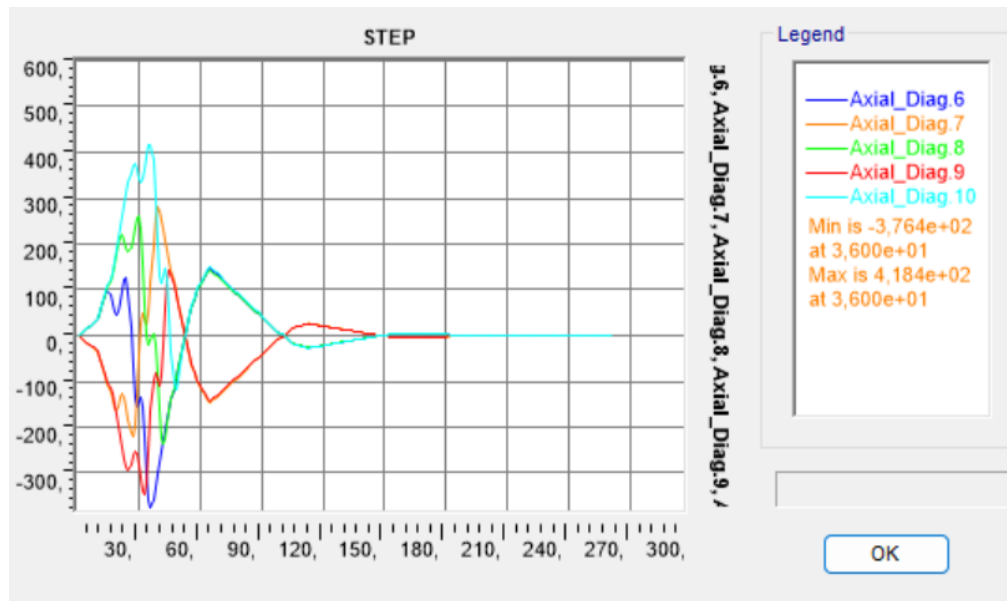


Figura A.4.5 Diagonales empotradas (6-10) Paso de tiempo v/s Carga Axial (kN)

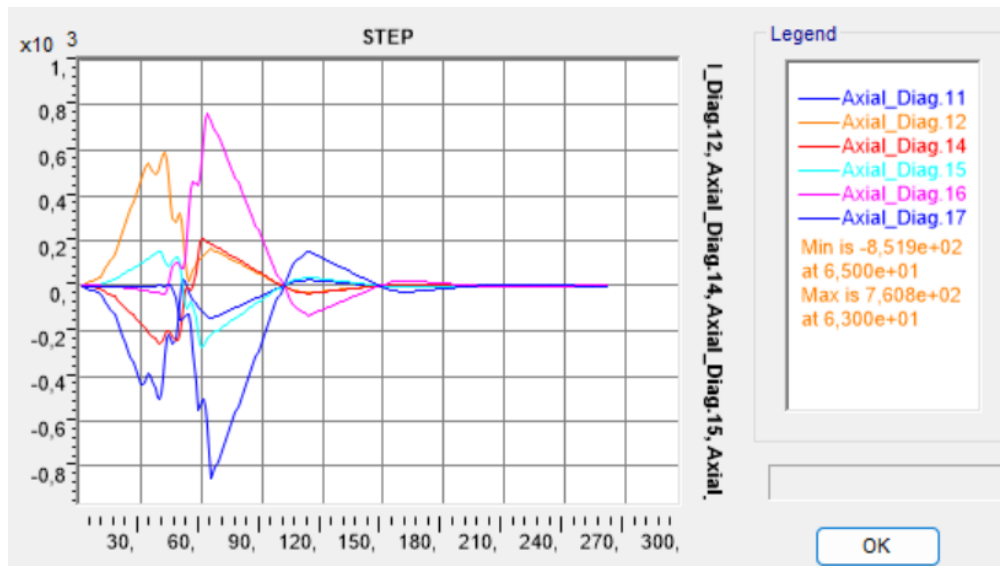


Figura A.4.6 Diagonales empotradas (11-17) Paso de tiempo v/s Carga Axial (kN)

