

Patología de Estructuras Metálicas en Conexiones y Miembros de Acero Estructural

Angélica Tatiana Cruz Orozco

Monografía para optar el título de Especialista en Estructuras

Director

Armando Gómez Villabona

Especialización en Estructuras

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Especialización en Estructuras

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2020

Dedicatoria.

Esta monografía va dedicada primeramente a Dios y a mis padres Gladys Orozco y Luis Cruz quienes me han dado el valor de emprender metas por medio del conocimiento basado en los principios y valores que me han inculcado.

A la Universidad Industrial de Santander y a todos los que hicieron partícipes de este proyecto como los docentes de la especialización, a mis compañeros, directivos de la facultad, y a mi director de monografía Armando Gómez Villabona. Adicionalmente quiero brindar homenaje y agradecimiento al compañero Javier Alexander Pabon (QEPD).

A todas las personas que también indirectamente me brindaron su apoyo como mi familia materna y paterna, amigos, a mi prima Jackeline Guerrero y a mi novio Diego Dueñez.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por los dones recibidos, a mis padres Gladys Orozco y Luis Cruz quienes me apoyaron emocional y económicamente con todos mis estudios profesionales, por la confianza que han puesto en mis habilidades y pasiones.

A la Universidad Industrial de Santander por permitirme ser parte de la cohorte VII de la Especialización en estructuras y ampliar mis conocimientos con el apoyo de docentes excelentemente capacitados, de compañeros que compartieron la experiencia en el área, directivos de la facultad, y a mi director Armando Gómez Villabona quien me apoyo en el desarrollo de la monografía.

Tabla de Contenido

Introducción	15
1. Objetivos	18
1.1 Objetivo General	18
1.2 Objetivos Específicos	18
2. Revisión de teorías	19
2.1 Patología estructural	19
2.2 Causas de intervención: Patología de estructuras de edificación	19
2.3 Etapas en el proceso de estudio de la patología estructural	20
2.4 Clases de patologías	21
2.5 Bases teóricas	22
2.5.1 Conceptos básicos de mecánica de materiales	22
2.5.2. Cálculo No lineal	30
2.5.3 Ejemplo de caso no lineal	31
2.6 Bases del diseño de estructuras de acero	33
2.7 Fallas en estructuras de acero	39

PATOLOGÍA EN ESTRUCTURAS METÁLICAS

2.7.1 Falla por deformación plástica.	39
2.7.2 Falla por inestabilidad.	39
2.7.3.Falla por fatiga	39
2.7.4 Corrosión por tensión.	40
2.7.5 Fluencia o corrimiento.	40
2.7.6 Fractura frágil.	40
2.7.7 Las soldaduras en la fallas de estructuras.	41
2.7.7.1 Esfuerzos residuales	39
2.7.7.2 Defectos	39
2.7.7.3 Metalurgia	39
2.8 Soluciones	41
2.9 Valoración de estructuras existentes y códigos actuales. Caso Puentes	42
3. Evaluación de fallas y prevención	44
3.1 Corrosión	44
3.1.1Mecanismos de corrosión en aceros enterrados	44
3.1.2 Valoración de la corrosión por acción ambiental	47
4. Análisis de métodos de predicción	50
4.1 Instrumentación para el monitoreo de estructuras	50

PATOLOGÍA EN ESTRUCTURAS METÁLICAS

4.2 Terremoto y fuego	55
4.2.1 Fuego	55
4.2.2 Terremotos	62
4.3 Fatiga	65
4.4 Integridad estructural y métodos predictivos	69
5. Conclusiones	83
Referencias Bibliográficas	85

Lista de Tablas

Tabla 1	Tipos de patología estructural	21
Tabla 2	Características de aceros más comunes	33
Tabla 3	Relación entre variables y corrosión	44

Lista de Figuras

Figura 1	Mapa de las zonas de amenaza sísmica de Colombia.	16
Figura 2	Modelo secuencial de los procesos de la patología estructural.	20
Figura 3	Diagrama esfuerzo deformación de un cuerpo rígido perfecto rígido	22
Figura 4	Diagrama esfuerzo deformación de un cuerpo elástico perfecto	23
Figura 5	Diagrama esfuerzo deformación de un cuerpo plástico perfecto	23
Figura 6	Diagrama esfuerzo deformación de un cuerpo frágil perfecto	24
Figura 7	Diagrama esfuerzo deformación ensayo tracción	25
Figura 8	Zona elástica en diagrama esfuerzo deformación, ensayo tracción	25
Figura 9	Rotura en un ensayo tracción	26
Figura 10	Máquinas para ensayo de tracción	26
Figura 11	Esfuerzo normal simple	27
Figura 12	Esfuerzo cortante simple y doble	28
Figura 13 (a)	Esfuerzo normal en una viga a flexión. Véase la distribución no uniforme	29
Figura 13 (b)	Esfuerzo cortante en una viga a flexión. Véase la distribución no uniforme	29
Figura 14	Curvatura bajo cargas axiales. Ecuación de la elástica y forma curva	31
Figura 15 (a)	Ciclos de inversión hasta la falla N	35

Figura 15 (b)	Montaje para el ensayo de fatiga	35
Figura 16	Viaducto Polcevera (puente Morandi) Italia	36
Figura 17	Perfil tipo cajón con esfuerzos residuales por la fabricación	37
Figura 18	Puente antiguo	40
Figura 19 (a)	Relación entre las variables que afectan la corrosión en aceros enterrados	43
Figura 19 (b)	Tipos de corrosión	45
Figura 20	Montaje experimental para evaluación de revestimiento	46
Figura 21	Chapas con revestimiento sometidas a corrosión versus tiempo	47
Figura 22	Montaje experimental para modelar corrosión por cascareo	47
Figura 23	Montaje experimental para medir deformaciones con fibra óptica	48
Figura 24	Montaje experimental en celdas para medir deformaciones con fibra óptica	49
Figura 25 (a)	Inspección de alto riesgo en puentes	49
Figura 25 (b)	Prototipo de robot	50
Figura 26	Arquitectura de control	50
Figura 27	Elementos del efecto Hall	51
Figura 28	Incendio Catedral Notre Dame, París - Francia	52
Figura 29	Ataque a las Torres Gemelas 11 septiembre 2001	53
Figura 30	Fallas por exposición al fuego	54
Figura 31	Morfología de viga simple y continua luego de exposición al fuego	55
Figura 32	Morfología pórtico y armadura luego de exposición al fuego	55
Figura 33	Factor de sección y resistencia al fuego	56

Figura 34	Montaje experimental para establecer resistencia al fuego en uniones	56
Figura 35	Relación entre la tensión y la deformación	57
Figura 36	Disminución de la resistencia y rigidez del acero	57
Figura 37	Colapso de varias estructuras industriales por terremotos	58
Figura 38	Modelado experimental del estudio de Bai	59
Figura 39	Diagrama de desplazamiento con incendio posterior al terremoto	59
Figura 40	a) Terremoto de Japón de 1995. (b) Modos de falla de las estructuras	60
Figura 41	Modelos tridimensionales FEM: (a) Modelo placa (b) Modelo macizo	61
Figura 42	Resultados de los Modelos tridimensionales FEM	62
Figura 43	Diagrama para la valoración de la Fatiga	63
Figura 44	Diagrama para la valoración de la Falla de acuerdo con el método R6	65
Figura 45	Ilustración del modelo de análisis	65
Figura 46	(a) Puente real (b) Modelo a escala construido a escala 20 a 1	67
Figura 47	Respuesta modelo numérico para el primero modo de vibración	67
Figura 48	Respuesta transitoria. Excitación tipo impulso obtenida del modelo numérico	68
Figura 49	Respuesta transitoria obtenida experimentalmente	68
Figura 50	Cálculo de frecuencias. Véase la diferencia entre la viga "sana" y la averiada	69
Figura 51	Singularidad de inicio de la grieta según la mecánica de la fractura	70

Figura 52	Comparación entre diseño y construcción	71
Figura 53	Puente Milford Haven, en falla por pandeo lateral	72
Figura 54	Unión propensa a falla	72
Figura 55	Pasarela degradada por falta de mantenimiento e inspección	73
Figura 56	Grietas en unión soldada	74
Figura 57	Corrosión en partes de la aeronave	75
Figura 58	Deformación permanente en las alas de la aeronave	76
Figura 59	Detalle de la base del ala del modelo DC-3 y AC-47T	76
Figura 60	Vistas del ala deformada del AC-47T durante la vibración donde hay deformación cíclica, causante de los daños que generan corrosión	77

Resumen

Título:	Patología de estructuras metálicas en conexiones y miembros de acero estructural ¹
Autor:	Angélica tatiana cruz osorio ²
Palabras clave:	Conexiones, acero, estructuras, fallas, fatiga, corrosión

Descripción:

Las fallas estructurales son aspectos de la ingeniería de suma importancia ya que conllevan a pérdidas humanas y materiales cuando se registran los eventos no deseados, por ello se deben invertir recursos suficientes para conocer los mecanismos de falla, las formas de evitarlas o minimizar las fallas en estructuras metálicas de acero. El objetivo del presente trabajo es estudiar la patología en elementos estructurales y conexiones de acero presentes en estructuras metálicas, evaluando los antecedentes de fallas y las formas para prevenirlas. Para ello se revisaron las teorías básicas de estructuras, desde la mecánica de materiales, las bases para los códigos constructivos, las fallas en construcción, así como los diferentes mecanismos de falla, corrosión, fatiga, fractura frágil y mantenimiento. También se revisaron los métodos de predicción basados en la supervisión de la salud estructural y las formas de instrumentación para la obtención de las variables necesarias para el control y supervisión en línea de estructuras. Es necesario estudiar el problema de la patología desde un punto global y multifactorial, ya que existen diversas técnicas, aspectos y áreas de conocimientos involucradas en el estudio de la falla de las conexiones y miembros de acero estructural, las cuales se observarán en la presente investigación.

¹ Monografía

² Facultad de Fisicomecánicas. Especialización en Estructuras. Director: Armando Gómez Villabona

Abstract

Title:	Pathology of metallic structures in connections and members of structural steel
Author:	Angélica tatiana cruz osorio ²
Keywords:	Connections, steel, structures, faults, fatigue, corrosion

Description:

Structural failures are aspects of engineering of the utmost importance since they lead to human and material losses when unwanted events are recorded, so sufficient resources must be invested to know the failure mechanisms, ways to avoid them or minimize failures in metal steel structures. The objective of this work is to study the failures in structural elements and steel connections present in metallic structures, evaluating the history of failures and the ways to prevent them. For this, the basic theories of structures were reviewed, from the mechanics of materials, the bases for the construction codes, the failures in construction, as well as the different mechanisms of failure, corrosion, fatigue, fragile fracture and maintenance. Prediction methods we also reviewed based on the supervision of structural health and the forms of instrumentation to obtain the necessary variables for the control and supervision of structures online. It is necessary to study the problem of pathology from a global and multifactorial point, since there are various techniques, aspects and areas of knowledge involved in the study of the failure of connections and structural steel members, which will be observed in the present investigation.

Monograph

²Faculty of Physicomechanics. Specialization in Structures. Director: Armando Gómez Villabona

Introducción

Las estructuras de acero son las obras de infraestructura que más relacionamos con la vida moderna. El uso de las máquinas de vapor, la acerías, y la construcción industrializada trajeron grandes cambios a la civilización, convirtiendo pequeños asentamientos de poblaciones a grandes urbes, en poco tiempo, con impacto sobre la vida de las personas.

Rascacielos, fabricas, vías férreas, puentes, todas estas obras solo son posibles por la existencia del acero, por la utilización de este importante material estructural de manera segura, económica, generalizada, con conocimientos fáciles de aprender y difundir.

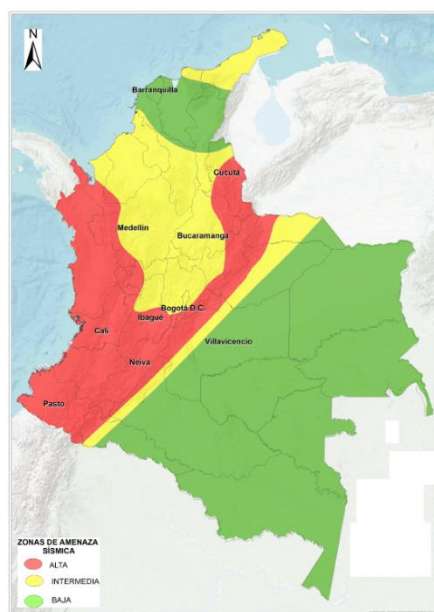
El desarrollo de las estructuras ha presentado fallas catastróficas, en algunos casos, disminución de la vida útil de las estructuras modernas, comparadas con las grandes obras de la antigüedad, lo que ha hecho que el mantenimiento, la ingeniería forense, el mantenimiento predictivo empezaran a invadir la ingeniería del acero constructivo

Las fallas estructurales en esencia son de baja ocurrencia, pero cuando suceden, traen consigo graves consecuencias, generalmente con gran difusión por el alcance de los medios masivos de comunicación actuales, por ello, han surgido numerosas investigaciones en el área de la las patologías de los aceros. Por ejemplo, Alpsten (2017) señala que las causas de fallas estructurales en las estructuras de acero se centra en tres diferentes condiciones: *“fallas en estructuras de acero (cuasi) cargadas estáticamente durante la fase de montaje / construcción, fallas que ocurren en la fase de servicio y finalmente daño por fatiga”* (p.2).

Para el caso de Colombia, se debe tener en cuenta que el país presenta diferentes niveles de amenaza sísmica (alta, intermedia y baja), donde aproximadamente el 83% de la población nacional está ubicada en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta (“Riesgo sísmico – Idiger”, 2020), la sismicidad está relacionada con la actividad en la zona de subducción del pacífico colombiano y en las fallas geológicas activas del país, como es el “Nido sísmico de Bucaramanga”, con epicentros ubicados en la zona de la Mesa de Los Santos en el departamento de Santander. Las zonas de amenaza sísmica de Colombia se pueden observar en la figura 1.

Figura 1.

Mapa de las zonas de amenaza sísmica de Colombia



Nota : Ingeominas (2010). Mapa Nacional de Amenaza Sísmica de Colombia.

Debido a la posibilidad de sismos se debe invertir tiempo y esfuerzo en prevenir los daños asociados, y de esta manera disminuir patologías que se puedan presentar en las estructuras, debido a eventos sísmicos, según De Freitas (2013), proporcionan un sistema de enfoque científico para descubrir lo que salió mal en una falla estructural. La objetividad que aporta ayuda a hacer una

investigación independiente de prejuicios y de asuntos de culpa. El patólogo está preocupado con lo que sucedió y cómo sucedió, en lugar de atribuir la culpa. El enfoque del patólogo es determinar hechos en lugar de atribuir responsabilidad.

Esta investigación está enfocada hacia las patologías en miembros y conexiones de acero. Se estudian casos emblemáticos de fallas, conceptos básicos y bases generales de diseño. Se revisan los enfoques modernos para el análisis de estructuras antes, durante y después de una falla. Fatiga, corrosión, instrumentación en estructuras, métodos de predicción y confiabilidad son temas a considerar.

La ingeniería forense aplicada a estructuras de acero en años recientes, combina diferentes tipos de análisis, por ejemplo: el estudio de los daños en las estructuras por efecto del viento como el hecho por Maraveas (2019), errores en el diseño por Campione (2019), uso de metodologías termográficas para la inspección de infraestructura cuyo análisis computacional permite detectar discontinuidades (grietas) en soldaduras de estructuras de acero en obras construidas realizadas por Garrido (2020), uso de técnicas de elemento finito para el análisis de fallas en uniones de acero en estructuras como las realizadas por Cerukuri (2020) entre otros muchos ejemplos.

La investigación engloba una visión general de como concebir las patologías en estructuras metálicas en conexiones y miembros de acero estructural, no como un punto aislado, sino más bien como una visión panorámica con cierta profundidad, el cual abarca muchos campos de especialización, que se interrelacionan entre sí, alimentándose y generando problemas multifactoriales.

1.Objetivos

1.1 Objetivo General

Estudiar la patología de las conexiones y miembros de acero presentes en estructuras metálicas.

1.2 Objetivos Específicos

- ✓ Revisar las teorías básicas de estructuras, desde la mecánica de materiales, así como los diferentes mecanismos de falla, corrosión, fatiga, fractura frágil y mantenimiento.
- ✓ Evaluar antecedentes de fallas con fatalidades y las formas para prevenirlas.
- ✓ Analizar los métodos de predicción basados en la supervisión de la salud estructural y las formas de instrumentación para la obtención de variables necesarias para el control y supervisión en línea de estructuras.

2. Revision de teorías

En este capítulo se revisan las teorías relacionadas con la patología estructural y los conceptos básicos de mecánica de materiales, necesarios para el estudio de la patología en estructuras metálicas en conexiones y miembros de acero estructural.

2.1 Patología estructural

La palabra "patología" se deriva de dos palabras latinas: pathos (enfermedad) y logos (discurso). De acuerdo a Helene y Pereira (2003), la patología puede ser definida como la parte de la Ingeniería que estudia los síntomas, los mecanismos, las causas y los orígenes de los defectos de las obras civiles, o sea, es el estudio de las partes que componen el diagnóstico del problema. Según Douglas y Ramsom (2007), la patología estructural se define como el estudio o tratamiento sistemático de defectos en la estructura, sus causas (etiología), sus consecuencias y sus remedios (o terapia). La patología estructural implica un enfoque holístico y tiene un alcance integral, que abarca el proceso de investigación desde la manifestación inicial del defecto hasta la rectificación y el monitoreo. La prevención, también es un objetivo de la patología.

2.2 Causas de intervención: Patología de estructuras de edificación

Entre las causas que pueden motivar la intervención sobre una estructura ya construida, de acuerdo con Rio Bueno (2004), se pueden señalar las siguientes:

- Problemas patológicos:
- Errores de diseño y/o cálculo de la estructura, incluyendo la concepción de los detalles.

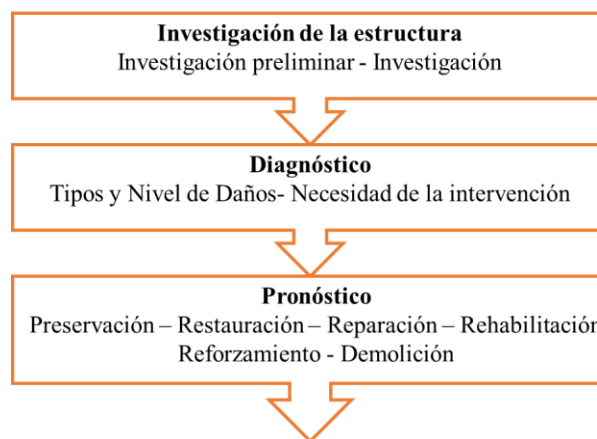
- Errores de ejecución en sus más diversas formas.
- Baja calidad de los materiales estructurales.
- Problemas de durabilidad, debido a degradación de los materiales por agresión del ambiente.
- Uso y/o mantenimiento incorrecto de la construcción.
- Acciones "imprevisibles" de carácter excepcional:
- Catástrofes naturales: terremotos, huracanes, etc.
- Accidentes: fuego, explosiones, etc.
- Remodelación y/o reutilización del edificio:
- Modificación de la estructura o de su distribución de esfuerzos.
- Cambios de utilización del edificio, con incremento de las sobrecargas de uso.

2.3 Etapas en el proceso de estudio de la patología estructural

A continuación, en la figura 2, se presentan las etapas del proceso de patología estructural de acuerdo con Carreño y Serrano (2005).

Figura 2.

Modelo secuencial de los procesos de que sigue la patología estructural



Adaptado de Carreño y Serrano (2005).

