

# Avances en la evaluación de fatiga en puentes: la metodología Fasstbridge \*

*Step forward in fatigue assessment on bridges: the Fasstbridge methodology \*\**

David Garcia-Sanchez<sup>\* a</sup>, Mikel Ezquerro<sup>b</sup>, Jesus Diez<sup>c</sup>, Mazen Wahbeh<sup>d</sup>, Rami

Boundaki<sup>e</sup>, Luis Sopena<sup>f</sup>, Sylvain Chataigner<sup>g</sup>

<sup>a</sup> PhD MSc Civil Engineering. Senior Researcher. TECNALIA

<sup>b,c</sup> MSc Mechanical Engineering. Project Manager. TECNALIA

<sup>d</sup> PhD, PE MSc Civil Engineer. Executive Chairman. ALTAVISTA SOLUTIONS

<sup>e</sup> PE MSc Civil Engineer. Project Manager. ALTAVISTA SOLUTIONS

<sup>f</sup> MSc Civil Engineering. gGRAVITY Engineering

<sup>g</sup> PhD MSc Civil Engineering. Senior Researcher. IFSITTAR

## RESUMEN

El documento presenta la herramienta de evaluación de fatiga FASSTbridge, que ha sido diseñada para trabajar con códigos basados en la normativa (AASHTO) y el Eurocódigo de la Unión Europea. Esta metodología es una evolución de los métodos probabilísticos y deterministas existentes. Significa un avance desde el análisis basado en el modelo de carga estándar hasta los enfoques de carga más precisos, obteniendo una evaluación fácil con un nivel de precisión satisfactorio que facilita una evaluación preventiva real de los puentes de acero existentes.

## ABSTRACT

The paper presents the FASSTbridge fatigue assessment tool, which has been designed to work with codes based on The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) or the European Union's Eurocode. Indeed, this methodology is an evolution of the existing probabilistic and deterministic methods. It means an advance from the analysis based on the standard load model to the more precise load approaches getting an easy assessment with satisfactory accuracy level facilitating a real preventive assessment of existing steel bridges.

**PALABRAS CLAVE:** puente de acero, refuerzo, vida residual, extensión vida útil, CFRP

**KEYWORDS:** steel bridge, retrofitting, fatigue, residual life, life time extension, CFRP

## 1. Introducción

Este artículo presenta un resultado del proyecto de investigación Infravation "Fast and effective solution for steel bridges life-time extension". Este resultado es, en sí mismo, un método de análisis para detectar posibles problemas de

fatiga que los análisis de fatiga tradicionales no pueden. El objetivo es crear un método preventivo, fiable y fácil de aplicar para prever problemas derivados de la fatiga y recalculer la esperanza de vida de los puentes de acero existentes en EE.UU y Europa.

## 2. Métodos actuales para el diseño a fatiga

La fatiga es un problema importante en el diseño de puentes, especialmente los de acero, independientemente del país en el que se construya. Tanto los códigos de diseño de fatiga americanos como europeos buscan medir y cuantificar el número de ciclos de carga resultantes del paso de un camión sobre un puente y los efectos inducidos por la tensión que dependen del tipo de puente, la ubicación del detalle, la longitud del tramo y la configuración de los ejes del vehículo.

El enfoque adoptado por las especificaciones modernas para el diseño de fatiga de estructuras de acero se basa principalmente en el trabajo realizado en Gran Bretaña [5] y en los EE.UU [6] [7] [8] a finales de 1960 y principios de 1970 [9]. Fue parte de esta investigación la que identificó la influencia de la tensión residual en la vida útil de la fatiga, demostrando que debido a la tensión residual de tracción asociada a los detalles de soldadura, el rango de tensión era la variable dominante y se simplificaba en gran medida el diseño de fatiga. Durante los años 1970 y 1980 hubo muchos ejemplos de aparición de grietas por fatiga a partir de detalles en soldaduras. La investigación reveló que el tipo de agrietamiento observado en la práctica estaba de acuerdo con los resultados de las pruebas de laboratorio y seguía las predicciones teóricas. Estos estudios también revelaron la necesidad de reconocer que las estructuras de acero podrían contener fisuración o discontinuidades similares a grietas.

