

# ¿POR QUÉ SIGUEN PRODUCIÉNDOSE FALLOS POR FATIGA? DESCRIPCIÓN DE DOS CASOS PARADIGMÁTICOS

L. Soria<sup>1</sup>, J. Domínguez<sup>1</sup>, J.M. Gallardo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Avda. Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla, España.  
E-mail: lsoriac@us.es

## RESUMEN

Los criterios de diseño que permiten evitar fallos por fatiga están, en general, bien establecidos, tanto desde un punto de vista científico como desde una perspectiva de la ingeniería más aplicada. Puede decirse que los usuarios finales son más conscientes de la existencia de este proceso y reconocen las características principales del mismo. No obstante, a los expertos siguen llegando casos de fractura producidas por fatiga. En este trabajo se presentan dos casos paradigmáticos de roturas que representan situaciones extremas de la casuística que puede encontrarse. De un lado, un caso donde la falta de cuidado en el diseño y la ejecución hubieran permitido prever a priori la rotura del componente. De otro lado, se presenta el caso de una pieza diseñada usando de los métodos al uso que, sin embargo, experimentó rotura. Se postula que las tareas de difusión y concienciación siguen siendo imprescindibles para reducir los fallos por fatiga que se producen en nuestros días.

## ABSTRACT

Design criteria that avoid fatigue failures are generally well established, both from a scientific standpoint and from an engineering perspective. It can be said that end users are progressively aware of the existence of this process and recognize its main features. However, experts are still fixing fatigue case histories. In this paper, two fairly different paradigmatic cases are presented. On the one hand, lack of care in the design and execution has caused a foreseeable breakage of the component. On the other hand, the case of a part designed up-the-arts experienced breakage. We hypothesize that outreach and awareness are still essential to reduce fatigue failures occurring nowadays.

**PALABRAS CLAVE:** Fatiga, Soldadura, Fretting.

## 1. INTRODUCCIÓN

El interés continuado de la comunidad científica por el estudio y la prevención de fallos queda reflejado en el creciente número de publicaciones sobre análisis de fallos, tanto en forma de monografías, como en publicaciones de otro tipo (figura 1). Industrias como la aeroespacial (1), la ingeniería nuclear (2) y especialmente la ingeniería civil son el objeto de un gran interés en relación a la prevención de fallos. Singularmente activo<sup>1</sup> en este campo es el sector de las TICs (3). Atendiendo al análisis de fallos en el ámbito de la Ingeniería Mecánica, los estudios se han centrado tradicionalmente en los metales (4) y han derivado progresivamente hacia las cerámicas, plásticos (5, 6) o compuestos (7-9).

<sup>1</sup> En el campo de la microelectrónica el interés por los análisis de fallos promueve la existencia de la Electronic Device Failure Analysis Society, EDFAS.

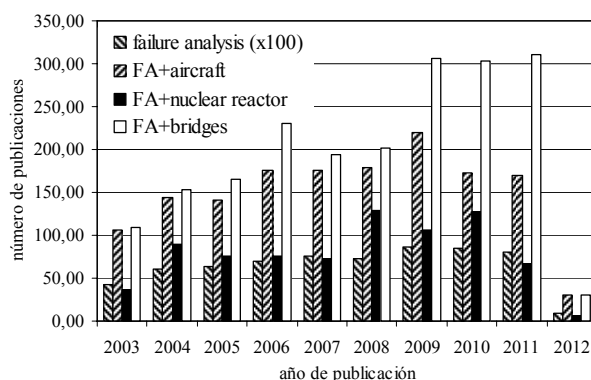


Figura 1. Registros identificados en la base de datos Compendex®, según las palabras clave señaladas.

A pesar del mayor conocimiento de los fenómenos y mecanismos implicados en los fallos que se evidencia

por la abundante bibliografía existente, aún siguen produciéndose fallos en los equipamientos industriales, productos de consumo, etc. La publicación de casos prácticos de análisis de fallos, lo que muchas veces se denomina como Ingeniería Forense, mueve también una actividad investigadora considerable (figura 2). Se celebran diversas series de congresos de ámbito internacional, como los *Forensic Engineering Congress*, trianuales, iniciados en 1997, en el campo de la Ingeniería Civil organizados por la *American Society of Civil Engineers*, ASCE (10), o los congresos internacionales *Engineering Failure Analysis*, organizados por *American Society for Materials*, ASM (11), y luego por Elsevier (12). El número de monografías que describen casos prácticos de análisis de fallos (13-18) es también numeroso, estando hoy día la metodología de estudio de fallos bien establecida (19-24).

