

Predicción de vida en estructuras

Estudio y tratamiento de la durabilidad estructural. Una breve reseña

Sergio Oller, Eugenio Oñate

Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería
Universidad Politécnica de Cataluña. Centro Internacional de Métodos
Numéricos en Ingeniería (CIMNE).

Resumen

El presente trabajo es una breve reseña sobre el problema de la predicción de vida, o estudio de la durabilidad, de los materiales estructurales sometidos a acciones mecánicas, térmicas y químicas. Este documento está enfocado desde las técnicas numéricas y resalta la potencialidad de este tipo de herramienta en el estudio de estructuras sometidas a fenómenos altamente complejos y acoplados.

Palabras clave

Métodos numéricos, elementos finitos, fatiga, daño y degradación, vida y durabilidad de los materiales.

Breve reseña sobre los fenómenos que reducen la vida de los materiales estructurales. Durabilidad

La mejora en el rendimiento industrial de los procesos de fabricación de las estructuras, exige nuevas técnicas de predicción que hagan a estos procesos más fiables, rápidos y de bajo coste. A esto hay que añadir que la responsabilidad futura sobre las estructuras hace que el fabricante exija también más fiabilidad en el producto obtenido. La fiabilidad es un concepto que debe extenderse en el tiempo, es decir, que hay que garantizar la "durabilidad" del material estructural. Esta exigencia de "fiabilidad" y "durabilidad" es muy compleja y arriesgado garantizarla "a priori", sin embargo, actualmente hay herramientas de simulación del comportamiento de "predicción de vida" e "integridad" durante la vida de la pieza estructural, que están basadas en técnicas numéricas y en la mecánica clásica. Un ejemplo de esta herramienta lo constituye el "método de los elementos finitos" (MEF) (Zienkiewicz, Taylor (1998), Oñate (1992)) y sus diversas aplicaciones al estudio y control de los procesos mecánicos.

La durabilidad estructural es un concepto que debe precisarse según el tipo de elemento estructural y su utilización, pues no puede exigirse la misma integridad en el tiempo para todo tipo de estructuras y bajo cualquier acción. La definición del período de durabilidad estructural lo establece la seguridad requerida a través de las demandas del mercado y está muy reñida con los costes de producción de la estructura. Es así, que es necesario profundizar en la investigación y desarrollo de herramientas capaces de garantizar cualitativa y cuantitativamente la integridad de una pieza estructural durante un período establecido para la prestación del servicio para el que ha sido diseñada.

Normalmente la durabilidad estructural depende de distintas situaciones:

- Una correcta solución de los problemas del diseño estructural geométrico para alcanzar una forma óptima. Este problema se afronta mediante técnicas

numéricas de optimización a partir de la definición de una función objetivo, cuya minimización, respecto de las variables de diseño, da la respuesta a la forma óptima buscada.

- El control del deterioro en el material producido por acciones mecánicas, térmicas, higrométricas y químicas, previstas o no, durante el tiempo de vida estructural. Estos problemas están causados por las acciones:
 - o estáticas y/o dinámicas (impactos, vibraciones, cargas de viento, sismos, movimientos diferenciales, etc.),
 - o de las altas y bajas temperaturas (criogenización, acción del fuego, etc.),
 - o de la humedad y de agresiones químicas (oxidación en metales, aluminosis y carbonatación de los cementos, etc.),
 - o acción de las radiaciones y efectos de descomposición de la materia (radiaciones ultravioletas en compuestos, etc.),

Estas situaciones provocan deterioro estructural en forma de microfisuras, fracturas, fatiga y distorsiones de la estructura interna del material, y deben ser estudiados bajo la óptica de los fenómenos mecánicos de fractura, degradación, plasticidad, viscoelasticidad, fatiga y daño químico-mecánico.

Todas estas complejas concurrencias de situaciones que se desarrollan en un material provocadas por las diversas causas mencionadas, son las que ponen en peligro la durabilidad del material e indirectamente la estructura. Son las técnicas numéricas, como el método de los elementos finitos, una de las pocas herramientas disponibles de diseño, control y predicción de vida, que garantiza seguridad y buen funcionamiento estructural durante el tiempo esperado de vida para dicha pieza.

Técnicas para el estudio de la durabilidad

La industria busca constantemente tener conocimiento cierto sobre la durabilidad de los materiales, sobre todo aquellos que cumplen funciones estructurales. En el pasado se tenía idea cualitativa sobre la vida o durabilidad de los materiales estructurales, estableciendo conclusiones a la luz de hechos ocurridos y errores cometidos. Naturalmente que esta forma de estudio no garantiza ni satisface a la industria ni al consumidor, porque la certidumbre sobre la durabilidad resulta posterior a la utilización de la estructura. Esto a forzado a

desarrollar estudios cuantitativos que arrojen más luz sobre la durabilidad estructural, y así podría decirse que han surgido dos técnicas de estudios:

- Una basada en estudios experimentales de laboratorio,
- Otra apoyada en simulaciones previas mediante técnicas numéricas.

En un principio puede decirse que ambas técnicas son complementarias una de otra, pero cada vez más se intensifican los estudios numéricos, porque son más baratos, rápidos de realizar y últimamente se está verificando su gran fiabilidad. A continuación se hace una breve presentación de ambos procedimientos.

Métodos de estudio y evaluación basados en ensayos de laboratorio.

La primera forma científica con que se afrontó el estudio de la durabilidad estructural ha sido mediante estudios de laboratorio (Wöhler 1871, Forrest (1962), Osgood (1982)). Los resultados que de ellos se obtienen son fundamentales para conocer el comportamiento y durabilidad del material y, además, sirven como base de estudio y parametrización de métodos analíticos y numéricos. Esto da carácter de indispensable al estudio experimental, sin embargo, siempre debe analizarse objetivamente el tipo de estudio que puede realizarse y el consecuente resultado que puede obtenerse por la vía experimental. De un rápido análisis se desprende que los resultados obtenidos experimentalmente no pueden extrapolarse fácilmente a la realidad que se quiere estudiar. Además, el elevado coste de un estudio experimental y las limitantes condiciones de observación que ofrece un laboratorio para reproducir el comportamiento en el tiempo de estructuras reales, no permiten a ésta metodología obtener todos los resultados concluyentes y seguros que exige la industria y el consumidor.

De una breve presentación del problema se deduce que, es necesario añadir al estudio experimental otro estudio "mecánico-numérico" complementario. Esto permite extender las conclusiones del laboratorio al problema real a partir de bases sólidas sustentadas en las leyes de la mecánica y utilizadas a través de técnicas numéricas. En forma resumida puede decirse que, la simulación en el tiempo, predicción de vida o durabilidad, de una estructura real necesita apoyarse en las siguientes bases:

- Ensayos de laboratorio de los materiales y partes estructurales,
- La mecánica de medios continuos,
- Las técnicas numéricas, particularmente el método de los elementos finitos.

Dado que el presente trabajo se orienta a presentar el estudio "mecánico-numérico" del problema de durabilidad estructural, se abandona éste apartado sobre las técnicas experimentales para pasar a mencionar las técnicas numéricas de estudio, que se centrarán básicamente en el método de los elementos finitos.

