

Redistribución de tensiones de fatiga de hormigón – programación con Elementos Finitos

Redistribution of concrete fatigue stresses – programming with Finite Elements

Joseba Souto Couso^a, Yari García de Amézaga Fernández^b, Josef Mussnig^c, Nadim
Mardini Al Kawam^d y Carlos Zanuy Sánchez^e

^aIngeniero Mecánico. Sener Energy. joseba.souto@energy.sener

^bIngeniero Mecánico. Sener Energy. yari.garciadeamezaga@energy.sener

^cIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sener Mobility. josef.mussnig@mobility.sener

^dIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sener Mobility. nadim.mardini@mobility.sener

^eDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Catedrático. Universidad Politécnica de Madrid. carlos.zanuy@upm.es

RESUMEN

El análisis de fatiga del hormigón es crucial para evaluar la resistencia de este tipo de estructuras. Los métodos tradicionales tienen limitaciones debido a la simplificación de modelos y la falta de consideración de la redistribución de tensiones, lo que afecta la precisión de las predicciones. La herramienta desarrollada mejora este análisis al incorporar la redistribución de tensiones, ofreciendo resultados más precisos y realistas que se pueden ajustar mejor con los datos experimentales. Esto permite una mejor predicción y gestión de la vida útil de las estructuras de hormigón, garantizando su seguridad y durabilidad. Se trata, por lo tanto, de una solución innovadora y fiable para los profesionales del sector.

ABSTRACT

Fatigue analysis of concrete is crucial for assessing the long-term strength of structures. Traditional methods have limitations due to model simplification and lack of consideration of stress redistribution, which affects the accuracy of predictions. The developed tool improves this analysis by incorporating stress redistribution, providing more accurate and realistic results that can better approach experimental data. This allows for better planning and management of the service life of concrete structures, ensuring their safety and durability. Therefore, it is an innovative and reliable solution for industry professionals.

PALABRAS CLAVE: hormigón, fatiga, Elementos Finitos, redistribución de tensiones.

KEYWORDS: concrete, fatigue, Finite Element, stress redistribution.

1. Objetivo general

El análisis de fatiga del hormigón es un campo de estudio crucial en la ingeniería civil, especialmente en la evaluación de la vida útil de las estructuras. Actualmente, los métodos tradicionales de análisis de fatiga presentan varias limitaciones significativas, principalmente

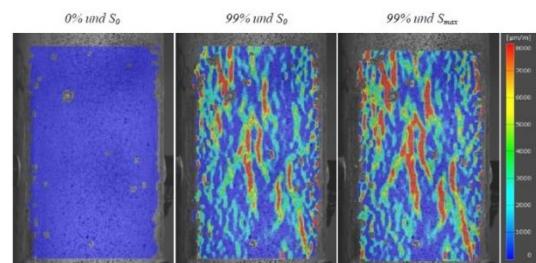
debido a la simplificación de los modelos de comportamiento del material y la falta de consideración de la redistribución de tensiones que ocurre durante el proceso de carga cíclica. Estas simplificaciones pueden llevar a discrepancias entre los resultados teóricos y los

Uno de los principales puntos de mejora en el análisis de fatiga del hormigón es la capacidad de los modelos para reflejar con mayor exactitud el comportamiento real del material bajo cargas cíclicas. Normalmente, la redistribución de tensiones, un fenómeno que ocurre cuando el hormigón se somete a cargas repetidas, no se tiene en consideración en los modelos actuales, ya que la normativa tampoco lo contempla, como la del Código Modelo [1].

En dicho documento, se abordaba el carácter simplista de la normativa internacional a la hora de analizar la complejidad real de los fenómenos de fatiga en hormigón y se presentaba en mayor profundidad la compleja respuesta del material que sucede en la realidad, ejemplificándolo mediante el análisis dinámico de estructuras de ferrocarriles.

En muchas ocasiones, se suele acudir a modelos de cálculo según el Método de

No obstante, al contemplar el comportamiento real de dichos elementos, se observa como el fenómeno de fatiga no es tan crítico ya que el hormigón dañado es capaz de transmitir las tensiones a los elementos de alrededor, fenómeno apreciable en los diversos ensayos realizados [3].



