REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA

SESIÓN DE RECONOCIMIENTO COMO
INGENIERO LAUREADO

D. ALFONSO FERNÁNDEZ CANTELI

INTERVENCIÓN Y CONFERENCIA MAGISTRAL
LEÍDAS EN EL ACTO CELEBRADO
EL DÍA 28 DE MAYO DE 2019

Y ***LAUDATIO*** DEL ACADÉMICO

EXCMO. SR D. ENRIQUE CASTILLO RON

MADRID MMXIX

Real Academia de Ingeniería

SESIÓN DE RECONOCIMIENTO COMO
INGENIERO LAUREADO

D. ALFONSO FERNÁNDEZ CANTELI

INTERVENCIÓN Y CONFERENCIA MAGISTRAL
LEÍDA EN EL ACTO CELEBRADO EL DÍA 28 DE MAYO DE 2019

Y ***LAUDATIO*** DEL ACADÉMICO

EXCMO. SR D. ENRIQUE CASTILLO RON

MADRID MMXIX

Editado por la Real Academia de Ingeniería
© 2019, Real Academia de Ingeniería
©2019, de los textos los autores
ISBN: 978-84-95662-71-2

LAUDATIO

D. Enrique Castillo Ron

Académico de la RAI

CONFERENCIA MAGISTRAL

D. Alfonso Fernández Canteli

Ingeniero Laureado

D. Enrique Castillo Ron

Académico de la RAI

LAUDATIO

LAUDATIO DE ALFONSO FERNÁNDEZ CANTELI

por

Enrique Castillo Ron

Académico de Número de la Real Academia de Ingeniería

Excmo. Sr. Presidente de la Real Academia de Ingeniería
Excmo. Señor Secretario
Excelentísimos Señores Académicos de la RAI
Queridos familiares de Alfonso
Señoras y Señores.

Quiero, en primer lugar, agradecer a la Real Academia de Ingeniería por haberme elegido para presentar la laudatio del Profesor Alfonso Fernández Canteli.

Es para mí un gran honor y una profunda satisfacción realizar esta gratísima tarea, ya que he trabajado con él durante muchos años y soy conocedor muy cercano de su gran obra y de sus importantísimas contribuciones al comportamiento de los materiales, especialmente en el área de la fatiga.

La propuesta como laureado fue apoyada por los Académicos Elías Fereres Castiel, Jaime Domíngez Abascal, Manuel Doblaré Castellano y Enrique Castillo Ron.

Seguidamente, procederé a exponer los méritos y la trayectoria profesional de Alfonso Fernández Canteli.

1. Primera etapa: Los comienzos

Alfonso Fernández Canteli nació en Oviedo 17/04/1945.

Obtiene el título de Ingeniero Industrial por la Universidad del País Vasco en 1970 e inmediatamente, demostrando una gran visión de futuro y valentía, se desplaza como becario al Instituto Politécnico de Zürich (ETH) (SUIZA) en el que permanece durante dos años.

Posteriormente, es Profesor Ayudante en dicho Instituto durante tres años, en los que entra en contacto con importantes investigadores y se orienta ya a los estudios de fatiga de materiales.

Tras esta estancia, que marcará su vida profesional, vuelve a España y trabaja como Ingeniero proyectista en SENER, durante dos años, y en EICESA, durante otros dos. En este periodo conoce lo que es la empresa privada y se relaciona con los problemas reales de la Ingeniería.

Posteriormente, regresa al Instituto Politécnico de Zürich, donde permanece entre 1979 y 1981, trabajando ya en su tesis doctoral, que defiende, bajo la dirección de Enrique Alarcón, Académico de número de esta casa, en 1981 [1].

Su vocación docente e investigadora le lleva a iniciar su actividad como profesor en la ETSII de Gijón en 1981.

En 1983 consigue la plaza de Profesor Titular en la ETSII de Gijón, que desempeña hasta 1988, cuando consigue la cátedra en la ETSII de Gijón, que no dejará ya hasta su jubilación en el año 2015.

Durante estos años, fue Director del Dpto. de Construcción de la ETSII de Gijón (1984-1987) y Director de la ETSII de Gijón (1991-1995), periodo de gran importancia para dicha Escuela, por el impulso que dio a la docencia e investigación.

Ha sido también Coordinador del Área de Tecnología Mecánica y Textil de la Agencia Nacional de Evaluación y Prospectiva durante el periodo 1995-1998.

2. Investigación y su impacto

Sus trabajos de investigación han tenido un gran impacto, especialmente en el tema de fatiga de materiales, por la originalidad de sus modelos y por haber introducido su carácter aleatorio en los mismos.

Ha participado en 40 proyectos de investigación, que incluyen un proyecto BRITE del que fue investigador principal, 5 proyectos de la ETH de Zürich, en tres de ellos IP, 7 proyectos de la FICYT (3 IP), 12 proyectos del MEC (6 IP), 2 Acciones Integradas Hispano-Británicas (IP), 2 Proyectos FEDER y un Proyecto del Principado de Asturias (IP).

Es autor de 137 publicaciones en revistas (127 de ellas en revistas internacionales y124 de ellas indexadas, de las que 86 están en el primer cuartil.

Ha publicado también más de 260 publicaciones en proceedings de congresos, de las que 138 de ellas son internacionales, habiendo sido invitado a un buen número de ellos como persona relevante.

Ha firmado 45 contratos con muy variadas empresas, 42 de ellos como IP o co-IP, lo que demuestra su gran preocupación por resolver problemas ingenieriles a la sociedad.

[1] Una importante publicación que refleja el trabajo de esta época es [1]

Figura 1: Colección de maquinaria para ensayos de fatiga de su laboratorio.

Ha impartido 22 conferencias invitadas en centros de investigación o Universidades extranjeras de primerísimo nivel.

Ha recibido un total de 2478 citas en Google Scholar y tiene un índice h = 25.

Tiene una patente: Cobo Hedilla A., Fernández Canteli A, con título: "Bloc en matériau réfractaire, et dispositif comprenant un tel bloc, utilisé lors de la fabrication de rubans de verre", de la entidad titular: Saint Gobain Vitrage International y País de prioridad: Francia, con Fecha de prioridad: 27.02.91 y con Extensión a Europa.

3. Laboratorio de ensayos de fatiga

Ha formado el laboratorio de ensayos de fatiga posiblemente más completo en la Univesidad española, habiendo conseguido todo el material de sus proyectos de investigación y, muy especialmente, la donación del Politécnico de Zürich de la única máquina de 100 t entonces disponible en España para estos ensayos. La figura 1 muestra las 10 máquinas de su laboratorio.

Su labor ha consistido en ir actualizando los equipos con las técnicas más avanzadas e incorporando ensayos de vanguardia, adaptándolos a la estimación de los modelos de fatiga desarrollados por él con su equipo y colaboradores.

4. Contribuciones más importantes

Es de los primeros investigadores en incorporar la aleatoriedad a los modelos de fatiga, produciendo un cambio muy significativo en los modelos, que ha tenido repercusión a nivel mundial muy relevante.

Ha desarrollado modelos de fatiga y software, que hoy se utilizan a nivel mundial. En particular, el programa ProFatigue, elaborado conjuntamente con el Prof. Castillo y el Laboratorio Federal Suizo de Ensayos e Investigación (Empa-Dübendorf), que se utiliza ya en varios países para evaluar los resultados de fatiga y extrapolarlos a la evaluación de daños de fatiga en casos reales.

Ha refrendado sus modelos con resultados realizados en el Empa, el Laboratorio Federal de Ensayos de Suiza, que es uno de los mejores y más prestigiosos a nivel internacional.

Ha propuesto un modelo probabilístico conjunto para curvas S-N y curvas de crecimiento de grieta, que permite relacionar ambos procesos en un único modelo, pudiendo pasarse de las curvas S-N a las curvas de crecimiento de grieta y viceversa. Además, este modelo permite entender el fenómeno de fatiga en su conjunto y explicar la propagación de daño, corrigiendo los problemas que tienen algunos modelos más utilizados por la comunidad ingenieril tanto práctica como científica.

Ha propuesto una metodología para incorporar la historia de solicitaciones y su carácter aleatorio al análisis de fatiga, mediante un modelo probabilístico de daño. El modelo anterior permite comprender cómo tiene lugar la acumulación de daño desde un punto de vista estocástico, pudiendo evaluar probabilidades de rotura.

Ha contribuído decisivamente a mejorar la metodología y estrategia de programas de ensayos de fatiga optimizándola y ha promovido una nueva metodología, denominada "Generalized Local Model (GLM)"para garantizar la transferibilidad, es decir, la aplicación de los resultados de caracterización de materiales en el dimensionamiento de componentes estructurales.

Ha desarrollado modelos para la caracterización de elementos de vidrio de grandes dimensiones, como, por ejemplo, los de fachadas de edificios singulares, en colaboración, primero con con Saint-Gobain, y luego independientemente.

Finalmente, ha contribuido a la formación de muchos ingenieros. En particular ha dirigido 18 tesis doctorales.

5. Instituto Universitario de Tecnología Industrial de Asturias

Su preocupación por el desarrollo regional se ha puesto de manifiesto de una forma explícita, entre otras actuaciones, en el lanzamiento del Instituto Universitario de Tecnología Industrial de Asturias.

OBJETIVOS DEL IUTA

Entre los objetivos de este Instituto están:

- El desarrollo tecnológico mediante la colaboración entre la Universidad y las empresas.
- La formación tecnológica y empresarial de jóvenes titulados para inserción en empresas.
- La promoción de las áreas o actividades de interés social y empresarial.

LÍNEAS DE ACTUACIÓN

Este instituto tiene como líneas de actuación:

- La caracterización mecánica de materiales, convencional y de fractura y fatiga.
- El análisis del comportamiento de materiales bajo acciones de servicio.
- El diseño y dimensionamiento y cálculo de estructuras y componentes mecánicos.
- La Bioingeniería.
- El desarrollo de modelos relativos a fiabilidad estructural.

PROYECTOS MÁS RELEVANTES

Entre los proyectos más relevantes desarrollados por el Instituto destacan, entre otros, lor referentes a:

- Desarrollo de nuevas calidades de cilindros de laminación.
- Desarrollo de aceros microaleados para servicio en presencia de gas ácido.
- Desarrollo de barras corrugadas de acero inoxidable para refuerzo del hormigón.

- Aplicación de capas proyectadas térmicamente por plasma y alta velocidad en calderas de Centrales Térmicas y barreras térmicas y anticorrosivas para turbinas de gas.

6. Estancias de investigación en Universidades extranjeras

Una de las virtudes más importantes del Profesor Alfonso Fernández Canteli es su facilidad de relación y de establecer puentes de colaboración a nivel internacional. Ello le ha llevado a realizar estancias, arrastrando a sus colaboradores y discípulos en centros internacionales del máximo nivel científico e ingenieril, tales como:

1. En el Instituto Politécnico de Zürich (SUIZA) (ETH) Zürich. Disfrutó de una Beca IBK desde 1.07.82 a 31.08.82 y desde 1.08.83 a 31.08.83. Realizó varias estancias financiadas por el Instituto en las que realizó artículos conjuntos con el Prof. Bruno Thürliman, que fue Académico Correspondiente de esta Real Academia y, también, Miembro de Número de la National Academy of Engineering (NAE) (EEUU).

2. En la University of Washington (Seattle, EE.UU.) desde 15.08.98 a 14.08.99.

3. En la Ruhr-Universität Bochum (Alemania), Facultad de Ingeniería Civil, Dep. Experimentelle Mechanik, desde 15.03.04 a 31.05.04.

4. En el Empa (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf Suiza) desde 1.07.07 a 31.07.07. Allí estuve con él en varias ocasiones. En particular, realizamos una estancia con una doctoranda un verano, durante la cual resolvimos la ecuación funcional que dió lugar al modelo de fatiga completo y al nacimiento del software ProFatigue.

5. Realizó una estancia en el Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik, Freiburg (Alemania) desde 01.03.10 a 30.11.10, durante la cual se desarrollaron modelos de crecimiento de grieta con el Prof. Castillo y el Dr. Siegele.

7. Colaboración con Universidades y centros de investigación extranjeros

Ha colaborado activamente con varias universidades y centros de investigación estranjeros, como, por ejemplo:

1. Experimentelle Mechanik, Ruhr-Universität Bochum (Alemania), realizando con su personal un artículo, 7 contribuciones en congresos internacionales y 7 en congresos nacionales.