Métodos basados en técnicas numéricas

Como ya se ha mencionado previamente, los estudios "mecánico-numéricos" permiten una "extrapolación conceptual" de los fenómenos observados en el laboratorio. Existen distintos procedimientos numéricos para aproximar la mecánica a la resolución de un problema real. Unos métodos, como las diferencias finitas, están basados en aproximar las ecuaciones diferenciales de la mecánica, y otros como el método de los elementos finitos, orientados a aproximar los campos incógnitas establecidos por las leyes de la mecánica. Naturalmente que estas metodologías no resuelven el problema por sí mismas, pues sólo establecen el "vehículo" sobre el que se introducirán las formulaciones de la mecánica. En el caso particular del estudio de la durabilidad estructural, el método numérico tiene la misión de gestionar el acoplamiento entre las siguientes formulaciones mecánicas,

- Ley de comportamiento de micro fisuración y fractura,
- Ley de comportamiento de plasticidad en metales y extensión de la formulación a problemas no metálicos,
- Ley de comportamiento de degradación o daño estructural,
- Ley de comportamiento viscoelástico y viscoplástico,
- Ley de comportamiento que haga sensible las leyes de la mecánica al problema de fatiga de metales y no metales,
- Leyes que establecen el acoplamiento químico-mecánico en materiales metálicos y no metálicos.

El método de elementos finitos (MEF) como técnica de aproximación del comportamiento no lineal de las estructuras

El MEF es un método muy apropiado para resolver muchos de los problemas de la mecánica y su éxito

radica, desde el punto de vista de un usuario, en muchas virtudes y pocos defectos. Entre las ventajas más importantes se podrían destacar las siguientes,

- La facilidad que ofrece el MEF para la aproximación de las variables de la mecánica en dominios complejos,
- La facilidad en la incorporación de las condiciones de contorno real del problema a resolver,
- La ya probada y eficiente forma de su implementación computacional.

Todo ha sido posible gracias al fuerte desarrollo que han tenido los ordenadores en los últimos veinte años. De no haber sido así, hoy no sería posible presentar al método de elementos finitos como una herramienta de evaluación de comportamiento estructural utilizable por la industria.

Es difícil precisar los orígenes del método de elementos finitos, pues hay técnicas matemáticas muy similares ya establecidas en la segunda mitad del siglo XIX, tal como el método de Ritz (Zienkiewicz, Taylor (1998)). Sin embargo, el MEF utilizado como herramienta de cálculo en la ingeniería es más reciente y podría establecerse que fue Courant en 1943, quién formuló y utilizó ésta técnica para resolver el problema de torsión de Saint-Venant, poniendo así el origen del tiempo para futuras aplicaciones ingenieriles. En 1953, Argyris, Turner, Clough, Martín y Topp firman el primer trabajo bajo el nombre del "método de los elementos finitos" y apoyados en las bases del método de "Ritz". Por la misma época aparecen ya trabajos de otros investigadores como Zienkiewicz, Melosh, Tocher, etc., quienes hoy ya son conocidos como los pioneros de la utilización del MEF en la solución de problemas de la mecánica y más particularmente de problemas estructurales y geotécnicos.

Las diferencias fundamentales entre el método de Ritz y el MEF son las siguientes (Zienkiewicz (1994)),

- Ritz: Utiliza una formulación aproximada del campo incógnita en todo el dominio y ésta debe cumplir las condiciones de conformidad en todo el dominio.
- MEF: Utiliza una formulación aproximada del campo incógnita para una parte del dominio, denominado "elemento finito". Esta función debe cumplir las condiciones de conformidad localmente dentro del elemento finito y además debe cumplir con

ciertas condiciones de continuidad entre elementos adyacentes.

El método de los elementos finitos (MEF) – Subdivisión del dominio.

La exigencia de la "condición de compatibilidad de desplazamientos" en una formulación mecánica aplicada a la resolución de estructuras, conduce a un método cuyas incógnitas son las fuerzas. Como alternativa puede exigirse la "condición de equilibrio entre fuerzas" y de aquí resulta una formulación cuyo campo incógnita son los desplazamientos. Estas dos formas conjugadas de presentar la formulación para la resolución de las estructuras pueden ser tratadas por el MEF, e incluso puede proponerse una forma mixta de formulación. Pese a esta diversidad de posibles formulaciones, por simplicidad en el tratamiento de las condiciones de borde, es más común utilizar el MEF en el contexto de una formulación en desplazamientos.

Definido el campo incógnita, el MEF establece un procedimiento de aproximación funcional en dos niveles,

- Aproximación a escala elemental: Definición de la aproximación funcional en un dominio finito contenido dentro del dominio global (ver Figura 1),
- Aproximación a escala global o estructural: Imposición de las condiciones de compatibilidad y equilibrio entre dominios elementales (ver Figura 1).

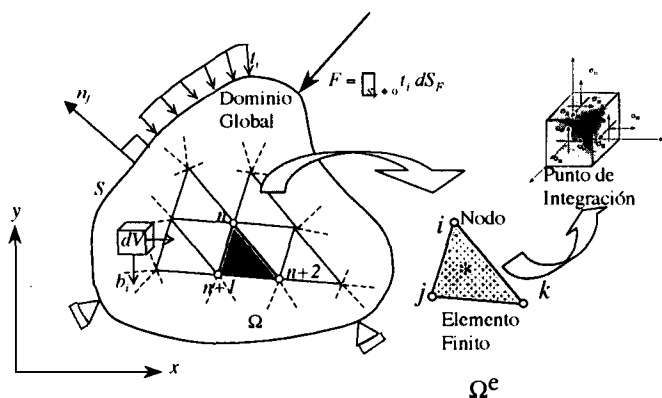


Figura 1 - Representación esquemática de un dominio global y su subdivisión en dominios locales.

El método de los elementos finitos (MEF).

Definición del equilibrio elemental y global.

La ecuación de equilibrio mecánico de un sólido sometido a acciones externas termo-mecánicas puede obtenerse directamente a partir de la 1ra. ley de la termodinámica (Malvern (1969), Lubliner (1990)). Su solución consiste en obtener los desplazamientos $u_i(x,y,z)$ una estructura sometida a acciones externas (fuerzas, variación de temperaturas, etc.). Para resolver el problema se propone aproximar estas funciones mediante polinomios normalizados del tipo $N_{jk}(x,y,z)$, que reciben el nombre de funciones de forma (Zienkiewicz, Taylor (1998), Oñate (1992)).

$$u_j(x,y,z)|_{\Omega^e} = N_{jk}(x,y,z) U_k|_{\Omega^e}$$

Esta función de forma $N_{jk}(x,y,z)$, definida en el dominio de un elemento finito, permite aproximar el campos de desplazamientos $U_k(x,y,z)$ mediante la valoración de las magnitudes U_k , en un número finito de puntos denominados nodos, que pertenecen al dominio Ω^e .

Desde un punto de vista mecánico numérico, la no-linealidad en la ecuación de equilibrio puede estar originada por distintos fenómenos,

- **No linealidad constitutiva**, que resulta de la pérdida de linealidad entre el campo de tensiones y deformaciones -, exige una definición especial de una ley de comportamiento del material, tal como ocurre en la plasticidad, daño, fractura, fatiga, etc.
- **No linealidad por grandes deformaciones**, que son debidas a la influencia no lineal que tiene el cambio de configuración del sólido en el campo de deformaciones. Además, estos cambios de configuración son producidos por los grandes movimientos, traslaciones y rotaciones, y también producen cambios en el sistema de referencia local en los puntos del sólido, afectando por ello al tensor de compatibilidad de deformaciones .
- **No linealidad por grandes desplazamientos**, que a diferencia de las grandes deformaciones, sólo afecta al tensor de compatibilidad de deformaciones , porque sólo ocurren cambios en el sistema de referencia local de los puntos del sólido como consecuencia de grandes movimientos.

La ecuación de equilibrio a nivel de un elemento finito Ω^e participa en dominio global Ω a través de la operación de "ensamblaje" A, que representa una "suma ordenada" entre las componentes de la fuerza,

teniendo en cuenta la posición y dirección de las fuerzas elementales.