Así, surge la necesidad de buscar una metodología que permita evaluar la fatiga del hormigón con mayor detalle, y la solución pasa por considerar la redistribución de tensiones durante la modelización y el cálculo mediante MEF.

Abaqus/CAE, que significa “Complete Abaqus Environment”, es un entorno integral

para la creación, análisis y visualización de modelos de Elementos Finitos. Este software es parte de las herramientas de Abaqus desarrollada por Dassault Systèmes y se utiliza ampliamente en diversas industrias para evaluar la integridad estructural, las vibraciones y el rendimiento de componentes y ensamblajes.

Por otro lado, la subrutina desarrollada permite realizar el cálculo del daño a fatiga en los primeros ciclos de manera individual y considerar la redistribución de tensiones. Así, se puede calcular de manera más precisa el daño acumulado durante los diferentes ciclos de fatiga.

En este contexto, la herramienta desarrollada representa un avance significativo respecto a los cálculos tradicionales. Al incorporar la redistribución de tensiones en el análisis de fatiga, esta herramienta ofrece una aproximación más precisa y realista de la respuesta del hormigón bajo cargas cíclicas. Los resultados obtenidos con esta herramienta pueden mostrar una mayor concordancia con los datos experimentales, lo que mejora la confianza en las predicciones y permite una mejor gestión de la vida útil de las estructuras de hormigón.

En resumen, la nueva herramienta no solo aborda las limitaciones de los métodos tradicionales, sino que también proporciona una solución robusta y fiable para el análisis de fatiga del hormigón. Esto representa un paso adelante en la ingeniería civil, ofreciendo una herramienta valiosa para garantizar la seguridad y durabilidad de las infraestructuras.

2. Contextualización

El trabajo realizado consiste en un software/herramienta para analizar piezas de hormigón con diferentes geometrías de manera automática cuando están sometidas a múltiples cargas de fatiga (desde simples bloques hasta estructuras más complejas como anillos de torres o dovelas de puentes).

Aunque se ha particularizado al estudio de imperfecciones en juntas secas entre

elementos de hormigón prefabricado, dicha metodología puede aplicarse a cualquier modelo de Elementos Finitos en el que se evalúe el comportamiento a fatiga del hormigón.

2.1 Base teórica

El modelo de material en el que se basa la herramienta parte de una tesis en la que se ha reproducido la evolución de tensiones y deformaciones durante la vida útil de un elemento sometido a ciclos de fatiga de acuerdo con lo que observaron Bennet y Raju en 1969 y se observa la Figura 1. Dicha investigación, recogida en la tesis doctoral de Carlos Zanuy [4], demuestra que las tensiones se redistribuyen y las deformaciones aumentan con el tiempo.

De acuerdo con la formulación definida a partir de los ensayos, la curva tensión-deformación característica del material evoluciona a lo largo de los ciclos de la forma indicada en la Figura 3.

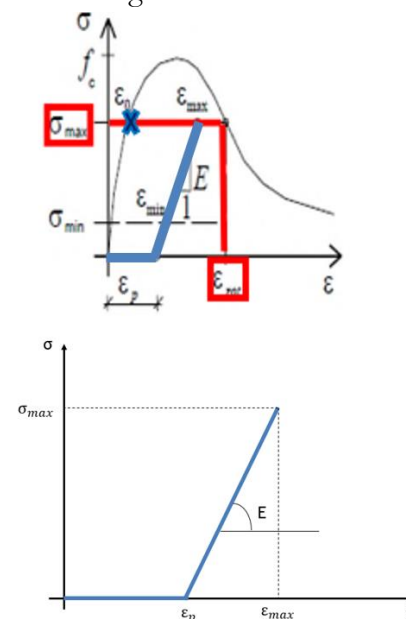


Figura 3. Idealización de la relación tensión-deformación para el análisis no lineal del hormigón en compresión.

De acuerdo con dicha modelización, el material tendrá un módulo de Young reducido E y una deformación residual plástica ϵ_p como consecuencia del daño a fatiga acumulado y la propia redistribución de tensiones.

En Abaqus, la variación de E con el daño N/N_f (relación entre el número de ciclos de carga y el número de ciclos de fatiga hasta rotura) se define a través de una variable modificada con la subrutina USDFLD, y la variación de ϵ_p con el daño N/N_f se define con la subrutina UEXPAN, tal y como viene explicado posteriormente en el apartado 2.3.

