UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO – CHILE

FATIGA EN ESTRUCTURAS METÁLICAS: EVALUACIÓN DE DAÑO EN UN PUENTE FERROVIARIO DE ACERO UBICADO EN PRAGA, REPÚBLICA CHECA

PABLO SILVA VÁSQUEZ

Memoria para optar al título de:
INGENIERO CIVIL

Profesor Guía:
RAMIRO BAZÁEZ

Co Profesor Guía:
PAVEL RYJÁČEK

Noviembre de 2018

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer profundamente al profesor Pavel Ryjáček de la Universidad Técnica Checa en Praga, por la oportunidad ofrecida para desarrollar el tema de este trabajo, su orientación y disposición para ayudar cuando fue necesario. Cabe mencionar que todos los datos experimentales e históricos utilizados en esta memoria fueron entregados por el profesor Ryjáček.

A Martín Macho, estudiante de doctorado de la Universidad Técnica Checa en Praga, quien me ayudó en las etapas iniciales del trabajo y me permitió utilizar un software desarrollado por él.

A los profesores Marcelo Bravo y Ramiro Bazáez, por permitirme trabajar en el extranjero y tomar la responsabilidad de guiar mi trabajo, respectivamente.

A mi familia, Simona y amigos,

por su gran apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

RESUMEN

El presente trabajo corresponde a un caso de estudio en el que se realiza un análisis de fatiga de un puente ferroviario de acero que se extiende entre las localidades de "*Kralupy nad Vltavou*" y "*Neratovice*", en República Checa. Para lograr esto, se elabora un modelo numérico de la estructura en tres dimensiones a través del software comercial CSiBridge.

Se utilizan distintos métodos para evaluar la estructura de acuerdo a las recomendaciones europeas. Inicialmente se utiliza un modelo de carga estandarizado y se obtiene una primera estimación a través de métodos simplificados. De acuerdo a estos resultados se planifica un monitoreo en la estructura, utilizando "*strain gauges*" que permiten validar el modelo y estimar con mayor precisión las cargas de servicio. Para esto, se utiliza una muestra de los trenes reales que circulan durante el monitoreo y se introducen en el modelo estructural.

A partir de las historias tiempo de deformaciones, se obtienen espectros de carga utilizando el método de conteo "*rainflow*", los que son utilizados para estimar la vida o límite a fatiga mediante la teoría lineal de acumulación de daño. Basado en estos resultados se establece una estimación de la vida remanente de la estructura y se plantean algunas recomendaciones.

Palabras clave: Evaluación a la fatiga, Puente ferroviario de acero, Modelo estructural, Monitoreo de la estructura, Espectro de carga, Teoría lineal de acumulación de daño.

ABSTRACT

The following thesis concerns a case study in which the fatigue assessment of a steel railway bridge is performed, located between the towns of "*Kralupy nad Vltavou*" and "*Neratovice*", Czech Republic. To accomplish that, a three-dimension numerical model is developed using the commercial software CSiBridge.

Different methods are used to assess the structure according to European recommendations. Initially, an oversized load model is used and a first estimation of the fatigue risk is calculated through simplified methods. In accordance with these results, a monitoring program of the structure is planned, using strain gauges that allow a validation of the model and a precise estimation of the service loads. For this, a sample of the real trains crossing the bridge during the monitoring is used as input in the numerical model.

Using the strain time histories, stress spectra are obtained using the rainflow method, which are used to estimate the fatigue life through the linear cumulative damage theory. Based on these results an estimation of the remaining fatigue life of the structure is established and some recommendations are advised.

Keywords: Fatigue assessment, Steel railway bridge, Structural model, Structure monitoring, Stress spectrum, Linear cumulative damage theory.

CONTENIDO

1 Introducción ... 1
1.1 Antecedentes ... 1
1.2 Objetivos ... 2
1.3 Alcance ... 2
1.4 Metodología de Trabajo ... 3
1.5 Estructura de la memoria ... 4
2 Revisión de la Literatura ... 6
2.1 Conformación del acero ... 6
2.2 Descripción del fenómeno ... 6
2.2.1 General ... 6
2.2.2 Iniciación de grietas ... 7
2.2.3 Propagación de grietas ... 9
2.3 Vida de fatiga ... 11
2.3.1 Curvas S-N ... 11
2.3.2 Parámetros que influyen en la vida de fatiga ... 12
2.4 Ciclos de amplitud variable ... 15
2.4.1 Espectro de cargas ... 15
2.4.2 Conteo de ciclos de amplitud variable ... 16
2.5 Predicciones de daño de fatiga ... 18
2.6 Evaluación de Fatiga en puentes de acero existentes ... 20
2.6.1 Evaluación preliminar ... 20
2.6.2 Investigación detallada ... 21
2.6.3 Panel de expertos ... 21
2.6.4 Medidas de solución ... 22
2.7 Métodos de cálculo ... 22
2.7.1 Método 1: Evaluación Preliminar (según Eurocódigo) ... 22
2.7.2 Método 2: Evaluación Detallada (Acumulación de daño) ... 25
2.8 Comparación con norma chilena ... 27
3 Descripción del Puente ... 28
3.1 Descripción General ... 28
3.2 Descripción de estructura ... 30
3.2.1 Arco ... 31
3.2.2 Vigas Longitudinales Principales ... 32

3.2.3 Vigas Transversales ... 33
3.2.4 Vigas Longitudinales Secundarias ... 33
3.2.5 Arriostramientos de Plataforma ... 34
3.2.6 Durmientes ... 34
3.2.7 Losas de Hormigón ... 34
3.3 Detalles Estructurales ... 34
4 Modelo Numérico ... 38
4.1 Modelo Global de la estructura ... 38
4.2 Modelos Detallados ... 39
4.2.1 Losas de Hormigón ... 40
4.2.2 Sección Viga Principal ... 40
4.3 Aplicación de las cargas ... 41
4.4 Cargas que actúan sobre la estructura ... 42
4.4.1 Cargas Permanentes ... 42
4.4.2 Cargas del Tren ... 43
4.4.3 Cargas de Viento ... 45
4.5 Combinaciones ... 51
5 Método 1: Investigación Preliminar ... 54
5.1 Cálculos Previos ... 54
5.2 Evaluación a la Fatiga ... 57
6 Monitoreo de la Estructura ... 59
6.1 Campaña de Monitoreo ... 60
6.2 Validación del Modelo Numérico ... 62
7 Carga de Tráfico de Trenes ... 68
7.1 Fuentes utilizadas ... 68
7.2 Carga histórica ... 68
7.2.1 Período 2005-2015 ... 68
7.2.2 Período 1960-2003 ... 68
7.3 Carga actual ... 69
7.3.1 Selección de Trenes ... 69
8 Método 2: Investigación Detallada ... 72
8.1 Análisis Estructural ... 72
8.2 Espectros de Carga ... 75
8.3 Acumulación de Daño ... 79

8.3.1 Análisis de Sensibilidad 81
9 Conclusiones 88
Referencias 91
Anexo A Secciones Transversales del Puente 94
Anexo B Disposición de "*Strain Gauges*" 95
Anexo C Resultados Validación 97
Anexo D Carga de tráfico y listado de Trenes 103
Anexo E Historias Tiempo 107
Anexo F Resultados Evaluación a la Fatiga 119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Resultados de conteo de ciclos utilizando el método "rainflow" (ver Figura 2-10) 17
Tabla 2-2 Valor λ_1 para tráfico ferroviario con ejes de 25 Ton..... 24
Tabla 2-3 Valores para λ_2..... 24
Tabla 2-4 Valores para λ_3..... 24
Tabla 2-5 Valores para λ_4..... 24
Tabla 3-1 Categoría de detalles estructurales..... 37
Tabla 4-1 Peso de la estructura 42
Tabla 4-2 Cálculo peso propio superestructura del ferrocarril..... 43
Tabla 4-3 Cálculo de coeficientes dinámicos..... 44
Tabla 4-4 Cargas de tracción y frenado..... 44
Tabla 4-5 Cálculo de carga centrífuga 45
Tabla 4-6 Resultados cálculos presión dinámica “peak” 47
Tabla 4-7 Cargas de viento en tablero..... 50
Tabla 4-8 Cargas de viento en arco..... 50
Tabla 4-9 Cargas de viento y tren en tablero..... 50
Tabla 4-10 Grupos de carga para tráfico ferroviario..... 51
Tabla 4-11 Valores de factores parciales, de reducción y coeficientes dinámicos..... 51
Tabla 4-12 Valores de factores de combinación de acciones variables 52
Tabla 4-13 Combinaciones vigas principales..... 52
Tabla 4-14 Combinaciones vigas transversales..... 52
Tabla 4-15 Combinaciones vigas transversales esviadas 53
Tabla 5-1 Resultados de esfuerzos máximos y mínimos 57
Tabla 5-2 Resumen evaluación preliminar a la fatiga..... 58
Tabla 6-1 Comparación entre los esfuerzos normales (MPa) máximos y mínimos obtenidos a través de la respuesta medida en terreno (deformaciones) y respuesta estimada por modelo numérico 1 (sin calibrar) 64
Tabla 6-2 Comparación entre los esfuerzos normales (MPa) máximos y mínimos obtenidos a través de la respuesta medida en terreno (deformaciones) y respuesta estimada por modelo numérico 2 (calibrado) 64
Tabla 6-3 Resultados validación modelo numérico 1 66
Tabla 6-4 Resultados validación modelo numérico 2 67
Tabla 8-1 Resultados Acumulación de Daño..... 79

Tabla 8-2 Resultados vigas principales 80
Tabla 8-3 Resultados vigas transversales 80
Tabla 8-4 Resumen vida útil 81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Modelo de una grieta de borde para análisis de fatiga [14]. 7
Figura 2-2 Iniciación de microgrietas en banda de deslizamiento [15]..... 7
Figura 2-3 Mecanismo de deslizamientos cíclicos [16] 8
Figura 2-4 Patrón de estrías en superficie de rotura [16] 9
Figura 2-5 Comportamiento de propagación de grietas [14] 10
Figura 2-6 Resultados de ensayos de fatiga y su curva S-N [13]..... 11
Figura 2-7 Secuencias de cargas con distintos resultados [20] 13
Figura 2-8 Efecto de los esfuerzos residuales [13]..... 14
Figura 2-9 Ejemplo de espectro de cargas [13]..... 15
Figura 2-10 Conteo de ciclos de amplitud variable según método "rainflow". Fuente: Wikimedia Commons. 16
Figura 2-11 Problema típico del conteo de ciclos [16] 17
Figura 2-12 Comparación de modelos de predicción de daño [15, 26]..... 19
Figura 2-13 Modelo de carga LM71 [37]..... 23
Figura 2-14 Curvas de resistencia a la fatiga para distintas categorías de detalle [3] 26
Figura 3-1 Ubicación del Puente. Fuente: en.mapy.cz..... 28
Figura 3-2 Vista lateral del puente. 28
Figura 3-3 Disposición de la estructura. (Nota: unidades en mm.) 29
Figura 3-4 Vista en planta de la grilla (mitad del puente). 30
Figura 3-5 Sección transversal común del puente. (Nota: unidades en mm.) 31
Figura 3-6 Sección transversal de un lugar donde se ubica el arco. (Nota: unidades en mm.) 31
Figura 3-7 Sección transversal del puente en sector de conexión viga del arco y viga principal. (Nota: unidades en mm.) 32
Figura 3-8 Apoyos de la estructura 33
Figura 3-9 Soldadura transversal en viga principal..... 35
Figura 3-10 Refuerzos transversales de vigas principales..... 35
Figura 3-11 Atiesadores de vigas transversales 35
Figura 3-12 Placa de unión en vigas principales..... 36
Figura 3-13 Placa de unión en vigas transversales..... 36
Figura 3-14 Conexión remachada entre viga transversal y viga principal 36
Figura 4-1 Vista isométrica del modelo numérico 38
Figura 4-2 Elementos que componen el modelo estructural 39

Figura 4-3 Transición utilizada en una malla de elementos finitos [42] 40
Figura 4-4 Modelo de las losas con elementos finitos bidimensionales 40
Figura 4-5 Modelo con elementos bidimensionales de la sección que exhibe interacción entre vigas principales y arco 41
Figura 4-6 Dirección en que actúa el viento y notación dimensiones del tablero [43] 45
Figura 4-7 Coeficiente de fuerza para puentes [43] 48
Figura 4-8 Coeficiente de fuerza para secciones rectangulares con esquinas pronunciadas [43] 49
Figura 4-9 Notación secciones con esquinas pronunciadas [43] 50
Figura 5-1 Diagrama de Momento en vigas principales debido a cargas permanentes 54
Figura 5-2 Diagrama de Fuerza de Corte en vigas principales debido a cargas permanentes 54
Figura 5-3 Diagrama de Fuerza Axial en vigas principales y arco debido a cargas permanentes 55
Figura 5-4 Envolvente de Momento en vigas principales 55
Figura 5-5 Envolvente de Fuerza de Corte en vigas principales 55
Figura 5-6 Envolvente de Fuerza Axial en vigas principales 55
Figura 5-7 Envolvente de Momento en vigas transversales 56
Figura 5-8 Envolvente de Corte en vigas transversales 56
Figura 5-9 Envolvente Fuerza Axial en vigas transversales 56
Figura 6-1 Esquema de algoritmo para calibración del modelo 59
Figura 6-2 (a) “Strain Gauge” soldada en refuerzo transversal; (b) acelerómetro uniaxial en ala superior de viga principal 60
Figura 6-3 Disposición dispositivos de monitoreo 61
Figura 6-4 Locomotora TRAXX F140 MS 62
Figura 6-5 Definición de la carga de la locomotora (en mm y kN) 63
Figura 6-6 Comparación entre esfuerzos obtenidos a través de la respuesta medida en terreno (deformaciones) y estimación del modelo numérico de una de las vigas principales (SG11) 64
Figura 6-7 Error Absoluto entre esfuerzos obtenidos a través de la respuesta medida en terreno (deformaciones) y estimación del modelo numérico de una de las vigas principales (SG11) 64
Figura 6-8 Comparación entre esfuerzos obtenidos a través de la respuesta medida en terreno (deformaciones) y estimación del modelo numérico de una de las vigas transversales (SG71) 65
Figura 6-9 Error Absoluto entre esfuerzos obtenidos a través de la respuesta medida en terreno (deformaciones) y estimación del modelo numérico para una de las vigas transversales (SG71) 65
Figura 6-10 Comparación entre esfuerzos obtenidos a través de la respuesta medida en terreno (deformaciones) y estimación del modelo numérico del refuerzo del lado interior (SG63) 65

Figura 6-11 Error Absoluto entre esfuerzos obtenidos a través de la respuesta medida en terreno (deformaciones) y estimación del modelo numérico para el refuerzo transversal del lado interior de una viga principal (SG63) 66
Figura 7-1 Evolución del volumen de tráfico (anual) en el puente 69
Figura 7-2 Correlación entre N° de ejes con N° de vagones 70
Figura 7-3 Correlación entre N° de ejes con largo del tren y peso total de los vagones 70
Figura 7-4 Histograma Bivariado de trenes 71
Figura 7-5 Tipo de tren que circula por el puente 71
Figura 8-1 Esfuerzos verticales debido a cargas permanentes en el refuerzo transversal. (Nota: valores en MPa). 72
Figura 8-2 Esfuerzos verticales en refuerzo debido a la carga del tren. (Nota: valores en MPa)..... 73
Figura 8-3 Modelo simplificado de la sección transversal del refuerzo. (Nota: Valores en MPa).... 74
Figura 8-4 Ubicación de la grieta en el refuerzo transversal 74
Figura 8-5 Historia tiempo de esfuerzos medidos en viga principal (SG11) 75
Figura 8-6 Historia tiempo de esfuerzos medidos en viga transversal (SG74) 76
Figura 8-7 Historia tiempo de esfuerzos medidos en viga transversal esviada (SG92) 76
Figura 8-8 Espectro de demanda de carga en viga principal (SG11) para el año 2017..... 77
Figura 8-9 Espectro de demanda de carga en viga transversal (SG74) para el año 2017 77
Figura 8-10 Espectro de demanda de carga en viga transversal esviada (SG92) para el año 2017... 78
Figura 8-11 Espectro de demanda de carga en refuerzo de viga principal para el año 2017 78
Figura 8-12 Acumulación de daño por fatiga - vigas principales (SG11)..... 79
Figura 8-13 Acumulación de daño por fatiga - vigas transversales (SG74)..... 80
Figura 8-14 Acumulación de daño por fatiga - refuerzo viga principal 80
Figura 8-15 Acumulación de daño vigas principales (SG11) para distintos factores de seguridad γ_{Mf} 82
Figura 8-16 Acumulación de daño vigas transversales (SG74) para distintos factores de seguridad γ_{Mf} 82
Figura 8-17 Acumulación de daños viga transversal esviada (SG92) para distintos factores de seguridad γ_{Mf} 83
Figura 8-18 Acumulación de daño refuerzo transversal para distintos factores de seguridad γ_{Mf} 83
Figura 8-19 Daño total para distintos valores del factor de seguridad γ_{Mf} (SG11) 83
Figura 8-20 Daño total para distintos valores del factor de seguridad γ_{Mf} (SG74)..... 84
Figura 8-21 Daño total para distintos valores del factor de seguridad γ_{Mf} (SG92) 84
Figura 8-22 Daño total para distintos valores del factor de seguridad γMf (refuerzo transversal) ... 84

Figura 8-23 Acumulación de daño vigas principales (SG11) para distintas categorías de detalle $\Delta\sigma_C$ 85
Figura 8-24 Acumulación de daño vigas transversales (SG74) para distintas categorías de detalle $\Delta\sigma_C$ 85
Figura 8-25 Acumulación de daño vigas transversal esviada (SG92) para distintas categorías de detalle $\Delta\sigma_C$ 86
Figura 8-26 Acumulación de daño refuerzo transversal para distintas categorías de detalle $\Delta\sigma_C$ 86
Figura 8-27 Daño total para distintos valores de categorías de detalle $\Delta\sigma_C$ (SG11) 86
Figura 8-28 Daño total para distintos valores de categorías de detalle $\Delta\sigma_C$ (SG74) 87
Figura 8-29 Daño total para distintos valores de categorías de detalle $\Delta\sigma_C$ (SG92) 87
Figura 8-30 Daño total para distintos valores de categorías de detalle $\Delta\sigma_C$ (refuerzo transversal)... 87

GLOSARIO

Letras en mayúscula

A_{ref}	Área de referencia
C	Constante de calibración
C_v	Factor de carga de viento
D	Factor de daño acumulado por fatiga
E	Módulo de Elasticidad
F_w	Fuerza de viento
$G_{k,j}$	Valor característico de una acción permanente *j*
K	Factor de intensidad de esfuerzos
L	Longitud (general)
L_f	Largo de influencia de la parte cargada de la curva
L_φ	Largo determinante del elemento estructural
N_i	Número de ciclos de un rango de esfuerzo de amplitud constante $\Delta\sigma_i$ que producen la falla de un ejemplar
N	Número de ciclos aplicado
P_i	"*Peak*" i de una historia tiempo de carga
$Q_{k,1}$	Valor característico de la acción variable principal *1*
$Q_{k,i}$	Valor característico de la acción variable principal *i*
Q_{sk}	Valor característico de "*nosing force*" en el puente
Q_{vi}	Valor característico de fuerzas verticales puntuales del modelo LM71
V	Velocidad máxima admisible en la vía férrea
Y	Constante adimensional dependiente de la geometría del componente estructural

Letras en minúscula

a	Longitud de la grieta
a_x	Distancia axial promedio
c_{dir}	Factor direccional
c_e	Factor de exposición
$c_{f,0}$	Coeficiente de fuerza para secciones rectangulares con esquinas pronunciadas
$c_{f,x}$	Coeficiente de fuerza
$c_{fx,0}$	Coeficiente de fuerza sin flujo en extremos libres

c_o	Factor de orografía
c_r	Factor de rugosidad
c_{season}	Factor de estación
d	Distancia entre vigas secundarias
d_{tot}	Profundidad del tablero
f	Factor de reducción de fuerza centrífuga
g	Aceleración de gravedad
g_k	Carga permanente distribuida linealmente
h	Altura de la fuerza centrífuga
I_v	Intensidad de turbulencia
k	Constante de rigidez
k_I	Factor de turbulencia
k_r	Factor de terreno
l	Longitud (general)
m	Constante de calibración
n_i	Número de ciclos aplicados de un rango de esfuerzo de amplitud constante $\Delta\sigma_i$
q_b	Presión dinámica básica
q_{lk}	Magnitud característica de cargas longitudinales en el puente
q_p	Valor "*peak*" de la presión dinámica
q_{tk}	Valor característico de fuerza centrífuga distribuida linealmente
$q_{tk,v}$	Valor de carga distribuida vertical debido a fuerza centrífuga
q_{vk}	Valor característico de la carga vertical uniformemente distribuida del modelo LM71
q_y	Carga de viento aplicada en dirección y
q_{y1}	Carga de tren y viento aplicada en vigas principales
q_{y2}	Carga de tren y viento aplicada en vigas secundarias
q_{z2}	Carga de tren y viento aplicada en vigas secundaria en dirección vertical z
r	Radio de curvatura de la vía férrea
v_b	Velocidad básica del viento
$v_{b,0}$	Valor fundamental de la velocidad básica del viento
v_m	Velocidad media del viento
w_e	Presión externa del viento
z_0	Longitud de rugosidad

z_e	Altura de referencia para las acciones de viento
z_{min}	Altura mínima
z_{max}	Altura máxima

Letras griegas

γ_{Ff}	Factor parcial para la carga de fatiga
$\gamma_{G,j}$	Factor parcial para la acción permanente *j*
$\gamma_{Q,i}$	Factor parcial para la acción variable *i*
γ_{Mf}	Factor parcial para la resistencia a la fatiga
ΔK	Factor de intensidad de esfuerzos
$\Delta\sigma$	Rango de esfuerzo de amplitud constante
$\Delta\sigma_c$	Valor de referencia de la resistencia a la fatiga bajo $2x10^6$ ciclos
$\Delta\sigma_P$	Rango de esfuerzo de referencia
Φ_2	Factor dinámico para vías cuidadosamente mantenida
Φ_3	Factor dinámico para vías de mantención estándar
λ	Factor equivalente de daño
λ_1	Factor por efecto de daño debido al tráfico
λ_2	Factor por volumen de tráfico
λ_3	Factor por la vida útil de diseño del puente
λ_4	Factor por el elemento estructural cargado por más de una pista
λ_e	Esbeltez efectiva
μ_{fat}	Nivel de seguridad para la fatiga
ρ_a	Densidad del aire
ρ	Peso específico del material
ξ_j	Factor de reducción para la acción *j*
σ	Esfuerzo actuante
$\sigma_{P,max}$	Esfuerzo máximo de referencia
$\sigma_{P,min}$	Esfuerzo mínimo de referencia
σ_v	Desviación estándar de la turbulencia
$\psi_{0,i}$	Factor para combinación de la acción variable *i*
ψ_r	Factor de reducción para secciones cuadradas con esquinas redondeadas
ψ_λ	Factor para elementos con flujo de extremo libre

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Uno de los medios de transporte históricamente más usados en Europa es el ferrocarril, el cual es utilizado tanto para el transporte de pasajeros como de mercancías. El tráfico de ferrocarriles aumentó considerablemente en la red europea durante las últimas décadas [1], llevando consigo un aumento en el número y tamaño de estos vehículos. Este incremento puede afectar la seguridad, serviciabilidad y durabilidad de la estructura.

Durante los siglos XIX y XX un gran número de puentes de acero fue construido en Europa. Actualmente, dichas estructuras se encuentran cerca de cumplir su vida útil de funcionamiento, la cual no se estimaba cuando fueron construidas. Debido a esto, y adicionalmente al aumento del volumen de tráfico vehicular, es recomendable una evaluación profunda de las estructuras, para evaluar la condición de desempeño actual, incluso aunque no haya indicios de deterioro por fatiga.

Asimismo, Chile no se encuentra ajeno a esta realidad, donde se pueden encontrar puentes con bastantes años de servicio y que requieren ser evaluados a la fatiga. Un ejemplo de esto corresponde al accidente ocurrido en agosto de 2016 en la comuna de Pitrufquén, Región de la Araucanía, donde un tren de carga cayó al río Toltén debido al colapso de un puente ferroviario de acero, donde se presume que una de las causas fue la fatiga del material.

En este trabajo se evalúa el puente que une las localidades de "*Kralupy nad Vltavou*" y "*Neratovice*" ubicado en la República Checa, el cual fue construido en el año 1960 y corresponde a una vía que permite transportar productos asfálticos y derivados del petróleo producidos en el primer pueblo. Actualmente se estima que el volumen de tráfico que circula por el puente es un poco más de 6 millones de toneladas al año, de los cuales su mayor parte (~95%) corresponden a trenes pesados.

El sistema estructural corresponde a un puente ferroviario de acero que se extiende a través de tres vanos y con una superestructura en forma de arco en el vano central. Cabe señalar que durante inspecciones visuales preliminares en el puente en estudio, se apreciaron grietas en las soldaduras que unen el refuerzo transversal de las vigas principales con el ala inferior de la misma, en el sector donde el arco se une con dichos elementos, y que además corresponde a la proximidad de los apoyos, lo cual es un indicio claro de acumulación de daño en la estructura.

1.2 Objetivos

El objetivo de este trabajo es evaluar la condición actual de un puente ferroviario de acero y determinar el nivel de daño por fatiga producto de cargas cíclicas que actúan sobre sus elementos principales. Además, se intentará explicar la presencia de grietas que se han observado en inspecciones preliminares. Para esto, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Elaborar un modelo numérico que permita estimar el comportamiento de la estructura existente.
- Comparar los resultados experimentales con la respuesta predicha por un modelo numérico.
- Determinar el nivel de daño en elementos importantes de la estructura.
- Explicar la razón de la presencia de grietas en la soldadura del refuerzo principal de una de las vigas principales del puente.
- Presentar una metodología para la evaluación de puentes de acero cuya vida útil esté próxima a cumplirse, o que manifiesten signos de deterioro debido a la fatiga.

1.3 Alcance

Este trabajo estudia el nivel de daño a la fatiga en detalles estructurales de un puente ferroviario existente y muestra el procedimiento para utilizar la expresión lineal de acumulación de daño de Palmgren-Miner [2].

La creación del modelo numérico se desarrolla mediante el software CSiBridge 2017, basado en valores nominales señalados en los planos de fabricación (no considera defectos de instalación o de materiales) y validado a través de mediciones en terreno. El efecto dinámico de las cargas de tráfico se considera indirectamente a través de la amplificación de las cargas estáticas mediante la utilización de factores definidos en el Eurocódigo EN1993-1-9 : 2005 [3]. Los esfuerzos se obtienen mediante un análisis lineal elástico de la estructura, asumiendo la hipótesis de pequeñas deformaciones y que las solicitaciones que provocan la falla por fatiga no incurren en el rango no lineal de los materiales.

Las evaluaciones a la fatiga se basan en las recomendaciones europeas [4] y en el Eurocódigo [3, 5]. Estos métodos son válidos para la zona denominada fatiga de altos ciclos ("*High cycle fatigue*" en inglés), en la cual generalmente no se producen deformaciones plásticas. La evaluación de acumulación de daño se acota a un número limitado de elementos, considerados como críticos o que pueden presentar un comportamiento difícil de predecir.

Para la elaboración de los espectros de carga se realizan interpolaciones basadas en datos históricos del volumen de tráfico. Para esto, se emplean datos cuantificados de la localidad en el periodo que

comprende los años 2005-2015, mientras que para el período 1960-2003 se utilizan datos de la red global de la República Checa [6]. Para el espectro de carga obtenido mediante el modelo numérico, se utiliza una muestra de los trenes que circularon por el puente durante la semana en que se realizó el monitoreo.

A pesar de que los análisis efectuados se refieren a un puente en particular, la metodología descrita en este trabajo puede ser aplicada a otras estructuras en distintas situaciones. Sin embargo, es importante considerar aquellas condiciones en las que pueden diferir, realizando cambios y/o estudios adicionales en caso de ser necesario.

1.4 Metodología de Trabajo

De acuerdo a los objetivos mencionados anteriormente, la metodología de trabajo puede resumirse en los siguientes pasos:

- Revisión Bibliográfica: Recopilación y lectura de publicaciones relacionadas con el fenómeno de la fatiga en materiales metálicos, evaluación a la fatiga de puentes existentes, recomendaciones establecidas por organismos internacionales, experiencias similares desarrolladas en el extranjero, entre otras. Además, se estudia la normativa correspondiente (Eurocódigos) relacionada con la materia, comparando también con lo que señala la normativa chilena. Por otro lado, también se estudian documentos de referencia para comprender mejor el funcionamiento del software de análisis estructural CSiBridge.
- Estudio del puente: Se revisan documentos que describen el estado actual de la estructura y luego se realizan inspecciones visuales en terreno, para comprender la conformación del puente y observar el estado en el que se encuentra. Se revisan los planos y memorias de cálculo a modo de complemento.
- Elaboración del modelo numérico: se confecciona el modelo global de la estructura solamente con elementos tipo viga-columna ("*frame*" en inglés) lineales a partir de la información disponible en los planos, considerando propiedades nominales de los materiales y de las secciones estructurales. Se calculan las cargas y se introducen al software de análisis estructural. Se efectúan análisis lineales estáticos para verificar la obtención de resultados coherentes, realizando calibraciones en el modelo cuando corresponda. Posteriormente, se crean modelos detallados de algunas secciones del puente mediante la utilización de elementos finitos bidimensionales que se ensamblan al modelo global de la estructura.
- Evaluación a la fatiga preliminar: A través de una inspección en terreno, se identifican detalles estructurales susceptibles a fallar debido a fatiga y se les asigna una categoría en la

que se clasifican según el Eurocódigo. A partir de esto, se ejecuta una evaluación a la fatiga a través de un método simplificado que se define en el Eurocódigo, el que permite obtener una noción del estado del puente y sus elementos críticos.

- Validación del modelo: Se comparan los resultados del análisis numérico con los datos de la respuesta de la estructura medida en terreno. En caso de obtener una predicción adecuada el modelo se considera validado. En caso contrario, se realizan calibraciones en distintos elementos del modelo numérico para mejorar dicha predicción.
- Elección de trenes: Se efectúa un análisis estadístico de los trenes que circulan por el puente durante el período de mediciones, escogiendo aquellos más representativos para las categorías establecidas. Se definen dichos trenes en el software de análisis estructural considerando su peso, longitud y geometría.
- Cuantificación del daño: Se crea un espectro de ejes equivalentes a partir de los resultados obtenidos de la circulación de los trenes en el modelo numérico. A partir de este espectro y los datos históricos sobre el volumen de tráfico, se utiliza la expresión lineal de cuantificación de daño acumulado y se analizan los resultados.

1.5 Estructura de la memoria

A continuación, se entrega un resumen del contenido y la estructura de la memoria.

En el Capítulo 2, se hace una revisión de la literatura disponible a la fecha. En particular, se describe brevemente el fenómeno de fatiga, junto con una explicación de conceptos relevantes; se explica el método de predicción utilizado y adicionalmente se hace mención a la metodología de evaluación de puentes existentes, señalando los métodos de cálculo que se utilizan en este trabajo. Finalmente se expone brevemente lo que señala la norma chilena en cuanto a la materia.

En el Capítulo 3 se hace una descripción detallada del puente en estudio, incluyendo su emplazamiento, sus propiedades geométricas y de materiales, y el cálculo de las cargas de servicio. En el Capítulo 4 se realiza una descripción de los modelos numéricos utilizados, mientras que en el Capítulo 5 se señalan los resultados de una evaluación numérica preliminar de la estructura.

En el Capítulo 6, se entrega una descripción de la campaña de monitoreo realizada y se muestran algunos resultados de las mediciones de la respuesta estructural del puente, sometido a la condición de carga de servicio. En el Capítulo 7, se describe el trabajo desarrollado en cuanto a las cargas vehiculares, basado en los datos obtenidos durante el monitoreo.

En el Capítulo 8 se presentan los resultados de los cálculos relacionados con el proceso de la evaluación a la fatiga del puente, además de un análisis de sensibilidad respecto a la acumulación de daño. Finalmente, en el Capítulo 9 se plantean las conclusiones y propuestas a realizar.

2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

Los comienzos del estudio de la fatiga remontan a mediados del siglo XIX [7], principalmente ante la falla reiterada de ejes de trenes. Históricamente, una de las grandes motivaciones para estudiar el fenómeno de la fatiga proviene de accidentes catastróficos que se han producido a través de la historia. Entre aquellos se pueden encontrar choques de aviones [8] y colapsos de puentes [9], causando víctimas fatales y pérdidas millonarias. Debido a esto, el diseño y la evaluación de estructuras frente al fenómeno de la fatiga es relevante, donde razones de seguridad, durabilidad y económicas adquieren gran importancia.

Cabe señalar que los modelos existentes para la predicción de daño no son muy precisos [10], siendo este uno de los mayores problemas en cuanto a la fatiga. Sin embargo, es posible trabajar con modelos numéricos siempre y cuando exista un entendimiento cualitativo del fenómeno y de la naturaleza de las incertezas que existen durante su evaluación.

2.1 Conformación del acero

El acero es un material conformado por la aleación de hierro, carbono y otros elementos. El elemento principal corresponde al hierro, el cual en su estado sólido forma naturalmente estructuras atómicas cristalinas con forma cúbica, también conocidas como granos, las cuales se unen entre sí a través de sus bordes para formar una red cristalina. Debido a la disposición cúbica de los átomos, se generan zonas en que las partículas están más separadas entre sí, y otras en que se encuentran aglutinadas, formando planos propensos a una falla frágil y a una falla dúctil, respectivamente. Por otro lado, los átomos de carbono, entre otros elementos que conforman el acero, son de un menor tamaño que los átomos de hierro y rellenan los espacios intersticiales de las estructuras cristalinas anteriormente mencionadas. Dependiendo de la proporción de estos elementos, el material adquiere características como una mayor resistencia, ductilidad a bajas temperaturas, resistencia a la corrosión, además de modificar algunas de sus propiedades mecánicas como la ductilidad, el esfuerzo de fluencia, esfuerzo de rotura, entre otras [11].

2.2 Descripción del fenómeno

2.2.1 General

La fatiga es una de las principales causas de daño en elementos de acero [12, 13], que ocurre cuando un elemento se encuentra bajo el efecto de cargas cíclicas repetitivas, generando una gran cantidad de oscilaciones en el estado de esfuerzos en elementos estructurales. Las estructuras sometidas a este tipo de cargas experimentan un daño progresivo que se encuentra asociado a la formación de grietas, como la que se muestra en la Figura 2-1.

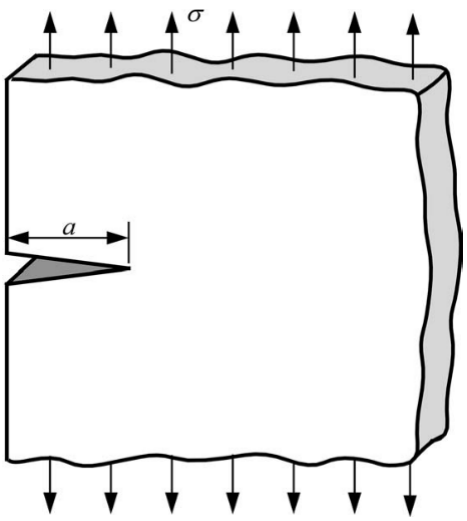


Figura 2-1 Modelo de una grieta de borde para análisis de fatiga [14].

Una característica significativa de este fenómeno es que las cargas que producen el agrietamiento por fatiga tienen una magnitud menor a la resistencia nominal del material. Comúnmente, las grietas surgen cerca de detalles constructivos como soldaduras o conexiones, los cuales son considerados puntos críticos en cuanto al problema de la fatiga.

Diversos autores han planteado que la vida de fatiga se puede separar en distintas etapas. De forma general se pueden señalar dos fases, el período de iniciación de grietas y el período de propagación de grietas [12, 15, 16].

2.2.2 Iniciación de grietas

Mediante observaciones microscópicas se ha determinado que las primeras grietas comienzan como microgrietas ubicadas en bandas de deslizamiento en la superficie de materiales metálicos (ver Figura 2-2). Se originan como consecuencia del deslizamiento cíclico que se produce debido a esfuerzos de corte que producen las cargas y que inducen deformaciones plásticas localizadas.

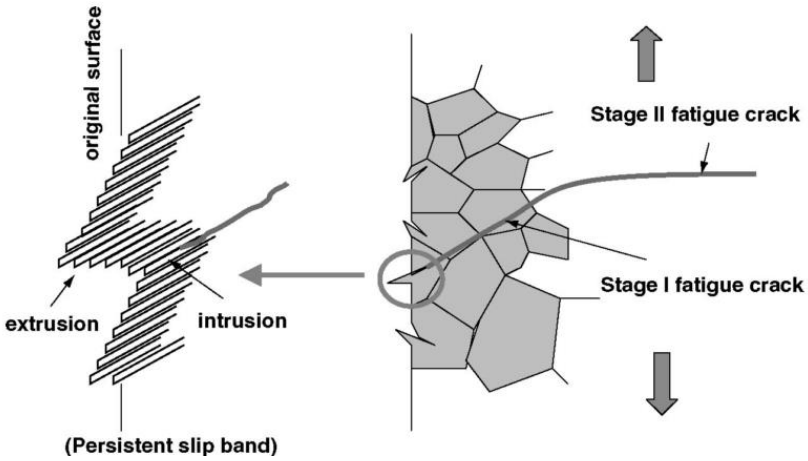


Figura 2-2 Iniciación de microgrietas en banda de deslizamiento [15]

Si bien el fenómeno de la fatiga provoca esfuerzos de magnitud bajo el esfuerzo de fluencia, se producen deformaciones plásticas localizadas en un pequeño número de granos del material. En una escala microscópica, los esfuerzos de corte no se distribuyen homogéneamente a través del material y difieren en cada grano, dependiendo de la forma y tamaño de los mismos, su orientación y la anisotropía del material [16]. También es necesario señalar que los granos ubicados en la superficie exhiben una menor restricción al deslizamiento, debido a que el material circundante está presente en un solo lado y que las condiciones para el deslizamiento son más favorables en algunos granos que en otros.

Si ocurre deslizamiento, un endurecimiento por deformación (deformación plástica y permanente) puede ocurrir durante el incremento de la carga, generando una singularidad en el material y por consiguiente una concentración de esfuerzos de corte en el material circundante. Debido a esto, los ciclos posteriores al deslizamiento inicial ocurren principalmente en la misma banda de deslizamiento, aunque en planos adyacentes y paralelos, causando una extensión de la grieta. En la Figura 2-3 se muestra de forma simplificada el mecanismo descrito.

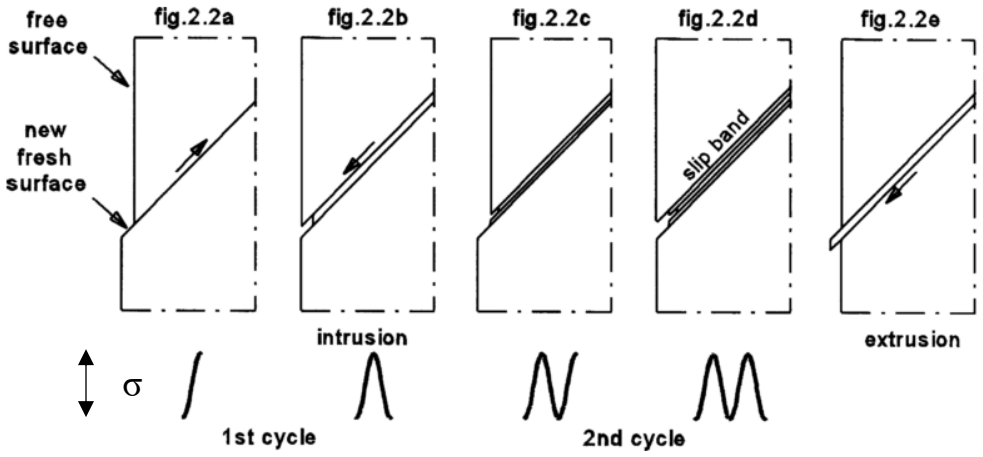


Figura 2-3 Mecanismo de deslizamientos cíclicos [16]

La presencia de orificios, soldaduras y otro tipo de discontinuidades geométricas causan distribuciones de esfuerzos no homogéneas, que se traducen en amplificaciones de esfuerzos en las superficies. Asimismo, las condiciones superficiales como la corrosión y el desgaste por fricción pueden acentuar esta amplificación de esfuerzos, por lo que el período de iniciación de grietas se considera un fenómeno superficial del material.

Mientras tanto, inspecciones microscópicas de elementos que han fallado muestran un patrón de estrías en las superficies de rotura (ver Figura 2-4), similar al que se puede encontrar en la concha de una almeja. Dichas estrías representan la extensión de una grieta durante un ciclo de carga y corresponden a una señal de las deformaciones micro-plásticas en la punta de la grieta. En algunos

casos es posible observar un cambio considerable en el tamaño de las estrías, que pueden corresponder a ciclos de mayor amplitud o al cambio en las etapas de agrietamiento, dependiendo de la posición en la que se ubiquen.

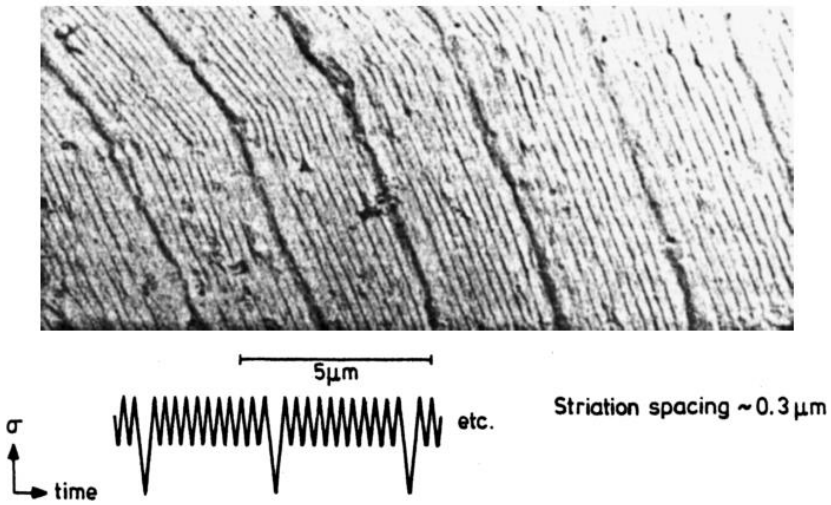


Figura 2-4 Patrón de estrías en superficie de rotura [16]

2.2.3 Propagación de grietas

Como se puede observar en la Figura 2-2, la dirección principal en que se extienden inicialmente las microgrietas es oblicua. Cuando esta alcanza un mayor tamaño se forma la punta de la grieta, que presenta una distribución de esfuerzos heterogénea, por lo que pueden ocurrir ciclos de deslizamiento en distintas direcciones. De este modo el crecimiento de la grieta se desvía del plano de corte original, con una tendencia a extenderse en dirección perpendicular a los esfuerzos de tracción principales.

Durante la década de 1960, se planteó el concepto de factor de intensidad de esfuerzos K [14, 16], que describe la severidad de la distribución de esfuerzos alrededor de la punta de la grieta y que es utilizado para predecir su crecimiento. Se puede expresar como:

$$K = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \tag{2.1}$$

Donde:

- σ es el esfuerzo actuante.
- a es la longitud de la grieta.
- Y es una constante adimensional que depende de la geometría del componente estructural

Una carga que produzca un ciclo de esfuerzos en la punta de la grieta de un componente agrietado provocará una variación del factor de intensidad de esfuerzos entre K_{max} y K_{min}, conocido como el rango de factores de intensidad:

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = Y \cdot (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} = Y \cdot \Delta\sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \tag{2.2}$$

Utilizando dichos conceptos se desprende que el crecimiento de una grieta es función de los factores de intensidad de esfuerzos en la punta de la grieta. A través de experimentos, se llegó a una relación entre dichas variables como la que se observa en la Figura 2-5.

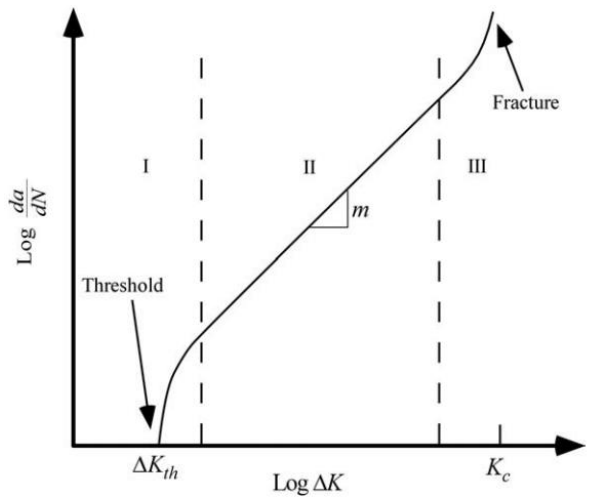


Figura 2-5 Comportamiento de propagación de grietas [14]

Se pueden observar tres zonas de comportamiento de propagación de grietas en la Figura 2-5. Primero, la zona III tiene relación con la falla del espécimen y un crecimiento descontrolado de la grieta, que corresponde a la situación en que los esfuerzos alcanzan un valor elevado que supera la resistencia a la fractura del material. Mientras, la zona II corresponde a un comportamiento lineal (en gráfico bi-logarítmico) y que queda definido por la ley de Paris [17] (ver ecuación (2.3)):

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \tag{2.3}$$

Donde:

- da/dN es la tasa de crecimiento de la grieta por ciclo de carga.
- ΔK es el rango de factores de intensidad de esfuerzos.
- C y m son constantes del material que se obtienen experimentalmente.

Por otro lado, la primera zona posee un comportamiento más complejo de explicar. Para valores bajo ΔK_{th} (valor umbral) las microgrietas pueden crecer; sin embargo, las grietas de tamaño macroscópicos no exhiben ese crecimiento. Un concepto ampliamente aceptado es que las fuerzas involucradas que presentan valores ΔK menores que el valor umbral no son capaces de abrir el mecanismo de cierre de la grieta. Un estudio de Elber [18] ha intentado medir y modelar este

mecanismo para poder explicarlo. También se señala que solo es posible aumentar el tamaño de las grietas si es que el ciclo de esfuerzos es capaz de abrir completamente el mecanismo de cierre.

2.3 Vida de fatiga

La vida de fatiga, o también conocida como límite de fatiga, se define como el número de ciclos de un nivel de esfuerzo que puede soportar el material antes que falle; es decir, equivale a la resistencia del elemento o conexión estructural ante cargas cíclicas repetitivas.

Para conocer la resistencia a la fatiga de una conexión, es necesario llevar a cabo ensayos en especímenes sometidos a cargas cíclicas de amplitud constante. Los especímenes tienen que ser lo suficientemente grandes para representar de manera realista las propiedades geométricas y el comportamiento constitutivo de los materiales, incluyendo efectos tales como los esfuerzos residuales. Los resultados obtenidos para distintas configuraciones se pueden graficar, obteniendo lo que se conoce como curvas S-N.

2.3.1 Curvas S-N

Estas curvas, también conocidas como curvas de Wöhler [10], se obtienen como resultado de un número de ensayos a distintos niveles de esfuerzo. Describen la relación entre el rango de esfuerzo $\Delta\sigma$ aplicado y la vida de fatiga del componente en estudio, en términos del número de ciclos N que inducen la falla por fatiga. Normalmente se grafican en escala logarítmica, con el número de ciclos en la abscisa y el rango de esfuerzo en la ordenada, como se puede observar en la Figura 2-6.

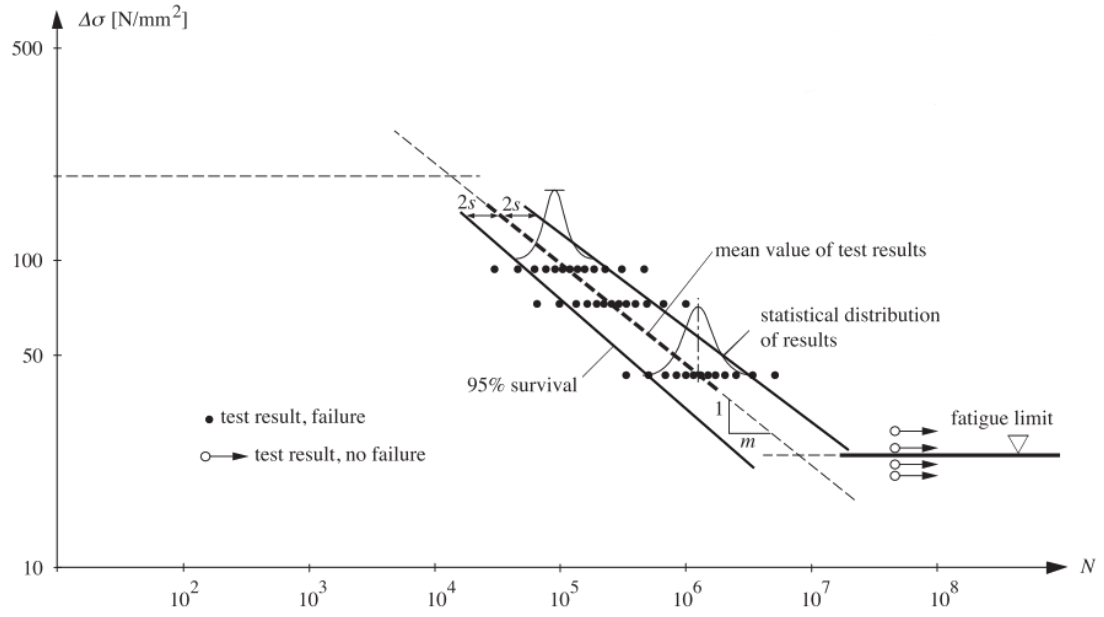


Figura 2-6 Resultados de ensayos de fatiga y su curva S-N [13]

De acuerdo a la Figura 2-6, se pueden observar distintas regiones en una curva S-N. El rango entre los 10^4 y 10^7 ciclos se denomina fatiga de alto ciclaje, donde en general no ocurren deformaciones plásticas. La relación entre ambas variables es aproximadamente lineal (en escala logarítmica) y puede ser descrita generalmente por la relación de Basquin [10, 13]:

$$N = C \cdot \Delta\sigma^{-m} \tag{2.4}$$

Donde:

- N es el número de ciclos aplicado.
- $\Delta\sigma$ es el rango de esfuerzo de amplitud constante.
- C y m son constantes que se obtienen experimentalmente.

Luego, la zona entre los 10 y 10^4 ciclos se llama fatiga de bajo ciclaje, donde se producen grandes deformaciones plásticas y que además es relevante para estructuras con un espectro de cargas con ciclos de gran magnitud, como el que producen las cargas sísmicas. Se observa que si la falla no se produce durante el primer ciclo, la vida de fatiga puede ser cercana a un centenar de ciclos. Además, el interés por este fenómeno ha guiado al desarrollo de las curvas ε-N, las cuales se construyen de forma similar a las curvas S-N pero a través de la aplicación de deformaciones unitarias cíclicas de amplitud constante.

Por último, la tercera zona, conocida como fatiga de gigaciclos y que se relaciona con amplitudes de esfuerzos bajos, muestra una recta horizontal conocida como límite de fatiga de amplitud constante. Esta recta indica que los ciclos menores a este valor pueden ser aplicados un número grande de veces ($>10^8$) sin resultar en falla debido a fatiga. Este límite se obtiene de especímenes ensayados que no muestran fallas tras un gran número de ciclos de carga. Sin embargo, en esos casos los ensayos son detenidos principalmente por razones de tiempo (mayores costos), sin obtener mayor información sobre efectos de fatiga para la condición de carga en estudio.

Mientras tanto, algunos experimentos [19] muestran que en ocasiones sí se pueden presentar fallas en la zona de gigaciclos, por lo tanto el límite establecido no es del todo claro. De acuerdo a las observaciones del estudio realizado por Bathias, la iniciación de las grietas en la zona de gigaciclos se origina adentro del ejemplar y no en la superficie como en los otros casos, por lo que más investigaciones son necesarias para determinar si ambos mecanismos poseen alguna relación.

2.3.2 Parámetros que influyen en la vida de fatiga

Dependiendo de la geometría, materiales y características mecánicas de conexiones soldadas, remachadas, orificios, entre otros, se pueden identificar cuatro parámetros principales que influyen en la vida de fatiga.

2.3.2.1 Efectos de las Cargas

La magnitud del rango de esfuerzos, que corresponde a la diferencia entre el esfuerzo máximo y mínimo de un ciclo de esfuerzos, afecta directamente a la vida de fatiga. Las cargas de amplitud variable también tienen un efecto considerable, debido a que implica una interacción entre las secuencias de carga que pueden producir un efecto distinto al de los experimentos de amplitud constante. Dependiendo de la combinación de parámetros, una secuencia determinada puede producir una aceleración o un retraso de la propagación de la grieta, como se puede observar en la Figura 2-7. En ambos casos se produce la falla por fatiga, pero los cálculos de acumulación de daño señalan que para la historia de esfuerzos de la figura de la izquierda no se produce la falla, mientras que en el de la derecha sí se produce. La razón de este fenómeno se debe a que la expresión de acumulación lineal de daño no considera los efectos de secuencia de carga, si no que se basa en el conteo del número de ciclos que se producen para cada rango de esfuerzos (ver sección 2.7.2).

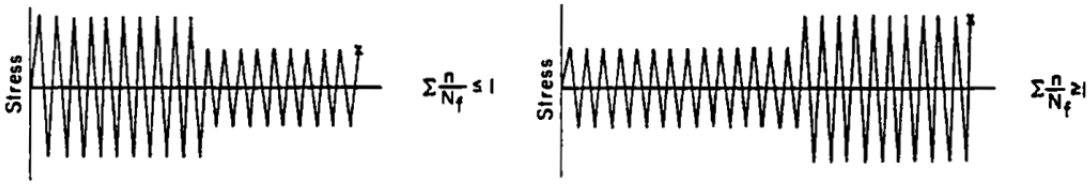


Figura 2-7 Secuencias de cargas con distintos resultados [20]

Cabe mencionar que los experimentos son generalmente ejecutados aplicando una carga uniaxial, mientras que en una estructura real normalmente se producen estados de esfuerzos triaxiales, que resultan en una menor vida de fatiga.

2.3.2.2 Efectos estructurales

La geometría de los elementos, conexiones y materiales estructurales es decisiva en cuanto a la ubicación en que se producirá la grieta como en la tasa de propagación, ya que está directamente relacionada con la forma en que se distribuyen los esfuerzos. Se puede señalar que la presencia de orificios o uniones, además de las soldaduras, producen efectos de concentración de esfuerzos que favorecen la posibilidad de iniciar una grieta. Por tanto, si el diseño estructural considera un apropiado detallamiento de cada componente, se pueden disminuir considerablemente los efectos negativos que pueden producir concentraciones de esfuerzo y finalmente fracturas debido a propagación de grietas por fatiga. Dicho esto, comúnmente se pueden encontrar defectos de fabricación, principalmente en soldaduras, que en la práctica afectan negativamente el desempeño estructural.

Se puede pensar que un ciclo en compresión puede ser inocuo para la vida de fatiga; sin embargo, no es necesariamente el caso para elementos soldados. Debido a la presencia de esfuerzos residuales, que pueden encontrarse en tracción, un punto material dentro de una conexión soldada puede pasar

de encontrarse en un estado de esfuerzos de compresión a uno de tracción, como se observa en la Figura 2-8. El comportamiento de una grieta es influenciado por la suma del esfuerzo aplicado y los esfuerzos residuales.

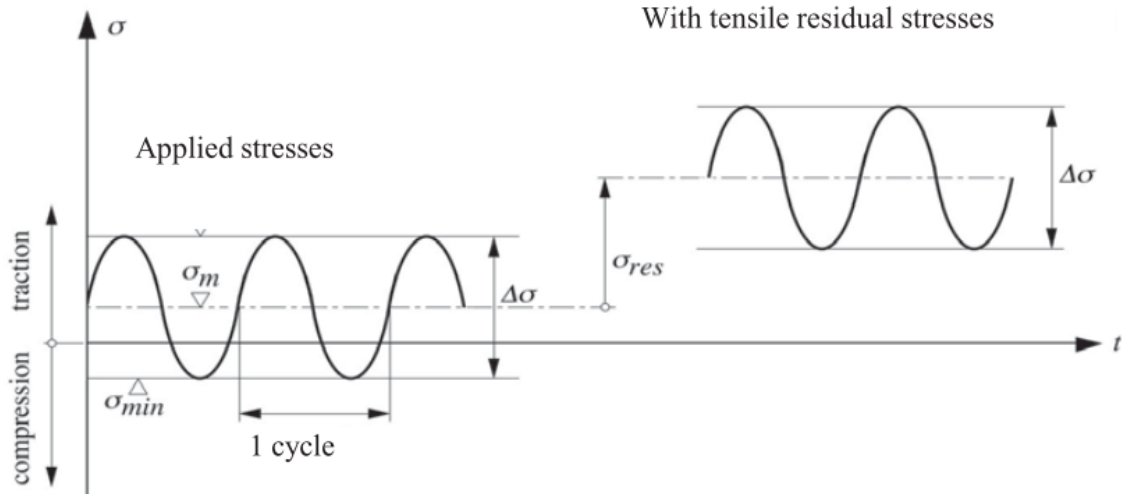


Figura 2-8 Efecto de los esfuerzos residuales [13]

2.3.2.3 Efectos del Material

Se ha observado que la composición química, características mecánicas (módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia, etc.), microestructura del material (tipo de grano, tamaño y distribución) y condiciones de procesamiento (forjado en caliente, formado en frío, recalentado, etc.) a menudo tienen una gran influencia en la vida de fatiga. Materiales diferentes pueden presentar distintos mecanismos de agrietamiento dependiendo de sus características.

Es importante señalar que al ser un fenómeno superficial (iniciación de grietas), cualquier defecto que pueda tener el material, como algún rasguño o inclusiones superficiales, pueden convertirse en una concentración de esfuerzos que favorezcan la formación de una grieta.

2.3.2.4 Efectos ambientales

Los efectos del ambiente en algunos casos pueden ser muy severos y en otros bastante inocuos. El efecto más relevante corresponde a la corrosión, la cual puede reducir la vida de fatiga de elementos metálicos. En estos casos, un elemento metálico que sufre de corrosión experimenta una disminución de su sección transversal, lo cual puede provocar un aumento en los esfuerzos [21]. El efecto de corrosión combinado con el efecto de fatiga tiene un efecto más perjudicial que cuando se consideran actuando por separado; es decir, los esfuerzos cíclicos favorecen la corrosión de los elementos y la acción corrosiva acelera el mecanismo que produce agrietamiento.

2.4 Ciclos de amplitud variable

2.4.1 Espectro de cargas

Si bien las curvas S-N son de mucha utilidad para efectos de diseño, estas son construidas a partir de ensayos con cargas cíclicas de amplitud constante. En cambio, las cargas reales (como la circulación de un tren de carga por un puente) producen historias tiempo de carga bastante complejas, en las que normalmente se pueden observar muchos ciclos de magnitud variable.

Por tanto, surge la necesidad de un método para contar dichos ciclos y considerar su influencia en un análisis de vida de fatiga. Generalmente, las cargas de fatiga se describen a través de un espectro de carga, en el cual se consideran diversos rangos de esfuerzos y los números de ciclos que ocurren asociados a cada magnitud, como se puede observar en la Figura 2-9.

Para obtener un espectro de cargas es necesario analizar una secuencia de historia tiempo que, en ocasiones, puede ser bastante complicada de obtener. Una historia tiempo que dependa de la naturaleza de las cargas aplicadas puede ser difícil de predecir, presentando una variabilidad y aleatoriedad importante. En la práctica, es frecuenta la toma de mediciones de la respuesta estructural en terreno durante un período considerable de tiempo, con el fin de disminuir el nivel de incerteza de las cargas. Algunas recomendaciones sobre procedimientos de medición en puentes pueden encontrarse en [22]. Tras obtener una secuencia de historia tiempo, se puede continuar con el conteo de ciclos para elaborar el espectro de cargas.

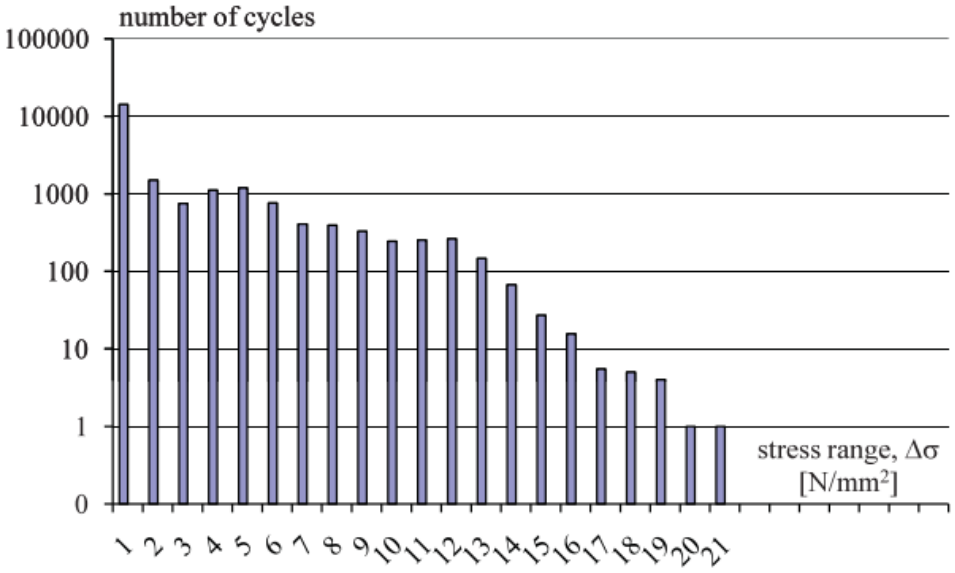


Figura 2-9 Ejemplo de espectro de cargas [13]

2.4.2 Conteo de ciclos de amplitud variable

Varios métodos se han planteado para el conteo de ciclos de amplitud variable, los que se pueden clasificar en métodos que almacenan uno o dos parámetros. Aquellos de un parámetro son los que cuentan ciclos que superan un determinado umbral; por ejemplo, los que cuentan directamente el número de "*peaks*" y valles, o los que cuentan los rangos entre "*peaks*" y valles sucesivos, como el método de conteo de rangos. La descripción de algunos de estos métodos se puede encontrar en [23]. Por otro lado, los métodos de dos parámetros, como el método "*rainflow*", entregan mejores resultados ya que pueden identificar eventos más complejos en una secuencia de historia-tiempo y representar fielmente las cargas cíclicas de amplitud variable.