En el caso que haya linealidad en el comportamiento del sólido, se cumple la siguiente relación de equilibrio global, que resulta del ensamblaje de las ecuaciones de equilibrio local siendo

$$0 = \mathbf{A} \left[\mathbf{f}_k^{\text{mas}} + \mathbf{f}_k^{\text{int}} - \mathbf{f}_k^{\text{ext}} \right]_{\Omega^e} = \Delta \mathbf{f}_k|_{\Omega}$$

$\mathbf{f}_k^{\text{int}}|_{\Omega^e}$, $\mathbf{f}_k^{\text{mas}}|_{\Omega^e}$ y $\mathbf{f}_k^{\text{ext}}|_{\Omega^e}$ los conjuntos ordenados, en forma de matrices columna, de las fuerzas interna, másica y externa que se desarrollan en cada punto del sistema discreto que aproxima el continuo.

Cualquier forma de no linealidad en el sólido, se manifiesta como un desequilibrio entre las fuerzas interiores y las exteriores, $\Delta \mathbf{f}_k|_{\Omega}$, que en un cierto instante de tiempo "t" puede eliminarse mediante la linealización de esta fuerza desequilibrante en la vecindad del estado de equilibrio actual. La ecuación de equilibrio dinámico en el sólido completo suele presentarse en la siguiente forma matricial (S. Oller (2001)).

$$0 = {}^{i+1}[\Delta \mathbf{f}]_{\Omega} \approx {}^i[\Delta \mathbf{f}]_{\Omega} + \underbrace{\left[\mathbf{M} \frac{\ddot{\mathbf{U}}}{\dot{\mathbf{U}}} + \mathbf{K}^T + \mathbf{D}^T \frac{\dot{\mathbf{U}}}{\dot{\mathbf{U}}} - \frac{\mathbf{f}^{\text{ext}}}{\dot{\mathbf{U}}} \right]_{\Omega}}_{{}^i \mathbf{J}_{\Omega}^T} {}^{i+1}[\Delta \mathbf{U}]_{\Omega}$$

Esta ecuación representa el equilibrio de fuerzas que participan en la estructura, linealizada en el campo de los desplazamientos. En ella $[\mathbf{J}^T]_{\Omega}$ es la denominada matriz jacobiana, $[\mathbf{K}^T]_{\Omega}$ representa la matriz de rigidez tangente, $[\mathbf{M}]_{\Omega}$ es la matriz de masa, $[\mathbf{D}^T]_{\Omega}$ es la matriz de amortiguación tangente, todas ellas definidas en todo el dominio Ω y $\mathbf{C}^T_{ijst}$ el tensor tangente correspondiente a la ley constitutiva utilizada en cada punto del sólido. La fuerza desequilibrada en el sólido $i+1$ $[\Delta \mathbf{f}_k]_{\Omega}$ se elimina siguiendo una resolución de Newton-Raphson hasta que este residuo resulte despreciable, situación que se conoce como convergencia del proceso linealizado hacia la solución exacta. Para estudios más profundos, se recomienda consultar el libro Zienkiewicz, Taylor (1998).

No linealidad de los materiales – Inclusión de las leyes de comportamiento de los materiales en el MEF, para el estudio de la durabilidad

La ley de comportamiento del sólido en un punto (Punto de integración numérica), se introduce en la

ecuación de equilibrio (3), mediante una formulación denominada ley constitutiva. Esta formulación define la tensión s_{ij} , el tensor constitutivo C_{ijkl} , la viscosidad $\hat{\eta}_{ijkl}$ y la influencia de la no linealidad cinemática. Esto permite realizar un estudio mecánico numérico, que lleva a un análisis racional de predicción del comportamiento de la estructura en el tiempo y por lo tanto permite estudiar la durabilidad de las estructuras.

La influencia de las cargas y del tiempo produce en algunos sólidos estructurales comportamientos irrecurables. Básicamente pueden establecerse tres tipos de comportamientos no lineales dependientes del tiempo (Malvern (1969),

- **Elasticidad retardada o "creep"**, donde ocurre crecimiento de deformación a tensión aplicada constante (ver Figura 2).
- **Relajación de tensiones**, donde se produce pérdida de tensión mientras el nivel de deformaciones se mantiene constante. Este comportamiento, aunque no invertible, representa la forma implícita inversa de la elasticidad retardada (ver Figura 2).
- **Visco-plasticidad** cuyo comportamiento no lineal se debe a un crecimiento del campo de deformaciones inelásticas, pero esto ocurre siempre que el campo de tensiones supere unos umbrales preestablecidos (ver Figura 4).

Hay también materiales cuyo comportamiento no lineal es independiente del tiempo (Malvern (1969), Lubliner (1990), Oller (2001)) y esta situación puede ser consecuencia de distintos fenómenos, como,

- **Plasticidad o comportamiento con flujo instantáneo.** Este comportamiento puede matemáticamente establecerse como un caso particular del comportamiento viscoplastico, aunque la física del problema es cualitativamente diferente (ver Figura 3).
- **Daño o degradación de rigidez**, que produce en los materiales una pérdida de resistencia como consecuencia de una degradación en la elasticidad del material.

Estos comportamientos pueden presentarse en forma aislada o participar todos ellos a la vez en distinto grado. El tratamiento adecuado de estos fenómenos, permite sensibilizar el comportamiento de los materiales a fenómenos acoplados como

- **La fatiga**, extensión conceptual de la plasticidad y el daño, influenciada por los ciclos de carga (Suero, Oller (1998), Oller, Suero (1999), Salomón, Oller, Car, Oñate (1999), DARCAST (2000), González Torre (2001)),

- **Influencia físico-química**, como es el caso de la degradación de las propiedades del material en presencia de humedad. Ejemplo de esto es el fenómeno de aluminosis y carbonatación de los cementos en presencia de humedad, que puede tenerse en cuenta en la definición constitutiva como una extensión conceptual de la plasticidad y daño en cuyas formulaciones puede incluirse la definición de un potencial químico (Bosh (1998), Car, Oller, Oñate (1998)).

Sobre la modelización constitutiva y su influencia en el comportamiento estructural debe profundizarse en fuentes concretas, especializadas en cada área. No obstante, en las Figuras 3, 4 y 5 se muestra la definición de las formulaciones básicas que pueden utilizarse para estudiar la durabilidad del material (fatiga, fractura, acoplamiento físico-químico).