2. Department of Material Science and Technology, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) Dübendorf, Zürich (Suiza), resultando de esta colaboración cuatro artículos y la organización de cinco congresos internacionales y dos congresos nacionales.

3. Institute of Physics of Materials, Academy of Sciences of the Czech Republic (República Checa), que dieron lugas a dos artículos conjuntos, doce congresos internacionales y cuatro congresos nacionales.

4. FEUP Universidade do Porto (Portugal), que generó doce artículos conjuntos, doce congresos internacionales, tres congresos nacionales y una tesis doctoral.

5. Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Kazán (Rusia) con tres artículos, tres congresos internacionales y dos congresos nacionales.

6. Università degli Studi di Parma (Italia) dando lugar a un artículo conjunto y tres congresos internacionales.

7. Institut für Werkstoffkunde der Technischen Universität Darmstadt (Alemania) con dos artículos, dos congresos internacionales y dos congresos nacionales.

8. IWM (Institut für Werkstoffmechanik) Fraunhofer, Freiburg (Alemania), con un artículo, y una codirección de tesis doctoral.

8. Conferencias impartidas en Universidades extranjeras

Como consecuencia de su prolífico trabajo de investigación y su preocupación por difundir el conocimiento, ha impartido un gran número de conferencias en Universidades extranjeras, tales como:

1. "Statistisches Analyse der Miner-Zahl mit Hilfe eines Indexes der Wahrscheinlichkeit einer Totalschädigung". Fachhochschule Bochum (Alemania) (24.11.84).

2. "Neues statistisches Modell für die Ermüdungsanalyse". ETH-Zürich (Suiza) (12.06.85).

3. “Anwendung von probabilistischen bruchmechanischen Prinzipien auf die Bruchsicherheit von Glasplatten”. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (Alemania) (04.07.95).

4. “Failure design of glass plates using a probabilistic approach based on Fracture Mechanics”. Sekurit Saint-Gobain Zentrale Forschung (ZAF). Herzogenrath (Alemania) (23.07.96).

5. “On the probabilistic concept of mechanical design“. Fachhochschule Bielefeld (Alemania) (22.10.97).

6. “A Model for Probabilistic Failure Design of Glass Plates in Buildings”. Department of Mechanical Engineering. University of Washington (EEUU) (22.10.98).

7. “A Model for Probabilistic Failure Design of Glass Plates in Buildings”. College of Engineering. University of California Davis (EEUU) (06.07.99).

8. “Ein neues Modell für Bruchanalyse in der LEBM auf der Basis eines Tensor-Konzeptes“. Institut für Werkstoffmechanik, Fraunhofer Institut Freiburg (Alemania) (15.05.09).

9. “A general statistical S-N fatigue model including the stress level influence“. Institute of Physics of Materials, Academy of Sciences of Czech Republic, Brno (República Checa) (8.06.09).

10. “A crack growth rate model compatible with the S-N field“. Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau, Montanuniversität Leoben, (23.11.09) Leoben (Austria).

11. “Probabilistic fatigue models for assessment of $S-N$ and $\epsilon-N$ fields in LCF, HCF and VHCF”. Institut für Werkstoffkunde, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt (Alemania) (22.11.10).

12. “Probabilistic fatigue models for assessment of S-N and e-N fields in LCF, HCF and VHCF”. Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Parma (Italia) (3.06.11).

13. “Checking the fatigue limit from thermographic techniques by means of a probabilistic model of the e-N field“. Institute of Physics of Materials, Academy of Sciences of the Czech Republic, Brno (República Checa) (4.11.11).

14. “Checking the fatigue limit from thermographic techniques by means of a probabilistic model of the e-N field“. Dipartamento di Meccanica. Politecnico di Milano (16.01.12).

15. “Probabilistic fatigue models for assessment of S-N and e-N fields in LCF, HCF and VHCF”. Institute of Science Materials and Technology, Technische Universität Wien (01.02.13).

16. “A crack growth model compatible with the S-N field”. Research Centre for Power Enginering Problems, Russian Academy of Sciences, (19.07.13) Kazán, Rusia.

17. “A unified probabilistic approach for fatigue life and damage prediction”, Centre of Excellence in Computational Mechanics, (21.01.14) Politecnico di Bari, Italia.

18. “Hazard maps and probabilistic failure assessment: Two ways of tackling reliability”, Department of Civil-Environmental Engineering and Architecture, Università degli Studi di Parma, Italia (10.06.15).

19. “Hazard maps and probabilistic failure assessment: Two ways of tackling reliability”, Center of Experimental Mechanics, Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana, Eslovenia (05.10.16).

20. “Phenomenological models for fatigue and static fracture prediction”, University of Ostrava, República Checa, Invited Lecture (24.05.18).

21. “Phenomenological probabilistic models for fatigue and static frature prediction”, IWM Fraunhofer Institut, Freiburg, Alemania, (18.07.18).

22. “A methodology for probabislitc modeling o fracture and fatigue failures”, Empa-Dübendorf (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschunganstalt); Zurich, Suiza, (20.07.18).

9. Revisor de las principales revistas del area de fatiga

Ha ralizado una gran labor como referee en las principales revistas de fatiga, tales como:

1. International Journal of Fatigue
2. International Journal of Fracture
3. International Journal of Solids and Structures
4. Fatigue and Fracture of Engineering Material and Structures

5. Engineering Fracture Mechanics
6. Theoretical and Applied Fracture Mechanics
7. Engineering Failure Analysis
8. Engineering Structures
9. Strain
10. Ceramics International
11. Journal of Composite Materials
12. Composites Science and Technology
13. Journal of Testing and Evaluation ASME
14. International Journal of Structural Integrity
15. Mechanical Systems and Signal Processing
16. Mechanics of Time Dependent Materials
17. Comptes Rendus Mecanique
18. Pressure Vessels and Piping Conference ASME
19. Materials and Design, etc.

10. Otros méritos

1. Es co-autor de una monografía publicada por Springer y su versión española por la Real Academia de Ingeniería, que se muestra en la figura 2.
2. Ha recibido la Medalla en reconocimiento a la labor realizada en investigación de fractura y fatiga de la Sociedade Portuguesa de Materiais, 2016.
3. Ha recibido la Medalla en reconocimiento a la labor realizada en investigación de fractura y fatiga del Grupo Español de Fractura, 2016.
4. Tiene el Título Profesional de Piano por el Conservatorio Profesional de Música de Bilbao, Junio 1968, obtenido con la Calificación de Sobresaliente.
5. Ha realizado Estudios equivalentes a Master-Degree en Ingeniería Civil + Proyecto Final de Carrera en Ingeniería Civil, Institut für Baustatik und Konstruktion. Bauingenieurwesen, ETH Zürich, 1971. Calificación: 5.5 sobre 6.

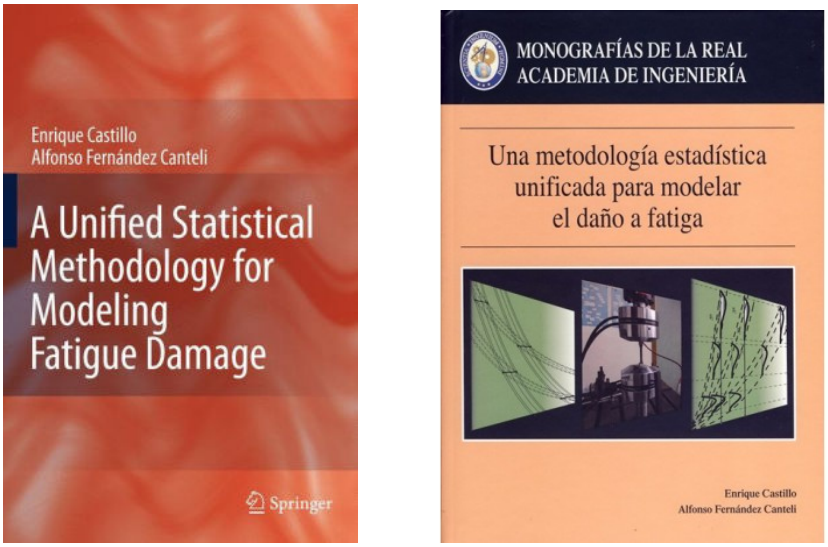


Figura 2: Monografía en inglés publicada por Springer y versión española publicada por la Real Academia de Ingeniería.

6. Ha sido Promotor en la ETSII de Gijón y responsable del programa ERASMUS y SOCRATES de la U.E. para intercambio académico y prácticas de alumnos y desarrollo de cursos específicos de idiomas entre 1990 y 2000, especialmente durante los años en que la salida a realizar estudios a Universidades extranjeras era muy escasa.

7. Ha sido Vocal del Jurado del Premio Nacional "Leonardo Torres Quevedo" de Investigación Técnica. Convocatoria 1997.

8. Fue el Padrino del Prof. Enrique Castillo Ron en su nombramiento como Dr. Honoris Causa por la Universidad de Oviedo. Único doctor Honoris Causa en 40 años de existencia de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón. Todo un hito en una Universidad en la que sólo se reconocían los méritos en ramas científicas.

9. Ha sido el único Profesor Emérito en el año 2015 de la Universidad de Oviedo.

10. Ha realizado importantes actividades de investigación en el campo de la Etnografía. (1 libro sobre el calzado de madera en el nororeste español y 4 publicaciones). Posee la mayor colección de madreñas de España.

11. Ha sido Vocal del Consejo Asturiano de las Artes y las Ciencias (representante por la Universidad de Oviedo) desde 17.01.01 a 31.05.03.

12. Ha sido Vocal del panel de expertos en la evaluación del Plan Estratégico de los centros del CSIC, 2009.

13. Ha sido Miembro del panel de expertos del Programa Academia de la Aneca para la acreditación. Desde junio 2008 a enero 2013.

11. Modelos de curvas S-N de fatiga basados en condiciones de compatibilidad

Finalmente, queremos incluir en esta sección la que consideramos su contribución más importante, que se refiere a la modelización basada en condiciones, lo que elimina la arbitrariedad de los modelos.

La idea consiste en identificar las propiedades que debe cumplir un modelo, en este caso de fatiga, pero la idea es de validez general, para que pueda considerarse física e ingenierilmente válido. Al expresar estas propiedades mediante ecuaciones funcionales, la resolución del sistema resultante garantiza que los modelos obtenidos no sólo satisfacen dichas condiciones, sino que convierten en inválidos a todos los demás.

En lo que sigue, se explica cómo utilizar esta técnica a los modelos de fatiga, que nacieron en la ETH de Zürich ([2]) y se fueron perfeccionando en sucesivos trabajos como los [3], [4], [5] y [6].

11.1. Condiciones de compatibilidad de las curvas S-N de fatiga para nivel de tensión constante

Supongamos que se ensayan varias probetas a diferentes rangos de tensión $\Delta\sigma^*$ y que se determinan sus vidas a fatiga N^*, es decir, sus curvas S-N, que se muestran en rojo en la figura 6. Si consideramos un punto genérico $(\Delta\sigma^*, N^*)$, y los segmentos vertical y horizontal de la figura, es obvio que cualquier curva S-N que entre por el segmento horizontal, tiene forzosamente que salir por el segmento vertical, lo que implica que las áreas sombreadas de las densidades de N^* condicionada por $\Delta\sigma^*$ y de $\Delta\sigma^*$ condicionada por N^*, tienen que coincidir. Pero esas áreas corresponden a las funciones de distribución condicionadas correspondientes, por lo que debe ser:

$$p = h^*(N^*|\Delta\sigma^*) = g^*(\Delta\sigma^*|N),$$

donde h^* y g^* son las funciones de distribución condicionadas, que es la llamada condición de compatibilidad.