Teniendo en cuenta los códigos de diseño AASHTO y Eurocodigo, el diseño de fatiga se basa en la idea de estados de límite de fatiga. Un estado límite se define como "una condición más allá de la cual el puente o componente deja de satisfacer la disposición para la que fue diseñado" [9]. En general, los componentes y las uniones del puente están

diseñados para satisfacer las ecuaciones básicas de estado límite de fatiga para todos los efectos de fuerza especificados.

### 2.1 AASHTO

Los dos documentos que rigen el diseño de fatiga y el mantenimiento de puentes de acero son la especificación de diseño de puentes de diseño de factor de carga y resistencia (LRFD) de AASHTO [10] y el Manual AASHTO para evaluación de puentes (MBE) [11]. El diseño del puente según AASHTO asume una vida de diseño de 75 años.

### 2.2 Eurocódigo

Los EN Eurocodigos [12] son una serie de 10 normas europeas, EN 1990 - EN 1999, que proporcionan un enfoque común para el diseño de edificios y otras obras de ingeniería civil y productos de construcción en la Unión Europea. Son los medios recomendados para dar una presunción de conformidad con los requisitos básicos del Reglamento sobre Productos de Construcción para las obras de construcción y los productos que llevan el Mercado CE, así como la referencia preferida para las especificaciones técnicas en contratos públicos [13]. Cada uno de los diez Eurocódigos se publica en varias partes y cada parte va acompañada de un anexo nacional que modifica varios valores para tener en cuenta las diferencias regionales en temperatura, clima, tráfico y otras consideraciones.

Al igual que la especificación LRFD de AASHTO, las reglas de diseño de fatiga en el Eurocódigo se basan en los resultados de las pruebas de fatiga obtenidas principalmente bajo carga de amplitud constante. La clasificación de un detalle de unión dado, ya sea soldado o atornillado, resulta de una evaluación estadística de los datos de la prueba de fatiga con una probabilidad de supervivencia del 95% para un intervalo de confianza del 75%. La evaluación se compara

con un conjunto de curvas S-N igualmente espaciadas con una constante de pendiente de  $m=3$ .

### 3. FASSTbridge: Metodología para la evaluación de fatiga en puentes

Antes de presentar esta metodología y la herramienta de evaluación de fatiga creada, se discutirán los objetivos, métodos de análisis y pasos de implementación que guiaron el desarrollo de la metodología FASSTbridge y la herramienta de evaluación de fatiga.

#### 3.1 Objetivo

Para facilitar la evaluación preventiva de la fatiga de los puentes de acero existentes en un escenario de pre-fallo, es esencial identificar variables y condiciones adicionales que afecten a la resistencia a la fatiga e incorporar estas observaciones en el análisis de fatiga actual métodos para obtener un método de evaluación que sea fácil de aplicar, pero que también proporcione un nivel satisfactorio de precisión y confianza.

Además, el enfoque debe ser lo suficientemente flexible como para que pueda incorporar diferentes métodos de cálculo de tensión, mediciones de frecuencia y carga de tráfico, desviaciones de los detalles de diseño estándar y los efectos de la corrosión y la falta de mantenimiento. Parte de esta información se puede obtener utilizando equipos existentes de ensayo no destructivo (NDT) y de monitorización estructural (SHM) para proporcionar más información para evaluar la vida de fatiga remanente del puente.

#### 3.2 Aproximación

La Figura 1 y la Figura 2 incluyen la representación gráfica de cómo la metodología de evaluación de fatiga FASSTbridge propuesta recopila información sobre el puente y utiliza esa

información para evaluar la vida de fatiga actual del detalle de diseño que se está investigando .