2.4 Clases de patologías

Según el Astorga (2009) las patologías pueden aparecer por tres motivos:

- Las patologías que aparecen por Defectos, son aquellas relacionadas con las características intrínsecas de la estructura. Pueden ser causadas por un mal diseño, una errada configuración estructural, una construcción mal elaborada o materiales de calidad deficiente que no cumplen especificaciones de la NTC.
- Las patologías originadas por Daños, son las que se manifiestan durante y/o luego de la incidencia de una fuerza externa a la edificación. Los daños pueden ser causados por un fenómeno natural, como un sismo, inundación, deslizamiento de tierras, entre otros. Aunque otro motivo posible podría ser el caso en el que la estructura se viera obligada a soportar una carga para la cual no fue diseñada, es decir, una sobrecarga.
- El tercer motivo de patologías puede ser el Deterioro, generalmente se diseñan para que funcionen durante una vida útil, pero con el transcurrir del tiempo, la estructura presenta daños que deberán ser atendidas de manera inmediata. Una estructura puede estar debilitándose o en proceso de deterioro cuando se ven expuestas a la intemperie, al contacto con sustancias químicas presentes en el agua o en el aire.

Tabla 1.

Tipos de patología estructural.

Patologías	
Patologías por concepción estructural	Patologías en columnas
Patologías por diseño	Patología en losas
Patologías por construcción	Patologías en vigas de amarre
Patologías en elementos no estructurales	Patologías por configuración geométrica y estructural

Adaptado de Carreño y Serrano (2005).

2.5.1 Bases teóricas

De acuerdo con Valencia Clement (2010), el propósito del diseñador de estructuras es lograr una estructura económica, segura y que cumpla con ciertos requisitos funcionales y estéticos. Para conseguirlo, el ingeniero debe conocer suficientemente la mecánica y el análisis estructural, las propiedades de los materiales y la función y comportamiento de los elementos constitutivos de la estructura.

2.5.2 Conceptos básicos de mecánica de materiales

Las bases de la mecánica de materiales y del diseño de estructuras están apoyadas en la mecánica del cuerpo rígido, comúnmente conocida como *estática*, la mecánica del cuerpo deformable, conocida como mecánica de materiales o resistencia de materiales, contienen una conjunción de conceptos, que por básicos no dejan de ser importantes y deben ser considerados.

Desde lo más simple hacía lo más complejo se inicia con el concepto de cuerpo rígido, el cual se considera un cuerpo que no experimenta deformación alguna, independientemente del valor de carga, en consecuencia no sufre falla, ver Figura 1, en la figura se puede observar el comportamiento de un cuerpo rígido perfecto, una idealización que corresponde a un cuerpo que no sufre deformaciones por esfuerzo de fuerzas externas.

Figura 3.

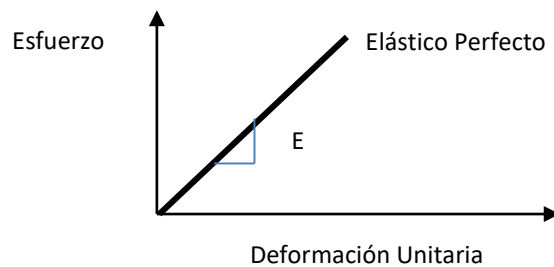
Diagrama esfuerzo deformación de un cuerpo rígido perfecto.



Concepto importante a señalar, es el del cuerpo elástico perfecto, en el cual se relacionan el esfuerzo y la deformación de forma proporcional, siendo la pendiente de la recta el valor del módulo de Young o módulo de elasticidad, ver Figura 2.

Figura 4.

Diagrama esfuerzo deformación de un cuerpo elástico perfecto.



Otro muy utilizado para el modelado del comportamiento de materiales estructurales, es el *cuerpo plástico perfecto*, el cual no posee zona elástica, solo un esfuerzo de fluencia, y una zona de deformaciones plásticas infinitas, ver Figura 3.

Figura 5.

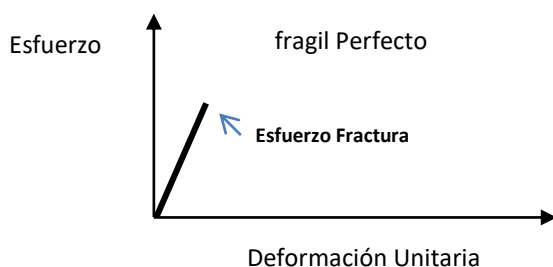
Diagrama esfuerzo deformación de un cuerpo plástico perfecto.



El concepto de idealización del comportamiento mecánico de un cuerpo es el de *frágil perfecto*, el cual corresponde a un material que no posee zona plástica, pasa de la zona elástica a la fractura. En la Figura 4 puede observarse el comportamiento asociado.

Figura 6.

Diagrama esfuerzo deformación de un cuerpo frágil perfecto.



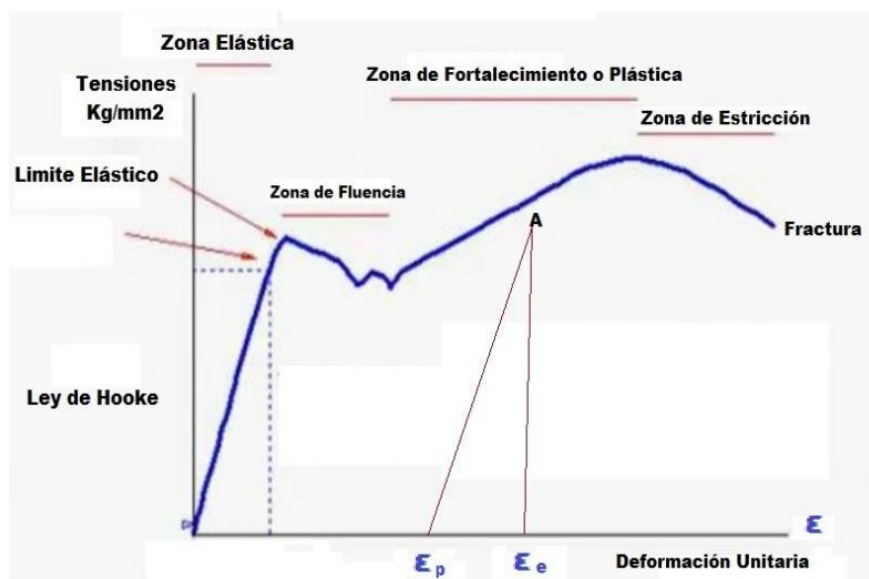
Todos estos modelos son idealizaciones del comportamiento real de un elemento, el cual se obtiene en pruebas de laboratorio, que indican que los materiales poseen una combinación de todos estos conceptos de acuerdo con Pytel y Singer (1994).

El ensayo de tracción es una prueba que consiste en someter un material a un esfuerzo de tracción para obtener en esencia cuatro características mecánicas: *módulo de Young*, *resiliencia*, *tenacidad* y *ductilidad*. También se obtienen los esfuerzos de límite de proporcionalidad, esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo, y esfuerzo de rotura. Este ensayo es a velocidad controlada, está regulado y normalizado en todo el mundo, siendo frecuentemente referenciado por las normas de la *American Society Testing and Materials* o Sociedad Americana de Pruebas de Materiales, identificada así por sus siglas en inglés AISC. Para la determinación de la resistencia a la tracción de productos de acero se utiliza la norma ASTM A370 - 14 (Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products).

Un ejemplo de los resultados de estas pruebas puede observarse en la Figura 5, donde se grafica una curva de esfuerzo deformación para un material de alta ductilidad.

Figura 7.

Diagrama esfuerzo deformación ensayo tracción.

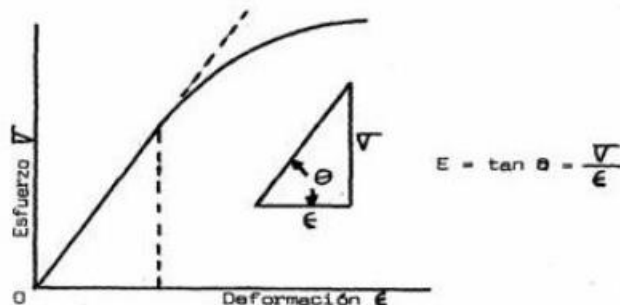


Adaptado de Boletín de Tecnología, “Ensayo de tracción” (2019), <https://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html>.

Luego del ensayo se puede estudiar el comportamiento en la zona elástica, el cual se observa en la Figura 6, considerando la zona antes del esfuerzo límite de proporcionalidad. En dicha zona se puede calcular el módulo de elasticidad E .

Figura 8.

Zona elástica en diagrama esfuerzo deformación, ensayo tracción

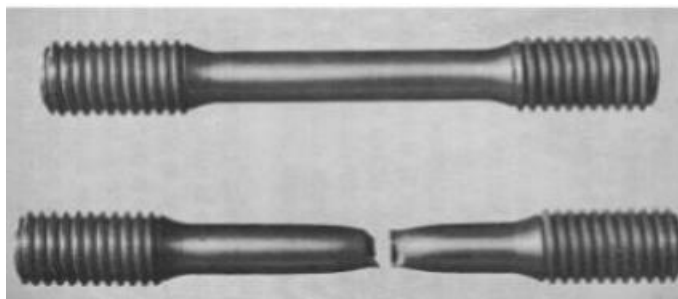


. Adaptado de Boletín de Tecnología, “Ensayo de tracción” (2019), <https://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html>.

Los materiales de alta ductilidad (por ejemplo el aluminio) tienden a fracturar con una deformación plástica previa, la cual puede notarse en la Figura 7. Esta es una fractura donde se observa el fenómeno de estricción o encuellamiento.

Figura 9.

Rotura en un ensayo tracción



. Adaptado de Boletín de Tecnología, “Ensayo de tracción” (2019), <https://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html>.

Los equipos utilizados para los ensayos de tracción se pueden observar en la Figura 8.

Figura 10.

Máquinas para ensayo de tracción.



Adaptado de Boletín de Tecnología, “Ensayo de tracción” (2019), <https://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html>.

Los conceptos básicos de mecánica de materiales, son complementados con los conceptos básicos de Popov (2000) los cuales permiten comprender con mayor precisión el comportamiento de las estructuras y uniones de acero.

Esfuerzo normal simple: esfuerzo producido por la acción de una fuerza normal a un área, Figura 9, aplicada en el centroide de la sección. Característico de barras y cables, ecuación 1:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

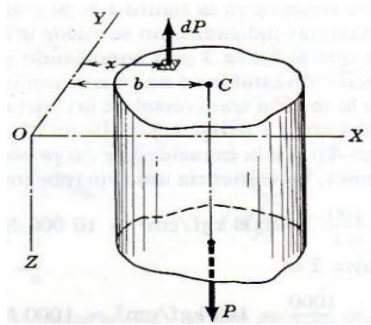
σ Esfuerzo normal simple

F Fuerza normal

A Área transversal

Figura 11.

Esfuerzo normal simple



. Adaptado de Popov (2000).

Esfuerzo cortante simple: esfuerzo producido por la acción de una fuerza cortante paralela a un área, Figura 10 nodos A y C. Presente en chavetas, pernos en cortante simple y punzones, ecuación 2:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2)$$

τ Esfuerzo cortante simple

F.... Fuerza cortante

A.... Área transversal

Esfuerzo cortante doble: esfuerzo producido por la acción de una fuerza paralela a un área, Figura 10, nodo D. Presente en pernos en cortante doble, ecuación 3.

$$\tau = \frac{F}{2A} \quad (3)$$

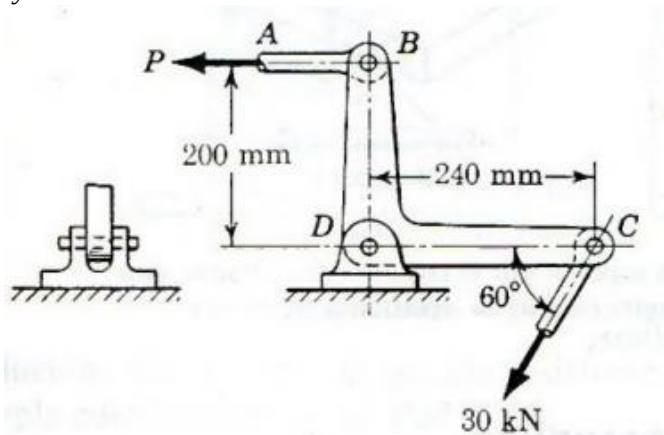
τ Esfuerzo cortante doble

F.... Fuerza normal

A.... Área transversal

Figura 12.

Esfuerzo cortante simple y doble.



Adaptado de Popov (2000).

Esfuerzo normal por flexión presente en vigas, ver Figura 13(a). Es un esfuerzo de distribución no uniforme, ecuación 4:

$$\sigma = \frac{My}{I_{zz}} \quad (4)$$

σ Esfuerzo normal.

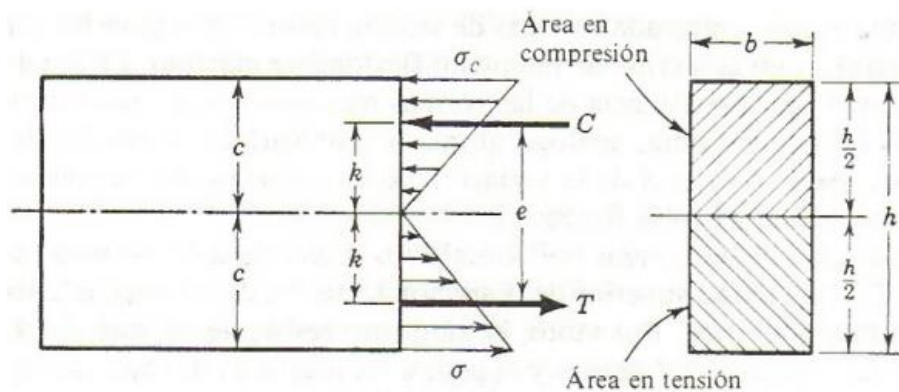
M.... Momento flector.

y.... Distancia desde el centroide a la fibra esforzada.

I_{zz} Momento de inercia respecto al eje neutro.

Figura 13(a).

Esfuerzo normal en una viga a flexión



. Véase la distribución no uniforme. Adaptado de Popov (2000).

Esfuerzo cortante por flexión presente en vigas: Es un esfuerzo de distribución no uniforme, Figura 11(b), ecuación 5.

$$\tau = \frac{VQ}{I_{zz}b} \quad (5)$$

τ Esfuerzo normal.

V Fuerza cortante.

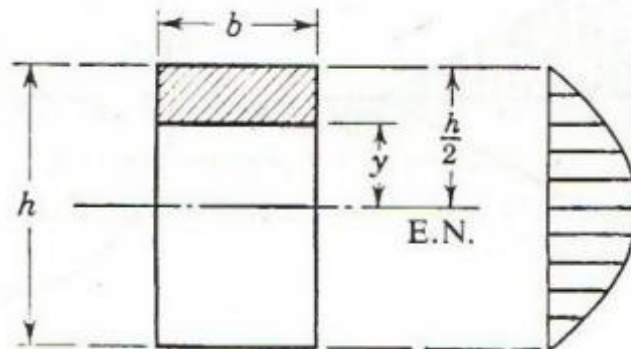
Q Momento estático de área.

I_{zz} Momento de inercia respecto al eje neutro.

b Base en la fibra esforzada.

Figura 13(b).

Esfuerzo cortante en una viga a flexión.



Véase la distribución no uniforme. Adaptado de Popov (2000).

2.5.3 Cálculo No lineal

El cálculo lineal elástico es el método de análisis escogido para dimensionar el comportamiento de una estructura durante la fase de diseño, sin embargo, en la ingeniería actual existen múltiples situaciones donde los estados límites de servicios o las restricciones en desplazamiento pierden su sentido, como es el caso de estructuras con una gran concentración de tensiones y desplazamientos

despreciables, como explica Gil (1996), en las cabezas de vigas pretensadas existe una fuerte concentración de tensiones en un estado triaxial mientras sus desplazamientos son prácticamente nulos en comparación con la sollicitación que reciben. En estos casos debemos utilizar un cálculo no lineal, también llamado en segundo orden. Y las estructuras tensadas son uno de estos casos. Según Sastre (2012), existen diversos tipos de no linealidad:

a. No linealidad geométrica.

Cuando los desplazamientos de una estructura son muy grandes (independientemente de que también lo sean las deformaciones), el equilibrio debe buscarse en esta forma final, por lo que en cada caso de carga encontraremos una forma final diferente, y las reacciones no serán proporcionales a las acciones.

b. No linealidad mecánica: elementos.

Es posible que al producirse los desplazamientos, ciertos elementos de la estructura se vean sometidos a esfuerzos que no pueden soportar. Por ejemplo, un cable sometido a compresión. En este caso, según el tipo de carga habrá más o menos elementos resistentes activos, con lo que, otra vez, los resultados no serán proporcionales a las acciones.

c. No linealidad mecánica: materiales.

Hay materiales que tienen un comportamiento tensión-deformación no lineal. Si eso es así, está claro que el comportamiento de una estructura, formada por elementos de este tipo de material, va a ser también no lineal.

d. No linealidad mecánica: cargas.

Existen acciones (como el viento o la nieve) que dependen de la forma de la estructura. Si existen grandes desplazamientos, cambia la forma y cambian las acciones. Evidentemente los resultados son también variables y no proporcionales a las acciones.

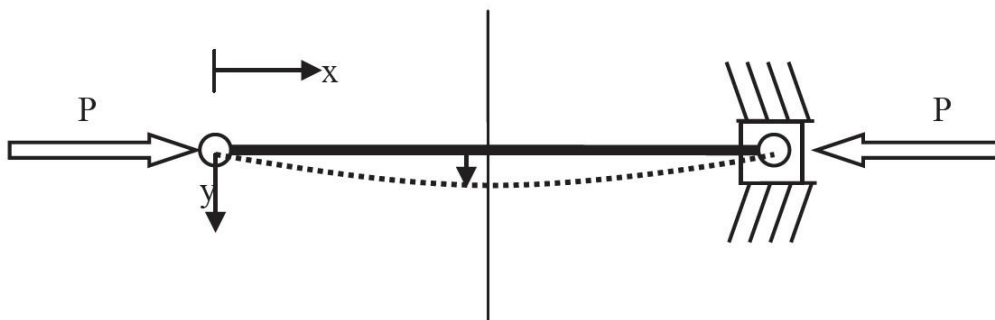
2.6 Ejemplo de caso no lineal

En general, la no-linealidad geométrica se da en situaciones de grandes deformaciones, en dichas situaciones los desplazamientos ya no serán proporcionales a las deformaciones. Según Sánchez

(2011), en esos casos puede pasar que el punto de aplicación de las cargas se desplace ostensiblemente bajo la acción de las fuerzas, por lo que puede que se induzcan nuevas deformaciones debidas al desplazamiento de los puntos de aplicación de las cargas. Esos nuevos desplazamientos de segundo orden, requieren recalcular los esfuerzos bajo la nueva configuración de cargas. Un ejemplo de lo descrito corresponde al caso de piezas esbeltas que sufren pandeo, como la de la figura 14. Si se llama $y(x)$ al desplazamiento respecto a la forma recta, para una barra con los enlaces exteriores como los de la figura resulta que el desplazamiento máximo se da en el centro de la misma: $y_{\max} = y(L/2)$.

Figura 14.

Curvatura bajo cargas axiales.



Ecuación de la elástica y forma curva. Adaptado de Sánchez (2011).

Para tener en cuenta los efectos de segundo orden se debe considerar, en lugar de las aproximaciones lineales de la teoría de la elasticidad lineal, las ecuaciones que relacionan las fuerzas exteriores y la deformación del eje sin despreciar ningún término.