Si se supone ahora que las funciones h^* y g^* pertenecen a la misma familia de distribuciones y que ésta es una familia de localización y escala, lo que es una

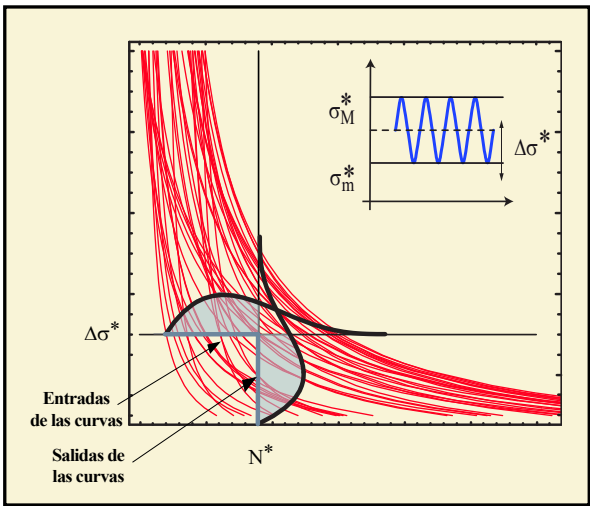


Figura 3: Curvas S-N, en rojo, correspondientes a diferentes probetas e ilustración de la condición de compatibilidad.

hipótesis muy débil, ya que tienen que ser estables con respecto a cambios de escala (de unidades) y de origen, la condición de compatibilidad puede escribirse en la forma:

$$\frac{N^* - \mu_1^*(\Delta\sigma^*)}{\sigma_1^*(\Delta\sigma^*)} = \frac{\Delta\sigma^* - \mu_2^*(N^*)}{\sigma_2^*(N^*)}, \tag{1}$$

que es una ecuación funcional[2] con cuatro funciones incógnitas, cuya solución conduce a los dos modelos siguientes:

$$\text{Modelo 1}: \qquad p = h^*\left(\frac{(N^* - B^*)(\Delta\sigma^* - C^*) - \lambda^*}{\delta}\middle|\, \sigma_\ell^*, L^*\right), \tag{2}$$

$$\text{Modelo 2}: \qquad p = h^*\left(A^*N^* + B^*\Delta\sigma^* + C^* \,|\, \sigma_\ell^*, L^*\right), \tag{3}$$

donde λ^* and δ^* son parámetros de localización y escala, respectivamente, y A^*, B^* y C^* son otros parámetros, y ésto es así independientemente de la función h^*.

Si se excluye el segundo modelo por su sencillez, y se hacen consideraciones asintóticas, el principio del eslabón más débil conduce a los dos modelos de curvas S-N:

$$\boxed{\text{Modelo de Weibull: } p = 1 - \exp\left[-\left(\frac{(N^* - B^*)(\Delta\sigma^* - C^*) - \lambda^*}{\delta^*}\right)^{\beta^*}\right],}$$

[2]las ecuaciones funcionales juegan un papel muy relevante en los trabajos del Profesor Alfonso Fernández Canteli, como puede entenderse en [7]

$$\boxed{\text{Modelo de Gumbel: } p = 1 - \exp\left[-\exp\left(\frac{(N^* - B^*)(\Delta\sigma^* - C^*) - \lambda^*}{\delta^*}\right)\right].}$$

En resumen, la condición de compatibilidad (1) junto con el el principio del eslabón más débil y consideraciones físicas y estadísticas nos permiten obtener la forma funcional de las curvas S-N dadas en los modelos de Weibull y Gumbel.

11.2. Condiciones de compatibilidad de las curvas S-N de fatiga para diferentes niveles de tensión

Si se consideran ahora los diferentes modelos que surgen para diferentes niveles de tensión, y se impone la condición de compatibilidad, que se ilustra en la figura 11, en la que se muestran las curvas percentiles $\{0{,}01, 0{,}05, 0{,}5, 0{,}95, 0{,}99\}$ de las curvas S-N para valores constantes de σ_M^* ($\sigma_{M_1}^* < \sigma_{M_2}^*$ líneas continuas) y valores constantes de σ_m^* ($\sigma_{m_2}^* < \sigma_{m_1}^*$ líneas de trazos), ilustrando la condición de compatibilidad (véanse [8] y [9]):

$$h^*\left(\frac{(N^* - B_m^*(\sigma_m^*))(\sigma_m^* - \sigma_M^* - C_m^*(\sigma_m^*)) - \lambda_m^*(\sigma_m^*)}{\delta_m^*(\sigma_m^*)}\right) = h^*\left(\frac{(N^* - B_M^*(\sigma_M^*))(\sigma_m^* - \sigma_M^* - C_M^*(\sigma_M^*)) - \lambda_M^*(\sigma_M^*)}{\delta_M^*(\sigma_M^*)}\right), \tag{4}$$

donde ahora los parámetros B^*, C^*, λ^* y δ^* son funciones de σ_m^* o σ_M^*, indicados por los correspondientes subíndices m y M, que se refiren a tensiones mínima y máxima, respectivamente..

Esta ecuación es una ecuación funcional con ocho funciones incógnitas, cuya solución más general, que obtuvimos un verano y se validó en el EMPA (véase [10]), es:

$$p = h^*\left(r^*(\sigma_m^*, \sigma_M^*) + s^*(\sigma_m^*, \sigma_M^*)N^*\right), \tag{5}$$

donde

$$r^*(\sigma_m^*, \sigma_M^*) = C_0^* + C_1^*\sigma_m^* + C_2^*\sigma_M^* + C_3^*\sigma_m^*\sigma_M^*, \tag{6}$$

$$s^*(\sigma_m^*, \sigma_M^*) = C_4^* + C_5^*\sigma_m^* + C_6^*\sigma_M^* + C_7^*\sigma_m^*\sigma_M^* \tag{7}$$

y C_0^* a C_7^* son constantes.

Ello conduce a los modelos:

$$\boxed{\textbf{Modelo 1 :} \quad p = 1 - \exp\left[\left(r^*(\sigma_m^*, \sigma_M^*) + s^*(\sigma_m^*, \sigma_M^*)N^*\right)^\beta\right]}$$

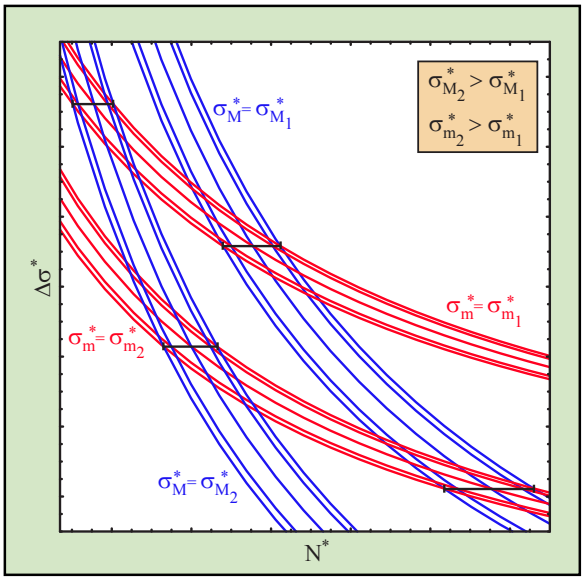


Figura 4: Condición de compatibilidad de varias curvas S-N.

$$\boxed{\textbf{Modelo 2 :} \quad p = 1 - \exp\left[-\exp\left(r^*(\sigma^*_m, \sigma^*_M) + s^*(\sigma^*_m, \sigma^*_M)N^*\right)\right].}$$

Es importante señalar que sólo estos modelos cumplen las condiciones de compatibilidad, por lo que los demás modelos quedan invalidados.

Estos modelos fueron extendidos también al caso de curvas $\epsilon - N$ (véase [11][12]).

Los modelos anteriores son válidos bajo la hipótesis de independencia o quasi-independencia de las resistencias. Otros modelos desarrollados para el caso de dependencia, incluyendo los de series temporales pueden verse en [13], [14] o [15].

12. Modelos de crecimiento de grieta

Los modelos de crcimiento de grieta dan cómo crece el tamaño de grieta a^* en función de la grieta inicial a^*_o, el número de ciclos, N^* y la solicitación Q^*, es decir, son de la forma:

$$a^* = h^*(a^*_0, N^*, Q^*) \tag{8}$$

donde a^*, a^*_0 y Q^* son variables adimensionales, posiblemente surgidas del teorema Pi de Buckingham.

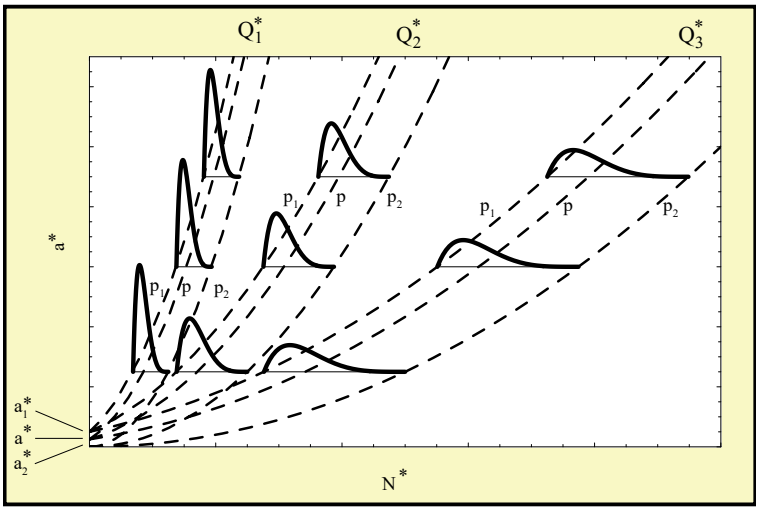


Figura 5: Ilustración de cómo cambia la curva de crecimiento de grieta con la carga Q^* y la de N^* condicionada por el tamaño de grieta a^* (una traslación).

12.1. Condición de compatibilidad de las curvas de crecimiento de grieta I

En este caso, esta función no puede ser arbitraria, y también debe cumplirse una condición de compatibilidad (véase [16]):

> La fórmula (8) debe dar el mismo resultado si se aplican primero N_1^* ciclos y luego N_2^* ciclos, que si se aplican todos los ciclos $N_1^* + N_2^*$ de golpe, es decir, debe ser:
>
> $$a^* = h^*\left(a_0^*, N_1^* + N_2^*, Q^*\right) = h^*\left(h^*\left(a_0^*, N_1^*, Q^*\right), N_2^*, Q^*\right), \qquad (9)$$
>
> que es una ecuación funcional, donde la incognita es la función $h^*(a_0^*, N^*, Q^*)$.

La ecuación funcional (10) es la conocida ecuación de la traslación, cuya solución general es:

$$\boxed{a^* = h^*\left(a_0^*, N^*, Q^*\right) = \phi\left(\phi^{-1}\left(a_0^*, Q^*\right) + N^*, Q^*\right); \quad \forall\, a_0^*, N^*,} \qquad (10)$$

donde $\phi(\cdot,\cdot)$ es una función invertible con respecto al primer argumento y arbitraria.

Si F_{a_0} es la función de distribución del tamaño inicial a_0, de (10) resulta:

$$F_{N^*|a^*,Q^*}(N^*|a^*, Q^*) = 1 - F_{a_0}\left(\phi(\phi^{-1}(a^*, Q^*) - N^*, Q^*)\right), \qquad (11)$$

que muestra que la función de densidad de N^* condicionada a un tamaño de grieta a^* depende sólo de la carga, y es una traslación de valor $\phi^{-1}(a^*, Q^*)$, tal como muestra la figura 5. Nótese que las funciones de densidad tienen la misma forma para valores de Q^* constantes y difieren sólo en una traslación.

12.2. Condición de compatibilidad de las curvas de crecimiento de grieta II

Seguidamente vemos cómo existe también una condición de compatibilidad análoga a la de las curvas S-N.