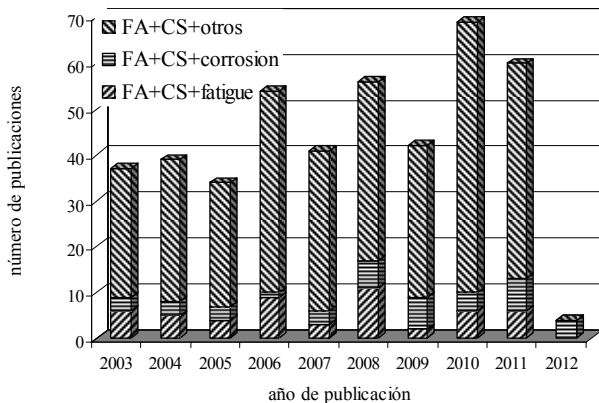


Figura 2. Registros identificados en la base de datos Compendex©, según las palabras clave señaladas (FA, failure analysis; CS, case histories).

Una de las causas de los fallos que siguen produciéndose en elementos mecánicos son aquellas relacionadas con la fatiga. Precisamente, estudios sistemáticos de análisis de fallos por fatiga en el mundo del transporte ferroviario se inician ya a mediados del siglo XIX. (25). Hoy se dispone de procedimientos normalizados de cálculo a fatiga (26, 27) y, sin embargo, continúan produciéndose fallos achacables total o parcialmente a dicho fenómeno. De la figura 2 se deduce que el número de casos de fallos reportados en la literatura donde la fatiga está presente se encuentra en el 12%, porcentaje incluso superior al de casos reportados con origen en la corrosión, causa esta última que ha sido tradicionalmente considerada como fuente de sustanciosas pérdidas económicas en el mundo industrial. Precisamente, en la serie de encuentros anuales que promueve el Grupo Español de Fractura el interés por el estudio experimental o de análisis de fallos con intervención de fenómenos de fatiga no decae en términos generales (figura 3).

En este trabajo se presentan dos casos que los autores consideran representativos para ilustrar por qué, a pesar del buen conocimiento actual sobre los procesos de

fatiga que se ha puesto de manifiesto en los párrafos anteriores, siguen produciéndose fallos por esta causa.

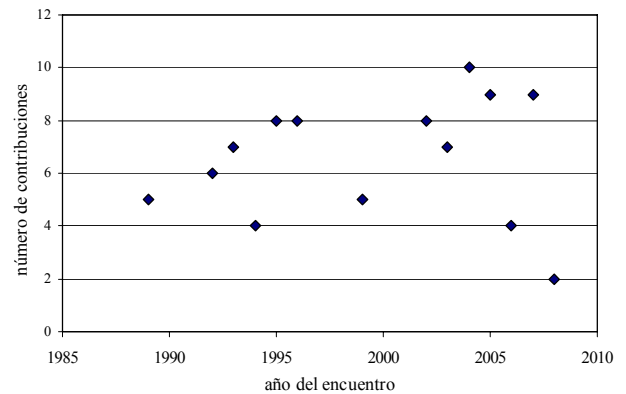


Figura 3. Estudios experimentales o de análisis de fallos en los encuentros del GEF relativos a fatiga.

## 2. ENSAYOS REALIZADOS Y RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PRIMERO DE LOS CASOS

Se trata de una placa basculante que soporta un silentblock. No hay constancia de que seyan realizado estudios previos al diseño relativos a las cargas a soportar por el componente ni de su resistencia a la fatiga. Se ha realizado inspección visual, que muestra que la rotura ha ocurrido en la barra de acero que sirve de eje de basculación, en una de las zonas de unión de la barra a la chapa (Figura 4). La unión entre la chapa y la barra se realiza mediante soldadura, por la parte interior de la chapa.



Figura 4. Eje de soporte basculante roto en la unión a la chapa soporte.



Figura 5. Aspecto de la superficie de rotura.

Las soldaduras de unión entre la barra de acero y la chapa no son completas, es decir no está soldado todo el perímetro de la barra. Estas soldaduras abarcan 265° (la de la izquierda) y 235° (la de la derecha) del total de 360°, probablemente por la dificultad de ejecutar el cordón entre la barra y la chapa. En la figura 5 pueden verse, a distintos aumentos, las superficies de fractura de la barra de acero, donde se observan claramente marcas indicativas de un proceso de rotura por fatiga. El inicio de la grieta puede localizarse en la zona que corresponde a la de inicio del cordón de soldadura que une la barra con la chapa. Se ha realizado el análisis químico de la chapa y de la barra de acero, con el fin de estudiar su soldabilidad. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Valor medio de los resultados de los análisis (% en peso)

|       | C     | Mn   | S     | P     | Cr    | Ni    | Mo    | V     | Cu    | C <sub>equiv</sub> |
|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|
| Barra | 0,073 | 0,35 | 0,015 | 0,013 | 0,015 | 0,014 | 0,002 | 0,007 | 0,013 | 0,14               |
| Chapa | 0,085 | 1,41 | >0,10 | 0,039 | 0,070 | 0,023 | 0,004 | 0,007 | 0,011 | 0,34               |