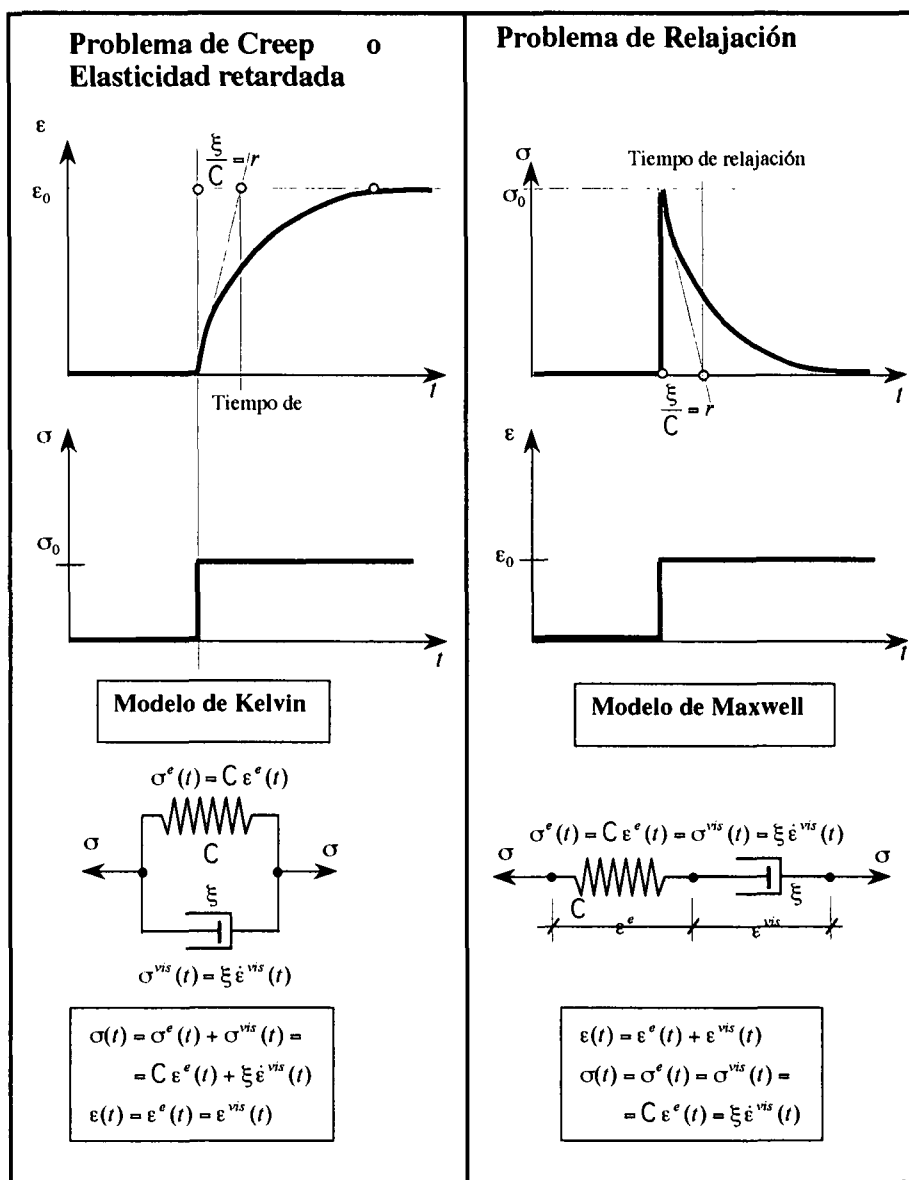


Figura 2. Formas simplificadas de entender los modelos constitutivos viscosos de Kelvin y Maxwell.

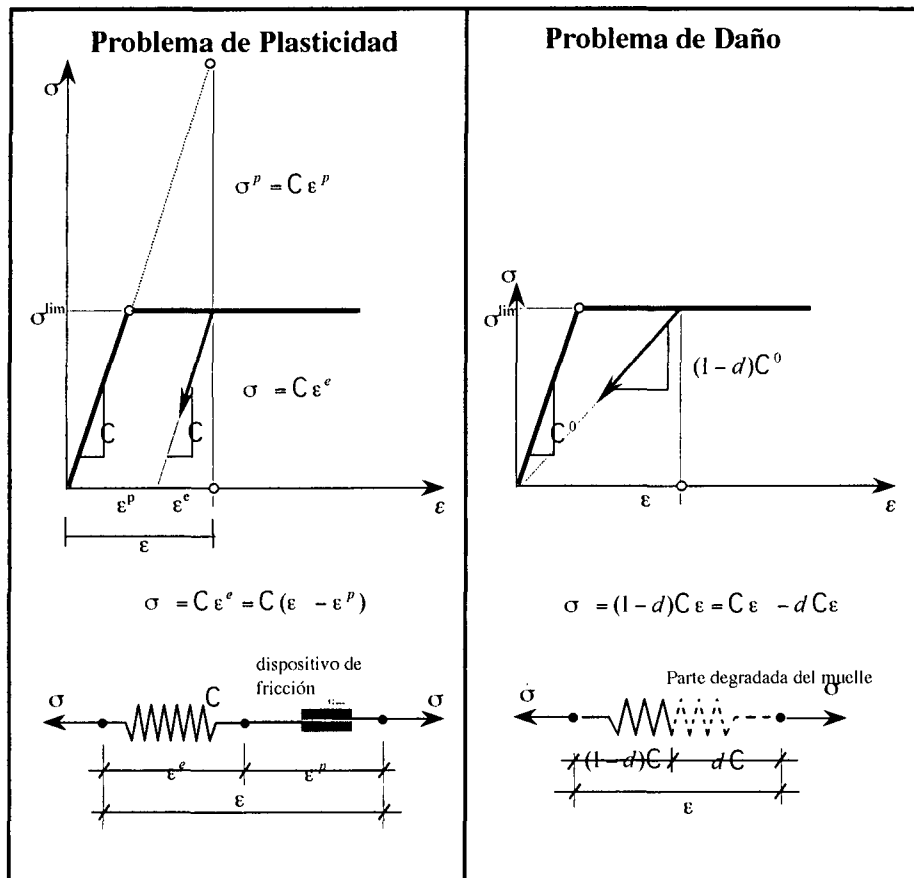


Figura 3. Formas simplificadas de entender el comportamiento elastoplástico y daño.

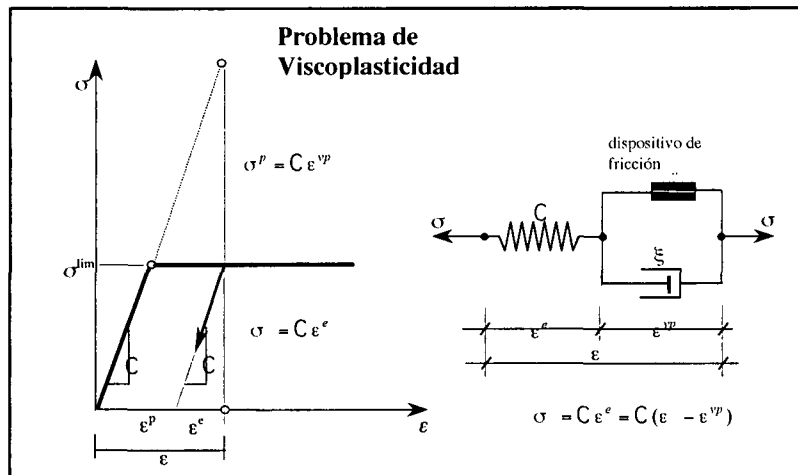


Figura 4. Formas simplificadas de entender el comportamiento visoplástico.

Ejemplos de simulación numérica de durabilidad estructural

Prueba a Fatiga de un Molde para solidificación de Piezas de Aluminio

Se presenta un molde de acero para inyección de aluminio, que será representado por un cuarto de la parte simétrica. Este molde trabaja bajo un ciclo impuesto de temperaturas y altas presiones, es decir, que tiene un comportamiento termo-mecánico acoplado. Se ha estudiado la vida útil de éste molde para el estado de cargas impuesto, y para ello se ha resuelto un problema de fatiga a través de un modelo constitutivo de daño influenciado por el número de ciclos (Oller S. (2001). La geometría, aproximación de la malla finita y propiedades de los materiales se resumen a continuación (Salomón O, Oller S, Car E, Oñate E. (1999)).