La figura 6 ilustra la condición de compatibilidad, que expresa que toda curva de crecimiento de grieta que pasa por el segmento horizontal debe pasar por el segmento vertical, es decir, que las dos áreas sombreadas deben ser iguales, y eso debe cumplirse para cualquier punto $(N^*.a^*)$, es decir:

$$F_{N^*|a^*}(N|a, Q^*) = 1 - F_{a^*|N^*}(a|N, Q^*).$$

Esto es análogo al caso de las curvas S-N, pero squí se tiene una ley de mínimo para $N^*|a^*$, y una de máximo para $a^*|N^*$, ya que a^* se refiere a la grieta máxima. Por tanto, resulta:

$$\begin{aligned} p &= q_{max}\left(\frac{a^* - \mu_1^*(N^*)}{\sigma_1^*(N^*)}\middle| Q^*, L^*\right) \\ &= 1 - q_{min}\left(\frac{N^* - \mu_2^*(a^*)}{\sigma_2^*(a^*)}\middle| Q^*, L^*\right), \end{aligned} \tag{12}$$

donde q_{max} y q_{min} son distribuciones de máximo y mínimo, tales que

$$q_{max}(x) = 1 - q_{min}(-x), \tag{13}$$

y de (12) y (13) se obtiene;

$$q_{max}\left(\frac{a^* - \mu_1^*(N^*)}{\sigma_1^*(N^*)}\middle| Q^*, L^*\right) = q_{max}\left(\frac{\mu_2^*(a^*) - N^*}{\sigma_2^*(a^*)}\middle| Q^*, L^*\right), \tag{14}$$

es decir,

$$\frac{a^* - \mu_1^*(N^*)}{\sigma_1^*(N^*)} = \frac{\mu_2^*(a^*) - N^*}{\sigma_2^*(a^*)}, \tag{15}$$

que es una ecuación funcional cuya solución da dos modelos posibles:

$$\textbf{Modelo 1 :} \quad p = q_{max}\left(\frac{a^* + \gamma^*(Q^*)N^* - \eta^*(Q^*)}{\rho^*(Q^*)}\middle| Q^*, L^*\right), \tag{16}$$

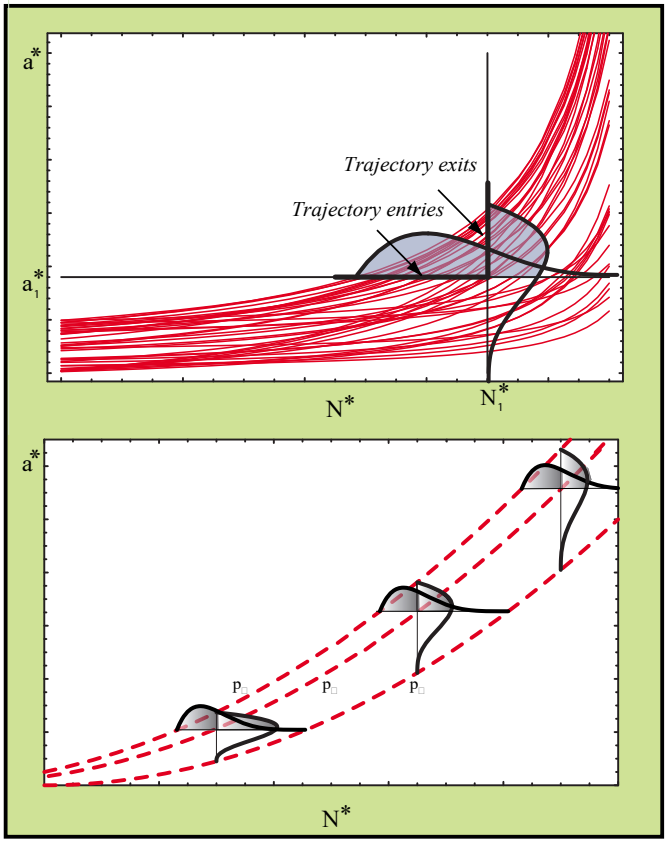


Figura 6: Ilustración de la condición de compatibilidad de la curvas de crecimiento de grieta.

donde β^*, η^* y ρ^* son parámetros, lo que muestra que se trata de lineas rectas, y

$$\textbf{Modelo 2 :} \quad p = q_{max}\left(\frac{(M^*(Q^*) - N^*)(a^* - a^*_{th}(Q^*)) - \eta^*(Q^*)}{\rho^*(Q^*)}\middle| Q^*, L^*\right), \tag{17}$$

donde $M^*(Q^*), a^*_{th}(Q^*)$, $\eta^*(Q^*)$ anyd $\rho^*(Q^*)$ son parámetros, lo que muestra que se trata de hipérbolas con asíntotas $N^* = M^*(Q^*)$ y $a^* = a^*_{th}(Q^*)$.

En este caso para los tamaños de grieta a^* están justificadas familias de máximos de Weibull y Gumbel. mientras que para N^* deben ser familias de mínimos. Por ello, los modelos resultantes son (16) y (17), donde

$$q_{max}(x) = \exp\left[-(-x)^{\beta}\right] \quad \text{y} \quad q_{max}(x) = \exp\left[-\exp\left(-x\right)\right], \tag{18}$$

es decir

$$\boxed{\textbf{Modelo 1a :} \quad p = \exp\left[-\left(-\frac{a^* + \gamma^*(Q^*)N^* - \eta^*(Q^*)}{\rho^*(Q^*)}\right)^{\beta^*}\right],}$$

$$\boxed{\textbf{Modelo 1b :} \quad p = \exp\left[-\exp\left(-\frac{a^* + \gamma^*(Q^*)N^* - \eta^*(Q^*)}{\rho^*(Q^*)}\right)\right],}$$

y

$$\boxed{\textbf{Modelo 2a :} \quad p = \exp\left[-\left(-\frac{(N^* - M^*(Q^*))(a^* - a^*_{th}) - \eta^*(Q^*)}{\rho^*(Q^*)}\right)^{\beta^*}\right]}$$

$$\boxed{\textbf{Modelo 2b :} \; p = \exp\left[-\exp\left(-\frac{(N^* - M^*(Q^*))(a^* - a^*_{th}(Q^*)) - \eta^*(Q^*)}{\rho^*(Q^*)}\right)\right],}$$

donde los parámetros $\gamma^*(Q^*), \beta^*, \eta^*(Q^*), \rho^*(Q^*), M^*(Q^*)$ y $a^*_{th}(Q^*)$ dependen de Q^*, L^*.

12.3. Condición de compatibilidad de las curvas de crecimiento de grieta III

Hasta ahora se han obtenido las curvas de crecimiento de grieta para valores constantes durante el ensayo de $\mathbf{Q}^* \equiv (\Delta\sigma^*, \sigma^*_\ell)$ o $\mathbf{Q}^* \equiv (\sigma^*_n, \sigma^*_M)$. Ahora se estudia el caso de Q^* o (σ^*_m, σ^*_M) variables.

La hipótesis que hacemos es que la distribución de los tamaños de grieta para los mismos niveles de daño sean coincidentes, independientemente de cómo se alcancen éstos.

Esta hipótesis se ilustra en la figura 7, donde se muestran tres niveles de daño con sus correspondientes números de ciclos, para el caso de tres solicitaciones difrentes Q^*_1, Q^*_2 y Q^*. Nótese cómo se ha forzado a coincidir a las densidades de $a^*|N^*$ para los mismos niveles de daño. Hemos supuesto que dada N^*_1, Q^*_1 y Q^*, existe una $N^* = q(N^*_1, Q^*)$ tal que las densidades de $a^*|N^*_1$ y $a^*|N^*$ coinciden.

Dadas las curvas percentiles de la función de crecimiento para una carga de referencia Q^*_1

$$a^* = h(a^*_0, N^*, Q^*_1) = g(a^*_0, N^*),$$

se supone que existe una función creciente $N^* = q(N^*_1, Q^*)$ tal que:

$$a^* = h(a^*_0, q(N^*_1, Q^*), Q^*) = g(a^*_0, N^*_1).$$

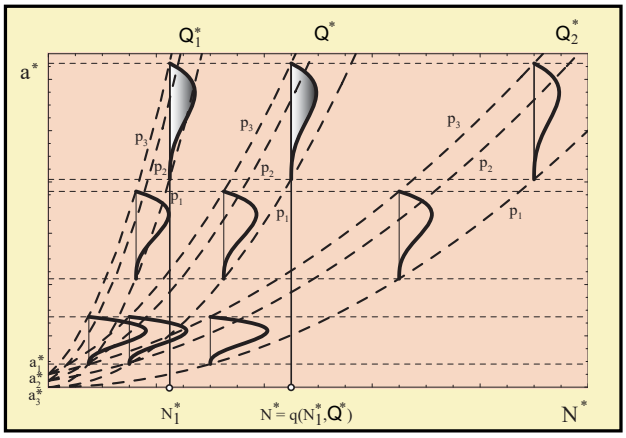


Figura 7: Ilustración de la coincidencia del daño para diferentes niveles de carga.

La condición de compatibilidad para cualquier historia de tensiones Q^*, es:

$$p = q_{max}(a^*, N_1^*|Q_1^*, L^*) = q_{max}(a^*, N^*|Q^*, L^*), \tag{19}$$

lo que fuerza a las funciones de densidad de a^* para un par particular N_1^* y Q_1^* y a^* para un par genérico N^* y Q^* a coincidir (densidades sombreadas en la figura 7) lo que conduce a la ecuación funcional:

$$\begin{aligned} &\frac{(N_1^* - M_1^*)(a^* - a_{th_1}^*) - \eta_1^*}{\rho_1^*} \\ &= \frac{(M^*(Q^*) - q^*(N_1^*, Q^*)))(a^* - a_{th}^*(Q^*)) - \eta^*(Q^*)}{\rho^*(Q^*)}, \end{aligned} \tag{20}$$

donde $M_1^*, a_{th_1}^*, \eta_1^*$ y ρ_1^* son los parámetros asociados a un ensayo de fatiga con

$$Q_1^* = (\sigma_{m_1}^*, \sigma_{M_1}^*),\ M(^*Q^*), a_{th}^*(Q^*), \eta^*(Q^*) \text{ y } \rho^*(Q^*)$$

y los parámetros correspondientes a un ensayo genérico con

$$Q^* = (\sigma_m^*, \sigma_M^*), \text{ and } M_1^* = M^*(Q_1^*),\ a_{th_1}^* = a_{th}^*(Q_1^*),\ \eta_1^* = \eta^*(Q_1^*),\ \rho_1^* = \rho^*(Q_1^*),$$
$$N_1^* = q^*(N_1^*, Q_1^*) \text{ y } N^* = q^*(N_1^*, Q^*).$$

La solución de la ecuación funcional (20), con cinco funciones incógnitas, es:

$$N^* = q^*(N_1^*, Q^*) = \frac{\eta^*(Q^*)}{\eta_1^*}(N_1^* - M_1^*) + M^*(Q^*). \tag{21}$$

$$a_{th}^*(Q^*) = a_{th}^* \tag{22}$$

$$\rho^*(Q^*) = \frac{\eta^*(Q^*)\rho_1^*}{\eta_1^*}. \tag{23}$$

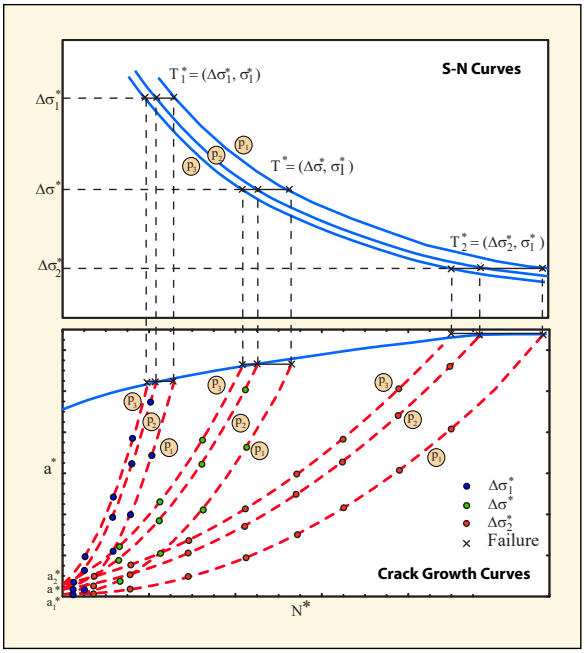


Figura 8: Relación existente entre las curvas S-N y las de crecimiento de grieta.

que da lugar al modelo:

$$\boxed{F_{a^*|N^*,Q^*}(a^*, N^*) = q_{max}\left[\frac{\eta_1^*}{\rho_1^*}\left(\frac{(M^*(Q^*) - N^*)(a^* - a_{th_1}^*)}{\eta^*(Q^*)} - 1\right)\right]}$$

Este modelo junto con (21) a (23) garantiza la coincidencia de las distribuciones de los tamaños de grieta $a^*|N_1^*$ tras N_1^* ciclos de un ensayo de fatiga con tensiones Q_1^* y $a^*|N$ tras N^* ciclos de un ensayo de fatiga con tensiones Q^*, (21) da la relación entre N_1^* y N^* y (22) muestra que la asíntota a_{th} no dependen de Q^*.