2.4.2.1 Método de Conteo de Rangos

Esta técnica consiste en contar la magnitud entre un "*peak*" y un valle sucesivos. Los rangos con pendiente positiva se consideran positivos y aquellos con pendiente negativa se consideran negativos. Al momento de contar ciclos sólo se consideran las magnitudes y cada rango representa medio ciclo.

2.4.2.2 Método "*Rainflow*"

Basado en una analogía del flujo de la lluvia sobre techos de pagoda, el método "*rainflow*" [3, 16], que permite contar ciclos de amplitud variable con resultados satisfactorios. Las líneas que conectan los "*peaks*" son visualizadas como techos de pagoda (ver Figura 2-10).

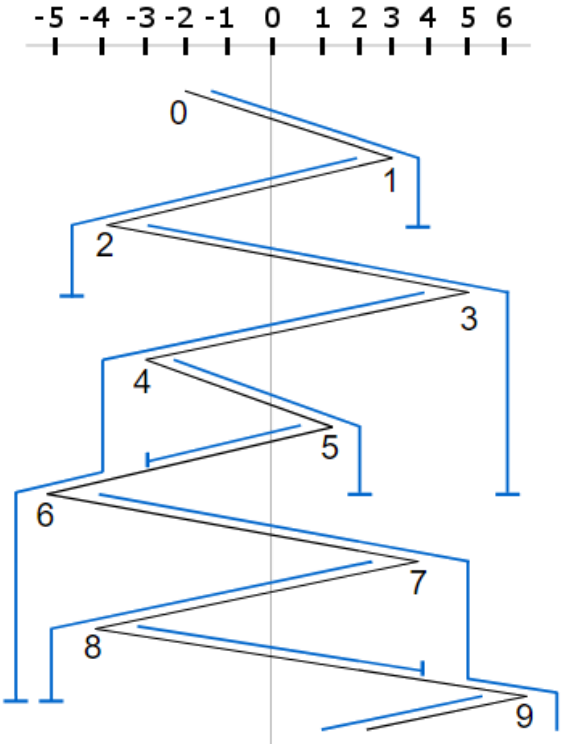


Figura 2-10 Conteo de ciclos de amplitud variable según método "rainflow". Fuente: Wikimedia Commons.

El “flujo de lluvia” que comienza en un mínimo puede continuar hasta que se encuentre con un valor opuesto mínimo menor que el del cual inició. Por ejemplo, en la Figura 2-10 un “flujo” comienza en el “*peak*” 0 y se detiene opuesto al “*peak*” 2, contando medio ciclo del rango entre los “*peaks*” 0 y 1. De modo similar, si el “flujo” se inicia en un máximo, debe parar cuando se encuentre con un valor opuesto máximo mayor que el del cual inició. En la Figura 2-10 se puede observar un “flujo” que comienza en el “*peak*” 3 y se detiene opuesto al “*peak*” 9, contando medio ciclo entre los “*peaks*” 3 y 6. Adicionalmente, un “flujo” también debe detenerse cuando se encuentra con un “flujo” proveniente de un “techo” superior, como se ve en la Figura 2-10, el medio ciclo que comienza en el “*peak*” 5 y se detiene bajo el “*peak*” 4. Los resultados del conteo de ciclos de la Figura 2-10 se resumen en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1 Resultados de conteo de ciclos utilizando el método "rainflow" (ver Figura 2-10)

Rango de esfuerzos	Número de Ciclos
11	0,5
10	0,5
9	0,5
8	1
7	0,5
6	0
5	0,5
4	1

El método “*rainflow*” posee un comportamiento distinto al de otros algoritmos, solucionando algunos de los problemas principales del conteo de ciclos. En la Figura 2-11 se muestra cómo dos métodos distintos manejan un problema típico, en el que una pequeña variación ocurre entre dos valores extremos de un ciclo.

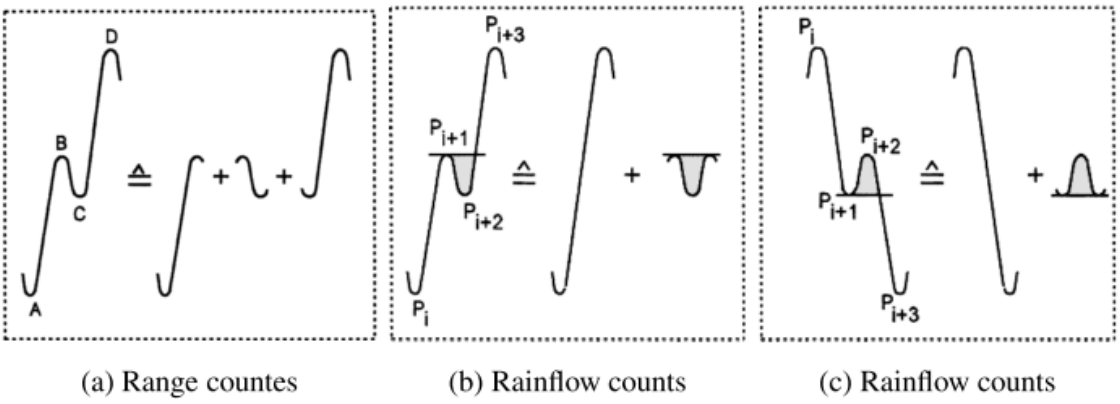


Figura 2-11 Problema típico del conteo de ciclos [16]

Se puede observar en la Figura 2-11 que los resultados obtenidos usando ambos métodos son diferentes. Se espera que el daño a la fatiga de un rango mayor, como el AD, sea mayor que el de los

otros tres. El método de conteo de rangos simplemente cuenta los rangos AB, BC y CD por separado, sin obtener información alguna sobre el rango AD. En cambio, el método "*rainflow*" cuenta los rangos AB, BC, y CD, almacenando esta información y evaluando el comportamiento de los rangos, contando el ciclo BC por separado y removiéndolo del gran ciclo AD, que de este modo se cuenta independientemente. Debido a estas características, el método "*rainflow*" comúnmente es considerado como el que conduce a mejores predicciones para el conteo de ciclos en historias tiempo complejas [13, 20] tanto de esfuerzos como de deformaciones.

Diversos algoritmos para implementar el método han sido desarrollados por distintos autores [24, 25]. Una definición que se puede encontrar en [16] señala que el método funciona definiendo 4 "*peaks*" sucesivos, que se denotan por P_i, P_{i+1}, P_{i+2} y P_{i+3}. Los requisitos para que el método remueva el rango pequeño del rango grande son:

$$P_{i+3} > P_{i+1} \quad y \quad P_i < P_{i+2} \tag{2.5a}$$

Si ocurre una situación similar en un rango descendente:

$$P_{i+1} > P_{i+3} \quad y \quad P_{i+2} < P_i \tag{2.5b}$$

Para el conteo de ciclos de secuencias de historia tiempo, se realizan conteos sucesivos utilizando el método "*rainflow*". Se comienza con los ciclos más pequeños y se van removiendo, simplificando la secuencia y continuando con un nuevo paso del procedimiento. Se prosigue sucesivamente hasta que no se puede aplicar el método, quedando con un residuo y contando directamente dichos rangos.

2.5 Predicciones de daño de fatiga

Uno de los grandes objetivos del estudio de la fatiga es encontrar una forma para predecir el daño que producen las cargas cíclicas. Un problema práctico asociado a estas predicciones es estimar la vida útil remanente de la estructura, donde esta puede ser usada sin exhibir una probabilidad de falla producto de problemas por fatiga.

Varios autores han planteado modelos relacionados con la predicción de acumulación de daño. En [26] se puede encontrar un resumen de varios modelos planteados, cada uno con distintas características: lineales, no lineales, semi analíticos, empíricos, etc.

Pese a la existencia de bastantes modelos matemáticos, la regla de acumulación de daño más popular es la regla de Palmgren-Miner [2]. Esta regla lineal se obtiene al aplicar n_i veces un ciclo de amplitud $\Delta\sigma_i$, cuya resistencia a la fatiga corresponde a N_i ciclos, lo equivale a consumir una porción n_i/N_i de

la vida de fatiga. La falla se define cuando se consume el 100% de la resistencia, lo que corresponde a obtener un valor de daño (*D*) igual a 1, como se define en la ecuación (2.6).

$$D = \sum_{i=1}^{N} \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \tag{2.6}$$

A pesar de la popularidad de la regla de Palmgren-Miner, contiene ciertas limitaciones que son importantes de mencionar. El nivel de daño producido no depende del nivel de las cargas actuantes, ni tampoco tiene efecto alguno el patrón de la secuencia aplicada. Además, los ciclos de amplitud bajo el límite de fatiga no causan daño, aunque para historias de carga de amplitud variable dichos ciclos pueden propagar grietas existentes. Un procedimiento alternativo que sugieren algunos autores corresponde a extrapolar la curva S-N bajo el límite de fatiga, ya sea con el mismo exponente o bien con uno distinto. Otros autores señalan que el modelo de predicción debe aplicarse por separado en dos etapas, una que considere la fase de iniciación de las grietas y otra la fase de propagación. En la Figura 2-12a se puede observar un modelo bilineal (dos etapas) de acumulación de daño y la fórmula de Palmgren-Miner. Mientras, en la Figura 2-12b se pueden observar modelos no lineales que incorporan el efecto de las cargas y de las dos etapas.

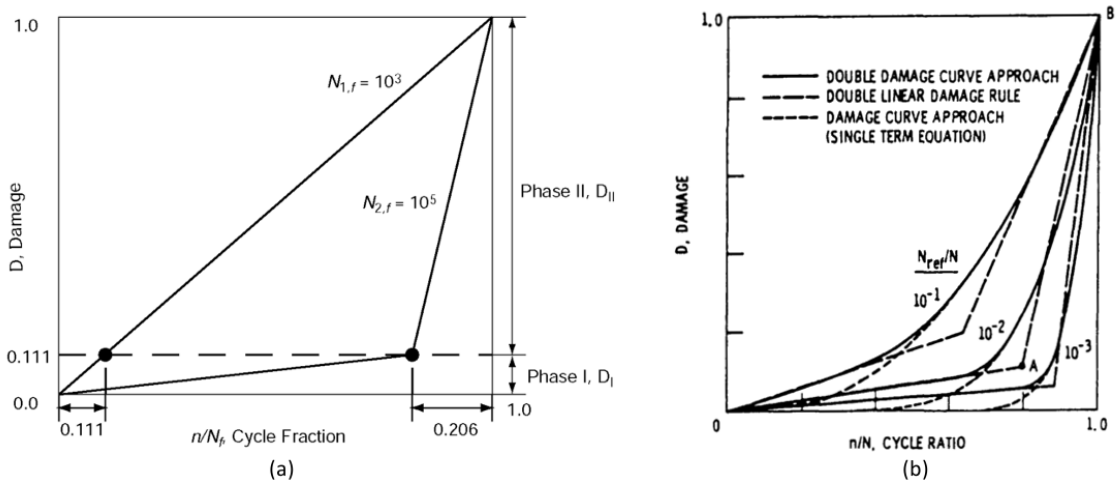


Figura 2-12 Comparación de modelos de predicción de daño [15, 26]

Pese a que la regla de Palmgren-Miner evidencia ciertas limitaciones, su uso práctico sigue siendo posible, teniendo siempre un adecuado criterio basado en la experiencia, y de ser posible el control de incertidumbre producto de la variabilidad de las cargas.

2.6 Evaluación de Fatiga en puentes de acero existentes

Una aplicación de la teoría de fatiga que ha adquirido relevancia en la actualidad corresponde a la evaluación de estructuras existentes con gran cantidad de años de servicio y que se encuentran sometidas a cargas cíclicas. Por ejemplo, los puentes de acero construidos hasta aproximadamente la mitad del siglo XX, constituyen parte de este grupo. Aquellas estructuras pueden estar cercanas a presentar fallas por fatiga, por lo que la evaluación de su nivel de daño es urgente.

Este es un tema habitual en países con un nivel de infraestructura desarrollado, en los que se ha convertido una necesidad para tomar decisiones en cuanto a la administración de la infraestructura civil. Por otro lado, se presentan grandes dificultades durante la evaluación del desempeño de este tipo de infraestructura, ya que en algunos casos los materiales utilizados durante la construcción de la estructura no son usados en la actualidad y no son comúnmente conocidos. Adicionalmente, en la mayoría de los casos no hay mucha información sobre la historia de carga o incluso la documentación (planos, detallamiento, etc.) de la estructura no está disponible.

Debido a lo señalado, se han elaborado artículos [27] e informes [4] con metodologías y recomendaciones sobre cómo desarrollar dichas evaluaciones. De acuerdo a estos documentos, una evaluación a la fatiga se puede separar en cuatro fases:

- Evaluación preliminar
- Investigación detallada
- Investigación de expertos
- Medidas de solución

Por otro lado, también es posible encontrar en la literatura distintos casos en los que se han aplicado dichas metodologías [28–30].

2.6.1 Evaluación preliminar

Consiste en remover dudas acerca de la seguridad de la estructura utilizando métodos de cálculo relativamente simples e identificar zonas críticas en la estructura. En esta etapa se asume el puente como una estructura nueva, por lo que se utilizan los métodos de cálculo indicados en los códigos de diseño. En esta etapa se sugiere hacer suposiciones conservadoras en caso de faltar información.

También es necesaria una minuciosa identificación de los componentes estructurales ubicados en el puente, debido a que generalmente los métodos utilizados en las normas de diseño se basan en la clasificación y utilización de curvas S-N, que están asociadas a la categoría del componente estructural en consideración. Debido a esto, una correcta clasificación de los componentes críticos de

la estructura es muy importante. Para esto se utiliza información de los planos, memorias de cálculo y realizando inspecciones visuales en terreno.

2.6.2 Investigación detallada

El objetivo es utilizar métodos más refinados para aquellos elementos estructurales en que el nivel de seguridad no ha sido garantizada en la fase anterior. Para esto, normalmente se realizan cálculos de acumulación de daño, utilizando valores actualizados de cargas, modelos estructurales más refinados, propiedades del material más precisas, entre otros.

Para actualizar los valores de las cargas (parámetro de mayor incerteza) se pueden efectuar mediciones en terreno, registrando el tipo de vehículo que circula por la estructura durante un período de tiempo. De este modo se obtienen cargas más confiables y menos conservadoras que las de los códigos de diseño. Sin embargo, es necesario considerar que las mediciones tienen que ser extrapoladas en el tiempo.

Los modelos estructurales son una parte importante de la evaluación de la estructura. Pese a esto, comúnmente son más conservadores de lo necesario. Dependiendo de la geometría de la estructura y la naturaleza de las cargas, se pueden presentar esfuerzos secundarios y otros efectos que son difíciles de cuantificar. Por esto es que se recomienda refinar los modelos y elaborarlos en base a los planos, considerando la geometría real de la estructura. Este proceso de discretización del dominio del sistema estructural puede llevarse a cabo utilizando elementos finitos tipo "*shell*" y realizando validaciones del modelo basado en mediciones de la respuesta real de la estructura. Grandes avances se están desarrollando en cuanto a la utilización de nuevas tecnologías que facilitan la obtención de datos en terreno, como son la utilización de artefactos remotos con una elevado nivel de precisión [31, 32].

Las curvas S-N corresponden a una categoría particular del componente estructural, y generalmente son valores conservadores. En caso de no encontrar el componente correspondiente en los listados que contienen los códigos, o no conocer las propiedades mecánicas del material, se puede buscar información acerca de casos similares en la literatura o realizar ensayos del material a partir de ejemplares extraídos de la estructura.

2.6.3 Panel de expertos

Si tras la fase anterior aún no se ha podido garantizar un nivel de seguridad estructural, y una falla tenga grandes consecuencias en términos de riesgos vitales o costos, un equipo de expertos puede proponer llevar a cabo evaluaciones a través de métodos probabilísticos, mecánica de fracturas, entre otros.

2.6.3.1 Mecánica de fracturas

El estudio y predicción del comportamiento de las grietas [33, 34] puede ser muy apropiado para determinar la vida útil remanente de una estructura, especialmente cuando estas han sido detectadas. Pese a esto, dicho método omite la fase de iniciación de la grieta, concentrándose simplemente en la fase de propagación de la misma. De este modo, se obtiene una estimación conservadora de la vida de fatiga del elemento analizado.

2.6.3.2 Métodos probabilísticos

La variación de algunos de los parámetros requeridos para los cálculos basados en el sistema de clasificación puede tener un gran efecto en el nivel de daño calculado. Por otro lado, dichos parámetros presentan un nivel de incertidumbre (por ejemplo, la categoría asignada a los componentes estructurales o las propiedades mecánicas de los materiales) que puede ser considerado a través de estos métodos, determinando como resultado las probabilidades de falla del componente analizado [35].

2.6.4 Medidas de solución

En caso de que ninguna de las fases previas justifique mantener la estructura en funcionamiento en su condición actual, es necesario proponer medidas para que la estructura pueda seguir funcionando con un nivel suficiente de seguridad (ver secciones 2.7.1.3 y 2.7.2). Entre las posibilidades se puede señalar: reparación de la estructura, instalación de refuerzos, reducir el volumen de tráfico, entre otras. De otra forma, es inminente la demolición de la obra de infraestructura, debiendo asumir las consecuencias económicas y sociales en busca de resguardar la seguridad del tránsito.

2.7 Métodos de cálculo

Los cálculos de fatiga se desarrollan a través de dos métodos, los cuales se basan principalmente en lo que señalan las normativas y especificaciones que rigen la evaluación de estructuras existentes. La obtención de los esfuerzos se basa en los resultados de análisis lineales estáticos del modelo estructural, sin realizar análisis dinámico alguno de la estructura. En la literatura se pueden encontrar modelos sofisticados para predecir el comportamiento dinámico de puentes bajo el flujo de trenes [36]

2.7.1 Método 1: Evaluación Preliminar (según Eurocódigo)

El primer método corresponde a una evaluación del desempeño estructural asumiendo la construcción de una estructura nueva de acuerdo a la normativa de diseño vigente. Para esto, se utilizan las disposiciones de la norma europea que considera el diseño de puentes ferroviarios EN 1993-2 [5]. En este documento se entrega un modelo de carga, la incorporación de factores de amplificación

dinámicos, la definición de curvas S-N, la categoría de detalles estructurales y las ecuaciones para la evaluación a la fatiga.

2.7.1.1 Carga de Fatiga

Para la evaluación a la fatiga de puentes ferroviarios, el código considera el modelo estandarizado de carga LM71, amplificado por el factor dinámico Φ_2, los cuales están definidos en EN 1991-2 como se presenta a continuación:

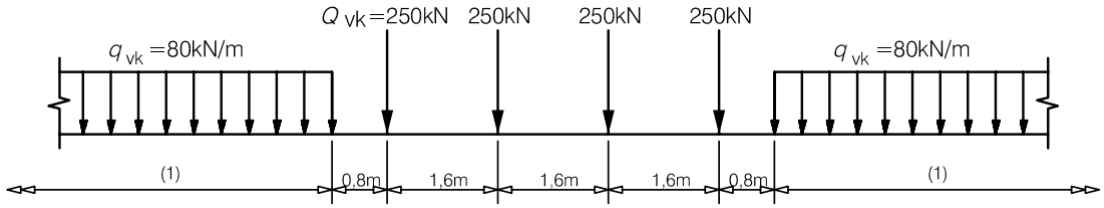


Figura 2-13 Modelo de carga LM71 [37]

$$\phi_2 = \frac{1{,}44}{\sqrt{L_\phi} - 0{,}2} + 0{,}82 \quad , \quad 1{,}00 \leq \phi_2 \leq 1{,}67 \tag{2.7}$$

Donde:

- L_φ es el largo determinante definido para elementos estructurales específicos según la tabla 6.2 en EN1991-2.

2.7.1.2 Rango de esfuerzos

El rango de esfuerzos de referencia $\Delta\sigma_P$ debe ser calculado usando el esfuerzo máximo $\sigma_{P,max}$ y el esfuerzo mínimo $\sigma_{P,min}$, calculados a través del modelo de carga LM71, ubicado en la posición más desfavorable, de modo que el rango de esfuerzos sea maximizado. Se define como:

$$\Delta\sigma_P = \left|\sigma_{P,\max} - \sigma_{P,\min}\right| \tag{2.8}$$

Los efectos de daño producidos por dicho rango de esfuerzos pueden ser representados como un rango de esfuerzos equivalente, relacionado con $2x10^6$ ciclos:

$$\Delta\sigma_{E,2} = \lambda \cdot \phi_2 \cdot \Delta\sigma_P \tag{2.9}$$

Donde:

- λ corresponde al factor equivalente de daño, se define para puentes ferroviarios de hasta 100 m de largo, como:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \lambda_4 \quad , \quad \lambda \leq \lambda_{max} \tag{2.10}$$

Donde:

- λ_1 es el factor por efecto de daño debido al tráfico, que depende del largo de la línea de influencia crítica (según Figura 9.7 de EN-1993-2).
- λ_2 es el factor por volumen de tráfico.
- λ_3 es el factor por vida útil de diseño del puente.
- λ_4 es el factor por elemento estructural cargado por más de una pista.
- λ_{max} es el máximo valor de λ considerado para el límite a la fatiga.

Los valores que definen el parámetro λ se encuentran tabulados en el Eurocódigo y se muestran en las Tablas 2-2, 2-3, 2-4 y 2-5.

Tabla 2-2 Valor λ_1 para tráfico ferroviario con ejes de 25 Ton

L	λ_1
0,5	1,65
1,0	1,65
1,5	1,65
2,0	1,64
2,5	1,55
3,0	1,51
3,5	1,31
4,0	1,16
4,5	1,08
5,0	1,07
6,0	1,04
7,0	1,02
8,0	0,99
9,0	0,96
10,0	0,93

L	λ_1
12,5	0,90
15,0	0,92
17,5	0,73
20,0	0,68
25,0	0,65
30,0	0,64
35,0	0,65
40,0	0,65
45,0	0,65
50,0	0,66
60,0	0,66
70,0	0,66
80,0	0,66
90,0	0,66
100,0	0,66

Tabla 2-3 Valores para λ_2

Tráfico por año [10^6 t / pista]	5	10	15	20	25	30	35	40	50
λ_2	0,72	0,83	0,90	0,96	1,00	1,04	1,07	1,10	1,15

Tabla 2-4 Valores para λ_3

Vida útil de diseño [años]	50	60	70	80	90	100	120
λ_3	0,87	0,90	0,93	0,96	0,98	1,00	1,04

Tabla 2-5 Valores para λ_4

$\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_{1+2}$	1,00	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50
λ_4	1,00	0,91	0,84	0,77	0,72	0,71

Donde:

- $\Delta\sigma_1$ es el rango de esfuerzos en la sección a ser evaluada debido a LM71 en una pista
- $\Delta\sigma_{1+2}$ corresponde al rango de esfuerzos de la misma sección en cualquiera de las dos pistas.

2.7.1.2.1 Método "*hot spot*"

Una variación del método de las curvas S-N corresponde a la evaluación de esfuerzos en posiciones denominadas "*hot spots*". En este método, los esfuerzos son evaluados mediante un modelo numérico detallado, directamente en la posición de la grieta (normalmente en la base de la soldadura). Debido a esto, las curvas de diseño empíricas son independientes del detalle estructural. Sin embargo, el Eurocódigo [3] contiene en su anexo algunas categorías de detalle específicas para el método "*hot spot*".

2.7.1.3 Evaluación a la fatiga

El Eurocódigo utiliza un método de clasificación de los detalles estructurales empleando curvas S-N, el rango de esfuerzos y factores parciales de carga y resistencia. El nivel de seguridad para la fatiga puede expresarse como:

$$\mu_{fat} = \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} \tag{2.11}$$

Donde:

- μ_{fat} es el nivel de seguridad a la fatiga
- $\Delta\sigma_{E,2}$ es el rango de esfuerzos equivalente, asociado a $2x10^6$ ciclos (ver ecuación (2.8))
- γ_{Ff} es el factor parcial para la carga de fatiga. Se recomienda $\gamma_{Ff} = 1{,}00$ [EN 1993-2]
- γ_{Mf} es el factor parcial para la resistencia a la fatiga. Se recomiendan los valores entregados en la tabla 3.1 de [EN 1993-1-9]
- $\Delta\sigma_c$ es el valor de referencia de la resistencia a la fatiga bajo $2x10^6$ ciclos para el detalle estructural considerado (también conocido como categoría del detalle). Estos valores se pueden encontrar en la tabla 8.1 a 8.10 de [EN 1993-1-9]

Para valores de $\mu_{fat} \leq 1$ el elemento analizado satisface el requerimiento de seguridad. Para $\mu_{fat} > 1$ el elemento tiene que ser evaluado a través de métodos más sofisticados.

2.7.2 Método 2: Evaluación Detallada (Acumulación de daño)

Este método corresponde a un nivel más sofisticado de evaluación, el cual se lleva a cabo para los elementos que no poseen un nivel adecuado de seguridad según el primer método. Los cálculos se efectúan mediante la regla de Palmgren-Miner de acumulación lineal de daño (ver ecuación (2.5)), para lo cual es necesario obtener el número de ciclos de ocurrencia y la resistencia a la fatiga para cada rango de esfuerzo en consideración.

Con objeto de obtener el número de ciclos de ocurrencia, se puede elaborar un espectro de cargas utilizando el método "*rainflow*", basado en la respuesta de tiempo historia obtenidas de manera experimental o mediante simulación numérica.

Para obtener la resistencia nominal a la fatiga, correspondiente a un rango de esfuerzo determinado, se utiliza una serie de curvas S-N que se definen en el Eurocódigo EN 1993-1-9 y se muestran en la Figura 2-14. Dichas curvas dependen de la categoría de detalle y se definen como:

$$N_R(\Delta\sigma_R) = \left(\frac{\Delta\sigma_C}{\Delta\sigma_R}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 \quad para\ \Delta\sigma_R \geq \Delta\sigma_D \tag{2.12a}$$

$$N_R(\Delta\sigma_R) = \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_R}\right)^5 \cdot 5 \cdot 10^6 \quad para\ \Delta\sigma_L \leq \Delta\sigma_R \leq \Delta\sigma_D \tag{2.12b}$$

$$N_R(\Delta\sigma_R) = \infty \quad para\ \Delta\sigma_R < \Delta\sigma_L \tag{2.12c}$$

Donde:

- $\Delta\sigma_L$ es el límite de "corte" de la curva S-N
- $\Delta\sigma_D$ es el límite de fatiga de amplitud constante

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \Delta\sigma_C \tag{2.13}$$

$$\Delta\sigma_L = \left(\frac{5}{100}\right)^{\frac{1}{5}} \cdot \Delta\sigma_D \tag{2.14}$$

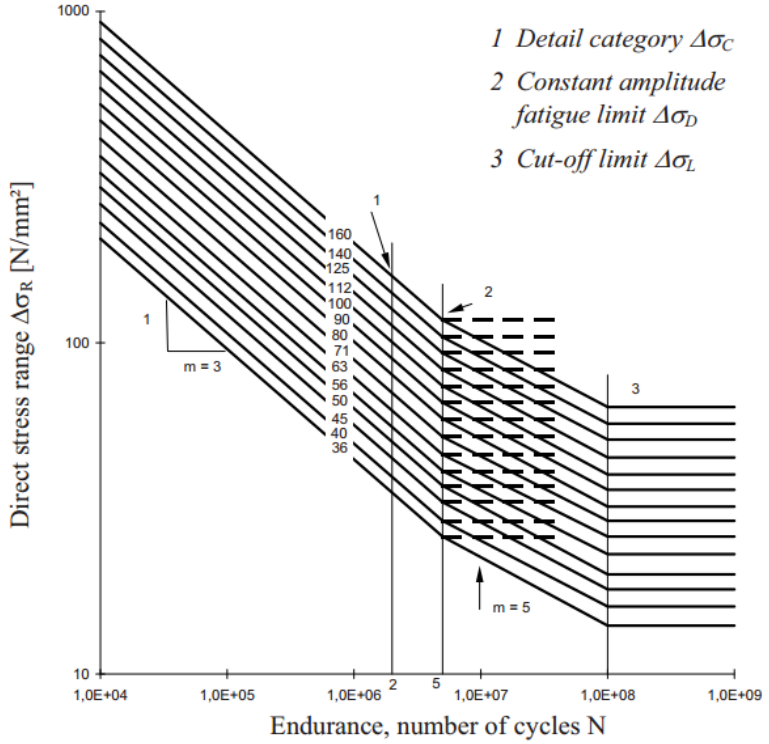


Figura 2-14 Curvas de resistencia a la fatiga para distintas categorías de detalle [3]

Como se puede observar en la Figura 2-14, la serie de curvas S-N definidas en el Eurocódigo tratan el límite de amplitud constante (zona entre los $5 \cdot 10^6$ y 10^8 ciclos) extrapolando la curva de la zona de fatiga de altos ciclos modificando el exponente por uno mayor. De este modo se considera el daño que pueden producir ciclos de menor magnitud.

El método asume que cada rango de esfuerzos produce un daño parcial que puede ser representado por el cociente n_i/N_i. El daño total se define como la suma de todos los daños parciales y la falla ocurre cuando este valor alcanza la unidad.

Como se señaló anteriormente, el método de la acumulación lineal de daño considera simplificaciones como el hecho de ignorar el patrón de la secuencia de los ciclos, que el daño producido no dependa del nivel de cargas, entre otras. Pese a esto, el uso de la ecuación (2.4), junto con las curvas S-N del Eurocódigo, una estimación confiable de las cargas y el uso de factores de seguridad (calculando $N_R(\gamma_{Mf} \cdot \Delta\sigma_R)$), ha demostrado ser bastante confiable, y en general, es considerada como la regla más importante de acumulación de daño.

2.8 Comparación con norma chilena

La norma chilena que establece las disposiciones referente a puentes viales corresponde al Manual de Carreteras, Volumen 3 [38], en el cual se señala que el diseño de puentes se rige según la norma americana AASHTO [39]. Sin embargo, se puede utilizar como alternativa la referencia [40] elaborada por la misma organización. Asimismo, el organismo a cargo de la red ferroviaria chilena es la Empresa de Ferrocarriles del Estado (EFE), que posee la norma técnica “Diseño de Puentes Ferroviarios”, la cual hace referencia a un manual de diseño estadounidense elaborado por AREMA, entre otros documentos.

Las normas AASHTO y la norma técnica EFE utilizan un método de diseño similar al del Eurocódigo; es decir, un método de clasificación de las curvas S-N de acuerdo a la categoría de los detalles estructurales, y su utilización para establecer un criterio de desempeño respecto a la fatiga.

Mientras, la única norma que contempla la evaluación de puentes existentes corresponde a la referencia [40]. Esta norma señala que se pueden realizar mediciones en terreno para establecer el efecto de las cargas en los elementos de la estructura, y que los resultados de las mediciones pueden ser utilizados para proyectar la vida de fatiga con mayor confiabilidad.

3 DESCRIPCIÓN DEL PUENTE

3.1 Descripción General

El puente en estudio se localiza en el km.1,508 del pueblo "*Kralupy nad Vltavou*" (coordenadas 50°14'2.50"N, 14°20'0.50"E), ubicado en la región de Bohemia Central, perteneciente al área metropolitana de Praga, República Checa (ver Figura 3-1). Este puente conecta dicho pueblo y la pequeña ciudad de "*Neratovice*", cruzando el río Moldava. La estructura corresponde a un puente ferroviario de acero de vía única, que entrega servicio en ambas direcciones tanto a pequeños trenes de pasajeros como a grandes trenes de carga. En la Figura 3-2 se observa una vista lateral de la estructura en terreno, mientras que en la Figura 3-3 se muestran esquemáticamente dos elevaciones y una vista en planta del puente en cuestión.

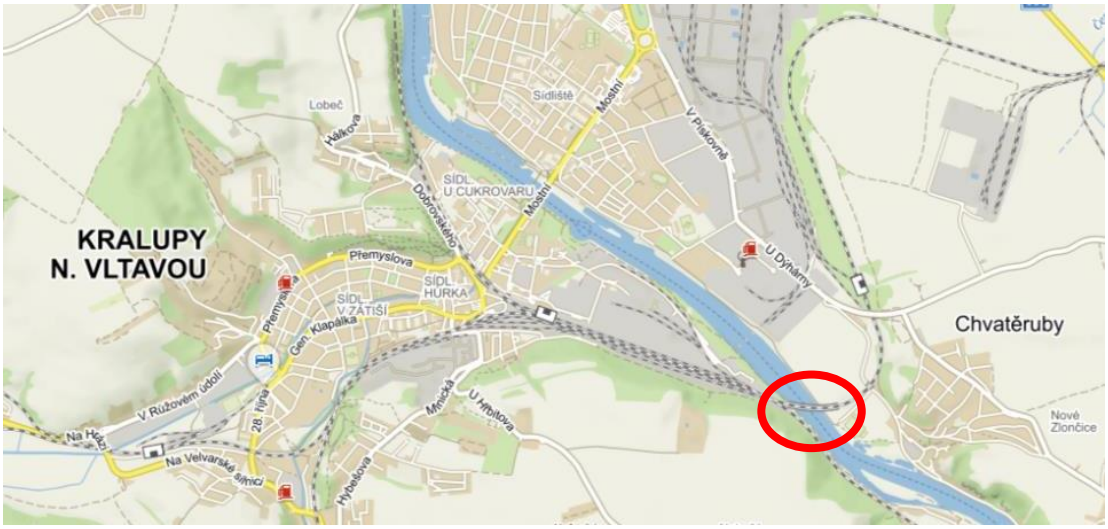


Figura 3-1 Ubicación del Puente. Fuente: en.mapy.cz

Figura 3-2 Vista lateral del puente.

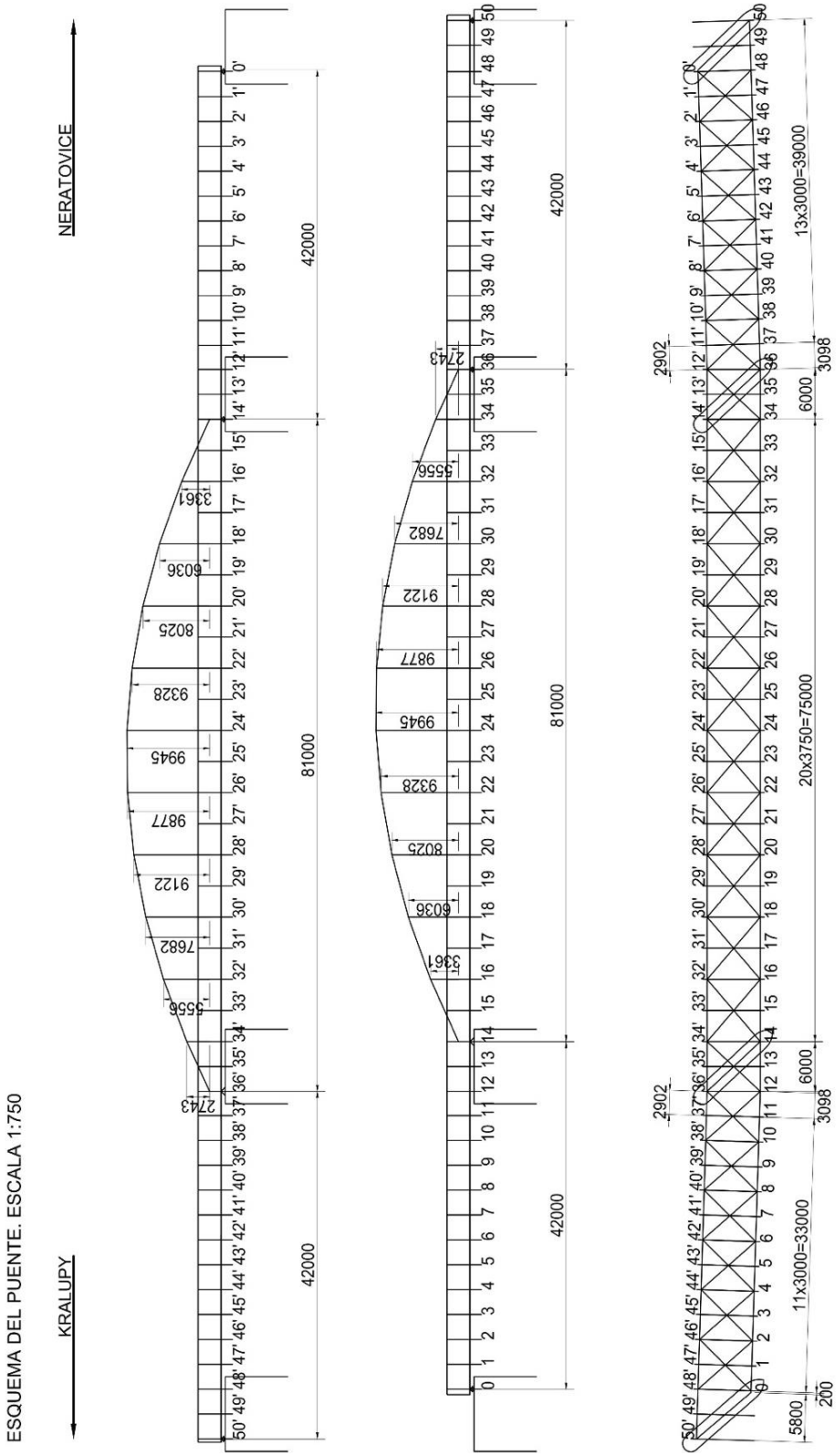


Figura 3-3 Disposición de la estructura. (Nota: unidades en mm.)

3.2 Descripción de estructura

La superestructura del puente está compuesta por una grilla continua de elementos de acero que se extiende a través de tres vanos (42 m + 81 m + 42 m =165 m) que se encuentran esviados en relación a la subestructura (47° aproximadamente), soportados por apoyos deslizantes y simples. A su vez, el puente se distribuye en 52 ejes (observar en Figura 3-3 que nomenclatura de ejes no es igual en ambos lados) transversales, y se ensambla a un arco a lo largo del segundo vano (ver Figura 3-2 y Figura 3-3). Mientras, los extremos de la estructura metálica interactúan con una losa de hormigón armado, la cual yace sobre algunos de sus elementos y es utilizada como transición entre la estructura metálica y las losas de hormigón que le prosiguen. Es relevante señalar que el puente no es completamente recto, ya que los vanos laterales poseen una leve desviación en relación al vano intermedio. De modo similar, la vía férrea presenta una leve curvatura en dichos vanos (ver Figura 3-3).

La grilla de elementos está formada por las vigas principales, vigas transversales, vigas secundarias, arriostramientos y elementos de refuerzo. La disposición de los elementos se puede observar en la Figura 3-4, que muestra las vigas transversales y arriostramientos (arriba), además de las vigas secundarias y refuerzos laterales (abajo).

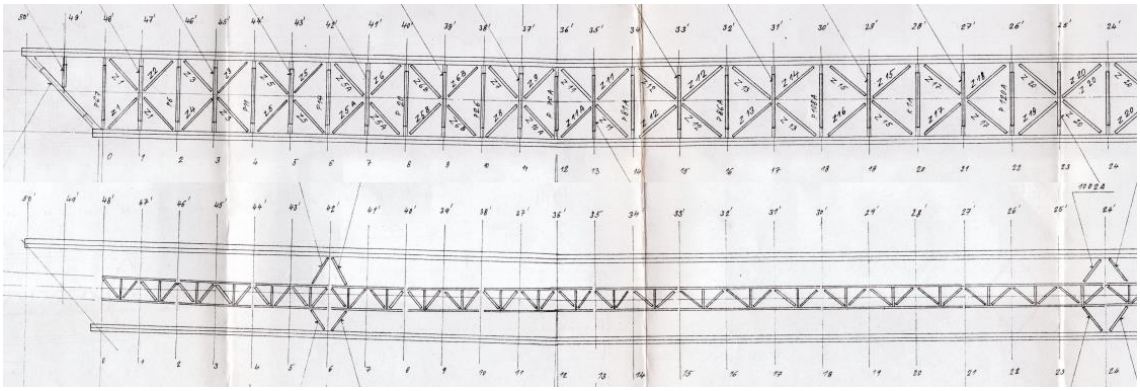


Figura 3-4 Vista en planta de la grilla (mitad del puente).

La sección transversal típica del puente (ver Figura 3-5) consiste en dos vigas principales paralelas, separadas a una distancia de 6,4 m, que se conectan entre sí a través de vigas transversales. En la zona de conexión entre dichos elementos, se observan placas de acero que permiten su unión y que además funcionan como refuerzo transversal de las vigas principales. Sobre las vigas transversales, yacen las vigas longitudinales secundarias, las que a su vez se conectan con las traviesas de madera de la vía férrea. Sin embargo, la sección transversal varía en las secciones de conexión con el arco y en los extremos de la estructura. Para visualizar el resto de las secciones transversales referirse al Anexo A.

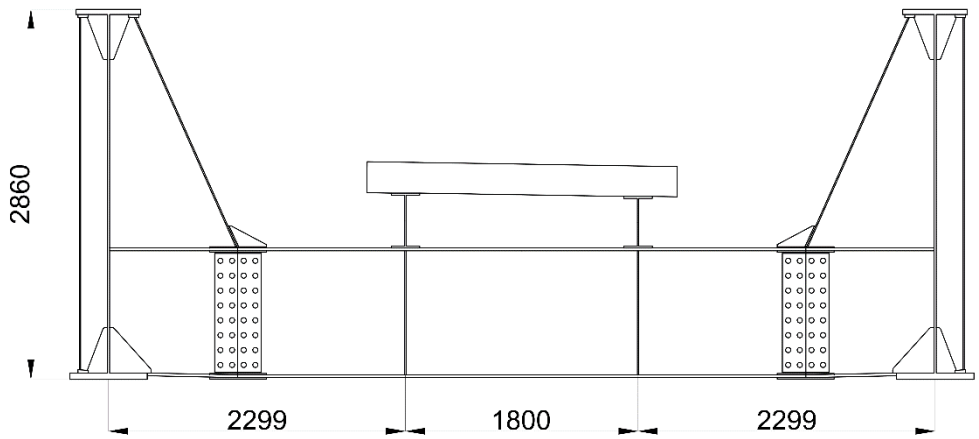


Figura 3-5 Sección transversal común del puente. (Nota: unidades en mm.)

3.2.1 Arco

Entre los ejes 14-36' y 36-14' se prolongan los vanos intermedios, que en adición a los elementos mencionados anteriormente, están compuestos por dos arcos (ver Figuras 3-3 y 3-6).

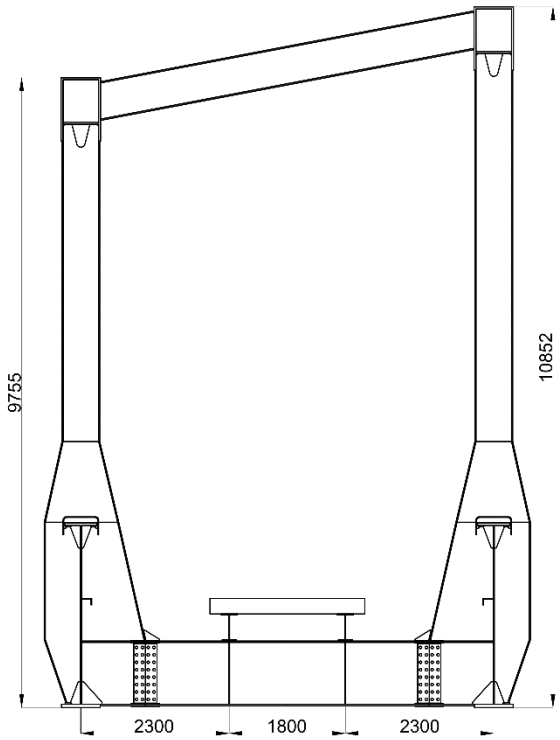


Figura 3-6 Sección transversal de un lugar donde se ubica el arco. (Nota: unidades en mm.)

Los dos arcos están constituidos de elementos de sección transversal tipo cajón cuadrado. Se conectan cada 6 m a las vigas principales del puente a través de columnas, y en los casos donde estas no existen, a través del refuerzo transversal (ver secciones transversales en Anexo A). Los elementos en los

extremos del arco se encuentran soldados longitudinalmente al alma de las vigas principales, mientras que transversalmente se hallan soldados a su refuerzo transversal (ver Figura 3-7). La longitud de las vigas del arco varía de acuerdo con la forma de la estructura; asimismo, la sección transversal oscila entre 600 y 610 mm de ancho y mide 680 mm de alto, con un espesor que varía entre los 20 y 30 mm.

Las montantes corresponden a elementos de sección transversal "I", que en un extremo están soldados a los refuerzos de las vigas principales (ver Figura 3-6), mientras que en el otro están conectados a las vigas longitudinales del arco. Las columnas se localizan cada 6 m desde el eje 18-32' hasta el 32-18' y sus largos varían en función de la forma del arco, alcanzando una altura máxima de 9,88 m (en relación al nivel de las vigas principales) en el eje 24-24'. El alma de las columnas es de 550 mm de alto y 10 mm de espesor, mientras que las alas miden 200 mm de ancho y 18 mm de espesor.

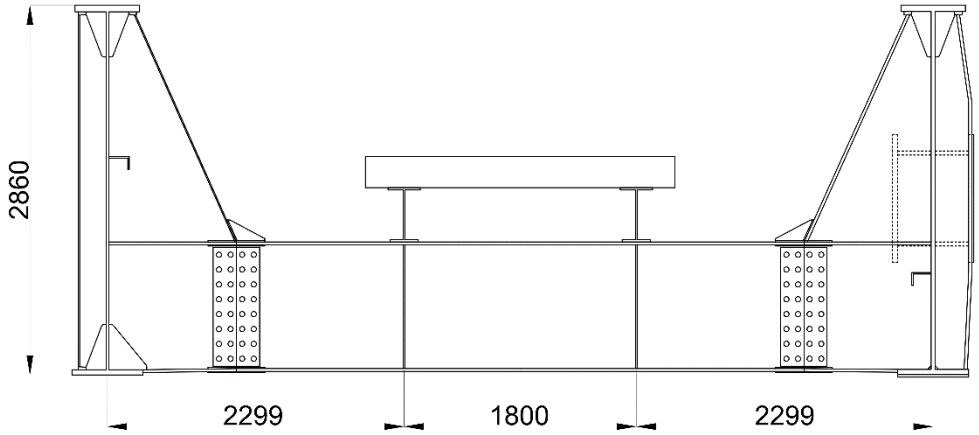


Figura 3-7 Sección transversal del puente en sector de conexión viga del arco y viga principal. (Nota: unidades en mm.)

Las vigas transversales del arco son elementos de sección "I" que conectan las dos estructuras y están directamente soldados a las vigas longitudinales. Se localizan en los ejes 20-28' (20'-28), 22-26' (22'-26) y 24-24'. El largo de los elementos varía de acuerdo con la altura de las estructuras en los puntos de conexión. El alma de las vigas transversales es de 550 mm de alto y 10 mm de espesor, mientras que las alas tienen 200 mm de ancho y 20 mm de espesor.

3.2.2 Vigas Longitudinales Principales

Corresponden a vigas altas con perfiles soldados de sección "I". Presentan un alma con una altura de 2770 mm y un espesor que varía entre 15 y 30 mm. El ancho de las alas varía entre 500 y 650 mm, mientras que su grosor entre 40 y 50 mm. Ambas vigas contienen perfiles "L" soldados a su alma, ubicadas al lado interno del tablero y a una altura variable. Las vigas se encuentran sobre un apoyo deslizante en los puntos 0 (0'), 14', 36 y 50 (50'), mientras que en los puntos 14 y 36' yacen sobre apoyos simples, como se muestran en la Figura 3-8(a) y Figura 3-8(b), respectivamente. Refuerzos

transversales, que varían su geometría a lo largo del puente (ver Anexo A), se conectan a las vigas principales en cada uno de los ejes, los que también actúan como mecanismo de conexión con las columnas del arco y las vigas transversales.

(a)

(b)

Figura 3-8 Apoyos de la estructura

3.2.3 Vigas Transversales

Entre los ejes 0 y 50 (0’ y 50’), un total de 53 vigas transversales permiten conectar las vigas principales, a través de una conexión remachada que une el alma de las vigas transversales con los refuerzos de las vigas principales (ver Figura 3-5). En el eje 49 (49’), una viga transversal perpendicular corta se conecta al alma de una viga transversal esviada que se ubica en el eje 50-0’ (50’-0). Todos estos elementos corresponden a perfiles soldados de sección “I”, cuya alma oscila entre 776 a 960 mm de alto y 8 a 10 mm de espesor, mientras que sus alas fluctúan entre 200 a 320 mm de ancho y 12 a 25 mm de espesor. A su vez, todas las vigas transversales presentan atiesadores en la posición donde se conectan las vigas secundarias.

3.2.4 Vigas Longitudinales Secundarias

Dos vigas secundarias se encuentran sobre cada viga transversal, conectadas mediante remaches que unen las alas superior e inferior de las vigas transversales y secundarias, respectivamente. Se encuentran separadas mutuamente por una distancia de 1,8 m localizadas en la misma dirección que los rieles de ferrocarril, prolongándose a través de la estructura hasta el comienzo de las losas de hormigón (ejes 0-48’ [48-0’]). Cumplen la función de soportar los durmientes de la vía férrea y corresponden a perfiles soldados de sección “I” con un alma que varía entre los 368 y 459 mm de alto con un espesor de 10 mm, mientras que las alas miden 220 mm de ancho y 16 mm de espesor.

Otros elementos refuerzan las vigas secundarias, formando una estructura similar a una cercha. Dichos elementos consisten en perfiles tipo “L” y “U”, que se conectan al alma de las dos vigas

secundarias. En algunos lugares de la estructura es posible encontrar un refuerzo lateral adicional, nuevamente formado por perfiles “L” y “U”, distribuidos similarmente (ver Figura 3-4). Sin embargo, estos últimos se conectan al ala inferior de las vigas secundarias y al alma de las vigas principales.

3.2.5 Arriostramientos de Plataforma

Las riostras que conectan ambas vigas longitudinales consisten en elementos de perfil tipo “2L” y se encuentran distribuidas a través de todos los vanos, formando un patrón en forma de “X”. Están conectadas a través de remaches a placas de unión (*gusset plates* en inglés), que se encuentran soldadas a las alas inferiores de las vigas principales y vigas transversales (ver Figuras 3-12 y 3-13).

3.2.6 Durmientes

Las durmientes utilizadas en el puente en estudio corresponden a elementos de madera que soportan directamente los rieles por los cuales circula el tren. Tienen una sección transversal de forma cuadrada de 200x200 mm y tienen una longitud de 2400 mm. Se montan sobre las vigas secundarias y se distribuyen en promedio cada 600 mm. En algunos casos presentan una pequeña inclinación debido a la diferencia de altura de las vigas secundarias.

3.2.7 Losas de Hormigón

Las losas que interactúan con la estructura metálica se ubican entre los ejes 48-0’ (48’-0) y 50-0’ (50’-0), cubriendo la zona triangular que definen estos puntos (ver Figura 3-3). Corresponden a losas macizas utilizadas como transición entre la estructura metálica y las estructuras de hormigón que le prosiguen; una de ellas se puede apreciar levemente en la Figura 3-14. Se conectan a las vigas transversales ubicadas en los ejes 48-0’ y 48’-0, a través del ala superior y parte del alma con la ayuda de un perfil de sección transversal “L”, mientras que se encuentra simplemente apoyada sobre las vigas transversales corta y oblicua.

3.3 Detalles Estructurales

Debido a que los métodos utilizados se basan en la clasificación de detalles estructurales, es importante identificar y clasificar aquellos que contiene la estructura. Esto se considera a través de la categoría del detalle estructural $\Delta\sigma_c$, parámetro que indica una noción de la resistencia a la fatiga en MPa (ver sección 2.7.1.3).

En el caso del puente en estudio, la mayor parte de los elementos están formados por placas metálicas que se encuentran soldadas longitudinalmente entre sí a través de todo el vano. De acuerdo a lo observado, se puede estimar que las soldaduras fueron ejecutadas manualmente. Además, en algunas de las vigas principales es posible encontrar soldaduras transversales, como se puede observar en la Figura 3-9.

Figura 3-9 Soldadura transversal en viga principal

Aproximadamente cada 3 metros se encuentran los refuerzos transversales de las vigas principales, soldados al alma y ala inferior del elemento. Estos refuerzos restringen el pandeo local del alma y funcionan como arriostramiento lateral para controlar el pandeo lateral torsional de la viga principal. Se pueden observar en las Figuras 3-5 y 3-10. De modo similar, es posible encontrar atiesadores en las vigas transversales, localizados justo debajo de las vigas secundarias (como se exhibe en la Figura 3-11), actuando como refuerzos frente al pandeo local del alma y las alas de dichas vigas.

Figura 3-10 Refuerzos transversales de vigas principales

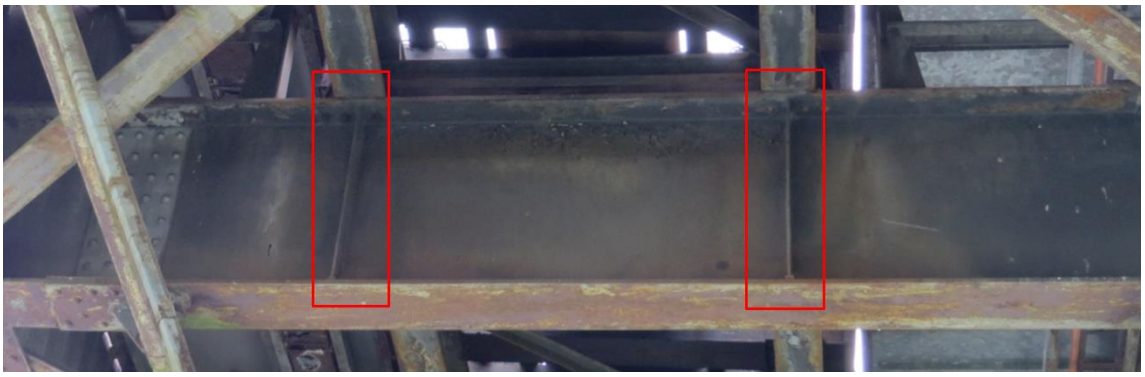


Figura 3-11 Atiesadores de vigas transversales

También se pueden encontrar placas de unión soldadas, las que conectan los arriostramientos de plataforma con el ala inferior de algunas de las vigas principales y transversales, tal como se aprecia en la Figuras 3-12 y 3-13.

Figura 3-12 Placa de unión en vigas principales

Figura 3-13 Placa de unión en vigas transversales

Figura 3-14 Conexión remachada entre viga transversal y viga principal

Adicionalmente, las vigas transversales exhiben conexiones remachadas en ambos extremos, donde se conecta con las vigas principales, como se muestra en la Figura 3-14.

De acuerdo a los valores recomendados por el Eurocódigo [3] y un artículo sobre conexiones remachadas [41], se establece la categoría de los detalles estructurales como se indica en la Tabla 3-1. En dichas referencias se encuentran tabulados diversos valores asignados a una serie de detalles estructurales. Según las características que puedan poseer, distintos valores se señalan para un mismo detalle.

Tabla 3-1 Categoría de detalles estructurales

Detalle Estructural	$\Delta\sigma_c$
Soldadura longitudinal	100
Soldadura transversal	90
Refuerzo transversal	80
Conexión remachada	80
Placa de unión	40

4 MODELO NUMÉRICO

En las diversas etapas del estudio se utilizan distintas versiones del modelo numérico, dependiendo de la complejidad del análisis y el nivel de detallamiento requerido. En esta sección se describe la versión más compleja, utilizada tras la validación del modelo para ejecutar la teoría de acumulación de daño.

4.1 Modelo Global de la estructura

El puente es modelado de acuerdo a los planos disponibles utilizando el software de análisis estructural CSiBridge 2017 [42]. La estructura se modela en tres dimensiones empleando principalmente elementos tipo "*frame*" y "*link*", aunque también se utilizan elementos tipo "*shell*" para modelar partes de la estructura que requieren mayor prolijidad, como se visualiza en la Figura 4-1.

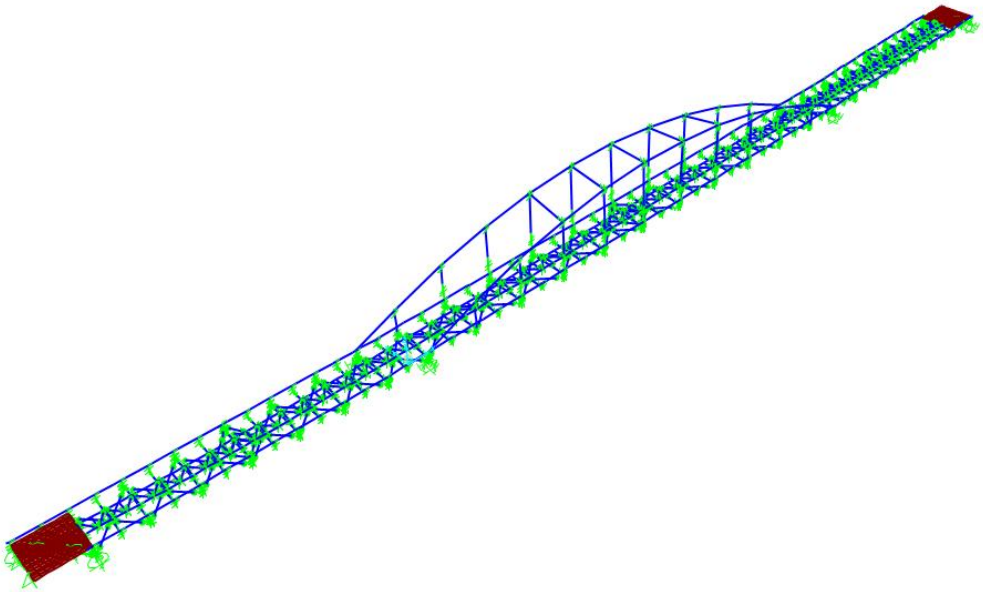


Figura 4-1 Vista isométrica del modelo numérico

Las vigas, columnas y riostras se modelan utilizando elementos tipo "*frame*", asignando las secciones transversales correspondientes definidas mediante la herramienta "*section designer*". Elementos ficticios de sección tubular son usados para modelar las conexiones remachadas entre las vigas longitudinales secundarias y vigas transversales, liberando el momento en la dirección requerida. En la Figura 4-2 se pueden observar algunos de los elementos utilizados en el modelo, donde las vigas principales, vigas transversales, y vigas secundarias se representan con líneas de color rojo, azul y

celeste, respectivamente; mientras, las riostras se representan con líneas negras y los elementos ficticios en color rosado.

Los elementos tipo "*link*" son utilizados para modelar conexiones rígidas entre elementos, además de representar la excentricidad existente entre ellos. En la Figura 4-2, los "*links*" están representados por el color verde, y se puede apreciar que modelan las conexiones de las vigas principales con vigas transversales, de los arriostramientos con vigas principales, como también la excentricidad que presentan los apoyos con el resto de los elementos, entre otros.

Los apoyos se consideran semi-rígidos en las direcciones horizontales, por lo que se decide utilizar resortes lineales para modelarlos, asignándoles una rigidez k = 200 MN/m y k = 1000 MN/m, según corresponda, de modo que se permitan pequeños desplazamientos en dichos nodos (unos 5 mm, según recomendaciones del co-profesor guía). En la dirección vertical se encuentran completamente restringidos, estimando que cepas y pilas son perfectas por lo que no se consideran asentamientos y posibles deformaciones que puedan experimentar.

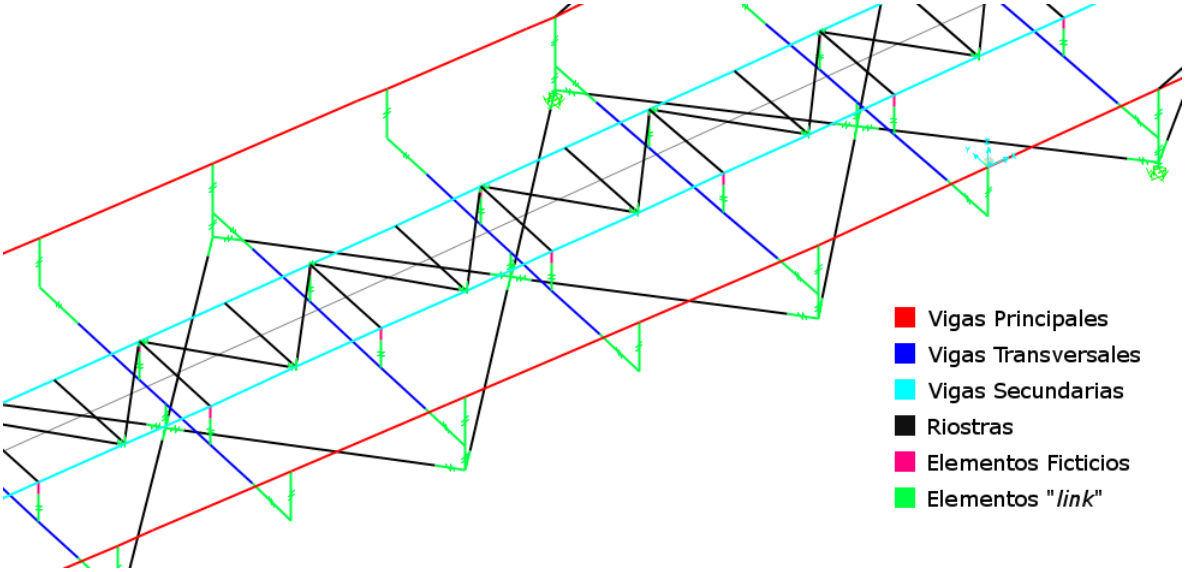


Figura 4-2 Elementos que componen el modelo estructural

4.2 Modelos Detallados

Para modelar con mayor precisión las losas de hormigón, además del comportamiento del elemento en que se encuentra la grieta, se procede a utilizar elementos tipo "*shell*" de 4 nodos (en ocasiones resulta inevitable utilizar elementos triangulares). La malla de elementos finitos se elabora manualmente mediante el software AutoCAD, verificando que todos los nodos de los elementos estén conectados entre sí. Para las transiciones en que se desea disminuir (o aumentar) el tamaño de los elementos se utiliza un patrón como el de la Figura 4-3.