Propiedades del material, geometría y malla de elementos finitos

Elementos: 280, Nodos: 909, Cuadriláteros 8 nodos, con 4 puntos de Gauss

Características del material

Acero sometido a un comportamiento de micro fisuras mediante un modelo de daño isótropo.

$$E = 2.15 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2, \nu = 0.3, S^f = 1.6 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2, G_f = G_c = 30 \cdot 10^5 \text{ N/m} \\ m^o = 7800 \text{ kg/m}^3, k = 25 \text{ W/m}^\circ\text{C}, c_k = 460 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}, h_{air} = 10 \text{ N/MS}^\circ\text{C}, \\ \alpha^{TER} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}, \theta^{rf} = 20^\circ\text{C}$$

$\theta = 20^\circ\text{C}$	$S^f = 1.6 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	$E = 2.15 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
$\theta = 400^\circ\text{C}$	$S^f = 1.3 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	
$\theta = 500^\circ\text{C}$	$S^f = 1.1 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	$E = 1.76 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
$\theta = 600^\circ\text{C}$	$S^f = 0.8 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	$E = 1.65 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$
$\theta = 650^\circ\text{C}$	$S^f = 0.6 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$	

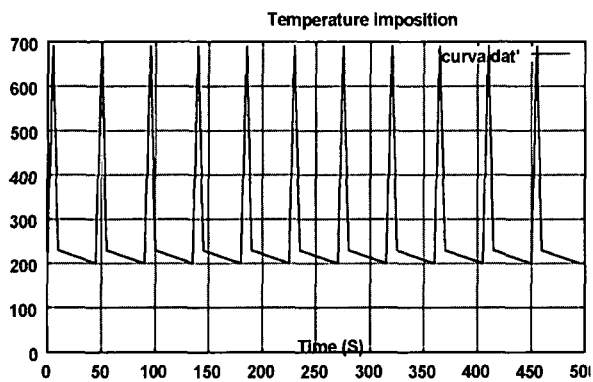
Características del material

Aluminio sometido a comportamiento elástico isótropo

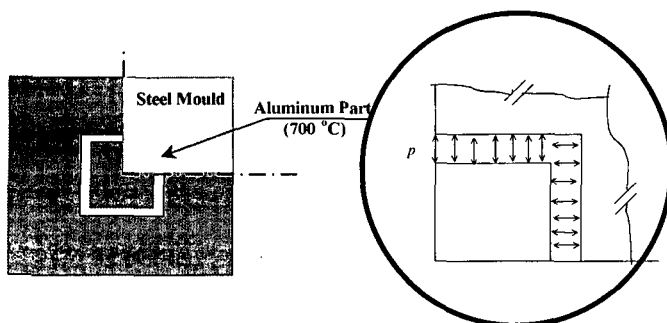
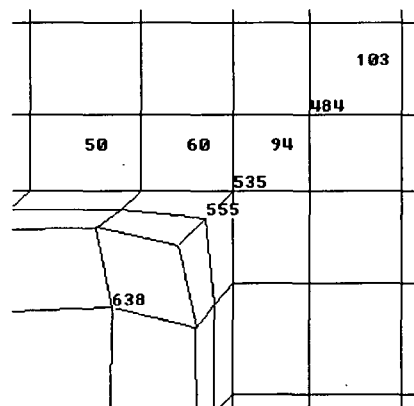
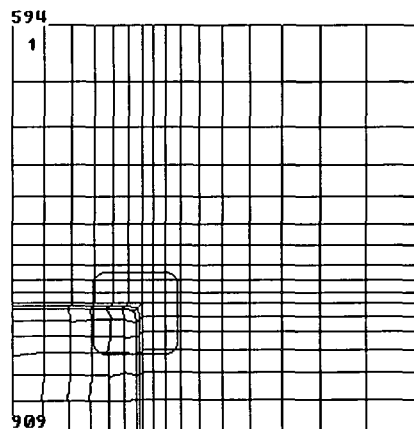
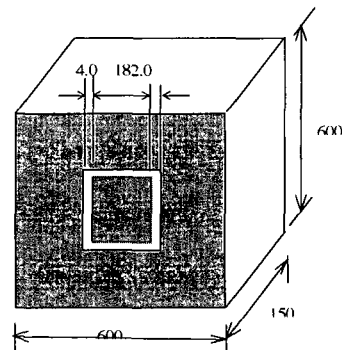
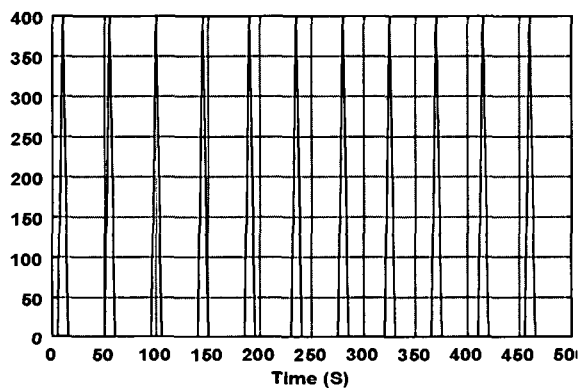
$$E = 6.93 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2, \nu = 0.37, m^o = 2650 \text{ kg/m}^3, \\ k = 234.46 \text{ W/m}^\circ\text{C}, c_k = 955 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}, h_{air} = 10 \text{ N/MS}^\circ\text{C}, \\ \alpha^{TER} = 12.19 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}, \theta^{rf} = 20^\circ\text{C}$$

Características de la carga

Imposición de temperatura en el aluminio, siguiendo la historia que se muestra a continuación:



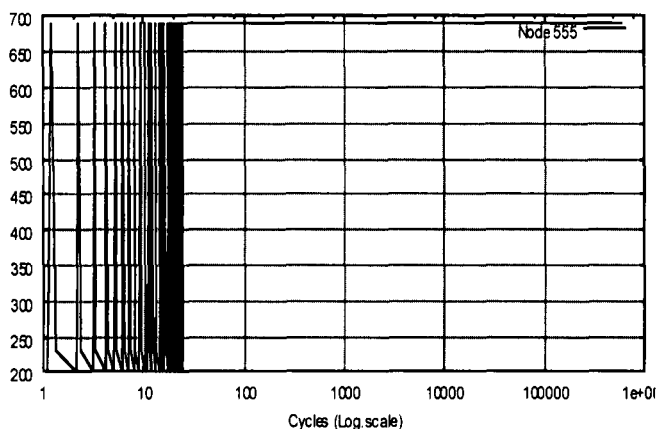
Imposición de presión sobre las caras del molde en contacto con la fundición:



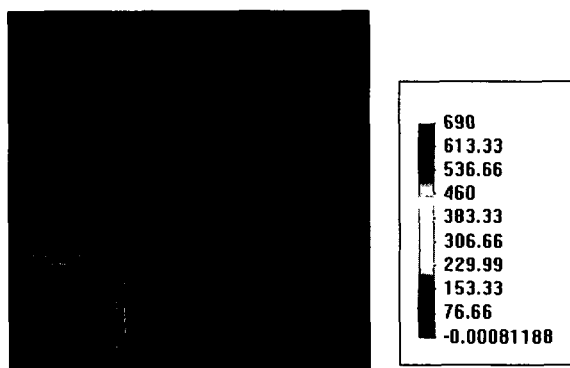
Malla utilizada para el análisis numérico (1/4 del problema entero) y detalle de la esquina interior. Los nodos y elementos presentados son aquéllos para los que se presentan las curvas y gráficos de respuesta.