Como se describe en la Figura 1, la metodología de evaluación de fatiga FASSTbridge propuesta es un cuestionario que recopila información específica y relevante de un usuario experto sobre el puente que luego se utiliza para determinar una estimación de la vida de fatiga [12]. En el enfoque de evaluación de la fatiga de FASSTbridge, un usuario con conocimiento suficiente del puente recibe un cuestionario que debe ser respondido con el fin de evaluar su vida de fatiga restante. Este cuestionario (y los cálculos asociados realizados en las entradas del cuestionario) se denomina Herramienta de Evaluación de Fatiga FASSTbridge.

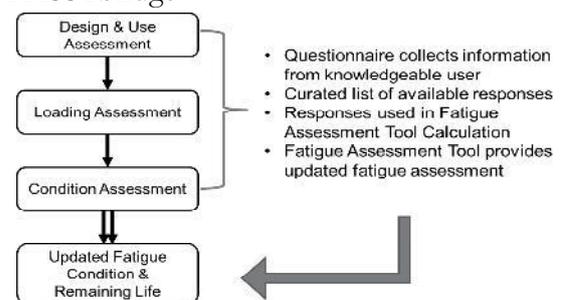


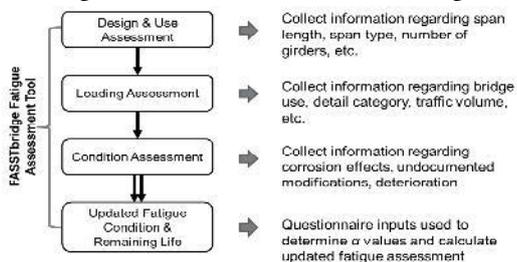
Figura 1. Diagrama de flujo que muestra el flujo de información del cuestionario de evaluación de fatiga en la evaluación actualizada de la vida útil de la fatiga de la herramienta de evaluación de fatiga

El cuestionario de la herramienta de evaluación de fatiga FASSTbridge se ha desarrollado para incluir una lista concisa de preguntas con una selección predeterminada de variables de respuesta para cada pregunta. Además, el cuestionario ha sido desarrollado para ser compatible con las especificaciones AASHTO y Eurocodigo. Las variables de respuesta se basan en las entradas de las especificaciones AASHTO y Eurocódigo, las normas NCHRP y JRC, y las aportaciones de expertos. Las respuestas se han limitado a valores predeterminados para hacer posibles los cálculos de evaluación de fatiga.

La Figura 2 demuestra que las preguntas que componen el cuestionario de evaluación

de fatiga se pueden agrupar en diferentes categorías. Las diferentes categorías de preguntas son necesarias para obtener diferentes tipos de información que luego se pueden aplicar directamente a variables específicas en los cálculos de vida de fatiga. Las respuestas para las diferentes preguntas dependen de: el tipo de puente, los detalles de construcción, el volumen de tráfico y también los resultados de las preguntas contestadas anteriormente, de modo que las respuestas tienen conexiones entre los diferentes grupos.

Como se muestra en la Figura 1 y la Figura 2, el propósito del cuestionario dirigido es recopilar la información necesaria para



**Figura 2. Diagrama de flujo que demuestra los diferentes propósitos de las preguntas del cuestionario de evaluación de fatiga Herramienta de evaluación de fatiga Herramienta de evaluación de fatiga**

realizar una evaluación de fatiga actualizada sobre el detalle de interés.

Para cada pregunta en el cuestionario de evaluación de fatiga el usuario es capaz de seleccionar de una lista de respuestas. Cada respuesta a una pregunta determinada se compara con un valor específico de  $\alpha$ . Las respuestas a todas las preguntas se utilizan para determinar los valores de la variable para muchas de las variables utilizadas en los cálculos de vida de fatiga. La vida útil de fatiga restante generada por la herramienta de evaluación de fatiga se logra resolviendo los cálculos de vida útil de fatiga con la inclusión de los valores de la posición obtenida a través del cuestionario de evaluación de fatiga. En las secciones siguientes se presentan implementaciones específicas del uso de

valores de  $\alpha$  en los cálculos de evaluación de fatiga.