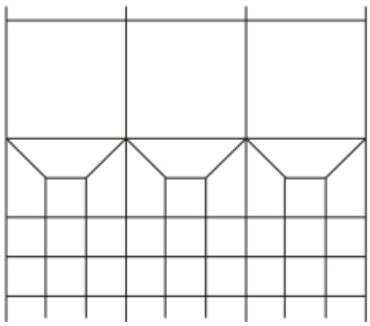


Figura 4-3 Transición utilizada en una malla de elementos finitos [42]

4.2.1 Losas de Hormigón

Se modelan las losas de hormigón que interactúan con la estructura metálica, además de una porción de losa adyacente que no interactúa con el resto de la estructura, como se muestra en la Figura 4-4 (en rojo losa que interactúa). El espesor de los elementos se divide en dos grupos, la parte central con un espesor de 883 mm y los lados con un espesor de 175 mm, distribuidos como se señala en la Figura 4-4b. La conexión entre los nodos de la losa y las vigas transversales se efectúa mediante elementos tipo "*frame*" ficticios y de sección tubular (ver Figura 4-4a, en rosado) que tienen el momento principal liberado, excepto en el eje 48-0' (48'-0) donde los elementos transmiten todas las fuerzas internas, debido a que la losa y la viga actúan como un elemento compuesto (ver Anexo B, SG8X). El propósito de este modelo corresponde a mejorar la interacción entre las losas y el resto de la estructura del puente.

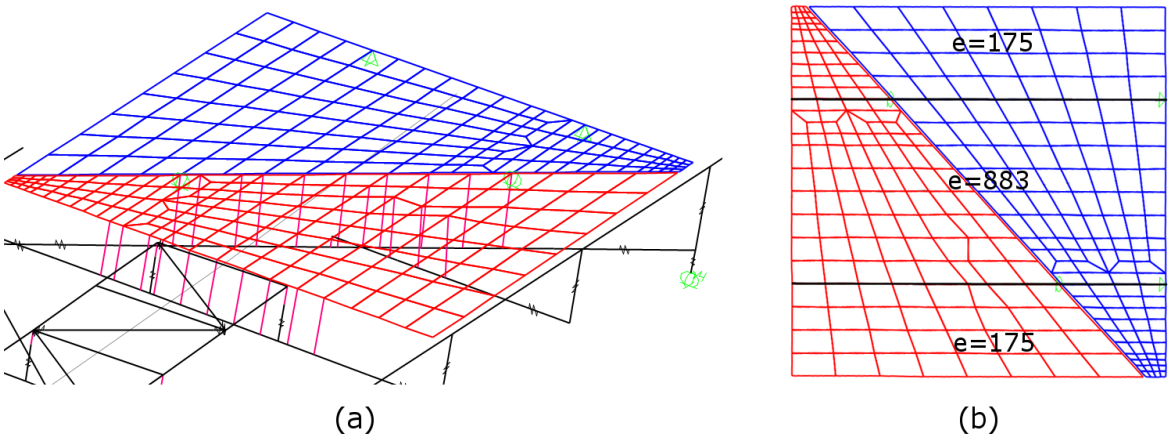


Figura 4-4 Modelo de las losas con elementos finitos bidimensionales

4.2.2 Sección Viga Principal

Se modela una sección de una de las vigas principales del puente, correspondiente a la interacción con uno de los extremos del arco, donde además se observan grietas en la soldadura del refuerzo transversal de la viga. La sección modelada considera la fracción desde que el arco interactúa con el

alma de la viga principal hasta que se conecta con el refuerzo transversal, tomando en cuenta una distancia adicional para cada lado (unos 1000 mm aproximadamente). Se incluyen los refuerzos transversales y otros elementos que contribuyen a la conexión (alas adicionales, placas de unión, etc.), considerando las dimensiones de acuerdo a los planos de la estructura.

El modelo detallado se ensambla al modelo global para considerar las condiciones de borde apropiadas. Cada elemento tipo "*frame*" que interactúa con elementos tipo "*shell*" se conecta a ellos mediante elementos rígidos tipo "*link*", uniendo los nodos de borde de los elementos "*shell*" con el nodo del elemento lineal, como se muestra en la Figura 4-5. El propósito de este modelo es identificar las concentraciones de esfuerzos en los refuerzos transversales de la viga principal, además de comprender el comportamiento de dicha sección.

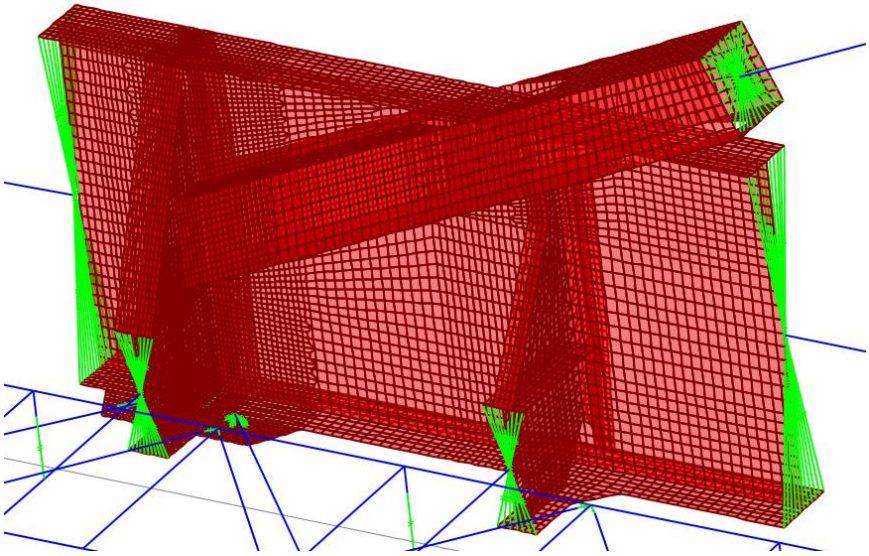


Figura 4-5 Modelo con elementos bidimensionales de la sección que exhibe interacción entre vigas principales y arco

Por otro lado, la consideración del apoyo es distinta en este modelo. La viga principal está conectada a una placa metálica y esta última se encuentra soportada por el apoyo. Como la placa metálica tiene una rigidez inherente a las propiedades del material, se considera que la viga está apoyada en una superficie. A modo de simplificación, se utilizan resortes lineales distribuidos por unidad de área con una rigidez constante k = 285 MN/m^2. Esta rigidez se determinó, de tal manera, que en los puntos de apoyo se permitieran pequeños desplazamientos (unos 5 mm).

4.3 Aplicación de las cargas

Los análisis se ejecutan en el software de análisis estructural a través de una serie de cargas estáticas en distintas posiciones definidas como se muestra en el Capítulo 6. Para efectos de este trabajo se

realizan análisis lineales estáticos de primer orden, considerando pequeñas deformaciones. Para llevar a cabo lo anterior, se define una pista por donde circulan las cargas. Esto se hace a través de una línea de referencia según la ubicación de la vía férrea que se señala en los planos. Se establece un ancho de 1800 mm y se asignan los objetos a los cuales afecta directamente: las vigas longitudinales secundarias y los elementos tipo "*shell*" de las losas que interactúan con ella. De este modo, las cargas se distribuyen a las vigas transversales, transmitiéndolas a las vigas principales y estas finalmente al arco.

4.4 Cargas que actúan sobre la estructura

La principal carga que actúa sobre el puente corresponde al peso propio y carga viva producto del flujo de trenes de pasajeros y de carga. Además de las cargas verticales, se deben considerar efectos secundarios debido al flujo vehicular, como la fuerza centrífuga y las fuerzas de aceleración y frenado de los ferrocarriles. Si bien se consideran todos estos efectos como cargas estáticas, también es necesario considerar la posible amplificación de esfuerzos debido a la naturaleza dinámica de estas solicitaciones, lo que se efectúa indirectamente a través de la utilización de factores de amplificación.

Adicionalmente, la estructura también es solicitada por efectos ambientales. Si bien en República Checa no se producen sismos, presenta un clima adverso que solicita a las estructuras, que se puede traducir en fuertes cargas de viento, además de nieve, humedad y oscilaciones térmicas considerables (temperaturas muy bajas en invierno y muy altas en verano).

4.4.1 Cargas Permanentes

4.4.1.1 Peso Propio – Estructura Principal

El peso de los elementos de la estructura se estima basado en el área de las secciones transversales, el largo de los elementos y el peso específico del material. Para efectos prácticos, el cálculo del peso total de la estructura es generado automáticamente por el software CSiBridge, según un modelo descrito en Capítulo 4.

Para considerar el peso de componentes adicionales del puente (refuerzos, remaches y otros elementos no estructurales) no incluidos en el modelo numérico, el peso por unidad de volumen ρ=78,50 kN/m^3 es incrementado por un factor de amplificación S=1,25 (recomendado por el co-profesor guía), resultando aproximadamente en el peso real del puente.

Tabla 4-1 Peso de la estructura

Elementos	Peso Total (estimado) [kN]
Columnas	75,49
Vigas Longitudinales Arco	825,83
Vigas Transversales Arco	30,35

Elementos	Peso Total (estimado) [kN]
Vigas Transversales Tablero	401,26
Vigas Longitudinales Secundarias	285,67
Arriostramientos	158,44
Vigas Longitudinales Principales	2653,23
Secciones L Grilla	18,48
Secciones U Grilla	31,23
Losa de Hormigón	1165,80
Peso Total Estructura	**5677,01**

4.4.1.2 Peso Propio – Superestructura del Ferrocarril

El peso de la superestructura del ferrocarril se considera como cargas linealmente distribuidas en las vigas segundarias. Está conformada por los rieles (1,7 kN/m según memoria de cálculo), durmientes (200x200x2400, un total de 259) y ángulos de seguridad (L160x100x16). En la Tabla 4-2 se muestran los resultados por cada elemento:

Tabla 4-2 Cálculo peso propio superestructura del ferrocarril

ρ_{acero} [kN/m^3]	ρ_{madera} [kN/m^3]	$g_{k,rieles}$ [kN/m]	$g_{k,durmientes}$ [kN/m]	$g_{k,ángulos\ de\ seguridad}$ [kN/m]
78,5	8,00	0,85	0,87	0,31

4.4.1.3 Peso Propio – Placas de Piso y consolas para cables

Hay placas metálicas en ambos lados del tablero, entre la línea férrea y las vigas principales. Se asume que la carga del peso de estas placas la recibe en su totalidad las vigas principales, por lo que se modelan como una carga linealmente distribuida en dichos elementos. El peso de las placas soportado por cada viga es estimado como: $g_{k,placas}$=1,035 kN/m.

En ambos lados del tablero, justo debajo de las placas de piso (conectadas a ellas), hay dos consolas de acero que sostienen los cables de comunicación. Se consideran como cargas linealmente distribuidas en las vigas principales. Dicha carga es estimada como: $g_{k,consolas}$=1 kN/m.

Los valores de esta sección son obtenidos a través de las memorias de cálculo de la estructura.

4.4.2 Cargas del Tren

4.4.2.1 Cargas Verticales

El puente se carga con el modelo LM71 (ver Figura 2-12), multiplicado por un factor de clasificación α=1 que se utiliza para considerar un tráfico más pesado o más liviano que lo normal. Este modelo se coloca en la posición más desfavorable.

Las cargas verticales del modelo Q_{vi} se dividen longitudinalmente en 3 cargas de acuerdo a la figura 6.4 de EN1991-2. La distancia axial promedio "a_x" es considerada de acuerdo a la distribución de las durmientes, tomando un valor de 600 mm.

El efecto dinámico del tráfico se considera a través del uso del coeficiente dinámicos Φ_2 (distinto para cada elemento) que multiplican las cargas verticales y se calculan según la ecuación (2.5). La longitud determinante de cada elemento L_ϕ se obtiene de la tabla 6.2 de EN1991-2:

Tabla 4-3 Cálculo de coeficientes dinámicos

Elemento	Vano	L [m]	k	L_m [m]	L_φ [m]	Φ_2
Vigas Principales	1	42	1,3	55	71,5	1,000
	2	81	-	-	40,5	1,054
	3	42	1,3	55	71,5	1,000
Vigas Transversales	-	4,4	-	-	8,8	1,341
Vigas Transversales Esviadas	-	1	-	-	3,6	1,668

4.4.2.2 Cargas Horizontales

4.4.2.2.1 Fuerzas de Tracción y Frenado

El valor característico de las cargas de tracción y frenado son considerados de acuerdo a la sección 6.5.3 de EN1991-2. Actúan en las vigas secundarias en dirección longitudinal y son uniformemente distribuidas en un largo de influencia $L_{a,b}$. El valor total de la carga de tracción no debe superar los 1000 kN, mientras que la de frenado no debe ser más que 6000 kN.

Tabla 4-4 Cargas de tracción y frenado

Tracción		Frenado	
q_{lk} [kN/m]	$L_{a,b}$ [m]	q_{lk} [kN/m]	$L_{a,b}$ [m]
33	30,3	20	165

4.4.2.2.2 "*Nosing Force*"

El valor característico de la carga "*nosing force*" Q_{sk}=100 kN es considerado de acuerdo a la sección 6.5.2 de EN1991-2. Dichas cargas actúan como fuerzas puntuales horizontales en las vigas secundarias, perpendiculares a estos elementos y corresponden al efecto de los ejes de un vehículo ferroviario ante defectos geométricos que pueda presentar la línea férrea. En el modelo se consideran las cargas puntuales divididas en 3 de modo similar a las cargas verticales del modelo LM71. Se modelan varios casos en distintas posiciones longitudinales del puente.

4.4.2.2.3 Fuerza Centrífuga

Corresponde a la fuerza reactiva de la fuerza centrípeta que permite el giro del tren debido a las curvas presentes en la vía férrea. El valor característico es considerado de acuerdo a la sección 6.5.1 de EN1991-2. A modo de simplificación, solo se considera el efecto de la carga distribuida del modelo LM71, por lo tanto:

$$q_{tk} = \frac{V^2}{g \cdot r} \cdot (f \cdot q_{vk}) \tag{4.1}$$

Tiene que considerarse como una carga actuando hacia el exterior de la curva en una dirección horizontal y ubicada a 1,80 m sobre los rieles. Como no se consideran los rieles en el modelo, la fuerza actúa en una posición de 2,4 m sobre las vigas secundarias. Debido a esta excentricidad, se definen cargas verticales de igual magnitud y sentido contrario actuando en las vigas secundarias, para modelar el momento que produce. Se modelan 3 casos de carga centrífuga, actuando en cada una de las curvas por separado y otro actuando en conjunto. En la Tabla 4-5 se muestran los resultados.

Tabla 4-5 Cálculo de carga centrífuga

q_{vk} [kN/m]	V [km/h]	g [m/s^2]	r [m]	L_f [m]	f	q_{tk} [kN/m]	h [m]	d [m]	$q_{tk,v}$ [kN/m]
80	60	9,8	200	20	1,00	7,55	2,4	1,8	10,07

4.4.3 Cargas de Viento

Los valores de las cargas son obtenidos de acuerdo a EN1991-1-4. Los cálculos consideran una dirección del viento transversal al puente, según la convención que se señala en la Figura 4-6.

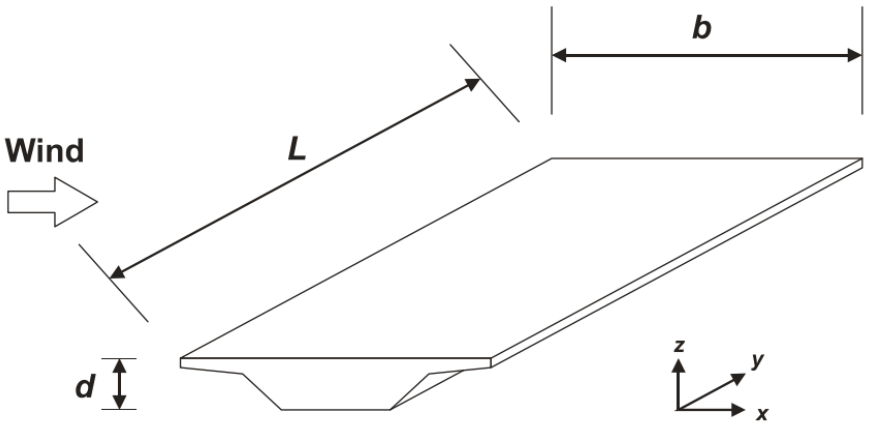


Figura 4-6 Dirección en que actúa el viento y notación dimensiones del tablero [43]

4.4.3.1 Velocidad del viento y presión dinámica

La velocidad del viento y la presión dinámica están compuestas por una componente media y otra variable. La velocidad media v_m proviene de la velocidad básica del viento v_b, la cual depende del clima y la variación de velocidad con la altura, determinada a partir de la orografía y rugosidad del terreno. La componente variable del viento es representada a través de la intensidad de turbulencia.

4.4.3.1.1 Valores básicos

El valor fundamental de la velocidad básica del viento $v_{b,0}$, es la velocidad media representativa en 10 minutos, sin considerar la dirección ni la estación del año, a 10 m sobre el nivel del suelo en un terreno abierto con vegetación baja y aislada de obstáculos (corresponde a categoría II de terreno según tabla 4.1 de EN1991-1-4). La velocidad básica del viento puede calcularse como:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \tag{4.2}$$

Donde:

- c_{dir} es el factor direccional
- c_{season} es el factor de estación

4.4.3.1.2 Valor medio

La velocidad media del viento $v_m(z)$ a una altura z sobre el terreno depende de la rugosidad y orografía del terreno, además de la velocidad básica del viento v_b:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \tag{4.3}$$

Donde:

- $c_r(z)$ es el factor de rugosidad
- $c_o(z)$ es el factor de orografía, considerado igual a 1,0

4.4.3.1.2.1 Rugosidad del Terreno

El factor de rugosidad $c_r(z)$ considera la variabilidad de la velocidad media del viento debido a la altura sobre el nivel del suelo y la rugosidad del terreno, en la dirección considerada del viento:

$$c_r(z) = \begin{cases} c_r(z_{min}) & para \quad z < z_{min} \\ k_r \cdot ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & para \quad z_{min} \leq z \leq z_{max} \\ c_r(z_{max}) & para \quad z_{max} < z \end{cases} \tag{4.4}$$

Donde:

- z_0 es la longitud de rugosidad según tabla 4.1 de EN1991-1-4
- k_r es el factor de terreno que depende de z_0 y se calcula como:

$$k_r = 0{,}19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0{,}07} \tag{4.5}$$

- $z_{0,II}$ es igual a 0,05 (categoría de terreno II)
- z_{min} es la altura mínima definida en la tabla 4.1 de EN1991-1-4
- z_{max} se toma como 200 m

4.4.3.1.3 Turbulencia del Viento

La intensidad de turbulencia $I_v(z)$ a una altura z se define como la desviación estándar de la turbulencia dividida por la velocidad media de la velocidad:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \begin{cases} I_v(z_{min}) & para \quad z < z_{min} \\ \dfrac{k_I}{c_o(z) \cdot \ln(z/z_0)} & para \quad z_{min} \leq z \leq z_{max} \\ I_v(z_{max}) & para \quad z_{max} < z \end{cases} \tag{4.6}$$

Donde:

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I \tag{4.7}$$

- k_I es el factor de turbulencia, con un valor recomendado igual a 1,0.

4.4.3.1.4 Presión dinámica "*peak*"

El valor peak de la presión dinámica $q_p(z)$ a una altura z, que considera la velocidad media y variaciones en el corto plazo, se calcula como:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot {v_m}^2(z) = c_e(z) \cdot q_b \tag{4.8}$$

Donde:

- ρ_a es la densidad del aire
- $c_e(z)$ es el factor de exposición que se define como:

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \tag{4.9}$$

- q_b es la presión dinámica básica, que se calcula como:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot {v_b}^2 \tag{4.10}$$

4.4.3.1.5 Resultados

En los cálculos se considera por separado el caso del tablero y del arco. El terreno corresponde a una categoría II (de acuerdo al Eurocódigo) y la zona de la República Checa, en la que se ubica el puente, coincide con una zona II de viento (de acuerdo al Anexo Nacional del Eurocódigo). Para las alturas de referencia de cálculo, se consideran el centroide del arco y para el tablero el centroide de las vigas principales.

Tabla 4-6 Resultados cálculos presión dinámica "peak"

Caso	z_e [m]	ρ_a [kg/m^3]	c_{dir}	c_{season}	$v_{b,0}$ [m/s]	v_b [m/s]	c_o (z_e)	$z_{0,II}$ [m]	z_0 [m]	z_{min} [m]	k_r	c_r	v_m [m/s]	k_I	I_v	q_p (z_e) [Pa]
Tablero	10,20	1,25	1,0	1,0	25	25	1,00	0,05	0,01	1	0,17	1,18	29,40	1,00	0,14	1086
Arco	14,18	1,25	1,0	1,0	25	25	1,00	0,05	0,01	1	0,17	1,23	30,80	1,00	0,14	1165

4.4.3.2 Cargas de viento

4.4.3.2.1 Tablero

Para calcular las cargas en el tablero se utiliza el método señalado en el capítulo 8 de EN1991-1-4. El método simplificado (utilizado en este trabajo) señala que para puentes la fuerza de viento en dirección transversal se puede obtener de acuerdo a:

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot v_b^2 \cdot C_v \cdot A_{ref,x} \tag{4.11}$$

Donde:

- $A_{ref,x}$ corresponde al área de referencia dada por:

$$A_{ref,x} = d_{tot} \cdot L \tag{4.12}$$

- d_{tot} es la profundidad del tablero, similar a d en la Figura 4-6, aunque también incluye la altura del vehículo si se considera dicho caso.
- C_v es el factor de carga de viento y que se define como:

$$C_v = c_e(z) \cdot c_{f,x} \tag{4.13}$$

- $c_{f,x}$ es el coeficiente de fuerza para acciones de viento en tableros de puentes y viene dado por:

$$c_{f,x} = c_{fx,0} \tag{4.14}$$

- $c_{fx,0}$ corresponde al coeficiente de fuerza sin flujo en extremos libres y se obtiene a partir de la Figura 4-7

Se puede definir la presión externa del viento w_e modificando la ecuación (3.11) a partir de las definiciones anteriormente mencionadas:

$$w_e = \frac{F_w}{A_{ref,x}} = q_p(z) \cdot c_{f,x} \tag{4.15}$$

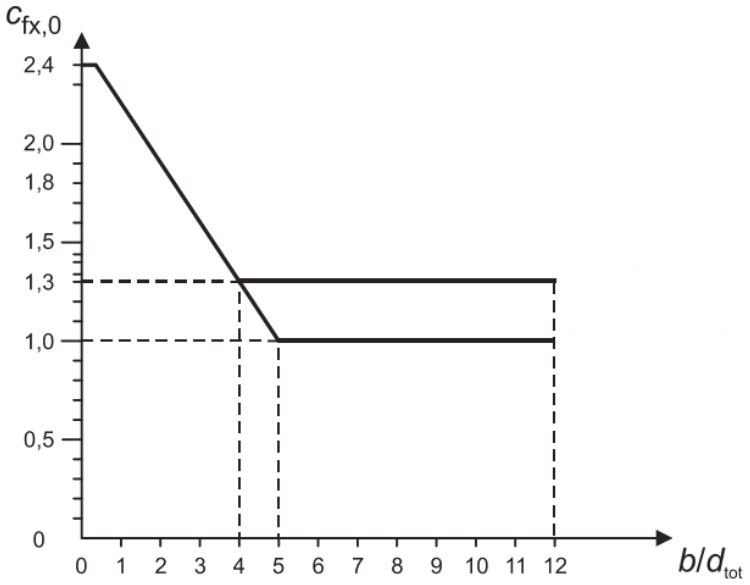


Figura 4-7 Coeficiente de fuerza para puentes [43]

4.4.3.2.2 Vigas del Arco

Para las vigas del arco, se utilizan las disposiciones del capítulo 7.6 de EN1991-1-4, que dan cuenta del procedimiento para determinar las cargas de viento que impactan elementos con secciones rectangulares. De modo similar a la ecuación (4.15), se puede calcular la presión que ejerce el viento cambiando el coeficiente de fuerza:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda \tag{4.16}$$

Donde:

- $c_{f,0}$ es el coeficiente de fuerza para secciones rectangulares con esquinas pronunciadas que se obtiene de la Figura 4-8
- ψ_r es el factor de reducción para secciones cuadradas con esquinas redondeadas (con valor unitario para aquellas que poseen esquinas pronunciadas)
- ψ_λ es el factor para elementos con flujo de extremo libre

El área de referencia viene dada por:

$$A_{ref} = l \cdot b \tag{4.17}$$

Donde:

- l es el largo del elemento estructural considerado

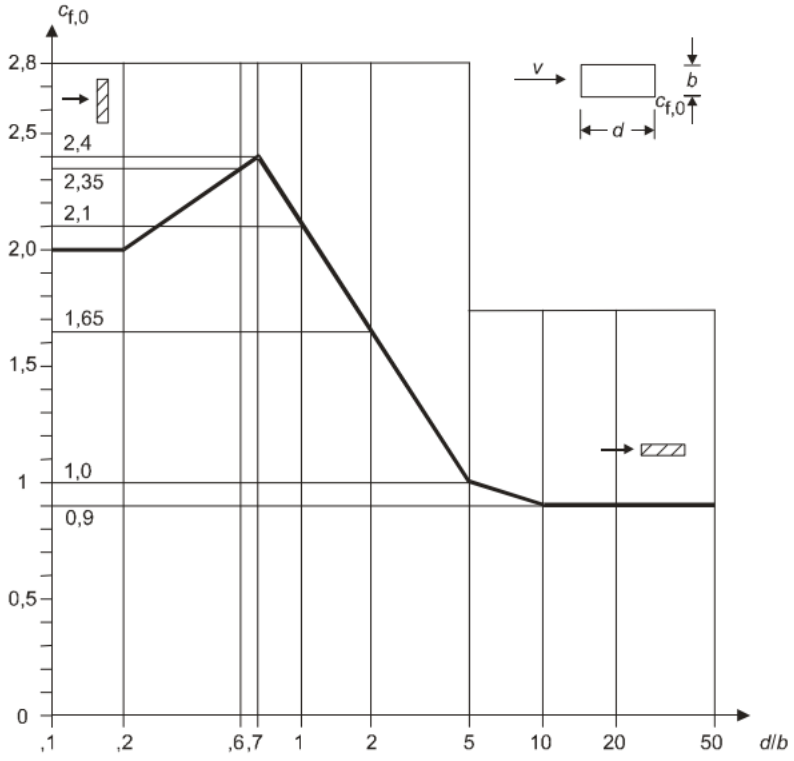


Figura 4-8 Coeficiente de fuerza para secciones rectangulares con esquinas pronunciadas [43]

4.4.3.2.3 Columnas del Arco

Para las columnas del arco se utilizan las disposiciones del capítulo 7.7 de EN1991-1-4, que explican el procedimiento para obtener las cargas de viento sobre elementos estructurales de secciones con bordes pronunciados como perfiles I. De modo similar, se definen los coeficientes de fuerza:

$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi_\lambda \tag{4.18}$$

Se utiliza la misma Figura 4-8, sin embargo, cambia la definición de la geometría de la sección y se considera de acuerdo a la Figura 4-9:

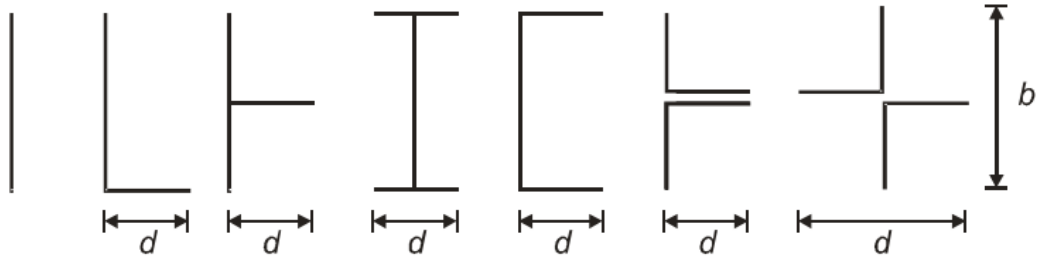


Figura 4-9 Notación secciones con esquinas pronunciadas [43]

4.4.3.2.4 Carga de viento sobre el tren

Además de considerar la carga de viento actuando sobre el puente, se considera que parte de la carga actúa sobre el vehículo (3 m sobre el nivel de las vigas principales). De este modo resulta una carga excéntrica a 2,9 m en relación a las vigas secundarias, generando un momento que se modela a través de cargas verticales de sentido contrario (similar al caso de carga centrífuga).

4.4.3.2.5 Resultados

Para el cálculo de las cargas linealmente distribuidas en los elementos del modelo, se multiplican las presiones por la profundidad del elemento en el que son aplicadas.

4.4.3.2.5.1 Viento

Tabla 4-7 Cargas de viento en tablero

Elemento	b [m]	d_{tot} [m]	b/d_{tot}	$c_{f,x}$	C_v	w_e [Pa]	w_e [kPa]	q_y [kN/m]
Tablero	6,4	2,87	2,230	1,831	5,091	1989	1,989	5,707

Tabla 4-8 Cargas de viento en arco

Elemento	Caso	b [m]	d [m]	d/b	b/d	$c_{f,0}$	ψ_r	L [m]	λ_e	ψ_λ	c_f	w_e [Pa]	w_e [kPa]	q_y [kN/m]
Vigas Arco	A-A	0,68	0,61	0,897	-	2,203	1	7,562	22,24	0,78	1,718	2001	2,001	1,361
	B-B y C-C	0,68	0,60	0,882	-	2,218	1	7,715	22,69	0,78	1,730	2015	2,015	1,370
Columnas Arco	-	0,59	0,20	-	2,93	1,449	-	4,826	16,47	0,73	1,057	1232	1,232	0,246

4.4.3.2.5.2 Viento y Tren

Tabla 4-9 Cargas de viento y tren en tablero

Elemento	b [m]	d_{tot} [m]	b/d_{tot}	$c_{f,x}$	C_v	w_e [Pa]	w_e [kPa]	q_{y1} [kN/m]	q_{y2} [kN/m]	$q_{y2}/2$ [kN/m]	h [m]	d [m]	q_{z2} [kN/m]
Tablero	6,4	5,87	1,090	2,173	6,042	2360	2,360	6,773	7,080	3,540	2,9	1,8	11,407

4.5 Combinaciones

Las combinaciones de las cargas se elaboran de acuerdo a las ecuaciones que se indican en la sección 6.4.3.2 de EN1990:

$$\sum_{j\geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \text{ "+" } \gamma_P \cdot P \text{ "+" } \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \tag{4.19}$$

$$\sum_{j\geq 1} \xi_j \cdot \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \text{ "+" } \gamma_P \cdot P \text{ "+" } \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \text{ "+" } \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \tag{4.20}$$

Donde:

- $G_{\mathbf{k,j}}$ es el valor característico de una acción permanente *j*
- $Q_{k,1}$ es el valor característico de la acción variable principal *1*
- $Q_{k,i}$ es el valor característico de la acción variable secundaria *i*
- P es el valor representativo de una acción de pretensado
- $\gamma_{G,j}$ es un factor parcial para la acción permanente *j*
- $\gamma_{Q,i}$ es un factor parcial para la acción variable *i*
- $\psi_{0,i}$ es un factor para combinación de la acción variable *i*
- ξ_j es un factor de reducción para la acción *j*
- "+" implica "combinado con"

Por otro lado, las cargas de tráfico ferroviario, descritas anteriormente, se agrupan considerando que actúan con distinta magnitud simultáneamente, como se señala en la sección 6.8.2 de EN1991-2. Esto simplifica su introducción a las combinaciones considerando estos grupos de carga como una acción variable única. En la Tabla 4-10 se muestran los grupos considerados.

Tabla 4-10 Grupos de carga para tráfico ferroviario

Grupo de carga	Fuerzas Verticales	Fuerzas Horizontales		
	LM71	Tracción, Frenado	Fuerza Centrífuga	"*Nosing force*"
1	1	1	0,5	0,5
2	1	0,5	1	1
3	0,5	1	0,5	0,5
4	0,5	0,5	1	1

Cabe señalar que los factores dinámicos son utilizados en las combinaciones (se utiliza ϕ_3, de acuerdo a 6.4.5.2 de EN1991-2) amplificando el valor de las cargas verticales del modelo LM71. Los valores de estos coeficientes, los factores parciales y de reducción se muestran en la Tabla 4-11.

Tabla 4-11 Valores de factores parciales, de reducción y coeficientes dinámicos

γ_G	γ_Q	ξ	$\Phi_{3\ \text{VIGAS PRINCIPALES}}$	$\Phi_{3\ \text{VIGAS TRANSVERSALES}}$	$\Phi_{3\ \text{VIGAS TRANSVERSALES ESVIADAS}}$
1,20	1,30	0,85	1,080	1,511	2,000

Los valores de los factores para combinación de acciones variables se muestran en la Tabla 4-12, que son obtenidos de la sección A.2.2.6 de EN1990.

Tabla 4-12 Valores de factores de combinación de acciones variables

Caso de carga	ψ_0
Carga Vertical LM71	0,8
Fuerzas de Tracción y Frenado	0,8
Fuerza Centrífuga	0,8
"*Nosing Force*"	0,8
Viento	0,75

Finalmente, tras combinar todos los valores, se obtienen las combinaciones para cada elemento:

Tabla 4-13 Combinaciones vigas principales

Número	Ecuación	G	V_{LM71}	T/F_{LM71}	C_{LM71}	N_{LM71}	V_{P+T}
C1	6.10a	1,2	1,1232	1,04	0,52	0,52	0,975
C2		1,2	1,1232	0,52	1,04	1,04	0,975
C3		1,2	0,5616	1,04	0,52	0,52	0,975
C4		1,2	0,5616	0,52	1,04	1,04	0,975
C5		1,2	1,1232	1,04	0,52	0,52	0,975
C6		1,2	1,1232	0,52	1,04	1,04	0,975
C7		1,2	0,5616	1,04	0,52	0,52	0,975
C8		1,2	0,5616	0,52	1,04	1,04	0,975
C9	6.10b	1,02	1,404	1,3	0,65	0,65	0,975
C10		1,02	1,404	0,65	1,3	1,3	0,975
C11		1,02	0,702	1,3	0,65	0,65	0,975
C12		1,02	0,702	0,65	1,3	1,3	0,975
C13		1,02	1,1232	1,04	0,52	0,52	1,3
C14		1,02	1,1232	0,52	1,04	1,04	1,3
C15		1,02	0,5616	1,04	0,52	0,52	1,3
C16		1,02	0,5616	0,52	1,04	1,04	1,3

Tabla 4-14 Combinaciones vigas transversales

Número	Ecuación	G	V_{LM71}	T/F_{LM71}	C_{LM71}	N_{LM71}	V_{P+T}
C1	6.10a	1,2	1,57144	1,04	0,52	0,52	0,975
C2		1,2	1,57144	0,52	1,04	1,04	0,975
C3		1,2	0,78572	1,04	0,52	0,52	0,975
C4		1,2	0,78572	0,52	1,04	1,04	0,975
C5		1,2	1,57144	1,04	0,52	0,52	0,975
C6		1,2	1,57144	0,52	1,04	1,04	0,975
C7		1,2	0,78572	1,04	0,52	0,52	0,975
C8		1,2	0,78572	0,52	1,04	1,04	0,975
C9	6.10b	1,02	1,9643	1,3	0,65	0,65	0,975
C10		1,02	1,9643	0,65	1,3	1,3	0,975
C11		1,02	0,98215	1,3	0,65	0,65	0,975
C12		1,02	0,98215	0,65	1,3	1,3	0,975
C13		1,02	1,57144	1,04	0,52	0,52	1,3
C14		1,02	1,57144	0,52	1,04	1,04	1,3
C15		1,02	0,78572	1,04	0,52	0,52	1,3
C16		1,02	0,78572	0,52	1,04	1,04	1,3

Tabla 4-15 Combinaciones vigas transversales esviadas

Número	Ecuación	G	V_{LM71}	T/F_{LM71}	C_{LM71}	N_{LM71}	V_{P+T}
C1	6.10a	1,2	2,08	1,04	0,52	0,52	0,975
C2		1,2	2,08	0,52	1,04	1,04	0,975
C3		1,2	1,04	1,04	0,52	0,52	0,975
C4		1,2	1,04	0,52	1,04	1,04	0,975
C5		1,2	2,08	1,04	0,52	0,52	0,975
C6		1,2	2,08	0,52	1,04	1,04	0,975
C7		1,2	1,04	1,04	0,52	0,52	0,975
C8		1,2	1,04	0,52	1,04	1,04	0,975
C9	6.10b	1,02	2,6	1,3	0,65	0,65	0,975
C10		1,02	2,6	0,65	1,3	1,3	0,975
C11		1,02	1,3	1,3	0,65	0,65	0,975
C12		1,02	1,3	0,65	1,3	1,3	0,975
C13		1,02	2,08	1,04	0,52	0,52	1,3
C14		1,02	2,08	0,52	1,04	1,04	1,3
C15		1,02	1,04	1,04	0,52	0,52	1,3
C16		1,02	1,04	0,52	1,04	1,04	1,3

5 MÉTODO 1: INVESTIGACIÓN PRELIMINAR

El modelo utilizado para la investigación preliminar no considera ninguno de los modelos que utilizan elementos tipo "*shell*"; en cambio, considera solamente elementos tipo *"frame"* y *"link"* (unidimensionales). Cada losa se modela como dos elementos tipo "*frame*" paralelos, cada uno con la mitad de la losa como sección transversal. Se conectan con el resto de la estructura mediante elementos rígidos tipo "*link*". Cabe mencionar que en este trabajo solo se analizan las vigas principales y vigas transversales (considerados como los más importantes de la estructura). Además, se desprecian los esfuerzos de corte debido a que sus efectos no se consideran relevantes frente a la propagación de grietas por fatiga.

5.1 Cálculos Previos

De acuerdo al procedimiento establecido en [22], previo a la evaluación a la fatiga, se realiza un análisis estructural utilizando las combinaciones entre las cargas permanentes y las cargas de servicio. Entre estas últimas se consideran las cargas asociadas al paso del tren (modelo LM71, cargas centrífugas, aceleración y frenado) y las cargas de viento. Las cargas y combinaciones (ver Sección 4.4) se calculan de acuerdo a los métodos señalados en el Eurocódigo [37, 43, 44].

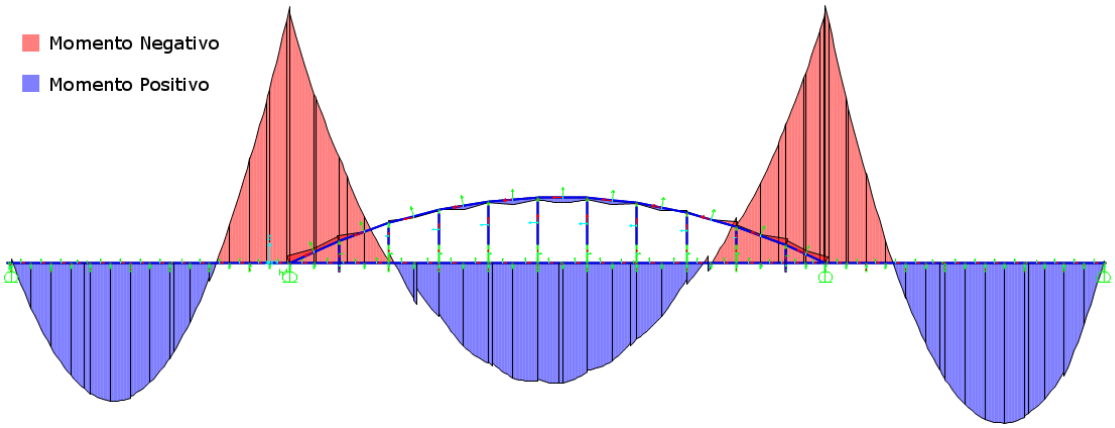


Figura 5-1 Diagrama de Momento en vigas principales debido a cargas permanentes

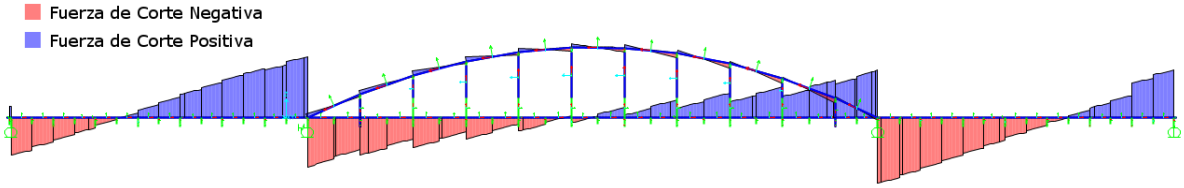


Figura 5-2 Diagrama de Fuerza de Corte en vigas principales debido a cargas permanentes

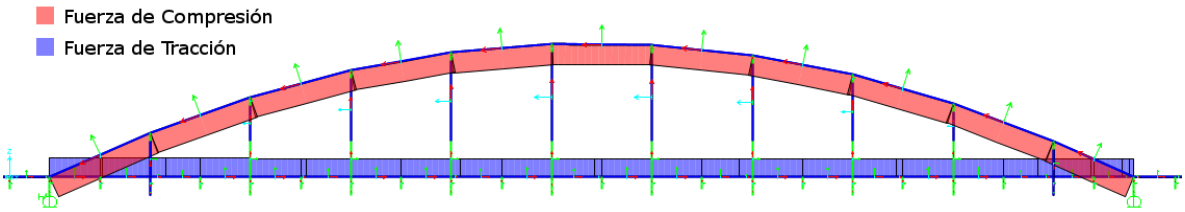


Figura 5-3 Diagrama de Fuerza Axial en vigas principales y arco debido a cargas permanentes

En las Figuras 5-1 a 5-3 se muestran los diagramas de fuerzas internas debido a la acción de las cargas permanentes para las vigas principales y los elementos que conforman el arco. En las Figuras 5-1 y 5-2 se observa que los diagramas presentan ciertas discontinuidades, lo que se debe a la presencia de elementos rígidos tipo "*link*", utilizados para modelar la conexión entre las columnas del arco, vigas principales y vigas transversales. Los elementos rígidos transmiten parte del momento flector y de la fuerza de corte hacia el arco y las vigas transversales, lo cual explica el comportamiento cualitativo de los diagramas. Pese a que los diagramas no corresponden exactamente a una curva "suave", como resultaría en un modelo de una cercha simplificada, se observa un comportamiento bastante similar a lo esperado, por lo cual en esta primera etapa se considera que los resultados obtenidos a través del modelo numérico son válidos.

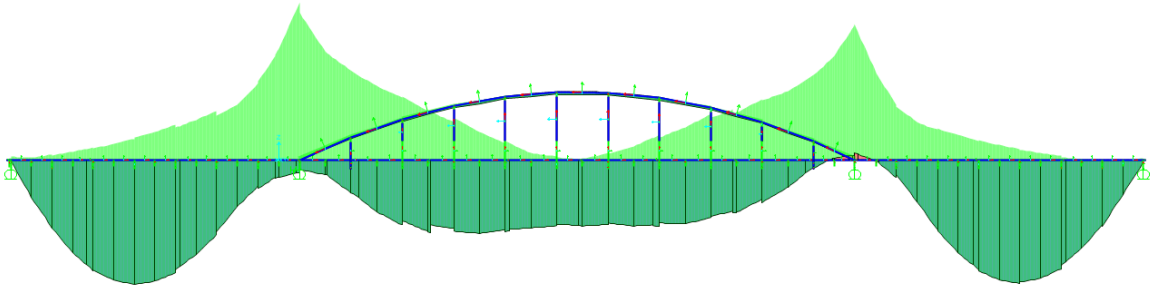


Figura 5-4 Envolvente de Momento en vigas principales

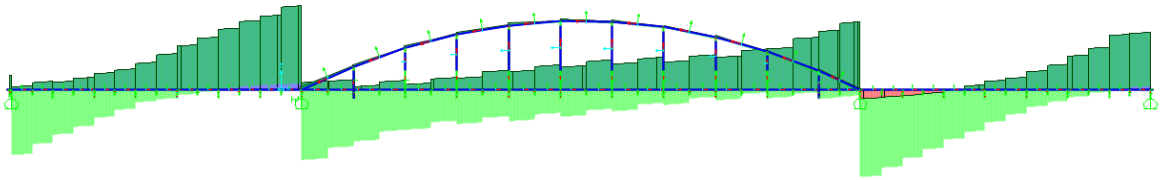


Figura 5-5 Envolvente de Fuerza de Corte en vigas principales

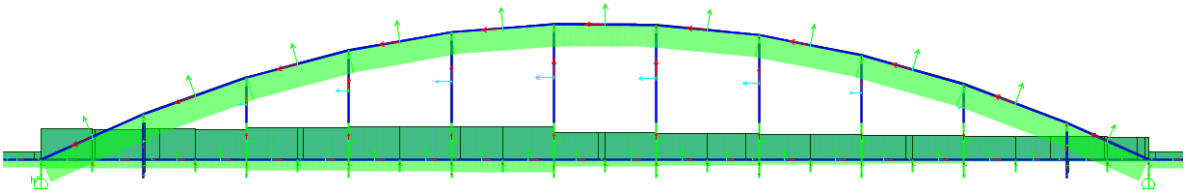


Figura 5-6 Envolvente de Fuerza Axial en vigas principales

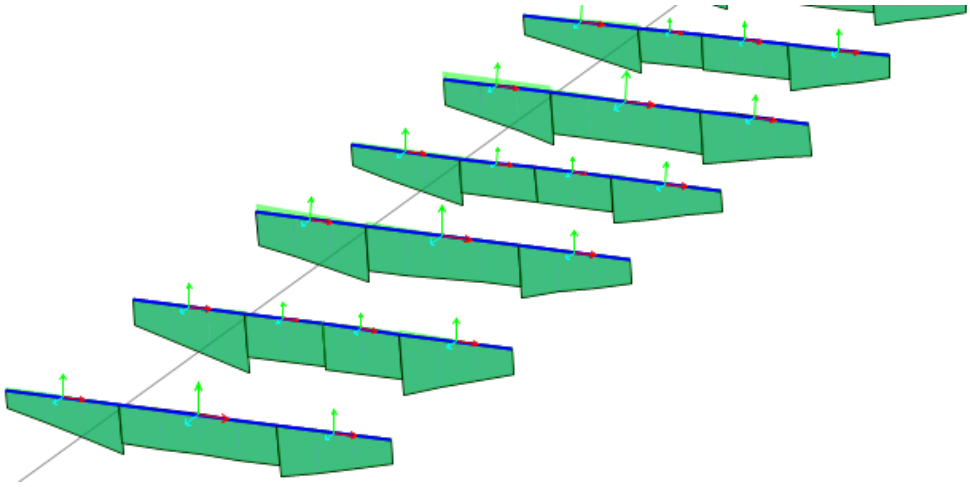


Figura 5-7 Envolvente de Momento en vigas transversales

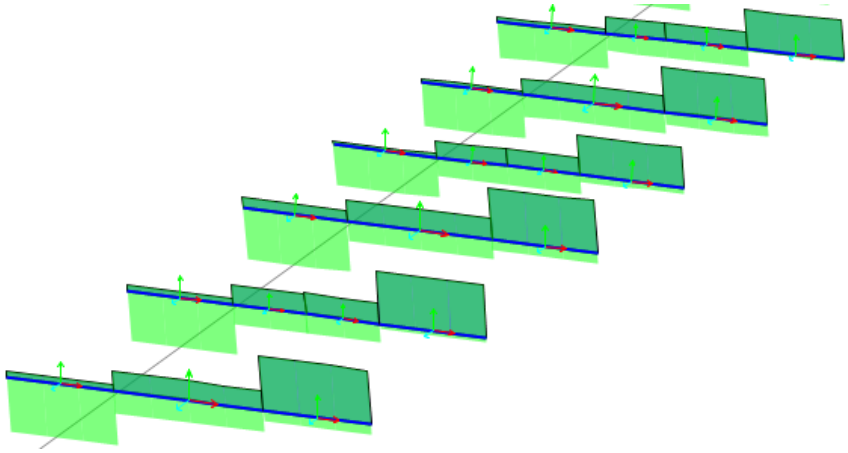


Figura 5-8 Envolvente de Corte en vigas transversales

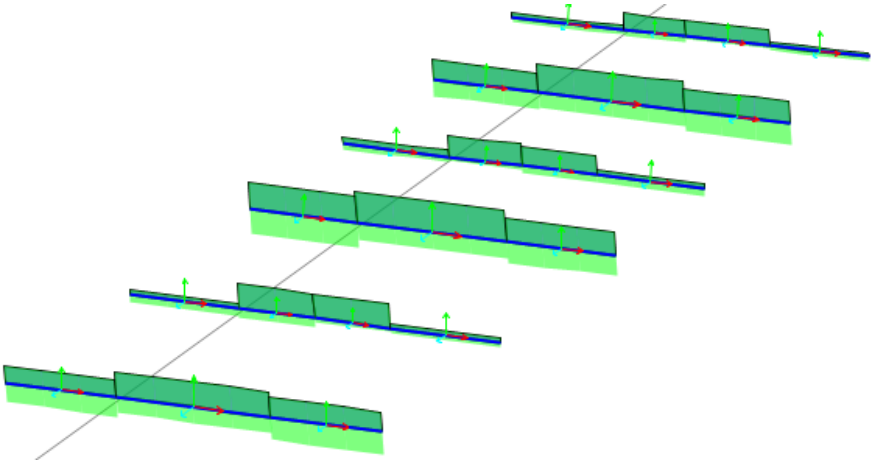


Figura 5-9 Envolvente Fuerza Axial en vigas transversales

En las Figuras 5-4 a 5-9 se muestran las envolventes de los diagramas de fuerzas internas debido a las combinaciones de cargas (ver sección 4.5) para las vigas principales, los elementos que conforman el arco y algunas de las vigas transversales.

Con los resultados del análisis de la estructura se puede verificar si es que el modelo funciona correctamente e identificar previamente los elementos más solicitados. Para esto se efectúa un análisis "*moving load*", mediante el cual se obtienen las fuerzas internas más desfavorables, utilizando los fundamentos de un análisis de líneas de influencia. Los esfuerzos normales se calculan a partir de los resultados del modelo, utilizando la ecuación (5.1).

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M_z}{I_z} \cdot y \pm \frac{M_y}{I_y} \cdot z \tag{5.1}$$

Tabla 5-1 Resultados de esfuerzos máximos y mínimos

Elementos	σ_{max} [MPa]	σ_{min} [MPa]
Vigas Transversales	227	-215
Vigas Transversales Esviadas	224	-232
Vigas Principales	239	-286

De acuerdo a los resultados (ver Tabla 5-1), los mayores esfuerzos se ubican en las vigas principales, mientras que para las vigas transversales, las más desfavorables son aquellas esviadas, ubicadas en los extremos de la estructura. Es importante considerar que la forma en que se modelan las losas en esta etapa es una aproximación y puede no representar fielmente la interacción entre los elementos.

5.2 Evaluación a la Fatiga

Posteriormente, se realiza la evaluación preliminar a la fatiga de acuerdo a las disposiciones específicas para puentes de acero mencionadas en el Eurocódigo [3, 5]. Según estas disposiciones, la evaluación se ejecuta utilizando la ecuación (2.9) de este documento, empleando la categoría de detalle más desfavorable para cada elemento, con un factor de seguridad γ_{Mf}=1,35 (caso más desfavorable); los rangos de esfuerzos se calculan mediante el análisis estructural debido a la acción de las cargas verticales del modelo LM71, sin considerar factores de mayoración. Se utiliza el mismo tipo de análisis estructural mencionado previamente, en conjunto con la ecuación (5.1), para obtener los esfuerzos que se utilizan para la evaluación a la fatiga de cada elemento. La Tabla 5-2 muestra los valores más desfavorables de niveles de seguridad a la fatiga, para los tipos de elementos estudiados. Recordar que para $\mu_{fat} > 1$, el Eurocódigo indica que el elemento en estudio tiene que ser evaluado a través de métodos más sofisticados.

Tabla 5-2 Resumen evaluación preliminar a la fatiga

Elementos	Máx μ_{fat}
Vigas Principales	1,77
Vigas Transversales	2,36
Vigas Transversales Esviadas	1,40

Los resultados muestran que las vigas transversales poseen un factor más desfavorable que las vigas principales; es decir, son las más susceptibles a fallar por fatiga. Para el caso de las vigas principales, los elementos más expuestos al daño por fatiga corresponden a los que están en la cercanía de los apoyos. Los resultados detallados se pueden observar en el Anexo F.

6 MONITOREO DE LA ESTRUCTURA

Basado en los resultados de la etapa anterior y en inspecciones visuales en terreno, se decide realizar un monitoreo de la estructura. De acuerdo a las inspecciones visuales, se pueden apreciar distintos niveles de corrosión en algunos elementos de la estructura. Además, las vigas transversales en contacto con la losa de hormigón (ejes 48-0' y 0-48') poseen un leve agrietamiento en la soldadura del atiesador bajo las vigas longitudinales secundarias. Por otro lado, la soldadura del refuerzo transversal de una de las vigas principales presenta un agrietamiento considerable, en la zona donde se une con la viga transversal, cerca de los apoyos simples (ejes 12-36' y 14-34').

El objetivo del monitoreo es analizar el comportamiento de la respuesta de la estructura en terreno y compararlo con las predicciones que realiza el modelo numérico, además de obtener mayor información sobre las cargas que solicitan a la estructura. Se efectúa con la finalidad de sintetizar un modelo que represente fielmente la respuesta de la estructura dada las condiciones en las que se encuentra, y que a través de su análisis sea posible efectuar estimaciones del comportamiento de los elementos estructurales que la componen; poder verificar la resistencia, los desplazamientos, la vida de fatiga, entre otros, de acuerdo con las normas de diseño vigentes. En la Figura 6-1 se muestra un esquema con el proceso de validación del modelo estructural.

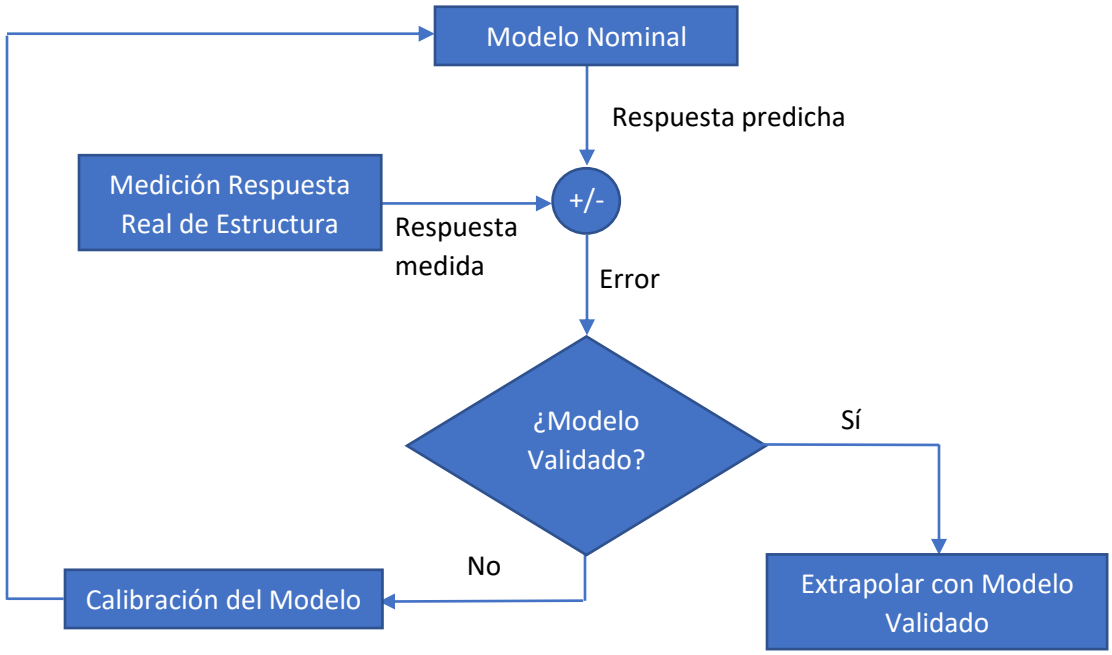


Figura 6-1 Esquema de algoritmo para calibración del modelo

6.1 Campaña de Monitoreo

El monitoreo se realizó durante el período comprendido entre el 31 de octubre al 7 de noviembre de 2017, utilizando varios dispositivos de medición tales como acelerómetros, potenciómetros lineales (desplazamientos de apoyos), radares de interferometría (miden deflexiones), sensores de fibra óptica (miden deformaciones, aceleraciones y desplazamientos), "*strain gauges*", entre otros. En la Figura 6-2a se aprecia un "*strain gauge*" LY11-10/120 fabricado por Hottinger Baldwin Messtechnik, soldado a un refuerzo de la viga principal ubicada inmediatamente sobre el apoyo simple, en el punto 36' (ver Figura 6-3). Estos "*strain gauges*" son uniaxiales, tienen una longitud de 10 mm y una resistencia básica de 120 Ω. La orientación del "*strain gauge*" de la Figura 6-2a se escoge basado en la dirección de los esfuerzos que teóricamente causan el agrietamiento observado en el refuerzo transversal, señalada por el Eurocódigo [3]. En la Figura 6-2b se observa un acelerómetro uniaxial ubicado en el ala superior de una de las vigas principales.

(a) (b)

Figura 6-2 (a) "Strain Gauge" soldada en refuerzo transversal; (b) acelerómetro uniaxial en ala superior de viga principal

En este trabajo solo se utilizan los resultados de las mediciones de deformaciones unitarias, obtenidas a través de los "*strain gauges*" instalados en el puente. La obtención de datos de la respuesta real de la estructura permite validar el modelo numérico, además de realizar una evaluación de daño basada en la cantidad de tráfico que circula por la estructura durante dicha semana. Un total de 24 "*strain gauges*" fueron instalados, distribuidos entre las vigas principales, vigas transversales y algunas secciones del refuerzo que presenta grietas. Un esquema sobre la posición de los dispositivos se muestra en la Figura 6-3, mientras que más información se puede encontrar en el Anexo B.

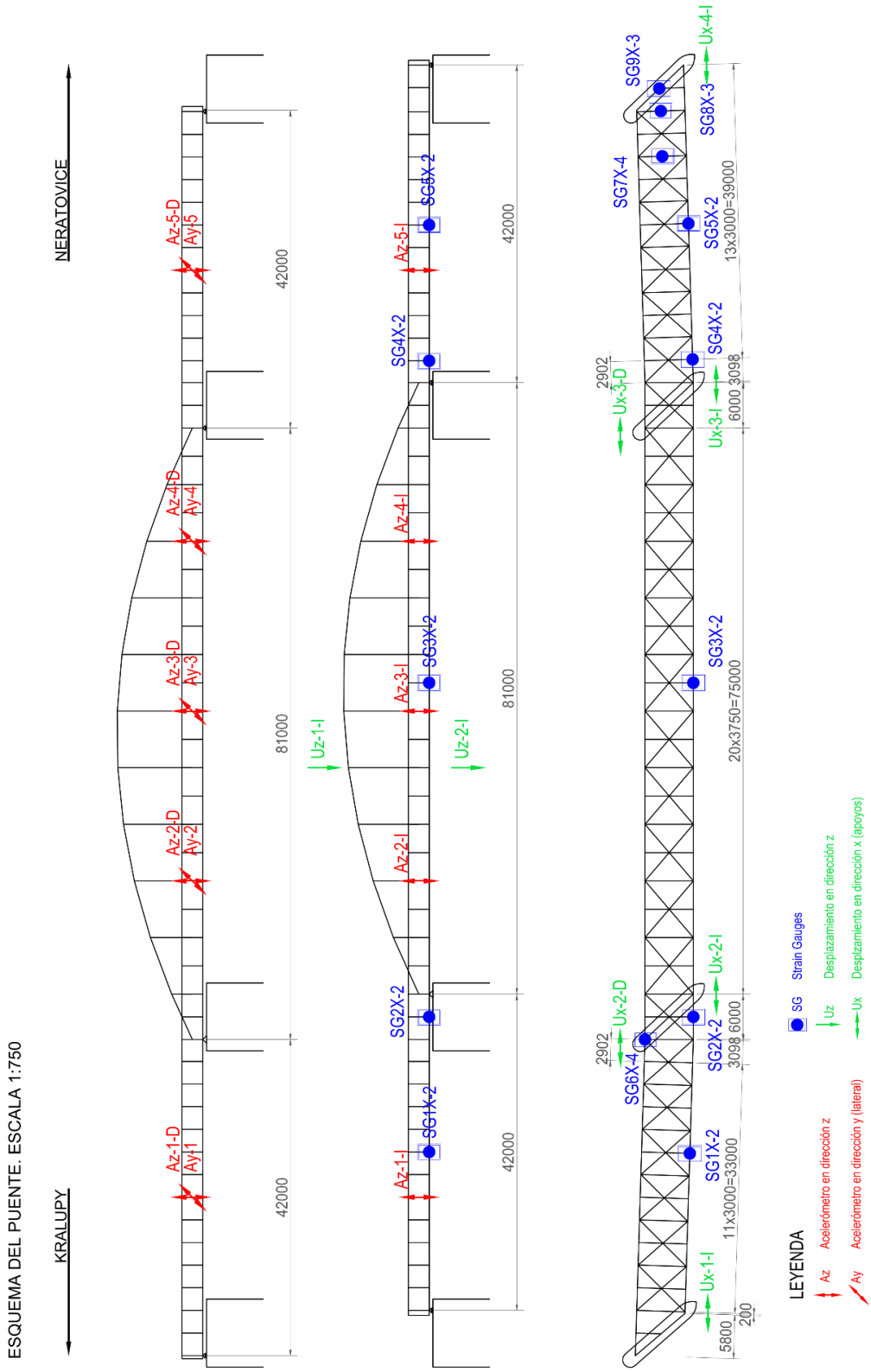


Figura 6-3 Disposición dispositivos de monitoreo

La adquisición de datos se realiza a través de un panel de control EMS DV 803, que admite mediciones hasta en 32 canales. Cada canal incluye un convertidor A/D de 16-bit con una frecuencia de muestreo de hasta 3200 Hz. Los datos son almacenados en una memoria interna y son transferidos a un computador a través de una interfaz Ethernet. Adicionalmente, se utiliza un modem GSM (GPRS/EDGE/3G) para obtener los datos remotamente. En el caso de los datos adquiridos por los "*strain gauges*" se efectúan con una frecuencia de 12,5 Hz, obteniendo más de un millón de datos por día. Debido a esta gran cantidad, se reducen a través de rutinas creadas en MATLAB, eliminando datos durante el período en que no circulan trenes. Esto se realiza comparando la variación de deformaciones entre tiempos sucesivos, y eliminando aquellos datos que estuviesen bajo cierto umbral. El cálculo de los esfuerzos a partir de las deformaciones asume un módulo de elasticidad de 210 GPa para todo el material, de acuerdo a las recomendaciones europeas para la evaluación de estructuras de acero existentes [4].

Figura 6-4 Locomotora TRAXX F140 MS

6.2 Validación del Modelo Numérico

El modelo numérico es validado mediante la comparación de los esfuerzos obtenidos a partir de las mediciones debido al flujo de trenes y los resultados obtenidos de un análisis "*multi-step static*", entregado por el modelo. Para este propósito, se utilizó el registro de la locomotora TRAXX F140 MS (ver Figura 6-4) que tiene cuatro ejes de 211 kN cada uno y espaciamientos de 2 y 8,3 m. Se define en el modelo según se muestra en la Figura 6-5.

