

Estimación de daño por fatiga mediante mecánica del daño continuo

Aplicación a plataformas marinas de acero

Alejandro Ruiz Sibaja, Ce Tochtli Méndez Ramírez
Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana.
Calle de la Pérgola s/n, Xalapa, Veracruz, 91090, México
Tel: 00.52.22.88.42.17.56. Fax: 00.52.22.88.12.06.88
aleruiz@uv.mx

Sergio Oller Martínez
Universitat Politècnica de Catalunya
c/Gran Capitán s/n, Barcelona 08034, España
Tel: 00.34.93.401.56.69. Fax: 00.34.93.401.10.48
sergio.oller@upc.es

RESUMEN

En este trabajo se presenta un nuevo modelo constitutivo para estimar el crecimiento de daño por fatiga en plataformas marinas fijas. El modelo se basa en un tratamiento de la mecánica del daño continuo (MDC). Se muestra la teoría necesaria para evaluar la degradación en la resistencia del material por efecto de la fatiga ocasionada por carga cíclica. La técnica permite reproducir la evolución en el tiempo de la respuesta no lineal de la estructura. Se incluye una aplicación numérica en dos dimensiones para una plataforma fija sometida a carga de oleaje. Se discuten las curvas de evolución de daño y deterioro de la resistencia.

PALABRAS CLAVE:

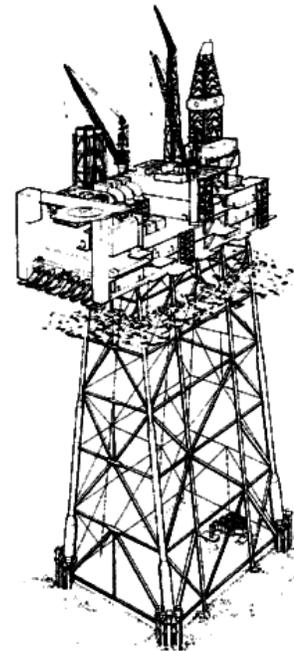
Mecánica, daño continuo, fatiga, plataforma.

ABSTRACT

In this paper a new constitutive model to evaluate the damage growth due to fatigue in fixed offshore platforms is presented. The model is based on a continuum damage mechanics (CDM) treatment. It shows the basic theory to evaluate deterioration in materials strength by fatigue effects caused by cyclic loading. This formulation permits to reproduce temporal evolution of non-linear structural response. Finally, examples are included for a fixed offshore platform subjected to wave load. Damage history and strength deterioration curves are also discussed.

KEYWORDS:

Mechanics, continuum damage, fatigue, platform.



INTRODUCCIÓN

Más de un cuarto del petróleo de la Tierra y más del 15% del gas natural se encuentran bajo el mar. La extracción de hidrocarburos desde instalaciones costa afuera ha incrementado las demandas sobre la integridad de las plataformas marinas de acero que se utilizan para tal fin. Particularmente, en el entorno marino, se ha encontrado que es necesario diseñar las estructuras contra un posible daño por fatiga. La naturaleza del daño por fatiga que ocurre en las plataformas marinas de acero tiene su origen en el crecimiento de grietas.

Las grietas surgen en las conexiones tubulares porque estas son regiones de alta concentración de esfuerzos y altos esfuerzos residuales. Además en esas zonas es común la presencia de defectos en la soldadura^{1,2}. El estudio de fatiga requiere el comprender que este no es un fenómeno asociado al concepto clásico de plasticidad y/o daño y que la rotura de la pieza se produce bajo cargas que están aún en el intervalo elástico del comportamiento del material.³

La estimación de la vida de fatiga en una estructura es difícil ya que la práctica de la ingeniería convencional se basa en curvas esfuerzo-log(N) y alguna regla de acumulación de daño. Esta aproximación se traduce en el uso de la regla de Palmgren-Miner la cual proporciona información sobre el número de ciclos hasta la falla, N_f para una



amplitud de esfuerzos determinada. Un defecto conocido de este método es el hecho observado de que el daño por fatiga no siempre crece en forma lineal con el número de ciclos aplicados.

En su lugar, la parte principal de la vida de servicio puede agotarse sin ninguna manifestación de reducción de la resistencia. De forma que el daño se vuelve evidente y crece en forma visible sólo hacia el final del tiempo de vida útil. Una segunda objeción ocurre cuando se tienen cargas cíclicas con amplitudes variables. En tal situación la regla de Palmgren-Miner pronostica el mismo valor de daño acumulado sin tomar en cuenta el orden de aparición de las diferentes amplitudes, hecho que es contrario a las observaciones experimentales.⁴

La aproximación alternativa se basa en el crecimiento de la grieta y recurre a la mecánica de la fractura. Esta técnica modela la situación física de forma más cercana y su principal objetivo es encontrar la resistencia residual en un cuerpo en función del tamaño de una grieta existente. Para esto se basa en una medida de la energía liberada, lo que conduce al desarrollo de un criterio de fractura para determinar el crecimiento de la grieta en cuestión.