13. Relación entre los modelos S-N y el de crecimiento de grieta

Los modelos anteriores permiten integrar las curvas S-N y las de crecimiento de grieta en un modelo único, lo que supone un gran avance, ya que permite pasar de una a otra y vice versa, así como entender la muy estrecha relación entre ambas.

La figura 8 ilustra esta relación.

También ha desarrollado importantes modelos para el estudio de estructuras acristaladas (véase [17] y [18]), para acumulación de daño (véase [19] y [20]), habiendo mostrado sus discrepancias con la regla de Miner (véanse [21] y [22]) y para el análisis de sensibilidad (véanse [23] y [24]).

Finalmente, la influencia de la longitud en la resistencia a fatiga, ha sido analizada en sus trabajos [25], [26], [27] y [28].

14. Epílogo

Basados en todos estos méritos y considerando que reúne una experiencia y unos méritos muy relevantes, la Real Academia de Ingeniería aprobó la concesión de la distinción de ingeniero laureado al PROFESOR ALFONSO FERNÁNDEZ CANTELI.

Querido Alfonso, es para mí un honor y una gran satisfacción que, a partir de ahora, formes parte de este distinguido grupo de ingenieros.

MUCHAS GRACIAS.

Referencias

[1] A. Fernández-Canteli, V. Esslinger, and B. Thurlimann. Ermüdungsfestigkeit von Bewehrungs- und Spannstählen. Technical report, ETH Zürich, 1984.

[2] E. Castillo, A. Fernández-Canteli, V. Esslinger, and Thürlimann. Statistical models for fatigue analysis of wires, strands and cables. In *IABSE Proceedings*, volume 82, pages 1–140, 1985.

[3] E. Castillo and A. Fernández-Canteli. A statistical model for lifetime analysis. *Elektrika*, 84:5–21, 1986.

[4] E. Castillo, A. Fernández Canteli, and A.S. Hadi. On fitting a fatigue model to data. *International Journal of Fatigue*, 21:97–106, 1999.

[5] E. Castillo and A. Fernández-Canteli. A general regression model for lifetime evaluation and prediction. *International Journal of Fracture*, 107:117–137, 2001.

[6] E. Castillo, A. Ramos, R. Koller, M. López-Aenlle, and A. Fernández-Canteli. A critical comparison of two models for assessment of fatigue data. *International Journal of Fatigue*, 30(1):45–57, 2008.

[7] E. Castillo, A. Fernández-Canteli, and R. Ruiz-Cobo. Design of statistical lifetime models by functional equations. In Janos Galambos and Imre Kátai, editors, *Probability Theory and Applications, Essays:to the Memory of József Mogyoródi*, pages 279–287. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1992.

[8] E. Castillo, A. Fernández-Canteli, and M. L. Ruiz-Ripoll. A general model for fatigue damage due to any stress history. *International Journal of Fatigue*, 30:150–164, 2008.

[9] E. Castillo and A. Fernández-Canteli. A parametric lifetime model for the prediction of high cycle fatigue based on stress level and amplitude. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 29:1031–1038, 2006.

[10] R. Koller, M. L. Ruiz-Ripoll, A. García, A. Fernández-Canteli, and E. Castillo. Experimental validation of a statistical model for the Woehler field corresponding to any stress level and amplitude. *International Journal of Fatigue*, 31:231–241, 2009.

[11] E. Castillo, A. Fernández-Canteli, H. Pinto, and M. López-Aenlle. A general regression model for statistical analysis of strain-life data. *Materials Letters D*, 62:3639–3642, 2008.

[12] A. Fernández-Canteli, e. Castillo, H. Pinto, and M. López-Aenlle. Estimating the S-N field from strain-lifetime curves. *Strain*, in press, 2008.

[13] E. Castillo, A. Luceño, A. Montalbán, and A. Fernández-Canteli. A dependent fatigue lifetime model. *Communications in Statistics, Theory and Methods*, 16(4):1181–1194, 1987.

[14] E. Castillo, A. Fernández-Canteli, A. Ascorbe, and E. Mora. Aplicación de los modelos de series temporales al análisis estadístico de la resistencia de tendones de puentes atirantados. *Anales de Ingeniería Mecánica*, 2:379–382, 1984.

[15] E. Castillo, A. Fernández-Canteli, A. Ascorbe, and E. Mora. The Box-Jenkins model and the progressive fatigue failure of large parallel elements stay-tendons. In *Statistical extremes and applications*. ASI-NATO, 1983.

[16] E. Castillo, A. Fernández-Canteli, H. Pinto, and M. L. Ruiz-Ripoll. A statistical model for crack growth based on tension and compression Wöhler fields. *Engineering Fracture Mechanics*, 75:4439–4449, 2008.

[17] A. Fernández-Canteli, A. Garcia-Prieto, E. Castillo, and M. J. Lamela. A design model for glass elements based on the statistical distribution of crack sizes. *Key Engineering Materials*, pages 264–268, 2004.

[18] A. Fernández-Canteli, M. J. Lamela, M. J. Garcia-Prieto, and E. Castillo. Strength characterization of glass by means of the statistical theory of confounded data. *Key Engineering Materials*, pages 1923–1926, 2004.

[19] E. Castillo, A. Fernández-Canteli, M. López-Aenlle, and M. L. Ruiz-Ripoll. Some fatigue damage measures for longitudinal elements based on the Wöhler field. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 30:1063–1075, 2007.

[20] E. Castillo, A. Fernández-Canteli, M. López-Aenlle, and M. L. Ruiz-Ripoll. Some fatigue damage measures for longitudinal elements based on the Woehler field. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 30:1063–1075, 2007.

[21] A. Fernández-Canteli. Statistical interpretation of the Miner-number using an index of total damage. In *IBASE Colloquium*, Lausanne, 1982.

[22] A. Fernández-Canteli. Statistical interpretation of the Miner-number using an index of probability of total damage. In *IABSE Colloquium Fatigue of Steel and Concrete Structures, Lausanne*, 1982.

[23] E. Castillo, A. Fernández-Canteli, A. S. Hadi, and M. López-Aenlle. A fatigue model with local sensitivity analysis. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 30:149–168, 2007.

[24] E. Castillo, A. S. Hadi, A. Conejo, and A. Fernández-Canteli. A general method for local sensitivity analysis with application to regression models and other optimization problems. *Technometrics*, 46(4):430–444, 2004.

[25] E. Castillo, A. Fernández-Canteli, E. Mora, and A. Ascorbe. Influencia de la longitud en la resistencia a fatiga de tendones de puentes atirantados. *Anales de Ingeniería Mecánica*, 2:383–389, 1984.

[26] E. Castillo, M. López-Aenlle, A. Ramos, A. Fernández-Canteli, R. Kieselbach, and V. Esslinger. Specimen length effect on parameter estimation in modelling fatigue strength by Weibull distribution. *International Journal of Fatigue*, 28:1047–1058, 2006.

[27] E. Castillo, A. Fernández-Canteli, J. R. Ruiz-Tolosa, and J. M. Sarabia. Statistical models for analysis of fatigue life of long elements. *Journal of Engineering Mechanics*, 116:1036–1049, 1990.

[28] M. López-Aenlle, A. Ramos, A. Fernández-Canteli, E. Castillo, R. Kieselbach, and V. Esslinger. Specimen length effect on parameter estimation in modelling fatigue strength by Weibull distribution. *International Journal of Fatigue*, pages 1047–1058, 2006.

D. Alonso Fernández Canteli

Ingeniero Laureado

CONFERENCIA MAGISTRAL

MODELIZACIÓN PROBABILÍSTICA EN FRACTURA Y FATIGA EN EL GRUPO IEMES DE LA UNIVERSIDAD DE OVIEDO

por

Alfonso Fernández Canteli

Dr. Ingeniero Industrial

Profesor Emérito Honorífico de la Universidad de Oviedo

1. Prolegómenos (Tesis doctoral)

En la tesis doctoral [1], dirigida por el Prof. Alarcón, se propusieron una serie de avances en la evaluación de resultados de ensayos de fatiga, que con su aplicación garantizaban una mayor racionalidad y fiabilidad en el dimensionamiento de componentes estructurales y mecánicos, a saber (ver Figs. 1 a 5):

- Evaluación estadística de los resultados de fatiga para la definición del campo S-N en el supuesto de distribución log-normal (Fig. 2).
- Reconocimiento de la importancia de establecer una relación entre las distribuciones $F(\Delta\sigma, N)$ y $E(N, \Delta\sigma)$ para una definición analítica del campo $S - N$ (Fig. 3).
- Formulación empírica para la consideración del efecto de escala en alambre de pretensado y torones.
- Normalización del campo $S-N$ como reducción de los resultados en diferentes rangos de tensión a un único rango de tensión (Fig. 4).
- Estimación de vida a fatiga de componentes bajo carga variable, basada en la normalización anterior y en un concepto probabilístico del daño acumulado (Miner probabilístico) (Fig. 5).

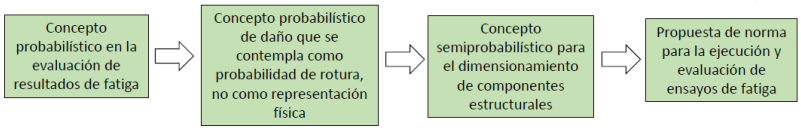


Fig. 1: Esquema del concepto probabilístico de dimensionamiento en fatiga. De [1].

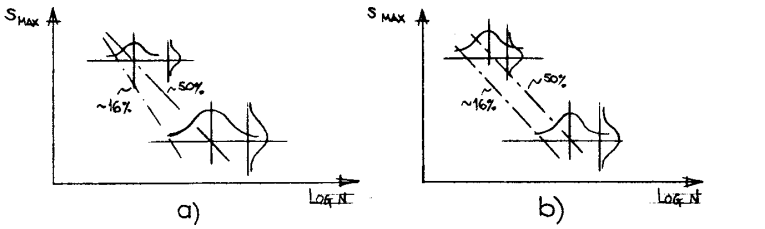


Figura 1: Esquema del concepto probabilístico de dimensionamiento en fatiga. De [1].

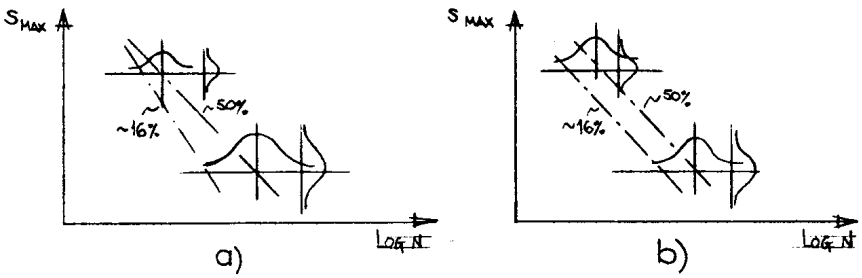


Figura 2: Simplificaciones del campo de dispersión de la curva de Wöhler mediante una solución lineal. De [1].

2. Establecimiento de la condición de compatibilidad

Sin embargo, el estudio adolecía de un enfoque predominantemente ingenieril, sobre una base empírica sin consistencia estadística, suponiendo una distribución log-normal.

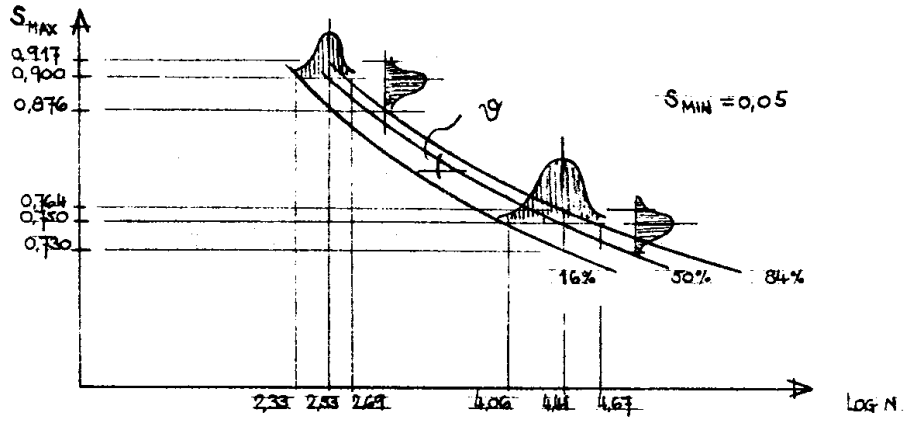


Figura 3: Estudio de la compatibilidad y de la variabilidad en el campo de de S_{max} y $\log N$ a través de propuesta de ecuación de Holmen. De [1].