Para el caso de las vigas longitudinales y transversales, el modelo utilizado para la validación corresponde a aquel en el que la superestructura de acero está modelada solamente con elementos

unidimensionales, mientras que las losas de hormigón se modelan con elementos tipo "*shell*" (ver Figura 4-1), el cual de denomina "Modelo numérico 1" (sin calibrar). Para mejorar los resultados, se modifican algunas de las propiedades de los elementos tipo "*link*" utilizados para modelar la conexión entre las vigas longitudinales secundarias con las vigas transversales, pasando de ser elementos completamente rígidos, a tener una rigidez de 60 y 130 MN/m en las direcciones u_1 y u_3, respectivamente. Esta modificación se efectúa para modelar el desgaste en las perforaciones de las vigas secundarias, que debido al daño acumulado han aumentado su diámetro. Además, se modifican los elementos de conexión entre la viga transversal con la losa de hormigón, los que se consideran transmitiendo todas las fuerzas internas en SG8X (ver anexo B), sin liberar el momento en la dirección principal. Esta versión se denomina "Modelo numérico 2" (calibrado). Para el caso del refuerzo transversal de la viga principal, se utiliza el modelo que contiene el detalle de la conexión del arco con la viga principal con elementos tipo "*shell*" (ver Figura 4-5). En dicho modelo se considera la grieta mediante la desconexión de los nodos entre las placas metálicas. Para la validación se considera un nodo que aproximadamente coincide con la posición del "*strain gauge*".

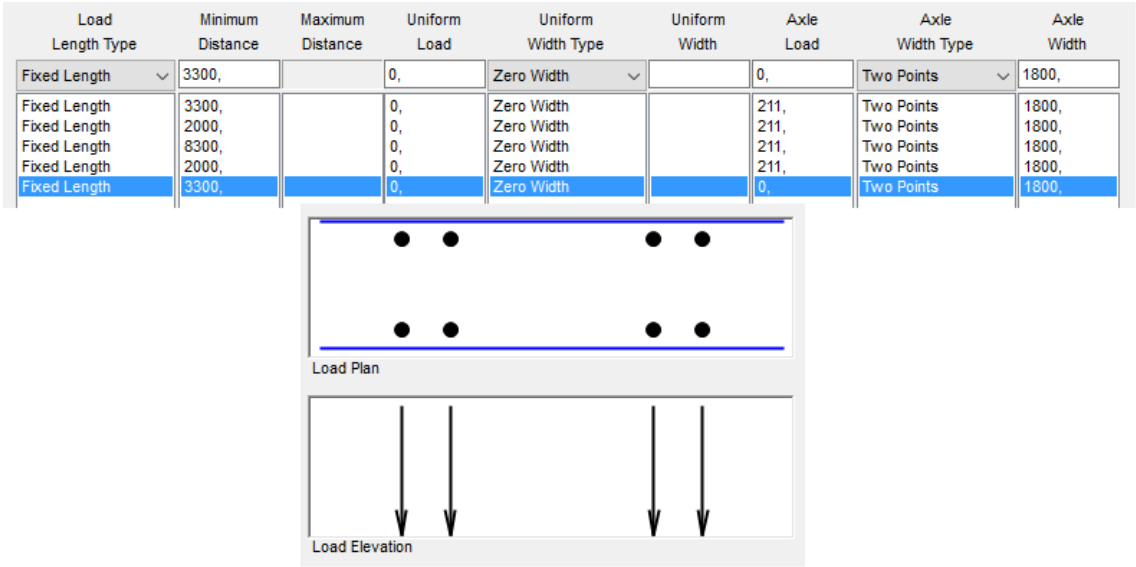


Figura 6-5 Definición de la carga de la locomotora (en mm y kN)

En las Figuras 6-6 a 6-11 se grafican los esfuerzos obtenidos mediante la respuesta de la estructura medida en terreno y la estimación del modelo numérico, además del error absoluto entre ambas respuestas. En las Tablas 6-1 y 6-2 se señalan los valores máximos y mínimos correspondientes a cada una de las figuras, además del error absoluto entre la medición y el modelo numérico considerado. En la Tabla 6-1 se observa que el error absoluto (mínimo) para SG71 es elevado, mientras que en la Tabla 6-2 se aprecia que se reduce considerablemente tras la calibración del modelo.

Tabla 6-1 Comparación entre los esfuerzos normales (MPa) máximos y mínimos obtenidos a través de la respuesta medida en terreno (deformaciones) y respuesta estimada por modelo numérico 1 (sin calibrar)

Caso	Medición		Modelo Numérico 1			
	MAX	MIN	MAX	MIN	ERROR ABS MAX	ERROR ABS MIN
SG11	6,01	-28,43	5,91	-27,13	0,11	1,30
SG63	0,93	-3,27	0,14	-2,80	0,79	0,47
SG71	1,02	-27,12	0,58	-23,05	0,44	4,07

Tabla 6-2 Comparación entre los esfuerzos normales (MPa) máximos y mínimos obtenidos a través de la respuesta medida en terreno (deformaciones) y respuesta estimada por modelo numérico 2 (calibrado)

Caso	Medición		Modelo Numérico 2			
	MAX	MIN	MAX	MIN	ERROR ABS MAX	ERROR ABS MIN
SG11	6,01	-28,43	-	-	-	-
SG63	0,93	-3,27	-	-	-	-
SG71	1,02	-27,12	1,06	-27,39	0,04	0,27

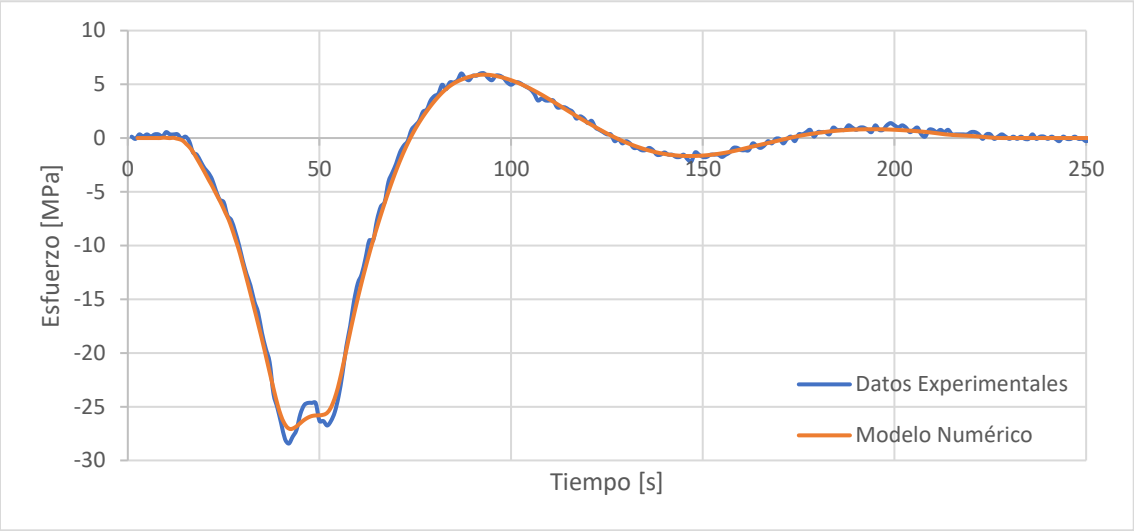


Figura 6-6 Comparación entre esfuerzos obtenidos a través de la respuesta medida en terreno (deformaciones) y estimación del modelo numérico de una de las vigas principales (SG11)

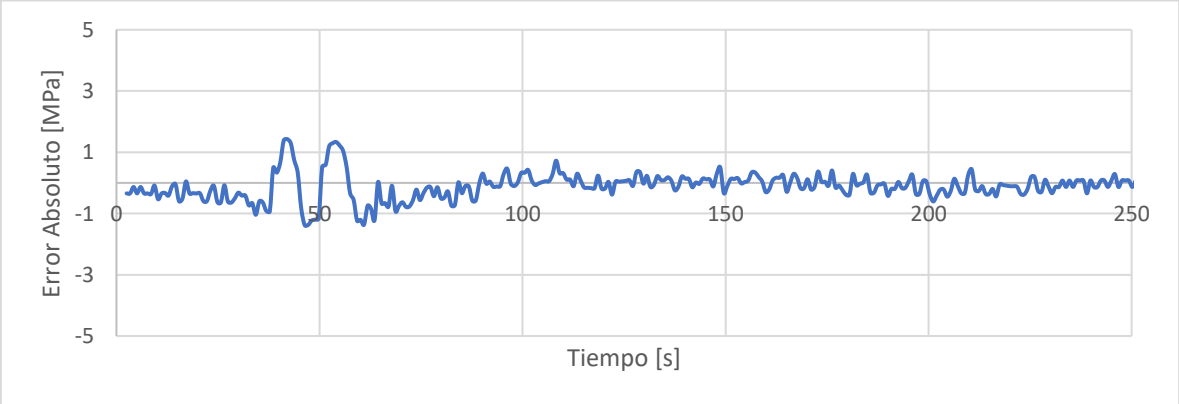


Figura 6-7 Error Absoluto entre esfuerzos obtenidos a través de la respuesta medida en terreno (deformaciones) y estimación del modelo numérico de una de las vigas principales (SG11)

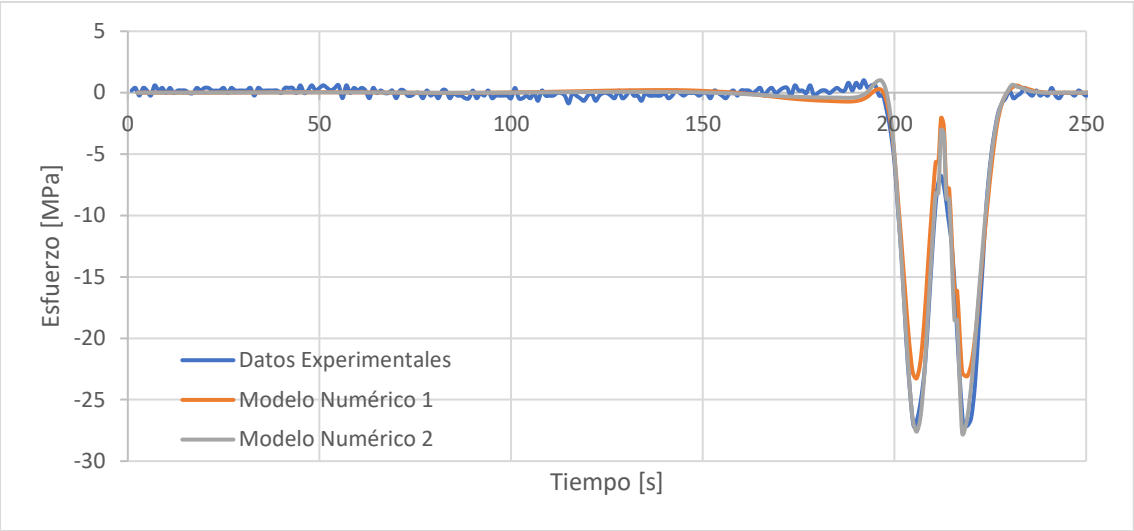


Figura 6-8 Comparación entre esfuerzos obtenidos a través de la respuesta medida en terreno (deformaciones) y estimación del modelo numérico de una de las vigas transversales (SG71)

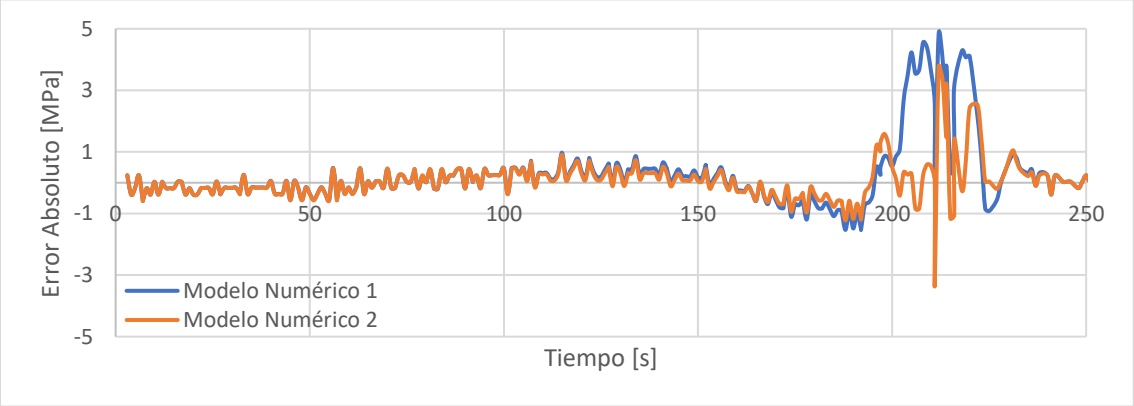


Figura 6-9 Error Absoluto entre esfuerzos obtenidos a través de la respuesta medida en terreno (deformaciones) y estimación del modelo numérico para una de las vigas transversales (SG71)

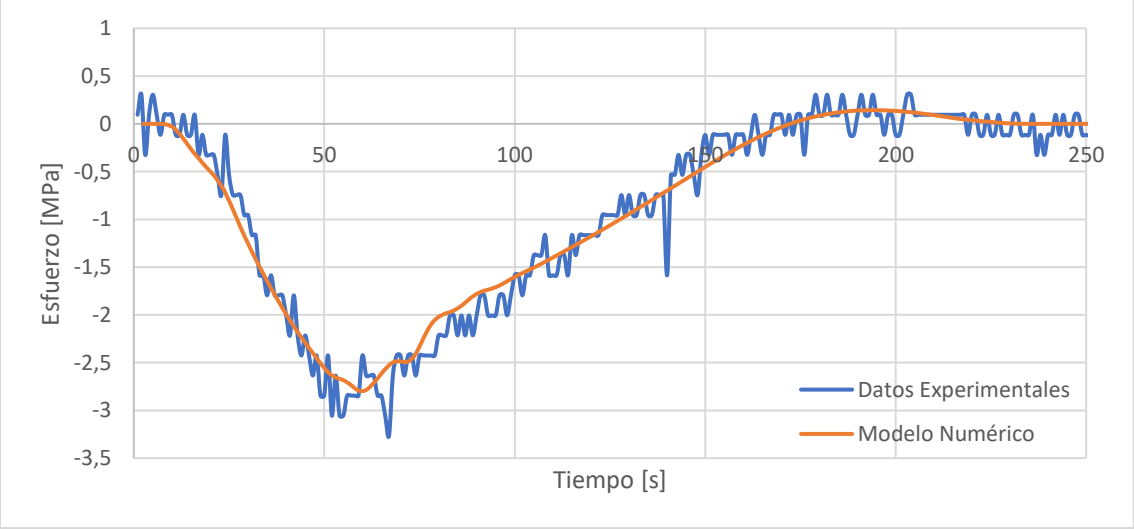


Figura 6-10 Comparación entre esfuerzos obtenidos a través de la respuesta medida en terreno (deformaciones) y estimación del modelo numérico del refuerzo del lado interior (SG63)

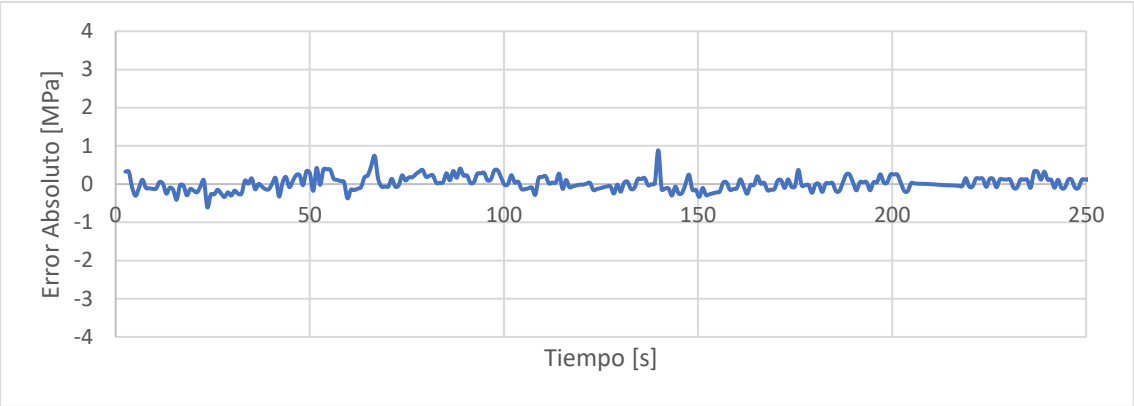


Figura 6-11 Error Absoluto entre esfuerzos obtenidos a través de la respuesta medida en terreno (deformaciones) y estimación del modelo numérico para el refuerzo transversal del lado interior de una viga principal (SG63)

En las Tablas 6-3 y 6-4 se señala el listado completo de los resultados, donde se observa que la respuesta del modelo numérico se comporta de modo similar a la respuesta de la estructura medida en terreno y que los errores absolutos entre los valores máximos y mínimos son bastante bajos. También se observa que en la mayoría de los casos donde los errores son considerables, el "modelo numérico 2" los reduce. Las pequeñas diferencias que se producen en los resultados se pueden deber a defectos constructivos y al deterioro que pueden haber desarrollado ciertos elementos y conexiones, los que no logran transmitir correctamente las fuerzas internas entre las distintas secciones de la estructura. Entre ellos se pueden encontrar remaches sueltos o inexistentes, presencia de grietas en soldaduras, elementos con secciones disminuidas por corrosión, etc.

Tabla 6-3 Resultados validación modelo numérico 1

Caso	Medición		Modelo Numérico 1			
	MAX	MIN	MAX	MIN	ERROR ABS MAX	ERROR ABS MIN
SG11	6,01	-28,43	5,91	-27,13	0,11	1,30
SG12	25,06	-4,97	25,01	-5,23	0,04	0,26
SG21	10,69	-3,59	11,98	-3,21	1,28	0,38
SG22	2,91	-12,42	2,54	-12,46	0,37	0,04
SG31	5,65	-13,04	5,67	-11,67	0,02	1,37
SG32	17,11	-1,37	17,94	-0,28	0,83	1,09
SG41	11,70	-3,84	11,08	-2,96	0,63	0,87
SG42	3,05	-12,07	2,84	-11,71	0,21	0,36
SG51	5,84	-24,82	5,00	-27,00	0,84	2,19
SG52	23,00	-5,77	25,85	-5,19	2,85	0,58
SG61	0,73	-15,44	0,66	-15,85	0,07	0,41
SG62	2,37	-22,62	1,09	-23,90	1,28	1,28
SG63	0,93	-3,27	0,14	-2,80	0,79	0,47
SG64	1,11	-2,46	0,51	-12,13	0,60	9,67
SG71	1,02	-27,12	0,58	-23,05	0,44	4,07
SG72	25,08	-2,85	30,01	-6,91	4,94	4,06
SG73	26,01	-1,92	29,78	-6,71	3,78	4,78

Caso	Medición		Modelo Numérico 1			
	MAX	MIN	MAX	MIN	ERROR ABS MAX	ERROR ABS MIN
SG74	0,89	-26,62	0,92	-23,33	0,03	3,29
SG81	0,84	-2,73	0,03	-3,69	0,81	0,96
SG82	14,38	-2,00	18,41	-4,15	4,03	2,16
SG83	16,03	-4,55	21,00	-2,60	4,96	1,94
SG91	1,98	-7,05	0,62	-6,43	1,37	0,62
SG92	22,86	-2,97	25,00	-1,21	2,14	1,76
SG93	13,64	-2,32	16,84	-3,60	3,20	1,28

Tabla 6-4 Resultados validación modelo numérico 2

Caso	Medición		Modelo Numérico 2			
	MAX	MIN	MAX	MIN	ERROR ABS MAX	ERROR ABS MIN
SG71	1,02	-27,12	1,06	-27,39	0,04	0,27
SG72	25,08	-2,85	24,72	-6,60	0,36	3,74
SG73	26,01	-1,92	24,74	-5,94	1,27	4,01
SG74	0,89	-26,62	1,29	-27,61	0,40	0,99
SG81	0,84	-2,73	0,03	-3,07	0,81	0,34
SG82	14,38	-2,00	13,84	-2,53	0,55	0,53
SG83	16,03	-4,55	14,87	-2,76	1,17	1,78
SG91	1,98	-7,05	0,43	-5,91	1,55	1,14
SG92	22,86	-2,97	18,30	-0,35	4,56	2,62
SG93	13,64	-2,32	11,81	-0,45	1,82	1,88

Sin embargo, es necesario señalar que hay casos en los que el comportamiento no es muy similar. Cabe destacar el lado derecho del refuerzo transversal (“SG64”) y las vigas transversales que interactúan con la losa de hormigón (“SG8X” y “SG9X”). Estas últimas, en especial la viga transversal esviada, muestran un comportamiento que el modelo numérico no es capaz de reproducir con exactitud, por lo que para obtener mejores resultados se sugiere utilizar un modelo más refinado, utilizando elementos tipo “*shell*” o sólidos para modelar la interacción entre elementos. Un posible problema con los resultados del lado derecho del refuerzo transversal es que ha sido modelado completamente conectado a la viga, recibiendo un nivel de carga considerable por la cercanía del apoyo, mientras que es probable que posea un nivel de daño que no es perceptible a simple vista y que no ha sido considerado.

En general se concluye que el modelo numérico calibrado representa fielmente el comportamiento de la estructura para los elementos analizados, es decir, para las vigas longitudinales y la mayor parte de las vigas transversales. Sin embargo, es preferible analizar con precaución los elementos que se encuentran en la vecindad de la losa de hormigón que interactúa con la estructura, ya que su comportamiento es complejo y el modelo no es capaz de representarlo con exactitud. Para conseguir mejores resultados en dichos elementos se sugiere modelar la losa, y los elementos que interactúan con ella, con elementos sólidos.

7 CARGA DE TRÁFICO DE TRENES

Para desarrollar la evaluación a la fatiga se necesita conocer la historia de carga que ha sufrido el puente. En ocasiones, la información histórica en cuanto al flujo de trenes es bastante escasa, por lo que es necesario realizar aproximaciones razonables que permitan continuar con los cálculos.

7.1 Fuentes utilizadas

Para la estimación de la carga histórica del puente, se utilizan tablas de operación de trenes entregadas por la SŽDC ("*Správa železniční dopravní cesty*" en checo – Administración de infraestructura ferroviaria) que considera el período entre los años 2005-2015 y un desglose por localidades que incluye la ubicación del puente. Para el período entre los años 1960-2003, se utilizan datos publicados en la disertación de doctorado [45], disponibles en línea, y que corresponden a datos generales de la red completa de la República Checa. En la Figura 7-1 se puede observar la evolución del volumen de carga a través del tiempo.

7.2 Carga histórica

7.2.1 Período 2005-2015

En las tablas utilizadas, los datos se encuentran ordenados por sectores que son propiedad del estado checo. Para cada sector se señala el volumen de tráfico, la longitud, el número de vías férreas y las constantes para determinar la carga de tráfico resultante. El sector en el cual el puente analizado se encuentra corresponde a "*Chvatěruby - Kralupy nad Vltavou*". Los datos correspondientes se muestran en el Anexo D.

7.2.2 Período 1960-2003

Los datos utilizados para este período corresponden a la carga total (anual) de la red completa de la República Checa. Sin embargo, para el período 1960-1992 los datos consideran como red total a la red de Checoslovaquia (República Checa y Eslovaquia), mientras que para el período entre 1993-2003 sólo a la de República Checa. Para obtener la carga de la localidad, se efectúa la siguiente aproximación: basado en los datos del año 2005 (último año para el que se cuenta con datos del sector considerado), se calcula el porcentaje al que corresponde la localidad analizada del total de la red, para cada uno de los períodos recién señalados. Utilizando las proporciones obtenidas, se calcula la carga en el sector para cada año, a partir de los valores tabulados de la red completa (ver Anexo D).

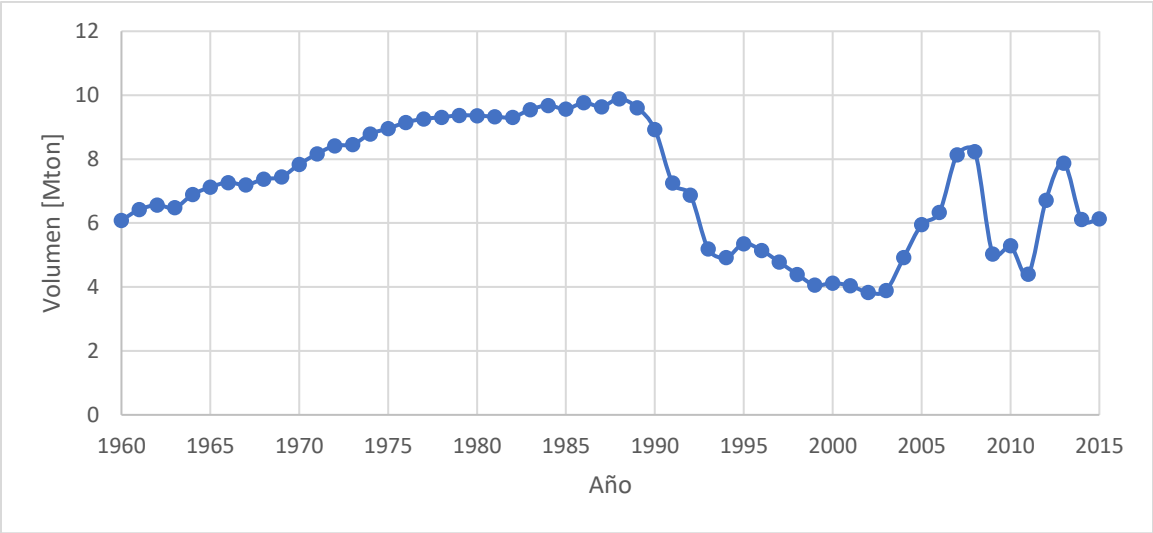


Figura 7-1 Evolución del volumen de tráfico (anual) en el puente

7.3 Carga actual

Para determinar la carga actual del puente se utilizan dos métodos dependiendo del elemento analizado. Primero, se utilizan directamente las mediciones obtenidas a través de los "*strain gauges*", para aquellos elementos en los cuales miden las deformaciones. En segundo lugar, se utilizan los resultados del modelo numérico, para lo cual se seleccionan trenes representativos que circularon por el puente durante el período de monitoreo y se definen dentro del modelo. La SŽDC entregó información detallada sobre dichos trenes.

7.3.1 Selección de Trenes

La SŽDC entregó información sobre 74 trenes de carga que cruzaron por el puente durante el período de medición. En dichos documentos, se señala el tipo de locomotora utilizada, los tipos de vagones, peso y largo total del tren, número de vagones, número de ejes y peso de los vagones. Algunas especificaciones de estos trenes se señalan en el Anexo D y debido a la gran variabilidad que presentan, se utilizan algunas herramientas de la estadística para su selección.

Se identifican las variables relevantes para clasificar los trenes, las cuales corresponden al peso total del tren, número de ejes, número de vagones, largo del tren (en metros) y peso total de los vagones (en toneladas). Si bien la velocidad de los ferrocarriles también es importante, especialmente para realizar análisis dinámicos, no se considera en este trabajo debido a que por la estructura sólo circulan vehículos a bajas velocidades (menores a 20 km/h). A causa de esto, se desestiman los efectos dinámicos de las cargas vehiculares y solamente se llevan a cabo análisis lineales estáticos que se consideran válidos para este estudio. Por otro lado, existen correlaciones lineales entre algunas de las variables con el número de ejes, como se aprecia en las Figuras 7-2 y 7-3. Se observa que el número

de vagones exhibe un coeficiente de correlación al cuadrado de 0,9737; el largo del tren uno de 0,9776 y el peso total de los vagones uno de 0,9116. Las ecuaciones de dichas correlaciones se muestran en los gráficos. Debido a estos resultados, se consideran como variables independientes el número de ejes y el peso total del tren (no presenta correlación, debido a la aleatoriedad de los vagones con carga).

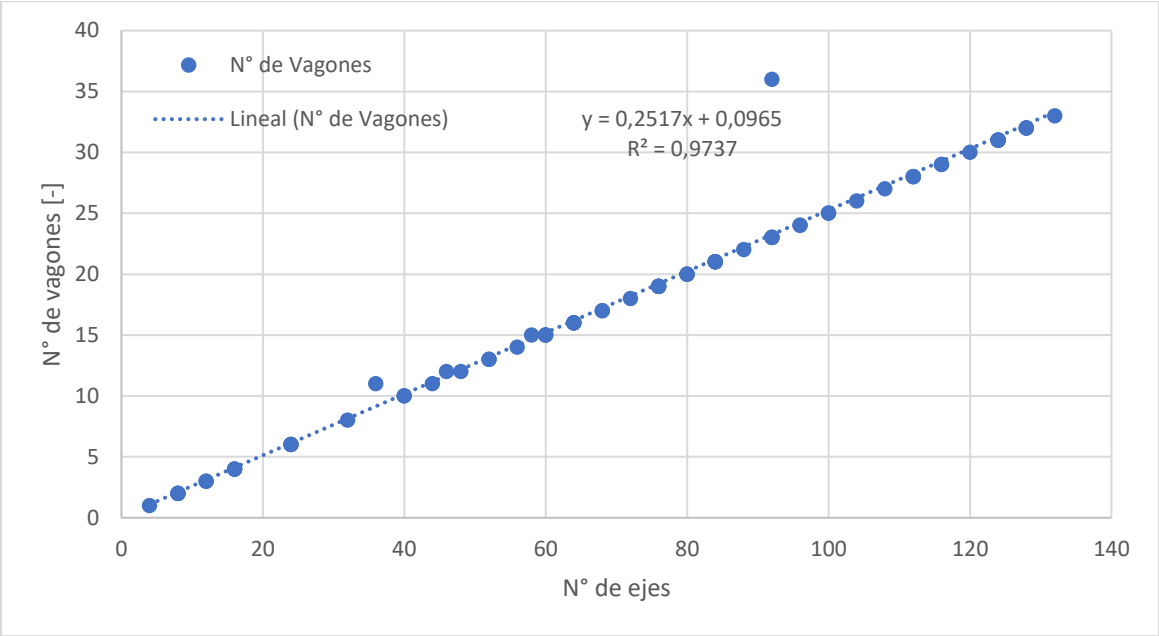


Figura 7-2 Correlación entre N° de ejes con N° de vagones

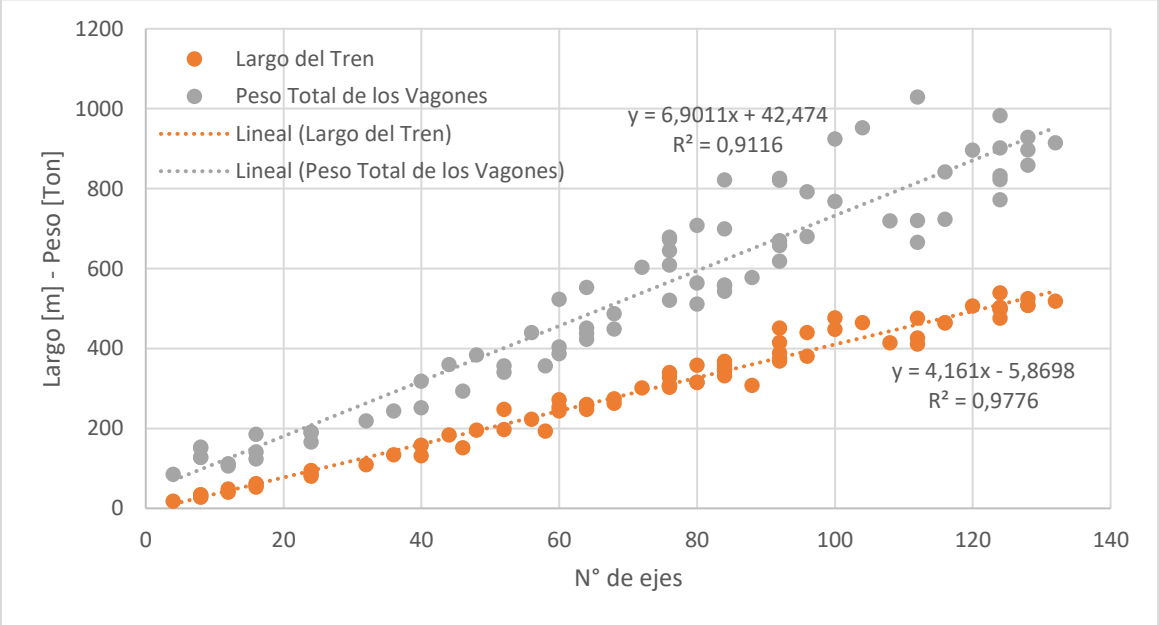


Figura 7-3 Correlación entre N° de ejes con largo del tren y peso total de los vagones

Se definen clases para estas dos variables, agrupando los trenes en un histograma bivariado como se muestra en la Figura 7-4. Para cada clase del peso total del tren, se escoge al menos un tren correspondiente al grupo que posee una mayor frecuencia (en algunos casos se escogen dos). Se seleccionan aquellos trenes que presentan características cercanas a los indicadores de posición de la clase analizada. Para mayor información ver Anexo D.

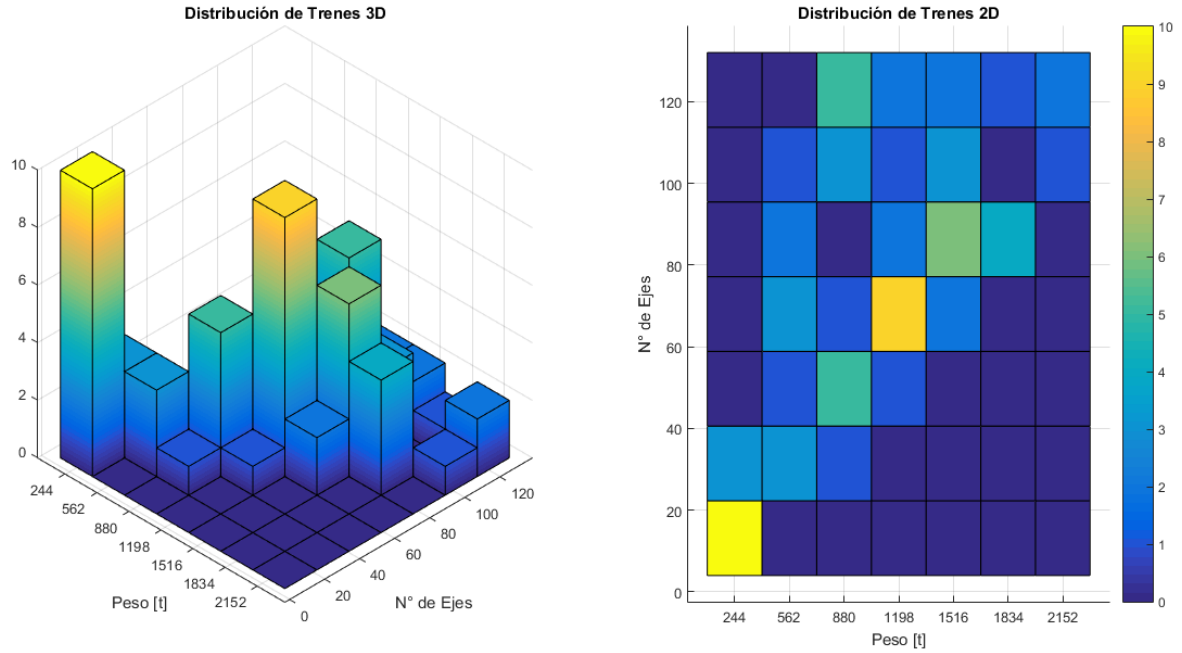


Figura 7-4 Histograma Bivariado de trenes

De este modo se seleccionan trenes con distintos largos, peso total, número y tipo de vagones, número de ejes y distribución de carga, representativos de la muestra disponible. Se define cada tren en el modelo numérico, de acuerdo a las dimensiones disponibles en un catálogo de vagones en línea [46] y una base de datos de locomotoras. En la Figura 7-5 se puede observar un tren de carga que actualmente circula por el puente.

Figura 7-5 Tipo de tren que circula por el puente

8 MÉTODO 2: INVESTIGACIÓN DETALLADA

Con el fin de estimar con mayor exactitud la vida de fatiga de los elementos, e intentar demostrar que la causa de la grieta encontrada en el puente corresponde a agrietamiento por fatiga, se ejecuta una segunda investigación. Para llevar a cabo esto, se utiliza un modelo numérico calibrado y más detallado (ver Capítulos 4 y 6), además de utilizar el modelo de acumulación lineal de daño (ecuación (2.6)), en el cual se utilizan espectros de carga basados en las mediciones realizadas en terreno y una muestra de los trenes que circularon por el puente durante el monitoreo (ver Capítulos 6 y 7). Adicionalmente, se efectúa un análisis de sensibilidad para comprender como afectan en los resultados de acumulación de daño algunos de los parámetros utilizados en los modelos de predicción.

8.1 Análisis Estructural

Durante esta etapa se utiliza el modelo descrito en el Capítulo 4, que contiene la sección de una viga principal y su conexión con el arco modelada con elementos tipo "*shell*" (ver Sección 4.2.2 y Figura 4-5). Además, considera como carga de tráfico los trenes escogidos en el Capítulo 7. En las Figuras 8-1 y 8-2 se puede observar la distribución de esfuerzos normales (en dirección vertical), para la posición más desfavorable de la locomotora TRAXX F140 MS (ver Figura 6-3), en el refuerzo de la viga principal correspondiente al eje 12-36'. A modo de comparación, se muestran dos modelos distintos, a la izquierda se ubica un modelo sin agrietamiento y a la derecha uno agrietado (ver Capítulo 6).

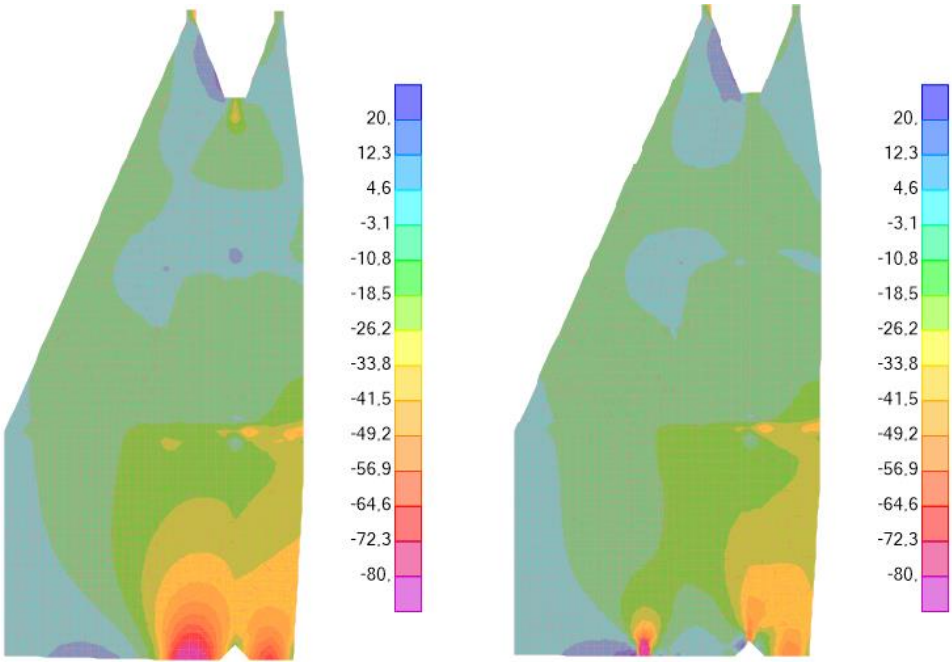


Figura 8-1 Esfuerzos verticales debido a cargas permanentes en el refuerzo transversal. (Nota: valores en MPa).

Se observan esfuerzos de compresión elevados cerca de la soldadura debido a las cargas permanentes. Un mínimo de -97 MPa se observa en el modelo sin grieta, mientras que en el modelo que la incluye se observa un mínimo de -268 MPa. Pese a que a primera vista pareciera que hay mayores esfuerzos en la figura de la izquierda (mayor área con colores de magnitudes elevadas), los valores de mayor magnitud se observan en el modelo agrietado. Esto ocurre debido a la concentración de esfuerzos que se produce en la vecindad de la grieta y a que el modelo no considera el efecto paliativo que produce el material circundante al estar en compresión.

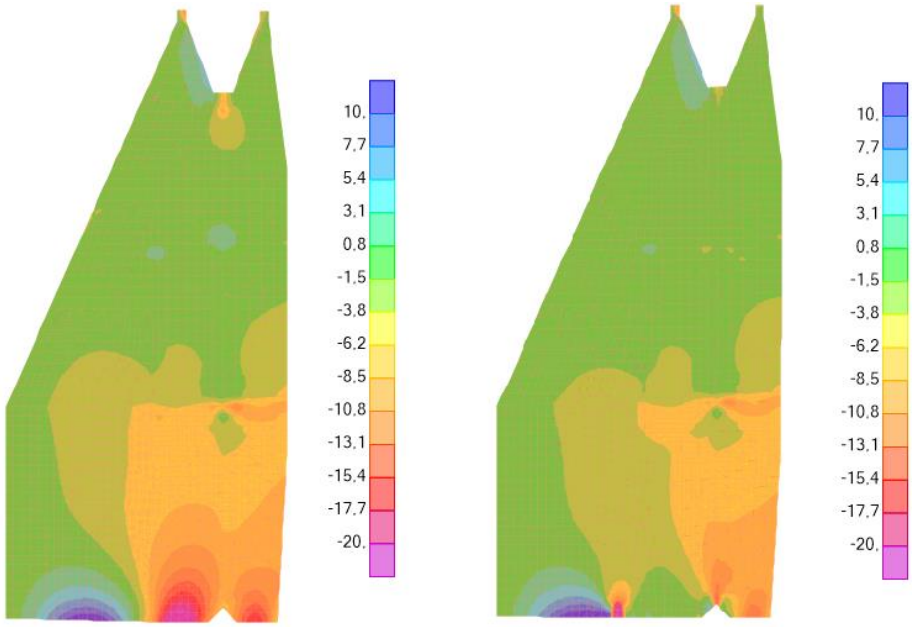


Figura 8-2 Esfuerzos verticales en refuerzo debido a la carga del tren. (Nota: valores en MPa).

Una situación parecida se observa para el caso de la carga de tren, en el cual se utiliza el mismo vehículo que para la validación del modelo (ver Figuras 6-2 y 6-3). En este caso se observan esfuerzos de -30 MPa para el modelo sin la grieta y -85 MPa para el modelo agrietado. Nuevamente, se produce una amplificación en el modelo agrietado por la misma razón señalada en el párrafo anterior.

A modo de complemento se elabora un modelo simplificado, en dos dimensiones, de una sección transversal del refuerzo suponiendo que no está agrietado. Para poder observar la compleja distribución de esfuerzos que pueden presentar las soldaduras, se introduce el esfuerzo en compresión de mayor magnitud obtenido de la carga de tren (-30 MPa), como carga en dicho modelo. Para obtener una geometría aproximada de la soldadura se realizaron mediciones en terreno, las que muestran deficiencias de fabricación y discrepan con las medidas de los planos.

En la Figura 8-3 se observa una amplificación de los esfuerzos en los puntos de conexión entre el refuerzo y la soldadura. Los esfuerzos más elevados se encuentran en el punto de conexión inferior,

donde se alcanzan valores de hasta -250 MPa. En el lado superior izquierdo se alcanzan esfuerzos de hasta -75 MPa.

A partir de estos resultados, se observa que el refuerzo transversal y las soldaduras de esta sección de la viga principal soportan esfuerzos considerables, por lo que es necesario utilizar una categoría de detalle de acuerdo a esta condición.

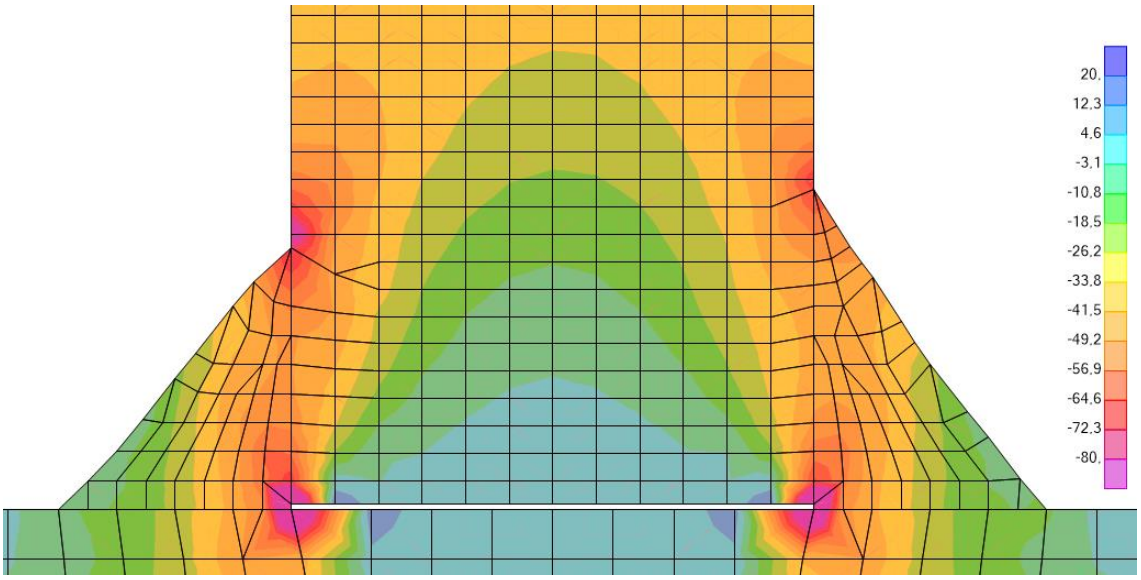


Figura 8-3 Modelo simplificado de la sección transversal del refuerzo. (Nota: Valores en MPa).

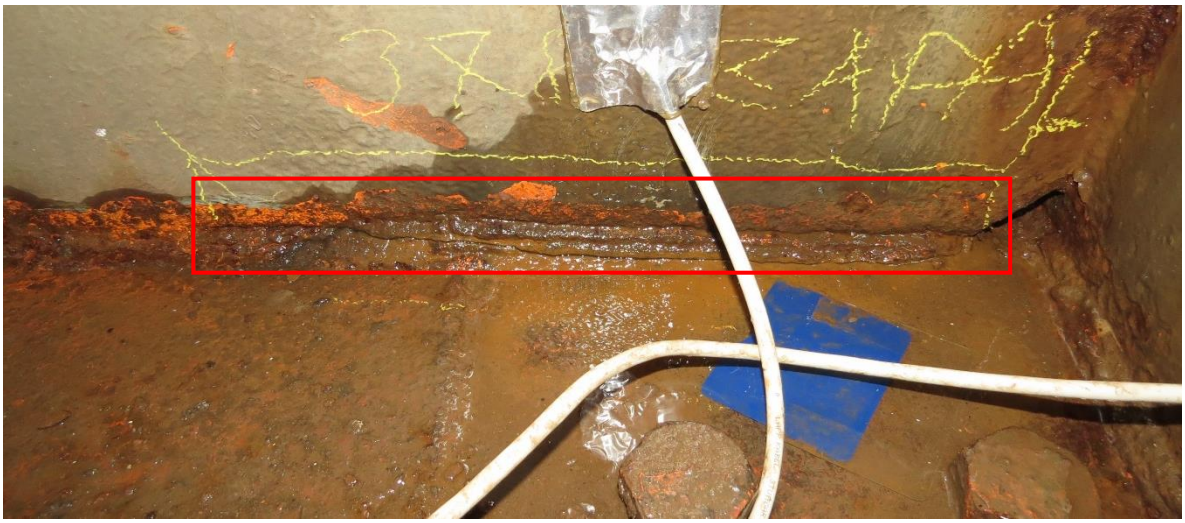


Figura 8-4 Ubicación de la grieta en el refuerzo transversal

La Figura 8-4 muestra el refuerzo transversal que se encuentra agrietado, que se ubica en el punto 14 de acuerdo al esquema global del puente (ver Figura 3-3), inmediatamente sobre el apoyo simple. Basado en lo que se observa en la Figura 8-4 y las tablas del Eurocódigo [3], se establece que la categoría del detalle $\Delta\sigma_c$ es igual a 36 MPa. Sin embargo, como se encuentra en compresión, y se

puede considerar como una condición levemente favorable, se considera una categoría de detalle $\Delta\sigma_c$ igual a 40 MPa.

8.2 Espectros de Carga

Para calcular los espectros de carga se utiliza el software "*Stress spectrum generator*", desarrollado por el Ingeniero Civil Martin Macho, actualmente alumno de doctorado de la Universidad Técnica Checa en Praga. Dicho software implementa las reglas del método "*rainflow*", de acuerdo a la definición mencionada en la sección 2.3.2.2, a partir de una historia tiempo de carga.

Para las vigas principales y vigas transversales, el espectro de cargas se obtiene directamente de las mediciones de los "*strain gauges*", considerando el período completo de medición de aproximadamente 7 días (ver Figuras 8-5, 8-6 y 8-7). En dichas figuras, cada "*peak*" corresponde al paso de un tren de carga a través del puente, mientras que la variación de la respuesta media se relaciona con la componente climática que provoca dilataciones y compresiones en el material. La magnitud de estas variaciones oscila en el transcurso del tiempo, de acuerdo a la temperatura, humedad, radiación solar y otras componentes medio ambientales en determinado instante. En cambio, el refuerzo transversal de la viga principal se analiza a través del modelo numérico, utilizando los resultados de los análisis "*multi-step static*" debido a la circulación de cada uno de los trenes en consideración. Para este caso, se obtienen los valores de los esfuerzos verticales (dirección para la evaluación a la fatiga establecida en el Eurocódigo [3] para dicho detalle estructural) más desfavorables de tres nodos colindantes y se trabaja con el valor promedio.

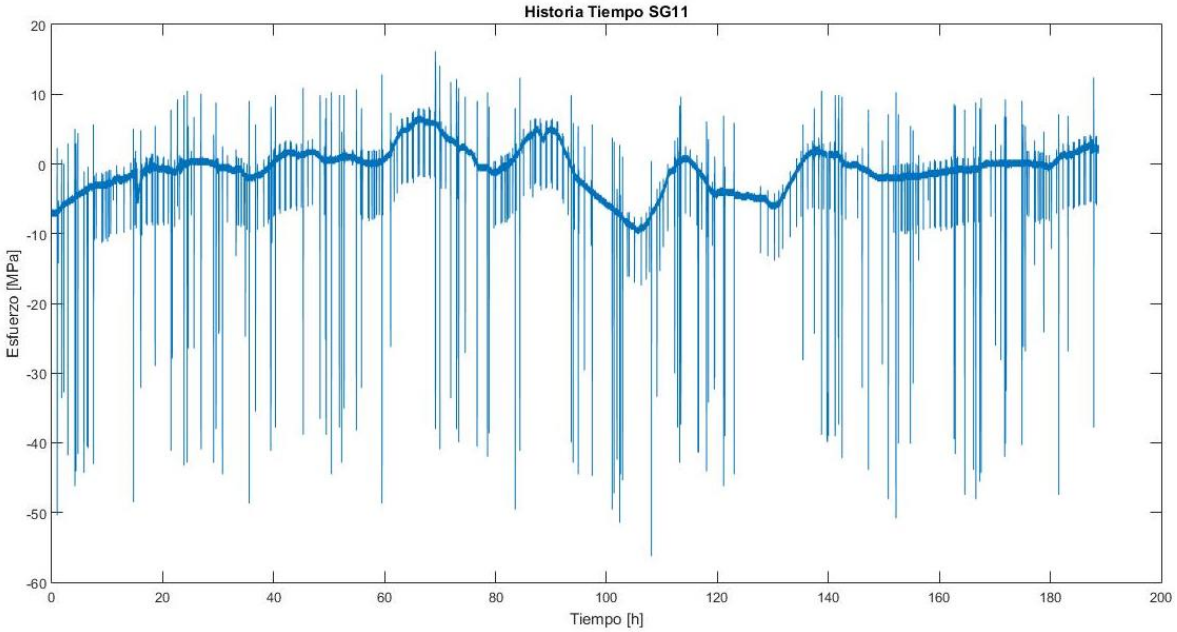


Figura 8-5 Historia tiempo de esfuerzos medidos en viga principal (SG11)

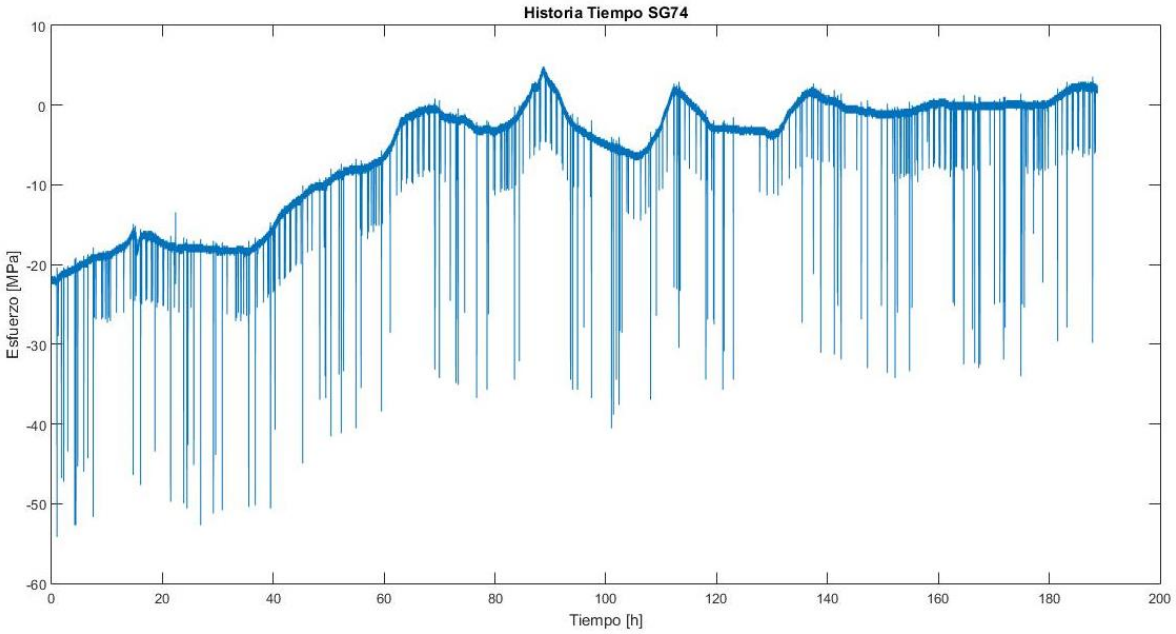


Figura 8-6 Historia tiempo de esfuerzos medidos en viga transversal (SG74)

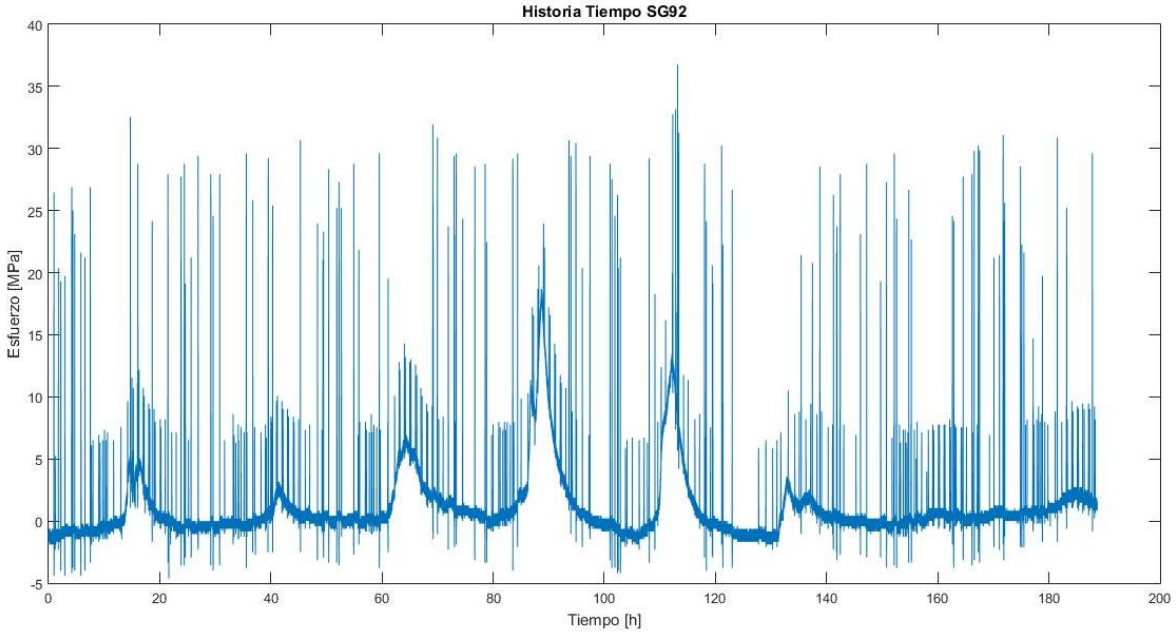


Figura 8-7 Historia tiempo de esfuerzos medidos en viga transversal esviada (SG92)

Los espectros de demanda obtenidos a través de la historia tiempo corresponden a una semana de funcionamiento del puente, por lo que son multiplicados por 52 semanas para estimar el espectro correspondiente al año 2017 (ver Figuras 8-8, 8-9 y 8-10). Cada espectro obtenido a través del análisis estructural, debido la circulación de los trenes, se multiplica por la frecuencia asociada a cada

vehículo y se superponen en un espectro único, el cual se multiplica por el número de semanas en un año (ver Figura 8-11).