Si se llama $y(x)$ al desplazamiento respecto a la forma recta, para una barra con los enlaces exteriores como los de la figura resulta que el desplazamiento máximo se da en el centro de la misma: $y_{\max} = y(L/2)$. El momento máximo y la tensión que adquiere la barra en la configuración deformada vienen dadas por:

$$M_f = P_{crit} \cdot y_{\max}$$

$$\sigma_{xx} \approx \frac{P_{crit}}{A} + \frac{P_{crit} y_{\max}}{W_x}$$

(6) y (7)

La ecuación 6 y 7, describen el problema de estabilidad por pandeo. En la teoría elástica lineal se relaciona el desplazamiento del eje de una pieza prismática recta con el momento flector, de la siguiente manera:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_f}{EI_f} \approx \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (8)$$

Esta ecuación da una aproximación muy buena para situaciones donde $y(x)$ es muy pequeña comparada con la longitud de la barra, pero para tener en cuenta los efectos de segundo orden se debe considerar las ecuaciones que relacionan fuerzas exteriores y la deformación del eje sin despreciar ningún término. La ecuación de la elástica exacta en este caso viene dada por:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} \left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{-3/2} = \frac{1}{\rho} = \frac{M_f}{EI_f} \quad (9)$$

La ecuación (8) es una ecuación diferencial lineal mientras que la ecuación exacta (9) es no lineal, para cuya resolución hay que tener en cuenta las condiciones de contorno adecuadas para encontrar una solución en particular.

2.6 Bases del diseño de estructuras de acero

Las bases del diseño de las estructuras de acero están todas fundamentadas en los manuales de la *American Institute of Steel Construction* o Sociedad Americana de Construcciones en Acero, identificada así por sus siglas en inglés AISC. Las bases del diseño según Brockenbrough y Merritt (1997) son las siguientes:

Las *propiedades de los aceros estructurales*, deben considerarse tomando en cuenta la aplicación a la cual se van a destinar, aceros al carbono, aceros de alta resistencia y baja aleación *High Strength Low Alloy* (HSLA) por sus siglas en inglés, aceros tratados térmicamente, aceros para puentes, entre muchos otros.

Entre los aceros, están los destinados específicamente para aplicación en puentes, los cuales son del grupo 709, que poseen resistencia a la fluencia por el orden de 36 a 100 klb/pulg². Aspectos importantes a considerar están las propiedades a tensión, módulo de Young, ductilidad, fluencia,

zona de endurecimiento por deformación, límite de proporcionalidad, relación de Poisson, módulo de resistencia al corte o cizalladura.

En la Tabla 2, pueden observarse las características de los aceros más comunes, comparados con otros metales.

Tabla 2.

Características de aceros más comunes

METALES	Densidad (kg/m ³)	Coeficiente de dilatación lineal [$\mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$]	Límite de proporcionalidad (MPa) ^a		Resistencia última (MPa)			Módulo de elasticidad (GPa)		Elongación (%) (en 50 mm)
			Tensión	Cortante	Tensión	Compr.	Cortante	E	G	
Acero, 0.2% carbono, laminado en caliente	7 850	Varia de 11.0 a 13.2	240	150	410	b	310	200	80	35
0.2% carbono, laminado en frío	7 850		420	250	550	b	420	200	80	18
0.6% carbono, laminado en caliente	7 850		420	250	690	b	550	200	80	15
0.8% carbono, laminado en caliente	7 850	El valor medio es 11.7	480	290	830	b	730	200	80	10
Fundición gris	7 200	10.8	c	d	140	520	d	100	40	Pequeña
Fundición maleable	7 200	11.9	250	160	370	b	330	170	90	18
Hierro forjado	7 700	12.1	210	130	350	b	240	190	70	35
Aluminio fundido	2 650	23.1	60		90	b	70	70	30	20
Aluminio, aleación 17ST	2 700	23.1	220	150	390	b	220	71	30	—
Latón, laminado										
(70% Cu, 30% Zn)	8 500	18.7	170	110	380	b	330	100	40	30
Bronce, fundido	8 200	18.0	140		230	390	—	80	35	10
Cobre, estirado	8 800	16.8	260	160	380	b	—	120	40	4

NOTAS

^a El límite de proporcionalidad y el módulo elástico, a compresión, pueden tomarse los mismos que a tensión, excepto en la fundición o hierro fundido cuyo límite de proporcionalidad es aproximadamente 180 MPa.

^b Como resistencia última a compresión en materiales dúctiles puede tomarse el punto de cedencia o fluencia que es ligeramente superior al límite de proporcionalidad a tensión.

^c No está bien definido, aproximadamente vale 40 MPa.

^d La fundición falla por tensión diagonal.

Nota: Se presentan las propiedades de los aceros más utilizados en la construcción de edificaciones. Adaptado de Brockenbrough y Merritt (1997).

Los aceros deben someterse también a pruebas de dureza, deben evaluarse los efectos del trabajo en frío y su relación con los valores de deformación permanente. También son muy importantes los efectos de las temperaturas elevadas sobre las propiedades a tensión, por su influencia sobre las condiciones de trabajo de las estructuras.

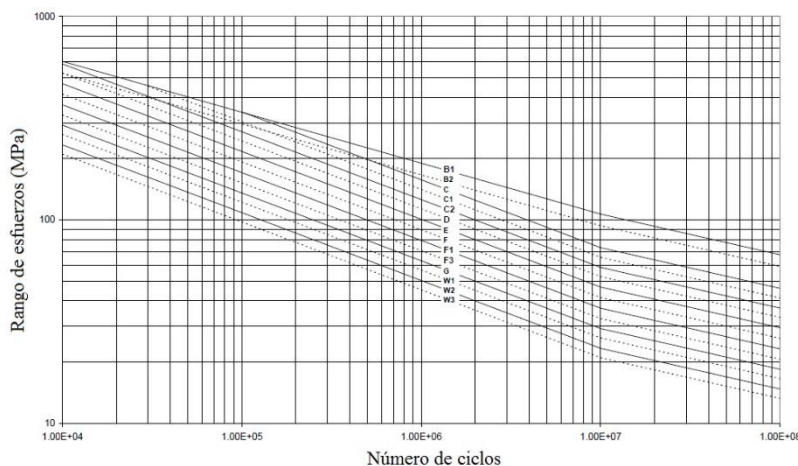
La *fatiga* es un fenómeno que se presenta en miembros estructurales sometidos a cargas cíclicas. De acuerdo a Det Norske Veritas (2008), el objetivo del diseño de fatiga es garantizar que la estructura tenga una vida útil adecuada. Las vidas calculadas de fatiga también forman la base de programas de inspección eficientes durante la fabricación y la vida operativa de la estructura. Para garantizar que la estructura cumpla con su función prevista, se debe realizar una evaluación de fatiga, respaldada cuando sea apropiado por un análisis detallado de fatiga, para cada miembro individual, que está sujeto a la carga de fatiga.

Cabe señalar que cualquier elemento o miembro de la estructura, cada unión soldada y accesorio u otra forma de concentración de tensión, es potencialmente una fuente de grietas por fatiga y debe considerarse individualmente.

La falla por fatiga puede alcanzarse a valores de esfuerzo muy por debajo del esfuerzo de fluencia, razón por la cual debe considerarse en el diseño. El estudio de la fatiga se hace sometiendo a cargas cíclicas a una probeta, adelantando la falla por el aumento de los ciclos de carga en el tiempo. El resultado de estos ensayos es el diagrama de esfuerzos versus ciclos, σ -N, las curvas S-N para el ambiente del aire se dan la Figura 15(a). En la Figura 15(b) está el montaje experimental usado más recientemente para las vigas I estructurales de acero soldado.

Figura 15 (a).

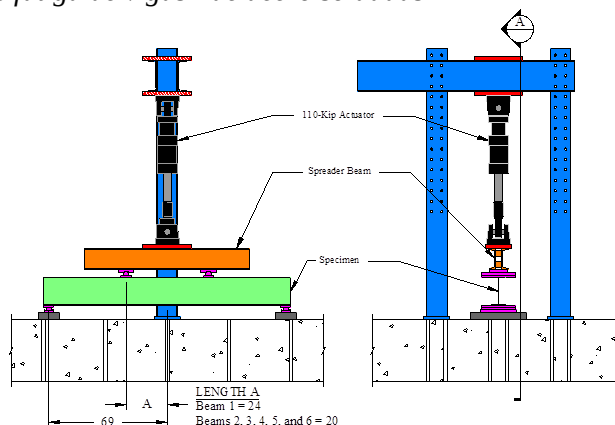
Ciclos de inversión hasta la falla N.



Adaptado de Det Norske Veritas (2008).

Figura 15 (b).

Montaje para el ensayo de fatiga de vigas I de acero soldadas



Tomado de Federal Highway Administration (2018).

La *fractura frágil* es un fenómeno que se presenta en condiciones desfavorables de tensión, temperatura, velocidad de carga, discontinuidad geométrica, (concentrador de esfuerzo), con alguna o todas esas condiciones presentes. La característica principal de esta falla es una fractura que ocurre por agrietamiento del material con muy poca presencia de deformación plástica, lo hace desastroso en la mayoría de los casos, en menor medida profundamente indeseable.

Para evitar esta falla deben minimizarse las muescas, los efectos de soldaduras deficientes, o aceros no adecuados a la aplicación destinada en el diseño final. Las modificaciones en el diseño durante la fabricación, sin la notificación y aprobación del diseñador suelen ser fuente de situaciones para que esta falla se genere.

Un ejemplo de falla corresponde al Viaducto Polcevera (puente Morandi), localizado al oeste de Génova, Italia, el cual se derrumbó el 18 de agosto de 2018, ocasionando la muerte de 43 personas y enormes daños materiales. Aunque no están claras las causas del colapso, diversos estudios como los realizados por Goyache (2019) quien propone que la causa de su colapso pudo ser la falta de mantenimiento, debido a que las vainas de hormigón que recubrían los cables de acero pudieron dejar pasar a través de sus poros el aire salino proveniente de la costa de Génova, dando lugar a una serie de procesos químicos que pudieron llevar a la corrosión del acero de los tirantes y a que éste perdiera sección resistente hasta romperse. Así, se cree que el inicio del colapso fue la pérdida de uno de los tirantes del sistema compensado número 9, por otra parte, Khalil (2018), relaciona la corrosión en el acero pretensado, las condiciones climáticas (vientos y rayos) como los orígenes de la pérdida de integridad del puente y su posterior falla por agrietamiento y fractura, ver Figura 16.

Figura 16.

Viaducto Polcevera (puente Morandi) Italia

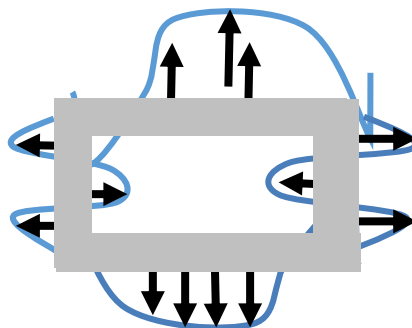


. Adaptado de [Fotografía de Bbruno-CC].
(España, 2018). Archivo fotográfico del Periódico El Confidencial.

Los *esfuerzos residuales* son aquellos producidos por la fabricación en el laminado, con frecuencia se producen por las diferentes tasas de enfriamiento durante la fabricación de perfiles. En la Figura 14 pueden observarse estos esfuerzos en un perfil laminado en caliente.

Figura 17

Perfil tipo cajón con esfuerzos residuales por la fabricación



. Adaptado de Brockenbrough y Merritt (1997).

2.7 Fallas en estructuras de acero

Existen tipos básicos de fallas en estructuras de acero de acuerdo con Weck (1965). Estas fallas ocurren debido a la excesiva deformación plástica, como resultado de una sobrecarga o de un impacto, de inestabilidad estructural, de fluencia, de corrosión bajo tensión, la fatiga y la fractura frágil. Los métodos convencionales de diseño consideran en esencia los dos primeros casos, es decir, la sobrecarga, la inestabilidad, toman en parte el tercero, la fluencia. Pero la fatiga, que es el tipo de falla más común, y la fractura frágil, que es la falla de mayor impacto por su naturaleza inesperada, no lo son tanto.

2.7.1 Falla por deformación plástica.

El procedimiento para el cálculo considerando este aspecto es primero estimar las magnitudes de las cargas, el segundo paso es el cálculo de esfuerzos usando una conjunción de métodos analítico, numérico y experimental, el tercer paso es dimensionar la estructura, tal que el máximo esfuerzo no exceda cierto valor permisible establecido por regulaciones, convenciones o por el diseñador.

2.7.2 Falla por inestabilidad.

Esta falla no está relacionada directamente con los esfuerzos, porque influye también la forma del elemento. Pandeo a flexión elástico de columnas, pandeo lateral elástico de vigas, pandeo a flexión elástico de pórticos, pandeo local, y comportamiento no lineal.

2.7.3 Falla por fatiga.

Esta falla es la más común de las fallas, debido a que en ninguna estructura está sometida a las cargas estáticas consideradas en el diseño. La falla por fatiga inicia invariablemente de una discontinuidad, que puede ser una hendidura concebida en el diseño, o peor aún hecha por el fabricante sin conocimiento del diseñador, a este panorama hay que agregarle que todas las cargas

son variables con el tiempo, son dinámicas y producen movimiento en la estructura que llega a ser de millones repeticiones durante el tiempo de servicio de la estructura.

2.7.4 Corrosión por tensión.

Llamado comúnmente corrosión, es este un proceso electroquímico, ya que toma lugar en estructuras sometidas a esfuerzos residuales, libres de cargas aplicadas, con lo que se hace muy difícil su predicción por los métodos tradicionales de cálculo.

2.7.5 Fluencia o corrimiento.

Esta falla es considerada en la forma convencional de diseño, excepto que el esfuerzo permisible no está ligado al esfuerzo último o al de fluencia, sino a un esfuerzo obtenido experimentalmente con un proceso de calentamiento. El riesgo de esta falla se incrementa con la fatiga y la temperatura.

2.7.6 Fractura frágil.

Considerado como una falla presente en estructuras de gran espesor, aunque hay excepciones, presentándose en chapas de espesores de 1/8 de pulgada. Los esfuerzos residuales en soldaduras son unas de las causas de la fractura frágil.

2.7.7 Las soldaduras en la fallas de estructuras.

2.7.7.1 Esfuerzos residuales. Todos los procesos de soldadura producen esfuerzos residuales. No pueden calcularse, ni evitarse, e incrementan la deformación plástica bajo carga, y el pandeo.

2.7.7.2 Defectos. La soldadura puede introducir muchos defectos en la unión. Las grietas introducen un factor que incrementa la falla por fatiga.

2.7.7.3 Metalurgia. La soldadura y la zona afectada por el calor presentan una gran diversidad de esfuerzos de fluencia entre los materiales a unir y el material de aporte de la soldadura. Promueve la penetración de hidrógeno con lo cual se generan grietas.

2.8 Soluciones

Aunque no existen soluciones únicas y lineales a cada situación, lo que es obvio es que la mayoría de las fallas están asociadas al desconocimiento de los mecanismos que las producen, y su ignorancia durante el proceso de diseño, fabricación y montaje.

Es indispensable usar el método tradicional de diseño, pero es más importante aún el seleccionar el acero adecuado a la aplicación que se desea.

La supervisión durante la fabricación y el montaje debe estar bajo los ojos del diseñador, o en delegación de este a fin de que no se introduzcan modificaciones que afecten gravemente uniones, empalmes, procesos de ensamblaje o de montaje.

2.9 Valoración de estructuras existentes y códigos actuales. Caso Puentes

Los códigos de construcción y diseño se adaptan con frecuencia a lo largo del tiempo, dependerá de las políticas de cada país en particular. Con frecuencia estructuras existentes no fueron diseñadas para que sigan en servicio, pero aún están allí, su valor arquitectónico es muy grande como para demolerlos y sustituirlos, sobre todo, si a primera vista están en buen estado y forman parte del patrimonio de una sociedad.

Es por ello, que surge la importancia de evaluar estas estructuras para estimar su vida útil, para el caso, los investigadores Siviero y Pavan (2018) proponen algunas recomendaciones, que pueden ser aplicables en nuestro país:

- ✓ Normalmente los puentes están hechos de materiales antiguos, con características muy inferiores a las actuales.
- ✓ La resistencia de la estructura es muy diferente a la estimada en el diseño, aunque el concreto aumenta su resistencia con el tiempo, los agentes ambientales atacan y deterioran especialmente al acero.
- ✓ Existen discrepancias entre los diferentes métodos de calificación aprobados. Estas discrepancias se confirman mediante la ejecución de cálculos preliminares de calificación realizados en puentes. Las razones de estas diferencias deben entenderse y abordarse completamente al desarrollar nuevas pautas o códigos.
- ✓ Los valores de falla antiguos eran muy conservadores, lo que ha compensado los efectos del deterioro por el tiempo, y los fenómenos de fatiga asociados a los largos periodos de tiempos de servicio.

Todas estas recomendaciones deben considerarse para los análisis de falla. En la Figura 15 puede verse un antiguo puente, que como tal debe cumplir con los códigos vigentes.

Figura 18.

Puente antiguo que cumple con su función, pero que debe ser reevaluado.



Adaptado de Siviero y Pavan (2018).

Cambios y desarrollos futuros en el diseño de estructuras de acero

Las tendencias actuales establecen el método de desarrollo directo, DDM (Direct Design Method), y su implementación en las normas de diseño, de acuerdo con Rasmussen y Zhanga (2017). Se implementan tanto la geometría como los efectos no lineales, considerando a las computadoras modernas como la herramienta indispensable en el proceso de diseño. La filosofía del análisis plástico predice el colapso con el concepto de bisagras como punto de falla. El análisis inelástico permite lograr miembros estructurales más ligeros y más económicos.

De acuerdo a Rasmussen y Zhanga (2017), el método de diseño directo tiene paralelos con el diseño basado en el desempeño (*performance-based design*) en la medida en que el diseño puede

ser dirigido para cumplir con ciertos criterios en términos de modo de falla y ubicación de falla. El análisis avanzado está encontrando un uso cada vez mayor en los métodos de diseño sísmico basados en el desempeño porque determina con precisión los desplazamientos, teniendo en cuenta la degradación de la rigidez a medida que el rendimiento se propaga a través de la estructura y los cambios en la frecuencia natural resultantes de los cambios en la rigidez. El análisis avanzado también es particularmente útil cuando se incorporan dispositivos de disipación de energía en una estructura, ya que permite determinar con precisión el efecto de dichos dispositivos en el rendimiento estructural. Como tal, se espera que con el tiempo, el diseño basado en el desempeño para acciones sísmicas y fuego adopte cada vez más métodos de análisis avanzados, incluido el análisis dinámico transitorio inelástico para el diseño sísmico.

3.Evaluación de fallas y prevención

Existen múltiples formas de estudiar patología de estructuras metálicas en conexiones y miembros de acero estructural, desde la predicción con modelos estadísticos, la concepción de la estructura desde el enfoque de la integridad mecánica, el conocimiento del mecanismo de falla, y el de la ingeniería forense. Estudiaremos cada enfoque para dar una visión amplia del tema.

3.1 Corrosión

3.1.1 Mecanismos de corrosión en aceros enterrados

La corrosión en elementos de acero enterrados es un problema muy importante, debido a que no pueden verse los efectos del fenómeno. En cualquier lugar hacia donde miramos hay estructuras

de acero enterradas, o parcialmente enterradas en el suelo. Siendo la corrosión el mecanismo que degrada el material, especialmente al acero, es muy importante que podamos prevenir o estimar este fenómeno, aunque muchos de estos métodos no están muy claramente establecidos. El suelo es un ambiente corrosivo por excelencia y debe conocerse su característica para saber la afectación sobre los aceros estructurales. La corrosión siempre estará presente, no puede evitarse, pero si se puede controlar, estimar y mitigar. Entre los factores que afectan a la corrosión están de acuerdo con Arriba-Rodríguez, Villanueva-Balseira, Ortega-Fernández, y Rodríguez-Pérez (2018) los siguientes:

-*Textura del suelo.* La textura del suelo está relacionada con la distribución de partículas de mineral en el suelo, en que influyen en la composición de arcilla, sal y arena, siendo las partículas más pequeñas aquellas que propician un ambiente más corrosivo.