Al inicio del análisis ϵ_p será 0, asumiendo que al comienzo el material se encuentra en su estado inicial sin daño a fatiga.

El módulo de elasticidad E y la deformación bajo carga máxima ϵ_{max} , variarán en función del daño tal y como se describe en la formulación mostrada posteriormente y que se muestra en la Figura 4 como ejemplo para un caso de carga cíclico entre unas tensiones máxima y mínima constantes.

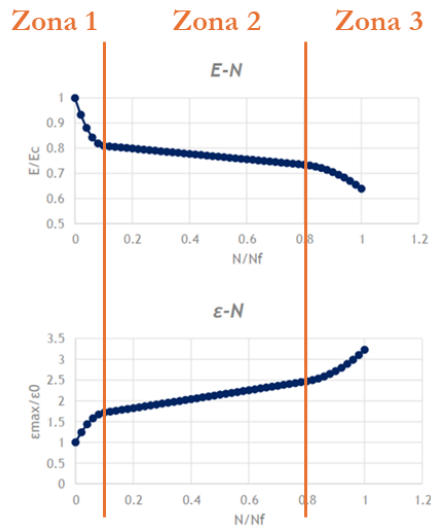


Figura 4. Variación de E y ϵ_{max} con N/N_f .

En la figura, se pueden visualizar tres zonas. La primera y la tercera representan una pérdida acusada de las propiedades y la segunda zona una pérdida lineal de las propiedades.

A continuación, se presentará la formulación relativa a la modelización que replica el comportamiento expuesto por Holmen en 1979 (Figura 5), y ha sido contrastado por múltiples publicaciones [3].

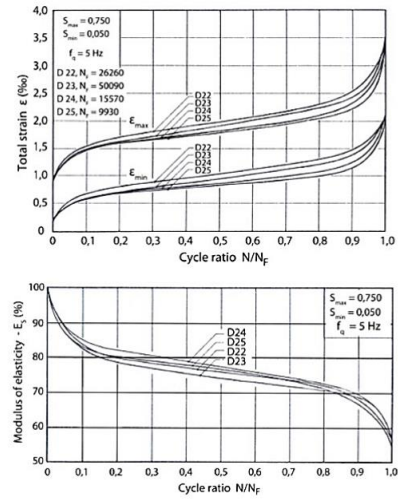


Figura 5. Variación de la deformación y el módulo de elástico con el daño (Holmen, 1979) [3].

Los valores de referencia para el cálculo del daño a fatiga son S_{max} (tensión relativa máxima) y S_{min} (tensión relativa mínima):

$$S_{max} = \frac{\sigma_{max}}{f_{cd,fat}} \quad (1)$$

$$S_{min} = \frac{\sigma_{min}}{f_{cd,fat}} \quad (2)$$

Donde se utiliza el valor de $f_{cd,fat}$ de las normativas (resistencia de cálculo frente a fatiga del hormigón), que se obtiene mediante la siguiente expresión, a partir de parámetros característicos del hormigón β_{cc} (coeficiente de ajuste de la resistencia del hormigón en función de la edad), $\beta_{c,sus}$ (coeficiente que tiene en cuenta la influencia de la fisuración y la tensión de compresión en el hormigón), f_{ck} (resistencia característica a compresión del hormigón) y $\gamma_{c,fat}$ (coeficiente se utiliza para ajustar la resistencia del hormigón bajo cargas cíclicas):

$$f_{cd,fat} = \beta_{cc} \beta_{c,sus} f_{ck} \left(\frac{1 - \frac{f_{ck}}{400}}{\gamma_{c,fat}} \right) \quad (3)$$

2.1.1 Variación de ϵ_{max}

En el caso de ϵ_{max} , se consideran las siguientes ecuaciones para cada zona.