Los contenidos de carbono de los dos aceros son inferiores al valor que se suele considerar como máximo permitido de 0.24%C, mientras que los carbonos equivalentes calculados son también inferiores al valor máximo permitido, que suele ser del orden del 0.52%. En cuanto a los contenidos de azufre y de fósforo, los de la chapa de acero son inferiores a los máximos permitidos de 0.045%. La barra tiene un alto contenido en azufre, por tratarse de un acero de fácil maquinabilidad, lo que conlleva un alto contenido en manganeso, lo que elimina posibles problemas de agrietamiento en caliente durante la soldadura.

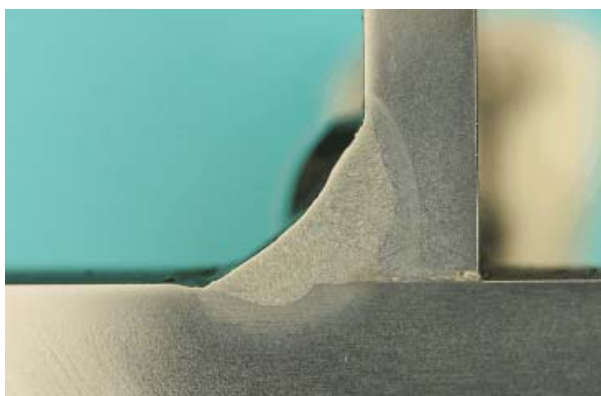


Figura 6. Macrografía de la soldadura mostrando falta de fusión en la raíz.

Sin embargo, en la inspección mediante macrografías de secciones transversales del cordón de soldadura (figura 6) se aprecia claramente una falta de fusión en la raíz de la soldadura. Esta falta de fusión es un defecto grave en la ejecución de la soldadura que debilita mecánicamente la unión soldada. A tenor de los resultados obtenidos en los ensayos realizados puede concluirse que la rotura de la barra de acero de la placa basculante ha sido debida a un proceso de rotura por fatiga. En el fallo parecen haber contribuido tanto una deficiente ejecución de la

soldadura (con falta de fusión en la raíz), como un mal diseño de la unión entre los elementos barra y chapa, con un cordón de soldadura no completo. Habida cuenta del pequeño mecanizado que lleva la barra de acero, se sugiere que se cambie por un acero de maquinabilidad normal, para eliminar el posible efecto del alto contenido de azufre en la soldabilidad

### 3. ENSAYOS REALIZADOS Y RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SEGUNDO DE LOS CASOS

En el segundo caso de estudio se da la particularidad de que los autores fueron también los responsables del diseño del elemento. Se trata de un puntal de 37 mm de diámetro fabricado en aluminio 7075 T73. El puntal se empotra en su soporte en un orificio de 25 mm de diámetro. Las cargas soportadas son de tipo flexión multidireccional y una limitada carga de tracción. Al tratarse de un diseño comprometido se procedió a realizar un extenso estudio para asegurar la integridad del elemento en el cambio de sección. Así, se especificó un radio de acuerdo de 2 mm y el montaje de una vaina de teflón en el alojamiento para evitar el contacto directo del soporte con el puntal. Una vez realizado el montaje del conjunto se instrumentó el puntal para determinar los estados de carga. En estas condiciones se comprobó que la vida a fatiga del componente superaba ampliamente los diez años, periodo que se acordó para llevar a cabo la inspección del conjunto. A los nueve años de servicio se produjo la rotura del puntal por el cambio de sección.

Se comprobó que no estaba montada la vaina de teflón especificada en el diseño. En la figura 7 se ilustra un puntal similar al fracturado donde se aprecia que ha habido daño en la zona de cambio de sección por roce y posible inclusión de objeto extraño en el alojamiento del puntal, sin que pueda descartarse que se hayan producido procesos de fretting.