### 3.3 Implementación

Una secuencia general de pasos para el uso e implementación del cuestionario de evaluación de fatiga y la herramienta de evaluación de fatiga es la siguiente:

1. El usuario selecciona la respuesta adecuada a una pregunta en el cuestionario de evaluación de fatiga.
2. En función de la respuesta seleccionada por el usuario, se asigna un valor para un valor determinado.
3. El valor asignado a la opción  $\alpha$  se inserta en un cálculo de vida útil de fatiga restante modificado.
4. Una vez completado el cuestionario de evaluación de fatiga, se asignan todos los valores para el valor de  $\alpha$ .
5. Se resuelve el cálculo modificado de la vida útil de la fatiga restante y se proporciona una evaluación de fatiga actualizada para el detalle que se está analizando.

#### 3.3.1 AASHTO. Vida remanente a fatiga

A continuación se muestra la ecuación de cálculo de la evaluación de fatiga propuesta, basada en las especificaciones de AASHTO e incorporando los valores del cuestionario de evaluación de fatiga.

El cálculo actualizado de la evaluación de fatiga comienza con la ecuación de vida útil de fatiga restante del AASHTO MBE descrito anteriormente.

$$Y = \frac{R_{RA}}{365 \cdot n \cdot (ADT \cdot p \cdot \text{fraction of trucks in traffic}) \cdot (\Delta f)^3} \quad (1)$$

Donde:

$$ADT_{SL} = ADT \cdot p \cdot \text{fraction of trucks in traffic} \quad (2)$$

$$Y = \text{Remaining Fatigue Life} \quad (3)$$

Los valores de la variable de evaluación de fatiga se incorporan al cálculo de la vida útil de fatiga restante para producir un nuevo

cálculo de vida de fatiga remanente que incluye las influencias de las variables de adicionales.

**Tabla 1: Lista de valores para el cálculo de la vida útil de la fatiga para AASHTO**

$a_i$	Variable
$a_1$	A: resistencia a fatiga del detalle de diseño
$a_2$	N: número de ciclos
$a_3$	ADT: tráfico medio diario
$a_4$	p: tráfico en carril
$a_5$	Tráfico de camiones en carril
$a_6$	$[(\Delta f)_{\text{eff}}]^3$ : rango de tensiones
$a_7$	Tipo de viga, efectos de la corrosión, grado de importancia, tolerancia al riesgo, etc...

### 3.3.2 Eurocódigo. Vida remanente a fatiga

A continuación se muestra la ecuación de cálculo de la evaluación de fatiga propuesta, basada en las especificaciones del Eurocódigo e incorporando los valores del cuestionario.

A diferencia de las especificaciones AASHTO, las especificaciones del Eurocódigo no proporcionan una ecuación sencilla para calcular la vida de fatiga restante de un detalle de construcción. Sin embargo, para seguir un procedimiento de evaluación de fatiga similar al de las especificaciones de AASHTO, se ha derivado una ecuación de vida útil de fatiga restante a partir de la ecuación de estado límite de Eurocódigo que se muestra en la sección 3.3.4 e incluyendo los factores  $\lambda$ .

$$\lambda_1 * \lambda_2 * \lambda_3 * \lambda_4 * \gamma_{FF} * \Delta\sigma_{FLM3} \leq \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{MF}} \quad (4)$$

El factor Eurocódigo  $\lambda_3$  permite seleccionar la vida útil del diseño del detalle, tal como se muestra en la Sección 3.3.4.3. Con esta información, la ecuación de estado límite de fatiga de Eurocódigo se reescribe para resolver un valor de tiempo que luego se puede comparar con la vida inicial del diseño.

$$t_{Ld} \leq \frac{100 * (\frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{MF}})^3}{(\lambda_1 * \lambda_2 * \lambda_4 * \gamma_{FF} * \Delta\sigma_{FLM3})^3} \quad (5)$$

La parte del lado derecho de la ecuación proporciona una estimación del número de años restantes en la vida de fatiga de un detalle de construcción. En el caso de que el lado derecho de la ecuación sea mayor que la vida inicial del diseño, esta ecuación sugiere que el

detalle que se está analizando debe ser cuidadosamente monitorizado o reforzado para extender su vida de fatiga. Esta ecuación se puede reescribir expandiendo el factor  $\lambda$  de la parte restante para que otras variables que tengan un efecto en el cálculo de la vida de fatiga restante se puedan mostrar más fácilmente.