Para la primera zona ($0,0 \leq N/N_f \leq 0,1$) se realiza un ajuste polinómico de segundo grado de $\epsilon_{max}/\epsilon_0$ (relación entre la deformación bajo carga máxima y la deformación inicial):

$$\frac{\epsilon_{max}}{\epsilon_0} \left(\frac{N}{N_f} \right) = 1 + A \left(\frac{N}{N_f} \right) + B \left(\frac{N}{N_f} \right)^2 \quad (4)$$

Donde los parámetros A y B se definen a partir de ε_{1-2} (deformación relativa que indica el cambio entre las fases 1 y 2 del proceso de fatiga) y $\dot{\varepsilon}_2$ (la velocidad de deformación en la segunda fase del proceso de fatiga):

$$A = 20 (\varepsilon_{1-2} - 1) - \dot{\varepsilon}_2 \quad (5)$$

$$B = 100 (1 - \varepsilon_{1-2}) + 10\dot{\varepsilon}_2 \quad (6)$$

Para la segunda zona ($0,1 \leq N/N_f \leq 0,8$) se realiza un ajuste lineal:

$$\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_0} \left(\frac{N}{N_f} \right) = \varepsilon_{1-2} + \dot{\varepsilon}_2 \left(\frac{N}{N_f} - 0,1 \right) \quad (7)$$

Donde se debe considerar que $\dot{\varepsilon}_2$ está limitada en función de $\varepsilon_{rot}/\varepsilon_0$ (la relación entre la deformación de rotura por fatiga y la deformación inicial) y ε_{1-2} de la siguiente forma:

$$\dot{\varepsilon}_2 \leq \frac{1}{0,9} \left(\frac{\varepsilon_{rot}}{\varepsilon_0} - \varepsilon_{1-2} \right) \quad (8)$$

Para la tercera zona ($0,8 \leq N/N_f \leq 1,0$) se realiza un ajuste polinómico de segundo grado:

$$\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_0} \left(\frac{N}{N_f} \right) = \varepsilon_{1-2} + \dot{\varepsilon}_2 \left(\frac{N}{N_f} - 0,1 \right) + C \left(\frac{N}{N_f} - 0,8 \right)^2 \quad (9)$$

Donde:

$$C = 25 \left(\frac{\varepsilon_{rot}}{\varepsilon_0} - \varepsilon_{1-2} - 0,9\dot{\varepsilon}_2 \right) \quad (10)$$

2.1.2 Variación del módulo de Young

Para la primera zona ($0,0 \leq N/N_f \leq 0,1$), el valor de E/E_c (la relación entre el módulo de deformación longitudinal del hormigón y el módulo de deformación tangente en el origen del hormigón) varía de la siguiente forma:

$$\frac{E}{E_c} \left(\frac{N}{N_f} \right) = 1 + M \left(\frac{N}{N_f} \right) + P \left(\frac{N}{N_f} \right)^2 \quad (13)$$

Donde los parámetros involucrados pueden obtenerse en función de $\dot{E}_2$ (velocidad de reducción del módulo en la segunda fase del proceso de fatiga) y $(E/E_0)_{1-2}$ (módulo de deformación relativo en el instante en que se pasa de la fase 1 a la 2 en el proceso de fatiga) de la siguiente forma:

$$M = -20 - \dot{E}_2 + 20 \left(\frac{E}{E_0} \right)_{1-2} \quad (14)$$

$$P = 100 + 10\dot{E}_2 - 100 \left(\frac{E}{E_0} \right)_{1-2} \quad (15)$$

Para la segunda zona ($0,1 \leq N/N_f \leq 0,8$):

$$\frac{E}{E_c} \left(\frac{N}{N_f} \right) = T + \dot{E}_2 \left(\frac{N}{N_f} \right) \quad (16)$$

Donde:

$$T = \left(\frac{E}{E_0} \right)_{1-2} - 0,1\dot{E}_2 \quad (17)$$

Para la tercera zona ($0,8 \leq N/N_f \leq 1,0$):

$$\frac{E}{E_c} \left(\frac{N}{N_f} \right) = Q + R \left(\frac{N}{N_f} \right) + S \left(\frac{N}{N_f} \right)^2 \quad (18)$$

Donde los parámetros se obtienen en función de $\dot{E}_2$ y E_{rot}/E_c (la relación entre el módulo de deformación en el instante de rotura por fatiga y el módulo de deformación tangente en el origen del hormigón):

$$Q = T - \dot{E}_2 \quad (19)$$

$$R = \dot{E}_2 \quad (20)$$

$$S = 25 \left(\frac{E_{rot}}{E_c} - T - \dot{E}_2 \right) \quad (21)$$

El valor de E_{rot}/E_0 (la relación entre el módulo de deformación en el instante de rotura por fatiga y el módulo de elasticidad), el valor de $\dot{E}_2$ y el valor de $S_{max,lim}$ (tensión máxima por debajo de la cual la velocidad de reducción de la rigidez en la segunda fase de fatiga es nula) se obtienen en función del valor de S_{min} indicado previamente, de acuerdo con la formulación incluida en [4], de donde provienen todas estas ecuaciones.