Evolución de la temperatura actuante en la cara en contacto con el aluminio inyectado

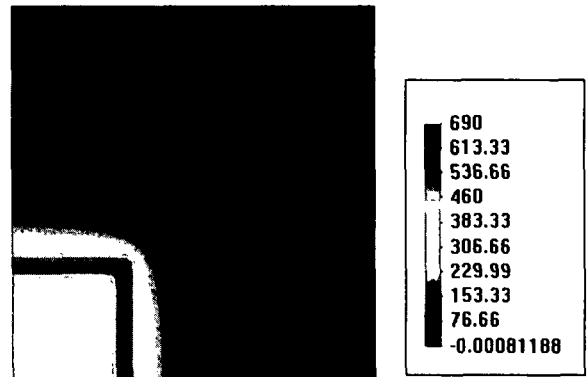
Se consideran dos intervalos de carga: el primero de 24 ciclos de 45 segundos con incrementos de 5 segundos (la carga de temperatura comienza a las 200°C y alcanza una cresta de 690°C cuando el aluminio se inyecta, luego se reduce a 230°C cuando la pieza de aluminio es extraída y finalmente el ciclo concluye cuando el molde se enfría hasta 200°C). Durante el segundo estado de cargas, la temperatura se mantiene en los máximos alcanzados al final del primer intervalo y los incrementos se consideran en números de ciclos, en vez de tiempo.



Evolución de la temperatura en diferentes puntos del molde. Se observa la ciclicidad del comportamiento en puntos cercanos al aluminio inyectado.



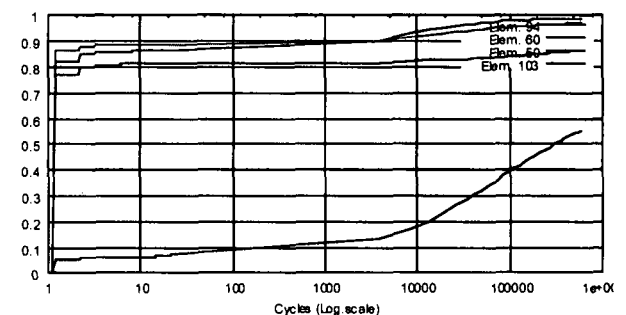
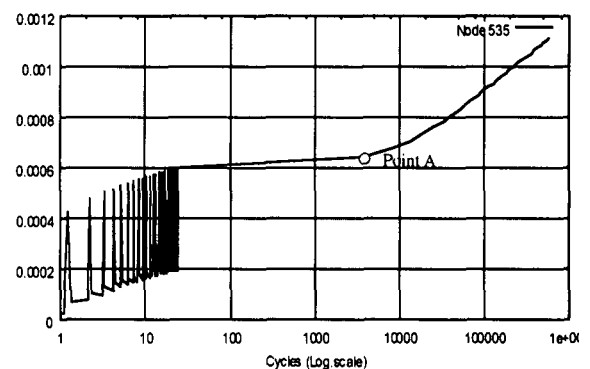
Distribución de temperaturas en el primer paso



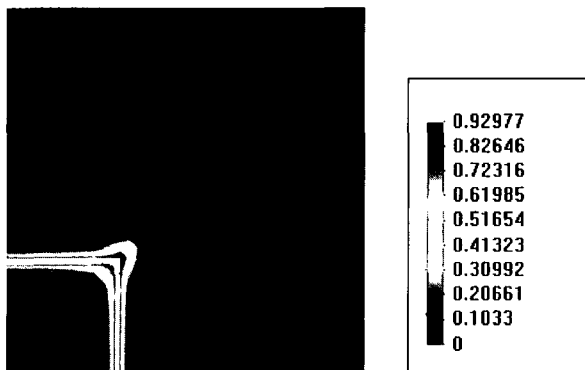
Distribución de temperatura al final del primer incremento de cargas (y al final del proceso).

Evolución del desplazamiento en la esquina interna del molde. El punto A muestra el claro cambio que sufre el comportamiento mecánico del molde.

Desde un punto de vista conceptual, este incremento excesivo de desplazamiento, acompañado de una pérdida de resistencia (ver fig. de tensiones), puede considerarse como el límite de vida útil en fatiga para el molde, porque se inicia la fractura.



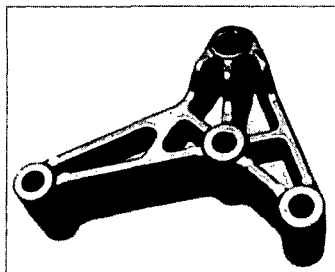
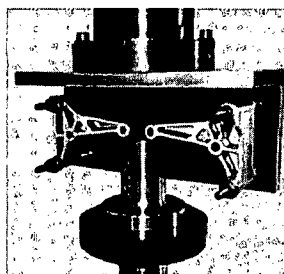
Historia del índice de daño en el primer punto de Gauss del elemento cercano a la esquina interna



Índice de daño al finalizar el proceso.

Prueba de fatiga de una pieza de alrededor construida en aluminio.

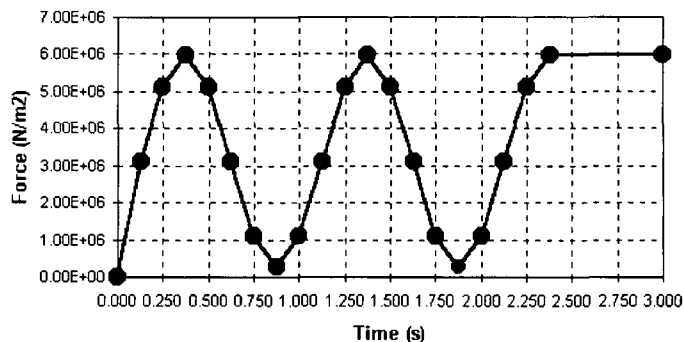
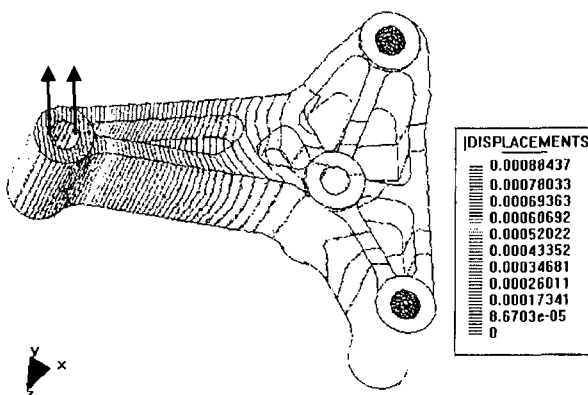
En este apartado se presenta un análisis numérico y experimental sobre el problema de fatiga en una pieza de aluminio para un soporte de alrededor como la que mostramos en la figura siguiente. El estudio experimental ha estado desarrollado por la Politécnica de Turín sometiendo la pieza a una carga cíclica en su extremo, en la manera que se muestra en la figura. El ensayo en este apartado numérico ha estado desarrollado por CIMNE (DARCAST, 2001)



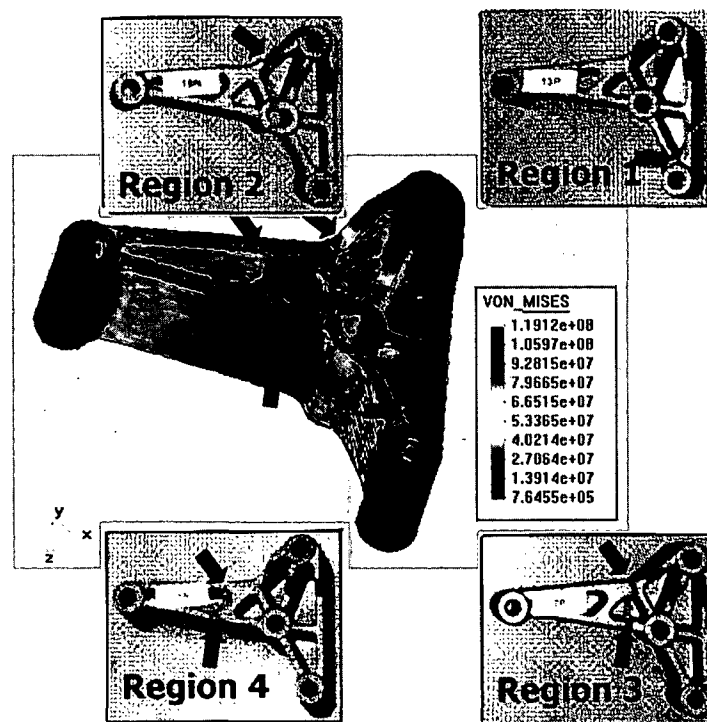
Fotografía de la pieza de un alternador construida en aluminio y forma en que se aplica la carga para realizar el ensayo de fatiga