-*Agua.* La presencia de agua es un parámetro relevante en la valoración de la corrosión, siendo directamente proporcional la relación entre humedad y pérdida de masa en elementos metálicos enterrados.

-*Aireación.* A mayor entrada de aire, mayor presencia de oxígeno, que propicia la corrosión.

-*Potencial eléctrico.* A mayor potencial, mayor presencia de oxígeno y mayor corrosión.

-*pH.* En general cualquier pH permite la presencia del fenómeno de corrosión, pero los valores de acidez influyen y aceleran el fenómeno corrosivo.

-*Resistividad.* Debido a la relación entre conductividad y corrosión, es inevitable que a menor resistencia mayor corrosión, por lo que una medida del ambiente corrosivo es una medida de la resistividad del suelo.

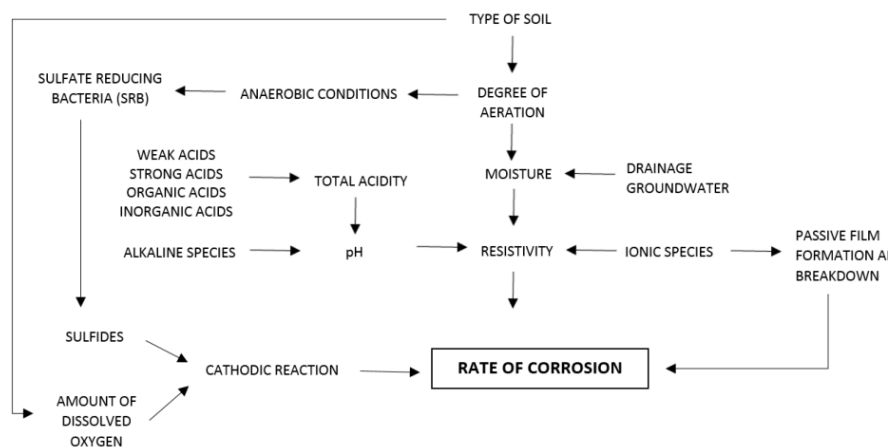
-*Contenidos de iones.* Los sulfatos y los cloruros ayudan a la corrosión, porque participan activamente en la reacción de la disolución del metal.

-Bacterias. Los microorganismos propician el fenómeno corrosivo, debido a la presencia de suelos arcillosos, ricos en humus, los cuales permiten el crecimiento de microorganismos.

En la Figura 19 (a) puede verse la relación entre las variables y la corrosión en elementos de acero enterrados.

Figura 19(a).

Relación entre las variables que afectan la corrosión en aceros enterrados.



Adaptado de Arriba-Rodríguez, Villanueva-Balsera, Ortega-Fernández, y Rodríguez-Pérez (2018).

En la Tabla 3 puede verse la relación entre variables y la corrosión

Tabla 3.

Relación entre variables y corrosión

Variable	Relación
Textura suelo	Directa
Agua	Directa
Aireación	Directa
pH	Directa
Potencial	Directa
Contenido de iones	Directa
Bacterias	Directa

Nota: Las variables asociadas al mecanismo de corrosión presentan una relación directa con la presencia de la corrosión para aceros enterrados. Adaptado de Arriba-Rodríguez, Villanueva-Balsera, Ortega-Fernández, y Rodríguez-Pérez (2018).

3.1.2 Valoración de la corrosión por acción ambiental

Estructuras grandes de acero, por ejemplo puentes, cuando están expuestos al ambiente, están sometidos a condiciones de corrosión muy agresivas, acompañados normalmente de agrietamiento por corrosión. Esta corrosión atmosférica puede causar pérdida de sección transversal en los miembros estructurales, lo que resulta en una pérdida de rigidez seguida de una redistribución de los esfuerzos por el cambio de sección. Existen múltiples estudios al respecto, tales como el de Chen, Xu, y Qu (2010). En este trabajo se estima la corrosión con una expresión exponencial para la corrosión atmosférica, y se consideran los efectos de corrosión bajo tensión y concentradores de esfuerzos.

En el estudio de Kumar, Londe, y Kittur (2018) se revelan los efectos de la corrosión en aceros y aleaciones de aluminio por pruebas de laboratorio para exponer a baños de sal y su respuesta para diferentes tiempos de exposición. También se estudiaron los comportamientos de la corrosión en la presencia de fracturas mecánicas.

Por su parte, Landolfo, Cascini, y Portio (2010) estudiaron los diferentes tipos de corrosión y sus formas de aparición, siendo clasificados de la forma siguiente:

- Corrosión general*. Es homogéneo sobre todo el material.
- Corrosión uniforme*. Una clase de corrosión general con la misma tasa de crecimiento.
- Corrosión cascabeo*. Es cuando la corrosión se presenta en forma de escamas.
- Corrosión en grietas*. Es debida la humedad en las grietas, o la corrosión presente entre dos materiales donde uno cubre al otro.
- Corrosión por erosión*. Es generada por la acción de un fluido
- Corrosión por cavitación*. Producida por acción de la cavitación en volutas de turbo máquinas.
- Corrosión galvánica*. Generada por contacto de un material noble en un electrolito galvánico.

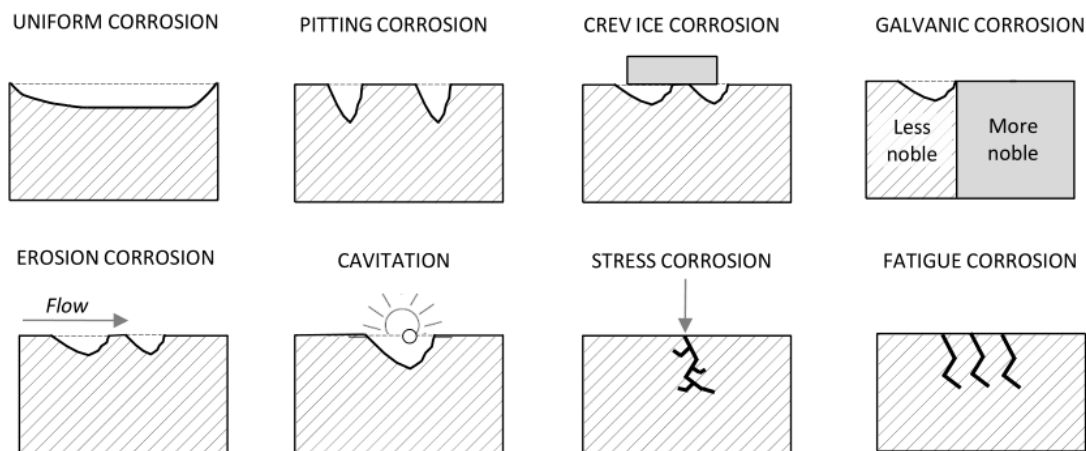
-*Corrosión por fatiga*. Es producida por esfuerzos cíclicos.

-*Corrosión por tensión*. Es debido a la aparición de fractura frágil en conjunción con un ambiente corrosivo y la tensión que origina la fractura.

En la Figura 16 (b) pueden observarse los diferentes tipos de corrosión.

Figura 19 (b).

Tipos de corrosión.



Adaptado Landolfo, Cascini, y Portio (2010).

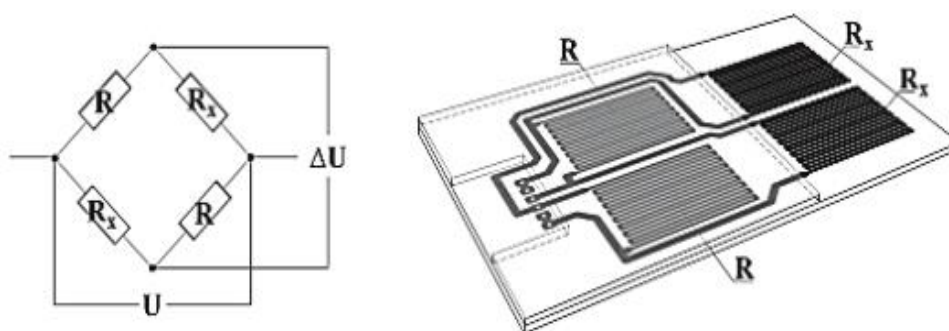
Unos de los aspectos ms importantes de las estructuras sometidas a la acción ambiental, es la de la protección contra la corrosión, es decir, la salud de los recubrimientos. Muchos puentes tienen cien años o más, y deben ser protegidos contra los efectos ambientales. Con frecuencia esa protección solo es brindada por una capa protectora de pintura que es la única barrera entre la corrosión y el metal, es por ello que debe evaluarse su efectividad.

Los estudios de Zajec, B. et al. (2018) evaluaron experimentalmente la eficiencia de revestimientos bajo ambientes controlados, midiendo la variación de resistencia como una medida de la acción de la corrosión.

El montaje experimental consta de unos resistores que son conectados a un puente de *Wheatstone*. Los cuatro resistores son distribuidos así, dos son de control no sometidos a la solución corrosiva, y los otros dos si sometidos a corrosión, ver Figura 20.

Figura 20.

Montaje experimental para evaluación de revestimiento.

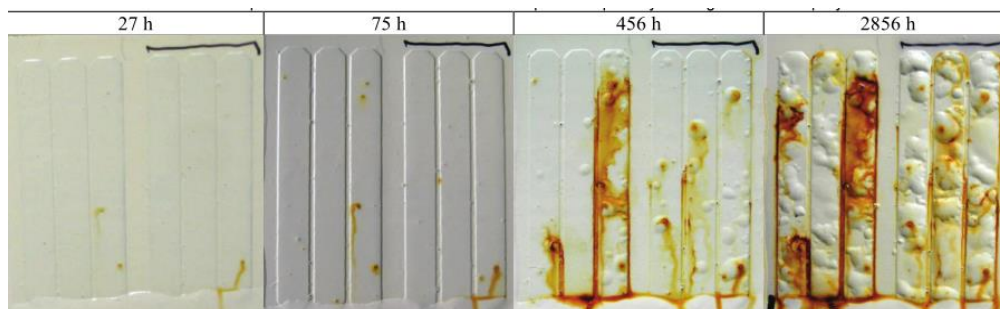


Adaptado de Zajec, B. et al. (2018).

En la Figura 21 puede observarse el aspecto del experimento una vez se someten a la acción de corrosión en función del tiempo. Las chapas poseen una capa protectora básica y fueron sumergidas en solución salina. Véanse las horas de exposición en la parte superior.

Figura 21.

Chapas con revestimiento sometida a corrosión versus tiempo

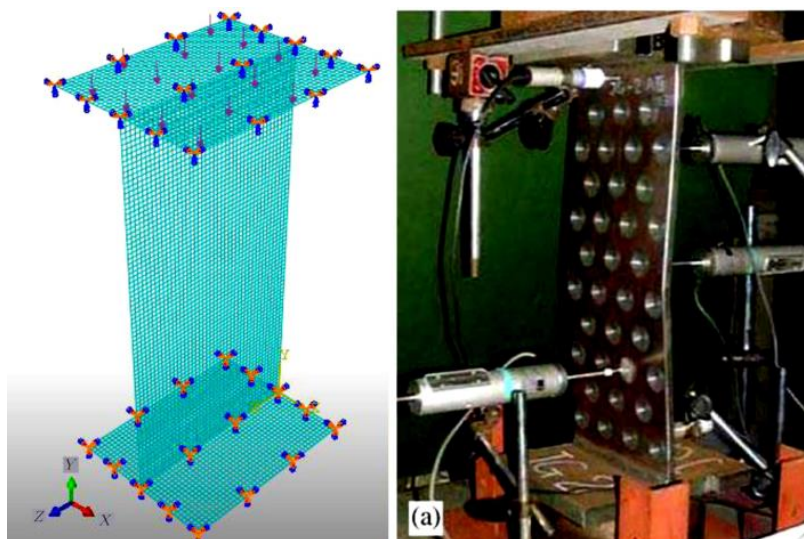


. Adaptado de Zajec, B. et al. (2018).

Los trabajos de Sharifi, Tohidi y Paik (2016) evaluaron la corrosión por cascaneo en aceros, con un montaje experimental que ilustra la pérdida de rigidez con perforaciones parciales y un modelado no lineal de la estructura en Abacus. En la Figura 22 puede verse el montaje experimental y el modelado numérico.

Figura 22.

Montaje experimental para modelar corrosión por cascaneo



. Adaptado de Sharifi, Tohidi y Paik (2016).

4. Análisis de métodos de predicción

En este capítulo se presentan los métodos de predicción utilizados para el estudio de la patología en estructuras metálicas en conexiones y miembros de acero estructural.

4.1 Instrumentación para el monitoreo de estructuras

Con cada avance en la informática y la instrumentación industrial se abren más posibilidades de instrumentar, medir, monitorear nuestro entorno. Estos avances son llevados a las estructuras

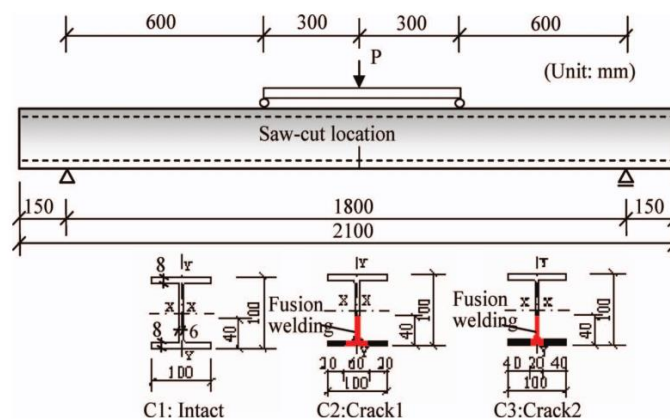
con mayor éxito cada día y debería ser considerado objeto de estudio, como una forma de evaluar las herramientas para el estudio de fallas.

Fibra óptica. Estos elementos que son útiles para múltiples aplicaciones tienen gran utilidad para medición de esfuerzos. Los trabajos de Li, Wua, y Zhou (2010) muestran como la fibra óptica puede emplearse con gran utilidad para monitorear estructuras, con prestaciones superiores a los del transformador diferencial de variación lineal, por sus siglas en inglés (LVDT) y los ERE.

La configuración permite detectar daños en varios puntos simultáneamente, con el montaje en celdas en una viga, colocando a intervalos sensores para la medición de deformaciones, ver Figuras 23 y 24 El trabajo presentado es una forma muy utilizada para estimar salud estructural, y tiene gran aplicación en ingeniería civil.

Figura 23.

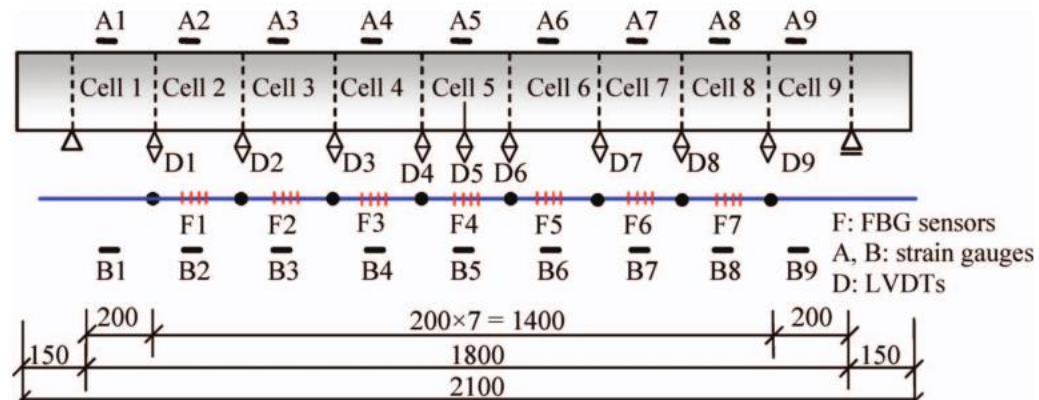
Montaje experimental para medir deformaciones con fibra óptica.



Adaptado de Li (2010).

Figura 24.

Montaje experimental para medir deformaciones con fibra óptica.



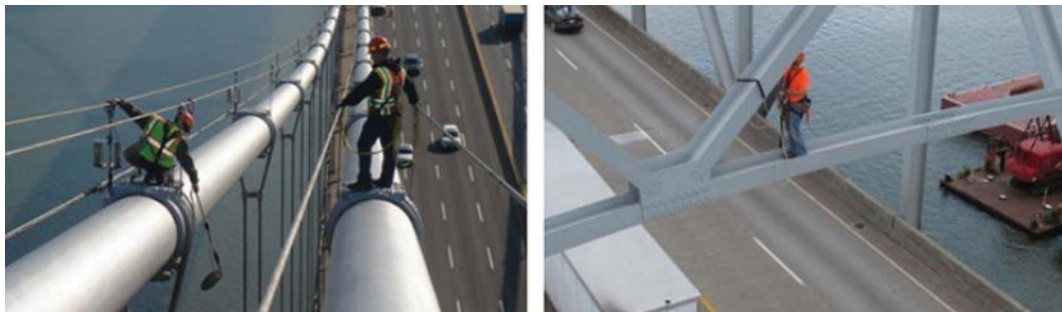
Adaptado de Li, (2010).

Los trabajos de Hoult, Ekim, y Regier (2014) describen el uso de la fibra óptica para detección de daños, pero de manera distribuida. Estos sensores permiten detectar tres mecanismos de falla críticos, fractura por fatiga, daños localizados y daños distribuidos como la corrosión.

También la robótica ha sido empleada en el monitoreo de estructuras. Los trabajos de La, Dinh, Pham, Ha, y Pham (2018) por ejemplo, emplearon un robot para la inspección de estructuras de acero, tales como puentes. La intención era limitar el riesgo de inspección, ver Figura 25(a), para así evitar el error de la subjetividad del inspector humano.

Figura 25(a).

Inspección de alto riesgo en puentes.

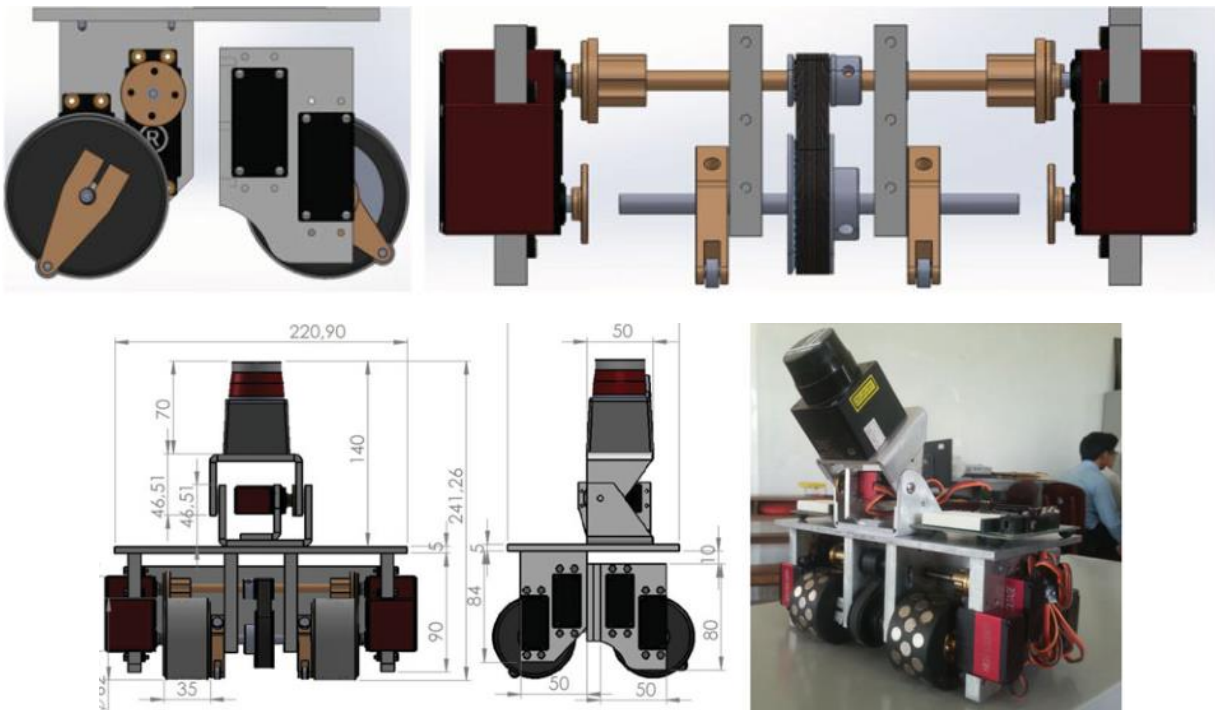


Adaptado de La, Dinh, Pham, Ha, y Pham (2018)

En la Figura 22(b), puede observarse el diseño del prototipo y en la Figura 23 la arquitectura de control. La ventaja de este dispositivo es su versatilidad en adherirse magnéticamente a las superficies metálicas, con lo que es capaz de llegar muy alto y muy lejos en la estructura.