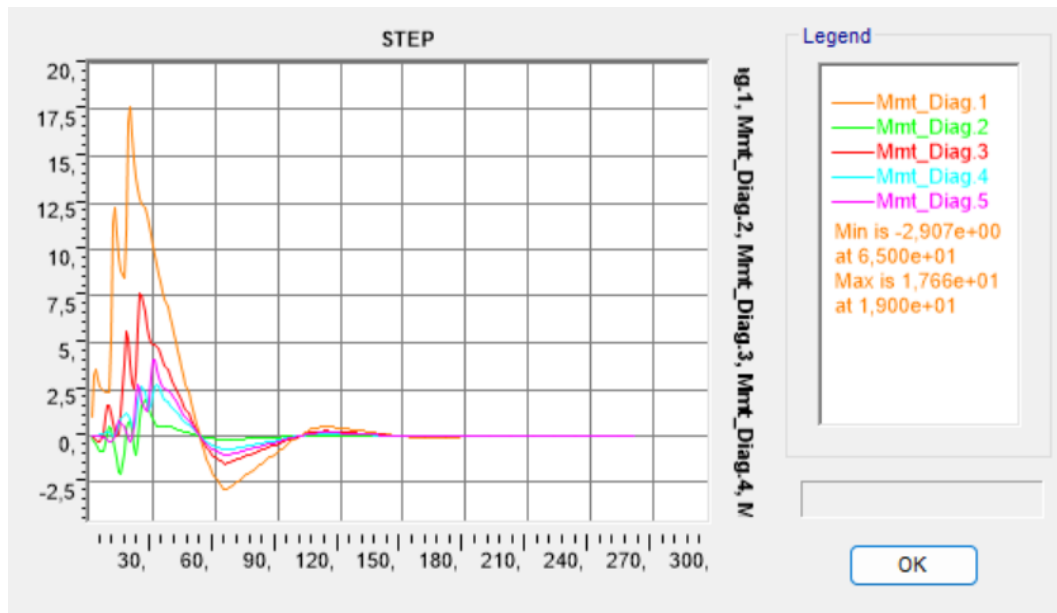


Figura A.4.7 Diagonales articuladas (1-5) Paso de tiempo v/s Momento (kN-m)

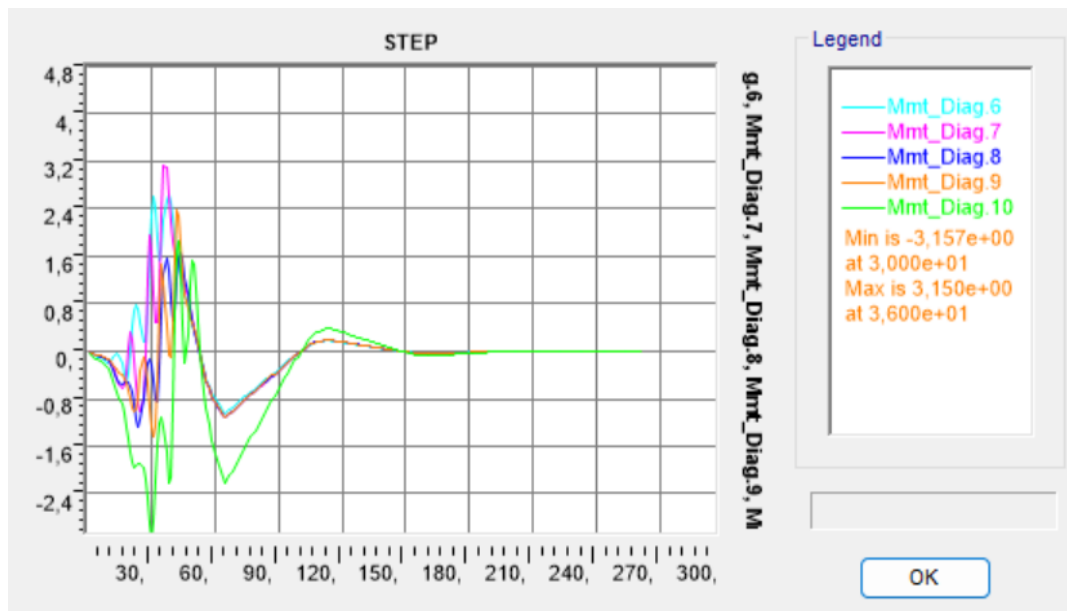


Figura A.4.8 Diagonales articuladas (6-10) Paso de tiempo v/s Momento (kN-m)