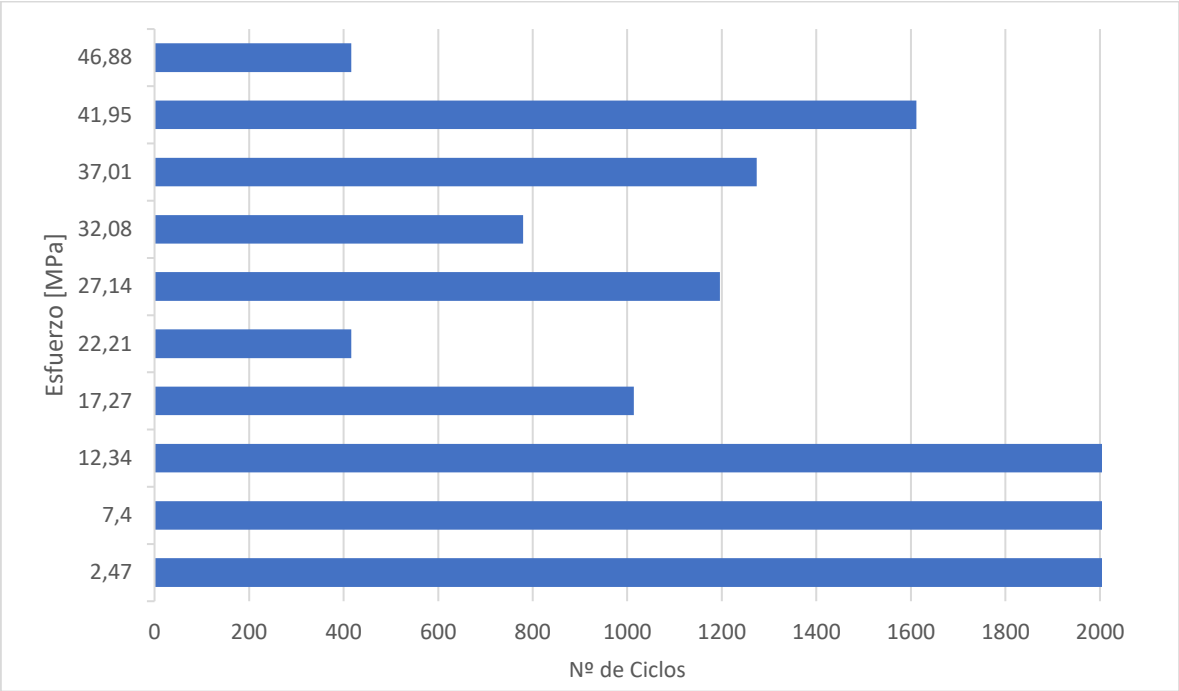


Figura 8-8 Espectro de demanda de carga en viga principal (SG11) para el año 2017

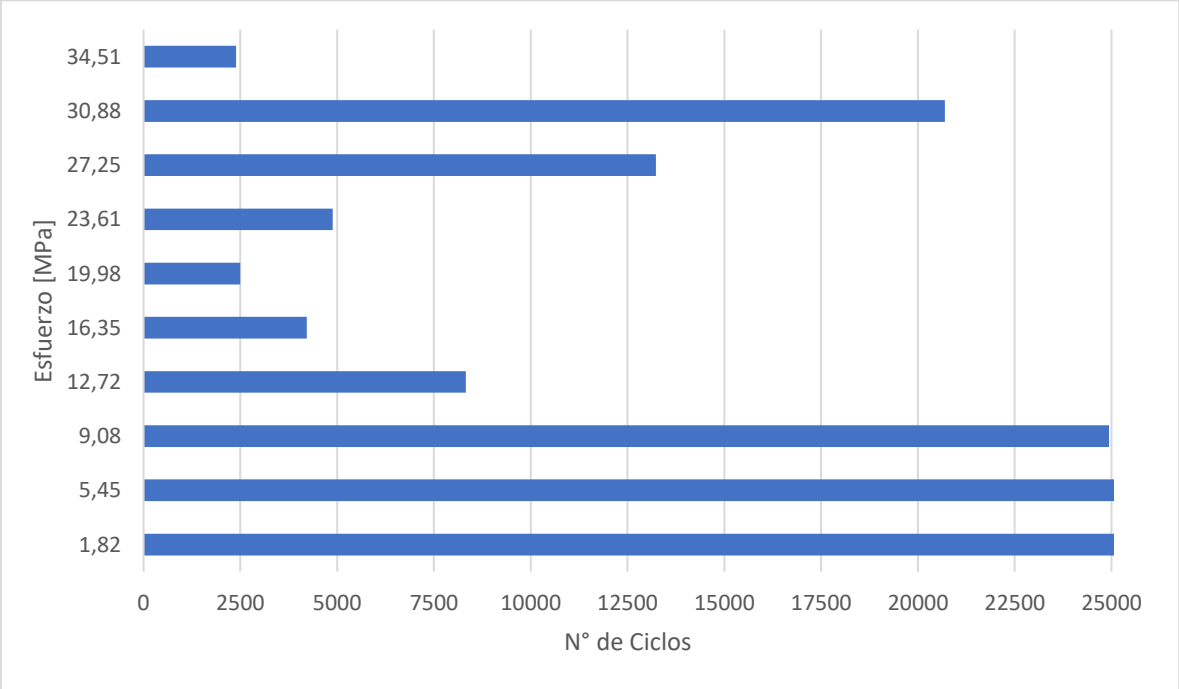


Figura 8-9 Espectro de demanda de carga en viga transversal (SG74) para el año 2017

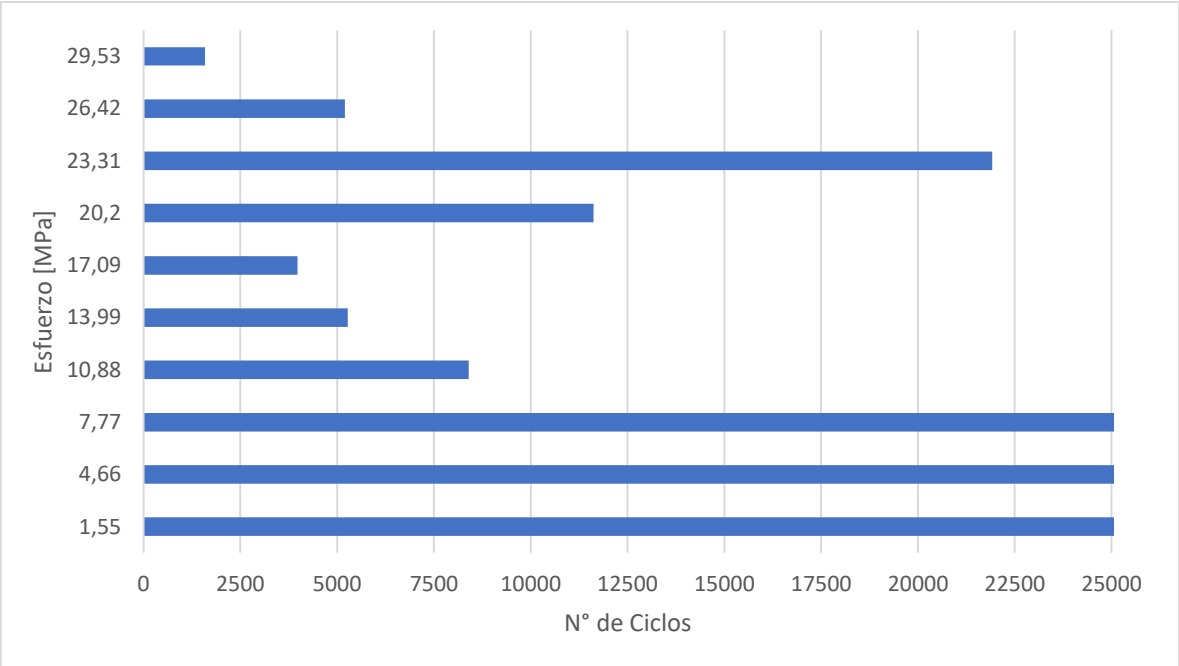


Figura 8-10 Espectro de demanda de carga en viga transversal esviada (SG92) para el año 2017

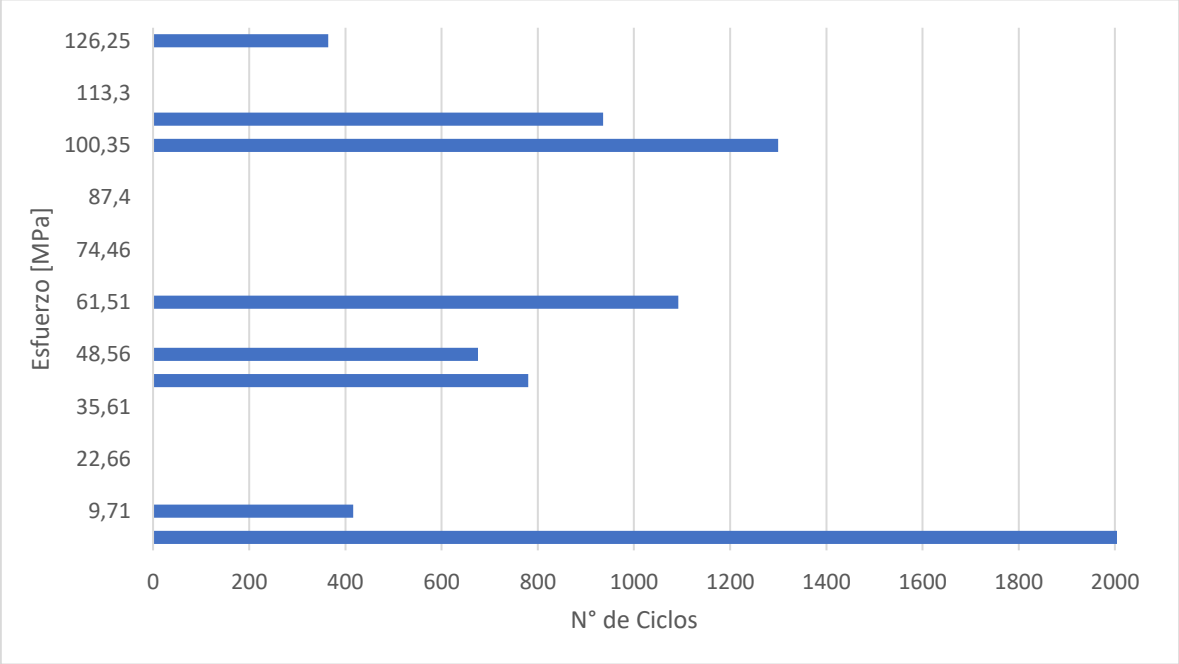


Figura 8-11 Espectro de demanda de carga en refuerzo de viga principal para el año 2017

A partir de los espectros de demanda, se puede observar que en la zona de la grieta del refuerzo transversal se generan rangos de esfuerzos de magnitudes mayores a los 125 MPa, mientras que para los otros elementos se producen con una magnitud menor a 50 MPa. En el caso de las vigas principales y las vigas transversales, las magnitudes de los rangos de esfuerzos son similares; sin embargo, las vigas transversales exhiben un número de ciclos mucho mayor.

8.3 Acumulación de Daño

Los espectros obtenidos para el año 2017 se consideran aplicables para los años 2016 y 2015. Este último se utiliza como referencia para extrapolar y obtener espectros para cada año de servicio. Esto se realiza mediante la multiplicación de la proporción de los volúmenes de tráfico, entre el año analizado y el año de referencia, por los valores del espectro obtenido a través del conteo de ciclos, como se señala en la ecuación (8.1).

$$n_i(año) = \frac{V_T(año)}{V_T(ref)} \cdot n_i(ref) \tag{8.1}$$

Donde:

- n_i es el número de ciclos aplicados de un rango de esfuerzo de amplitud constante $\Delta\sigma_i$.
- V_T es el volumen de tráfico.

Los cálculos de acumulación de daño se efectúan a partir de los espectros de carga asociados a cada año, utilizando la ecuación (2.4) y lo señalado en la sección 2.6.2. Para los cálculos se considera un factor de seguridad γ_{Mf}=1,15 asociado a bajas consecuencias de falla (se considera placa de unión como categoría de detalle). Realizando la sumatoria se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 8-1 Resultados Acumulación de Daño

Elemento	D
Vigas Principales	0,2254
Vigas Transversales	0,8392
Vigas Transversales Esviadas	0,3476
Refuerzo Viga Principal	2,8598

En la Tabla 8-1 se muestran los resultados más desfavorables para cada elemento, mientras que en las Figuras 8-12, 8-13 y 8-14 se exhibe la acumulación daño a través del tiempo para cada caso. En las Tablas 8-2 y 8-3 se señalan los resultados para los distintos "*strain gauges*" evaluados. Para ver resultados más detallados referirse al Anexo E

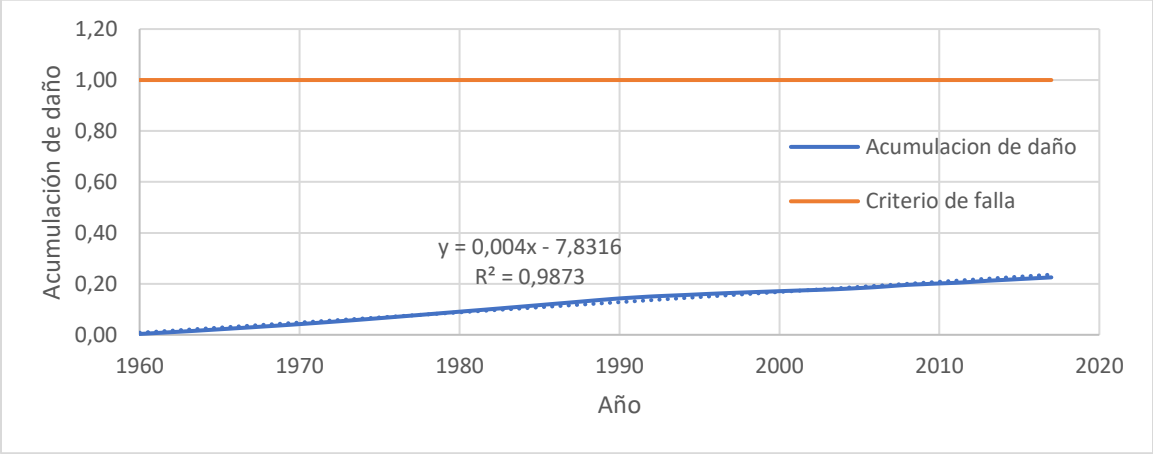


Figura 8-12 Acumulación de daño por fatiga - vigas principales (SG11)

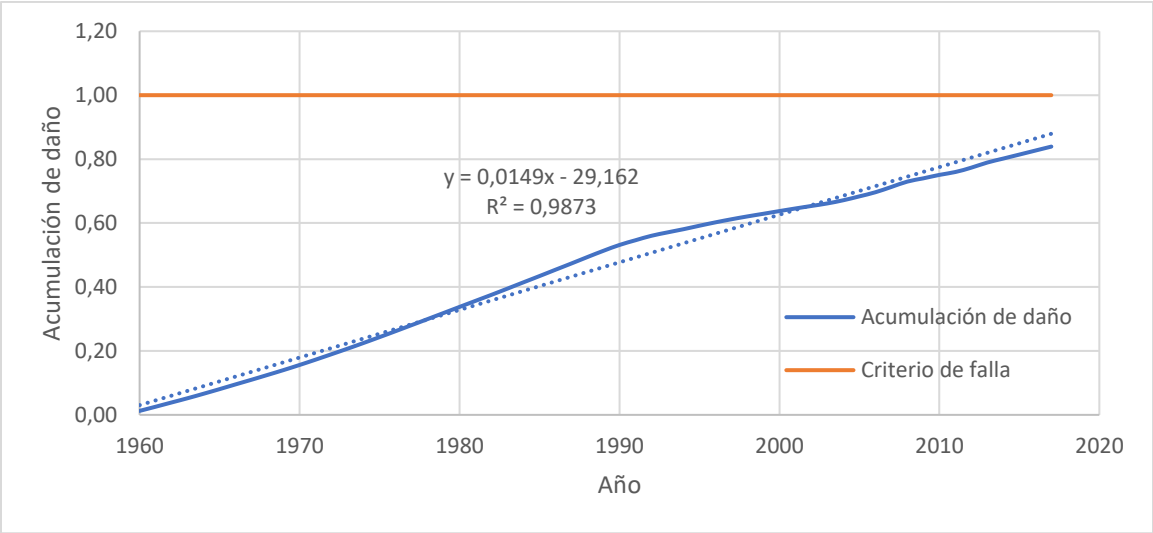


Figura 8-13 Acumulación de daño por fatiga - vigas transversales (SG74)

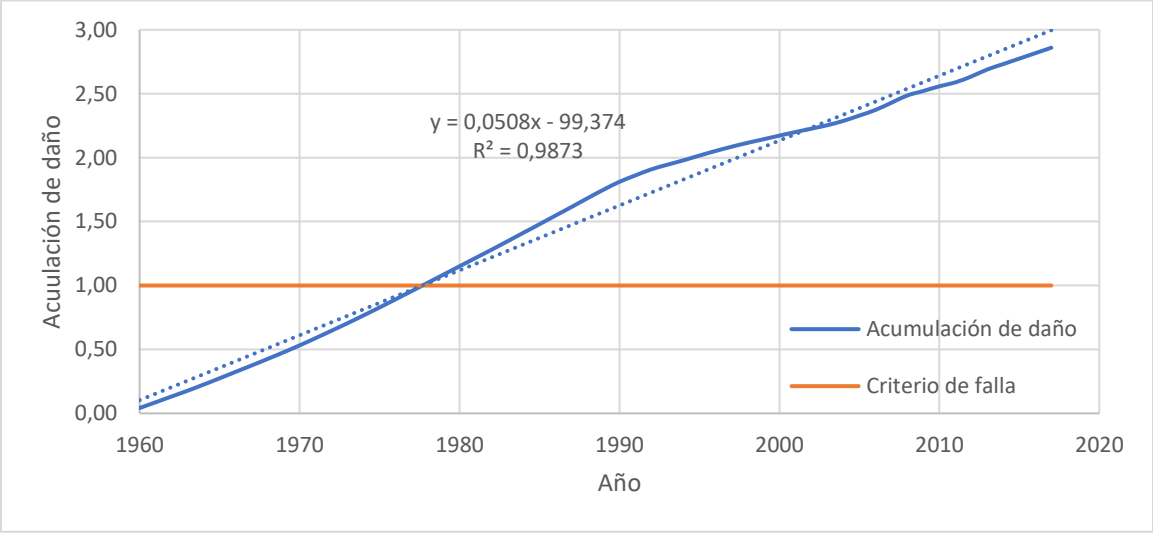


Figura 8-14 Acumulación de daño por fatiga - refuerzo viga principal

Tabla 8-2 Resultados vigas principales

Vigas Principales	
Strain Gauge	D
SG11	0,2254
SG12	0,1532
SG21	0,0709
SG22	0,0742
SG31	0,0040
SG32	0,0701
SG41	0,0658
SG42	0,0803
SG51	0,1392
SG52	0,1150

Tabla 8-3 Resultados vigas transversales

Vigas Transversales	
Strain Gauge	D
SG71	0,8069
SG72	0,7477
SG73	0,8205
SG74	0,8392
SG81	0,0000
SG82	0,0361
SG83	0,0603
SG91	0,0000
SG92	0,3476
SG93	0,0046

Los resultados señalan que el refuerzo de la viga principal falló hace bastantes años, mientras que las vigas principales y vigas transversales aún presentan vida útil, lo que concuerda con lo observado en la estructura real. Utilizando las expresiones lineales que aparecen en las Figuras 8-12 a 8-14, se puede estimar el año para el cual se alcanza el criterio de falla (D=1). Al restar este valor con el año del estudio (2017), se obtiene la vida remanente del elemento. De acuerdo con esto, se estima que la vida remanente que poseen las vigas principales es de unos 190 años, es decir, hasta 2207. En cambio, para las vigas transversales, sólo se puede asegurar una vida útil adicional de unos 6 años, hasta 2024. Los resultados concuerdan con lo observado en terreno, donde existe una gran grieta en el refuerzo analizado y tanto en las vigas principales como transversales no se ha apreciado daño en forma de grietas.

Tabla 8-4 Resumen vida útil

Elemento	Vida Útil Remanente	Apreciación de Daño
Vigas Principales	190 años	NO
Vigas Transversales	6 años	NO
Refuerzo Viga Principal	-	SI

8.3.1 Análisis de Sensibilidad

Para comprender mejor el efecto de los parámetros considerados en el cálculo del daño acumulado, se realiza un análisis de sensibilidad, calculando el daño para distintos valores de dichos parámetros. Se consideran relevantes para este análisis el efecto del factor de seguridad γ_{Mf} y la categoría de los detalles estructurales $\Delta\sigma_c$.

En el caso de los factores de seguridad, se consideran 5 valores, aquellos recomendados por el Eurocódigo [3] (1,00; 1,15; 1,35) y dos valores intermedios (1,10; 1,25). Para este análisis se considera una categoría de detalle $\Delta\sigma_c$ de 40 MPa.

En el caso de la categoría de los detalles estructurales, los valores considerados varían para el caso de las vigas y del refuerzo transversal. Para las vigas, se consideran las categorías de detalle establecidas en el Eurocódigo [3] para las placas de unión(40, 50, 71, 90) y un valor intermedio (80). En el caso del refuerzo transversal se utilizan los valores señalados en la norma europea asociados a soldaduras que resisten cargas (36, 40, 71) y dos valores intermedios (50, 60). Para este análisis se considera un factor de seguridad γ_{Mf} de 1,15.

8.3.1.1 Factores de seguridad

En las Figuras 8-15 a 8-18, se muestra la evolución del daño en el tiempo para los distintos valores de factores de seguridad γ_{Mf}. En las Figuras 8-19 a 8-22, se señala el valor total del daño acumulado

para cada valor del factor de seguridad, donde se observa una relación lineal entre ambas variables. También se puede apreciar que las vigas longitudinales y las vigas transversales esviadas (SG11 y SG92) cumplen con el criterio de desempeño de acumulación de daño para todos los valores del factor de seguridad. El resto de las vigas transversales no lo satisface para los valores de 1,25 y 1,35; mientras que el refuerzo transversal no lo satisface para ningún valor.

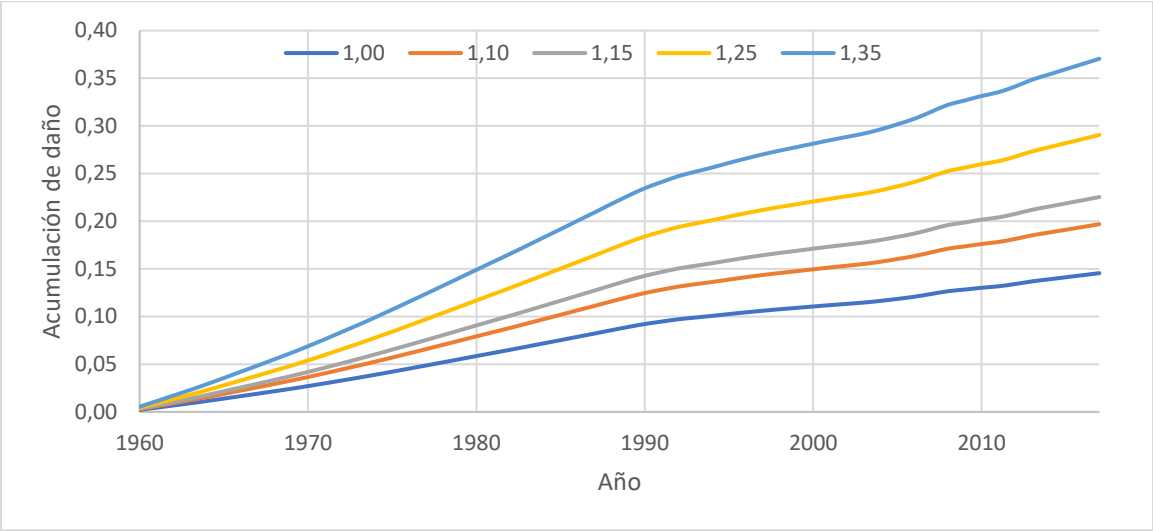


Figura 8-15 Acumulación de daño vigas principales (SG11) para distintos factores de seguridad γ_{Mf}

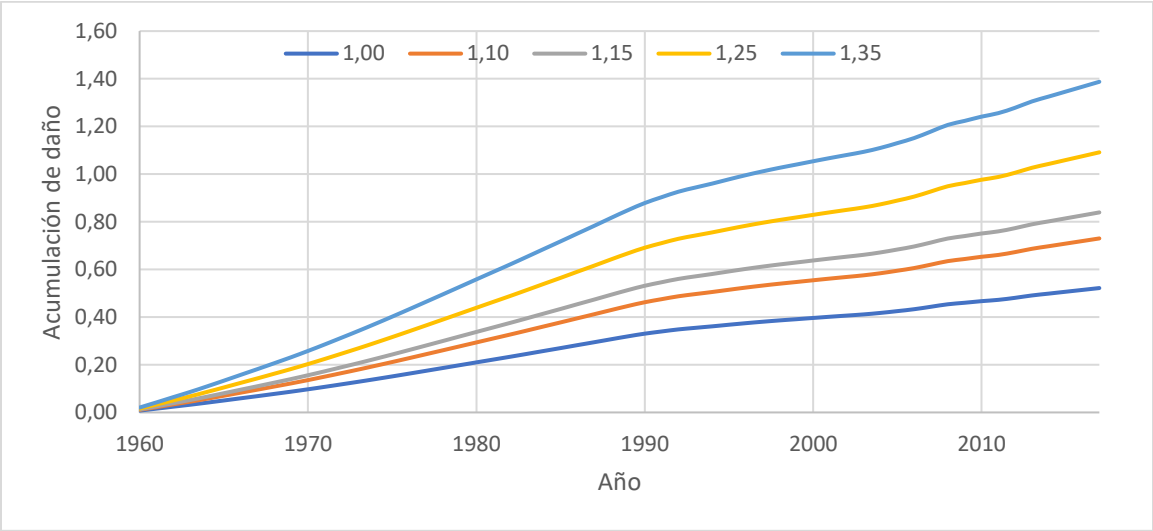


Figura 8-16 Acumulación de daño vigas transversales (SG74) para distintos factores de seguridad γ_{Mf}

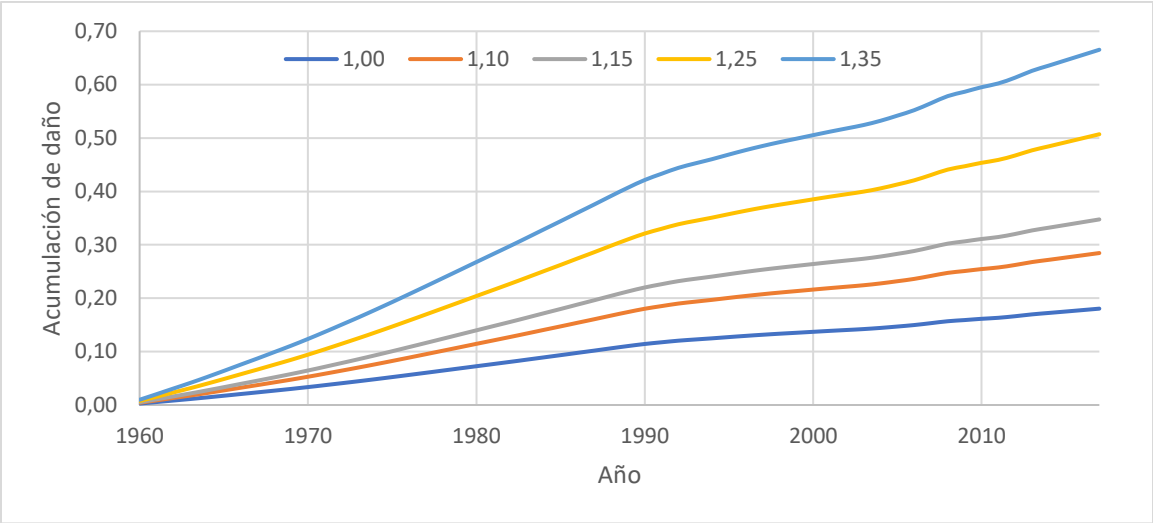


Figura 8-17 Acumulación de daños viga transversal esviada (SG92) para distintos factores de seguridad γ_{Mf}

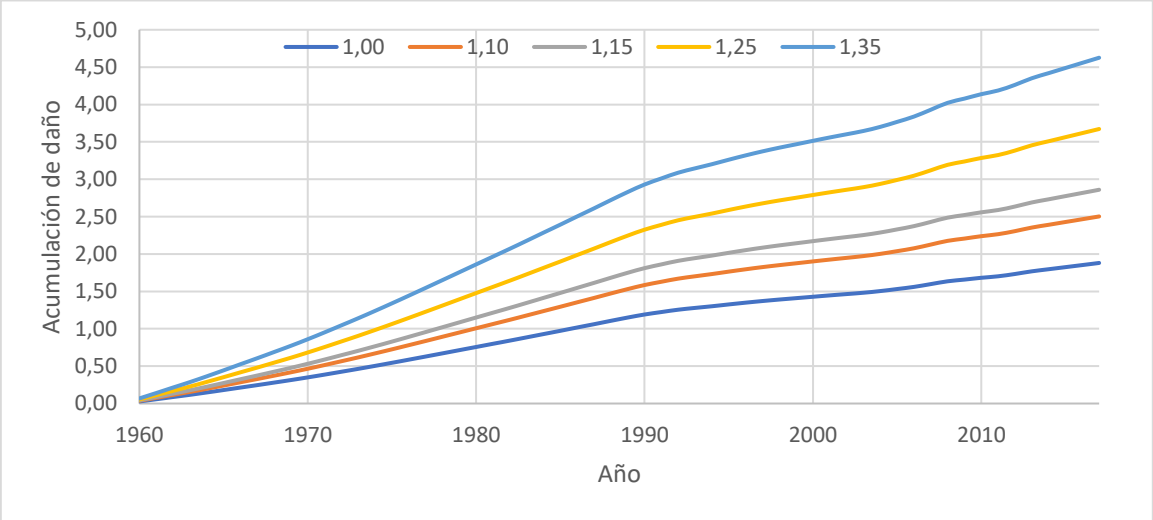


Figura 8-18 Acumulación de daño refuerzo transversal para distintos factores de seguridad γ_{Mf}

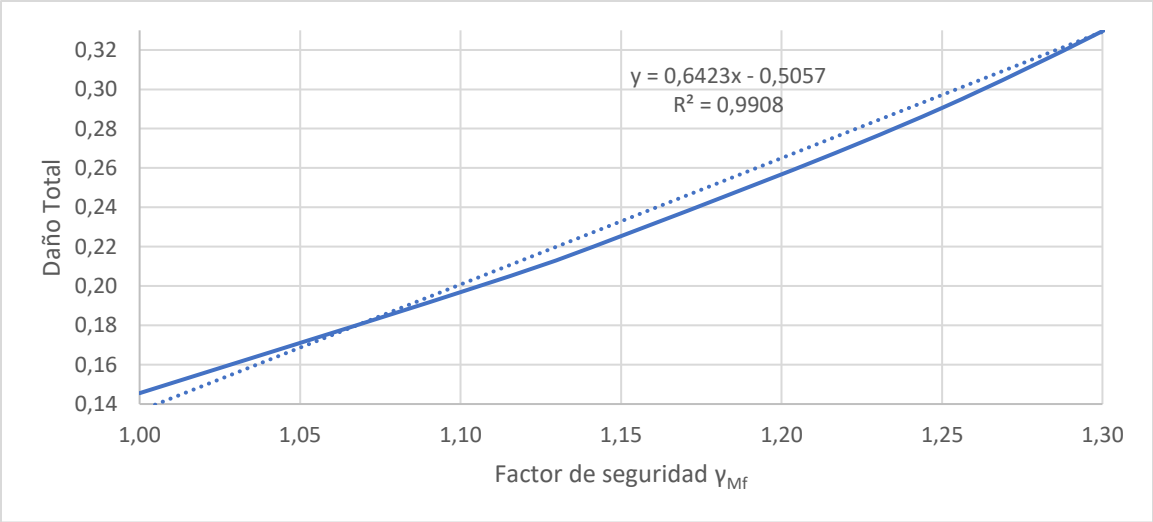


Figura 8-19 Daño total para distintos valores del factor de seguridad γ_{Mf} (SG11)

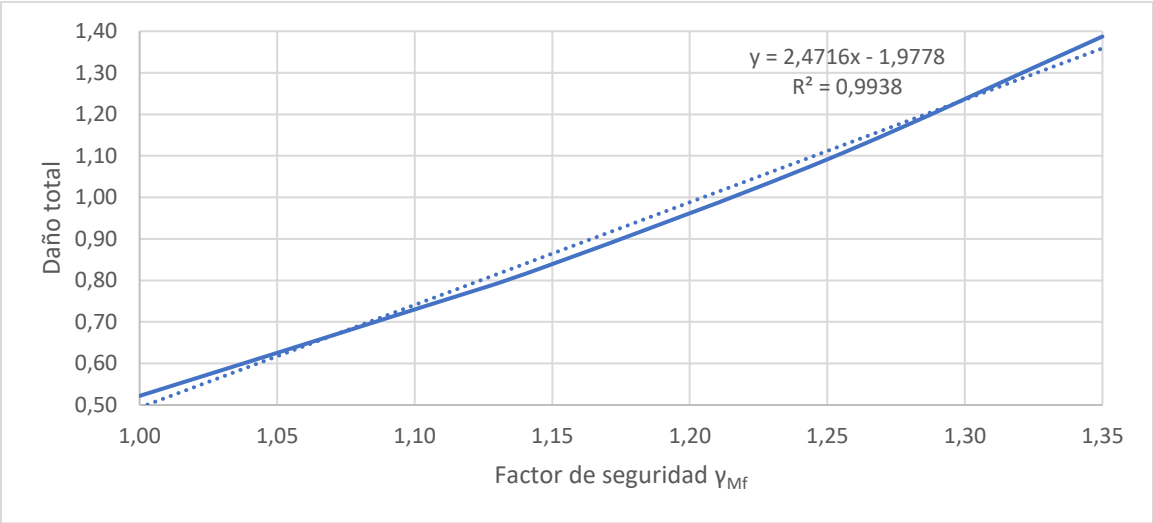


Figura 8-20 Daño total para distintos valores del factor de seguridad γ_{Mf} (SG74)

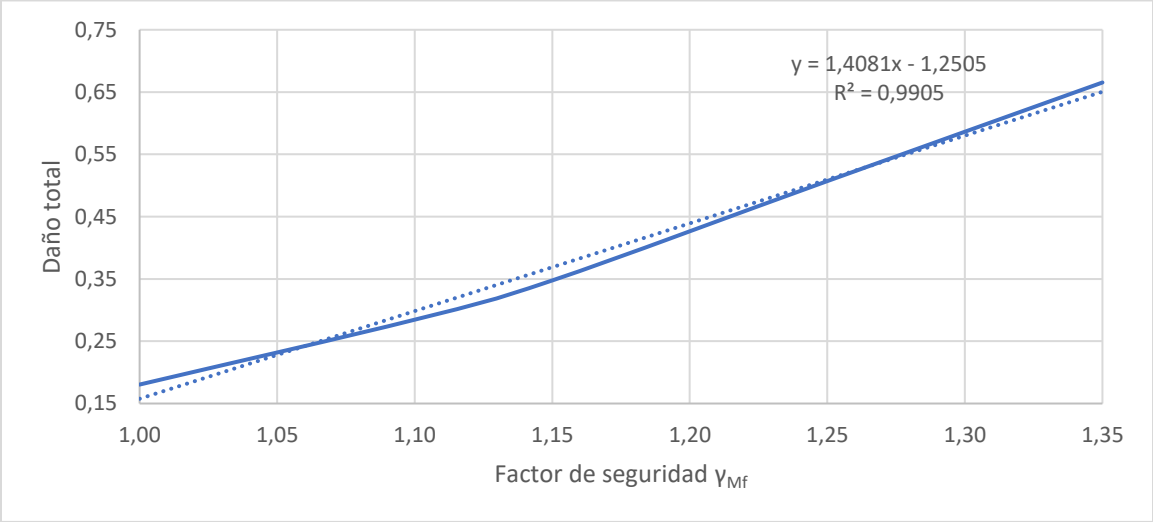


Figura 8-21 Daño total para distintos valores del factor de seguridad γ_{Mf} (SG92)

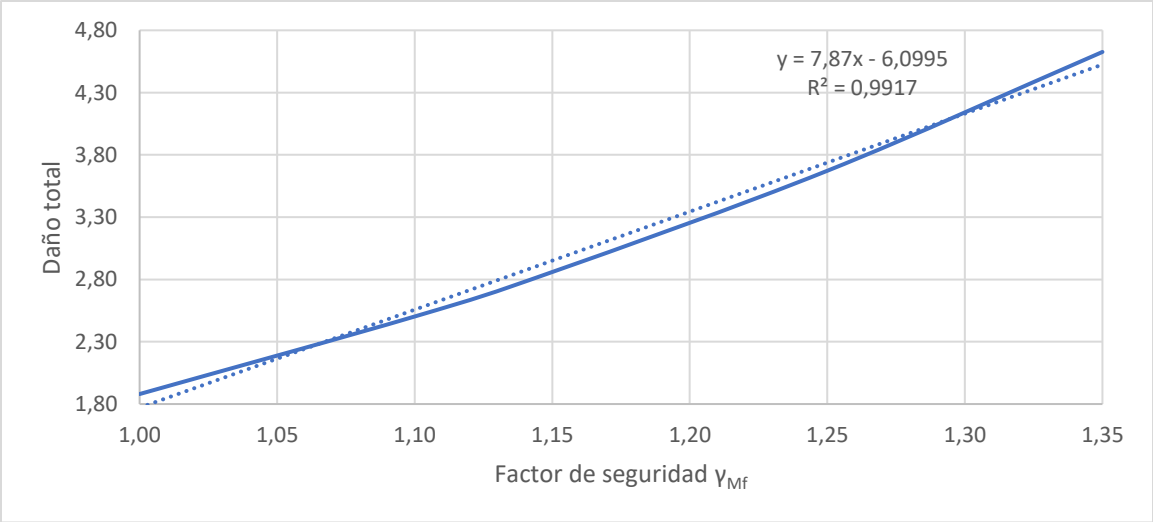


Figura 8-22 Daño total para distintos valores del factor de seguridad γMf (refuerzo transversal)

8.3.1.2 Categoría de detalle

En las Figuras 8-23 a 8-26, se muestra la evolución del daño en el tiempo para los distintos valores de la categoría de los detalles estructurales $\Delta\sigma_C$. En las Figuras 8-27 a 8-30, se muestra el valor total del daño acumulado para cada valor de la categoría de los detalles, donde en general se observa una relación exponencial entre ambas variables. Se observa que todas las vigas cumplen el criterio de desempeño a la fatiga para todos los valores de categoría de detalle, mientras que el refuerzo transversal lo cumple solamente para las categorías de detalles más altas (60 y 71).

Se aprecia que el efecto de la categoría de detalles es bastante importante en cuanto al cálculo de la acumulación de daño. Debido a esto, es necesario que estos valores sean determinados por un ingeniero con experiencia y en general intentar ser conservador en su elección.

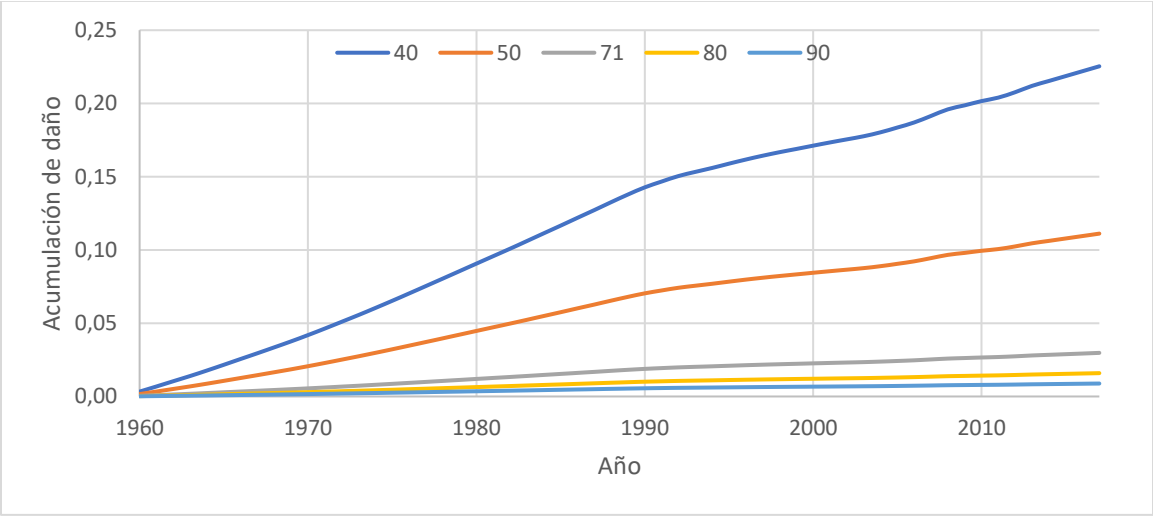


Figura 8-23 Acumulación de daño vigas principales (SG11) para distintas categorías de detalle $\Delta\sigma_C$

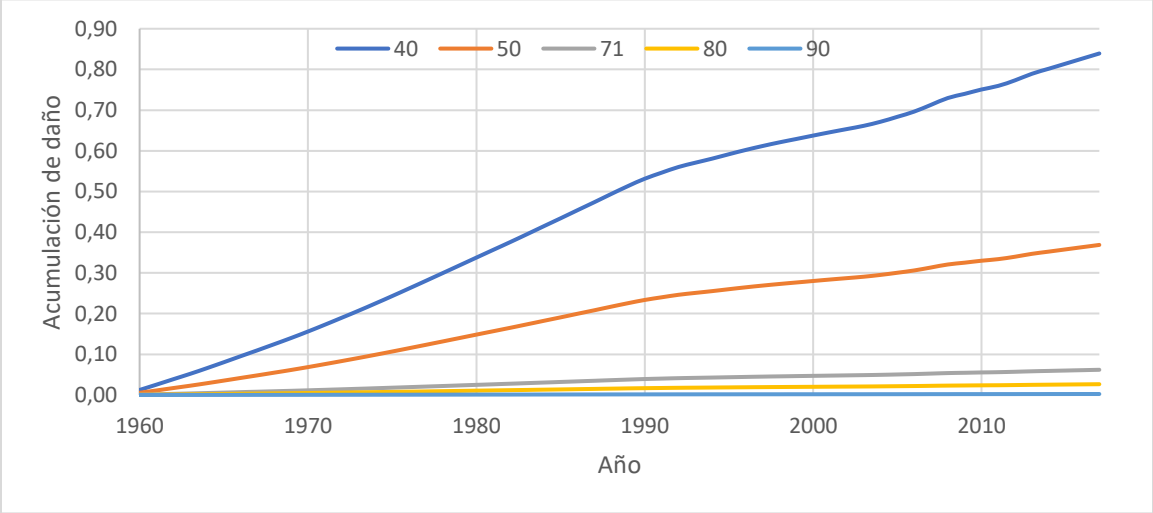


Figura 8-24 Acumulación de daño vigas transversales (SG74) para distintas categorías de detalle $\Delta\sigma_C$

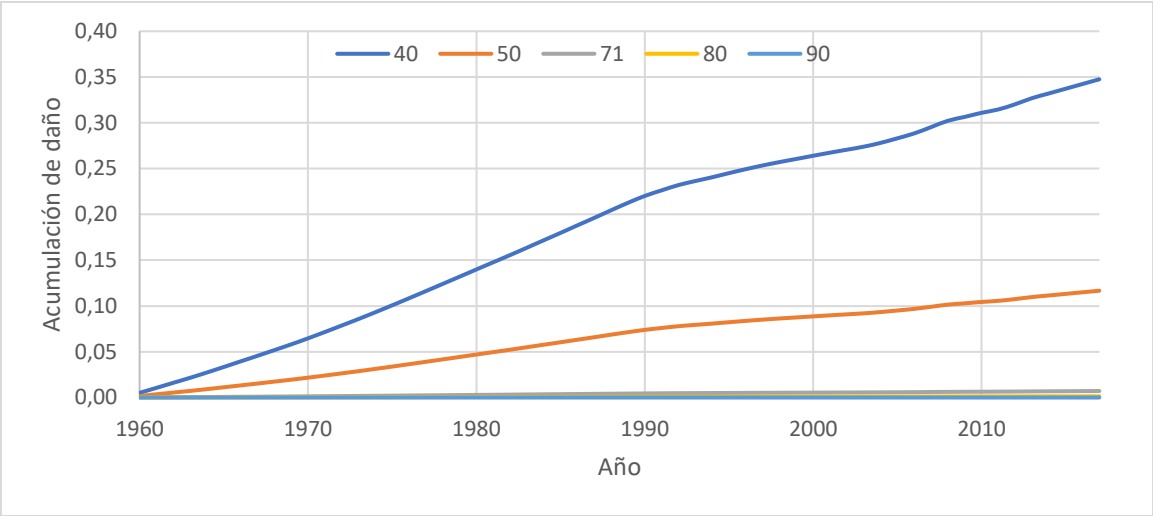


Figura 8-25 Acumulación de daño vigas transversal esviada (SG92) para distintas categorías de detalle $\Delta\sigma_C$

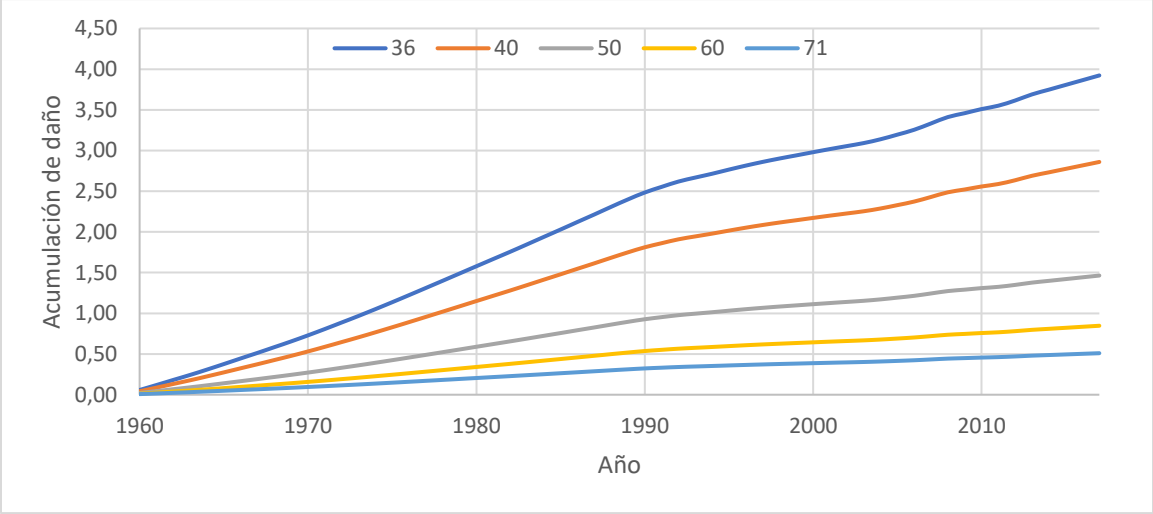


Figura 8-26 Acumulación de daño refuerzo transversal para distintas categorías de detalle $\Delta\sigma_C$

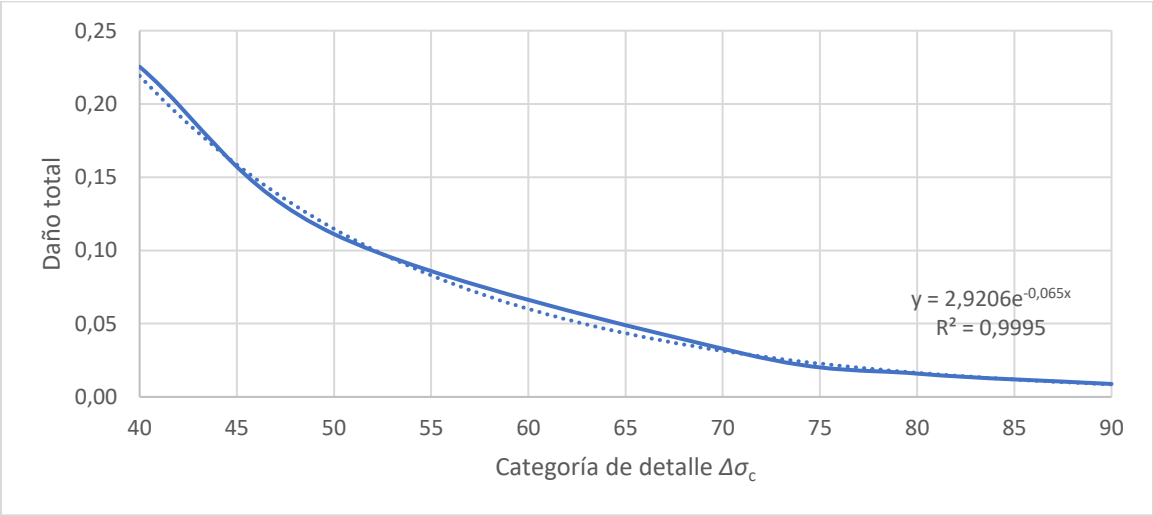


Figura 8-27 Daño total para distintos valores de categorías de detalle $\Delta\sigma_C$ (SG11)

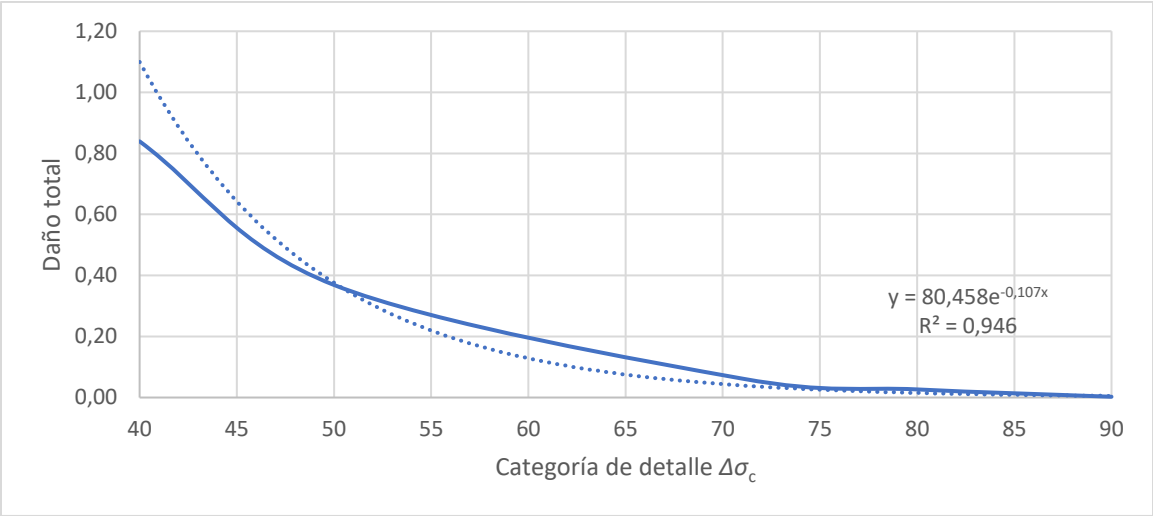


Figura 8-28 Daño total para distintos valores de categorías de detalle $\Delta\sigma_C$ (SG74)

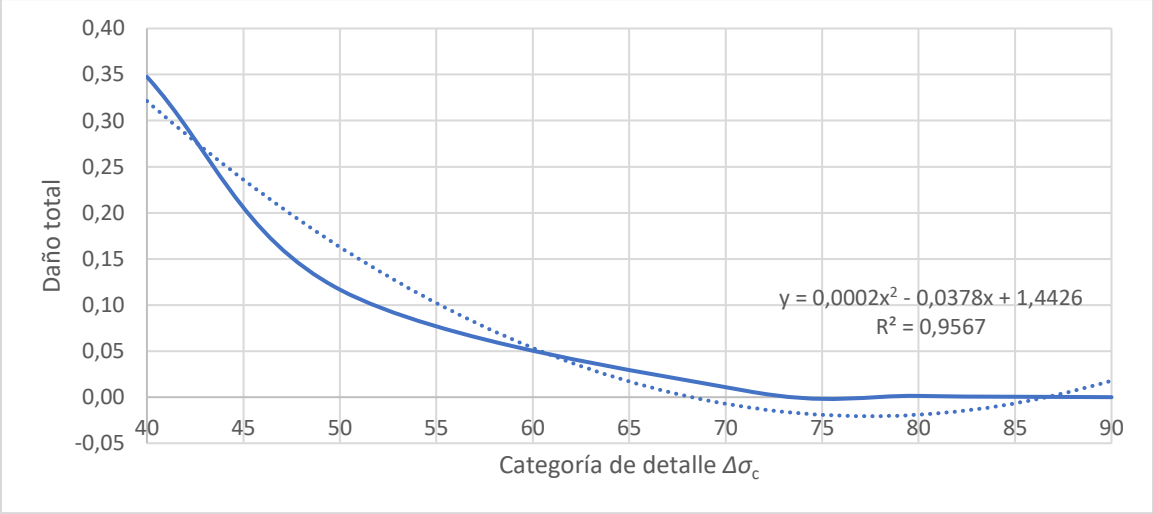


Figura 8-29 Daño total para distintos valores de categorías de detalle $\Delta\sigma_C$ (SG92)

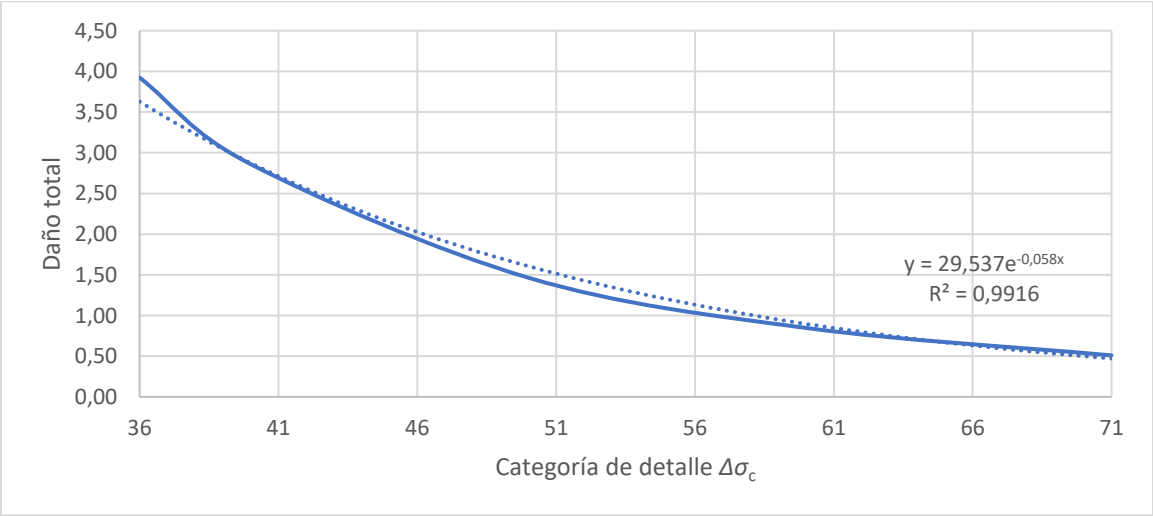


Figura 8-30 Daño total para distintos valores de categorías de detalle $\Delta\sigma_C$ (refuerzo transversal)

9 CONCLUSIONES

La elaboración del modelo numérico, la campaña de monitoreo y la evaluación a la fatiga se han desarrollado para establecer el nivel de daño que posee el puente ferroviario estudiado. Con este fin, se ha calibrado el modelo estructural a partir de los datos experimentales obtenidos durante la campaña de monitoreo y así poder explicar con resultados numéricos la presencia de grietas en la soldadura del refuerzo transversal de una de las vigas principales. A partir de los resultados se plantean las siguientes conclusiones y comentarios:

- El programa de monitoreo entrega resultados confiables y adecuados para la evaluación del puente, los cuales son utilizados para validar el modelo numérico a través de los resultados experimentales. Por consiguiente, se aprecia que el comportamiento del modelo numérico es bastante parecido al de las mediciones. En aquellos casos en que las comparaciones no son favorables (vigas transversales), se utiliza el "Modelo numérico 2", correspondiente a un modelo calibrado mediante la modificación de la rigidez de algunos elementos tipo "link", utilizados para conectar las vigas longitudinales secundarias con las vigas transversales, obteniendo mejores resultados con esta versión del modelo. En general los errores absolutos son bastante bajos (menores a 2 MPa), y en caso de no serlo, se debe a zonas puntuales complejas de modelar, como lo es el sector en que la estructura de acero interactúa con la losa de hormigón. A través del proceso de calibración se asegura que el modelo numérico estima correctamente el comportamiento de la estructura (mediante sus distintas versiones), permitiendo su uso para realizar estimaciones del desempeño estructural, así como también para la evaluación a la fatiga.
- El daño que posee el refuerzo transversal no parece ser perjudicial para la seguridad de la estructura debido a que se encuentra en compresión, presenta una redundancia considerable y las cargas se distribuyen principalmente en las vigas principales y transversales. Debido a esto, conservadoramente se puede señalar que el puente aún posee una vida útil remanente de aproximadamente 6 años, antes de requerir algún tipo de reparación. Este valor corresponde al análisis de la conexión de los arriostramientos con la viga transversal (ubicada en el eje 46-2') a través de placas de unión (SG74). Por lo tanto, para aumentar la vida útil de la estructura, se puede evaluar la condición en que se encuentra esta conexión (y en otras vigas cercanas) en terreno y reparar en caso de que se estime necesario, ya sea mediante un tratamiento de las soldaduras, utilización de elementos mecánicos o reemplazando dichas conexiones.

- El agrietamiento que exhibe la soldadura del refuerzo transversal estudiado es producido por fatiga, y puede haberse iniciado debido a la baja calidad del detalle estructural y la cantidad de trenes pesados que han circulado por el puente. Lo único que impide el pandeo lateral torsional de las vigas principales son los refuerzos transversales conectados a las alas superior e inferior de dichos elementos. Esta restricción lateral que entrega al alma, y parcialmente al ala en compresión, provoca el surgimiento de esfuerzos en las soldaduras que pueden explicar el nivel de daño evidenciado. Pese a que prevalecen esfuerzos de compresión, el complejo estado de esfuerzos que se desarrolla en las soldaduras puede generar tracción en otro lugar y dirección que no se está considerando, los que parecen ser responsables de la iniciación de la grieta. Una forma de rehabilitación podría ser reforzar la viga principal en la zona de momentos máximos negativos, agregando una placa en el ala en compresión para aumentar su espesor y evitar que el pandeo lateral torsional controle la significativamente la resistencia de la viga principal.
- Un monitoreo periódico de la estructura es aconsejable para comparar el comportamiento de la respuesta en terreno con los resultados del modelo numérico. De mantenerse una tolerancia en cuanto al error entre las predicciones y los datos experimentales, significa que el modelo continúa siendo válido y se puede confiar en sus resultados. En caso contrario, se infiere que la estructura ha aumentado su nivel de daño y es necesario tomar decisiones en cuanto a su utilización, reparación, entre otros. En esta situación es necesario volver a calibrar el modelo numérico antes de volver a realizar predicciones. Si no es posible llevar a cabo una calibración adecuada del modelo es aconsejable revisar si la grieta sigue expandiéndose. De ocurrir esto, es recomendable elaborar un modelo aún más refinado, con elementos sólidos y considerando la geometría de la soldadura y la grieta en su totalidad, lo cual puede resultar en un gran esfuerzo de modelación numérica. De este modo se puede ejecutar un análisis "*hot spot*" de la soldadura o un estudio de mecánica de fracturas, y determinar la vida útil remanente de acuerdo a dichos estudios. Adicionalmente, se sugiere monitorear el estado de las vigas transversales, debido a que los cálculos señalan que están próximas a cumplir su vida útil y la falla de estos elementos puede producir consecuencias importantes.
- Se puede señalar que el parámetro más relevante para la evaluación de daño a la fatiga corresponde a la categoría de los detalles estructurales que contiene la estructura. Una correcta identificación y clasificación de ellos es importante al momento de evaluar el daño, además de ser preferible escoger valores conservadores de los parámetros a utilizar.
- La metodología presentada en este trabajo puede ser aplicada en Chile, considerando que permitiría evaluar el nivel de fatiga de alto ciclaje para cargas vehiculares. Sin embargo, para

considerar el efecto sísmico, es necesario estudiar la fatiga de bajo ciclaje y cómo aplicarla para complementar el método señalado en este estudio.

- Es posible utilizar nuevas tecnologías para la adquisición de datos durante las campañas de monitoreo estructural, facilitando la medición en áreas remotas y de difícil acceso, especialmente si se desea realizar mediciones de mediano o largo plazo. Adicionalmente, se puede comenzar a considerar como parámetro relevante la medición de los desplazamientos transversales de los puentes.
- Es importante señalar que este trabajo sólo considera la respuesta estática de la estructura y los estudios se desarrollan basados en los resultados obtenidos de dichos análisis. No se realizan análisis dinámicos de la estructura debido a la baja velocidad de circulación de los vehículos que atraviesan el puente (menor a 20 km/h). Se estima que no habría gran diferencia en los resultados en caso de considerar un análisis dinámico y por lo tanto los resultados debido a la respuesta estática de la estructura se consideran válidos. Debido a esto no se consideran efectos importantes como la velocidad de circulación de los trenes, las fuerzas inerciales, amortiguamiento, entre otros.
- El estudio sólo considera un análisis determinístico del puente y para ser más realista e incorporar la incertidumbre inherente al problema, tanto de las solicitaciones como de las propiedades mecánicas y geométricas de la estructura, es necesario elaborar un modelo probabilístico, utilizando, por ejemplo, métodos bayesianos. Estos modelos escapan al alcance de este trabajo, por lo que se sugiere continuar de esta manera a futuro.

REFERENCIAS

[1] Sustainable Bridges, "Guideline for load and resistance assessment of existing European railway bridges: Advices on the use of advanced methods," 2007.

[2] M. A. Miner, "Cumulative damage in fatigue," *Am. Soc. Mech. Eng. - J. Appl. Mech.*, vol. 12, pp. 159–164, 1945.

[3] CEN, "Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue." BS EN 1993-1-9:2005, Brussels, 2005, p. 34 p.

[4] R. Helmerich, B. Kühn, and A. Nussbaumer, "Assessment of existing steel structures. A guideline for estimation of the remaining fatigue life," *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 3, no. 3, pp. 245–255, 2007.

[5] CEN, "Eurocode 3 : Design of steel structures – Part 2: Steel bridges." BS EN 1993-2:2006, Brussels, 2006, p. 102 p.

[6] T. R. Lenka Žemličková, "Provozní zatížení železničních mostů," 2005. [Online]. Available: http://www.mosty.cz/index.asp?module=ActiveWeb&page=WebPage&DocumentID=2078#.

[7] W. Schütz, "A history of fatigue," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 54, no. 2, pp. 263–300, 1996.

[8] G. S. Campbell and R. Lahey, "A survey of serious aircraft accidents involving fatigue fracture," *Int. J. Fatigue*, vol. 6, no. 1, pp. 25–30, 1984.

[9] S. B. Lee, "Fatigue failure of welded vertical members of a steel truss bridge," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 3, no. 2, pp. 103–108, 1996.

[10] J. Schijve and S. Y. Yarema, "Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art," *Mater. Sci.*, vol. 39, no. 3, pp. 307–333, 2003.

[11] H. Berns and W. Theisen, *Ferrous materials*. 1990.

[12] W. Cui, "A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 43–56, 2002.

[13] A. Nussbaumer, L. Borges, and L. Davain, "Basis of Fatigue in Steel Structures," in *Fatigue Design of Steel and Composite Structures: Eurocode 3: Design of Steel Structures Part 1-9 – Fatigue; Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures*, 1st ed., ECCS - European Convention for Constructiona Steelwork, 2011, pp. 1–42.

[14] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, vol. 58, no. 1. 2012.

[15] Y. Lee, "Fatigue Damage Theories," in *Fatigue Testing and Analysis*, Burlington: Elsevier,

2005, pp. 57–76.

[16] J. Schijve, *Fatigue of Structures and Materials*, 2a. ed. Holanda: Springer, 2009.

[17] P. C. Paris and F. Erdogan, “A critical analysis of crack propagation laws,” *J. Basic Eng.(Trans. ASME)*, vol. 85, no. 4, pp. 528–534, 1963.

[18] W. Elber, “The Significance of Fatigue Crack Closure,” *Damage Toler. Aircr. Struct.*, vol. 2, pp. 230–242, 1971.

[19] C. Bathias, “There is no infinite fatigue life in metallic materials,” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 22, pp. 559–565, 1999.

[20] N. E. Dowling, “Fatigue Failure Predictions for Complicated Stress Strain Histories,” pp. 71–87, 2008.

[21] P. Ryjáček, M. Macho, V. Stančík, and M. Polák, “Deterioration and assessment of steel bridges,” *Maintenance, Monit. Safety, Risk Resil. Bridg. Bridg. Networks - Proc. 8th Int. Conf. Bridg. Maintenance, Saf. Manag. IABMAS 2016*, 2016.

[22] Y. E. Zhou, “Assessment of Bridge Remaining Fatigue Life through Field Strain Measurement,” *J. Bridg. Eng.*, vol. 11, no. 6, pp. 737–744, 2006.

[23] Y. Lee and D. Taylor, “Cycle Counting Techniques,” in *Fatigue Testing and Analysis*, Burlington: Elsevier, 2005, pp. 77–102.

[24] S. D. Downing and D. F. Socie, “Simple rainflow counting algorithms,” *Int. J. Fatigue*, vol. 4, no. 1, pp. 31–40, Jan. 1982.

[25] H. Okamura, S. Sakai, and I. Susuki, “Cumulative Fatigue Damage Under Random Loads,” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 1, no. 4, pp. 409–419, 1979.

[26] A. Fatemi and L. Yang, “Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials,” *Int. J. Fatigue*, vol. 20, no. I, pp. 9–34, 1998.

[27] B. Kühn, “Assessment of existing steel structures - Recommendations for estimation of the remaining fatigue life,” *Procedia Eng.*, vol. 66, pp. 3–11, 2013.

[28] A. Brencich and L. Gambarotta, “Assessment procedure and rehabilitation of riveted railway girders: The Campasso Bridge,” *Eng. Struct.*, vol. 31, no. 1, pp. 224–239, 2009.

[29] F. Marques, C. Moutinho, F. Magalhães, E. Caetano, and Á. Cunha, “Analysis of dynamic and fatigue effects in an old metallic riveted bridge,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 99, pp. 85–101, 2014.

[30] J. Leander, A. Andersson, and R. Karoumi, “Monitoring and enhanced fatigue evaluation of a steel railway bridge,” *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 3, pp. 854–863, 2010.

[31] F. Moreu, R. E. Kim, and B. F. Spencer, “Railroad bridge monitoring using wireless smart sensors,” *Struct. Control Heal. Monit.*, vol. 24, no. 2, pp. 1–17, 2017.

[32] F. Moreu *et al.*, “Reference-Free Displacements for Condition Assessment of Timber Railroad Bridges,” *J. Bridg. Eng.*, vol. 21, no. 2, p. 04015052, 2016.

[33] C. Klinger, T. Michael, and D. Bettge, “Fatigue cracks in railway bridge hangers due to wind induced vibrations - Failure analysis, measures and remaining service life estimation,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 43, pp. 232–252, 2014.