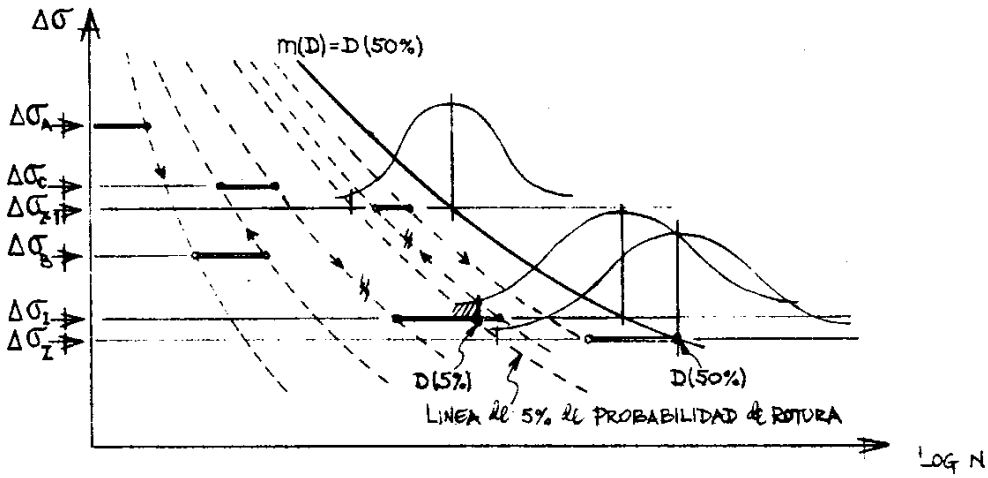


Figura 4: Proceso de transmisión del número de ciclos para varios niveles según la hipótesis "D" de daño acumulado. De [1].

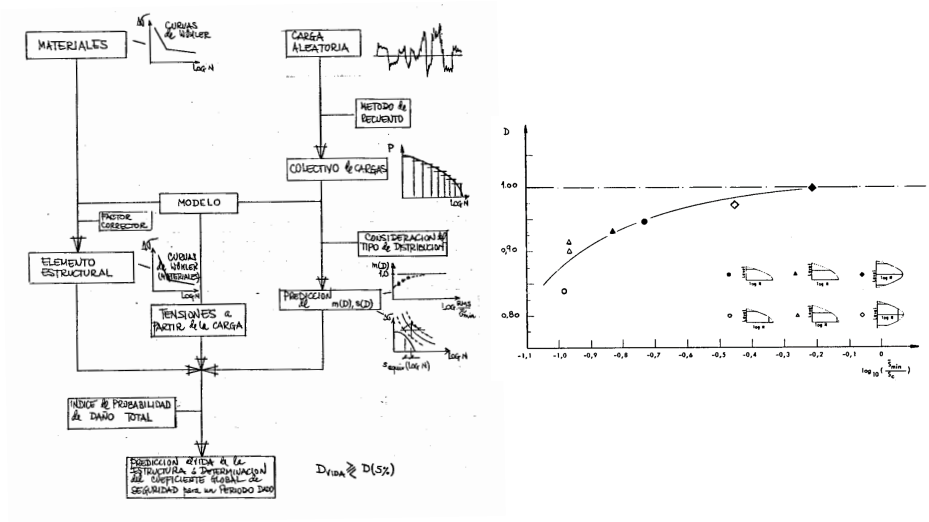


Figura 5: Esquema general del concepto de seguridad en fatiga bajo carga aleatoria; b) Corrección empírica del valor medio del índice de daño, con ayuda de resultados experimentales. De [1].

De hecho,

- La normalización se deducía mediante la hipótesis de constancia del coeficiente de variación en la distribución $F(\Delta\sigma, N)$ (Fig. 2).
- Las distribuciones $F(\Delta\sigma, N)$ y $E(N, \Delta\sigma)$ se suponían independientes, a falta de establecer su relación (o a partir de la dispersión en un ensayo estático) o compatibilidad (Fig. 3).
- La consideración del efecto de escala no contemplaba la necesidad de estabilidad de la distribución en la consideración del efecto de escala (normal extendida).
- No se aplicaba la estadística de extremos.

Las consultas realizadas a profesores de Estadística e Investigación Operativa de la ETH de Zurich, condujeron a la recomendación de aplicación del método Staircase que demostró no ser adecuado, ni suficiente, para resolver las contradicciones del modelo en su aplicación en el análisis de resultados de fatiga de armaduras activas y pasivas de hormigón armado.

En noviembre de 1982, tras la oportuna consulta con el Prof. Enrique Castillo de la Universidad de Cantabria, para tratar de garantizar un dimensionamiento

fiable de cables de puentes atirantados y pretensados bajo condiciones de fatiga, se inició una colaboración con el Prof. Thürlimann de la ETH de Zurich y el Dr. Esslinger del EMPA, que culminó con una propuesta de solución del Prof. Castillo sobre el modelo del campo $S-N$ (ver Fig. 6 y 7) que implicaba: a) satisfacción de condiciones físicas y estadísticas en el modelo, b) establecimiento de una ecuación funcional y c) su solución [2,3].

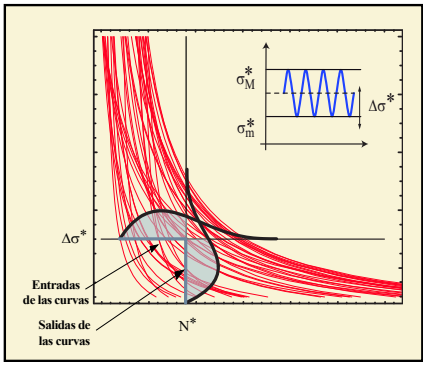


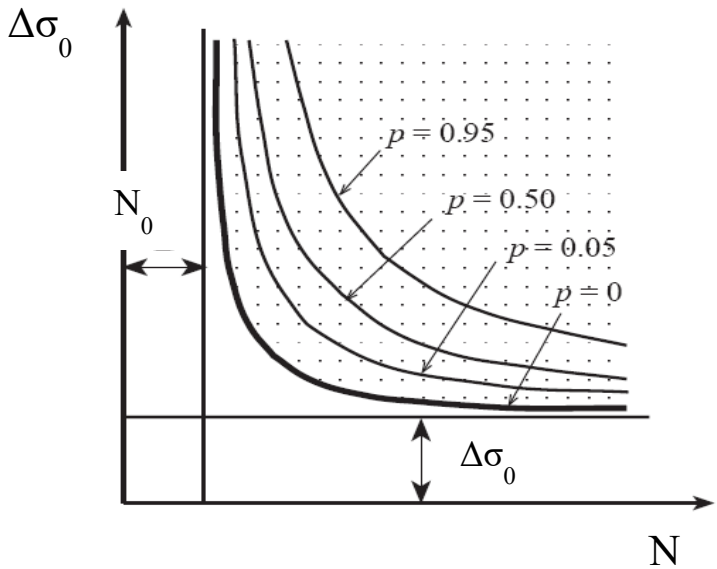
Figura 6: Curvas S-N, en rojo, correspondientes a diferentes probetas e ilustración de la condición de compatibilidad.

El modelo aportaba importantes avances en el estudio de fatiga, como se fue comprobando posteriormente, tales como:

- Definición probabilística del campo S-N, como funciones de distribución de Weibull, a partir de una evaluación sistematizada de los cinco parámetros del modelo.
- Normalización del campo $S-N$ y su reducción a una simple función de distribución mediante la definición de una nueva variable de normalización

$$V = (\log(\Delta\sigma/\Delta\sigma_0)(\log N/N_0).$$

- Interpretación de relación entre las curvas percentiles del campo $S-N$ y el tamaño máximo de grieta presente en cada probeta y en la muestra.
- Consideración simple del efecto de escala.
- Optimización en la estrategia de ensayos basada en el modelo.
- Justificación de la existencia de un límite asintótico de fatiga, como parámetro del modelo, no incluido en el establecimiento de las condiciones iniciales del modelo y existencia de multiplicidad de mecanismos de fractura con los consiguientes límites de fatiga.



$$F(N;\Delta\sigma) = 1 - exp\left[-\left(\frac{(\log(N/N_0))(\log(\Delta\sigma/\Delta\sigma_0))-\lambda}{\delta}\right)^{\beta}\right];$$

$$V=(\log(N/N_0))(\log(\Delta\sigma/\Delta\sigma_0)) \geq \lambda$$

Figura 7: Ilustración de la condición de compatibilidad en el campo $S - N$; b) Representación y expresión analítica del modelo probabilístico de fatiga propuesto por Castillo y Fernández Canteli. De [2-3].

- Posibilidad de extrapolación del modelo en la predicción de fatiga en tiempos de vida superiores a los del ensayo.
- Dimensionamiento a fatiga bajo carga variable, con tratamiento del problema como daño acumulado.
- Demostración de generalización de la condición de compatibilidad como metodología general para el establecimiento de otros posibles modelos de fractura y fatiga.
- Demostración de su superioridad respecto a otros modelos (Basquin, Coffin-Manson) y métodos, como por ej. Staircase o Probit, en lo concerniente a

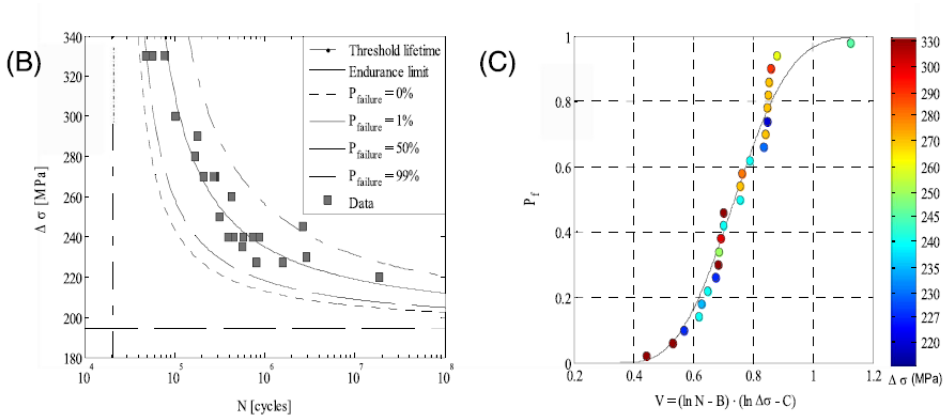


Figura 8: Ejemplo de ajuste de resultados experimentales de fatiga mediante el programa ProFatigue, basado en el modelo probabilístico del campo $S-N$ propuesto por Castillo y Fernández Canteli. De [4].

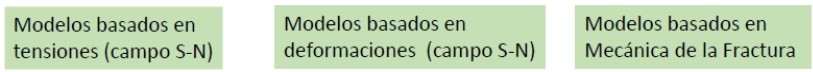


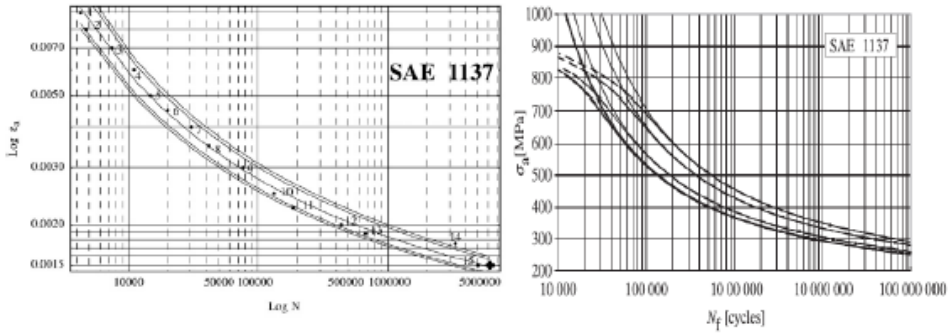
Figura 9: Los tres modelos convencionales utilizados en el análisis de fatiga.

fiabilidad y menor coste (reducción del número de probetas ensayadas y del tiempo global de la campaña de ensayo).