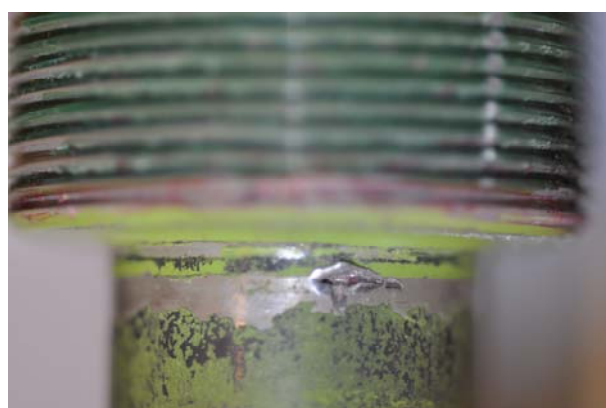


Figura 7. Puntal similar al accidentado mostrando marcas de rozamiento en el contacto con el alojamiento.

La rotura es típica de fatiga con un elevado factor de concentración de tensiones y un relativamente bajo nivel de carga. Se inician agrietamientos prácticamente

a lo largo de toda la periferia y la zona de rotura dúctil final es relativamente pequeña (figura 8).



Figura 8. Aspecto de la rotura.

Además la determinación de los radios de acuerdo en otros puntales del mismo conjunto determinó que los valores reales estaban en general por debajo de los 2 mm especificados, llegando incluso a 1,53 mm, lo que produce concentraciones de tensiones de hasta tres veces las consideradas en diseño.

Respecto a la propagación del agrietamiento, se ha llevado a cabo un exhaustivo estudio mediante microscopía electrónica de barrido para determinar la velocidad de avance de la grieta y compararla con los valores teóricos resultantes de las tensiones de diseño. Se han medido estriaciones de un valor medio de 3,7  $\mu\text{m}$ , lo que concuerda bien con los valores de diseño. Sin embargo, son también apreciables abundantes zonas donde el avance de la grieta se produce en saltos mayores de 15  $\mu\text{m}$  y de hasta 50  $\mu\text{m}$  (figura 9). Estos avances se relacionan con solicitaciones extraordinarias que no fueron incorporadas al diseño, ya que durante los ensayos de carga las solicitaciones puntuales máximas medidas eran un 20% inferiores a las que deben haber causado tales avances de grieta.

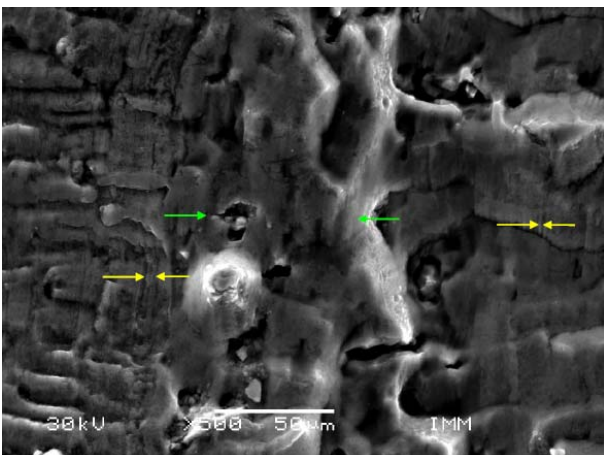


Figura 9. Micrografía SEM de la superficie de rotura por fatiga.

#### 4. CONCLUSIONES

De los argumentos plasmados en este trabajo ha de extraerse un conjunto de consideraciones que no son ajenas al conjunto del mundo científico interesado en el análisis de fallos. De hecho las conclusiones que siguen comparten en gran medida la filosofía general con otros autores (28):

1. El diseño contra la fatiga debe abordarse proponiendo diseños estructurales más inteligentes, uniones mejoradas y materiales de mayor resistencia a fatiga. Estas acciones se apoyarán en un detallado análisis tensional, aunque las mejoras potenciales deben ser verificadas con ensayos relevantes. Para muchos casos deben llevarse a cabo ensayos sobre el elemento trabajando realmente.
2. Un problema de base continúa siendo la predicción de la iniciación de grietas. Este asunto no puede resolverse satisfactoriamente sin ensayos de fatiga representativos. Y aunque sobre el crecimiento de grietas se tiene un conocimiento apreciable, un mayor esfuerzo investigador puede realizarse también en este aspecto.
3. En conjunto, los diversos aspectos de la fatiga y la tolerancia al daño son bien comprendidos cualitativamente, al menos al punto de conocer cuándo debe acudir a un experto. Sin embargo, análisis en profundidad de los modelos cuantitativos no están al alcance de todos y requieren la intervención de expertos.
4. Debido a que la definición del conjunto del problema de fatiga es de carácter multidisciplinar, es necesario continuar con la labor de formación tanto en la industria como en las universidades.