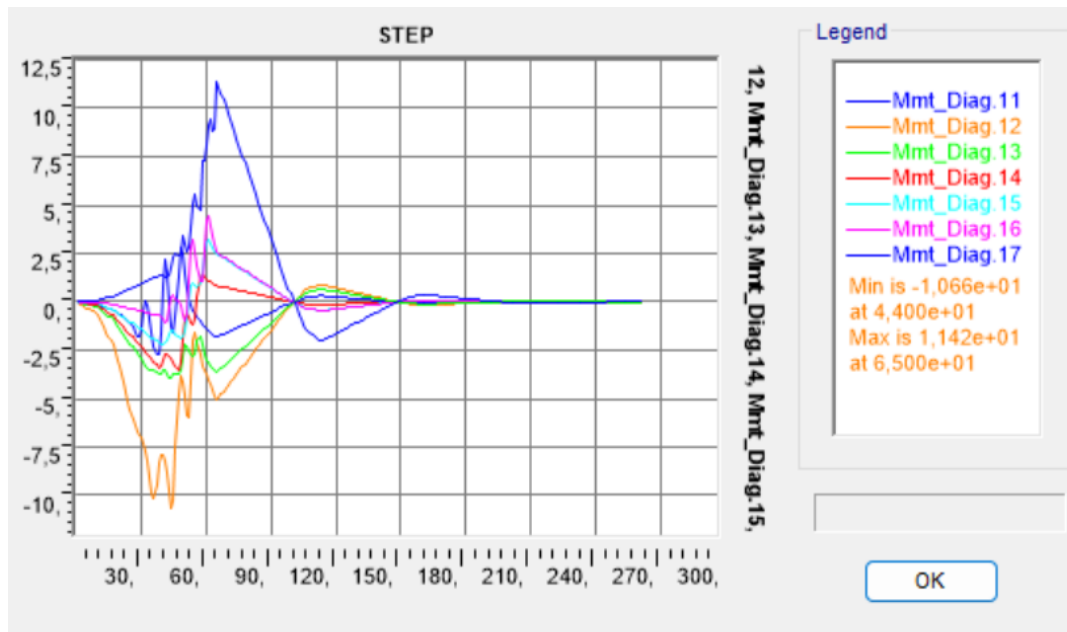


Figura A.4.9 Diagonales articuladas (11-17) Paso de tiempo v/s Momento (kN-m)

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil

Carrera : Ingeniería Civil

Nombre del memorista : Franco Oyarzo Vargas

Título de la memoria :

Fecha de la presentación oral :

Profesor(es) Guía : Rodrigo Silva

Profesor(es) Revisor(es) : Victor Aguilar

Concepto :

Calificación :

Resumen (máximo 200 palabras)

La fatiga en conexiones estructurales soldadas es una problemática crítica en estructuras sometidas a cargas cíclicas, especialmente en el ámbito industrial. Esta memoria aborda el caso de un Puente Apilador en el que se identificaron grietas en sus diagonales tubulares, motivando una evaluación detallada del comportamiento a la fatiga de sus conexiones. El objetivo principal fue analizar dichas conexiones mediante herramientas numéricas y comparar los resultados con los criterios establecidos por las normas AISC 360-16 y BS 7608.

Se desarrolló un modelo global en SAP2000 para obtener los rangos de tensiones en las conexiones, el cual sirvió como base para el análisis detallado de una conexión específica en IDEA StatiCa. Esta herramienta permitió evaluar las concentraciones de tensiones y la distribución de esfuerzos, entregando una perspectiva más precisa del riesgo de falla por fatiga. Los resultados evidencian diferencias importantes entre los enfoques normativos y el análisis por elementos finitos, mostrando el valor de una modelación detallada en el diseño de estructuras expuestas a cargas cíclicas. Finalmente, se proponen recomendaciones de refuerzo para mejorar el desempeño de la conexión afectada y se destaca la utilidad de IDEA StatiCa como complemento a los métodos tradicionales de evaluación estructural.
--