2.2 Descripción del modelo MEF

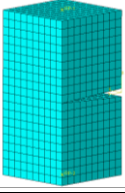
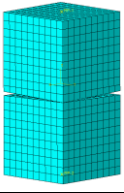
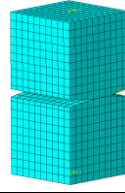
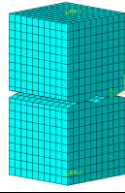
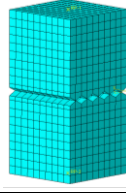
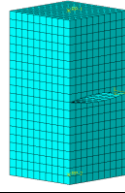
A continuación, se detallará el proceso seguido para la aplicación de la formulación en un modelo MEF.

En este caso se ha optado por el análisis del contacto entre dos bloques de hormigón a modo de ejemplo. Para introducir las imperfecciones, se ha creado un script en Python que es posteriormente ejecutado en Abaqus para generar el modelo MEF. Una vez que el modelo MEF ha sido generado, se definen las subrutinas de usuario para el análisis.

Toda la información para crear este modelo es introducida por la interfaz de usuario de la herramienta.

A continuación, se muestran algunas de las imperfecciones geométricas que se han analizado.

Tabla 1. Imperfecciones tipo que pueden ser analizadas.

Plano inclinado simple	Plano inclinado doble	Superficie sinusoidal (1 resalto)	Superficie sinusoidal (2 resaltos)	Superficie sinusoidal (5 resaltos)	Superficie sinusoidal negativa (1 resalto)
					

2.3 Subrutinas de usuario

Las subrutinas de usuario en Abaqus son secciones de código que permiten a los usuarios personalizar y extender las capacidades del software más allá de lo que ofrece la interfaz gráfica estándar. Estas subrutinas se escriben principalmente en Fortran, aunque también es posible utilizar C o C++. En este caso, se han empleado dos subrutinas, USDFLD y UEXPAN.

La subrutina USDFLD se utiliza para calcular el módulo de Young y la variación de la deformación residual. Además, también introduce la variación del módulo de Young mediante la modificación de FIELD(1), que se refiere al campo que controla el valor de las propiedades elásticas.

En el modelo, la variación del campo FIELD(1) se introduce como se muestra en el siguiente fragmento de código.

```
! NEW YOUNG'S MODULUS AND RESIDUAL STRAINS VALUES
IF (STATEV(5) == 1) THEN ! Damage is 1.
  IF (STATEV(13) == (1 - 0.0001)) THEN ! Damage 1 has
    STRP = STATEV(14) ! Last STRP is used.
  ELSE
    STATEV(13) = 1 - 0.0001 ! Young's modulus is re:
    STRP = STATEV(8) * (STATEV(11) - 1 / STATEV(12))
  END IF
ELSE
  STATEV(13) = 1 - STATEV(12) ! Young modulus is obta:
  STRP = STATEV(8) * (STATEV(11) - 1 / STATEV(12)) !!
END IF

STATEV(15) = STRP - STATEV(14)
STATEV(14) = STRP
END IF

FIELD(1) = STATEV(13) ! Young's modulus update.
```

Figura 6. Subrutina USDFLD en Fortran.

En este caso, se hace con la variable de estado STATEV(13), obtenido a partir de la variable de estado STATEV(12), correspondiente al valor de variación del módulo

de Young obtenido a partir de la formulación mostrada en el apartado 2.1.

La subrutina UXPAN se define para introducir deformaciones térmicas, como consecuencia de una variación de temperatura. Sin embargo, en este modelo se utiliza para introducir las deformaciones residuales causadas por el daño del hormigón ε_p , mostradas previamente en la Figura 3.