Alrededor de cincuenta piezas han sido sometidas al ensayo de fatiga, para así poder obtener conclusiones experimentales fiables. Una vez concluido el ensayo experimental, se han realizado análisis radiográficos para conocer el estado de la porosidad en el interior de la pieza y las superficies fracturadas han sido analizadas mediante estudios metalográficos. Esto ha permitido ajustar los parámetros del material y realizar un estudio numérico de verificación a través de elementos finitos. En esta página se muestra la forma en que se aplica la carga cíclica en la pieza analizada por elementos finitos.

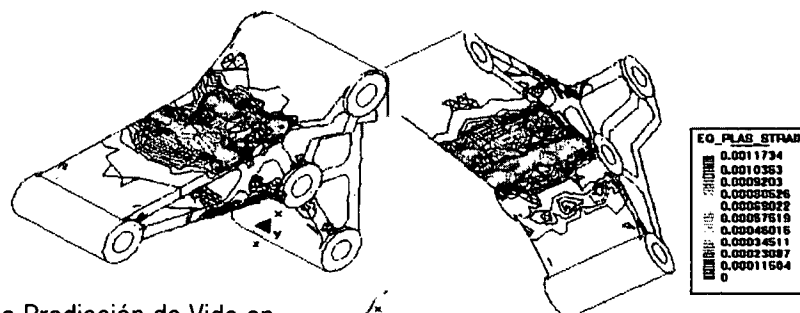
En la figura que a continuación se muestra, puede verse la coincidencia entre los resultados experimentales y numéricos.



Carga cíclica aplicada al soporte de alrededor



Mapa de deformaciones plásticas que muestra las zonas donde se inicia el deterioro por fatiga



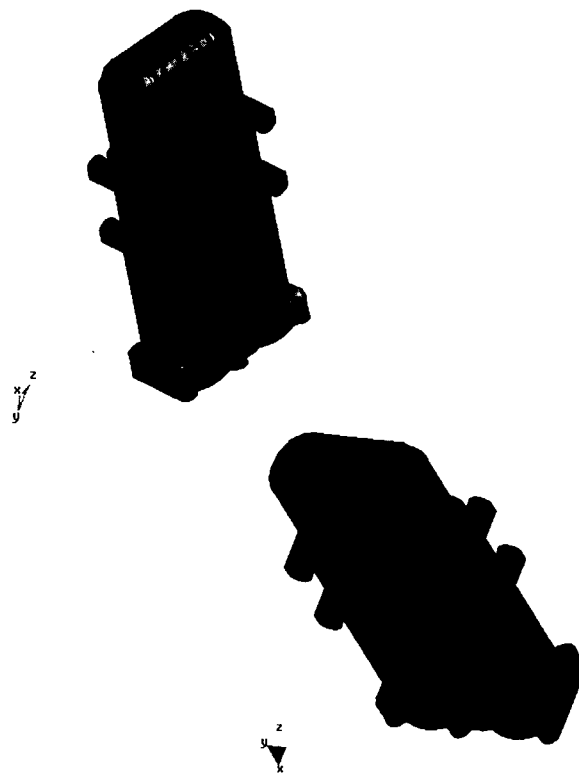
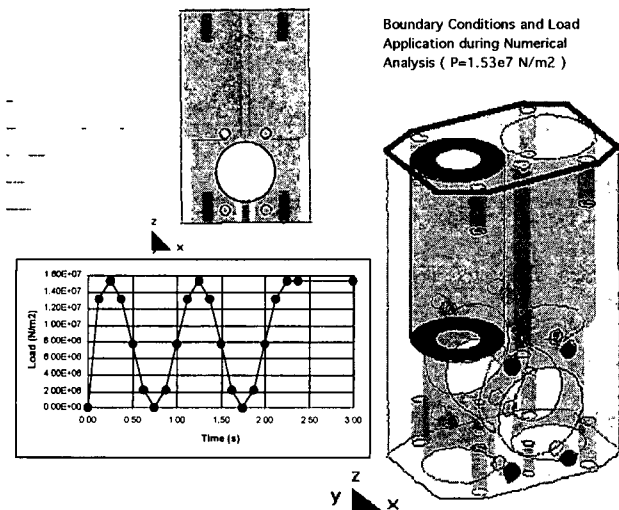
Análisis Numérico de Predicción de Vida en Mini-Componentes Hidráulicos

En este apartado se muestra una simulación numérica por elementos finitos (MEF), para realizar una predicción de vida útil de "mini bombas hidráulicas" sometidas a ciclos de altas presiones. Los resultados numéricos que aquí se muestran han sido desarrollados dentro del proyecto europeo MINIHAP (2001) sobre bombas fabricadas y ensayadas en laboratorio por la empresa Roquet S.A.. Estas bombas han sido construidas con dos materiales diferentes, en aluminio tipo Eural 7003 y en fundición de hierro globular GGG-40.



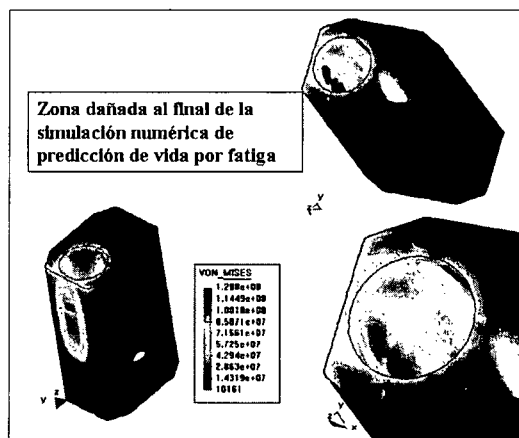
La predicción de vida de estas "mini bombas hidráulicas" ha sido estudiada numéricamente por CIMNE. Se ha trabajado con una geometría en 3-Dimensiones sobre planos reales y se ha impuesto una presión interior cíclica representativa de la real (ver Figura que se presenta a continuación). Las propiedades del material han sido consideradas según datos ofrecidos por el fabricante.

CIMNE ha obtenido, mediante la simulación numérica, una excelente aproximación al ensayo experimental, tanto en la localización del punto de máxima fatiga (ver Figura), como en el número de ciclos al que se alcanza este estado. El ensayo experimental muestra que la fractura por fatiga se alcanza a los 75811 ciclos y el ensayo numérico confirma este dato con 80000 ciclos.



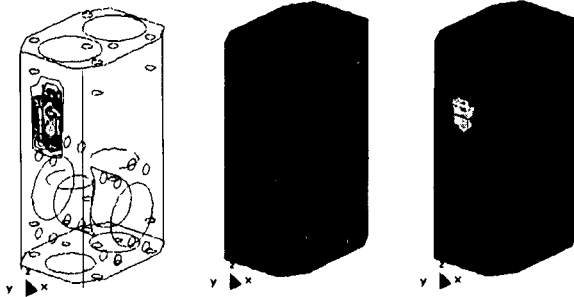
Geometría de la mini bomba y ciclos de carga al que se somete el cuerpo de la bomba.