Figura 25 (b).

Prototipo de robot.



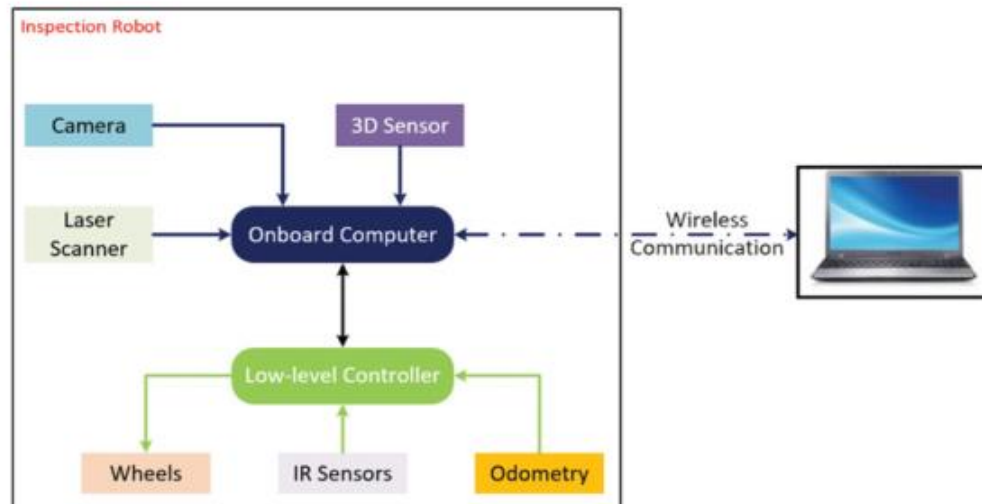
Adaptado de La, Dinh, Pham, Ha, y Pham (2018).

Figura 26.

Arquitectura de control

Automated robotic monitoring and inspection of steel structures and bridges

5



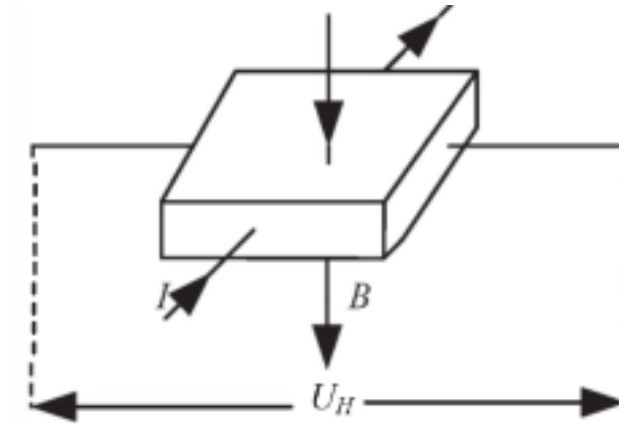
. Adaptado La, Dinh, Pham, Ha, y Pham (2018).

Otra forma de monitoreo son los instrumentos magnéticos. Los estudios de Dengfeng, Jintao y Haiyan (2015) se basan en el diseño de un instrumento magnético que permite medir variaciones de voltaje indicativas de variaciones de las propiedades de los elementos de una estructura.

El montaje experimental se basa en el efecto Hall, que se presenta cuando un material ferromagnético es sometido a una corriente eléctrica, y simultáneamente es cargado, el campo magnético generado cambia con la forma del elemento, pudiéndose relacionar ambas variables con una constante, llamada sensibilidad Hall del elemento KH. Ver Figura 24.

Figura 27.

Elementos del efecto Hall



. Adaptado de Dengfeng, Jintao y Haiyan (2015).

4.2 Terremoto y fuego

4.2.1 Fuego

La acción del fuego en las estructuras de acero debe ser evaluada y considerada en el diseño, ya que representa un enorme riesgo para la integridad de una edificación. Ni las edificaciones más valiosas desde el punto de vista cultural e histórico, están a salvo del riesgo de incendio. La *catedral de Notre Dame* es prueba de ello. Esta estructura, bastión de la iglesia católica, ícono de la ciudad de París, y símbolo cultural de Francia fue devorada por las llamas sin que se pudiera hacer mucho por evitarlo, el 15 de abril de 2019. Ver Figura 25. No es una estructura de acero, y tampoco fue construida bajo códigos constructivos modernos, pero si era una de las estructuras más observadas del mundo, con lo cual es válido concluir que no solo depende de la respuesta al evento que le den los equipos de combate de incendios, sino de cómo la estructura, en si misma está preparada para afrontar el siniestro.

Figura 28.

Incendio catedral Notre Dame, París- Francia



. Adaptado de [Fotografía sin autor]. (España, 2019). Archivo fotográfico del periódico el ABC.

Existen otros casos donde los códigos constructivos fueron respetados, pero en el diseño no se consideró el efecto de un incendio que no seguía las tradicionales formas de propagación. Los atentados terroristas al *World Trade Center*, el 11 de septiembre de 2001 en la ciudad de Nueva York, Estados Unidos, complejo de edificios en Bajo Manhattan, que incluía a las emblemáticas Torres Gemelas, son un ejemplo de ello, ver Figura 26. Nunca se imaginaron los diseñadores que un incendio con combustible de aviación fuera a propagar tal cantidad de calor que aceleró el colapso de esas maravillosas estructuras, llevándose con ellas una enorme cantidad de seres inocentes.

Figura 29.

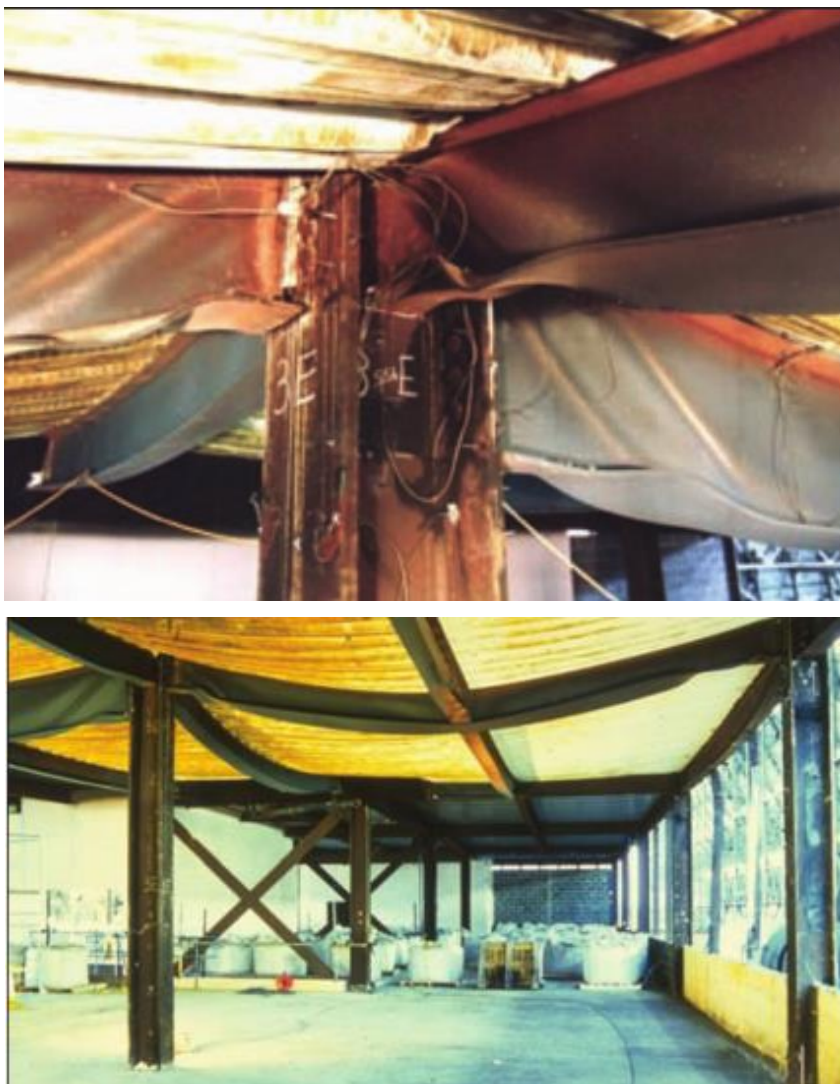
Ataque a las Torres Gemelas 11 septiembre 2001



. Adaptado de [Fotografía sin autor]. (Colombia, 2019). Archivo fotográfico del periódico El Heraldó.

Existen múltiples estudios que han dado respuesta al estudio de estructuras de acero bajo la acción del fuego, uno de ellos fue el de Burgess, Buick Davison, Dong y Huang (2012) quienes estudiaron el rol y la respuesta de las conexiones. Se presentó pandeo localizado en la cercanía de la junta, o deformación excesiva de los pórticos luego de la exposición al fuego, tal como puede verse en la Figura 27.

Figura 30.

Fallas por exposición al fuego

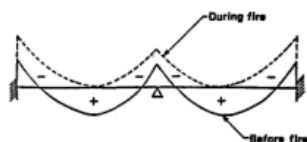
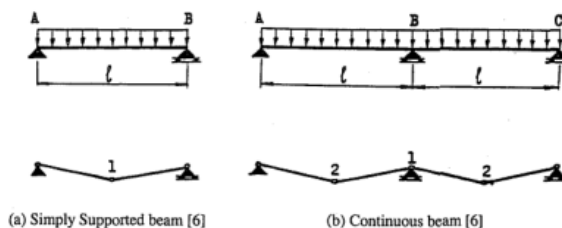
. Adaptado de Burgess, Buick Davison, Dong y Huang (2012).

En su estado del arte de las estructuras de acero sometidas a fuego, Nwosu, y Kodur (1997) reflejan como es el comportamiento de ciertas configuraciones de miembros durante y luego de estar sometidas al fuego. Ver Figuras 31 y 32.

En ellas puede notarse como la elástica de las vigas cambian de forma por la dilatación, debido a la expansión por cambio de temperatura, trayendo además la generación de esfuerzos térmicos.

Figura 31.

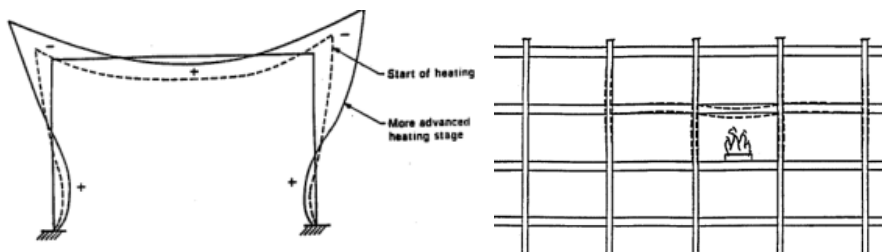
Morfología de viga simple y continua luego de exposición al fuego.



Adaptado de Nwosu y Kodur (1997).

Figura 32.

Morfología pórtico y armadura luego de exposición al fuego

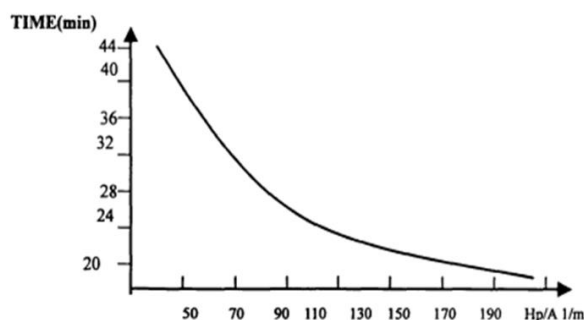


. Adaptado de Nwosu y Kodur (1997).

Wang y Wang (2017) estudiaron los efectos la acción del fuego en estructuras de acero en edificios construidos con de materiales ignífugos, concluyendo que deben incluirse una forma metódica de valorar la atenuación de la resistencia al fuego, una vez la estructura haya sido expuesta a un incendio. Se reporta un resultado de resistencia al fuego versus tiempo de exposición, notándose la tendencia exponencial, ver Figura 33.

Figura 33

. Factor de sección y resistencia al fuego.

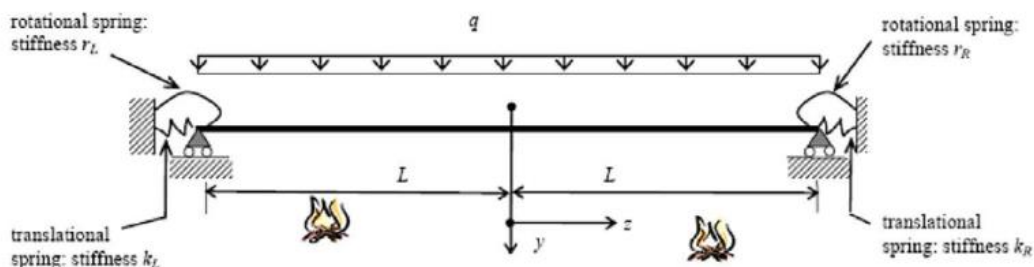


Adaptado de Wang y Wang (2017).

Rad y Yahyayi, (2016) estudiaron la acción de las conexiones bajo la acción de altas temperaturas por la acción de fuego. A continuación se explica el montaje experimental para establecer resistencia al fuego en uniones, el mismo consta de una viga donde se midió el cambio de sollicitación externa con la instalación de resortes torsionales. Estos resortes tienen valores conocidos, con lo cual pueden medirse los ángulos de la pendiente de la elástica en los apoyos, y estimar la variación por la acción del calor, ver Figura 34. En la investigación de Rad y Yahyayi, (2016), se estudió el efecto del fuego sobre vigas de acero considerando el ablandamiento de la conexión y la disminución de la resistencia de los materiales. Luego, la durabilidad de la estructura en fuego se analizaron diferentes condiciones que incluyen el tipo de conexión, el efecto de expansión longitudinal, la carga térmica y el tipo de incendio en el software ANSYS.

Figura 34.

Montaje experimental para establecer resistencia al fuego en uniones

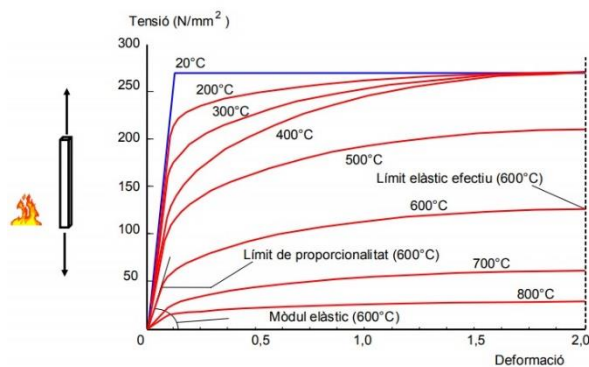


. Adaptado de Rad y Yahyayi (2016)

El efecto del fuego sobre las propiedades del acero se puede observar en la figura 35, en general se presenta una disminución de resistencia y rigidez del acero, al ser afectado por la temperatura.

Figura 35.

Gráfico que presenta la relación entre la tensión (N/mm^2) y la deformación (%) en función de la temperatura para el acero S275.

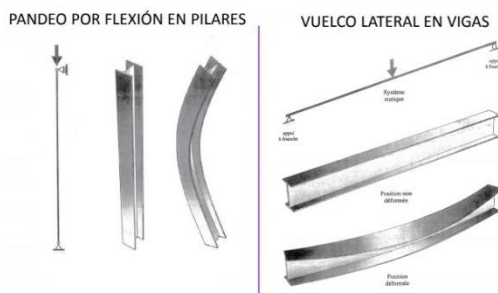


Adaptado de Jimenez (2017).

Como resultado del efecto del fuego en las estructuras de acero se presentan pandeo por flexión en pilares y vuelco lateral en vigas, como se puede observar en la figura 36.

Figura 36.

Disminución de la resistencia y rigidez del acero



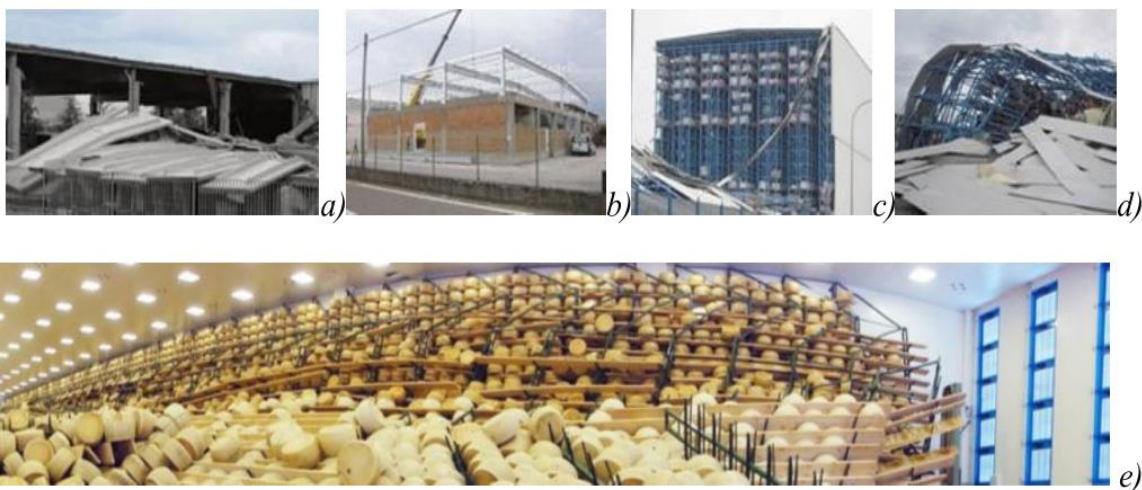
. Adaptado de Jimenez (2017).

4.2.2 Terremotos

Los movimientos de tierra son considerados en todos los códigos constructivos y son cada día más detallados y extensos, incorporando nuevas indicaciones y cálculos. Pero el análisis post sismo es un asunto muy importante que debe ser considerado bajo otra visión, y con otros criterios. Las investigaciones de Formisano, Di Lorenzo, Iannuzzi y Landolfo (2017) arrojaron resultados sobre las vulnerabilidades de edificios de uso industrial en Italia, ver Figura 37.

Figura 37.