En el siguiente extracto de código, se puede observar que la deformación residual se introduce a través del parámetro EXPAN(3), que se refiere al incremento de deformación en la dirección Z (correspondiente en este caso a la dirección de carga perpendicular al contacto).

```
Analysis_type = 1

IF (Analysis_type == 1) THEN
  IF (MOD(STATEV(16), 3.0) >= 2.0) THEN
    EXPAN(3) = -STATEV(15) * DTIME
  END IF
  STATEV(16) = TIME(2)
END IF
```

Figura 7. Subrutina UEXPAN en Fortran.

3. Funcionamiento de la herramienta

Una vez creado el modelo MEF y preparadas las subrutinas de manera automática mediante el uso de la herramienta, se procede con la realización del análisis, tras definir la carga máxima y mínima de cada ciclo.

El número total de ciclos de carga se discretiza en bloques de fatiga formados por un número inferior de ciclos de carga con tensiones máxima y mínima constante. El flujo del análisis se divide en los siguientes tres pasos (Figura 8):

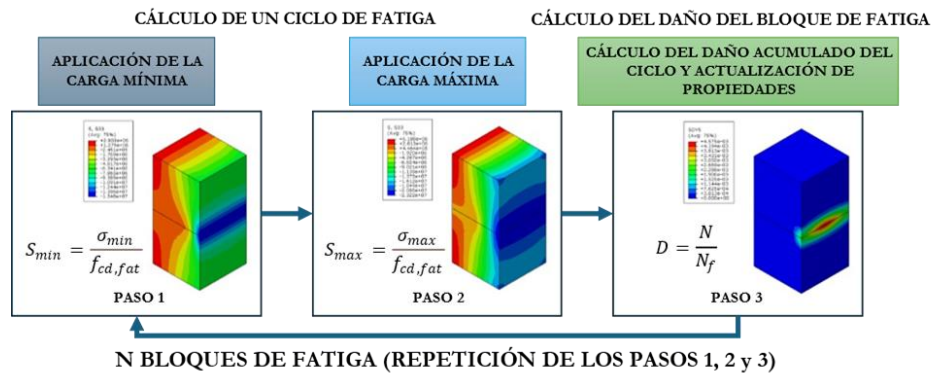


Figura 8. Flujo de trabajo de la herramienta.

En el primer paso del bloque de fatiga, se introduce la carga mínima.

En el segundo paso, se introduce la carga máxima. Además, las tensiones mínimas se almacenan con la subrutina USDFLD.

En el tercer paso, las tensiones máximas del paso anterior se almacenan con la subrutina USDFLD y se calcula el daño del hormigón del ciclo. Además, se utiliza la subrutina UEXPAN para introducir una deformación residual en el modelo y la subrutina USDFLD para modificar el módulo de Young de cara a evaluar el siguiente ciclo de fatiga. De esta manera, se calcula el daño elemento a elemento y se actualizan sus propiedades redistribuyendo la carga.

Finalmente, el análisis termina cuando el daño introducido y la consecuente pérdida de rigidez es tal que el modelo no es capaz de alcanzar la estabilidad o convergencia numérica. En ese instante, se puede obtener el número de ciclos de fatiga que es capaz de soportar el componente (o componentes) analizado antes de su colapso.

4. Particularidades

A continuación, se presentarán las particularidades de la herramienta desarrollada.

Por un lado, se abordará la formulación simplificada utilizada para modelar las tensiones multiaxiales, señalando las hipótesis adoptadas para facilitar su implementación. Por otro lado, se discutirán las limitaciones inherentes a la herramienta, proporcionando una visión crítica

de su aplicabilidad y precisión en diferentes escenarios de carga y condiciones estructurales.

4.1 Análisis multiaxial

El análisis desarrollado con la metodología anteriormente descrita parte de la suposición de la aplicación de una carga de compresión pura. No obstante, si se desea, puede realizarse un análisis multiaxial aplicando un factor de modificación a las tensiones mínima y máxima del bloque de fatiga de acuerdo con la formulación incluida en [5]. De esa manera, se tendrá en cuenta el efecto de las tensiones de confinamiento del elemento, ya sean de tracción (desfavorables) o de compresión (favorables).