[34] X. Huang, L. Tong, F. Zhou, and Y. Chen, “Prediction of fracture behavior of beam-to-column welded joints using micromechanics damage model,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 85, pp. 60–72, 2013.

[35] B. M. Imam and T. D. Righiniotis, “Fatigue evaluation of riveted railway bridges through global and local analysis,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 66, no. 11, pp. 1411–1421, 2010.

[36] R. E. Kim, F. Moreu, M. Asce, B. F. S. Jr, and F. Asce, “Hybrid Model for Railroad Bridge Dynamics,” vol. 142, no. 1969, 1996.

[37] CEN, “Eurocode 1: Actions on structures – Part 2: Traffic loads on bridges.” BS EN 1991-2:2003, Brussels, 2003, p. 164 p.

[38] Dirección de Vialidad, “Instrucciones y criterios de diseño,” *Manual de Carreteras*, vol. 3. p. 1482 p., 2015.

[39] AASHTO, *Standard Specifications for Highway Bridges*, 17th ed. Washington D.C., 2002.

[40] AASHTO, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 4th ed. Washington D.C., 2007.

[41] A. Taras and R. Greine, “Development and application of a fatigue class catalogue for riveted bridge components,” *Struct. Eng. Int. J. Int. Assoc. Bridg. Struct. Eng.*, vol. 20, no. 1, pp. 91–103, 2010.

[42] Computers and Structures Inc., “CSi Analysis Reference Manual,” p. 556, 2016.

[43] CEN, “Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions.” BS EN 1991-1-4:2005, Brussels, 2005, p. 146 p.

[44] CEN, “Eurocode – Basis of structural design.” BS EN 1990:2002, Brussels, 2002, p. 116 p.

[45] L. Žemličková, “Ekvivalentní rozkmit napětí železničních mostů,” 2004.

[46] Č. Cargo, “Catalog of freight wagons of ČD Cargo, a.s.,” 2018. [Online]. Available: https://www.cdcargo.cz/katalog-nakladnich-vozu.

Anexo A SECCIONES TRANSVERSALES DEL PUENTE

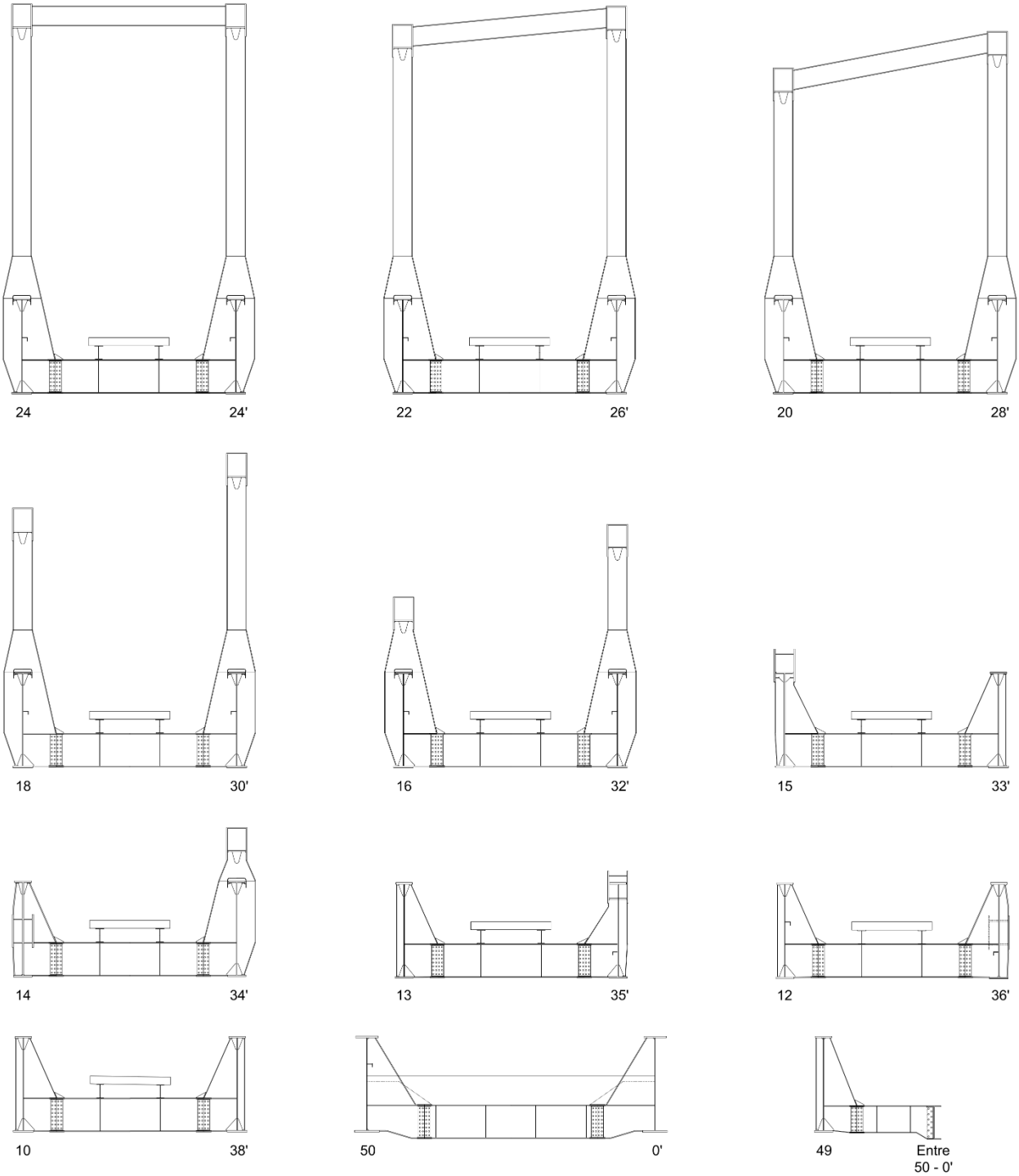


Figura A-1 Secciones Transversales del Puente

Anexo B DISPOSICIÓN DE "*STRAIN GAUGES*"

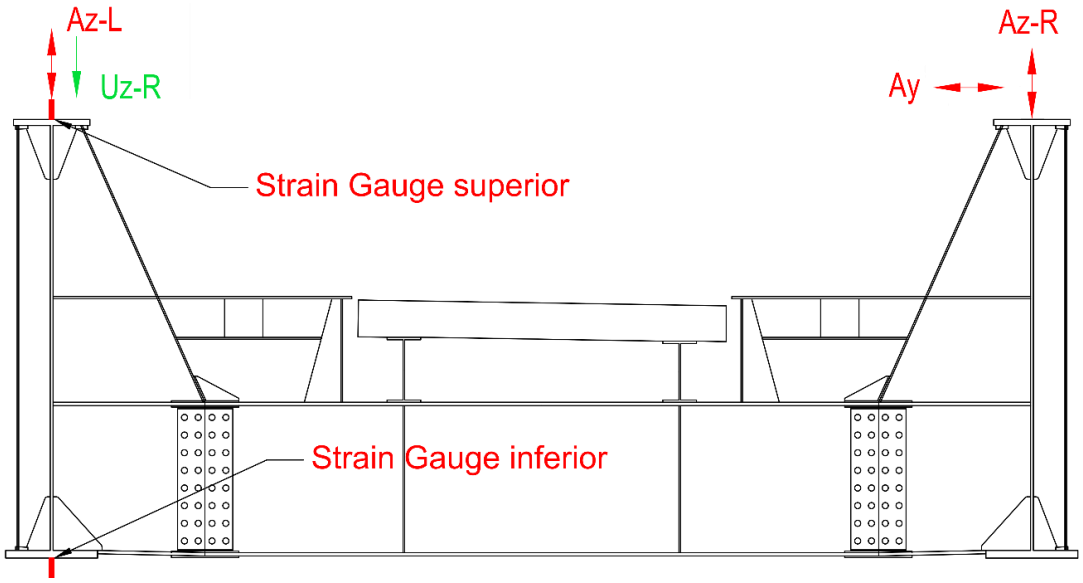


Figura B-1 Disposición dispositivos de medición en la sección transversal

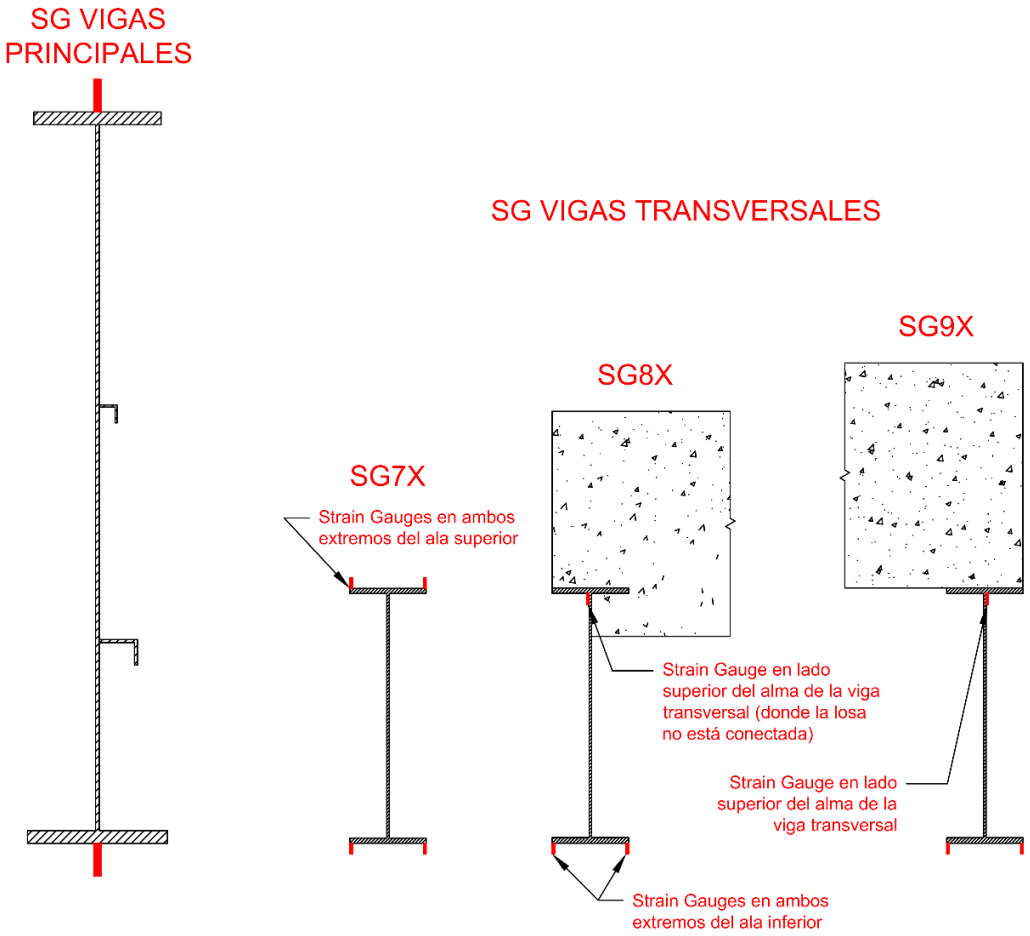


Figura B-2 Posición "Strain Gauges" en los elementos

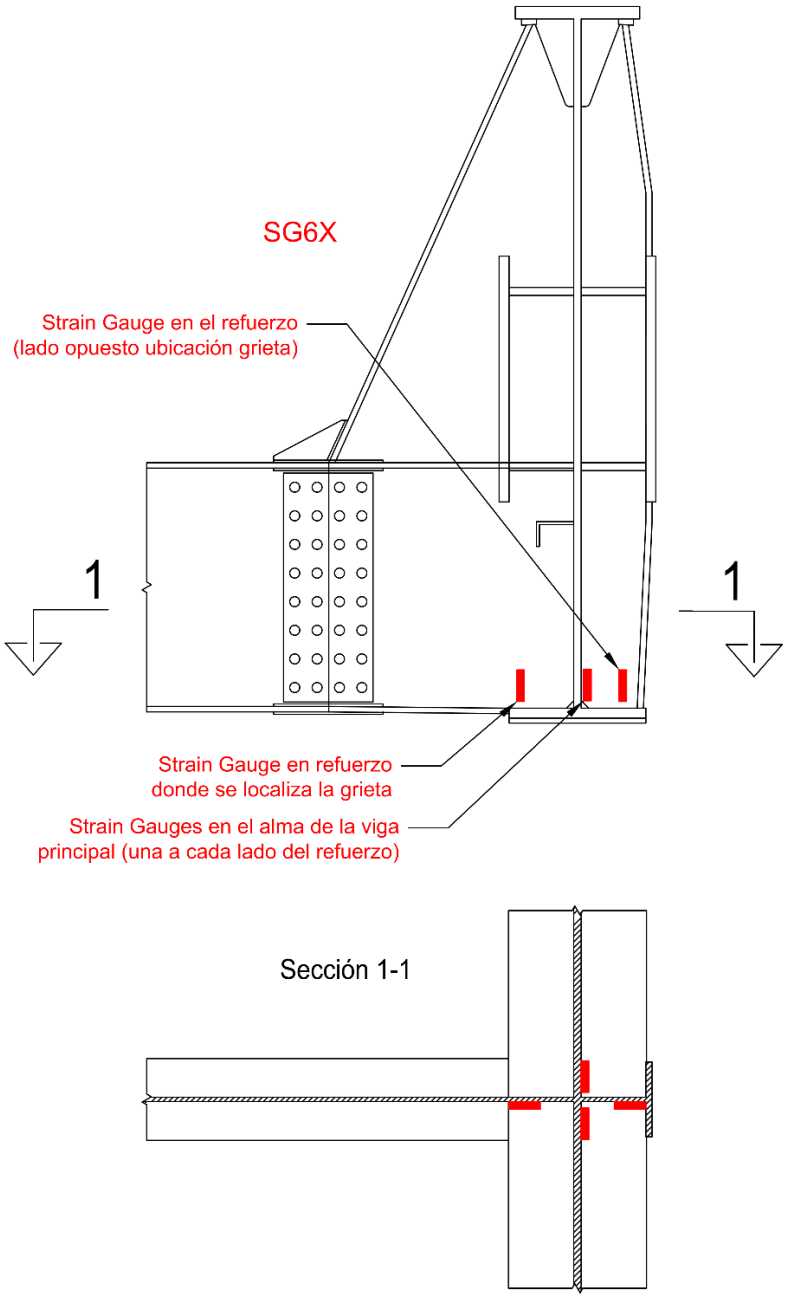
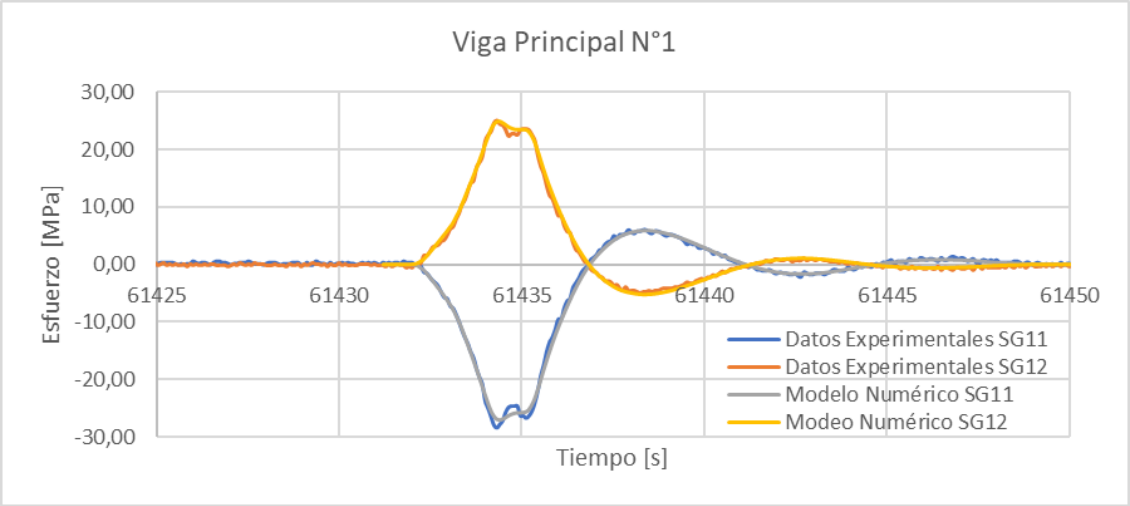
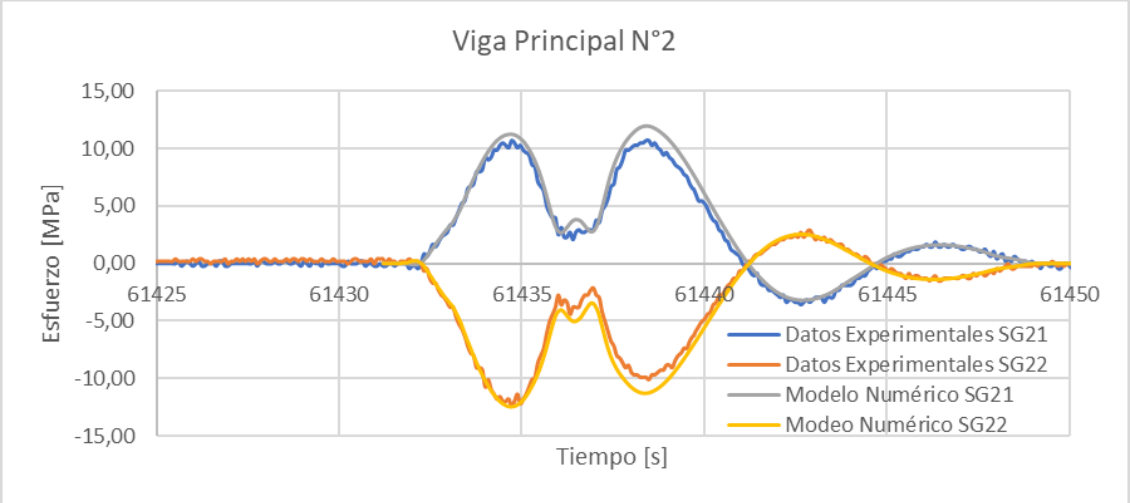


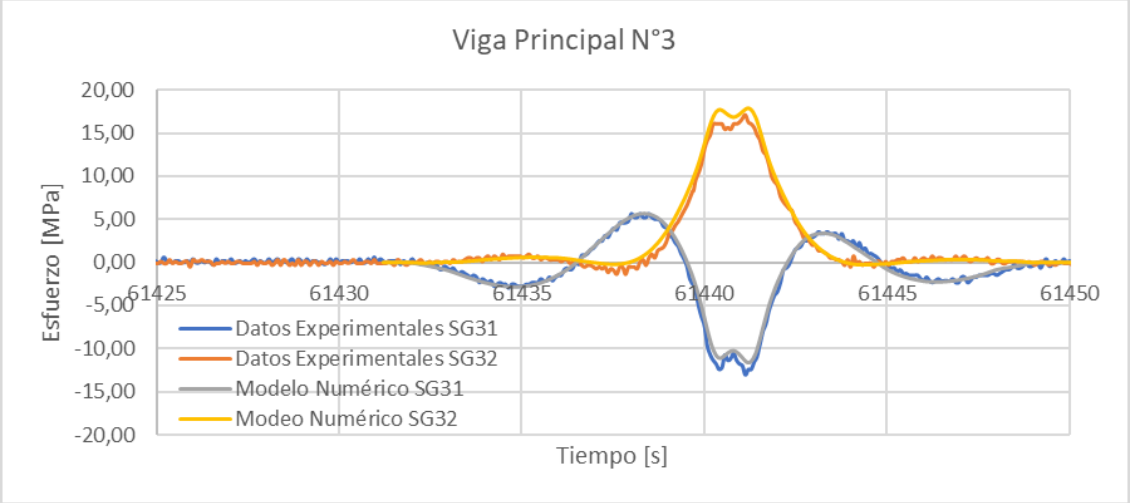
Figura B-3 Disposición de "Strain Gauges" en zona del refuerzo transversal.

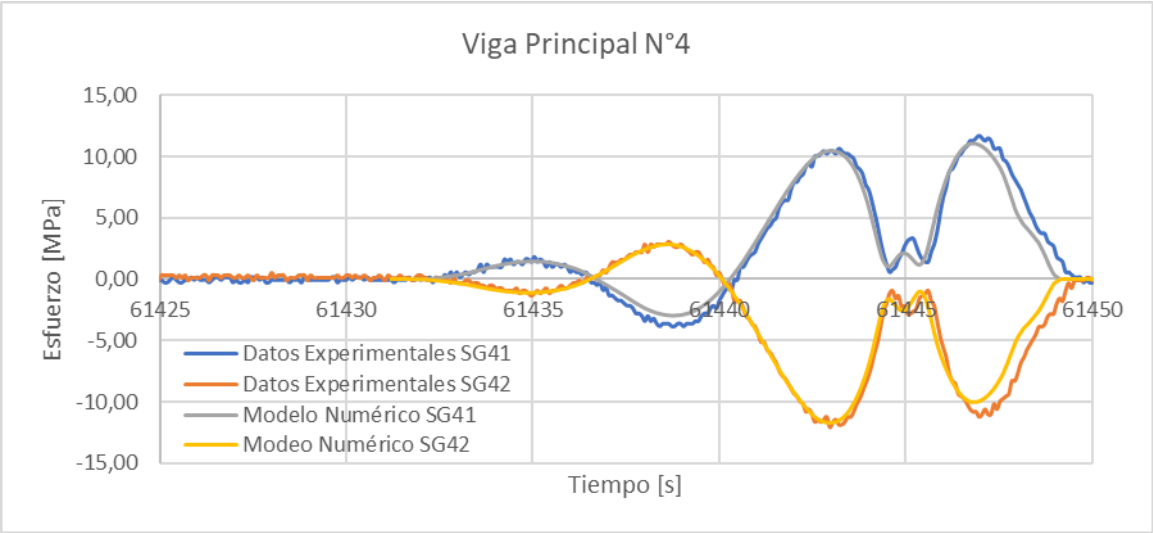
Anexo C RESULTADOS VALIDACIÓN

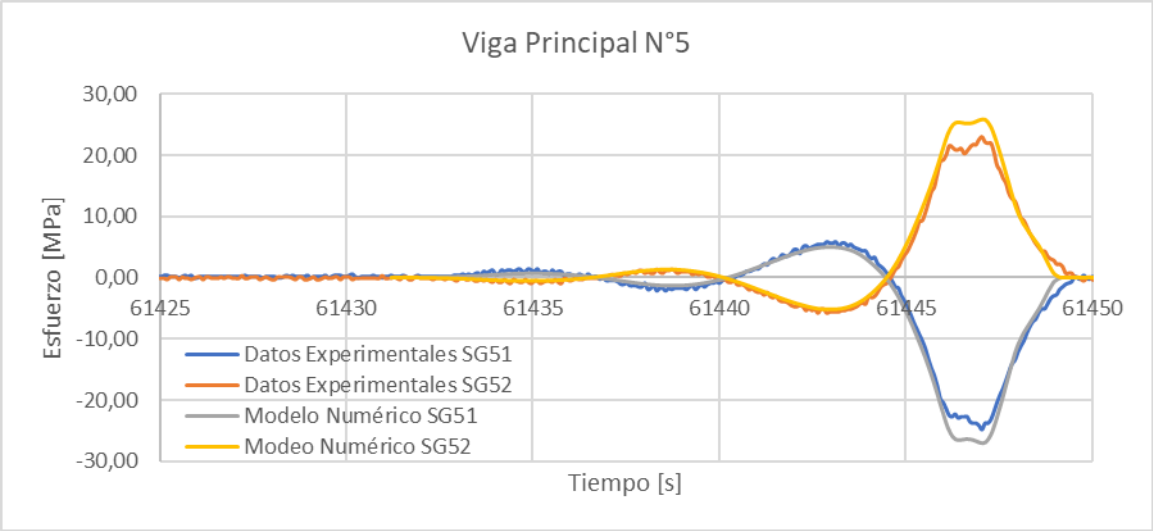
C-1 Vigas Principales



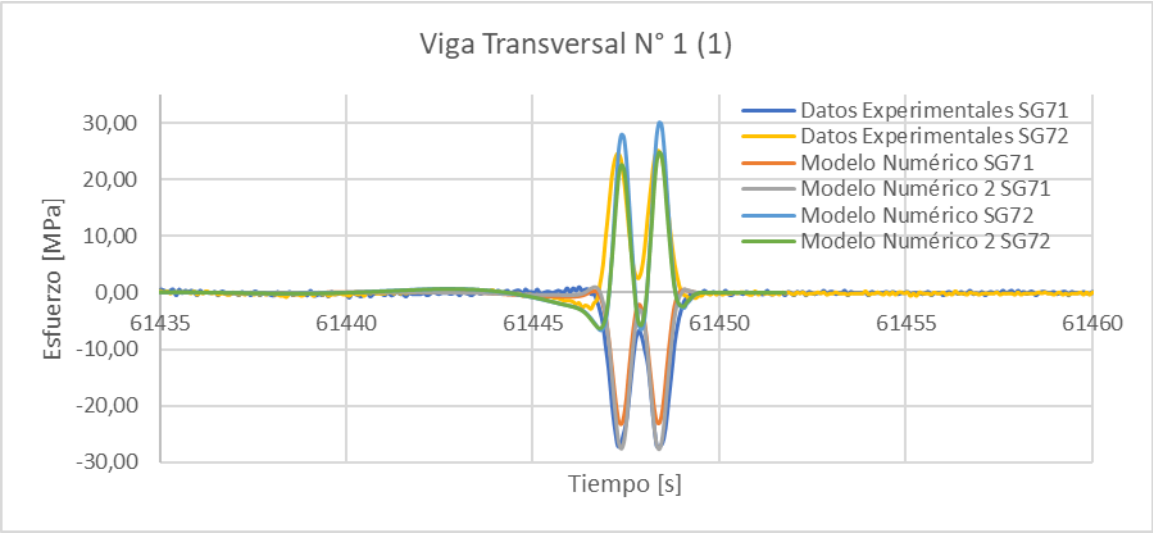


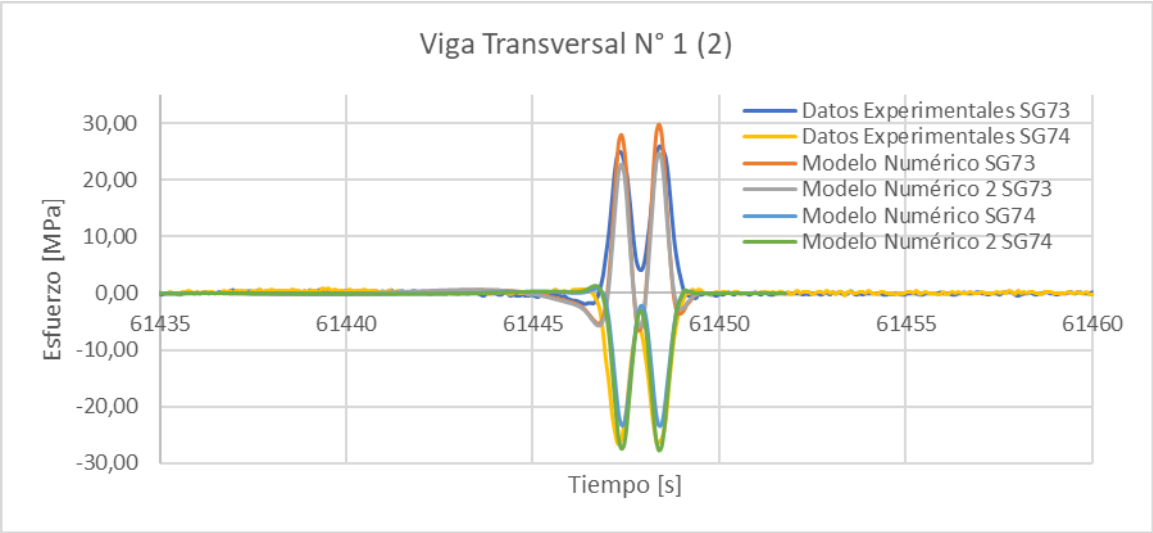


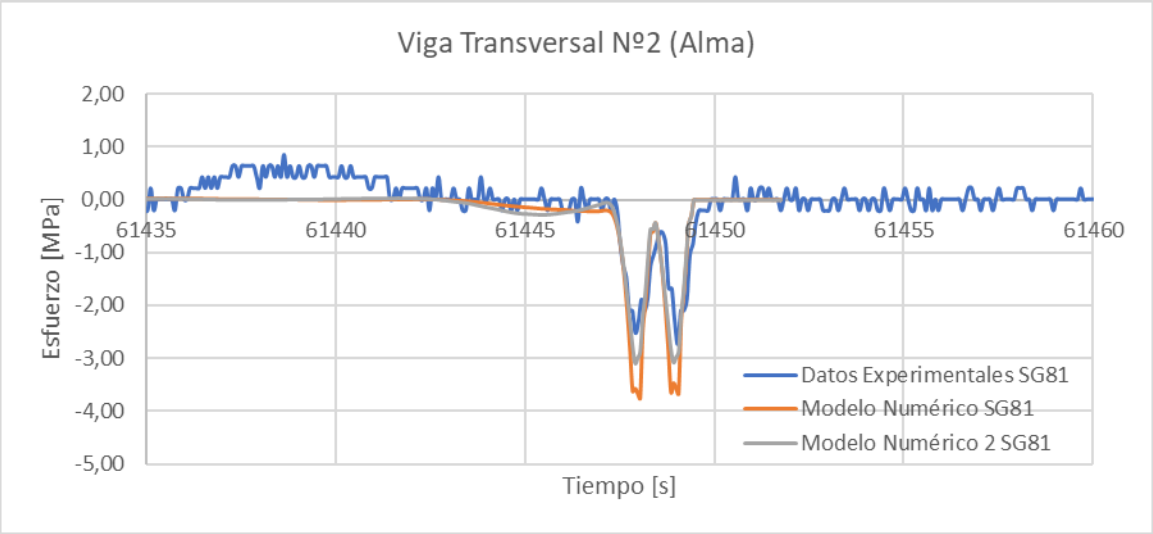


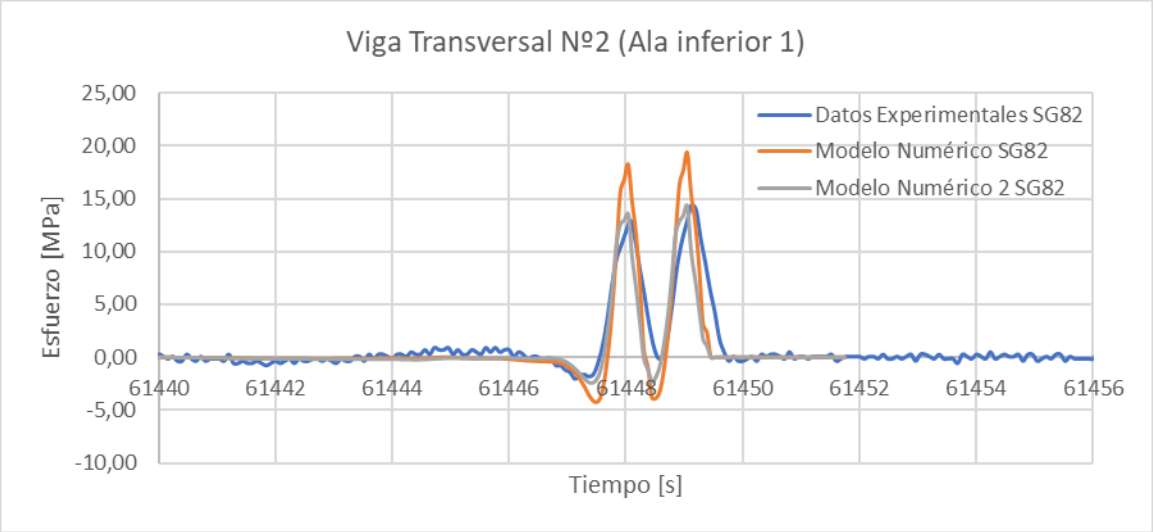


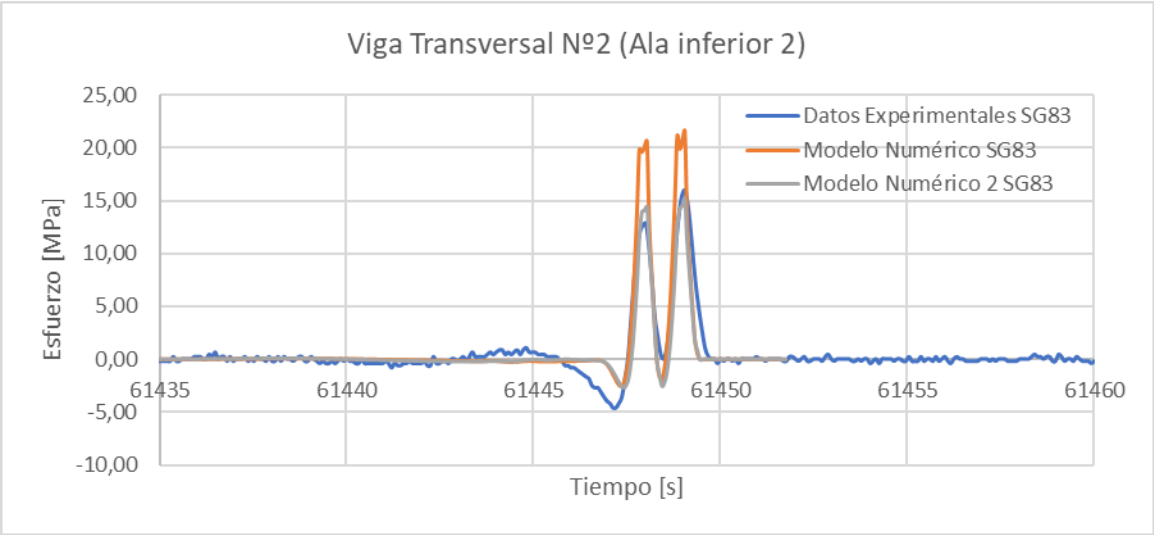
C-2 Vigas Transversales

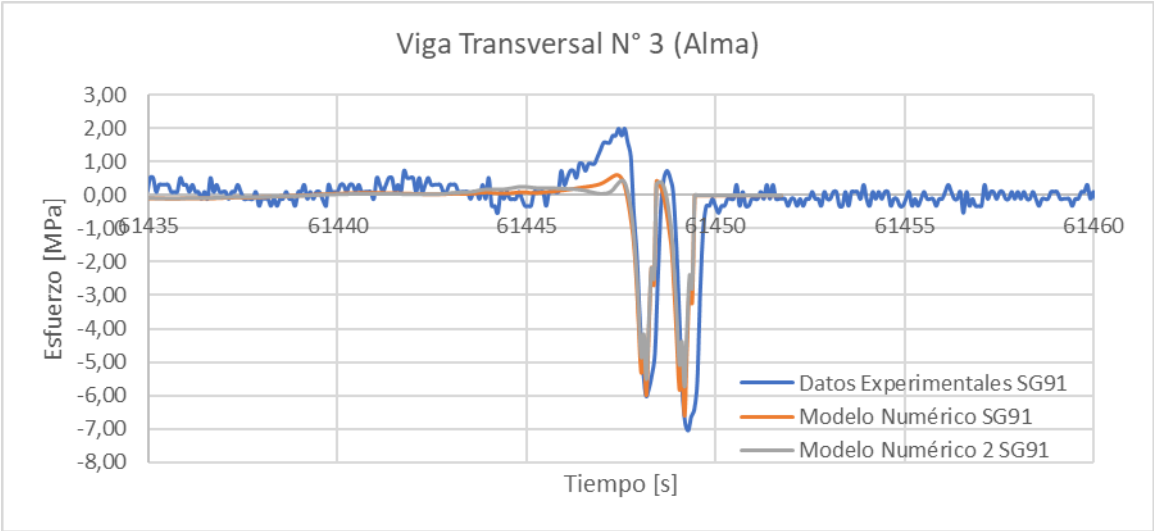


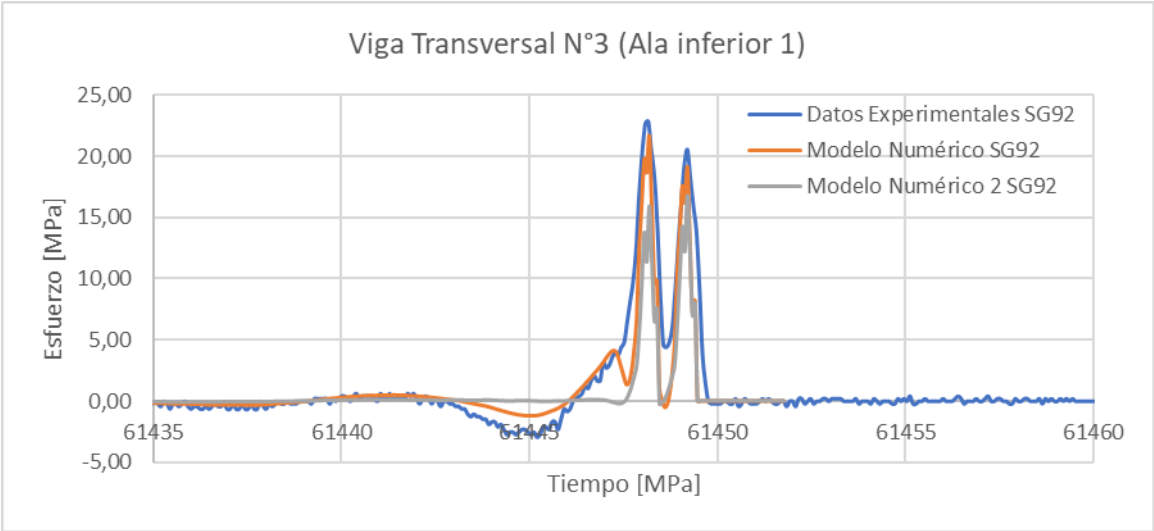

Viga Transversal N° 1 (2)
Datos Experimentales SG73
Datos Experimentales SG74
Modelo Numérico SG73
Modelo Numérico 2 SG73
Modelo Numérico SG74
Modelo Numérico 2 SG74
Esfuerzo [MPa]
30,00
20,00
10,00
0,00
-10,00
-20,00
-30,00
61435
61440
61445
61450
61455
61460
Tiempo [s]

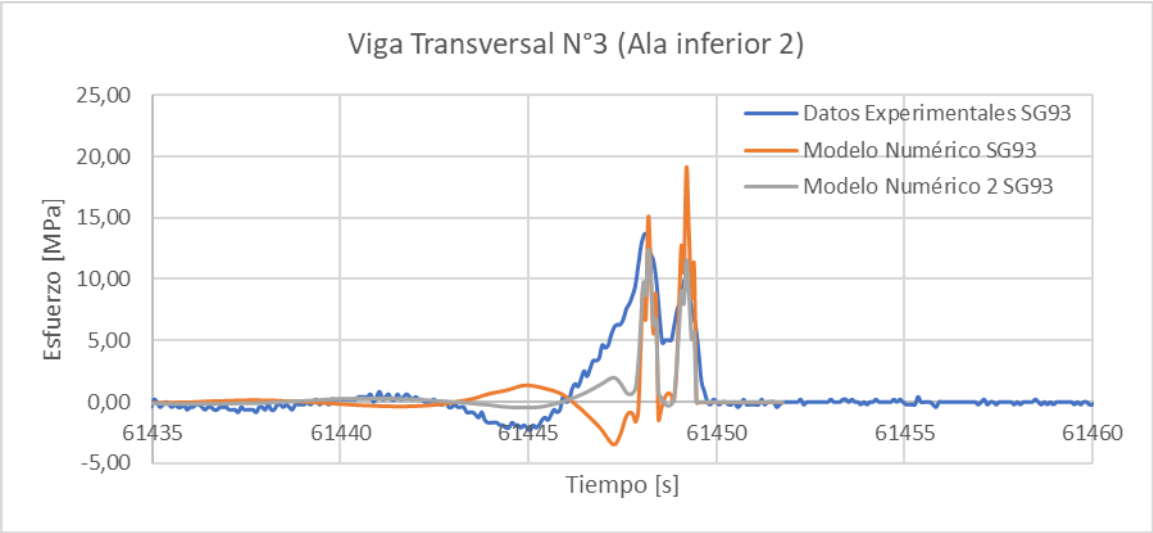

Viga Transversal Nº2 (Alma)
Datos Experimentales SG81
Modelo Numérico SG81
Modelo Numérico 2 SG81
Esfuerzo [MPa]
2,00
1,00
0,00
-1,00
-2,00
-3,00
-4,00
-5,00
61435
61440
61445
61450
61455
61460
Tiempo [s]


Viga Transversal Nº2 (Ala inferior 1)
Datos Experimentales SG82
Modelo Numérico SG82
Modelo Numérico 2 SG82
Esfuerzo [MPa]
25,00
20,00
15,00
10,00
5,00
0,00
-5,00
-10,00
61440
61442
61444
61446
61448
61450
61452
61454
61456
Tiempo [s]

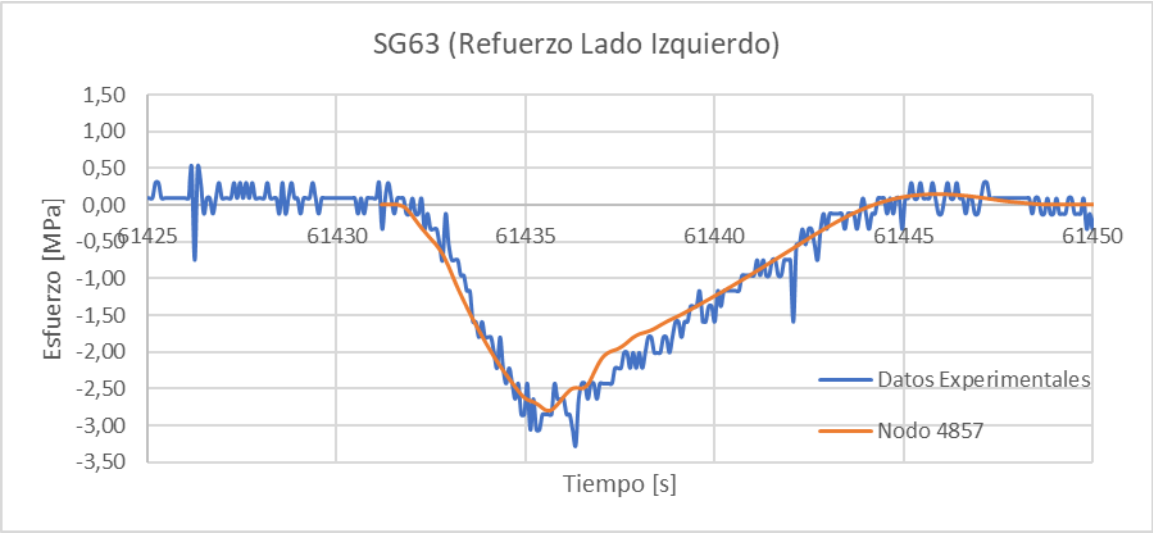

Viga Transversal Nº2 (Ala inferior 2)
Datos Experimentales SG83
Modelo Numérico SG83
Modelo Numérico 2 SG83
Esfuerzo [MPa]
25,00
20,00
15,00
10,00
5,00
0,00
-5,00
-10,00
61435
61440
61445
61450
61455
61460
Tiempo [s]

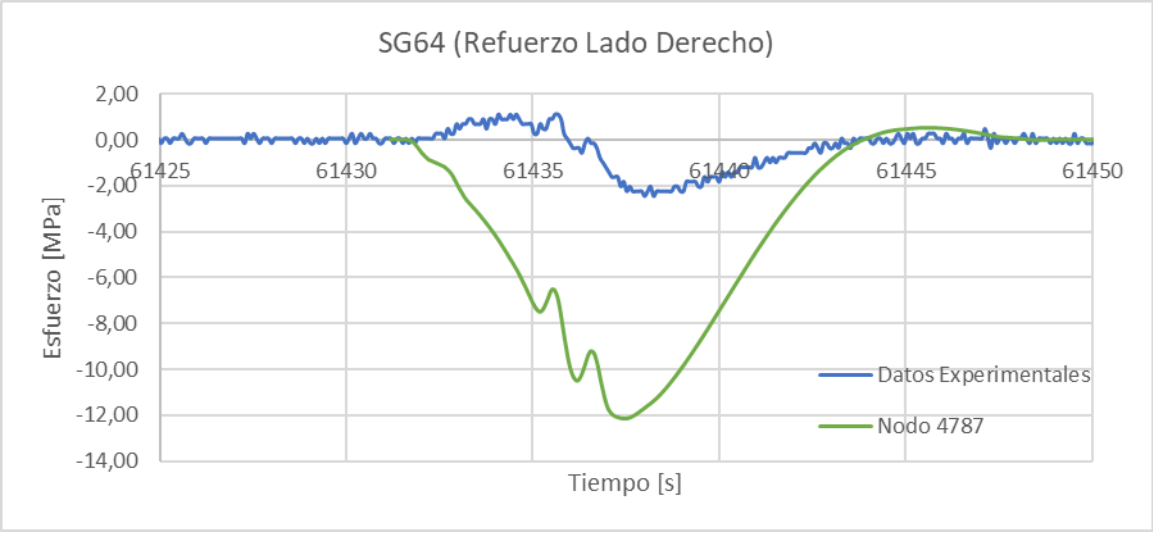

Viga Transversal N° 3 (Alma)
Datos Experimentales SG91
Modelo Numérico SG91
Modelo Numérico 2 SG91
Esfuerzo [MPa]
3,00
2,00
1,00
0,00
-1,00
-2,00
-3,00
-4,00
-5,00
-6,00
-7,00
-8,00
61435
61440
61445
61450
61455
61460
Tiempo [s]

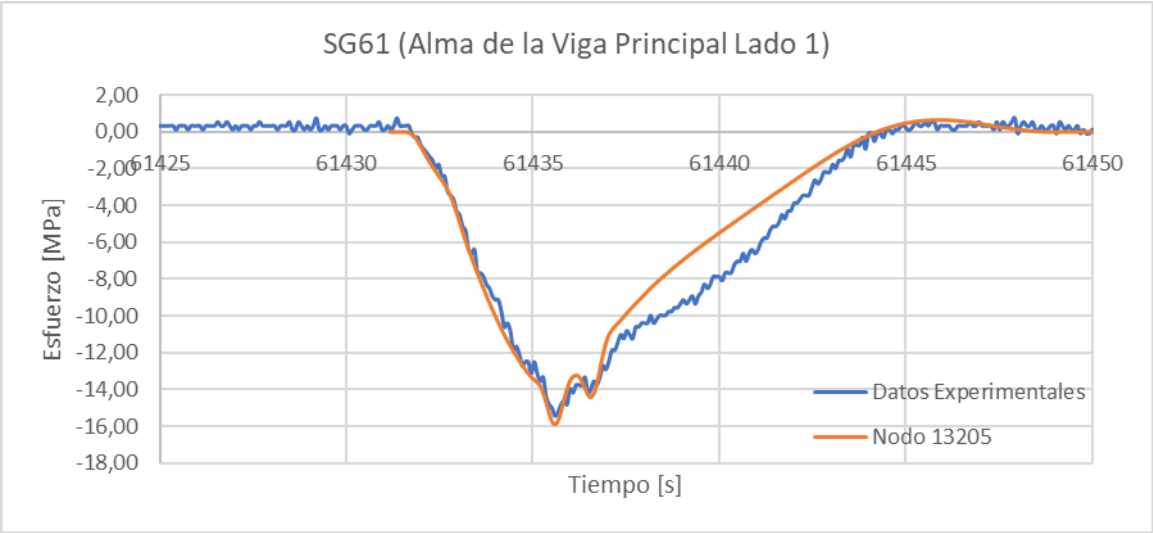

Viga Transversal N°3 (Ala inferior 1)
Datos Experimentales SG92
Modelo Numérico SG92
Modelo Numérico 2 SG92
Esfuerzo [MPa]
25,00
20,00
15,00
10,00
5,00
0,00
-5,00
61435
61440
61445
61450
61455
61460
Tiempo [MPa]

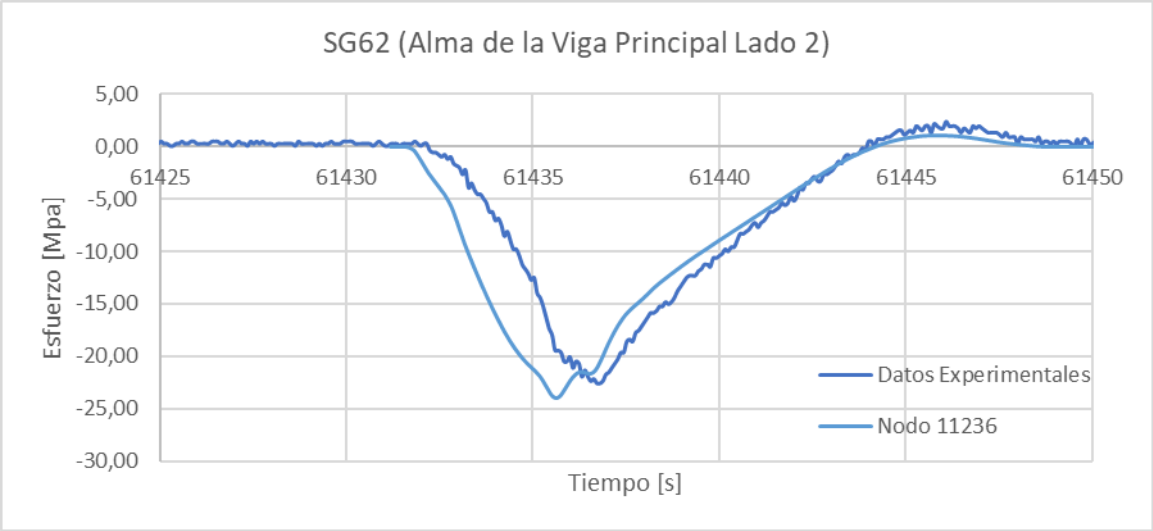


C-3 Refuerzos y Alma viga principal






SG61 (Alma de la Viga Principal Lado 1)
2,00
0,00
-2,00
-4,00
-6,00
-8,00
-10,00
-12,00
-14,00
-16,00
-18,00
61425
61430
61435
61440
61445
61450
Esfuerzo [MPa]
Tiempo [s]
Datos Experimentales
Nodo 13205


SG62 (Alma de la Viga Principal Lado 2)
5,00
0,00
-5,00
-10,00
-15,00
-20,00
-25,00
-30,00
61425
61430
61435
61440
61445
61450
Esfuerzo [Mpa]
Tiempo [s]
Datos Experimentales
Nodo 11236

Anexo D CARGA DE TRÁFICO Y LISTADO DE TRENES

D-1 Período 2005-2015

Tabla D-1 Volumen de Tráfico en "Chvatěruby - Kralupy nad Vltavou" Período 2005-2015

Volumen de tráfico anual	
Año	Mtons
2015	6,13
2014	6,11
2013	7,88
2012	6,72
2011	4,4
2010	5,29
2009	5,03
2008	8,24
2007	8,14
2006	6,33
2005	5,95

D-2 Período 1960-2003

Tabla D-2 Volumen de Tráfico en "Chvatěruby - Kralupy nad Vltavou" Período 1960-2003

Volumen de tráfico anual	
Año	Mtons
2003	3,89
2002	3,83
2001	4,04
2000	4,12
1999	4,06
1998	4,40
1997	4,78
1996	5,15
1995	5,36
1994	4,92
1993	5,19
1992	6,87
1991	7,25
1990	8,93
1989	9,61

Volumen de tráfico anual	
Año	Mtons
1988	9,89
1987	9,64
1986	9,77
1985	9,57
1984	9,68
1983	9,55
1982	9,31
1981	9,33
1980	9,36
1979	9,37
1978	9,31
1977	9,26
1976	9,15
1975	8,96
1974	8,79

Volumen de tráfico anual	
Año	Mtons
1973	8,46
1972	8,42
1971	8,17
1970	7,84
1969	7,44
1968	7,38
1967	7,19
1966	7,27
1965	7,12
1964	6,89
1963	6,48
1962	6,56
1961	6,42
1960	6,09

D-3 Listado de Trenes

Tabla D-3 Listado de trenes de carga que circularon por el puente durante el monitoreo

Tren	Peso [t]	Longitud [m]	N° de vagones	N° de Ejes	Peso vagones [t]
43399	1543	316	20	80	426
44782	2020	465	26	104	799
45389	721	411	28	112	632
52010	1585	440	24	96	664
52947	659	451	23	92	548
52070	1602	308	22	88	450
52082	916	448	25	100	771
52208	1677	358	21	84	526
53272	558	346	21	84	473
53382	1391	308	19	76	362
53740	2286	464	29	116	688
53796	1661	358	20	80	631
54012	667	426	28	112	581
54387	1591	476	28	112	944
54465	1766	346	21	84	473
54519	675	340	19	76	602
55302	939	196	12	48	230
55606	1319	263	17	68	343
55635	1262	259	16	64	346
55639	445	274	17	68	372
55679	441	223	14	56	296
55690	881	184	11	44	272
56005	751	477	25	100	691
57748	768	503	31	124	695
57749	984	539	31	124	895
59530	1180	244	15	60	327
59531	896	506	30	120	811
65565 (3.11)	1269	381	24	96	552
65565 (4.11)	452	248	16	64	323
65565 (6.11)	1368	518	33	132	761
65566 (3.11)	1510	414	27	108	591
65566 (4.11)	1051	332	21	84	473
69507 (3.11)	1168	253	15	60	438
69507 (6.11)	2311	465	29	116	638
69507 (31.10)	1833	415	23	92	736
69530 (1.11)	1500	375	23	92	682
69530 (2.11)	1572	315	20	80	420
69530 (3.11)	1204	303	19	76	457
69530 (5.11)	1300	368	21	84	657
69530 (6.11)	1509	328	19	76	560
69530 (7.11)-1	795	197	13	52	280
69530 (7.11)-2	1222	301	18	72	459
69530 (31.10)	1764	369	23	92	514
69531 (1.11)	1339	525	32	128	753

Tren	Peso [t]	Longitud [m]	N° de vagones	N° de Ejes	Peso vagones [t]
69531 (2.11)	1800	508	32	128	784
69531 (3.11)	1389	499	31	124	679
69531 (4.11)	1172	476	31	124	688
69531 (6.11)	859	508	32	128	686
69531 (31.10)	903	498	31	124	758
85410 (1.11)	748	132	10	40	188
85410 (2.11)	290	53	4	16	60
85410 (3.11)	851	152	12	46	229
85410 (4.11)	1074	193	15	58	293
85410 (7.11)	1457	389	36	92	542
85410 (31.10)	560	134	11	36	180
85411 (1.11)	1036	272	15	60	323
85411 (2.11)	107	40	3	12	42
85411 (3.11)	242	57	4	16	77
85411 (4.11)	167	80	6	24	102
85411 (7.11)	274	109	8	32	155
85411 (31.10)	904	248	13	52	277
85413	399	86	6	24	125
85414	113	48	3	12	48
85450	1174	308	19	76	450
85451	128	28	2	8	0
85452	1187	259	16	64	367
85453	85	18	1	4	0
85454 (2.11)	225	62	4	16	57
85454 (3.11)	128	28	2	8	0
85454 (4.11)	144	34	2	8	0
85454 (6.11)	144	34	2	8	0
85455 (1.11)	1058	260	16	64	399
85455 (2.11)	655	158	10	40	190
85455 (7.11)	467	95	6	24	114

D-4 Trenes Escogidos

D-4-1 Trenes

Tabla D-4 Trenes seleccionados incorporar en el modelo numérico

Clase	Tren	Peso [t]	Longitud [m]	N° de vagones	N° de Ejes	Peso vagones [t]
1	85454 (2.11)	225	62	4	16	57
2	85410 (31.10)	560	134	11	36	180
3-1	69531 (31.10)	903	498	31	124	758
3-2	85410 (3.11)	851	152	12	46	229
4	69530 (7.11)-2	1222	301	18	72	459
5	69530 (1.11)	1500	375	23	92	682
6	69530 (31.10)	1764	369	23	92	514
7	53740	2286	464	29	116	688

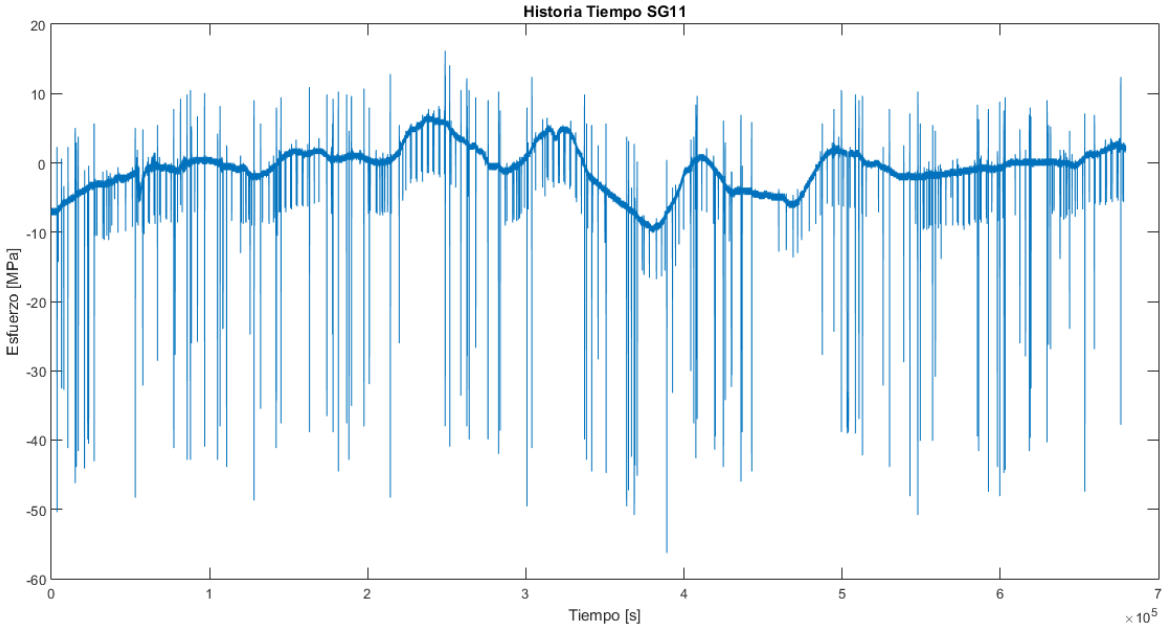
D-4-2 Indicadores de Posición y Dispersión

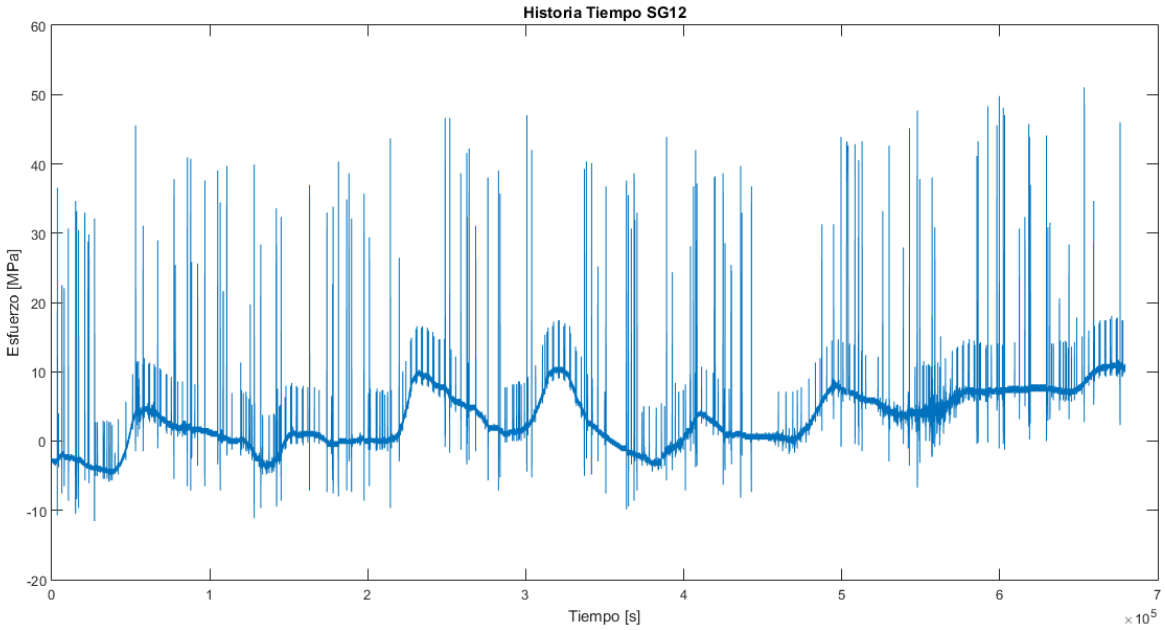
*Tabla D-5 Indicadores de posición y dispersión de cada clase**