Colapso de varias estructuras industriales en Italia por la acción de terremotos



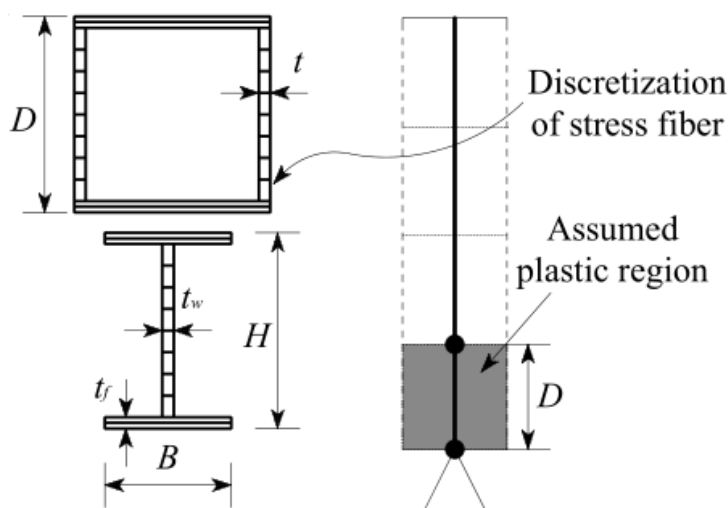
. Adaptado de Formisano, Di Lorenzo, Iannuzzi y Landolfo (2017)

Italia ha dedicado muchas investigaciones sobre fallas, dado que ha sido un país predispuesto a las catástrofes naturales por su geografía. En este estudio se obtienen curvas de fragilidad que consideran tipología de las construcciones, zonas sísmicas estado de las estructuras actuales. Para el caso, Bai, Kawano y Matsuo (2013) modelaron estructuras de alta vulnerabilidad a sismos, considerando el comportamiento del material, el pandeo y la pérdida de rigidez.

Este estudio se realizó por causas del *Terremoto de Kobe* en 1995, ocurrido en la parte sur de la prefectura de Hyōgo, Japón. El montaje experimental se diseñó con una discretización de las fibras sometidas a esfuerzos, y una zona con la asunción de comportamiento plástico, ver Figura 38. Se empleó un enfoque estadístico para los edificios de alto riesgo.

Figura 38

. Modelado experimental

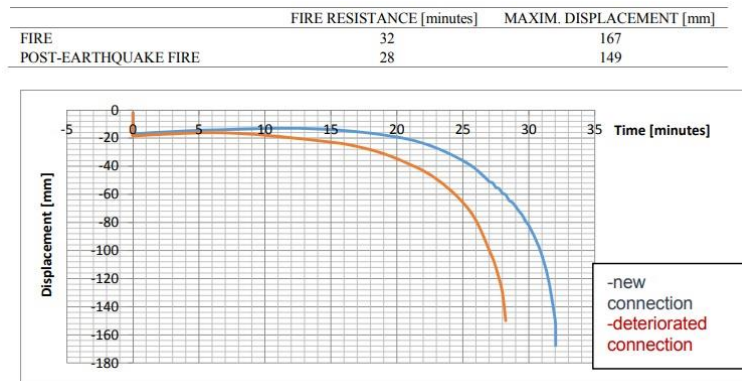


. Adaptado de Bai, Kawano y Matsuo (2013).

El concepto de coeficientes de deterioro implica el estudio de los daños en las conexiones luego de un sismo. Este es un modelo predictivo que puede ser útil en caso de evaluación rápida pero que aún requiere de evaluaciones y comprobaciones, según Tudor (2016). Las resistencias al fuego y la deflexión máxima de la viga en voladizo se muestran en la figura 39, se puede notar que en el caso del análisis de fuego en la subestructura estudiada, la resistencia al fuego es cuatro minutos mayor que en el caso del terremoto y fuego posterior. Un paralelo entre las curvas de desplazamiento en los dos casos subraya la menor capacidad de la conexión deteriorada bajo fuego.

Figura 39.

Diagrama de desplazamiento vertical de tiempo correspondiente al análisis de incendio / incendio posterior al terremoto.



Tomado de Tudor (2016).

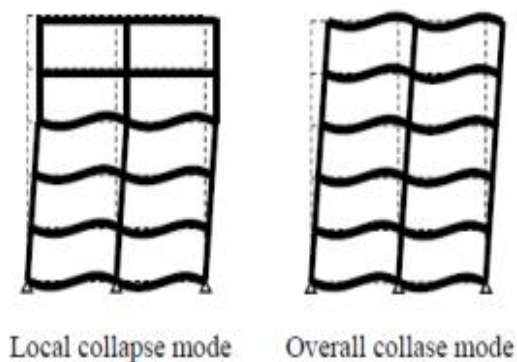
Ito y Mori (2016) presentan los métodos de reparación de estructuras de acero averiadas por sismos, evaluando con métodos numéricos y analíticos las configuraciones de reparaciones. Estos estudios realizados en Japón, fueron documentados y generaron una guía de indicaciones que fueron publicadas para su uso general. Primero documentaron los daños principales que sufren las estructuras durante un sismo, ver Figura 40.

Figura 40. a)

Terremoto de Japón de 1995. (b) Modos de falla de las estructuras



(a) Example of damaged steel frames (the Great Hanshin-Awaji Earthquake, Japan, 1995)



(b) Failure mode of steel frame

. Adaptado de Ito y Mori (2016).

4.3 Fatiga

La acción de la fatiga sobre las estructuras de acero induce la mayoría de las fallas, ya sea porque por sí misma genera el desenlace fatal, ya sea porque propicia otra falla como la corrosión o la fractura frágil. Por ejemplo, Śledziwski (2018) efectúa un análisis empleando métodos numéricos para la evaluación de juntas soldadas de acero sometidas a fatiga.

Este trabajo modela con bastante detalle partiendo del análisis tradicional de modelado de ciclos de vida:

$$N_f = \left(\frac{FAT}{\Delta\sigma_n} \right)^m \cdot N_c = \left(\frac{FAT}{2\sigma_{an}} \right)^m \cdot 2 \cdot 10^6,$$

N Ciclos de vida hasta la falla.

FAT Tipo de fatiga.

m Tendencia según el tipo de fatiga, normalmente es $m=3$.

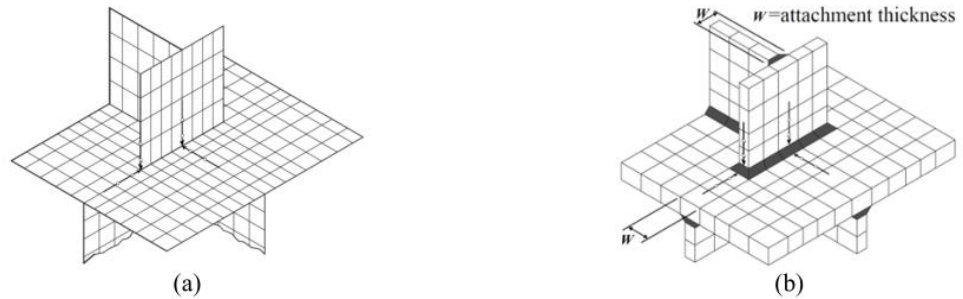
$\Delta\sigma_n$ Rango de esfuerzo nominal

σ_{an} Amplitud del esfuerzo nominal

En este trabajo se construyen dos modelos, uno con elementos de construcción tipo placa, y el otro es macizo, para evaluar la soldadura, ver Figura 41.

Figura 41.

Modelos tridimensionales FEM: (a) Modelo placa (b) Modelo macizo.

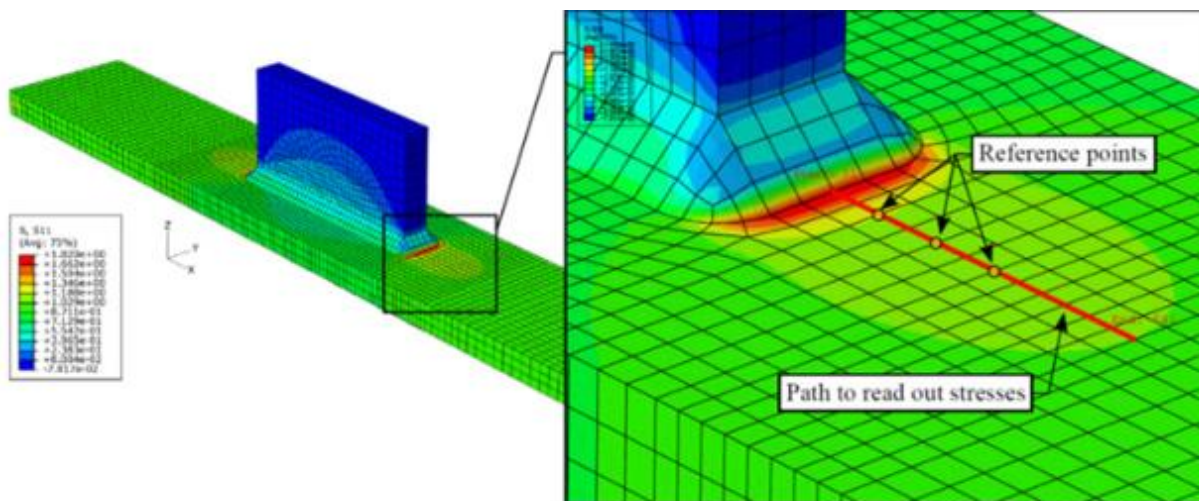


Adaptado de Śledziwski (2018).

En la Figura 42 se muestran algunos resultados:

Figura 42.

Resultados de los Modelos tridimensionales FEM.

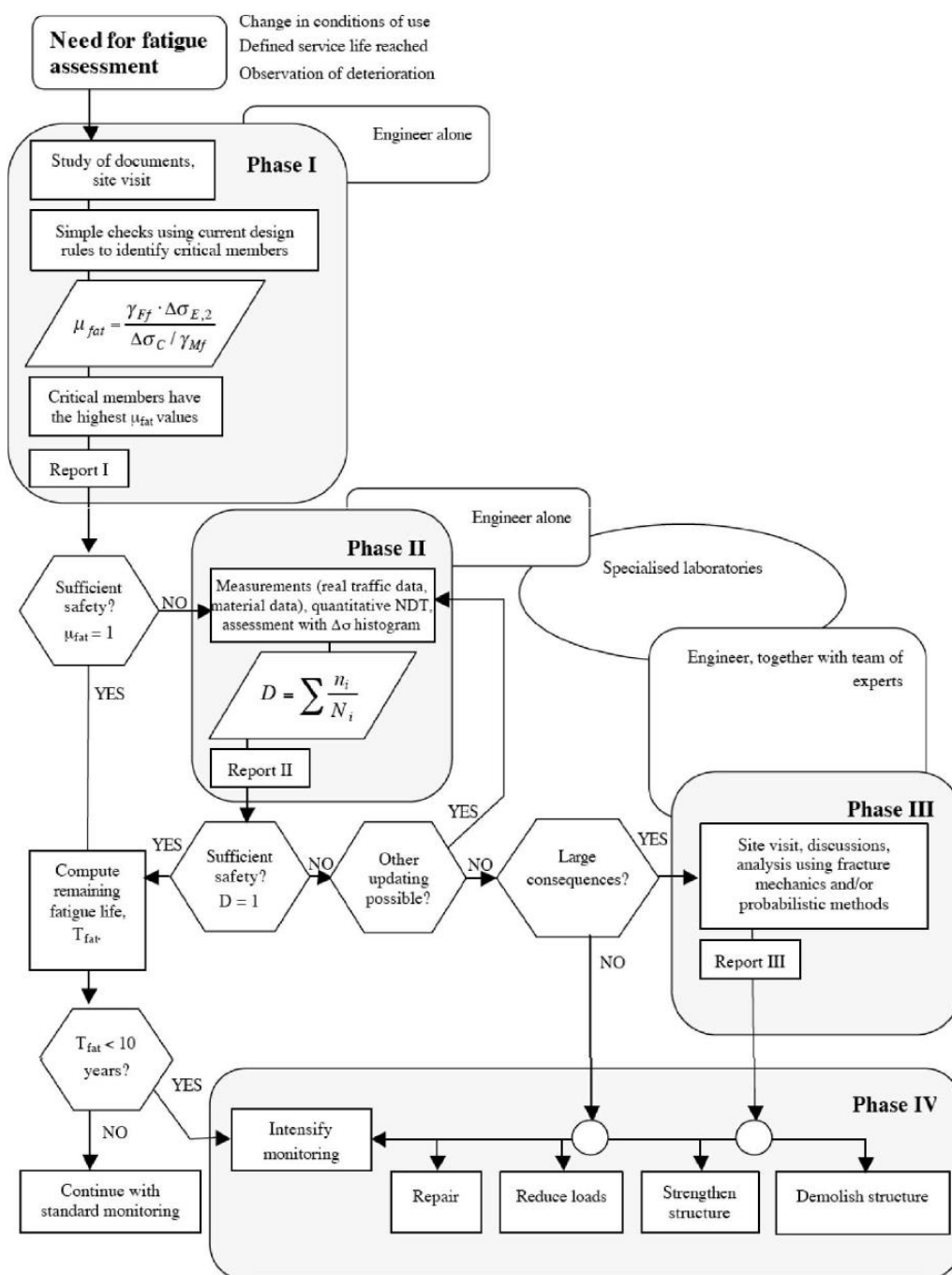


Adaptado de Sledziewski (2018).

Helmerich, Kühn y Nussbaumer (2007) plantean una guía para la estimación de la vida útil remanente en puentes de acero, que incluye cuatro fases: *participación de expertos, métodos no destructivos de evaluación, mediciones y análisis del material*. En la Figura 43 se muestra el diagrama de flujo propuesto.

Figura 43.

Diagrama para la valoración de la Fatiga.



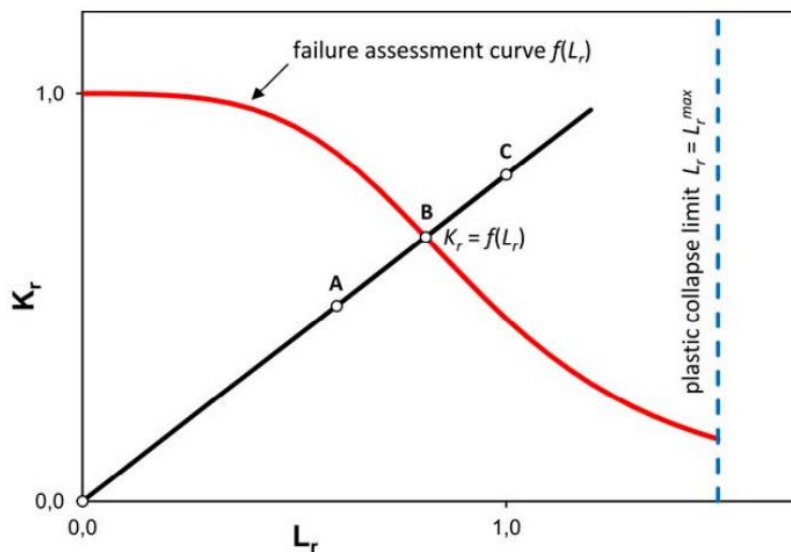
Adaptado de Helmerich, Kühn y Nussbaumer (2007).

4.4. Integridad estructural y métodos predictivos

Existen muchos métodos de valoración de la integridad estructural, entre los cuales está el método R6, el cual permite predecir elementos estructurales con defectos. Está basado en el diagrama de valoración de falla, el cual relaciona la seguridad de la sección estructural con un daño presente posible, o con un riesgo alto de daño alto. En la Figura 38 se observa un diagrama para la valoración de falla según, Kossakowski (2013). El análisis de seguridad del componente dañado en el método R6 generalmente se basa en el Diagrama de evaluación de fallas, denotado como FAD. Es un gráfico básico que nos permite determinar si la sección defectuosa funciona de manera segura, si el daño es posible o si el riesgo de daño es alto. El procedimiento R6 en el diagrama de evaluación de fallas combina dos criterios principales de fractura: criterio de carga límite y criterio de factor de intensidad de estrés. En consecuencia, en el procedimiento R6 se utilizan dos parámetros principales, L_r y K_r . Dependen de la carga, la geometría y las propiedades del material. El parámetro L_r está conectado al criterio de carga límite, donde: P se aplica a la carga primaria, $P_L(a, \sigma_y)$ es la carga límite correspondiente para el componente con un tamaño de grieta a y tensión de fluencia σ_y , σ_{ref} es la tensión de referencia primaria, σ_y es la tensión de fluencia igual al 0.2% de la tensión de prueba. El segundo parámetro K_r , que está vinculado al criterio del factor de intensidad del estrés, donde: K es el factor de intensidad de tensión, K_{mat} es la resistencia a la fractura del material.

Figura 44.

Diagrama para la valoración de la falla de acuerdo con el método R6



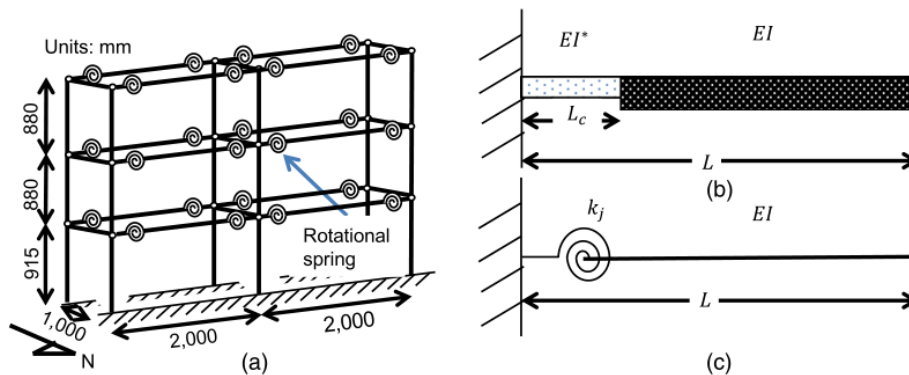
. Adaptado de Kossakowski (2013).

El monitoreo local es una técnica muy utilizada en laboratorio para probar modelos de predicción y está basado en la dinámica de estructuras, considerando la respuesta dinámica del conjunto bajo la excitación de una carga conocida, (Matarazzo, Kurata, Nishino y Suzuki (2018).

Ver Figura 45.

Figura 45. (a)

Ilustración del modelo de análisis (c) Modelo equivalente de viga averiada con resorte torsional.



Adaptado de (Matarazzo, Kurata, Nishino y Suzuki (2018).

Otra técnica relacionada a la anterior es la del análisis modal, la cual está asociada a las frecuencias naturales de vibración de una estructura, y a sus modos de vibración, los cuales están directamente relacionados con la rigidez estructural, a su vez es una función de la salud estructural, Kourehli (2017). Las características modales de una estructura sin daños están descritas por la ecuación:

$$\left[\mathbf{K} - \omega_i^2 \mathbf{M} \right] \Phi_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m$$

Donde K y M son las matrices de rigidez y masa respectivamente, ω es la frecuencia natural correspondiente al modo Φ , y m es el número de modos de vibración.

En este caso las variaciones de las soluciones de la ecuación representan un indicio de daño, y pueden ser evaluadas analíticamente.

En el trabajo de Laya y Méndez (2007) se efectuó un montaje experimental para el cálculo de las primeras cinco frecuencias naturales y los modos de vibración asociados de un puente de acero, que se encuentra operativo pero que requiere de un plan de mantenimiento mayor, Figura 40. Para ello se construyó un modelo a escala 20 a 1, que se instrumentó y se estimuló a frecuencias controlada para lograr la resonancia y los primeros cinco modos de vibración. También se calcularon respuestas transitorias, empleando el modelo matemático de amortiguación estructural. Todo fue validado con un modelo en elementos finitos. Ver Figuras 46, 47, 48 y 49.