Las curvas utilizadas son análogas a la siguiente para diferentes valores de $S_{33,cd,min}$ (tensión de cálculo relativa mínima en la dirección de compresión principal). A partir del número de ciclos de cada bloque y la relación entre las tensiones de confinamiento y compresión se obtiene un factor de modificación de las tensiones relativas máximas y mínimas empleadas en el cálculo del daño.

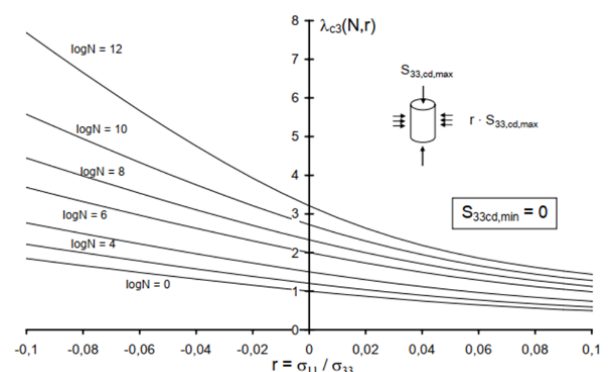


Figura 9. Factor multiaxial [5].

Dado que se obtienen dos tensiones de confinamiento a partir de Abaqus, se puede utilizar la tensiones mínima, media o máxima según se desee. Las tensiones de cálculo de daños se modifican de la siguiente forma:

Factor multiaxial

$$S_{ed, \min} = \gamma_{ed} \cdot \lambda_{e2 \text{ b2w}, e3}(N, \alpha \text{ b2w}, r) \cdot \sigma_{e, \min} \cdot \eta_e / f_{ed, for}$$

$$S_{ed, \max} = \gamma_{ed} \cdot \lambda_{e2 \text{ b2w}, e3}(N, \alpha \text{ b2w}, r) \cdot \sigma_{e, \max} \cdot \eta_e / f_{ed, for}$$

Valores uniaxiales

Figura 10. Valores de cálculo del análisis multiaxial.

4.2 Limitaciones de la herramienta

El modelo tiene diferentes limitaciones, que son las siguientes:

- Los elementos completamente dañados mantienen parte de la rigidez del material para permitir la convergencia del modelo. Sin embargo, la rigidez sigue siendo baja en comparación con los elementos no dañados.
- Para obtener un mejor resultado es necesario ajustar adecuadamente el número de ciclos en cada bloque de fatiga en que se discretiza el número total de ciclos de carga. El incremento de daño en cada bloque de fatiga no debe ser excesivo. Por lo tanto, deben realizarse varios análisis para ajustar el número de ciclos de cada bloque de fatiga y poder captar adecuadamente el efecto de la redistribución de tensiones.

5. Resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos. Se analizarán tanto los casos uniaxiales como los multiaxiales, proporcionando una visión detallada de cómo las diferentes condiciones de carga afectan la vida útil del componente.

5.1 Análisis uniaxial

Las siguientes imágenes muestran las diferencias entre los resultados del Código Modelo y la formulación no lineal planteada para un modelo con imperfecciones geométricas. Las principales características de los modelos son:

Tabla 2. Características de los modelos utilizados.

Medidas	Material	Imperfección	Carga
1 m x 1 m x 1 m	C50	Plano inclinado simple. Espacio de 2 mm	Mín: 2 MPa Máx: 6 MPa

- Los modelos comparados son:
1. Código Modelo.
 2. Modelo no lineal. 1000 ciclos por bloque de fatiga, 100 bloques de fatiga.
 3. Modelo no lineal. 100 ciclos por bloque de fatiga, 100 bloques de fatiga.
- Con estas consideraciones, los resultados de daños acumulados (SDV5) obtenidos son:

Tabla 3. Comparación de resultados en el análisis uniaxial.

Modelo	1er bloque de fatiga	2º bloque de fatiga	Último bloque de fatiga	Ciclos máximos
1	-	-	-	225
2				8,000
3				>10,000

Como se puede observar, el uso de la herramienta proporciona un mayor número de ciclos, debido a que en los primeros ciclos se produce un ligero daño de los elementos con su correspondiente deformación residual, lo que implica un aumento de la superficie de contacto. El aumento de la superficie de contacto junto con la reducción del módulo de Young produce una reducción de las tensiones, lo que aumenta la vida a fatiga del componente. El efecto se vuelve más evidente cuando se consideran bloques de fatiga pequeños, gracias a que se recoge de forma más refinada el efecto favorable de la progresiva redistribución de tensiones.