En la Tabla 2 se muestra la lista de valores de la palabra s introducidos en el cálculo de la vida útil de fatiga restante del Eurocódigo propuesto y la variable que modifica cada valor de la variable.

**Tabla 2: Lista de valores para el cálculo de la vida útil de la fatiga del Eurocódigo**

$\sigma_i$	Variable
$\sigma_1$	$\Delta\sigma_c$ : resistencia a fatiga del detalle de diseño
$\sigma_2$	$\gamma_{MF}$ : factor parcial de resistencia a fatiga
$\sigma_3$	$\lambda_t$ : daño por tráfico
$\sigma_4$	$N_{Obs}$ : carril único para tráfico de camiones
$\sigma_5$	$\lambda_2$ : volumen de tráfico anual esperado
$\sigma_6$	$\gamma_{FF}$ : factor de seguridad por fatiga
$\sigma_7$	$\Delta\sigma_{FLM3}$ : rango de tensiones

### 3.4. Inputs adicionales

La forma en que se asignan los valores de  $\alpha$  en función de las respuestas del cuestionario de evaluación de fatiga permite el uso de información adicional de END y SHM para guiar y actualizar los pesos de los valores de  $\alpha$ . El uso de herramientas y sensores para supervisar directamente variables como el volumen de tráfico, los pesos de los camiones o la frecuencia de carga con un detalle específico es un método mediante el cual los factores de pesaje asignados a diferentes valores de  $\alpha$  se pueden actualizar y perfeccionar. Con el uso de las herramientas de monitorización sugeridas, los valores de  $\alpha$  se pueden estudiar para comprender la variabilidad en el resultado de la evaluación de la fatiga.

## 4. Herramienta para la evaluación de fatiga en puentes

### 4.1. Introducción

Esta sección tratará los detalles y la presentación del cuestionario de evaluación de fatiga y la herramienta de evaluación de fatiga. Las preguntas que componen el cuestionario de evaluación de fatiga se presentarán individualmente y se discutirán el razonamiento y la justificación de su inclusión.

### 4.2. Cuestionario

El cuestionario de evaluación de fatiga incorpora más de 25 preguntas para determinar los valores de las variables de entrada necesarias y los valores de la variable de fatiga que se utilizarán en los cálculos restantes de la vida útil de la fatiga. El cuestionario de evaluación de fatiga ha sido diseñado para abordar las especificaciones AASHTO y Eurocódigo y, por lo tanto, las respuestas de algunas preguntas se utilizan para determinar las entradas para el cálculo de la vida útil de fatiga según la AASHTO o del Eurocódigo.

Las preguntas de la herramienta de evaluación de fatiga se agrupan en diferentes categorías en función del diseño, la carga y las evaluaciones de condiciones. Las diferentes categorías de preguntas son necesarias para recopilar diferentes piezas de información que se aplican directamente a variables específicas en los cálculos de la vida útil de la fatiga.

#### 4.2.1 Preguntas relativas al diseño

P1: ¿En qué año se construyó el puente?

El conocimiento de cuándo se construyó el puente se utiliza para determinar el número de años que el puente ha estado en servicio. La vida de fatiga restante de un detalle de diseño propenso a la fatiga es la vida total de fatiga determinada en este análisis, menos la edad actual del puente.

P2: ¿Cuál es la vida útil del diseño?