3. Extensión a otros modelos de fatiga y fractura

La aplicación de la condición de compatibilidad se hizo extensiva a nuevos modelos de fatiga y fractura, lo que permitió aplicar el mismo modelo general de Weibull del modelo de fatiga basado en tensiones, a los modelos de fatiga basados en deformaciones. Se amplió la aplicabilidad introduciendo el nivel de tensión como variable adicional, y se desarrollaron nuevas soluciones a los modelos de fatiga de crecimiento de grieta por fatiga.

Paralelamente en colaboración con Cristalería Saint-Gobain, se inició la aplicación de modelos probabilísticos en el dimensionamiento de componentes estructurales de vidrio, en donde se abordaron dos problemas, que supondrán una de-



$$p = F(N;\Delta\varepsilon) \quad = \quad 1 - \exp\left\{-\exp\left[\frac{(\log N - B)(\log \Delta\varepsilon - C) - \lambda}{\delta}\right]\right\},$$

Figura 10: El modelo probabilístico de fatiga en el campo $\epsilon - N$ propuesto por Castillo y Fernández Canteli. De [3].

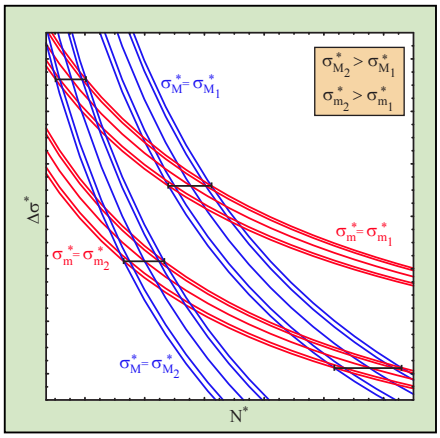


Figura 11: Condición de compatibilidad en los campos S-N deducidos para tensión máxima o tensión mínima constantes. De [3].

terminante contribución futura en el modelo local generalizado (GLM): el caso de datos confundidos y el problema de escala en fractura bajo condiciones de carga no uniforme [7].

En esta etapa, a la colaboración con el Prof. Castillo se añadió la del Prof.

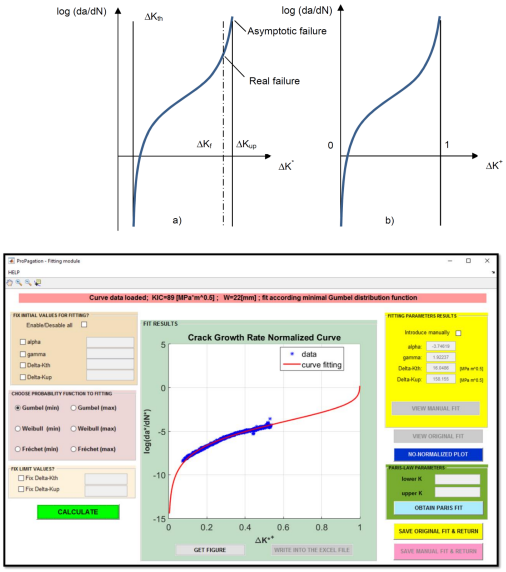


Figura 12: Esquema de ajuste del modelo local generalizado y conversión de funciones de distribución experimentales a la función de distribución primaria. De [12-13].

Kalthoff de la Ruhr Universität Bochum y de los Profesores Manuel Doblaré, José Fernández y Eugenio Giner, para el estudio de constricción y modo mixto en fractura, mediante la consideración del concepto tensorial de la intensidad de tensión, lo que permitió demostrar la falta de rigor de los conceptos clásicos de la Mecánica de la Fractura, como TP, DP, modelo "Dogbone", modelo de Sih y la insuficiencia del modelo biparamétrico en constricción, entre otros [8-11].

4. El modelo Local Generalizado

El modelo local generalizado (GLM) [12,13] es un modelo probabilístico que permite transformar la fdd de rotura experimental, EFCDF, obtenida para la distribución del parámetro de referencia o parámetro general (GP), a la fdd de rotura primaria, PFCDF, para distribución uniforme del GP. Garantiza la transferibilidad y el cálculo de la probabilidad de fallo local (a nivel de elemento finito) y global (a nivel de componente). Se puede definir según dos aproximaciones: como GP equivalente o bien según tamaño equivalente. El modelo se hace extensivo al análisis de fatiga en el tratamiento del efecto de escala, combinando el modelo local

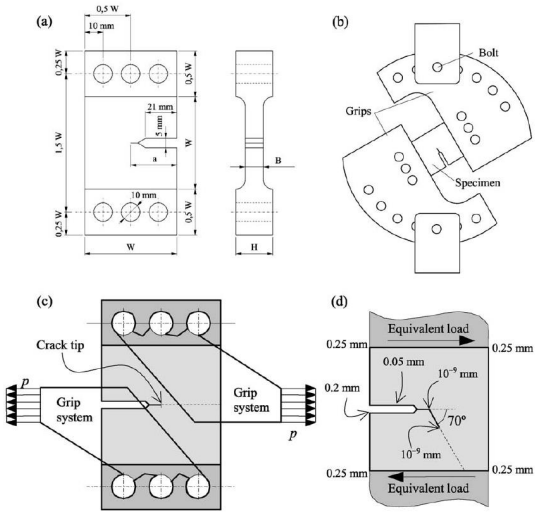


Figura 13: Utillaje en ensayos de fractura en modelo mixto I-II. De [8-9].

generalizado (GLM) con el modelo de regresión de Weibull, propuesto por Castillo y Fernández Canteli [14].

5. Modelos fenomenológicos basados en la estadística de extremos

La modelización de fenómenos que parecen seguir unas pautas definidas como funciones de densidad o de distribución de la familia generalizada de extremos (GEV) al describir la ley de rotura, ha permitido desarrollar:

- Ajuste y extensión asintótica de ensayos de resultados para la definición de la energía de fractura en hormigón mediante una función de máximos de Fréchet (Fig. 20).
- Normalización del proceso de la deformación de hormigón en fatiga como daño de referencia que permite la predicción una anticipada predicción de vida y consiguiente posibilidad de interrupción precoz del ensayo (Fig. 21).
- Soluciones alternativas en la caracterización del comportamiento viscoelástico de materiales, demostrando la inconsecuencia de una ley histórica, como

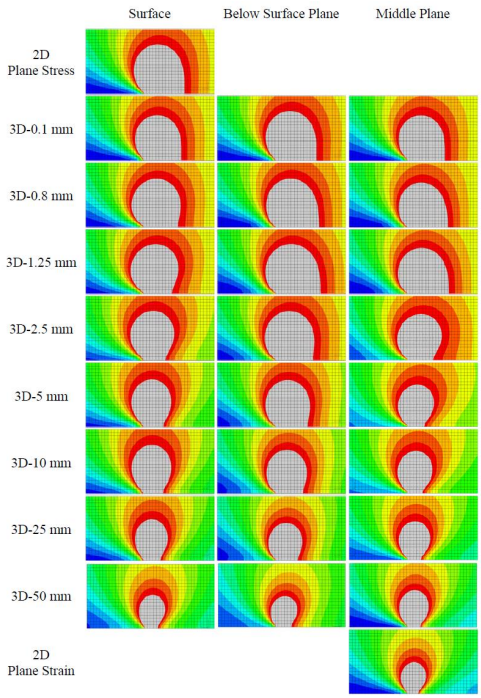


Figura 14: Zonas plásticas en el frente de grieta: b) Detalle de la zona plástica a través del espesor. De [10].

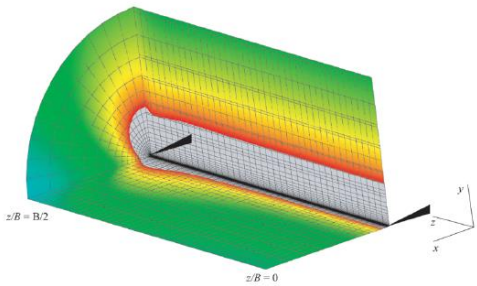


Figura 15: Zonas plásticas en el frente de grieta en función del espesor de probeta. De [10]

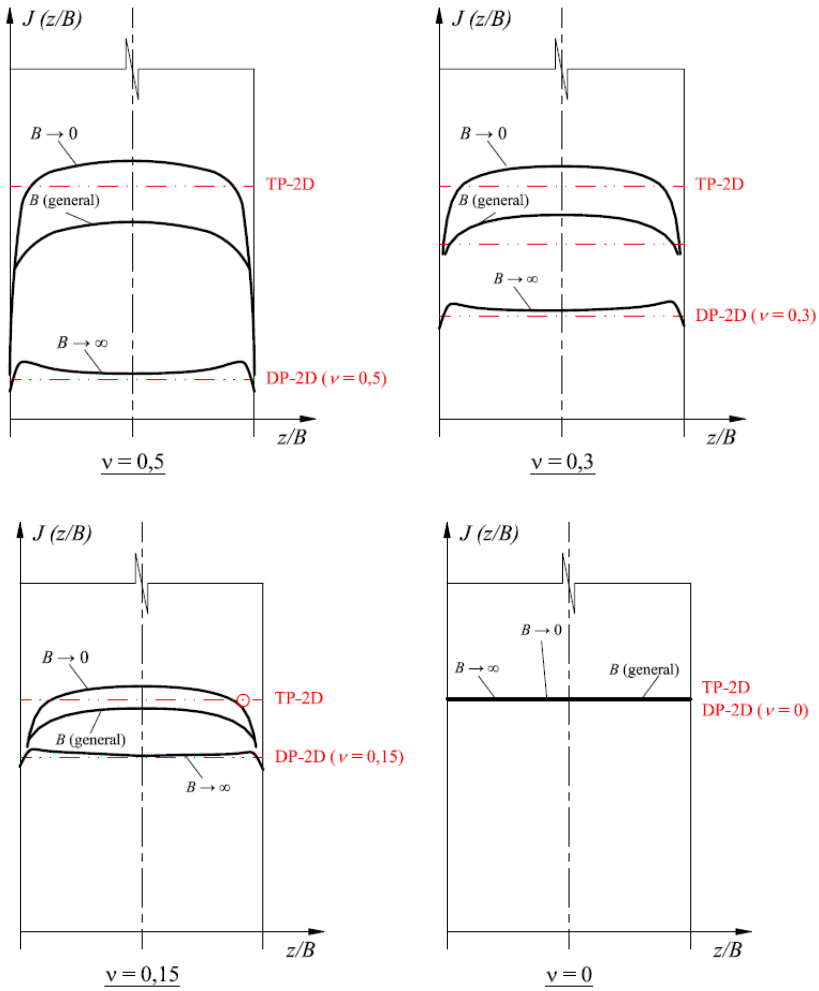


Figura 16: Comparación de la integral J(z/B) para diferentes espesores de probeta y comparación con los valores obtenidos para tensión y deformación plana. De [11].

es la de Williams-Landel-Ferry (WLF), sentando así las bases de una generalización en la modelización a fractura y fatiga de materiales poliméricos. En estos casos interviene la modelización del efecto de temperatura en los ensayos, como efecto de escala, si bien "de doble nivel" en el concepto del modelo básico S-N. (Fig. 22).

- Descripción de la evolución del crecimiento lento de grieta (Slow Crack Growth).

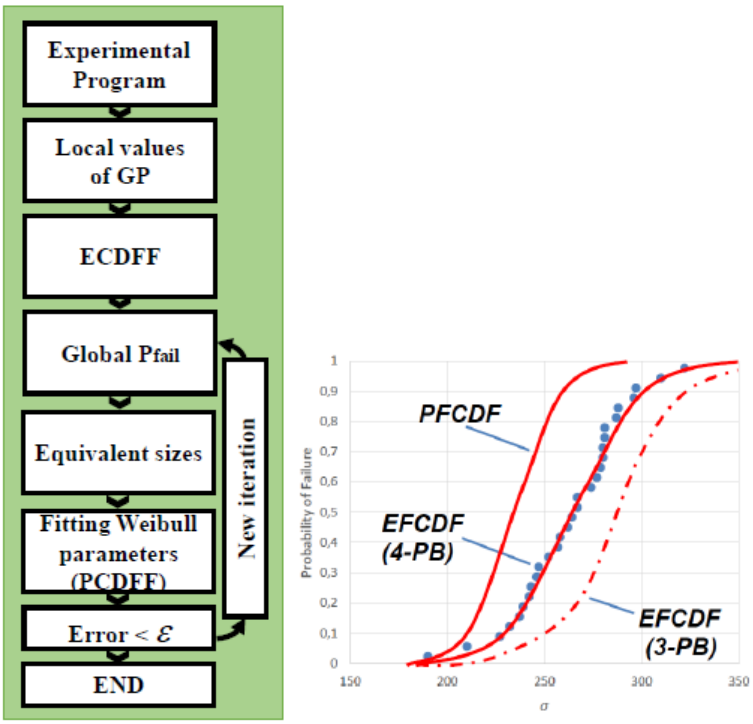


Figura 17: Ajuste de la curva $da/dN - \Delta K$ mediante una función de distribución de la familia estadística de valores extremos. b) Evaluación de resultados experimentales mediante el programa ProPagation. De [5,6].