Para el modelo considerado, realizando una definición adecuada de los bloques de fatiga, se puede obtener una vida a fatiga de $2.06E+10$ ciclos, lo que representa una mejora significativa en comparación con los 225 ciclos obtenidos con el Código Modelo.

5.2 Análisis multiaxial

De forma análoga, las siguientes imágenes muestran las diferencias cuando se realiza un análisis uniaxial o multiaxial. Las principales características de los modelos utilizados para realizar la comparación son las mismas que las contempladas anteriormente.

Los modelos comparados son, para el análisis no lineal de materiales (100 ciclos por bloque de fatiga, 100 bloques de fatiga):

1. Modelo imperfecto. Análisis multiaxial desactivado.
2. Modelo imperfecto. Análisis multiaxial activado. Tensiones mínimas (compresión circunferencial máxima).
3. Modelo imperfecto. Análisis multiaxial activado. Tensiones medias.
4. Modelo imperfecto. Análisis multiaxial activado. Tensiones máximas (tracción circunferencial máxima).

Tabla 4. Comparación de resultados en el análisis multiaxial.

Modelo	1º bloque de fatiga	2º bloque de fatiga	Último bloque de fatiga	Ciclos máximos
1				>10,000
2				1,700
3				600
4				400

Como puede apreciarse, el análisis multiaxial reduce la vida a fatiga, ya que en este caso las tensiones circunferenciales son principalmente tensiones de tracción.

Además, se observa que la reducción de la vida útil es más significativa cuando se consideran las tensiones de tracción máximas.

6. Conclusiones

La herramienta desarrollada para el cálculo de fatiga en hormigón, considerando la redistribución de tensiones, ha demostrado ser una herramienta valiosa para evaluar la vida útil del hormigón bajo condiciones de carga cíclicas.

La formulación adoptada facilita la implementación y el uso práctico de la herramienta. Sin embargo, es importante reconocer la necesidad de validación continua frente a datos experimentales y situaciones reales, para poder ajustar los modelos a dichos casos y poder predecir el daño de forma más precisa. Esto permitiría también poder reducir el número de ensayos a realizar al disponer de una herramienta que permite predecir el daño ante cambios de geometría, imperfecciones, etcétera.

En resumen, la herramienta proporciona una buena estimación del posible fallo del modelo y es útil para apreciar las diferencias respecto al Código Modelo. Representa un avance significativo en la ingeniería, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y mejoras en el diseño estructural.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todos los compañeros y profesionales que han contribuido al desarrollo de esta innovadora herramienta de análisis de fatiga del hormigón.

En primer lugar, agradecemos a nuestro equipo de desarrollo, cuyo esfuerzo y dedicación han sido fundamentales para llevar este proyecto a buen puerto.

Agradecemos a los colaboradores académicos y profesionales del sector de la construcción, cuyas valiosas aportaciones y críticas constructivas han enriquecido nuestro trabajo. Su perspectiva práctica ha sido vital para adaptar nuestra herramienta a las necesidades reales de la industria.

Referencias

- [1] fib Bulletin 65 (2013) Model Code for Concrete Structures-2010, fédération internationale du béton (fib).
- [2] Grupo de Trabajo 1/7 (2020) Fatiga en hormigón estructural, ACHE. Monografía 34.
- [3] M. Thiele (2016) Experimentelle Untersuchung und Analyse der Schädigungsevolution in Beton unter hochzyklischen Ermüdungsbeanspruchungen, BAM-Dissertationsreihe. Band 140.
- [4] C. Zanuy (2008) Análisis seccional de elementos de hormigón armado sometidos a fatiga, incluyendo secciones entre fisuras, Universidad Politécnica de Madrid. Tesis doctoral.
- [5] J. Göhlmann (2009) Zur Schädigungsberechnung an Betonkonstruktionen für Windenergieanlagen unter mehrstufiger und mehraxialer Ermüdungsbeanspruchung, Berichte des Instituts für Massivbau, Fraunhofer IRB Verlag.