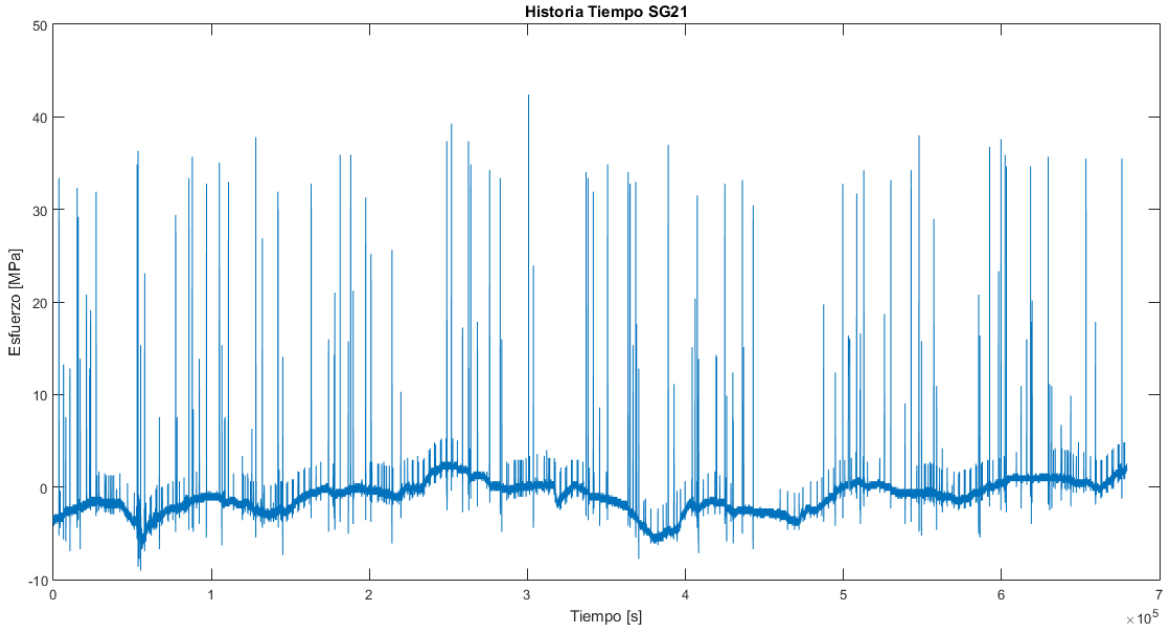
Clase	Parámetros	Peso [t]	Longitud [m]	N° de vagones	N° de Ejes	Peso vagones [t]
1	$\bar{x}$	188,15	52,08	3,62	14,46	51,23
	Me	144,00	48,00	3,00	12,00	48,00
	σ	91,70	26,51	2,02	8,09	52,27
2	$\bar{x}$	557,90	269,50	16,50	65,20	367,90
	Me	559,00	261,00	16,50	66,00	347,50
	σ	100,64	121,17	6,59	27,20	177,11
3	$\bar{x}$	863,47	351,40	21,27	84,93	515,87
	Me	881,00	411,00	25,00	100,00	632,00
	σ	91,65	155,30	8,98	36,07	259,21
4	$\bar{x}$	1198,60	315,00	19,67	78,53	466,80
	Me	1187,00	301,00	18,00	72,00	450,00
	σ	90,18	90,09	5,47	22,02	138,82
5	$\bar{x}$	1513,69	388,00	24,77	95,08	593,23
	Me	1510,00	375,00	23,00	92,00	591,00
	σ	91,32	75,46	5,73	18,56	160,35
6	$\bar{x}$	1768,00	399,20	24,00	96,00	606,60
	Me	1766,00	369,00	23,00	92,00	526,00
	σ	58,20	66,19	4,58	18,33	142,42
7	$\bar{x}$	2205,67	464,67	28,00	112,00	708,33
	Me	2286,00	465,00	29,00	116,00	688,00
	σ	161,28	0,58	1,73	6,93	82,40

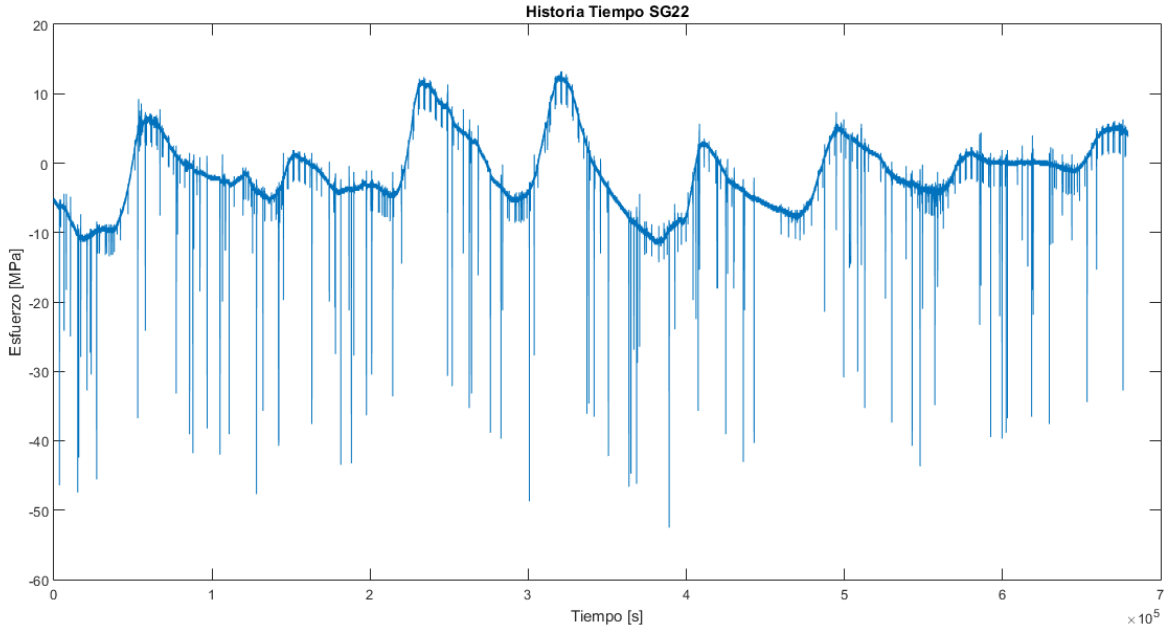
Anexo E HISTORIAS TIEMPO

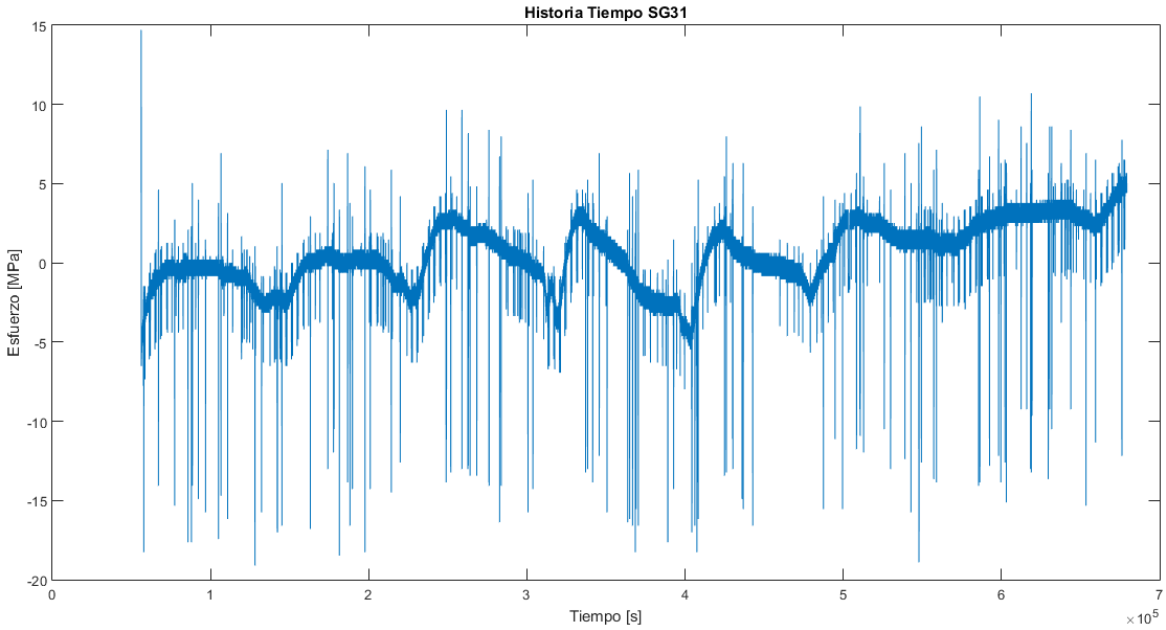
E-1 Vigas Principales

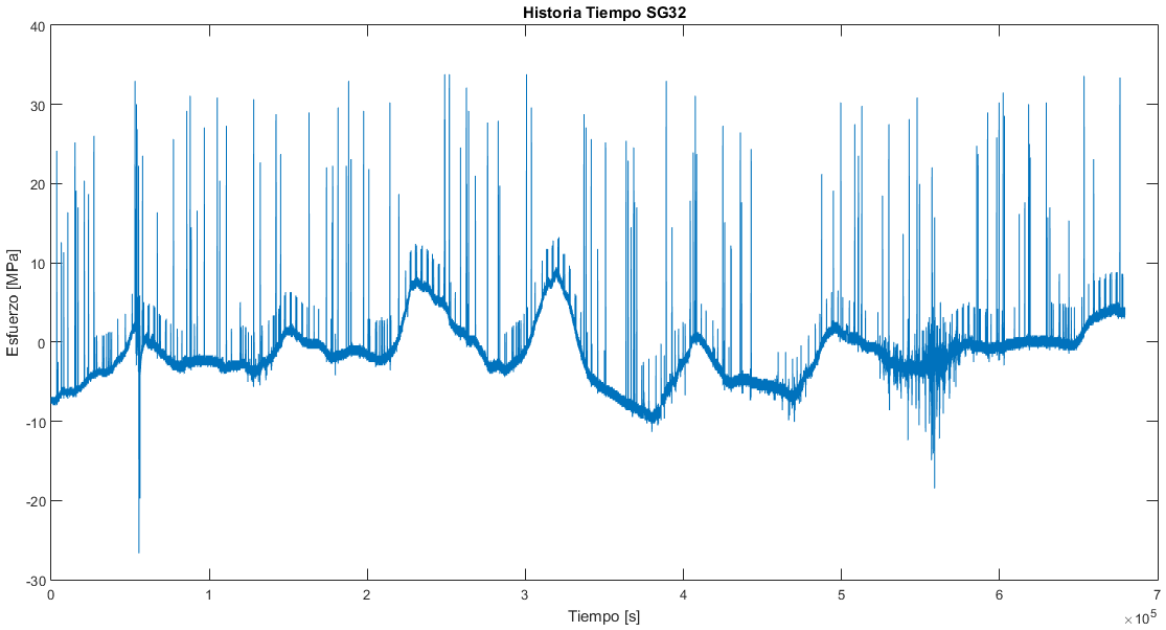


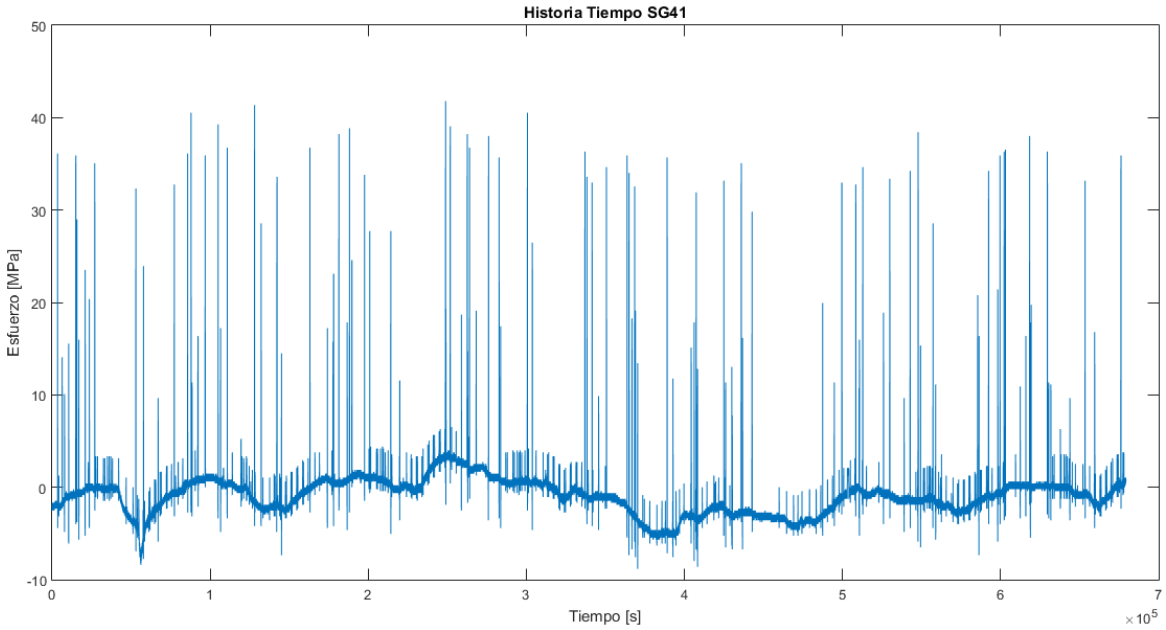


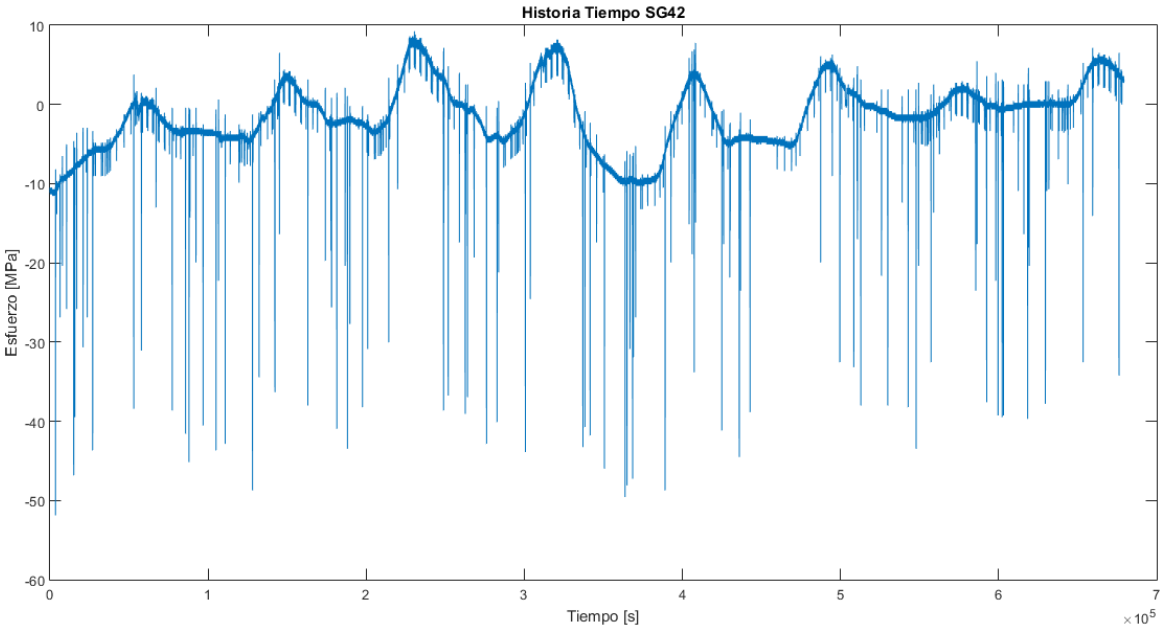

Historia Tiempo SG21
Esfuerzo [MPa]
Tiempo [s]
×10^5

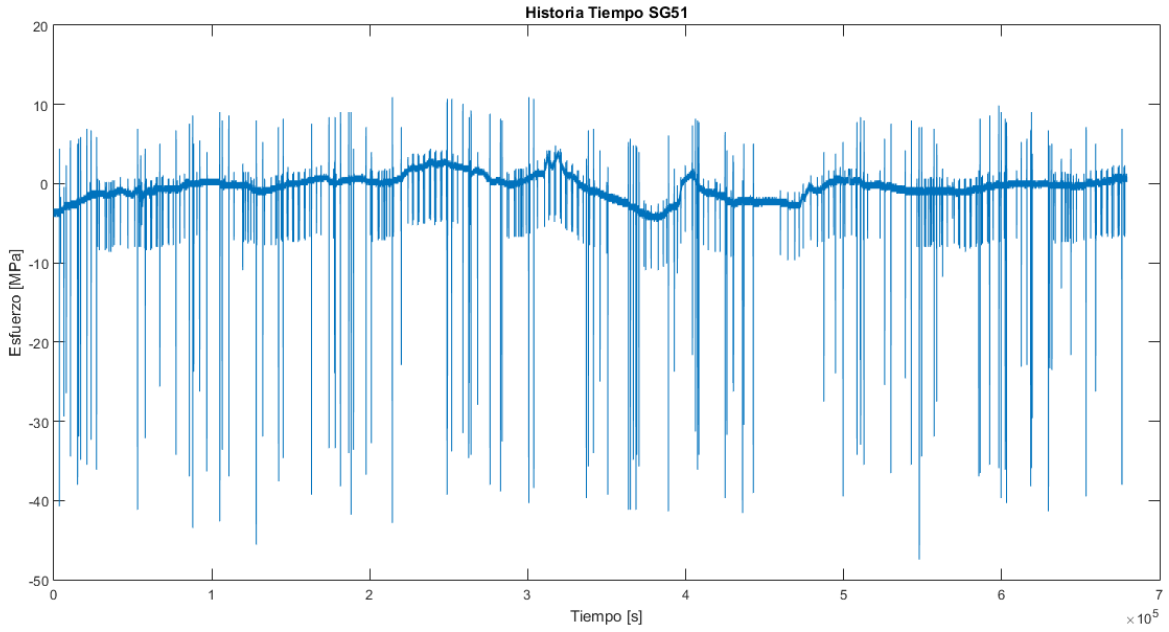

Historia Tiempo SG22
Esfuerzo [MPa]
Tiempo [s]
×10^5

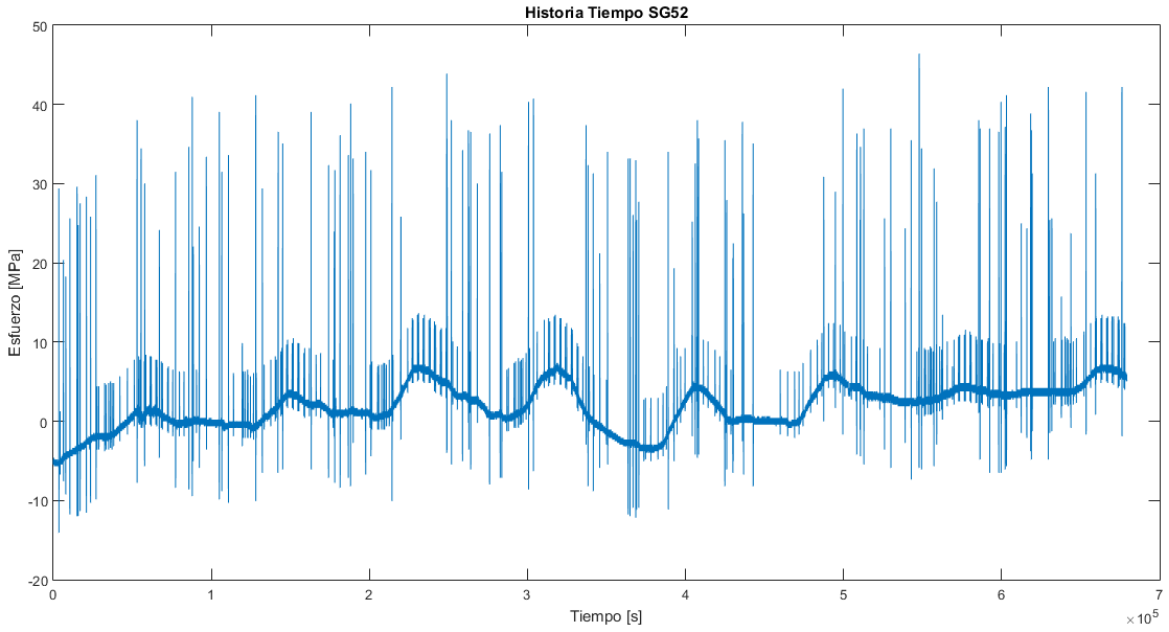

Historia Tiempo SG31
Esfuerzo [MPa]
Tiempo [s]
×10^5
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
0
1
2
3
4
5
6
7


Historia Tiempo SG32
Esfuerzo [MPa]
Tiempo [s]
×10^5
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
0
1
2
3
4
5
6
7

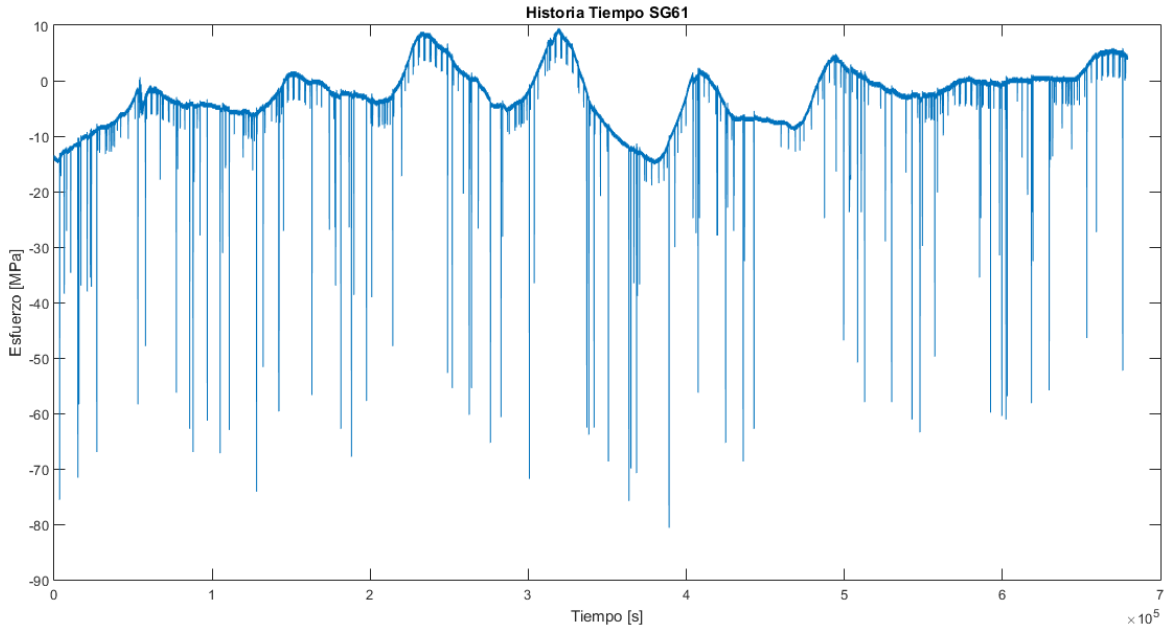

Historia Tiempo SG41
Esfuerzo [MPa]
Tiempo [s]
×10^5
50
40
30
20
10
0
-10
0
1
2
3
4
5
6
7

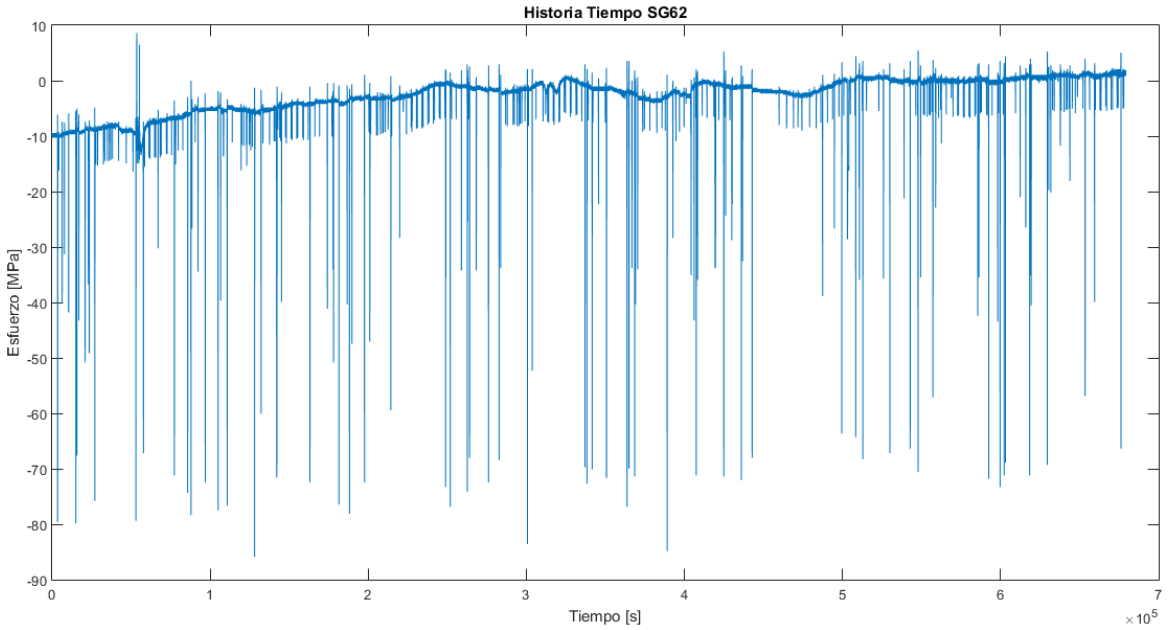

Historia Tiempo SG42
Esfuerzo [MPa]
Tiempo [s]
×10^5
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
-60
0
1
2
3
4
5
6
7

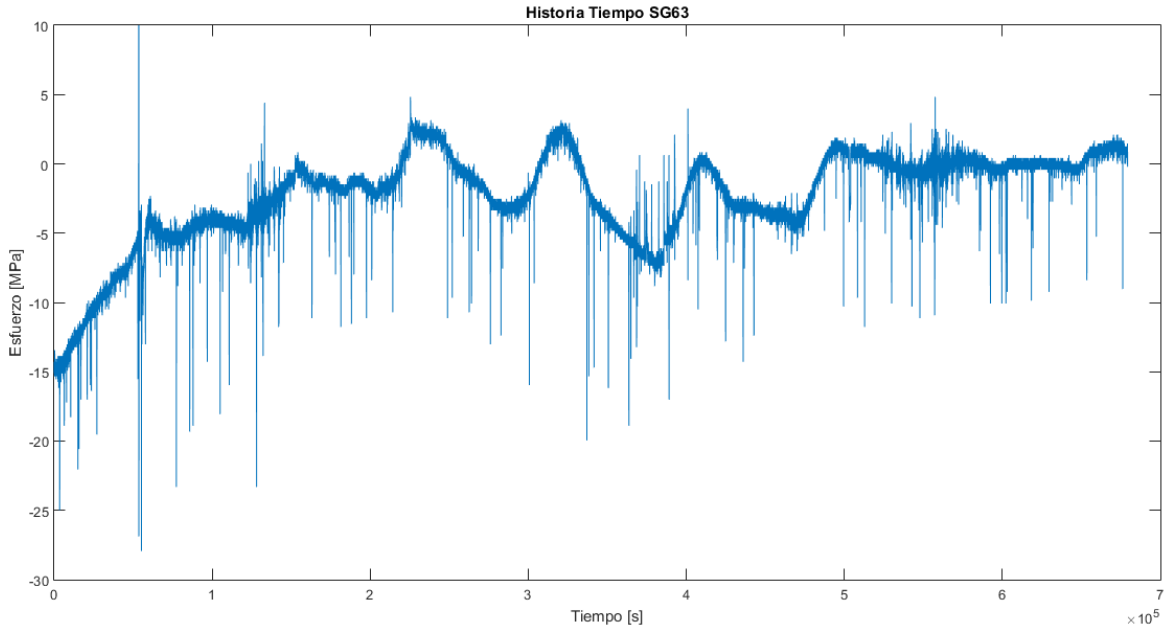

Historia Tiempo SG51
Esfuerzo [MPa]
Tiempo [s]
×10^5
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
0
1
2
3
4
5
6
7

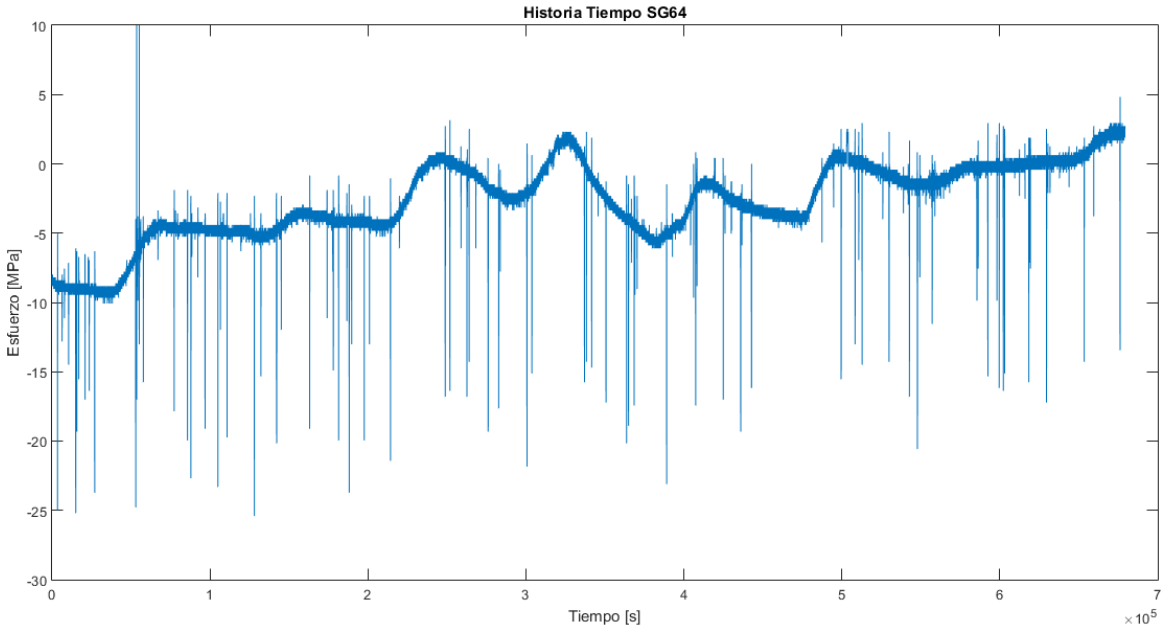

Historia Tiempo SG52
Esfuerzo [MPa]
Tiempo [s]
×10^5
50
40
30
20
10
0
-10
-20
0
1
2
3
4
5
6
7

E-2 Zona Refuerzo Transversal Viga Longitudinal

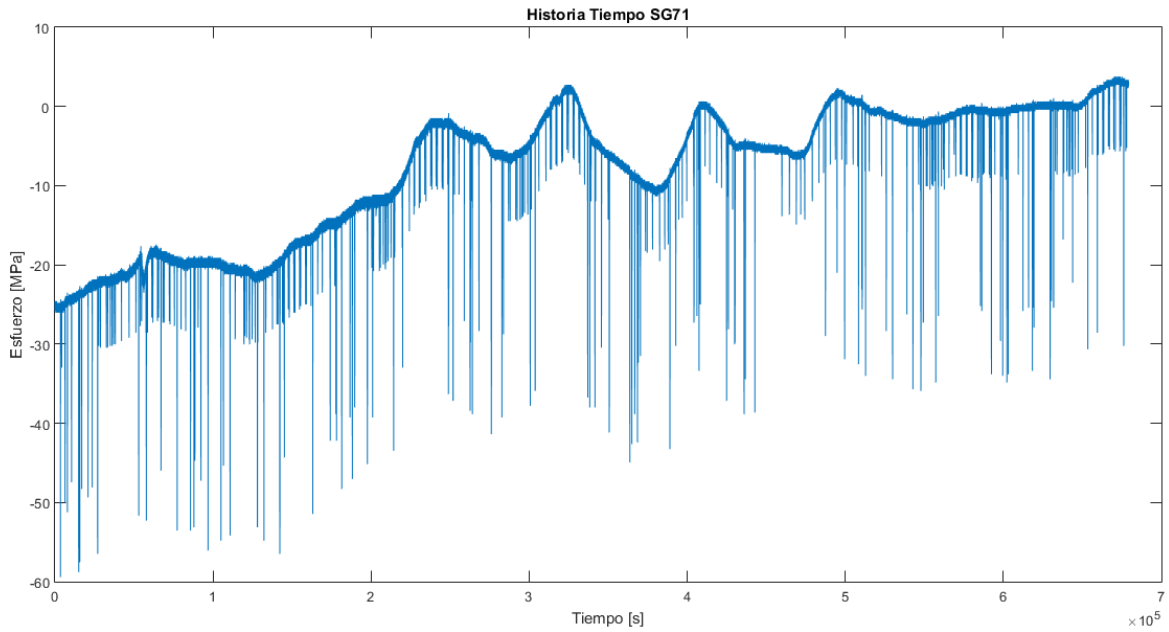


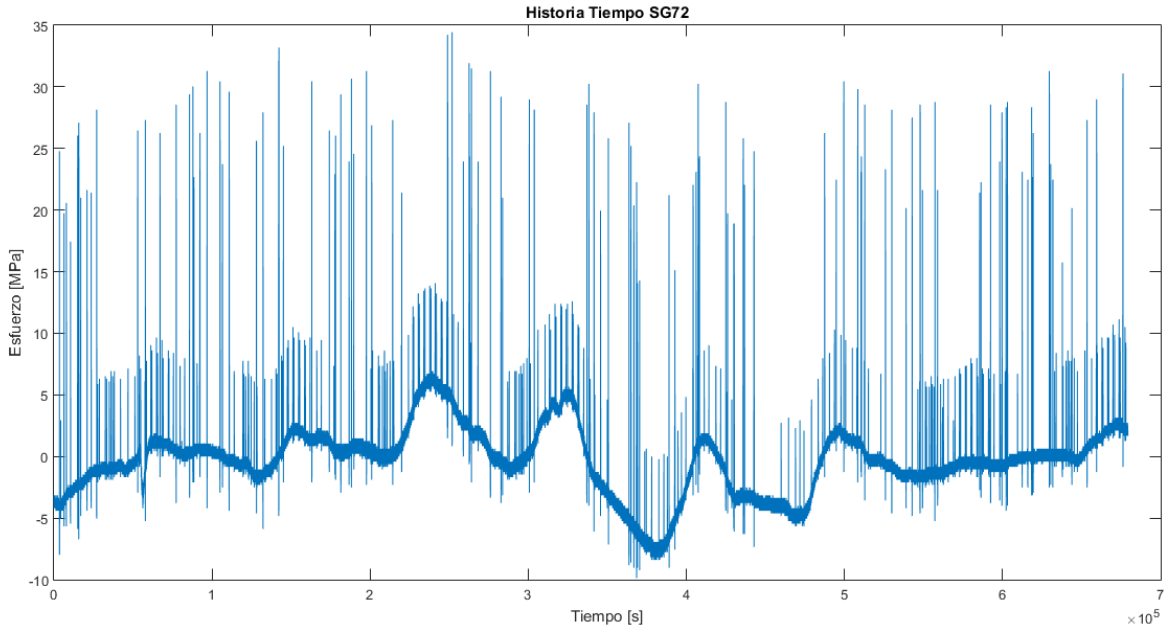


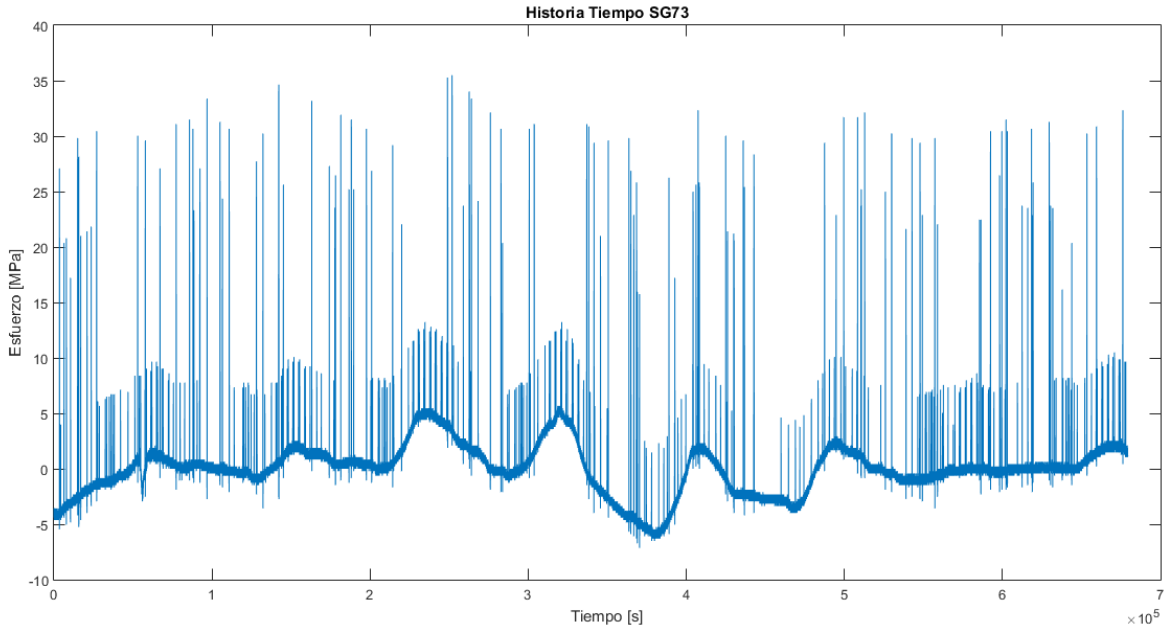

Historia Tiempo SG63
Esfuerzo [MPa]
Tiempo [s]
×10^5
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
0
1
2
3
4
5
6
7

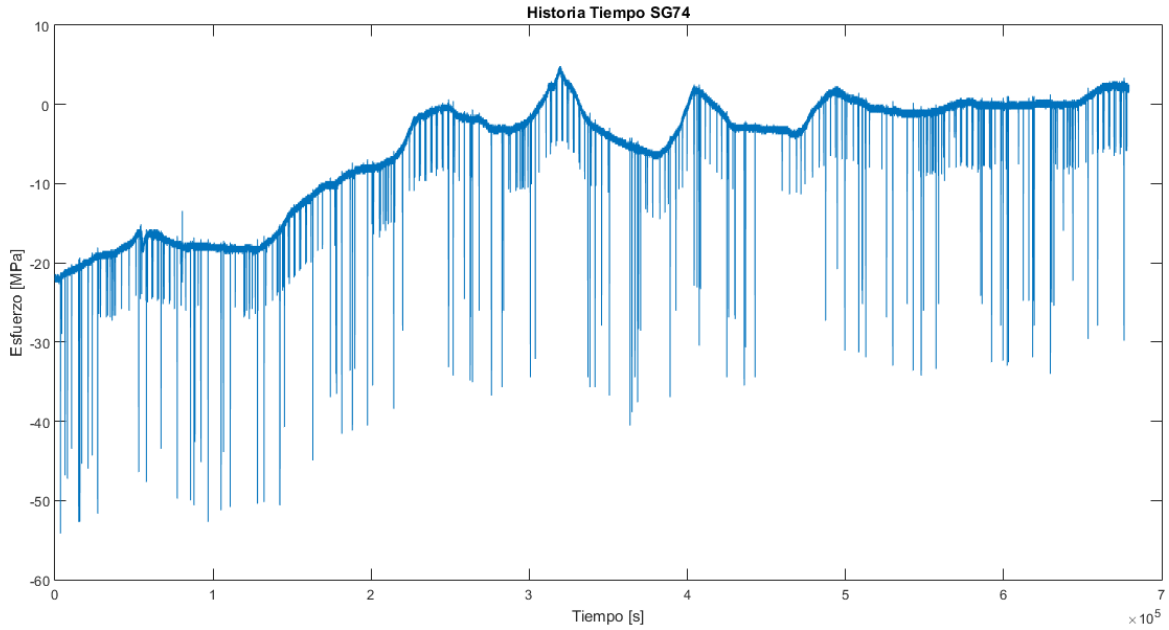

Historia Tiempo SG64
Esfuerzo [MPa]
Tiempo [s]
×10^5
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
0
1
2
3
4
5
6
7

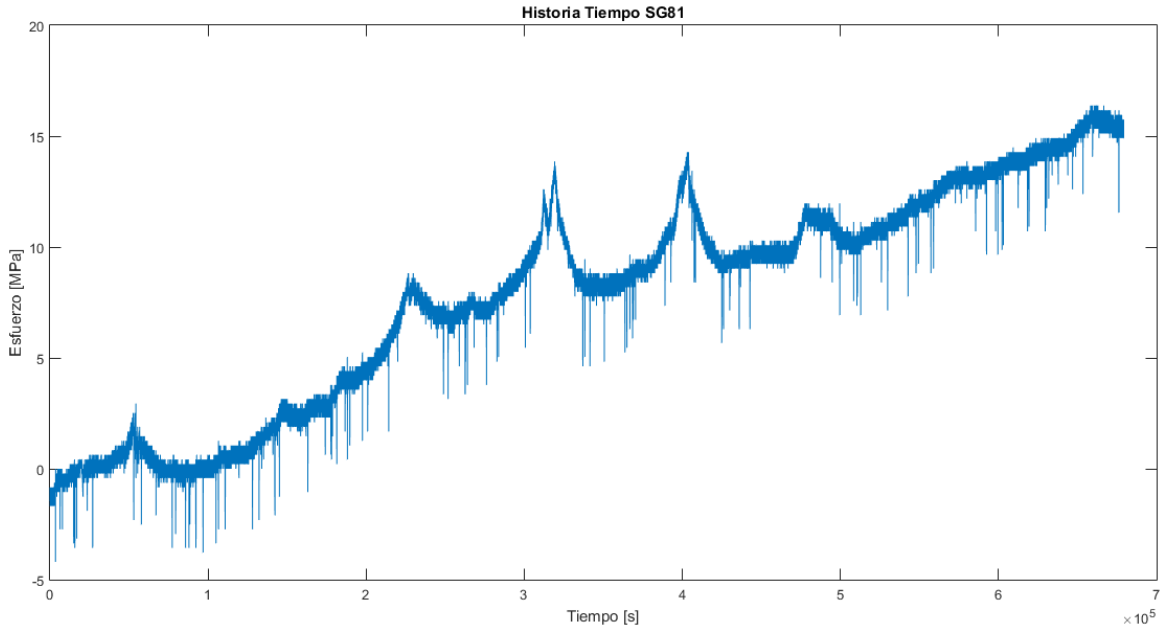
E-3 Vigas Transversales

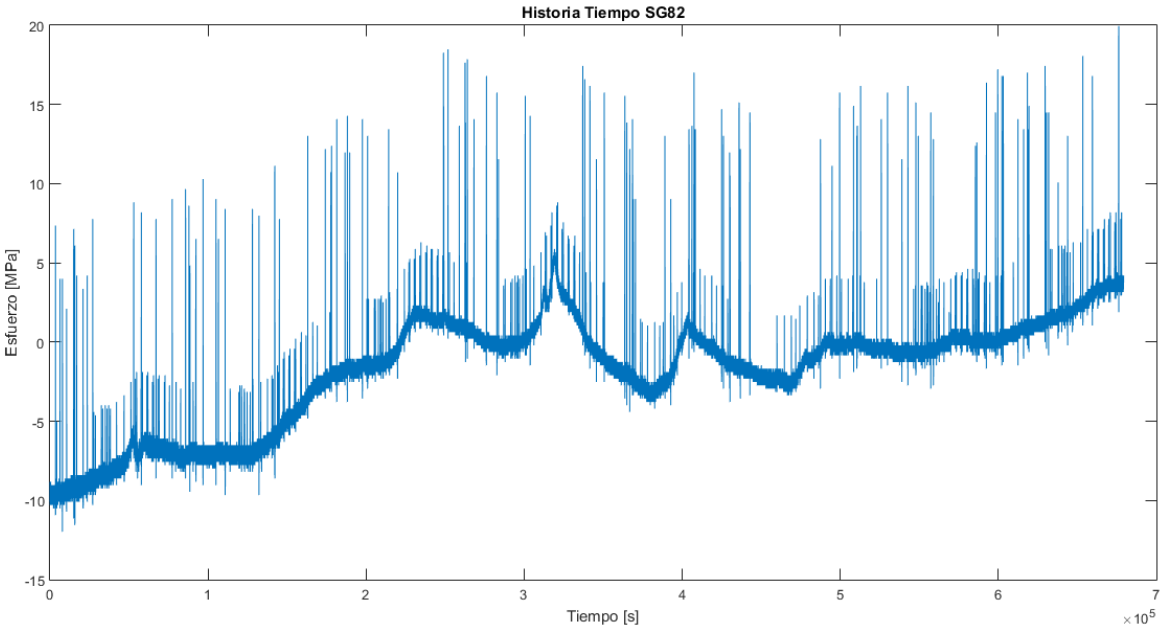


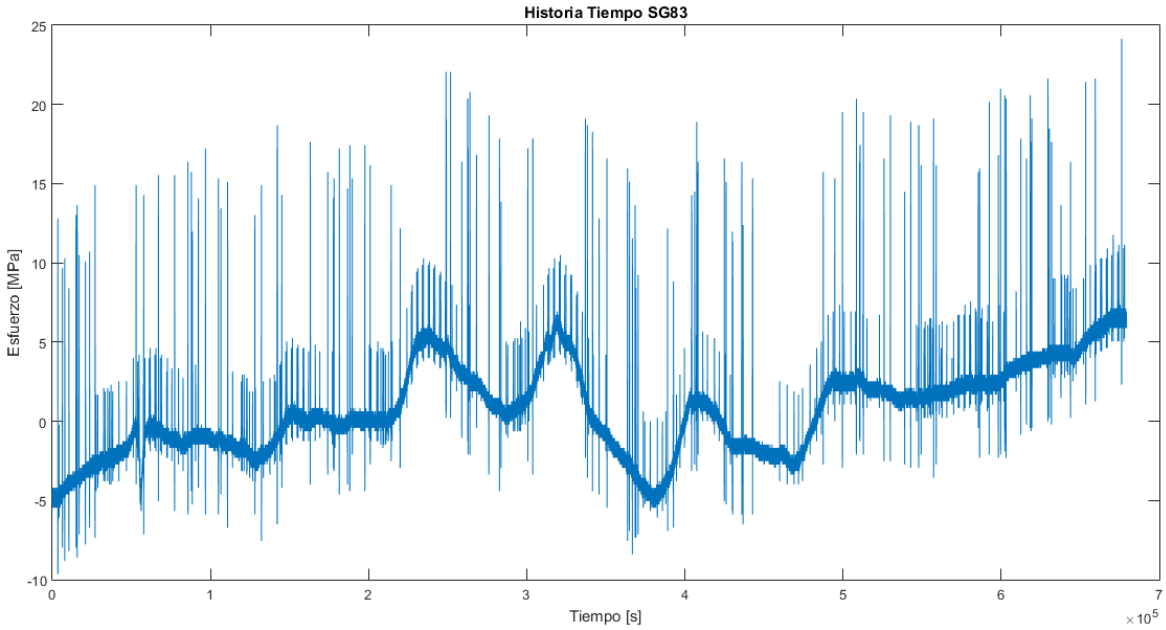


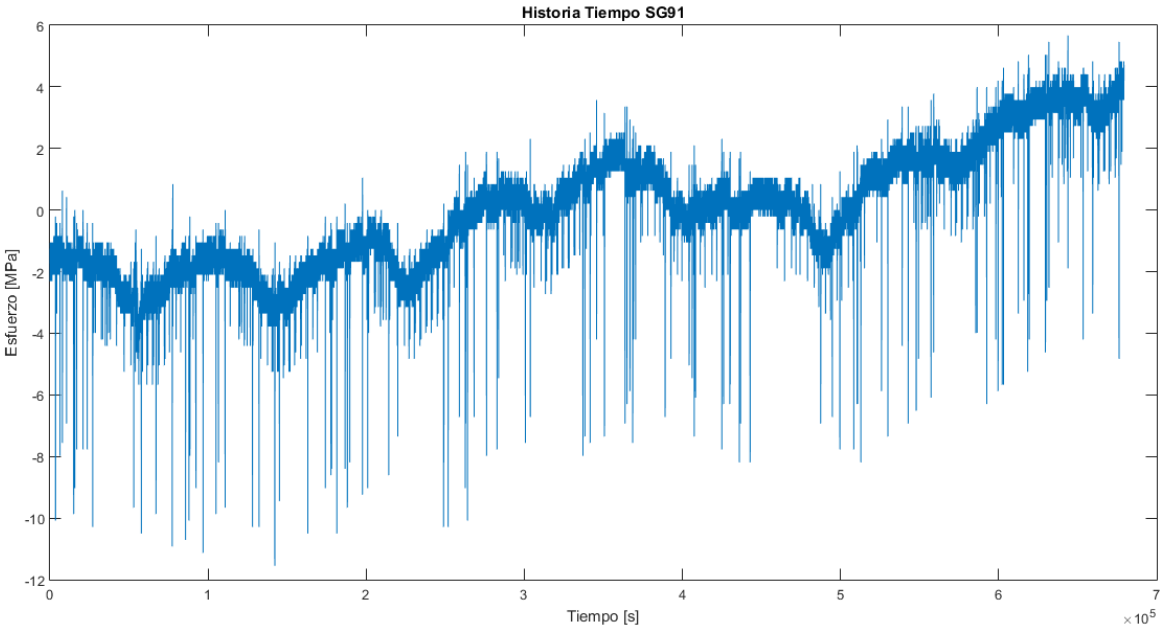

Historia Tiempo SG73
Esfuerzo [MPa]
Tiempo [s]
×10^5

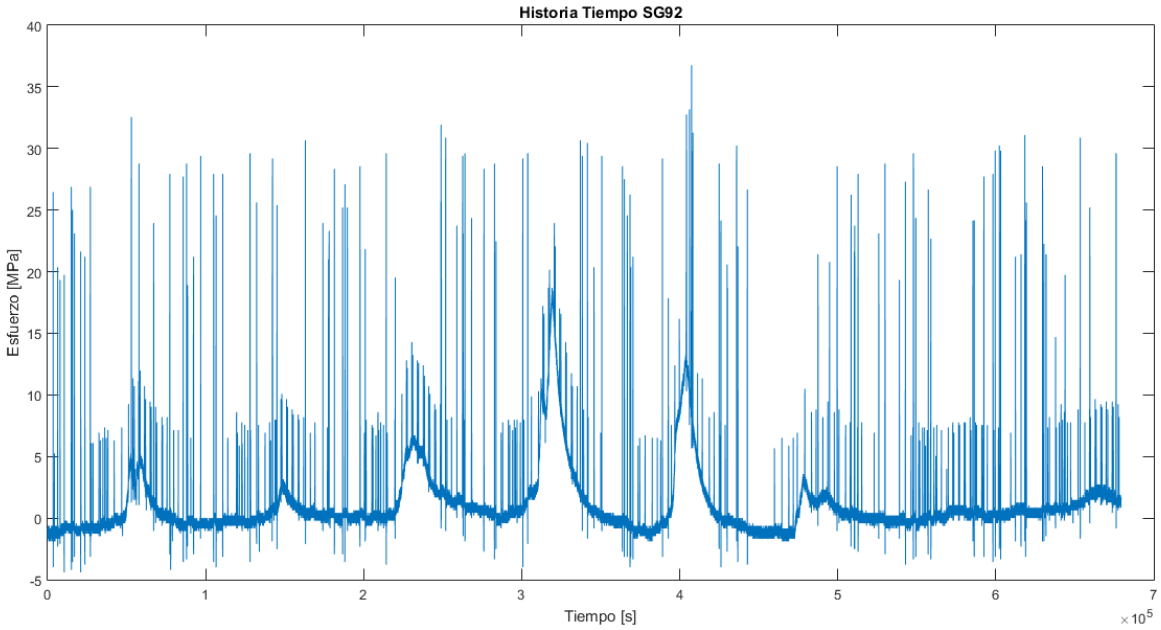

Historia Tiempo SG74
Esfuerzo [MPa]
Tiempo [s]
×10^5

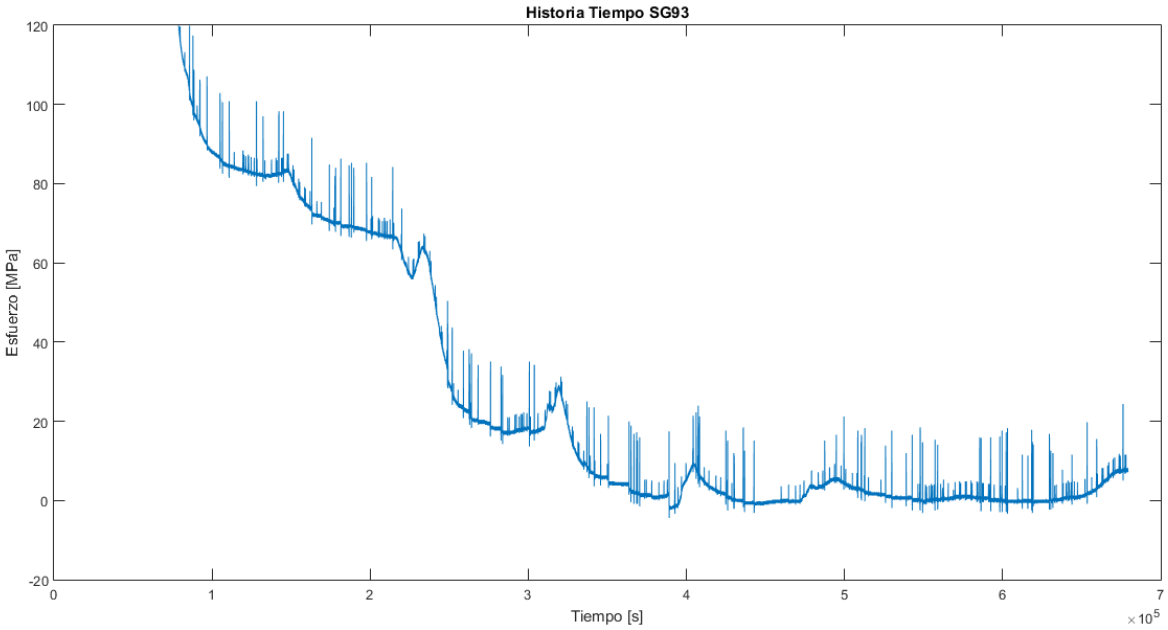

Historia Tiempo SG81
Esfuerzo [MPa]
Tiempo [s]
×10^5
20
15
10
5
0
-5
0
1
2
3
4
5
6
7


Historia Tiempo SG82
Esfuerzo [MPa]
Tiempo [s]
×10^5
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
0
1
2
3
4
5
6
7


Historia Tiempo SG83
Esfuerzo [MPa]
Tiempo [s]
×10^5


Historia Tiempo SG91
Esfuerzo [MPa]
Tiempo [s]
×10^5


Historia Tiempo SG92
Esfuerzo [MPa]
Tiempo [s]
×10^5


Historia Tiempo SG93
Esfuerzo [MPa]
Tiempo [s]
×10^5

Anexo F RESULTADOS EVALUACIÓN A LA FATIGA

F-1 Evaluación Preliminar

Tabla F-1 Nivel de seguridad vigas principales

Elemento	$\Delta\sigma_{1p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{2p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{3p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{4p}$ [MPa]	L_i [m]	λ	$\Delta\sigma_{1\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{2\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{3\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{4\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_c$ [MPa]	Nivel de Seguridad				
												$\mu_{1\,fat}$	$\mu_{2\,fat}$	$\mu_{3\,fat}$	$\mu_{4\,fat}$	$\boldsymbol{\mu_{fat}}$
1	14,76	13,35	15,09	15,84	35,7	0,484	7,53	6,81	7,70	8,08	50	0,20	0,18	0,21	0,22	**0,22**
2	0,00	0,00	0,00	0,00	35,7	0,484	0,00	0,00	0,00	0,00	80	0,00	0,00	0,00	0,00	**0,00**
3	47,64	30,85	31,98	43,78	35,7	0,484	24,31	15,74	16,32	22,34	80	0,41	0,27	0,28	0,38	**0,41**
4	64,40	71,93	67,43	60,93	35,7	0,484	32,86	36,70	34,41	31,09	50	0,89	0,99	0,93	0,84	**0,99**
5	64,89	68,40	60,24	56,45	35,7	0,484	33,11	34,90	30,74	28,81	50	0,89	0,94	0,83	0,78	**0,94**
6	94,63	86,81	76,92	85,66	35,7	0,484	48,29	44,30	39,25	43,71	80	0,81	0,75	0,66	0,74	**0,81**
7	94,64	96,29	87,71	85,92	35,7	0,484	48,30	49,14	44,76	43,85	50	1,30	1,33	1,21	1,18	**1,33**
8	97,56	94,58	83,70	86,97	35,7	0,484	49,79	48,26	42,71	44,38	50	1,34	1,30	1,15	1,20	**1,34**
9	110,16	115,42	104,32	98,62	35,7	0,484	56,21	58,90	53,24	50,33	50	1,52	1,59	1,44	1,36	**1,59**
10	111,51	111,84	99,88	99,52	35,7	0,484	56,90	57,07	50,97	50,79	50	1,54	1,54	1,38	1,37	**1,54**
11	108,95	109,37	97,52	97,07	35,7	0,484	55,60	55,81	49,77	49,53	50	1,50	1,51	1,34	1,34	**1,51**
12	110,73	106,66	92,24	96,65	35,7	0,484	56,50	54,43	47,07	49,32	50	1,53	1,47	1,27	1,33	**1,53**
13	112,54	118,23	102,51	96,25	35,7	0,484	57,43	60,34	52,31	49,12	80	0,97	1,02	0,88	0,83	**1,02**
14	101,31	101,55	86,21	85,98	35,7	0,484	51,70	51,82	43,99	43,88	50	1,40	1,40	1,19	1,18	**1,40**
15	103,19	99,72	80,60	84,41	35,7	0,484	52,66	50,89	41,13	43,08	50	1,42	1,37	1,11	1,16	**1,42**
16	75,15	74,28	61,90	62,86	35,7	0,484	38,35	37,90	31,59	32,08	50	1,04	1,02	0,85	0,87	**1,04**
17	76,64	73,13	60,95	64,80	18,45	0,530	42,78	40,82	34,02	36,17	50	1,16	1,10	0,92	0,98	**1,16**
18	97,56	98,95	97,58	96,05	35,7	0,484	49,78	50,49	49,80	49,02	50	1,34	1,36	1,34	1,32	**1,36**
19	87,30	79,85	78,84	86,81	18,45	0,530	48,73	44,57	44,01	48,46	80	0,82	0,75	0,74	0,82	**0,82**
20	91,15	113,05	114,94	91,06	18,45	0,530	50,88	63,10	64,16	50,83	80*	0,86	0,85	0,87	0,86	**0,87**
21	105,31	102,11	73,38	76,90	18,45	0,530	58,78	57,00	40,96	42,92	50	1,59	1,54	1,11	1,16	**1,59**
22	105,18	103,04	73,94	76,30	18,45	0,530	58,71	57,51	41,27	42,59	50	1,59	1,55	1,11	1,15	**1,59**
23	102,48	101,05	62,39	67,64	18,45	0,530	57,20	56,40	34,83	37,75	50	1,54	1,52	0,94	1,02	**1,54**
24	102,77	99,70	61,50	67,85	18,45	0,530	57,37	55,65	34,33	37,88	50	1,55	1,50	0,93	1,02	**1,55**
25	81,75	80,96	81,07	80,97	18,45	0,530	45,63	45,19	45,25	45,20	80	0,77	0,76	0,76	0,76	**0,77**
26	84,19	104,64	105,63	104,74	18,45	0,530	47,00	58,41	58,96	58,47	80*	0,79	0,79	0,80	0,79	**0,80**
27	98,13	95,49	67,86	69,26	18,45	0,530	54,78	53,30	37,88	38,66	50	1,48	1,44	1,02	1,04	**1,48**
28	98,21	96,56	67,82	68,47	18,45	0,530	54,82	53,90	37,86	38,22	50	1,48	1,46	1,02	1,03	**1,48**
29	94,84	92,44	52,91	57,98	18,45	0,530	52,94	51,60	29,53	32,36	50	1,43	1,39	0,80	0,87	**1,43**
30	94,60	93,65	53,73	58,65	18,45	0,530	52,81	52,28	29,99	32,74	50	1,43	1,41	0,81	0,88	**1,43**
31	104,84	105,63	106,85	106,10	18,45	0,530	58,52	58,96	59,64	59,23	50	1,58	1,59	1,61	1,60	**1,61**
32	92,90	102,13	108,30	96,68	18,45	0,530	51,86	57,01	60,45	53,97	50	1,40	1,54	1,63	1,46	**1,63**
33	94,68	67,71	54,71	81,12	18,45	0,530	52,85	37,80	30,54	45,28	80	0,89	0,64	0,52	0,76	**0,89**
34	101,32	62,05	60,20	93,25	18,45	0,530	56,56	34,64	33,60	52,05	80	0,95	0,58	0,57	0,88	**0,95**
35	100,96	86,71	90,18	92,92	18,45	0,530	56,36	48,40	50,34	51,87	80*	0,95	0,65	0,68	0,88	**0,95**
36	98,40	98,49	99,06	98,86	18,45	0,530	54,93	54,98	55,29	55,18	50	1,48	1,48	1,49	1,49	**1,49**
37	87,55	95,84	103,31	92,66	18,45	0,530	48,87	53,50	57,67	51,72	50	1,32	1,44	1,56	1,40	**1,56**
38	88,44	60,18	53,16	75,55	18,45	0,530	49,37	33,59	29,68	42,17	80	0,83	0,57	0,50	0,71	**0,83**
39	93,09	74,04	78,28	83,87	18,45	0,530	51,96	41,33	43,69	46,81	80*	0,88	0,56	0,59	0,79	**0,88**
40	92,70	53,71	52,10	82,98	18,45	0,530	51,74	29,98	29,08	46,32	80	0,87	0,51	0,49	0,78	**0,87**
41	123,65	96,97	78,62	107,96	18,45	0,530	69,02	54,13	43,89	60,26	80	1,16	0,91	0,74	1,02	**1,16**
42	114,09	118,57	104,29	99,37	56,7	0,492	59,12	61,44	54,04	51,49	50	1,60	1,66	1,46	1,39	**1,66**
43	110,10	102,08	80,67	89,50	18,45	0,530	61,46	56,98	45,03	49,96	50	1,66	1,54	1,22	1,35	**1,66**
44	113,42	88,82	57,43	84,49	18,45	0,530	63,31	49,58	32,06	47,16	80	1,07	0,84	0,54	0,80	**1,07**
45	114,73	106,11	84,77	94,25	18,45	0,530	64,04	59,23	47,32	52,61	50	1,73	1,60	1,28	1,42	**1,73**
46	117,54	97,05	65,97	88,51	18,45	0,530	65,61	54,17	36,82	49,41	80	1,11	0,91	0,62	0,83	**1,11**
47	110,19	114,99	100,99	95,70	56,7	0,492	57,09	59,58	52,33	49,59	50	1,54	1,61	1,41	1,34	**1,61**
48	119,34	89,14	71,00	104,22	18,45	0,530	66,62	49,76	39,63	58,18	80	1,12	0,84	0,67	0,98	**1,12**