La justificación de estas modelizaciones se pretende fundamentar en base a las propiedades aleatorias de "elementos primarios" que en un número muy alto constituyen el material de ensayo.

6. Conclusiones

La línea de investigación iniciada en la ETH de Zurich, continuada en la Universidad de Oviedo con el apoyo permanente y decisivo del Prof. Castillo, de la Universidad de Cantabria, junto a una extensa lista de colaboraciones con otros profesores de universidades españolas y extranjeras (UPM, Zaragoza, R.U. Bochum, Oporto, IPM Brno, Carlos III, UPV, Research Center Kazan, UCLM , Sevilla) ha

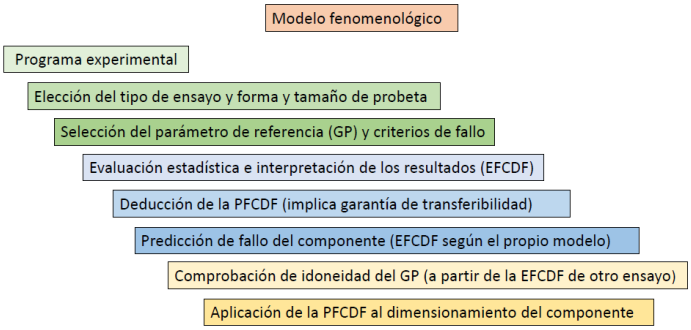


Figura 18: Esquema general de aplicación del modelo local generalizado. De [12-13].

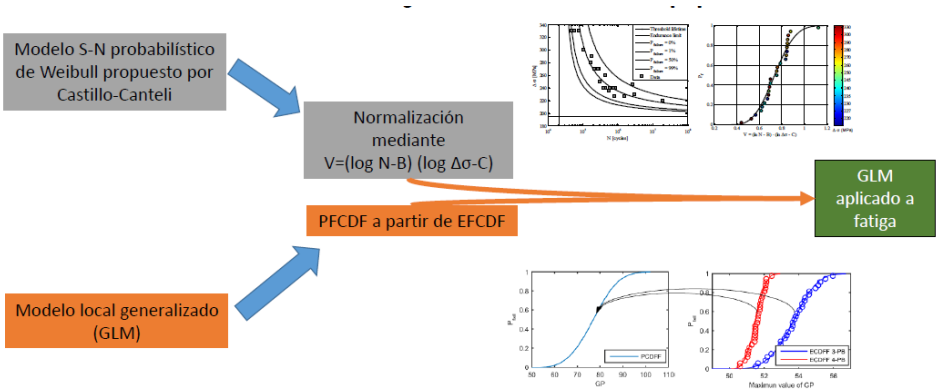
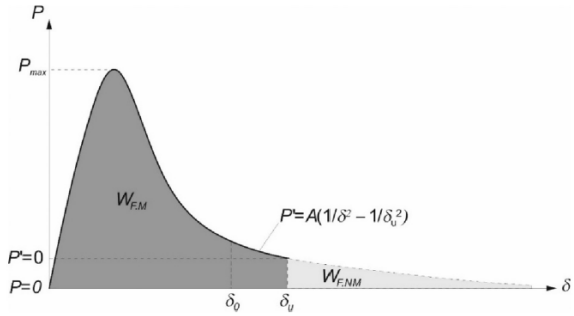


Figura 19: Extensión del modelo local generalizado al caso de fatiga mediante combinación con el modelo probabilístico S-N. De [14].

permitido crear un laboratorio de ensayos de fractura y fatiga ejemplar (ver Fig. 22). y mantener un progreso continuo en esos campos focalizado en su aplicación en ingeniería.

En todo este proceso, que representa la principal actividad que el candidato ha realizado en su condición de profesor de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón de la Universidad de Oviedo, los avances logrados en la modelización, basada en la compatibilidad (propuesta por el Prof. Castillo), en los modelos fenomenológicos basados en la familia GEV y en el modelo local generalizado, han resultado trascendentales como importante contribución en el avance y mejora del

$$f_{Fréchet}(\delta;\lambda,\gamma,\beta) = \frac{\beta}{\gamma}\left[\frac{\gamma}{\delta-\lambda}\right]^{\beta+1} exp\left[-\left(\frac{\gamma}{\delta-\lambda}\right)^{\beta}\right]; \qquad x > \lambda$$



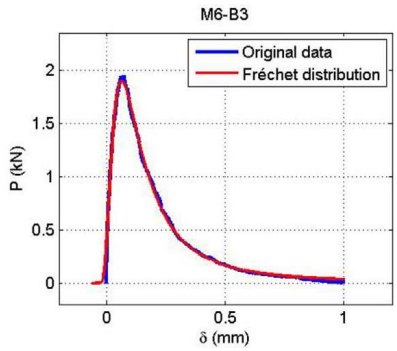


Figura 20: Modelización de la curva de fractura en hormigón, como función de densidad de Fréchet de máximos.b) Ajuste en hormigones de diferentes resistencias. De [15].

dimensionamiento probabilístico de componentes mecánicos y estructurales reales en materiales de diferente naturaleza.

7. Agradecimientos

Expreso aquí mi gratitud y reconocimiento a todos lo que han contribuido a esos logros en la investigación y a su proyección en la docencia y en la práctica de la Ingeniería y a la Real Academia de Ingeniería, en particular, a su Presidente Elías Fereres, a Enrique Castillo, Manuel Doblaré y Jaime Domínguez, que han promovido la concesión de esta distinción como Ingeniero Laureado que tanto aprecio. También quiero recordar a mis profesores de la ETH de Zurich, Bruno Thürlimann

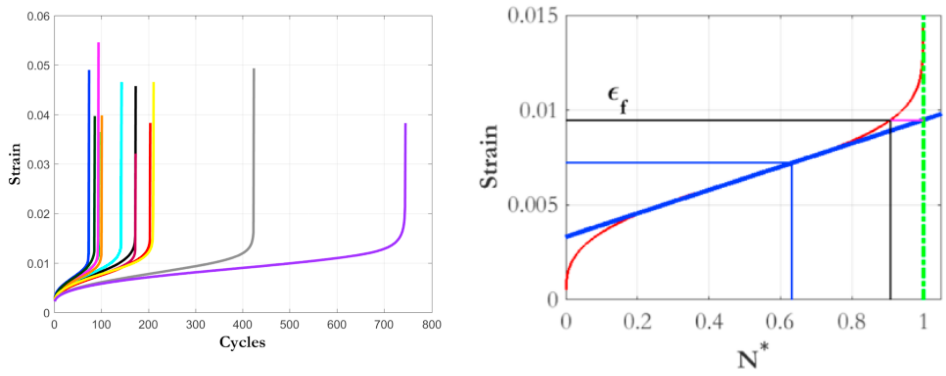


Figura 21: Daño medible (predicción de monitorización) y daño terminal (predicción) en el estudio de daño de hormigones bajo carga de fatiga. De [16].

y Hugo Bachmann a los que debo mi inicio en la carrera universitaria y su apoyo en unos momentos difíciles de mi vida profesional, así como a mi director de tesis, el Prof. Enrique Alarcón y a una larga lista de personas, imposible de resumir, que han influido decisivamente en mi trayectoria académica y personal.

Finalmente, no puedo menos de reconocer la contribución de mis padres, que me inculcaron los valores del sentido del deber y de la responsabilidad en el estudio y en el trabajo y el respeto y creencia en las instituciones y el apoyo de mi familia más cercana que ha sufrido la aplicación de esos principios.

8. Bibliografía

[1] Fernández Canteli A., "Criterios para la normalización de ensayos de fatiga en armaduras activas y pasivas de hormigón armado y pretensado", UPM, 1981.

[2] Castillo E., Fernández Canteli A. Esslinger V., Thürlimann, Statistical models for fatigue analysis of wires, strands and cables, IABSE Proceedings, 82, 1-14, 1982.

[3] Castillo E., Fernández Canteli A., A unified methodology for modeling fatigue damage, Springer 2009.

[4] Fernández Canteli A., Przybilla C., Nogal M., López Aenlle M., Castillo E., ProFatigue: A software program for probabilistic assessment of experimental fatigue data sets, Procedia Engineering, 74, 236-241, 2014.

[5] Castillo E., Fernández Canteli A., Siegele D., Obtaining S-N curves from

Figura 22: Dos panorámicas del Laboratorio de Ensayos del área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad de Oviedo.

crack growth curves. An alternative to self-similarity, Int. J. of Fracture, 187,(1), 159-172, 2014.

[6] Blasón González S., Phenomenological approach to probabilistic models of damage accumulation. Application in the analysis and prediction of fatigue crack growth, PhD Thesis, University of Oviedo, 2017.

[7] Muniz-Calvente M., Pelayo F., Lamela M.J., Álvarez-Vázquez A., Fernández Canteli A. Probabilistic failure analysis for real glass components under general loading conditions, Fatigue & Fracture of Eng. Materials and Structures, 42, 1283-1291, 2019.

[8] Fernández Zúñiga D., Fernández Canteli A., Doblaré M., Kalthoff J.F., Bergmannshoff D., Novel test criteria for determining fracture toughness under pure mode-II and mixed-mode loading, 14th European Conference of Fracture, Krakow, Vol. I, 521-530, 2002.

[9] Kalthoff J.F., Fernández Canteli A, Blázquez, Fernández Zúñiga D., Singular stress fields and instability conditions for mode-II and mixed-mode loaded cracks, Strength, Fracture and Complexity, 2006.

[10] Fernández Zúñiga D., Kalthoff J.F., Fernández Canteli A., Grasa J., Doblaré M., Three-dimensional finite element calculations of crack tip plastic zones and KIc specimen size requirements, 15th European Conference on Fracture, Stockholm, 2004.

[11] Giner E., Fernández Zúñiga D., Fernández Sáez J., Fernández Canteli A., Int.J. of Solids, On the Jx1-integral and the out-of-plane constraint in a 3D elastic plate, International Journal of Solids Structures, 47 (7-8), 934-946, 2010.

[12] Muñiz-Calvente M., The generalized local model: A methodology for probabilistic assessment of fracture under different failure criteria, PhD Thesis, University of Oviedo, 2017.

[13] Muñiz Calvente M., Fernández Canteli A., Shlyannikov V., Castillo E., Probabilistic Weibull methFodology for fracture prediction of brittle and ductile materials, Applied Mechanics and Materials, Vol. 784, 443-451, 2015.

[14] Muñiz-Calvente M., Fernández Canteli A., Pyttel B., Castillo E., Probabilistic assessment of VHCF data as pertaining to concurrent populations using a Weibull regression model, Fatigue and Fracture of Eng. Mat. and Structures. 40,11,1772-1782, 2017.

[15] Fernández-Canteli A., Castañón-Jano L., Cifuentes H, Muñiz-Calvente M., Castillo E., Fitting the fracture curve of concrete as a density function pertaining to the generalized extreme value family, Materials and Design., 129, 201-209, 2017.

[16] Blasón S., Poveda E., Ruiz G., Cifuentes H., Fernández-Canteli A., Twofold normalization of the cyclic creep curve of plain and steel-fiber reinforced concrete and its application to predict fatigue failure, Int. J. of Fatigue, 120, 215-227, 2019.

Sesión reconocimiento

Ingeniero Laureado

GALERÍA FOTOGRÁFICA

Elías Fereres saluda a Alfonso Fdez. Canteli

Alfonso Fdez. Canteli y su esposa con Jaime Domínguez Abascal y Enrique Castillo

Alfonso Fdez. Canteli con Jaime Domínguez Abascal

Enrique Castillo durante la Laudatio

Alfonso Fdez. Canteli recibiendo el diploma y la escultura

Alfonso Fdez. Canteli durante su intervención

SCIENTIA INGENIUM HUMANI