AASHTO asume una vida de diseño de 75 años, mientras que las especificaciones del Eurocódigo suponen una vida de diseño de 100 años.

P3: ¿El puente ha sido diseñado según las normas AASHTO o Eurocódigo?

Sobre la base de la respuesta a esta pregunta, se añaden u omiten preguntas posteriores en función de su pertinencia para la AASHTO o el Eurocódigo. Las respuestas a la mayoría de las preguntas se pueden aplicar a cualquiera de las especificaciones.

P4: ¿Cuál es el tipo de construcción del puente?

Utilizando las respuestas a estas dos preguntas, se determina el número de ciclos de rango de tensión ( $n$ ), a partir de las especificaciones AASHTO.

P5: ¿Cuál es la longitud del vano ft./m?

P6: ¿Dónde se encuentra el detalle de interés en el puente?

La información sobre la longitud del vano ( $m$ ), combinada con la ubicación del detalle en el puente, se utiliza para calcular  $\lambda_1$ .

P7: ¿Cuántas vigas comparten la carga en el puente?

El conocimiento del número de vigas principales que soportan el puente se utiliza para calcular un factor de redundancia que luego se utiliza como parte de la evaluación del riesgo al calcular la vida de fatiga remanente.

#### 4.2.2 Preguntas relativas a las cargas

P1: ¿Cuál es el número medio actual de camiones por día en un solo carril?

Si se conoce esta información, se evitan las estimaciones de  $(ADTT_{SL})_{Presente}$  mediante ADT, lo que resulta en una evaluación más precisa. Esta es la primera pregunta que muestra la posibilidad de utilizar información adicional de SHM o WIM para recopilar datos más precisos que se pueden utilizar en esta evaluación.

P2: ¿Cuál es el tráfico diario promedio actual (ADT) sobre el Bridge?

Si  $(ADTT_{SL})_{Presente}$  es desconocido, comience con la suposición de que ADT 20,000 vehículos. Si se sabe que se puede introducir información más precisa sobre el ADT en la evaluación para aumentar la precisión de la salida.

P3: ¿Cuál es el número anual de camiones en el carril lento?

P4: ¿Cuál es el peso bruto medio (kN) de los camiones en el carril lento?

El conocimiento de estas dos variables es necesario para calcular el factor 2 para la evaluación de la fatiga del Eurocódigo.

P5: ¿Cuántos carriles hay disponibles para los camiones?

P6: ¿Cuál es la clasificación de carreteras?

El número de carriles disponibles para los camiones y la clase de carretera se utiliza para estimar el  $ADTT_{SL}$  dado el ADT.

P7: ¿Cuál es la tasa de crecimiento del tráfico?

Las tasas de crecimiento del tráfico se utilizan para estimar el volumen de tráfico promedio de por vida  $(ADTT_{SL})$  utilizando información sobre el tráfico promedio actual  $(ADTT_{SL})_{Presente}$ .

El AASHTO MBE recomienda una aproximación para estimar la vida de fatiga restante de un detalle. Esta aproximación puede causar una estimación significativa y una sobreestimación de la vida restante. Tras el trabajo incluido en el NCHRP Report 721, esta aproximación se ha evitado en el análisis propuesto utilizando la solución de forma cerrada propuesta para  $Y$ . La vida útil a fatiga se revisa de la siguiente manera:

$$Y = \frac{\log \left[ \frac{R_{RA}}{365n[(ADTT_{SL})_{Presente}(\Delta F_{eff})]^{-3}g(1+g)^{a-1}+1} \right]}{\log(1+g)} \quad (6)$$

En la ecuación anterior,  $a$  es la edad actual del detalle,  $g$  es la tasa de crecimiento del volumen de tráfico anual estimado, y  $(ADTT_{SL})_{Presente}$  es el número promedio actual de camiones por día en un solo carril, como se define en el MBE de AASHTO. Como resultado, la iteración de un  $ADTT_{SL}$  preciso se ha vuelto innecesaria [13].