Elemento	$\Delta\sigma_{1p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{2p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{3p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{4p}$ [MPa]	L_i [m]	λ	$\Delta\sigma_{1\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{2\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{3\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{4\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_c$ [MPa]	Nivel de Seguridad				
												$\mu_{1\,fat}$	$\mu_{2\,fat}$	$\mu_{3\,fat}$	$\mu_{4\,fat}$	$\boldsymbol{\mu_{fat}}$
49	121,90	115,74	97,77	104,55	56,7	0,492	63,16	59,97	50,66	54,17	50	1,71	1,62	1,37	1,46	**1,71**
50	113,05	105,13	82,20	90,92	56,7	0,492	58,58	54,47	42,59	47,11	50	1,58	1,47	1,15	1,27	**1,58**
51	118,33	109,14	85,82	95,93	56,7	0,492	61,31	56,55	44,47	49,70	50	1,66	1,53	1,20	1,34	**1,66**
52	117,98	112,30	93,68	99,93	56,7	0,492	61,13	58,19	48,54	51,78	50	1,65	1,57	1,31	1,40	**1,65**
53	120,38	106,60	100,64	115,80	56,7	0,492	62,38	55,24	52,15	60,00	80	1,05	0,93	0,88	1,01	**1,05**
54	110,68	111,05	94,24	93,83	56,7	0,492	57,35	57,54	48,83	48,62	80	0,97	0,97	0,82	0,82	**0,97**
55	117,61	103,28	97,70	113,48	56,7	0,492	60,94	53,51	50,63	58,80	80	1,03	0,90	0,85	0,99	**1,03**
56	112,05	115,49	98,27	94,49	56,7	0,492	58,06	59,84	50,92	48,96	80	0,98	1,01	0,86	0,83	**1,01**
57	111,50	120,06	96,75	86,48	56,7	0,492	57,77	62,21	50,13	44,81	50	1,56	1,68	1,35	1,21	**1,68**
58	116,59	120,28	94,80	90,37	56,7	0,492	60,41	62,33	49,12	46,82	50	1,63	1,68	1,33	1,26	**1,68**
59	81,55	86,03	81,95	76,58	56,7	0,492	42,26	44,58	42,46	39,68	50	1,14	1,20	1,15	1,07	**1,20**
60	83,53	86,93	83,32	79,24	56,7	0,492	43,28	45,04	43,17	41,06	50	1,17	1,22	1,17	1,11	**1,22**
61	119,46	118,70	82,84	83,76	56,7	0,492	61,90	61,50	42,92	43,40	50	1,67	1,66	1,16	1,17	**1,67**
62	117,22	123,74	87,99	80,17	56,7	0,492	60,74	64,12	45,59	41,54	50	1,64	1,73	1,23	1,12	**1,73**
63	95,33	96,94	78,78	76,86	56,7	0,492	49,40	50,23	40,82	39,82	50	1,33	1,36	1,10	1,08	**1,36**
64	94,38	101,10	84,79	76,72	56,7	0,492	48,90	52,39	43,93	39,76	50	1,32	1,41	1,19	1,07	**1,41**
65	95,29	102,21	85,88	77,58	56,7	0,492	49,38	52,96	44,50	40,20	50	1,33	1,43	1,20	1,09	**1,43**
66	96,20	97,56	79,54	77,91	56,7	0,492	49,85	50,55	41,22	40,37	50	1,35	1,36	1,11	1,09	**1,36**
67	119,76	126,29	89,39	81,56	56,7	0,492	62,06	65,44	46,32	42,26	50	1,68	1,77	1,25	1,14	**1,77**
68	121,60	120,86	84,40	85,28	56,7	0,492	63,01	62,63	43,73	44,19	50	1,70	1,69	1,18	1,19	**1,70**
69	83,01	86,07	82,27	78,60	56,7	0,492	43,01	44,60	42,63	40,73	50	1,16	1,20	1,15	1,10	**1,20**
70	79,80	84,99	82,62	76,40	56,7	0,492	41,35	44,04	42,81	39,59	50	1,12	1,19	1,16	1,07	**1,19**
71	113,92	117,44	93,65	89,42	56,7	0,492	59,03	60,85	48,52	46,33	50	1,59	1,64	1,31	1,25	**1,64**
72	109,58	118,65	95,32	84,44	56,7	0,492	56,78	61,48	49,39	43,75	50	1,53	1,66	1,33	1,18	**1,66**
73	74,12	65,59	76,63	69,88	56,7	0,492	38,40	33,99	39,70	36,21	80*	0,65	0,57	0,54	0,61	**0,65**
74	62,78	68,03	61,31	53,52	56,7	0,492	32,53	35,25	31,77	27,73	50	0,88	0,95	0,86	0,75	**0,95**
75	62,86	68,92	61,96	54,09	56,7	0,492	32,57	35,71	32,11	28,02	50	0,88	0,96	0,87	0,76	**0,96**
76	70,97	58,59	50,43	65,75	56,7	0,492	36,77	30,36	26,13	34,07	80	0,62	0,51	0,44	0,57	**0,62**
77	69,34	72,44	62,82	58,80	56,7	0,492	35,93	37,54	32,55	30,47	50	0,97	1,01	0,88	0,82	**1,01**
78	69,56	72,41	61,34	57,64	56,7	0,492	36,04	37,52	31,79	29,87	50	0,97	1,01	0,86	0,81	**1,01**
79	86,05	94,33	61,79	80,40	56,7	0,492	44,59	48,88	32,02	41,66	80*	0,75	0,66	0,54	0,70	**0,75**
80	66,82	69,30	61,71	58,49	56,7	0,492	34,62	35,91	31,97	30,30	50	0,93	0,97	0,86	0,82	**0,97**
81	66,45	69,59	63,20	59,12	56,7	0,492	34,43	36,06	32,75	30,63	50	0,93	0,97	0,88	0,83	**0,97**
82	67,64	57,07	52,89	64,88	56,7	0,492	35,05	29,57	27,41	33,62	80	0,59	0,50	0,46	0,57	**0,59**
83	61,80	66,51	61,25	55,13	56,7	0,492	32,02	34,46	31,74	28,56	50	0,86	0,93	0,86	0,77	**0,93**
84	61,74	65,71	59,85	54,65	56,7	0,492	31,99	34,05	31,01	28,32	50	0,86	0,92	0,84	0,76	**0,92**
85	73,35	65,97	75,17	68,39	56,7	0,492	38,01	34,18	38,95	35,44	80*	0,64	0,58	0,53	0,60	**0,64**
86	87,61	93,15	61,50	80,24	56,7	0,492	45,39	48,27	31,87	41,58	80*	0,77	0,65	0,54	0,70	**0,77**
87	84,97	84,20	84,52	85,36	35,7	0,484	43,36	42,97	43,13	43,56	50	1,17	1,16	1,16	1,18	**1,18**
88	97,66	92,81	76,09	81,43	35,7	0,484	49,84	47,36	38,83	41,55	50	1,35	1,28	1,05	1,12	**1,35**
89	72,89	66,63	62,98	69,86	18,45	0,530	40,69	37,19	35,15	39,00	50	1,10	1,00	0,95	1,05	**1,10**
90	72,58	66,99	62,70	68,84	35,7	0,484	37,04	34,18	32,00	35,13	50	1,00	0,92	0,86	0,95	**1,00**
91	67,91	61,74	59,59	66,38	35,7	0,484	34,65	31,50	30,41	33,87	50	0,94	0,85	0,82	0,91	**0,94**
92	67,35	62,17	61,22	66,91	18,45	0,530	37,59	34,70	34,17	37,35	50	1,02	0,94	0,92	1,01	**1,02**
93	74,38	63,81	53,53	65,16	35,7	0,484	37,96	32,56	27,31	33,25	50	1,02	0,88	0,74	0,90	**1,02**
94	73,75	65,05	56,06	65,63	18,45	0,530	41,16	36,31	31,29	36,63	50	1,11	0,98	0,84	0,99	**1,11**
95	100,59	94,22	92,62	99,63	35,7	0,484	51,33	48,08	47,26	50,84	50	1,39	1,30	1,28	1,37	**1,39**
96	113,78	109,67	107,81	112,33	35,7	0,484	58,06	55,97	55,02	57,32	80	0,98	0,94	0,93	0,97	**0,98**
97	102,10	108,55	107,88	100,89	35,7	0,484	52,10	55,40	55,05	51,48	50	1,41	1,50	1,49	1,39	**1,50**
98	103,77	106,02	103,74	101,31	35,7	0,484	52,96	54,10	52,94	51,70	50	1,43	1,46	1,43	1,40	**1,46**
99	106,79	106,89	104,56	104,45	35,7	0,484	54,49	54,55	53,36	53,30	50	1,47	1,47	1,44	1,44	**1,47**
100	108,01	105,11	100,90	104,04	35,7	0,484	55,12	53,64	51,49	53,09	50	1,49	1,45	1,39	1,43	**1,49**
101	88,48	89,36	85,97	85,01	35,7	0,484	45,15	45,60	43,87	43,38	50	1,22	1,23	1,18	1,17	**1,23**
102	88,82	88,49	83,39	83,75	35,7	0,484	45,32	45,16	42,55	42,74	50	1,22	1,22	1,15	1,15	**1,22**
103	89,05	87,88	86,41	87,67	35,7	0,484	45,44	44,85	44,10	44,74	50	1,23	1,21	1,19	1,21	**1,23**
104	86,97	90,66	91,16	87,16	35,7	0,484	44,38	46,27	46,52	44,48	50	1,20	1,25	1,26	1,20	**1,26**
105	90,91	89,13	87,66	89,59	35,7	0,484	46,39	45,48	44,73	45,72	50	1,25	1,23	1,21	1,23	**1,25**
106	93,73	85,72	82,02	90,70	35,7	0,484	47,83	43,74	41,85	46,28	50	1,29	1,18	1,13	1,25	**1,29**
107	75,21	77,29	74,66	72,41	35,7	0,484	38,38	39,44	38,10	36,95	50	1,04	1,06	1,03	1,00	**1,06**
108	78,02	73,90	69,06	73,53	35,7	0,484	39,82	37,71	35,24	37,52	50	1,08	1,02	0,95	1,01	**1,08**

Elemento	$\Delta\sigma_{1p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{2p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{3p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{4p}$ [MPa]	L_i [m]	λ	$\Delta\sigma_{1\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{2\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{3\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{4\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_c$ [MPa]	Nivel de Seguridad $\mu_{1\,fat}$	$\mu_{2\,fat}$	$\mu_{3\,fat}$	$\mu_{4\,fat}$	μ_{fat}
109	100,55	93,76	81,21	88,56	35,7	0,484	51,31	47,85	41,44	45,19	50	1,39	1,29	1,12	1,22	**1,39**
110	98,15	96,94	86,66	87,97	35,7	0,484	50,09	49,47	44,22	44,89	50	1,35	1,34	1,19	1,21	**1,35**
111	98,28	95,46	84,96	88,02	35,7	0,484	50,15	48,71	43,35	44,92	50	1,35	1,32	1,17	1,21	**1,35**
112	98,90	84,18	74,15	90,09	35,7	0,484	50,47	42,96	37,84	45,97	80	0,85	0,72	0,64	0,78	**0,85**
113	84,58	78,45	69,20	75,83	35,7	0,484	43,16	40,03	35,31	38,70	50	1,17	1,08	0,95	1,04	**1,17**
114	82,93	80,78	73,34	75,68	35,7	0,484	42,32	41,22	37,43	38,62	100	0,57	0,56	0,51	0,52	**0,57**
115	96,87	98,83	93,03	90,87	35,7	0,484	49,43	50,43	47,47	46,37	100	0,67	0,68	0,64	0,63	**0,68**
116	79,95	86,18	81,25	74,40	35,7	0,484	40,80	43,98	41,46	37,97	80	0,69	0,74	0,70	0,64	**0,74**
117	60,71	59,46	57,18	58,59	35,7	0,484	30,98	30,34	29,18	29,90	50	0,84	0,82	0,79	0,81	**0,84**
118	27,20	33,03	32,39	25,90	35,7	0,484	13,88	16,86	16,53	13,22	80	0,23	0,28	0,28	0,22	**0,28**
119	0,00	0,00	0,00	0,00	35,7	0,484	0,00	0,00	0,00	0,00	80*	0,00	0,00	0,00	0,00	**0,00**
120	100,88	89,30	88,53	101,27	35,7	0,484	51,48	45,57	45,18	51,68	80	0,87	0,77	0,76	0,87	**0,87**
121	87,73	79,91	79,79	88,39	35,7	0,484	44,77	40,78	40,71	45,11	50	1,21	1,10	1,10	1,22	**1,22**
122	108,46	102,47	88,47	95,07	35,7	0,484	55,35	52,29	45,15	48,51	80	0,93	0,88	0,76	0,82	**0,93**
123	111,90	107,61	93,39	98,12	35,7	0,484	57,10	54,91	47,66	50,07	100	0,77	0,74	0,64	0,68	**0,77**
124	83,93	72,03	80,16	76,44	35,7	0,484	42,83	36,76	40,90	39,01	80*	0,72	0,62	0,55	0,66	**0,72**
125	58,42	57,32	50,10	51,47	35,7	0,484	29,81	29,25	25,57	26,26	50	0,80	0,79	0,69	0,71	**0,80**
126	56,57	58,26	53,82	52,53	35,7	0,484	28,87	29,73	27,46	26,80	100	0,39	0,40	0,37	0,36	**0,40**
127	41,77	22,87	13,13	38,58	35,7	0,484	21,31	11,67	6,70	19,69	100*	0,29	0,16	0,18	0,27	**0,29**
128	83,53	81,68	76,18	78,21	35,7	0,484	42,62	41,68	38,88	39,91	100	0,58	0,56	0,52	0,54	**0,58**
129	78,58	67,17	61,76	74,31	35,7	0,484	40,10	34,28	31,52	37,92	80	0,68	0,58	0,53	0,64	**0,68**
130	10,49	9,36	10,60	11,23	35,7	0,484	5,35	4,78	5,41	5,73	80	0,09	0,08	0,09	0,10	**0,10**
131	0,00	0,00	0,00	0,00	35,7	0,484	0,00	0,00	0,00	0,00	100	0,00	0,00	0,00	0,00	**0,00**
132	0,00	0,00	0,00	0,00	35,7	0,484	0,00	0,00	0,00	0,00	80*	0,00	0,00	0,00	0,00	**0,00**
133	45,16	60,98	59,92	42,50	35,7	0,484	23,04	31,12	30,58	21,69	50	0,62	0,84	0,83	0,59	**0,84**
134	23,51	29,95	29,31	22,31	35,7	0,484	12,00	15,29	14,96	11,39	80	0,20	0,26	0,25	0,19	**0,26**
135	95,62	92,40	97,21	100,69	18,45	0,530	53,37	51,58	54,26	56,20	100	0,72	0,70	0,73	0,76	**0,76**
136	91,38	78,61	83,36	98,10	18,45	0,530	51,01	43,88	46,53	54,76	100	0,69	0,59	0,63	0,74	**0,74**
137	97,15	95,51	101,30	103,26	18,45	0,530	54,23	53,31	56,55	57,64	100	0,73	0,72	0,76	0,78	**0,78**
138	103,39	81,12	79,50	105,16	18,45	0,530	57,71	45,28	44,37	58,70	50	1,56	1,22	1,20	1,58	**1,58**
139	93,21	81,06	86,79	101,21	18,45	0,530	52,03	45,25	48,44	56,50	100	0,70	0,61	0,65	0,76	**0,76**
140	97,52	104,66	105,38	97,44	18,45	0,530	54,43	58,42	58,82	54,39	50	1,47	1,58	1,59	1,47	**1,59**
141	88,54	71,80	71,94	90,41	18,45	0,530	49,42	40,08	40,15	50,46	80	0,83	0,68	0,68	0,85	**0,85**
142	82,73	69,87	71,58	85,89	18,45	0,530	46,18	39,00	39,95	47,94	80	0,78	0,66	0,67	0,81	**0,81**
143	103,10	89,87	88,84	103,24	18,45	0,530	57,55	50,17	49,59	57,63	100	0,78	0,68	0,67	0,78	**0,78**
144	104,95	111,15	111,94	105,30	18,45	0,530	58,58	62,04	62,48	58,78	100	0,79	0,84	0,84	0,79	**0,84**

* El valor de $\Delta\sigma_c$ varía dependiendo del caso (50, 80 ó 100)

Tabla F-2 Nivel de seguridad vigas Transversales

Elemento	$\Delta\sigma_{1p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{2p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{3p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{4p}$ [MPa]	L_i [m]	λ	$\Delta\sigma_{1\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{2\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{3\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{4\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_c$ [MPa]	Nivel de Seguridad $\mu_{1\,fat}$	$\mu_{2\,fat}$	$\mu_{3\,fat}$	$\mu_{4\,fat}$	μ_{fat}
145	52,34	38,08	39,32	56,12	6	0,775	54,37	39,56	40,85	58,30	80	0,92	0,67	0,69	0,98	**0,98**
146	43,80	39,19	43,55	46,29	6	0,775	45,50	40,71	45,24	48,09	80	0,77	0,69	0,76	0,81	**0,81**
147	37,45	36,08	36,87	38,53	6	0,775	38,91	37,48	38,30	40,03	80	0,66	0,63	0,65	0,68	**0,68**
148	34,02	35,22	36,87	35,44	6	0,775	35,34	36,59	38,30	36,82	80	0,60	0,62	0,65	0,62	**0,65**
149	65,68	75,06	64,98	64,41	6	0,775	68,23	77,98	67,50	66,91	80	1,13	1,30	1,12	1,11	**1,30**
150	69,59	68,96	70,42	71,04	7,5	0,749	69,86	69,23	70,69	71,31	80	1,18	1,17	1,19	1,20	**1,20**
151	47,63	55,80	66,77	59,66	7,5	0,749	47,82	56,02	67,02	59,89	80	0,81	0,95	1,13	1,01	**1,13**
152	62,01	68,26	71,95	66,18	6	0,775	64,41	70,90	74,75	68,75	80	1,09	1,20	1,26	1,16	**1,26**
153	54,35	53,78	70,84	63,86	7,5	0,749	54,56	53,99	71,11	64,11	80	0,92	0,91	1,20	1,08	**1,20**
154	59,88	71,52	77,07	65,43	7,5	0,749	60,11	71,79	77,37	65,68	80	1,01	1,21	1,31	1,11	**1,31**
155	58,32	78,81	76,23	55,73	6	0,775	60,58	81,87	79,19	57,90	80	0,99	1,34	1,29	0,94	**1,34**
156	57,09	45,81	62,45	75,20	7,5	0,749	57,31	45,98	62,69	75,49	80	0,97	0,78	1,06	1,27	**1,27**
159	78,59	67,98	66,79	77,40	7,5	0,749	78,89	68,24	67,05	77,70	80	1,33	1,15	1,13	1,31	**1,33**
160	67,56	63,40	59,46	64,91	7,5	0,749	67,82	63,64	59,69	65,16	80	1,14	1,07	1,01	1,10	**1,14**
161	45,86	54,54	67,57	60,31	7,5	0,749	46,03	54,75	67,83	60,54	80	0,78	0,92	1,14	1,02	**1,14**
162	69,22	73,55	73,09	68,76	7,5	0,749	69,49	73,83	73,38	69,03	80	1,17	1,25	1,24	1,16	**1,25**
169	70,61	69,37	73,69	77,04	7,5	0,749	70,89	69,63	73,98	77,34	80	1,20	1,18	1,25	1,31	**1,31**

Elemento	$\Delta\sigma_{1p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{2p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{3p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{4p}$ [MPa]	L_i [m]	λ	$\Delta\sigma_{1\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{2\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{3\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{4\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_c$ [MPa]	Nivel de Seguridad				
												$\mu_{1\,fat}$	$\mu_{2\,fat}$	$\mu_{3\,fat}$	$\mu_{4\,fat}$	$\boldsymbol{\mu_{fat}}$
170	57,46	58,20	69,47	68,73	7,5	0,749	57,68	58,42	69,73	68,99	80	0,97	0,99	1,18	1,16	**1,18**
171	70,27	74,59	82,10	75,41	7,5	0,749	70,54	74,88	82,41	75,70	80	1,19	1,26	1,39	1,28	**1,39**
172	75,43	73,24	74,59	76,77	7,5	0,749	75,72	73,52	74,87	77,07	80	1,28	1,24	1,26	1,30	**1,30**
173	90,70	87,16	89,52	94,19	7,5	0,749	91,05	87,50	89,86	94,55	80	1,54	1,48	1,52	1,60	**1,60**
174	92,56	84,52	87,59	94,80	7,5	0,749	92,91	84,85	87,93	95,17	80	1,62	1,48	1,54	1,66	**1,66**
175	88,46	85,36	88,51	91,05	6	0,775	91,90	88,67	91,94	94,59	80	1,55	1,50	1,55	1,60	**1,60**
176	65,67	66,98	67,23	74,33	6	0,775	68,22	69,58	69,83	77,21	80	1,15	1,17	1,18	1,30	**1,30**
177	89,16	85,47	88,97	91,79	6	0,775	92,63	88,78	92,42	95,35	100	1,25	1,20	1,25	1,29	**1,29**
178	62,81	63,78	66,53	72,05	6	0,775	65,25	66,26	69,12	74,85	100	0,88	0,89	0,93	1,01	**1,01**
179	64,03	63,85	69,04	70,03	6	0,775	66,52	66,33	71,72	72,75	100	0,90	0,90	0,97	0,98	**0,98**
180	89,15	85,01	88,61	91,98	6	0,775	92,61	88,31	92,05	95,55	100	1,25	1,19	1,24	1,29	**1,29**
181	73,43	69,87	72,66	76,21	6	0,775	76,28	72,59	75,48	79,17	100	1,03	0,98	1,02	1,07	**1,07**
182	82,70	70,70	74,14	88,46	6	0,775	85,91	73,45	77,02	91,89	100	1,16	0,99	1,04	1,24	**1,24**
183	70,49	71,71	74,38	73,15	6	0,775	73,22	74,50	77,26	75,99	100	0,99	1,01	1,04	1,03	**1,04**
184	93,29	84,84	87,32	95,29	6	0,775	96,91	88,14	90,71	98,99	100	1,31	1,19	1,22	1,34	**1,34**
185	91,14	86,32	90,40	93,94	6	0,775	94,67	89,67	93,91	97,58	100	1,28	1,21	1,27	1,32	**1,32**
186	89,71	83,66	87,18	92,50	6	0,775	93,19	86,90	90,56	96,09	100	1,26	1,17	1,22	1,30	**1,30**
187	63,35	67,20	65,64	71,20	6	0,775	65,81	69,81	68,18	73,96	100	0,89	0,94	0,92	1,00	**1,00**
188	89,45	84,60	87,96	92,41	6	0,775	92,92	87,88	91,38	95,99	100	1,25	1,19	1,23	1,30	**1,30**
189	61,91	63,97	61,08	69,98	6	0,775	64,31	66,46	63,45	72,69	100	0,87	0,90	0,86	0,98	**0,98**
190	64,07	63,71	64,92	67,99	6	0,775	66,56	66,19	67,44	70,63	100	0,90	0,89	0,91	0,95	**0,95**
191	85,51	88,70	91,38	89,20	6	0,775	88,83	92,14	94,93	92,67	100	1,20	1,24	1,28	1,25	**1,28**
192	39,39	45,18	69,36	63,56	6	0,775	40,92	46,94	72,05	66,03	50	1,10	1,27	1,95	1,78	**1,95**
193	45,78	41,49	62,66	66,95	6	0,775	47,56	43,10	65,09	69,55	50	1,28	1,16	1,76	1,88	**1,88**
194	69,49	71,34	73,69	72,50	6	0,775	72,19	74,11	76,55	75,32	100	0,97	1,00	1,03	1,02	**1,03**
195	45,02	50,66	73,68	68,03	6	0,775	46,77	52,63	76,53	70,67	80	0,79	0,89	1,29	1,19	**1,29**
196	70,00	82,10	89,59	74,37	6	0,775	72,72	85,29	93,07	77,26	100	0,98	1,15	1,26	1,04	**1,26**
197	54,14	55,62	80,32	79,90	6	0,775	56,24	57,78	83,44	83,00	50	1,52	1,56	2,25	2,24	**2,25**
198	52,05	58,19	83,50	77,36	6	0,775	54,07	60,45	86,74	80,36	50	1,46	1,63	2,34	2,17	**2,34**
199	83,71	93,40	95,56	86,24	6	0,775	86,96	97,03	99,27	89,59	100	1,17	1,31	1,34	1,21	**1,34**
200	51,20	49,41	66,87	68,67	6	0,775	53,19	51,33	69,47	71,33	80	0,90	0,87	1,17	1,20	**1,20**
201	72,18	69,47	72,24	74,94	6	0,775	74,98	72,17	75,04	77,85	100	1,01	0,97	1,01	1,05	**1,05**
202	59,34	58,92	80,39	80,81	6	0,775	61,64	61,21	83,52	83,95	50	1,66	1,65	2,25	2,27	**2,27**
203	58,15	60,85	82,82	80,11	6	0,775	60,40	63,21	86,03	83,22	50	1,63	1,71	2,32	2,25	**2,32**
204	85,85	90,64	93,79	90,23	6	0,775	89,19	94,16	97,44	93,74	100	1,20	1,27	1,32	1,27	**1,32**
205	41,77	42,91	59,58	66,92	6	0,775	43,39	44,58	61,89	69,52	80	0,73	0,75	1,04	1,17	**1,17**
206	66,62	62,39	70,85	65,38	6	0,775	69,21	64,81	73,60	67,92	100	0,93	0,87	0,99	0,92	**0,99**
207	57,62	58,22	79,79	79,18	6	0,775	59,85	60,48	82,88	82,26	50	1,62	1,63	2,24	2,22	**2,24**
208	58,09	57,94	79,38	79,53	6	0,775	60,34	60,19	82,46	82,61	50	1,63	1,63	2,23	2,23	**2,23**
209	83,46	88,07	91,23	87,16	6	0,775	86,70	91,48	94,77	90,54	100	1,17	1,24	1,28	1,22	**1,28**
210	41,17	41,62	63,74	65,61	6	0,775	42,77	43,24	66,21	68,16	100	0,58	0,58	0,89	0,92	**0,92**
211	62,75	60,57	68,71	60,84	6	0,775	65,18	62,92	71,38	63,20	100	0,88	0,85	0,96	0,85	**0,96**
212	53,68	53,59	78,29	78,39	6	0,775	55,77	55,67	81,33	81,43	50	1,51	1,50	2,20	2,20	**2,20**
213	54,71	53,02	77,30	78,99	6	0,775	56,84	55,08	80,30	82,06	50	1,53	1,49	2,17	2,22	**2,22**
214	84,32	87,68	90,76	87,97	6	0,775	87,60	91,08	94,28	91,39	100	1,18	1,23	1,27	1,23	**1,27**
215	42,88	42,18	61,97	63,12	6	0,775	44,54	43,82	64,38	65,57	100	0,60	0,59	0,87	0,89	**0,89**
216	63,41	64,13	67,95	64,69	6	0,775	65,87	66,62	70,58	67,20	100	0,89	0,90	0,95	0,91	**0,95**
217	56,74	58,03	80,34	79,05	6	0,775	58,94	60,28	83,46	82,12	50	1,59	1,63	2,25	2,22	**2,25**
218	57,45	57,81	79,10	78,74	6	0,775	59,68	60,06	82,17	81,79	50	1,61	1,62	2,22	2,21	**2,22**
219	87,11	83,21	87,19	90,28	6	0,775	90,49	86,44	90,57	93,78	100	1,22	1,17	1,22	1,27	**1,27**
220	34,30	34,38	62,83	61,34	6	0,775	35,63	35,71	65,27	63,72	80	0,60	0,60	1,10	1,08	**1,10**
221	55,67	57,04	68,71	67,34	6	0,775	57,83	59,25	71,37	69,95	100	0,78	0,80	0,96	0,94	**0,96**
222	57,80	57,61	79,35	79,54	6	0,775	60,04	59,84	82,43	82,63	50	1,62	1,62	2,23	2,23	**2,23**
223	58,32	57,43	78,31	79,20	6	0,775	60,58	59,66	81,35	82,28	50	1,64	1,61	2,20	2,22	**2,22**
224	82,91	87,89	90,78	86,75	6	0,775	86,13	91,30	94,30	90,11	100	1,16	1,23	1,27	1,22	**1,27**
225	42,78	43,37	64,24	61,16	6	0,775	44,44	45,06	66,73	63,54	100	0,60	0,61	0,90	0,86	**0,90**
226	64,47	63,61	70,84	67,62	6	0,775	66,97	66,08	73,59	70,24	100	0,90	0,89	0,99	0,95	**0,99**
227	53,10	54,42	79,17	77,86	6	0,775	55,16	56,53	82,25	80,88	50	1,49	1,53	2,22	2,18	**2,22**
228	53,60	53,72	77,79	77,67	6	0,775	55,68	55,80	80,80	80,68	50	1,50	1,51	2,18	2,18	**2,18**
229	84,06	88,30	91,16	87,76	6	0,775	87,32	91,73	94,69	91,17	100	1,18	1,24	1,28	1,23	**1,28**

Elemento	$\Delta\sigma_{1p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{2p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{3p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{4p}$ [MPa]	L_i [m]	λ	$\Delta\sigma_{1\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{2\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{3\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{4\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_c$ [MPa]	Nivel de Seguridad				
												$\mu_{1\,fat}$	$\mu_{2\,fat}$	$\mu_{3\,fat}$	$\mu_{4\,fat}$	$\boldsymbol{\mu_{fat}}$
230	42,20	41,20	66,15	64,41	6	0,775	43,84	42,80	68,71	66,91	100	0,59	0,58	0,93	0,90	**0,93**
231	63,86	61,67	72,21	65,37	6	0,775	66,34	64,06	75,01	67,90	100	0,90	0,86	1,01	0,92	**1,01**
232	58,16	57,99	79,58	79,75	6	0,775	60,42	60,24	82,67	82,85	50	1,63	1,63	2,23	2,24	**2,24**
233	58,44	57,67	78,44	79,21	6	0,775	60,71	59,91	81,48	82,28	50	1,64	1,62	2,20	2,22	**2,22**
234	83,95	87,28	89,96	86,75	6	0,775	87,21	90,67	93,46	90,12	100	1,18	1,22	1,26	1,22	**1,26**
235	43,51	41,73	65,81	64,81	6	0,775	45,20	43,35	68,37	67,33	100	0,61	0,59	0,92	0,91	**0,92**
236	66,61	65,23	72,99	66,20	6	0,775	69,20	67,77	75,82	68,77	100	0,93	0,91	1,02	0,93	**1,02**
237	61,21	56,57	79,15	83,80	6	0,775	63,59	58,77	82,23	87,05	50	1,72	1,59	2,22	2,35	**2,35**
238	59,42	59,27	80,12	80,27	6	0,775	61,73	61,57	83,23	83,39	50	1,67	1,66	2,25	2,25	**2,25**
239	84,88	89,73	92,08	87,58	6	0,775	88,17	93,21	95,65	90,98	100	1,19	1,26	1,29	1,23	**1,29**
240	49,30	50,03	67,02	66,01	6	0,775	51,21	51,97	69,62	68,57	100	0,69	0,70	0,94	0,93	**0,94**
241	72,70	73,79	74,60	73,51	6	0,775	75,52	76,65	77,49	76,37	100	1,02	1,03	1,05	1,03	**1,05**
242	59,01	50,66	75,88	84,13	6	0,775	61,30	52,63	78,82	87,39	50	1,65	1,42	2,13	2,36	**2,36**
243	53,75	55,82	80,98	78,91	6	0,775	55,83	57,99	84,12	81,97	50	1,51	1,57	2,27	2,21	**2,27**
244	86,66	89,50	91,83	88,84	6	0,775	90,02	92,98	95,40	92,29	100	1,22	1,26	1,29	1,25	**1,29**
245	56,81	45,58	67,72	79,77	6	0,775	59,02	47,35	70,35	82,86	100	0,80	0,64	0,95	1,12	**1,12**
246	75,30	70,04	74,72	80,81	6	0,775	78,22	72,76	77,62	83,95	100	1,06	0,98	1,05	1,13	**1,13**
247	42,77	43,55	65,72	64,94	6	0,775	44,43	45,24	68,27	67,46	50	1,20	1,22	1,84	1,82	**1,84**
248	48,20	40,73	65,70	73,17	6	0,775	50,07	42,31	68,25	76,01	50	1,35	1,14	1,84	2,05	**2,05**
249	71,11	71,24	76,75	75,72	6	0,775	73,87	74,01	79,73	78,66	100	1,00	1,00	1,08	1,06	**1,08**
250	58,47	57,94	80,33	80,86	6	0,775	60,74	60,19	83,44	84,00	50	1,64	1,63	2,25	2,27	**2,27**
251	57,18	57,87	82,65	81,40	6	0,775	59,40	60,12	85,86	84,56	100	0,80	0,81	1,16	1,14	**1,16**
252	52,11	51,86	69,86	70,10	6	0,775	54,13	53,87	72,57	72,82	50	1,46	1,45	1,96	1,97	**1,97**
253	54,27	48,59	71,96	78,09	6	0,775	56,38	50,47	74,76	81,12	100	0,76	0,68	1,01	1,10	**1,10**
254	83,91	78,46	81,04	86,20	6	0,775	87,17	81,50	84,18	89,54	100	1,18	1,10	1,14	1,21	**1,21**
255	73,22	70,67	83,47	89,66	6	0,775	76,06	73,41	86,71	93,14	100	1,03	0,99	1,17	1,26	**1,26**
256	86,70	76,73	78,34	88,46	6	0,775	90,06	79,71	81,38	91,90	100	1,22	1,08	1,10	1,24	**1,24**
257	86,34	81,78	83,24	92,84	6	0,775	89,69	84,95	86,47	96,44	100	1,21	1,15	1,17	1,30	**1,30**
258	85,96	80,03	81,67	86,82	6	0,775	89,29	83,14	84,84	90,19	100	1,21	1,12	1,15	1,22	**1,22**
259	84,00	79,98	86,00	90,03	6	0,775	87,26	83,09	89,34	93,52	100	1,18	1,12	1,21	1,26	**1,26**
260	81,35	77,95	80,32	87,58	6	0,775	84,50	80,97	83,44	90,98	100	1,14	1,09	1,13	1,23	**1,23**
261	86,06	78,71	81,06	88,27	6	0,775	89,40	81,77	84,20	91,69	100	1,21	1,10	1,14	1,24	**1,24**
262	82,27	86,52	84,76	85,05	6	0,775	85,46	89,88	88,05	88,35	100	1,15	1,21	1,19	1,19	**1,21**
263	82,03	81,65	82,41	83,44	6	0,775	85,22	84,82	85,60	86,67	100	1,15	1,15	1,16	1,17	**1,17**
264	80,34	83,55	85,74	84,08	6	0,775	83,46	86,79	89,07	87,34	100	1,13	1,17	1,20	1,18	**1,20**
265	79,88	80,25	82,77	82,86	6	0,775	82,98	83,36	85,98	86,08	100	1,12	1,13	1,16	1,16	**1,16**
266	70,05	72,10	86,69	86,55	6	0,775	72,77	74,90	90,06	89,90	100	0,98	1,01	1,22	1,21	**1,22**
267	80,83	83,67	86,18	82,85	6	0,775	83,97	86,92	89,53	86,07	100	1,13	1,17	1,21	1,16	**1,21**
268	83,01	84,22	85,77	89,44	6	0,775	86,24	87,49	89,10	92,91	100	1,16	1,18	1,20	1,25	**1,25**
269	84,60	81,15	83,39	85,81	6	0,775	87,88	84,30	86,62	89,14	100	1,19	1,14	1,17	1,20	**1,20**
270	83,12	83,48	86,19	89,99	6	0,775	86,35	86,72	89,54	93,49	100	1,17	1,17	1,21	1,26	**1,26**
271	77,27	83,49	84,59	78,37	6	0,775	80,27	86,73	87,87	81,41	100	1,08	1,17	1,19	1,10	**1,19**
272	98,41	82,45	88,05	100,53	6	0,775	102,23	85,65	91,47	104,43	100	1,38	1,16	1,23	1,41	**1,41**
273	79,69	105,23	109,52	85,60	6	0,775	82,78	109,31	113,77	88,92	100	1,12	1,48	1,54	1,20	**1,54**
274	59,40	57,62	81,85	83,63	6	0,775	61,71	59,86	85,03	86,88	50	1,67	1,62	2,30	2,35	**2,35**
275	88,72	81,29	78,92	92,46	6	0,775	92,16	84,44	81,99	96,05	100	1,24	1,14	1,11	1,30	**1,30**
276	81,44	91,27	94,81	75,45	6	0,775	84,61	94,81	98,49	78,37	100	1,14	1,28	1,33	1,06	**1,33**
277	83,71	67,83	67,74	83,77	6	0,775	86,96	70,46	70,37	87,02	100	1,17	0,95	0,95	1,17	**1,17**
278	86,66	79,59	80,89	87,96	6	0,775	90,02	82,68	84,03	91,37	100	1,22	1,12	1,13	1,23	**1,23**
279	53,13	52,12	71,41	72,42	6	0,775	55,19	54,14	74,18	75,23	50	1,49	1,46	2,00	2,03	**2,03**
280	85,20	80,10	80,55	88,65	6	0,775	88,51	83,21	83,67	92,09	100	1,19	1,12	1,13	1,24	**1,24**
281	81,18	80,76	83,41	70,02	6	0,775	84,33	83,89	86,65	72,73	100	1,14	1,13	1,17	0,98	**1,17**
282	49,95	51,19	71,62	70,37	6	0,775	51,88	53,17	74,40	73,10	50	1,40	1,44	2,01	1,97	**2,01**
283	48,81	51,64	71,65	68,83	6	0,775	50,71	53,64	74,43	71,50	50	1,37	1,45	2,01	1,93	**2,01**
284	70,13	73,83	76,68	72,21	6	0,775	72,85	76,70	79,66	75,01	100	0,98	1,04	1,08	1,01	**1,08**
285	44,93	41,60	73,74	79,50	6	0,775	46,67	43,21	76,60	82,59	100	0,63	0,58	1,03	1,11	**1,11**
286	65,45	67,01	83,23	72,67	6	0,775	67,99	69,61	86,46	75,49	100	0,92	0,94	1,17	1,02	**1,17**
287	55,39	49,06	68,00	74,33	6	0,775	57,54	50,97	70,64	77,22	50	1,55	1,38	1,91	2,08	**2,08**
288	55,39	48,89	68,58	75,09	6	0,775	57,54	50,79	71,25	78,00	50	1,55	1,37	1,92	2,11	**2,11**
289	69,13	80,46	82,12	70,87	6	0,775	71,82	83,58	85,31	73,62	100	0,97	1,13	1,15	0,99	**1,15**

Elemento	$\Delta\sigma_{1p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{2p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{3p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{4p}$ [MPa]	L_i [m]	λ	$\Delta\sigma_{1\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{2\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{3\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{4\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_c$ [MPa]	Nivel de Seguridad				
												$\mu_{1\,fat}$	$\mu_{2\,fat}$	$\mu_{3\,fat}$	$\mu_{4\,fat}$	$\boldsymbol{\mu_{fat}}$
290	54,60	50,20	76,95	81,71	6	0,775	56,72	52,15	79,93	84,88	100	0,77	0,70	1,08	1,15	**1,15**
291	75,18	83,07	88,83	73,99	6	0,775	78,10	86,30	92,27	76,86	100	1,05	1,17	1,25	1,04	**1,25**
292	53,41	51,79	70,67	72,30	6	0,775	55,48	53,80	73,42	75,10	50	1,50	1,45	1,98	2,03	**2,03**
293	54,16	51,09	70,38	73,45	6	0,775	56,26	53,07	73,11	76,30	50	1,52	1,43	1,97	2,06	**2,06**
294	71,76	83,80	84,71	73,09	6	0,775	74,54	87,05	87,99	75,93	100	1,01	1,18	1,19	1,03	**1,19**
295	52,13	49,57	75,45	78,59	6	0,775	54,15	51,50	78,38	81,64	100	0,73	0,70	1,06	1,10	**1,10**
296	76,93	80,20	86,54	81,90	6	0,775	79,91	83,31	89,90	85,08	100	1,08	1,12	1,21	1,15	**1,21**
297	51,03	48,80	71,19	73,42	6	0,775	53,01	50,70	73,96	76,27	50	1,43	1,37	2,00	2,06	**2,06**
298	53,61	48,54	68,87	73,94	6	0,775	55,69	50,42	71,55	76,81	50	1,50	1,36	1,93	2,07	**2,07**
299	79,38	75,64	77,69	82,98	6	0,775	82,46	78,57	80,70	86,20	100	1,11	1,06	1,09	1,16	**1,16**
300	51,47	52,06	70,88	70,29	6	0,775	53,47	54,08	73,63	73,02	50	1,44	1,46	1,99	1,97	**1,99**
301	53,17	50,36	70,08	72,89	6	0,775	55,23	52,32	72,80	75,72	50	1,49	1,41	1,97	2,04	**2,04**
302	80,88	77,57	78,58	81,90	6	0,775	84,02	80,58	81,63	85,07	100	1,13	1,09	1,10	1,15	**1,15**
303	48,64	48,84	76,56	76,36	6	0,775	50,53	50,73	79,53	79,32	100	0,68	0,68	1,07	1,07	**1,07**
304	77,57	79,35	85,89	82,60	6	0,775	80,58	82,42	89,22	85,80	100	1,09	1,11	1,20	1,16	**1,20**
305	49,98	54,04	73,83	69,77	6	0,775	51,92	56,14	76,70	72,48	50	1,40	1,52	2,07	1,96	**2,07**
306	51,63	52,78	71,69	70,54	6	0,775	53,63	54,83	74,47	73,28	50	1,45	1,48	2,01	1,98	**2,01**
307	75,53	84,96	85,41	77,74	6	0,775	78,46	88,26	88,73	80,76	100	1,06	1,19	1,20	1,09	**1,20**
308	50,50	51,46	76,52	78,88	6	0,775	52,46	53,46	79,49	81,94	100	0,71	0,72	1,07	1,11	**1,11**
309	84,98	82,39	88,22	75,10	6	0,775	88,28	85,59	91,64	78,01	100	1,19	1,16	1,24	1,05	**1,24**
310	47,69	54,92	75,57	68,34	6	0,775	49,54	57,05	78,51	71,00	50	1,34	1,54	2,12	1,92	**2,12**
311	47,92	55,25	73,96	66,63	6	0,775	49,78	57,40	76,83	69,21	50	1,34	1,55	2,07	1,87	**2,07**
312	72,73	76,10	78,81	74,07	6	0,775	75,55	79,05	81,87	76,95	100	1,02	1,07	1,11	1,04	**1,11**
313	41,61	44,79	76,54	77,32	6	0,775	43,22	46,52	79,51	80,32	100	0,58	0,63	1,07	1,08	**1,08**
314	68,09	64,27	80,99	75,14	6	0,775	70,73	66,76	84,13	78,05	100	0,95	0,90	1,14	1,05	**1,14**
315	51,27	49,69	69,80	71,38	6	0,775	53,26	51,62	72,51	74,15	50	1,44	1,39	1,96	2,00	**2,00**
316	50,88	50,18	70,39	71,10	6	0,775	52,85	52,12	73,13	73,86	50	1,43	1,41	1,97	1,99	**1,99**
317	69,18	75,82	77,93	72,45	6	0,775	71,86	78,76	80,96	75,26	100	0,97	1,06	1,09	1,02	**1,09**
318	48,69	53,23	74,84	73,19	6	0,775	50,58	55,30	77,74	76,03	100	0,68	0,75	1,05	1,03	**1,05**
319	77,81	75,76	78,73	75,29	6	0,775	80,83	78,70	81,79	78,22	100	1,09	1,06	1,10	1,06	**1,10**
320	50,24	52,20	70,69	68,73	6	0,775	52,19	54,23	73,44	71,40	50	1,41	1,46	1,98	1,93	**1,98**
321	50,78	51,91	71,43	70,29	6	0,775	52,75	53,93	74,20	73,02	50	1,42	1,46	2,00	1,97	**2,00**
322	72,68	76,60	77,94	75,67	6	0,775	75,51	79,58	80,97	78,60	100	1,02	1,07	1,09	1,06	**1,09**
323	49,54	49,68	73,53	73,38	6	0,775	51,46	51,61	76,38	76,23	100	0,69	0,70	1,03	1,03	**1,03**
324	77,49	79,54	81,68	75,80	6	0,775	80,50	82,63	84,85	78,75	100	1,09	1,12	1,15	1,06	**1,15**
325	49,76	53,12	73,90	70,54	6	0,775	51,69	55,19	76,77	73,27	50	1,40	1,49	2,07	1,98	**2,07**
326	50,68	51,34	72,22	71,55	6	0,775	52,64	53,34	75,02	74,33	50	1,42	1,44	2,03	2,01	**2,03**
327	75,61	82,30	83,64	80,35	6	0,775	78,55	85,49	86,88	83,47	100	1,06	1,15	1,17	1,13	**1,17**

Tabla F-3 Nivel de seguridad vigas transversales esviadas

Elemento	$\Delta\sigma_{1p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{2p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{3p}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{4p}$ [MPa]	λ	$\Delta\sigma_{1\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{2\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{3\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{4\,E,2}$ [MPa]	$\Delta\sigma_c$ [MPa]	Nivel de Seguridad				
											$\mu_{1\,fat}$	$\mu_{2\,fat}$	$\mu_{3\,fat}$	$\mu_{4\,fat}$	$\boldsymbol{\mu_{fat}}$
157	60,85	46,92	45,43	63,78	0,775	78,63	60,62	58,70	82,41	80	1,33	1,02	0,99	1,39	**1,39**
158	52,77	47,01	45,82	50,00	0,775	68,18	60,74	59,21	64,60	80	1,15	1,02	1,00	1,09	**1,15**
163	51,96	49,42	46,46	45,36	0,775	67,14	63,86	60,04	58,61	80	1,13	1,08	1,01	0,99	**1,13**
164	50,63	53,19	47,24	50,33	0,775	65,42	68,73	61,04	65,03	80	1,10	1,16	1,03	1,10	**1,16**
165	61,28	46,44	40,97	55,81	0,775	79,18	60,01	52,94	72,11	80	1,34	1,01	0,89	1,22	**1,34**
166	64,15	48,43	42,24	57,89	0,775	82,89	62,58	54,58	74,80	80	1,40	1,06	0,92	1,26	**1,40**
167	52,06	56,60	62,27	50,56	0,775	67,27	73,13	80,46	65,33	80	1,14	1,23	1,36	1,10	**1,36**
168	48,94	58,56	53,64	44,02	0,775	63,23	75,67	69,31	56,87	80	1,07	1,28	1,17	0,96	**1,28**

F-2 Evaluación Acumulación de Daño

Tabla F-4 Acumulación de daño vigas principales

Año	Regla de Palmgren - Miner (ni/Ni)									
	SG11	SG12	SG21	SG22	SG31	SG32	SG41	SG42	SG51	SG52
1960	0,0033	0,0023	0,0010	0,0011	0,0001	0,0010	0,0010	0,0012	0,0021	0,0017
1961	0,0035	0,0024	0,0011	0,0012	0,0001	0,0011	0,0010	0,0013	0,0022	0,0018
1962	0,0036	0,0024	0,0011	0,0012	0,0001	0,0011	0,0010	0,0013	0,0022	0,0018
1963	0,0035	0,0024	0,0011	0,0012	0,0001	0,0011	0,0010	0,0013	0,0022	0,0018
1964	0,0038	0,0026	0,0012	0,0012	0,0001	0,0012	0,0011	0,0013	0,0023	0,0019
1965	0,0039	0,0026	0,0012	0,0013	0,0001	0,0012	0,0011	0,0014	0,0024	0,0020
1966	0,0040	0,0027	0,0012	0,0013	0,0001	0,0012	0,0012	0,0014	0,0025	0,0020
1967	0,0039	0,0027	0,0012	0,0013	0,0001	0,0012	0,0011	0,0014	0,0024	0,0020
1968	0,0040	0,0027	0,0013	0,0013	0,0001	0,0013	0,0012	0,0014	0,0025	0,0021
1969	0,0041	0,0028	0,0013	0,0013	0,0001	0,0013	0,0012	0,0014	0,0025	0,0021
1970	0,0043	0,0029	0,0013	0,0014	0,0001	0,0013	0,0013	0,0015	0,0026	0,0022
1971	0,0045	0,0030	0,0014	0,0015	0,0001	0,0014	0,0013	0,0016	0,0028	0,0023
1972	0,0046	0,0031	0,0014	0,0015	0,0001	0,0014	0,0013	0,0016	0,0028	0,0023
1973	0,0046	0,0031	0,0015	0,0015	0,0001	0,0014	0,0013	0,0016	0,0029	0,0024
1974	0,0048	0,0033	0,0015	0,0016	0,0001	0,0015	0,0014	0,0017	0,0030	0,0025
1975	0,0049	0,0033	0,0015	0,0016	0,0001	0,0015	0,0014	0,0017	0,0030	0,0025
1976	0,0050	0,0034	0,0016	0,0016	0,0001	0,0016	0,0015	0,0018	0,0031	0,0026
1977	0,0051	0,0034	0,0016	0,0017	0,0001	0,0016	0,0015	0,0018	0,0031	0,0026
1978	0,0051	0,0035	0,0016	0,0017	0,0001	0,0016	0,0015	0,0018	0,0031	0,0026
1979	0,0051	0,0035	0,0016	0,0017	0,0001	0,0016	0,0015	0,0018	0,0032	0,0026
1980	0,0051	0,0035	0,0016	0,0017	0,0001	0,0016	0,0015	0,0018	0,0032	0,0026
1981	0,0051	0,0035	0,0016	0,0017	0,0001	0,0016	0,0015	0,0018	0,0031	0,0026
1982	0,0051	0,0035	0,0016	0,0017	0,0001	0,0016	0,0015	0,0018	0,0031	0,0026
1983	0,0052	0,0035	0,0016	0,0017	0,0001	0,0016	0,0015	0,0019	0,0032	0,0027
1984	0,0053	0,0036	0,0017	0,0017	0,0001	0,0016	0,0015	0,0019	0,0033	0,0027
1985	0,0052	0,0036	0,0016	0,0017	0,0001	0,0016	0,0015	0,0019	0,0032	0,0027
1986	0,0053	0,0036	0,0017	0,0018	0,0001	0,0017	0,0016	0,0019	0,0033	0,0027
1987	0,0053	0,0036	0,0017	0,0017	0,0001	0,0016	0,0015	0,0019	0,0033	0,0027
1988	0,0054	0,0037	0,0017	0,0018	0,0001	0,0017	0,0016	0,0019	0,0033	0,0028
1989	0,0053	0,0036	0,0017	0,0017	0,0001	0,0016	0,0015	0,0019	0,0032	0,0027
1990	0,0049	0,0033	0,0015	0,0016	0,0001	0,0015	0,0014	0,0017	0,0030	0,0025
1991	0,0040	0,0027	0,0012	0,0013	0,0001	0,0012	0,0012	0,0014	0,0024	0,0020
1992	0,0038	0,0026	0,0012	0,0012	0,0001	0,0012	0,0011	0,0013	0,0023	0,0019
1993	0,0028	0,0019	0,0009	0,0009	0,0000	0,0009	0,0008	0,0010	0,0018	0,0014
1994	0,0027	0,0018	0,0008	0,0009	0,0000	0,0008	0,0008	0,0010	0,0017	0,0014
1995	0,0029	0,0020	0,0009	0,0010	0,0001	0,0009	0,0009	0,0010	0,0018	0,0015
1996	0,0028	0,0019	0,0009	0,0009	0,0000	0,0009	0,0008	0,0010	0,0017	0,0014
1997	0,0026	0,0018	0,0008	0,0009	0,0000	0,0008	0,0008	0,0009	0,0016	0,0013
1998	0,0024	0,0016	0,0008	0,0008	0,0000	0,0007	0,0007	0,0009	0,0015	0,0012
1999	0,0022	0,0015	0,0007	0,0007	0,0000	0,0007	0,0006	0,0008	0,0014	0,0011
2000	0,0023	0,0015	0,0007	0,0007	0,0000	0,0007	0,0007	0,0008	0,0014	0,0011
2001	0,0022	0,0015	0,0007	0,0007	0,0000	0,0007	0,0006	0,0008	0,0014	0,0011
2002	0,0021	0,0014	0,0007	0,0007	0,0000	0,0007	0,0006	0,0007	0,0013	0,0011

Año	Regla de Palmgren - Miner (ni/Ni)									
	SG11	SG12	SG21	SG22	SG31	SG32	SG41	SG42	SG51	SG52
2003	0,0021	0,0014	0,0007	0,0007	0,0000	0,0007	0,0006	0,0008	0,0013	0,0011
2004	0,0027	0,0018	0,0008	0,0009	0,0000	0,0008	0,0008	0,0010	0,0017	0,0014
2005	0,0033	0,0022	0,0010	0,0011	0,0001	0,0010	0,0009	0,0012	0,0020	0,0017
2006	0,0035	0,0024	0,0011	0,0011	0,0001	0,0011	0,0010	0,0012	0,0021	0,0018
2007	0,0044	0,0030	0,0014	0,0015	0,0001	0,0014	0,0013	0,0016	0,0027	0,0023
2008	0,0045	0,0031	0,0014	0,0015	0,0001	0,0014	0,0013	0,0016	0,0028	0,0023
2009	0,0027	0,0019	0,0009	0,0009	0,0000	0,0009	0,0008	0,0010	0,0017	0,0014
2010	0,0029	0,0020	0,0009	0,0010	0,0001	0,0009	0,0008	0,0010	0,0018	0,0015
2011	0,0024	0,0016	0,0008	0,0008	0,0000	0,0007	0,0007	0,0009	0,0015	0,0012
2012	0,0037	0,0025	0,0012	0,0012	0,0001	0,0011	0,0011	0,0013	0,0023	0,0019
2013	0,0043	0,0029	0,0014	0,0014	0,0001	0,0013	0,0013	0,0015	0,0027	0,0022
2014	0,0033	0,0023	0,0010	0,0011	0,0001	0,0010	0,0010	0,0012	0,0021	0,0017
2015	0,0033	0,0023	0,0011	0,0011	0,0001	0,0010	0,0010	0,0012	0,0021	0,0017
2016	0,0033	0,0023	0,0011	0,0011	0,0001	0,0010	0,0010	0,0012	0,0021	0,0017
2017	0,0033	0,0023	0,0011	0,0011	0,0001	0,0010	0,0010	0,0012	0,0021	0,0017
TOTAL	**0,2254**	**0,1532**	**0,0709**	**0,0742**	**0,0040**	**0,0701**	**0,0658**	**0,0803**	**0,1392**	**0,1150**

Tabla F-5 Acumulación de daño vigas transversales

Año	Regla de Palmgren - Miner (ni/Ni)									
	SG71	SG72	SG73	SG74	SG81	SG82	SG83	SG91	SG92	SG93
1960	0,0119	0,0110	0,0121	0,0124	0,0000	0,0005	0,0009	0,0000	0,0051	0,0001
1961	0,0126	0,0116	0,0128	0,0131	0,0000	0,0006	0,0009	0,0000	0,0054	0,0001
1962	0,0128	0,0119	0,0131	0,0134	0,0000	0,0006	0,0010	0,0000	0,0055	0,0001
1963	0,0127	0,0117	0,0129	0,0132	0,0000	0,0006	0,0009	0,0000	0,0055	0,0001
1964	0,0135	0,0125	0,0137	0,0140	0,0000	0,0006	0,0010	0,0000	0,0058	0,0001
1965	0,0139	0,0129	0,0142	0,0145	0,0000	0,0006	0,0010	0,0000	0,0060	0,0001
1966	0,0142	0,0132	0,0145	0,0148	0,0000	0,0006	0,0011	0,0000	0,0061	0,0001
1967	0,0141	0,0130	0,0143	0,0146	0,0000	0,0006	0,0011	0,0000	0,0061	0,0001
1968	0,0144	0,0134	0,0147	0,0150	0,0000	0,0006	0,0011	0,0000	0,0062	0,0001
1969	0,0146	0,0135	0,0148	0,0151	0,0000	0,0007	0,0011	0,0000	0,0063	0,0001
1970	0,0153	0,0142	0,0156	0,0160	0,0000	0,0007	0,0011	0,0000	0,0066	0,0001
1971	0,0160	0,0148	0,0162	0,0166	0,0000	0,0007	0,0012	0,0000	0,0069	0,0001
1972	0,0165	0,0153	0,0168	0,0171	0,0000	0,0007	0,0012	0,0000	0,0071	0,0001
1973	0,0165	0,0153	0,0168	0,0172	0,0000	0,0007	0,0012	0,0000	0,0071	0,0001
1974	0,0172	0,0159	0,0175	0,0179	0,0000	0,0008	0,0013	0,0000	0,0074	0,0001
1975	0,0175	0,0162	0,0178	0,0182	0,0000	0,0008	0,0013	0,0000	0,0075	0,0001
1976	0,0179	0,0166	0,0182	0,0186	0,0000	0,0008	0,0013	0,0000	0,0077	0,0001
1977	0,0181	0,0168	0,0184	0,0188	0,0000	0,0008	0,0014	0,0000	0,0078	0,0001
1978	0,0182	0,0169	0,0185	0,0189	0,0000	0,0008	0,0014	0,0000	0,0078	0,0001
1979	0,0183	0,0170	0,0186	0,0191	0,0000	0,0008	0,0014	0,0000	0,0079	0,0001
1980	0,0183	0,0170	0,0186	0,0190	0,0000	0,0008	0,0014	0,0000	0,0079	0,0001
1981	0,0182	0,0169	0,0186	0,0190	0,0000	0,0008	0,0014	0,0000	0,0079	0,0001
1982	0,0182	0,0169	0,0185	0,0189	0,0000	0,0008	0,0014	0,0000	0,0078	0,0001
1983	0,0187	0,0173	0,0190	0,0194	0,0000	0,0008	0,0014	0,0000	0,0080	0,0001
1984	0,0189	0,0175	0,0193	0,0197	0,0000	0,0008	0,0014	0,0000	0,0082	0,0001
1985	0,0187	0,0173	0,0190	0,0195	0,0000	0,0008	0,0014	0,0000	0,0081	0,0001

Año	Regla de Palmgren - Miner (ni/Ni)									
	SG71	SG72	SG73	SG74	SG81	SG82	SG83	SG91	SG92	SG93
1986	0,0191	0,0177	0,0194	0,0199	0,0000	0,0009	0,0014	0,0000	0,0082	0,0001
1987	0,0189	0,0175	0,0192	0,0196	0,0000	0,0008	0,0014	0,0000	0,0081	0,0001
1988	0,0193	0,0179	0,0197	0,0201	0,0000	0,0009	0,0014	0,0000	0,0083	0,0001
1989	0,0188	0,0174	0,0191	0,0196	0,0000	0,0008	0,0014	0,0000	0,0081	0,0001
1990	0,0175	0,0162	0,0178	0,0182	0,0000	0,0008	0,0013	0,0000	0,0075	0,0001
1991	0,0142	0,0131	0,0144	0,0148	0,0000	0,0006	0,0011	0,0000	0,0061	0,0001
1992	0,0134	0,0125	0,0137	0,0140	0,0000	0,0006	0,0010	0,0000	0,0058	0,0001
1993	0,0102	0,0094	0,0103	0,0106	0,0000	0,0005	0,0008	0,0000	0,0044	0,0001
1994	0,0096	0,0089	0,0098	0,0100	0,0000	0,0004	0,0007	0,0000	0,0041	0,0001
1995	0,0105	0,0097	0,0107	0,0109	0,0000	0,0005	0,0008	0,0000	0,0045	0,0001
1996	0,0101	0,0093	0,0102	0,0105	0,0000	0,0005	0,0008	0,0000	0,0043	0,0001
1997	0,0093	0,0087	0,0095	0,0097	0,0000	0,0004	0,0007	0,0000	0,0040	0,0001
1998	0,0086	0,0080	0,0087	0,0089	0,0000	0,0004	0,0006	0,0000	0,0037	0,0000
1999	0,0079	0,0074	0,0081	0,0083	0,0000	0,0004	0,0006	0,0000	0,0034	0,0000
2000	0,0081	0,0075	0,0082	0,0084	0,0000	0,0004	0,0006	0,0000	0,0035	0,0000
2001	0,0079	0,0073	0,0080	0,0082	0,0000	0,0004	0,0006	0,0000	0,0034	0,0000
2002	0,0075	0,0069	0,0076	0,0078	0,0000	0,0003	0,0006	0,0000	0,0032	0,0000
2003	0,0076	0,0071	0,0077	0,0079	0,0000	0,0003	0,0006	0,0000	0,0033	0,0000
2004	0,0096	0,0089	0,0098	0,0100	0,0000	0,0004	0,0007	0,0000	0,0041	0,0001
2005	0,0116	0,0108	0,0118	0,0121	0,0000	0,0005	0,0009	0,0000	0,0050	0,0001
2006	0,0124	0,0115	0,0126	0,0129	0,0000	0,0006	0,0009	0,0000	0,0053	0,0001
2007	0,0159	0,0148	0,0162	0,0166	0,0000	0,0007	0,0012	0,0000	0,0069	0,0001
2008	0,0161	0,0149	0,0164	0,0168	0,0000	0,0007	0,0012	0,0000	0,0069	0,0001
2009	0,0098	0,0091	0,0100	0,0102	0,0000	0,0004	0,0007	0,0000	0,0042	0,0001
2010	0,0103	0,0096	0,0105	0,0108	0,0000	0,0005	0,0008	0,0000	0,0045	0,0001
2011	0,0086	0,0080	0,0088	0,0090	0,0000	0,0004	0,0006	0,0000	0,0037	0,0000
2012	0,0131	0,0122	0,0134	0,0137	0,0000	0,0006	0,0010	0,0000	0,0057	0,0001
2013	0,0154	0,0143	0,0157	0,0160	0,0000	0,0007	0,0012	0,0000	0,0066	0,0001
2014	0,0120	0,0111	0,0122	0,0124	0,0000	0,0005	0,0009	0,0000	0,0051	0,0001
2015	0,0120	0,0111	0,0122	0,0125	0,0000	0,0005	0,0009	0,0000	0,0052	0,0001
2016	0,0120	0,0111	0,0122	0,0125	0,0000	0,0005	0,0009	0,0000	0,0052	0,0001
2017	0,0120	0,0111	0,0122	0,0125	0,0000	0,0005	0,0009	0,0000	0,0052	0,0001
TOTAL	**0,8069**	**0,7477**	**0,8205**	**0,8392**	**0,0000**	**0,0361**	**0,0603**	**0,0000**	**0,3476**	**0,0046**

Tabla F-6 Acumulación de daño refuerzo viga transversal

Año	ni/Ni
1960	0,042
1961	0,045
1962	0,046
1963	0,045
1964	0,048
1965	0,049
1966	0,050
1967	0,050
1968	0,051
1969	0,052

Año	ni/Ni
1970	0,054
1971	0,057
1972	0,058
1973	0,059
1974	0,061
1975	0,062
1976	0,063
1977	0,064
1978	0,065
1979	0,065

Año	ni/Ni
1980	0,065
1981	0,065
1982	0,065
1983	0,066
1984	0,067
1985	0,066
1986	0,068
1987	0,067
1988	0,069
1989	0,067
1990	0,062
1991	0,050
1992	0,048
1993	0,036
1994	0,034
1995	0,037
1996	0,036
1997	0,033
1998	0,030
1999	0,028

Año	ni/Ni
2000	0,029
2001	0,028
2002	0,027
2003	0,027
2004	0,034
2005	0,041
2006	0,044
2007	0,056
2008	0,057
2009	0,035
2010	0,037
2011	0,031
2012	0,047
2013	0,055
2014	0,042
2015	0,043
2016	0,043
2017	0,043
TOTAL	**2,8598**