Figura 46. (a)

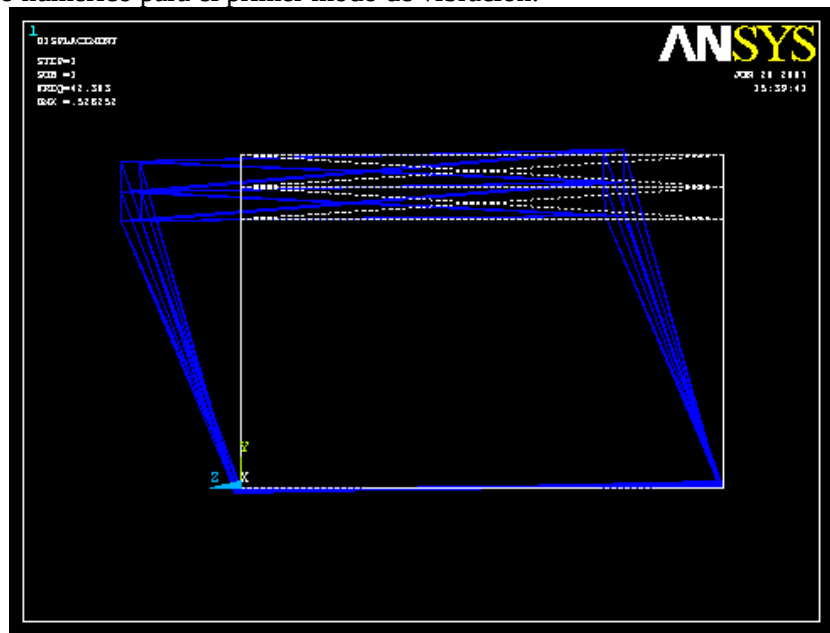
Puente real (b) Modelo a escala construido a escala 20 a 1.



Adaptado de Laya y Méndez (2007).

Figura 47.

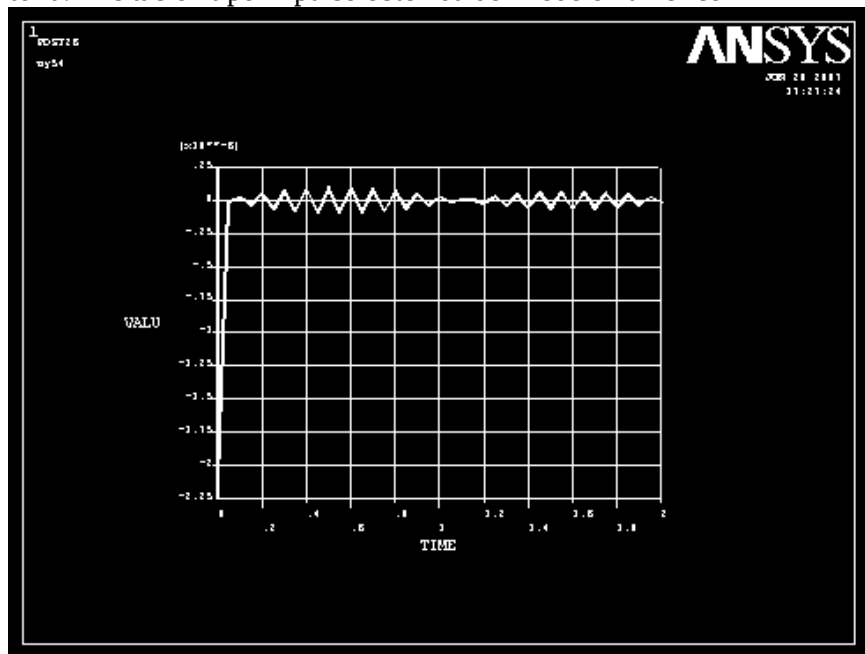
Respuesta modelo numérico para el primer modo de vibración.



Adaptado de Laya y Méndez (2007)

Figura 48.

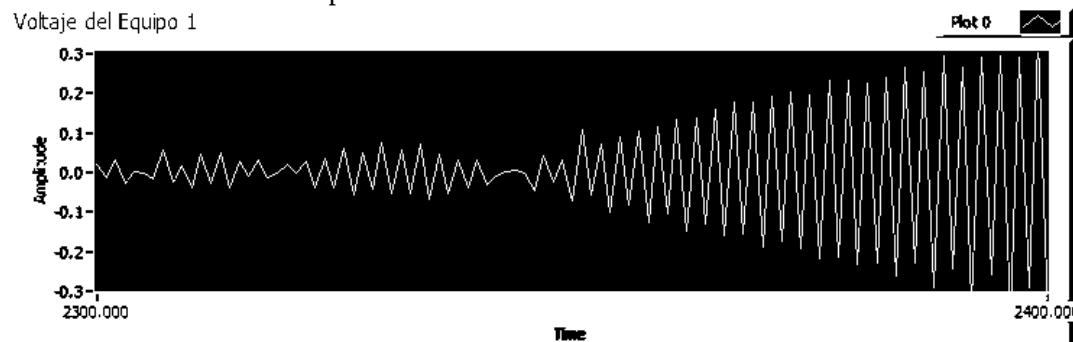
Respuesta transitoria. Excitación tipo impulso obtenida del modelo numérico



. Adaptado de Laya y Méndez (2007).

Figura 49.

Respuesta transitoria obtenida experimentalmente



. Adaptado de Laya y Méndez (2007).

Los análisis de sensibilidad según Kala (2016) implican la relación entre las variaciones de las respuestas dinámicas de una estructura, y sus variaciones de acuerdo con las imperfecciones presentes en los miembros estructurales, y la solución de valores propios de la ecuación diferencial

que rige el sistema dinámico, que en este caso son las frecuencias naturales de vibración de la estructura.

También son útiles los algoritmos basados en árbol de decisiones como el planteado por Hashemi, Ghodrati Amiri, y Hamedí (2015) en el cual se predicen daños, empleando la respuesta dinámica y clasificando las respuestas como severidad de daño.

Otros algoritmos empleados están basados en algoritmos genéticos multiobjetivos, los cuales se basan en las frecuencias naturales como los principales parámetros dinámicos para detectar los daños, según Farokhzad, Ghodrati Amiri, Mohebi y Ghafory-Ashtiany (2016). En la Figura 50, pueden verse los cálculos de estas frecuencias para una viga artificialmente dañada, y los cálculos obtenidos por diferentes métodos.

Figura 50.

Cálculo de frecuencias. Diferencia entre la viga "sana" y la averiada




Freq. numbers	Simply supported beam				Fixed-fixed beam			
	Undamaged	Damaged beam			Undamaged	Damaged beam		
		Exact Method	F.E.M	Error %		Exact Method	F.E.M	Error %
1	1341.4	996.9	971.54	2.54	410.87	394.9	382.4	3.16
2	4419.8	4293.3	4409.79	2.71	2441	2152.2	1955.0	9.16
3	8253.1	8177	8121.6 *	---	5763.5	6295.6	5344.5*	---
4	10532	14557	9475.90	13.7	6355.6	10438.8	6332.3	0.58

. Adaptado de Farokhzad, Ghodrati Amiri, Mohebi y Ghafory-Ashtiany (2016).

La confiabilidad y seguridad también es un campo que se aplica a las estructuras de acero, tal como lo indica Mraz y Lesay (2009). En este trabajo se emplea un estudio de confiabilidad para

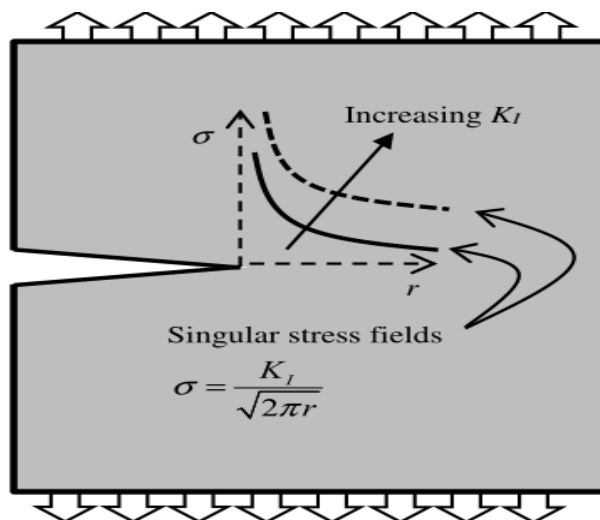
evaluar la resistencia a la corrosión de estructuras de acero con un recubrimiento galvánico, considerando las grietas en las uniones soldadas.

La valoración de estructuras antiguas es un problema muy importante a resolver, por el patrimonio que normalmente tienen ellas en esencia por el valor histórico y el arraigo de quienes los usan y los identifican como parte de su identidad cultural. Con frecuencia en este tipo de estructuras, la fractura frágil es la falla más preocupante, sobre la cual se deben emplear las técnicas y métodos predictivos disponibles. Un estudio interesante es presentado por Sieber y Stroetmann (2017) en el mismo se hacen comparaciones y análisis sobre el material y su influencia sobre la aparición de la fractura frágil.

La predicción de la fractura es considerada por Kanvinde (2017) en la ingeniería mecánica y la ingeniería civil para aplicarlas en estructuras civiles. La clásica teoría de propagación de grietas es una de las bases para la explicación y predicción del fenómeno. En la Figura 45 se observa el concepto básico de la fractura mecánica.

Figura 51

Singularidad de inicio de la grieta según la mecánica de la fractura

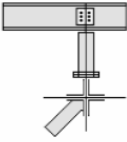
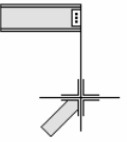
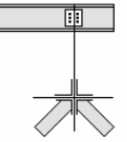
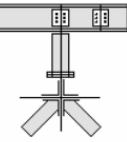
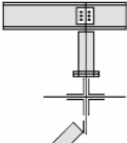
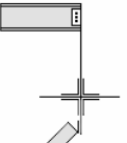
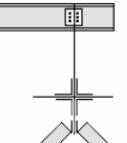
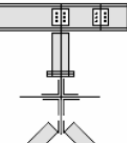


. Adaptado de Kanvinde (2016).

Las fallas de las estructuras también pueden verse desde la perspectiva de la ingeniería forense, Krishnamurthy (2007). Aquí se explican los conceptos básicos de la ingeniería forense, la cual debe verse como una conjunción entre los procedimientos y la ciencia, los primeros basados en los últimos. En uno de los casos estudiados la diferencia entre lo diseñado y lo planificado ocasionó una falla catastrófica, ver Figura 52, con la comparación entre lo planificado y lo realizado.

Figura 52.

Comparación entre diseño y construcción.

	Connection A	Connection B	Connection C	Connection D
(a) Original Design	 Allowable force: 160,000-lb Allowable moment: 0	 Allowable force: 185,000-lb	 Allowable force: 625,000-lb	 Allowable force: 565,000-lb
(b) As- built Design	 Allowable force: 15,440-lb Allowable moment: 9,490 lb-ft	 Allowable force: 59,000-lb	 Allowable force: 363,000-lb	 Allowable force: 565,000-lb

Adaptado de Krishnamurthy (2007).

El viento también puede ser una causa importante de falla de acuerdo con Maraveas y Fasoulakis (2018). En este estudio los investigadores analizaron, como el viento generó sobre una estructura daños importantes, ya que produjo fatiga y corrosión, fenómenos estos que debieron ser atendidos a fin de conservar la integridad de la estructura.

Otros casos importantes de estudio, aunque más antiguos fueron realizados por Burdekin (1981). De los casos reflejados existe uno emblemático, el *puede Milford Haven*, localizado en Gran Bretaña, al suroeste de Gales, el cual falló por pandeo lateral, ver Figura 53.

Figura 53.

Puente Milford Haven, en falla por pandeo lateral.



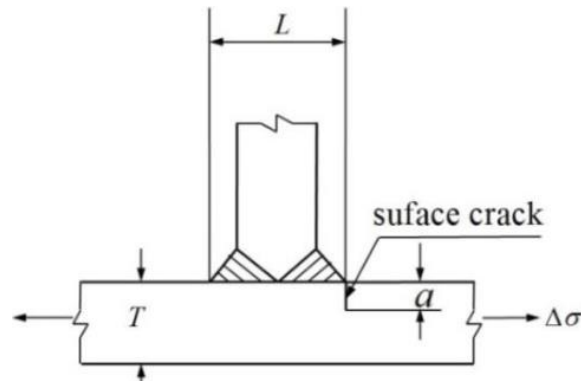
Adaptado de Burdekin (1981).

En el aspecto asociado a la gerencia de la inspección de la integridad estructural de estructuras de acero es muy importante el estudio de la fatiga realizado por Zou, Banisoleiman y González (2018). Los ciclos de vida de la estructura y la fatiga son variables a considerar y que deben ser controladas si se desea administrar la vida remanente de la instalación.

Un caso muy común es de la grieta en la unión soldada, la cual se agrava con la fatiga y los ciclos de carga, ver Figura 54. Aquí puede observarse como la forma del empalme o unión propicia la presentación de la grieta y la posible falla.

Figura 54

Unión propensa a falla



. Adaptado de por Zou, Banisoleiman y González (2018).

Es oportuno señalar que Odrobinák y Hlinka (2016) explican como una inspección y un mantenimiento deficiente ocasionaron una degradación de una pasarela peatonal. Ver Figura 55.

Figura 55.

Pasarela degradada por falta de mantenimiento e inspección



. Adaptado de Odrobinák y Hlinka (2016).

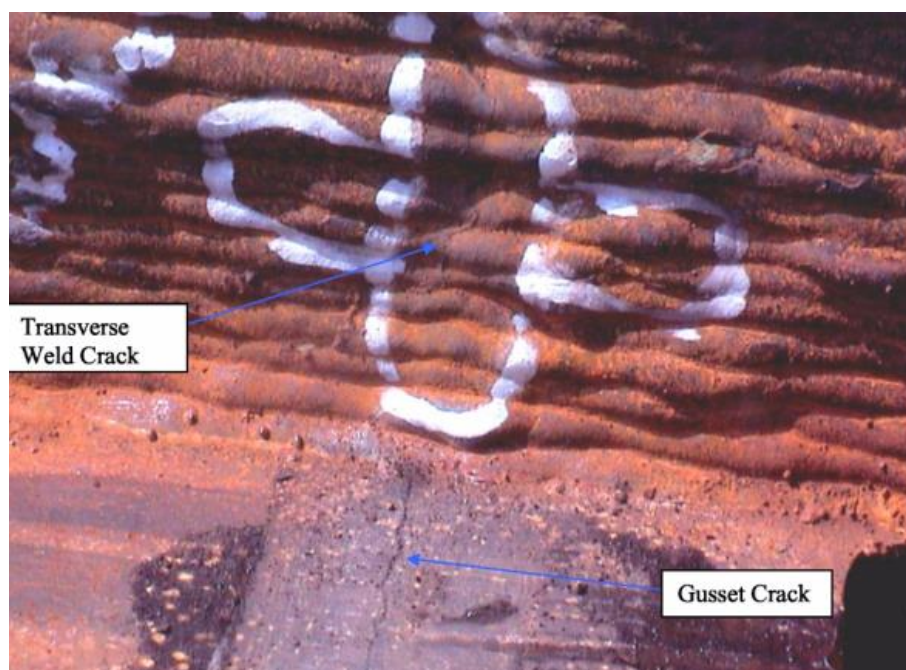
Por ello, es recomendable el monitoreo de estructuras, actividad que está muy desarrollada en China, tal como lo señala en su investigación Wang y Hu (2013). En el trabajo de Bernasovský (2013) se ilustra el análisis de falla de estructuras soldadas. Aquí se estudian varios casos de las fallas clásicas mencionadas en párrafos anteriores.

En la investigación de Dorin, Feier, Petzek y Bancila (2017) se refleja el problema de la restauración de estructuras antiguas de acero, además de los inconvenientes que se presentan por la diferencia de la técnicas de construcción y de fabricación antiguas, y los requerimientos actuales, así la imperiosa necesidad de adecuar estas estructuras para hacerlas seguras, confiables, o desincorporarlas si es el caso hacerlo.

Por su parte, Wattar y Highfill (2005) desarrollaron estudios sobre fallas en soldaduras, enfocándolo en la inspección de daño con archivos fotográficos. En la Figura 56 se observan grietas transversales en unión soldada.

Figura 56.

Grietas en unión soldada



. Adaptado de Wattar y Highfill (2005).

A diferencia de la curva de fuego estándar, hecho en un laboratorio, el fuego natural se caracteriza por tres fases: una fase de crecimiento, una fase de desarrollo completo y una fase de descomposición. Es necesario evaluar no solo el efecto sobre la resistencia estructural durante la

fase de calentamiento, sino también las altas tensiones de enfriamiento en la unión inducidas por la deformación distorsionante de los elementos calentados durante la fase de descomposición. Estudios realizados por Walda, F. et al. (2006) reportan resultados que muestran el conservadurismo del diseño del fuego incluido en el Eurocódigo. Los valores calculados muestran predicciones buenas y conservadoras de la temperatura en el compartimiento del fuego, la transferencia de calor a la estructura y las conexiones y la predicción del comportamiento estructural.

La incertidumbre como concepto también es aplicable al análisis de estructuras de acero. El diseño basado en desempeño y estimación de daños es estudiado por Azhdary y Shabakhty (2014) y la influencia del deterioro aleatorio en respuesta sísmica es estudiada por Naeim, Skliros y Reinhorn (2004). Otro caso muy interesante es el reportado por Mora, Rodríguez y Torres (2007). Este estudio no es de acero, ni de acero estructural, pero engloba unas causas de falla muy interesantes que es la fatiga, también señala que afecta al acero de manera significativa. Este estudio es sobre la falla por corrosión en una flota de aeronaves de la Fuerza Aérea Colombiana. Los aviones, unos AC-47T fueron modificados en su fuselaje y planos de sustentación, así como en su tren de motorización.

Luego de estas modificaciones, los aviones empezaron a tener problemas de corrosión, no presentados antes, ver Figura 57.

Figura 57.

Corrosión en partes de la aeronave



. Adaptado de Mora, Rodríguez y Torres (2007).

También se presentaron deformaciones excesivas en los planos de ataque de las alas, sin que se hayan reportado impactos con aves u otros daños en tierra, ver Figura 58.

Figura 58.

Deformación permanente en las alas de la aeronave



. Adaptado de Mora, Rodríguez y Torres (2007).

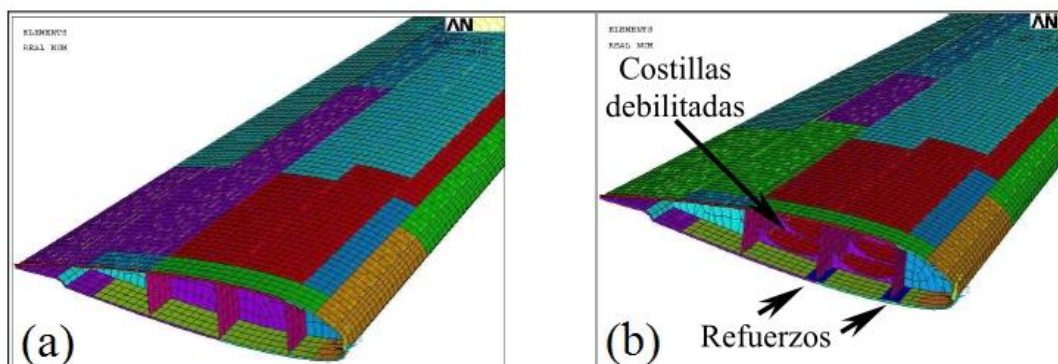
Luego de estas anomalías se logró determinar que el cambio de las condiciones del diseño, generó un patrón de vibración en las alas y fuselaje que generaron deformaciones tan grandes como

para lograr desprender el recubrimiento, y dejar al metal desnudo expuesto a los daños ambientales que degeneraron en un episodio corrosivo.

Estas conclusiones se fundamentaron en el análisis numérico, hecho en elementos finitos que se muestra en la figuras 53 y 54.