En las curvas de "tensión-Nro. de ciclos" y "daño-Nro. de ciclos", que se presentan a continuación, puede verse como la resistencia cae, en tanto el daño crece, cuando se alcanza el umbral de daño por fatiga a los 80000 ciclos de presión en el interior de la bomba.



Daño por Fatiga

Comparación de la zona dañada entre el estudio experimental (figura de la izquierda) y el numérico (dos figuras de la derecha).



Conclusiones

La mecánica de medios continuos, asistida por las técnicas numéricas, especialmente el método de los elementos finitos, constituyen una herramienta muy potente para el estudio y predicción de vida de piezas que cumplen función estructural. En este artículo sólo se ha hecho una introducción que muestra las bases de esta técnica, presentando diversos ejemplos que indican las grandes posibilidades del método. Se indican referencias que ayudan a completar la lectura y a adquirir una idea más clara de las posibilidades que ofrece esta vía de trabajo.

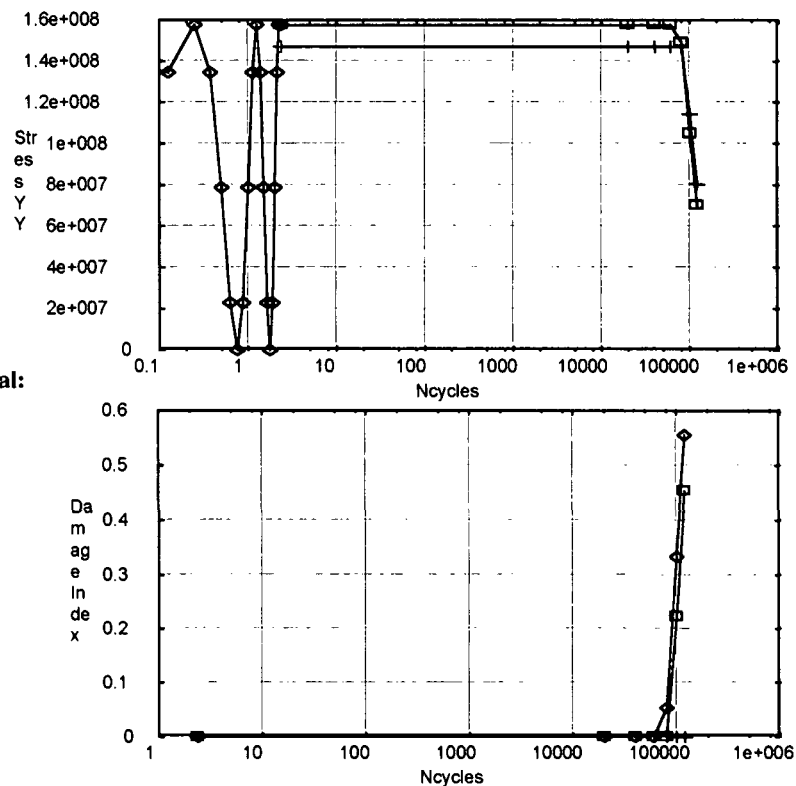
Predicción de vida por Fatiga

Estudio Experimental:

Fractura por fatiga
75811 ciclos

Estudio Numérico:

Fractura por fatiga
80.000 ciclos



Referencias

- Armero F., Oller S. (2000). A General Framework for Continuum Damage Models. Part I: Infinitesimal Plastic Damage Models in Stress Space. *International Journal of Solids and Structures*. Vol.37, No.48-50, pp. 7409-7436.
- Armero F., Oller S. (2000). A General Framework for Continuum Damage Models. Part II: Integration Algorithms, with Applications to the Numerical Simulation of Porous Metals. *International Journal of Solids and Structures*. Vol.37, No.48-50, pp. 7437-7464.
- Bosh E. (1998). *Tractament Mecanico-numeric del Fenomen de Degradació del Formigó Produït per la Humitat i el Temps*. Tesis de Especialidad de la Carrera de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos Universidad Politècnica de Catalunya – Barcelona – España.
- Car E., Oller S., Oñate E. (1998). Un Modelo Elasto Plástico Acoplado con Daño Mecánico e Higrométrico. Aplicación a Pavimentos Flexibles. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*. Vol. 3, No.1, pp. 19-37.
- COURANT R. (1943). Variational Methods for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibration. *Bull. Am. Math. Soc.*, Vol 49, 1-23.
- DARCAST (2000). *Enhanced Design and Manufacturing of High Resistance Casted Parts*. Final Technical Report. Craft Project N° : BES2-5637 funded by the European Community.
- FORREST P. (1962). *Fatigue of Metals* – Pergamon Press, London.
- GONZÁLEZ TORRE M. (2001). *Estudio de Fatiga Termo-mecánica, para Piezas Metálicas y Compuestos*. Tesis de Especialidad de la Carrera de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos Universidad Politècnica de Catalunya – Barcelona – España.
- LUBLINER J., OLIVER J., OLLER S., OÑATE E. (1989). A plastic-damage model for concrete *International Journal of Solids and Structures*; 25 (3): 299-326.
- LUBLINER J. (1990). *Plasticity Theory* - Macmillan Publishing - U.S.A.
- LUCCIONI B., OLLER S., DANESI R. (1996). Coupled Plastic-Damage Model. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Vol. 129, No. 1-2, pp. 81-90. 1996.
- MALVERN L. (1969). *Introduction to the Mechanics of Continuous Medium* - Prentice Hall USA.
- MINIHAP(2001)- Enhanced Design And Manufacturing Of Mini-Hydraulic Products. Project Growth No.: G1RD-CT-1999-00079-Mid-Term Report CIMNE - by O. Salomón
- OLIVER J., Cervera M., Oller S., Lubliner J. (1990). A Simple Damage Model For Concrete, Including Long Term Effects. *Second International Conference on Computer Aided Analysis And Design of Concrete Structures*. Vol. 2 pp. 945-958. Zell Am See, Austria. Viena.
- OLLER S., OÑATE E., MIQUEL J. AND BOTELLO S. (1996). A Plastic Damage Constitutive Model for Composite Materials. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 33, No.17, pp. 2501-2518. 1996.
- OLLER S., SUERO A. (1999). Tratamiento del Fenómeno de Fatiga Isotérmica Mediante la Mecánica de Medios Continuos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y diseño en Ingeniería*, Vol. 15, No.1, pp. 3-29.
- OLLER S. (2001). *Fractura Mecánica - Un Enfoque Global*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) - Ediciones UPC.
- OÑATE, E. (1992). *Cálculo de Estructuras por el Método de los Elementos Finitos. Análisis Estático Lineal*. Ed. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). Barcelona.
- OSGOOD C. (1982). *Fatigue Design*. Pergamon Press, 1982.
- SALOMÓN O, OLLER S, CAR E, OÑATE E. (1999). Thermomechanical fatigue analysis based on continuum mechanics. *Congreso Argentino de Mecánica Computacional, MECOM'99*, Mendoza, Argentina (Publicado en CD).
- SLUZALEC A. (1988). An analysis of thermal effects of coupled thermo-plasticity in metal forming processes. *Comm. Appl. Num. Meth*; 4: 675-685.
- SUERO A, OLLER S. (1998). Tratamiento del Fenómeno de Fatiga Mediante la Mecánica de Medios Continuos, Monografía CIMNE N° 45, Barcelona.
- WÖHLER A. (1871) Test to determine the forces acting on railway carriage axles and capacity of resistance of the axle – *Engineering*; 11: 199.
- ZIENKIEWICZ, O. C. AND TAYLOR, R. (1994). *El método de elementos finitos Vol. 1 y 2*. Ed. McGraw Hill-CIMNE. Barcelona.