P8: Basado en la ruta, ¿cuál es el nivel de importancia?

En función del nivel de importancia de la ruta, se aplica un modificador al volumen de tráfico para ajustar el nivel de riesgo en este análisis.

P9: ¿Cuál es la categoría de fatiga del detalle seleccionado para ser analizado?

El usuario debe elegir la categoría de detalle adecuada para el detalle seleccionado para ser analizado. Esta selección determina la constante de diseño del detalle para el cálculo de fatiga.

P10: ¿Cuál es el rango de tensión de carga de fatiga eficaz del detalle seleccionado que se va a analizar?

El rango de tensión efectivo en el detalle que se está analizando debe calcularse por cualquier medio que se considere apropiado para el análisis. Este análisis supone el uso del método de camión de fatiga para las especificaciones AASHTO y Eurocódigo.

P11: ¿Qué método de evaluación se utilizó para determinar el rango de tensión y la carga del camión?

El factor de carga parcial de estimación del rango de tensión modifica el rango de tensión efectivo basado en el método de análisis utilizado para medir el rango de tensión y el tráfico de camiones.

#### 4.2.3 Preguntas relativas al estado del puente

P1: ¿Cuál es el estado de la superficie de conducción?

En función de la calidad de la superficie de conducción, se aumenta el número de ciclos de rango de tensión. En la Figura 3 se muestran ejemplos de los diferentes tipos de superficies de conducción. A medida que la superficie de conducción se deteriora, el número de ciclos de rango de tensión aumenta

en la herramienta de evaluación de fatiga.



Figura 3: Ejemplos de diferentes condiciones de la superficie de conducción (The Peninsula Newspaper, 2016) (Johnston Publishing Ltd., 2016) (The New Indian Express, 2013)

P2: ¿Qué nivel de tolerancia al riesgo es aceptable en esta evaluación?

AASHTO: Esta pregunta determina el nivel de tolerancia al riesgo y selecciona el factor de resistencia a la fatiga adecuado.

Eurocódigo: Esta pregunta combina información sobre el nivel de importancia de la ruta y el nivel de tolerancia al riesgo para determinar un valor para el factor parcial de resistencia a la fatiga.

P3: ¿Cuál es la gravedad de la corrosión en el detalle?

P4: ¿Hay alguna reducción en el espesor del material debido a la corrosión?

La corrosión puede ser un factor para reducir la resistencia a la fatiga de un detalle y, al mismo tiempo, aumentar el rango de tensión eficaz en un detalle si hay picaduras significativas o pérdida de sección.

P5: ¿Existen discontinuidades geométricas no documentadas en el detalle?

Cualquier información adicional sobre el detalle que no estén documentadas podría aumentar las concentraciones de tensión.

P6: ¿Es el detalle una esquina de reentrada?

P7: ¿La esquina de re-entrada tiene una transición suave con un radio de 1/2 pulgadas (13 mm)?

Las esquinas de reentrada deben proporcionar una transición suave entre superficies adyacentes, pero generalmente no es necesario cortar exactamente a un perfil circular. La recomendación del Manual de la AISC de la 13a Edición, Parte 9, es que se

acepta un radio mínimo aproximado de 1/2 in. Sin embargo, el énfasis principal debe ser que las esquinas y esquinas cuadradas con radios significativamente más pequeños no proporcionan la transición suave que se requiere (Construcción, Instituto Americano de Acero, 2006).

P8: ¿Se cortó la superficie del detalle mediante medios de corte en caliente?

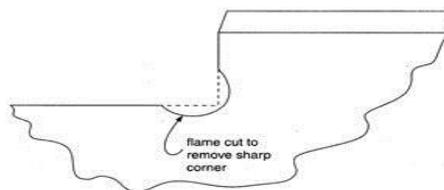


Figura 4: Corrección del recubrimiento de corte cuadrado mediante corte de llama; (Instituto Americano de Construcción de Acero, 2006)

P9: ¿Hay evidencia de molienda excesiva y re-soldadura en/o cerca del detalle?