#### REFERENCIAS

- 1 A.V.Reddy, Investigation of Aeronautical and Engineering Component Failures, CRC Press, 1st edition, 2004.
- 2 D.Flynn, Nalco Guide to Boiler Failure Analysis, McGraw-Hill Professional, 2nd ed, 2011.
- 3 ISTFA 2011: Proceedings of the 36th International Symposium for Testing and Failure Analysis, ASM International, 2011.
- 4 ASM Handbook: Volume 11, Failure Analysis and Prevention, W.T.Becker, R.J.Shipley, eds., ASM International, 10th edition, 2002.
- 5 V.Shah, Handbook of Plastics Testing and Failure Analysis (Society of Plastics Engineers Monographs), Wiley-Interscience; 3rd. ed. 2007.
- 6 Characterization and Failure Analysis of Plastics, S.Lampman, ed., ASM International, 2003.
- 7 Failure Analysis and Fractography of Polymer Composites (Woodhead Publishing in Materials), E.Greenhalgh, M.J.Hiley, C.B.Meeks, Eds., CRC Press, 1st edition, 2009.
- 8 E.E.Gdoutos, K.Pilakoutas, C.Rodopoulos, Failure Analysis of Industrial Composite Materials, McGraw-Hill Companies, 2000.

- 9 R.J.Kar, Composite failure analysis handbook, CINDAS/USAF CRDA Handbooks Operation, Purdue University; Rev. July 1993 edition (1993).
- 10 Forensic Engineering 2009: Pathology of the Built Environment, Proceedings of the 5th Forensic Engineering Congress, Shen-en Chen, Alicia Diaz de Leon, Anthony M. Dolhon and Michael J. Drerup, eds., ASCE, 2009.
- 11 Failure Analysis: Techniques and Applications : Proceedings of the First International Conference on Failure Analysis, 8-11 July 1991 Montreal, Quebec, J.I.Dickson, E.Abramovici, N.S.Marchand, eds., ASM Intl., 1992.
- 12 The Fourth International Conference on Engineering Failure Analysis Part 1. Gagg, Colin and Clegg, Richard (2011). Engineering Failure Analysis 18 (2).
- 13 R.Uhl, G.M.Davidson, K.A.Esaklul, Handbook of Case Histories in Failure Analysis, ASM Intl, 1979.
- 14 Handbook of Case Histories in Failure Analysis Volume 1, ASM International, 1992.
- 15 Handbook of Case Histories in Failure Analysis Volume 2, K.A.Esaklul, ed., ASM International, 1994.
- 16 Failure Analysis Case Studies I, Elsevier Science, 1998.
- 17 Failure Analysis Case Studies II, Elsevier, 2001
- 18 Failure Analysis Case Studies III, D.R.H.Jones, ed., Elsevier Science; 1st ed., 2004.
- 19 F.K.Naumann, Failure Analysis: Case Histories and Methodology, ASM Intl, 1983.
- 20 Forensic Engineering: An Introduction to the Investigation, Analysis, Reconstruction, Causality, Risk, Consequence, and Legal Aspects of the Failure of Engineered Products, S.Brown, ed., I S I Publications, 1995.
- 21 V. Ramachandran, A.C. Raghuram, R.V. Krishnan, S.K. Bhaumik, Failure Analysis of Engineering Structures: Methodology and Case Histories, ASM International, 2005.
- 22 Dr. Daniel P. Dennies, How to Organize and Run a Failure Investigation, ASM International, 2005.
- 23 UNE-EN 60812:2008, Técnicas de análisis de la fiabilidad de sistemas. Procedimiento de análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE). CTN: AEN/CTN 200/SC 56 - CONFIABILIDAD
- 24 UNE-EN 61025:2011, Análisis por árbol de fallos (AAF), CTN: AEN/CTN 200/SC 56 - CONFIABILIDAD
- 25 R A Smith and S Hillmansen, A brief historical overview of the fatigue of railway axles, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2004, 218, 267-277.
- 26 UNE-EN 1993-1-9:2008 y UNE-EN 1993-1-9:2008 ERRATUM:2011, Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-9: Fatiga. CTN: AEN/CTN 140/SC 3 - ESTRUCTURAS DE ACERO
- 27 EN 1999-1-3:2007 y EN 1999-1-3:2007/A1:2011 Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-3: Structures susceptible to fatigue CTN: AEN/CTN 140/SC 9 - ESTRUCTURAS DE ALUMINIO.
- 28 J.Schijve, Fatigue damage in aircraft structures, not wanted, but tolerated?, International Journal of Fatigue, v 31 (2009), p 998–1011.