Figura 59

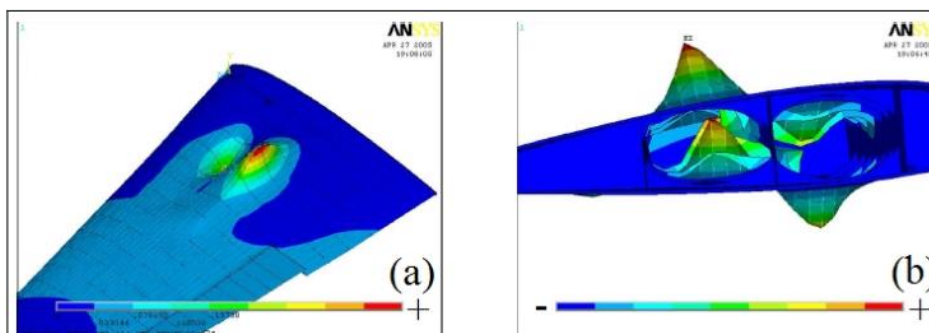
Detalle de la base del ala del modelo DC-3 y AC-47T.



Adaptado de Mora, Rodríguez y Torres (2007).

Figura 60.

Vistas del ala deformada del AC-47T durante la vibración donde hay deformación cíclica, causante de los daños que generan corrosión



. Adaptado de Mora, Rodríguez y Torres (2007).

5.Conclusiones

La patología estructural es muy importante debido a que involucra desastres y pérdida de vidas humanas, por lo que este trabajo se orientó a contribuir con un compendio de información en la búsqueda de soluciones que permita mitigar los daños en las edificaciones.

La comprensión de las propiedades de los materiales es muy importantes para entender el fenómeno de falla, ya que en ingeniería los esfuerzos y las deformaciones son conceptos base que permiten explicar los fenómenos asociados a la patología estructural del acero.

Como conclusión se debe resaltar que el diseñador, constructor y mantenedor deben estar en dominio de las teorías básicas, que las respeten, según las indicaciones que se reflejan en los códigos constructivos, normas y reglamentos. Ignorar cualquiera de estos aspectos conduce a catástrofes en las estructuras metálicas. En este punto no se debe escatimar ni en costos ni en márgenes de error. Curiosamente muchas estructuras antiguas siguen con una vida útil sin que hayan sido proyectadas con códigos modernos, pero fueron construidas con márgenes de error muy conservadores, y no se ahorraron en materiales, suministros y supervisión, ya que en muchas de esas obras el tiempo no era una variable predominante en la gerencia.

En cuanto a las evidencias de deterioro en las estructuras, hay que profundizar en su detección temprana y en su mitigación para evitar daños mayores. Existen muchas investigaciones que dan diferentes enfoques para analizar las patologías.

Los casos de estudios sobre la corrosión están asociados a otros factores como lo son el mantenimiento, la fatiga, fallas en las construcciones o modificaciones al diseño que propician

lugares para generar el proceso electroquímico inevitable, pero controlable con prácticas adecuadas.

Las técnicas de monitoreo estructural han tenido gran desarrollo, debido a que se han mejorado las técnicas de manejo de datos, la instrumentación y la informática, junto al manejo estadístico de la información obtenida pueden alimentarse modelos predictivos, por ejemplo, luego de ocurrir sismos y posteriores incendios (Tudor, 2016) que ayudan a alargar la vida útil de estructuras, o a prevenir colapso al ocurrir catástrofes, como el de que usa métodos numéricos para métodos de reparación de estructuras de acero averiadas por sismos (Ito y Mori, 2016).

Por último, es de resaltar, que no existe una única causa, las fallas son siempre una cadena de eventos, que con un diseño adecuado, una construcción según las recomendaciones de códigos y reglamentos, con un monitoreo constante, bien sea en línea o periódicamente, pueden prevenirse las fallas en miembros y conexiones de acero.

Referencias Bibliográficas

- Alpsten, G. (2017). Causes of Structural Failures with Steel Structures. *IABSE Symposium Report*. The Royal Institute of Technology KTH, Stockholm 1-9.
- Arriba-Rodríguez L., Villanueva-Balsera, J., Ortega-Fernández, F., y Rodríguez-Pérez, F. (2018). Methods to Evaluate Corrosion in Buried Steel, Review. *Metals*, 8, 334, 1-21, 2018. doi: 10.3390/met8050334 www.mdpi.com/journal/metals.
- ASTM A 370 (1992). Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. American Society for Testing and Materials.
- ASTM A370-14 (2014). Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org.
- ASTORGA, Ariana (2009). Centro de investigación en Gestión integral de Riesgos. Módulo III, Sección IV.CIGIR.
- Azhdary, F., y Shabakhty, N. (2014). Performance Based Design and Damages Estimation of Steel Frames with Consideration of Uncertainties. *Tehnički vjesnik* 21, 2, 351-358.
- Bai, Y., Kawano, A., y Matsuo, S. (2013). Effects of member strength deterioration on seismic responses of existing high-rise buildings made of steel structures and CFT structures subjected to severe ground motions. *Steel Construction Engineering*, Vol.20 No.78, june, 1-14.
- Bernasovský, P (2013). Case Studies of Welded Steel Structure Failures. *Acta Metallurgica Slovaca – Conference*. Vol. 3, 159-170. doi: 10.12776/amsc.v3.120.

- Boletín de Tecnología (2019). *Ensayo de tracción*. Recursos, Conocimientos y Temas de Tecnología. Recuperado de <https://www.areatecnologia.com/materiales/ensayo-de-traccion.html>.
- Brockenbrough, R., y Merritt, F. (1997). *Manual de diseño de estructuras de acero*. Segunda edición. McGraw-Hill: Bogotá.
- Burdekin, F.M. (1981). The Investigation of Structural Failures in Steel Buildings, Cranes and Bridges. ELSEVIER, *Journal of Occupational Accidents* 3, 163-175.
- Burgess, I., Buick Davison, J., Dong, G., y Huang, S.S. (2012). The Role of Connections in the Response of Steel Frames. *Structural Engineering International* 4, Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield, Sheffield, South Yorkshire UK, 449-461. doi: 10.2749/101686612X13363929517811.
- Campione, G., Giambanco, G. (2019). Influence of design mistakes and material degradation on the collapse of a long-span RC roof in South Italy. *Engineering Failure Analysis*. S1350.
- Carreño, J. y Serrano, R. (2005). Metodología de evaluación en patología estructural. Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil. Bucaramanga, Colombia, p. 377.
- Chen, B., Xu, Y-L., y Qu, W. (2010). Corrosion damage assessment and monitoring of large steel space structures. *Front. Archit. Civ. Eng. China*, 4 (3), 354–369. doi: 10.1007/s11709-010-0088-0.
- Cherukuri, S., Siva, I. (2020). Experimental and finite element analysis of cold formed steel beam-column joint. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.046>.
- De Freitas, V. (2013). *A State-of-the-Art Report on Building Pathology*. Porto University-Faculty of Engineering. CIB-W086-Building Pathology. 393, 21.

- Dengfeng, C., Jintao, Z., y Haiyan, X. (2015). Design of an instrument of magnetic measurement for steel structures. *IEEE 12th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, 1-4.
- Det Norske Veritas (2008). Fatigue design of Offshore Steel Structures. Recommended Practice DNV-RP-C203, Noruega, p. 130.
- Dorin, R., Feier, A., Petzek, E., y Bancila, R., (2017). Refurbishment of Existing Steel Structures – an Actual Problem. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 61 (3), 621–631. doi: <https://doi.org/10.3311/PPci.9140>.
- Douglas, James y Ramson, Bill (2007). Understanding Building Failures. Third edition. Taylor&Francis e-library, New York, p. 347.
- Farokhzad, R., Ghodrati Amiri, G., Mohebi, B., y Ghafory-Ashtiany, M. (2016). Multi- Damage Detection for Steel Beam Structure. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering* 4-2 25-44.
- Federal Highway Administration (2018). Fatigue Testing Setup and Procedure-Fatigue Performance of Welded Steel I-Beams. FHWA-HRT-17-110. Investigación y tecnología de la Administración Federal de Carreteras. Coordinación, desarrollo y innovaciones en el transporte por carretera. EEUU. Recuperado 28/05/ 2020 <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/bridge/17110/003.cfm>
- Formisano, A., Di Lorenzo, G., Iannuzzi, I., y Landolfo, R. (2017). Seismic Vulnerability and Fragility of Existing Italian Industrial Steel Buildings. *The Open Civil Engineering Journal*, Vol. 11, (Suppl-5, M7), 1122-1137. doi: 10.2174/1874149501711011122.

- Garrido, I, Lagüela, S., Otero, R., Arias, P. (2020). Thermographic methodologies used in infrastructure inspection: A review-Post –processing procedures. *Applied Energy* 266, 114857.
- Gil Espert, Lluís (1996). Análisis de sensibilidad con comportamiento no lineal del material y su aplicación en el diseño asistido de estructuras. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de caminos, Canales y puertos. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Goyache, Javier (2019). Análisis estructural del colapso del viaducto sobre el arroyo del Polcevera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. UPM. Madrid, p.159.
- Hashemi, S.A.H., Ghodrati Amiri, Gh., y Hamed, F. (2015). Steel Buildings Damage Classification by Steel Buildings Damage Classification by Damage Spectrum and Decision. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering* 3-1, 24-42.
- Helene, Paulo y Pereira, Fernanda (2003). Manual de rehabilitación de Estructuras de Hormigón. Reparación, refuerzo y Protección. Proyecto de difusión tecnológica. CYTED. Rehabilitar.
- Helmerich, R., Kühn, B., y Nussbaumer, A. (2007). Assessment of existing steel structures. A guideline for estimation of the remaining fatigue life. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance*, 245-255. doi: 10.1080/15732470500365562.
- Hoult, N.A., Ekim, O., y Regier, R.E. (2014). Damage/Deterioration Detection for Steel Structures Using Distributed Fiber Optic Strain Sensors. *ASCE*, 1-9. doi: 0.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000812.

- Ingeominas (2010). Mapa Nacional de Amenaza Sísmica de Colombia. Periodo de retorno 475 años. Instituto Colombiano de Geología y Minería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Ito, T., y Mori, K. (2016). Repair Method of Damaged Steel Framed Structures and Ultimate Seismic State of Repaired Steel Frames. *Journal of Civil & Environmental*, 2nd World Congress on Construction and Steel Structure, 1-8. doi: 10.4172/2165-784X.S3-002.
- Jimenez, Albert (2017). Cálculo de resistencia al fuego en estructuras. Construsoft S. L. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona Tech. Instituto Chileno del Acero (ICHA).
- Kala, K. (2016). Global Sensitivity Analysis in Stability Problems of Steel Frame Structures. *Journal of Civil Engineering and Management*. Vol. 22 (3), 417–424. doi: 10.3846/13923730.2015.1073618.
- Kanvinde, A. (2017). Predicting Fracture in Civil Engineering Steel Structures: State of the Art. ASCE, *Journal of Structural Engineering*, 143(3): 03116001, 1-15. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001704.
- Khalil, A. (2018). The Morandi Bridge in Genova – Analysis with the Applied Element Method. Applied Science International. Vol 06, 3-11.
- Kossakowski, P.G. (2013). Assessment of Material Behaviour and Structural Integrity of Engineering Structures Based on R6 Procedure. *Advances in Materials Science*. Vol. 13, No. 4 (38), december, 25-32. doi: 10.2478/adms-2013-0017.
- Kourehli, S.S. (2017). Damage Diagnosis of Structures Using Modal Data and Static Response. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, (1), 135-145. doi: 10.3311/PPci.7646.

- Krishnamurthy, N. (2007). Forensic Engineering in Structural Design and Construction. *Forensic Engineering in Structural Design and Construction*. Preprints of Structural Engineers World Congress, Bangalore: India, pp. 1- 16.
- Kumar, S., Londe, N.V., y Kittur, I. (2018). A Review on Deterioration of Mechanical Behaviour of High. IConMMEE, Series: *Materials Science and Engineering* 376, 1-11. doi:10.1088/1757-899X/376/1/012106.
- La, H.M., Dinh, T.H., Pham, N.P., Ha, Q.P y Pham. A.Q. (2018). Automated robotic monitoring and inspection of steel structures and bridges. *Robotica*, Cambridge University, 1-21. doi: 10.1017/S0263574717000601.
- Landolfo, R., Cascini, L., y Portio, F. (2010). Modeling of Metal Structure Corrosion Damage: A State of the Art Report. *Sustainability*, 2, 2163-2175. doi: 10.3390/su2072163.
- Laya, A y Méndez, J.L. (2007). Determinación experimental de los parámetros dinámicos del modelo a escala del puente Vega de Asa. *8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Cusco: Perú, 23 a 25 de octubre, 1-8.
- Li, S., Wua, Z., y Zhou, L. (2010). Health monitoring of flexural steel structures based on distributed fibre optic sensors. *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 6, No. 3, 303–315, june. doi:10.1080/15732470701492066.
- Maraveas, C., Tsavdaridis, K.D. (2019). Assessment and retrofitting of an existing Steel structure subjected to wind-induced failure analysis. *Jouernal of Building Engineerring* 23, 53-67.
- Maraveas, C., y Z. Fasoulakis, Z. (2018). Wind-Induced Failure Analysis and Retrofit of an Existing Steel Structure. *Open Journal of Civil Engineering*, 8, 271-291.
- Matarazzo, T.J., Kurata, M., Nishino, H., y Suzuki, A. (2018). Postearthquake Strength Assessment of Steel Moment-Resisting Frame with Multiple Beam-Column Fractures

- Using Local Monitoring Data. ASCE, *Journal of Structural Engineering*, 144(2): 04017217, 1-14. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001967.
- Mora, E., Rodríguez, E., y Torres, R. (2007). Análisis de las causas de la falta de disponibilidad de una flota de aviones AC-47T. 8° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cusco: Perú, 23 a 25 de octubre, 1-8.
- Mraz, L., y Lesay, J. (2009). Problems with reliability and safety of hot dip galvanized steel structures. *Soldagem Insp.* São Paulo, Vol. 14, No. 2, abr/jun, 184-190.
- Naeim, F., Skliros, K., y Reinhorn, A. M. (2004). Influence of Hysteretic Deteriorations on Seismic Response of Multistory Steel Frame Buildings. ASCE, *Advanced Technology in Structural Engineering*, 1- 8.
- Nwosu, D.I., y Kodur, V.K.R. (1997). Steel Structures Exposed To Fire - A State-Of-The-Art Report. *Internal Report (National Research Council Canada)*. Institute for Research in Construction, (12-01), 1-37.
- Odrobinák, J., y Hlinka, R. (2016). Degradation of steel footbridges with neglected inspection and maintenance. ELSEVIER, *Procedia Engineering* 156, 304-311. doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.301.
- Popov, E. (2000). *Mecánica de Sólidos*. Segunda edición. Pearson-Educación: México.
- Pytel, A. y Singer, F.L. (1994). *Resistencia de materiales. Introducción a la mecánica de sólidos*. Cuarta edición, HARLA: México.
- Rad, H., y Yahyayi, M. (2016). Investigating durability time interval of three-dimensional steel frame with angle connections under elevated temperature. *Advances in Science and Technology Research Journal*. Vol. 10, No. 29, march, 28-40. doi: 10.12913/22998624/61927.

Rasmussen, K.J.R., y Zhanga, H. (2017). Future challenges and developments in the design of steel structures an Australian perspective. *CE/PAPERS, EUROSTEEL*, Copenhagen: Denmark, september 13–15, 1-14. doi:org/10.1002/cepa.75.

Riesgo Sísmico - Idiger. (2020). Recuperado el 22 de Mayo 2020, desde <https://www.idiger.gov.co/rsismico>

Rio Bueno, Alfonso (2008). Patología, reparación y refuerzo de estructuras de hormigón armado de edificación. Departamento de estructuras. Universidad Politécnica de Madrid. UPM, p. 80.

Sánchez, D. y González, R. (2011). Cálculo de elementos estructurales. Universidad politécnica de Cataluña. BarcelonaTech. Primera edición. Iniciativa Digital Politécnica. Barcelona. España. p. 212.

Sastre, Ramón (2012). Cálculo no lineal. ETS Arquitectura del Vallès. Universitat Politècnica Catalunya, St. Cugat, Barcelona – España. <http://blogwintess.blogspot.com/2012/05/calculo-no-lineal.html>

Sharifi, Y., Tohidi, S., y Paik, J.K. (2016). Ultimate compressive strength of deteriorated steel web plate with pitting and uniform corrosion wastage. *Scientia Iranica A*, 23(2), 486-499.

Sieber, L., y Stroetmann, (2017). Assessment of old mild steel structures related to brittle fracture. *EUROSTEEL*. ce/papers, 1, N° 2-3, september 13-15, 2451-2460. doi: <https://doi.org/10.1002/cepa.293>.

Siviero, E., y Pavan, R. (2018). Assessment of existing steel bridges: codes and standard, 9th International Symposium on Steel Bridges. Series: Materials Science and Engineering 419, 1-10 doi:10.1088/1757-899X/419/1/012006.

- Śledziewski, K. (2018). Fatigue assessment for selected connections of structural steel bridge components using the finite elements method. *AIP Conference Proceedings* 1922, 150001, 1-11. doi:10.1063/1.5019154.
- Tudor, P. (2016). Steel Connections Deterioration Coefficient Introduction for Post-Earthquake Fire Analysis. ELSEVIER, *Procedia Engineering*, 161, 137-142.
- Valencia Clement, Gabriel (2010). Diseño básico de estructuras de acero de acuerdo con NSR-10. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Walda, F., Simoes da Silva, L., Moore, D.B., Lenond, T., Chladna, M., Santiago, A., Benes, M., y Borges, L. (2006). Experimental behaviour of a steel structure under natural fire. ELSEVIER. *Fire Safety Journal* 41, 509–522.
- Wang, H y Wang, R. (2017). Experimental Study on Fire Resistance of Building Steel Structure Fireproofing Material. *Chemical Engineering Transactions*. Vol. 59, 235-240. doi: 10.3303/CET1759040.
- Wang, X., y Hu, W.B. (2013). Structural health monitoring for steel structures. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 351-352, 1088-1091. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.351-352.1088.
- Wattar, S., y Highfill, S. (2005). Failure of Welded Steel Connections and Members: A Forensic Engineering Case Study. ASCE, Structures Congress, pp. 1-12.
- Weck, R. (1965). Failure of Steel Structures: Causes and Remedies. Proceedings of The Royal Society. *Mathematical, Physical & Engineering Sciences*, 3-9. doi: 10.1098/rspa.1965.0084.

Zajec, B., Bajt, M., Kosec, T., Kuhar, V., Legat, A., Lenart, S., Fifer, K., y Gavin, K. (2018).

Corrosion Monitoring of Steel Structure Coating Degradation. *Technical Gazette* 25, 5, 1348-1355. doi:org/10.17559/TV-20170206004112.

Zou, G., Banisoleiman, K., y González, A. (2018). Value of inspection in steel structural integrity management. Series: *Earth and Environmental Science* 146, 012080, 1-6. doi: 10.1088/1755-1315/146/1/012080.

[Fotografía de Bbruno-CC]. (España, 2018). *Viaducto Polcevera (puente Morandi) Italia*. Archivo fotográfico del periódico El Confidencial. Recuperado de www.elconfidencial.com/mundo.

[Fotografía sin autor]. (Colombia, 2019). *Ataque a las Torres Gemelas 11 septiembre 2001*. Archivo fotográfico del periódico El Heraldó. Recuperado de <https://www.elheraldo.co/ataque-torres-gemelas>.

[Fotografía sin autor]. (España, 2019). *Incendio catedral Notre Dame, París- Francia*. Archivo fotográfico del periódico ABC. Recuperado de <https://www.abc.es/internacional/abci-espectacular-incendio-catedral-notre-dame>.