P10: ¿Hay conexiones o archivos adjuntos no documentados?

Los detalles de diseño que no cumplen con el dibujo exacto o las descripciones como se presenta en la especificación se penalizan porque suponen una incertidumbre adicional.

## 5. Conclusiones

El resultado de la herramienta de evaluación de fatiga es un rango de años que representa la vida de fatiga remanente de un detalle que se analiza. A medida que la herramienta se ponga en práctica en las evaluaciones de casos reales, se espera que los resultados se refinen y proporcionen estimaciones más precisas y sugerencias de mitigación de la fatiga.

Además, un mayor uso de la herramienta de evaluación de fatiga en condiciones del mundo real proporcionará una valiosa experiencia de evaluación que conducirá a una mayor precisión al documentar y caracterizar posibles problemas de fatiga de acuerdo con esta metodología.

## ***Agradecimientos***

Este proyecto ha recibido financiación del Séptimo Programa Marco de investigación, desarrollo tecnológico y demostración de la Unión Europea en virtud del acuerdo de subvención no 31109806.0008.

FASSTbridge está cofinanciado por Funding Partners de ERA-NET Plus Infravation y la Comisión Europea. Los socios de financiación de la llamada de Infravation 2014 son: MINISTERIE VAN INFRASTRUCTUUR EN MILIEU, RIJKSWATERSTAAT BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UN STADTENTWICKLUNG, DANISH ROAD DIRECTORATE, STATENS VEGVESEN VEGDIREKTORATET, TRAFIKVERKET – TRV, VEGAGERÐIN, MINISTERE DE L'ECOLOGIE, DU DEVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'ENERGIE, CENTRO PARA EL DESARROLLO TECNOLOGICO INDUSTRIAL, ANAS S.p.A., NETIVEI, ISRAEL - NATIONAL TRANSPORT INFRASTRUCTURE COMPANY LTD, FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION USDOT

## ***References***

- [1] Sapp, M. (2016, June). Welding Timeline 1900-1950. Retrieved June 2016, from A
- [2] Fisher, J. W., Kulak, G. L., & Smith, I. F. (1998). A Fatigue Primer for Structural Engineers. National Steel Bridge Alliance.
- [3] Munse, W. a. (1964). Fatigue of Welded Steel Structures. New York: Welding Research Council.
- [4] Fisher, J., & Viest, I. M. (1964). Fatigue Life of Bridge Beams Subjected to Controlled Truck Traffic, Preliminary Publication. 7th Congress. IABSE.
- [5] Curney, T. (1979). Fatigue of Welded Structures, 2nd Edition. Cambridge University Press.
- [6] Fisher, J. W. (1984). Fatigue and Fracture in Steel Bridges: Case Studies. Wiley Interscience.
- [7] Fisher, J. W., Albrecht, P. A., Yen, B. T., Klingerman, D. J., & McNamee, B. M. (1974). Fatigue Strength of Steel Beams With Transverse Stiffeners and Attachments. National Cooperative Highway Research Program, Report 147. Washington, D.C.: Highway Research Board.
- [8] Fisher, J. W., Frank, K. H., Hirt, M. A., & McNamee, B. M. (1970). Effect of Weldments on the Fatigue Strength of Steel Beams. National Cooperative Highway Research Program Report 102. Washington, D.C.: Highway Research Board.
- [9] Mertz, D. (2015). Steel Bridge Design Handbook: Design for Fatigue. Washington, D.C.: Federal Highway Administration.
- [10] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2011). The Manual for Bridge Evaluation, Second Edition. Washington D.C. : American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [11] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2014). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Seventh Edition. Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [12] American Institute of Steel Construction. (2006, January 1). Engineering FAQs.
- [13] Bowman, M. D., Fu, G., Zhou, Y. E., Connor, R. J., & Godbole, A. A. (2012). NCHRP Report 721: Fatigue Evaluation of Steel Bridges. Washington, D.C.: Transportation Research Board.