De esto se deduce que este método está limitado a aquellos casos en los cuales se conozcan la orientación y el tamaño de una grieta existente. Además la teoría no está bien desarrollada para el caso tridimensional y carece de una base de datos suficiente que confirme los resultados de pruebas controladas con las condiciones registradas en campo.⁵

De lo anterior se desprende la necesidad de desarrollar una aproximación totalmente nueva para la predicción del comportamiento ante fatiga de un material virgen. Esta aproximación deberá ser totalmente independiente de la dimensión límite de la grieta y de los parámetros empíricos que se utilizan para pronosticar el crecimiento de grietas microscópicas.

Esta descripción hace pensar que la estructura teórica mecánica de las formulaciones inelásticas continuas, como la plasticidad y el daño, es apropiada para el tratamiento del daño por fatiga sin las limitaciones que presentan las técnicas tradicionales comentadas en los párrafos precedentes. Es así que a continuación se presenta un modelo para estimar el crecimiento de daño por fatiga mediante la

mecánica del daño continuo (MDC) que se ha desarrollado en años recientes en la Universidad Politécnica de Cataluña.⁶

Tal modelo modifica la ley constitutiva del material y se basa en las propiedades termodinámicas de acumulación de daño con lo cual se abate el grado de empirismo presente en las metodologías descritas en este apartado. Además, el modelo propuesto permite introducir el fenómeno de pérdida de resistencia de los metales producido por los efectos combinados de fatiga, plasticidad y daño. Las expresiones que se muestran en el desarrollo siguiente pueden incluirse, mediante las subrutinas correspondientes, en programas de análisis estructural, de forma tal que la ley constitutiva del material considere el fenómeno de fatiga.⁶

FORMULACIÓN DEL MODELO DE DAÑO POR FATIGA

Se define sólo el caso de fatiga isotérmica sin degradación. El tratamiento que se presenta difiere de aquel introducido por Chaboche,⁷ pues aquí no se define la evolución de la variable interna de daño en función del número de ciclos.

En su lugar, se formula una función que modifica el umbral de discontinuidad (daño), y a través de esta modificación se provoca una evolución implícita de la variable interna de daño. Consiste en introducir el efecto del número de ciclos en la función de daño, exigiendo el cumplimiento simultáneo de las mismas:

$$S_s(S_{ij}) - f_c(S_{ij}, d) \cdot f_{red}(N, S_{med}, R) = 0$$

$$\Rightarrow \left(\frac{S_s(S_{ij})}{f_{red}(N, S_{med}, R)} \right) - f_c(S_{ij}, d) = 0 \quad (1)$$

$$S'_s(S_{ij}, N, R) - f_c(S_{ij}, d) = 0 \quad (2)$$

En la expresión (1) $S\sigma(S_{ij})$ es el nivel de esfuerzos S_{ij} en un punto del material, $f_c(S_{ij}, d)$ representa la evolución de la resistencia en ese mismo punto, la función $f_{red}(N, S_{med}, R)$ hace sensible el modelo de daño al fenómeno de fatiga, d es la variable interna de daño, N es el número de ciclos actual, $R = S_{min} / S_{max}$ es el factor de reversión de los esfuerzos y S_{med} el esfuerzo medio. La función $S'\sigma(S_{ij}, N, R)$ en la expresión (2) indica el efecto del número de ciclos y

del factor de reversión, sobre el estado de esfuerzos en el punto del material.

El proceso mecánico descrito por las ecuaciones (1) y (2) permite acoplar fenómenos dependientes o no del tiempo y del número de ciclos. Por lo tanto el camino para alcanzar una determinada resistencia, resulta de la composición de dos rutas definidas en espacios independientes (figura 1). En la figura 1 también se observa esquemáticamente la evolución de la variable de daño global.

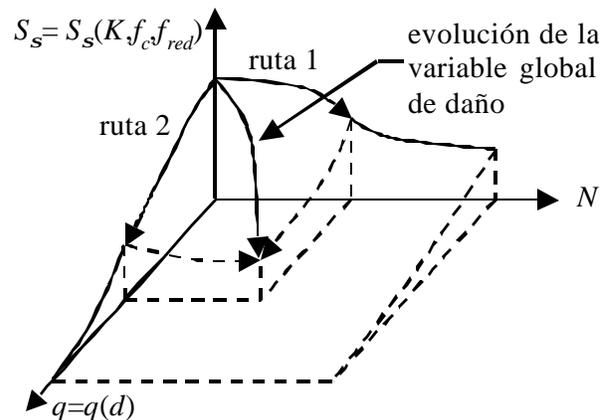


Fig. 1. Distintas rutas para converger a un punto del espacio de esfuerzo equivalente.

Curvas de Wöhler

Las curvas de Wöhler (Figura 2), representan en ordenadas los valores de esfuerzo y en abscisas el número de ciclos necesarios para romper una pieza. De esta manera, se establece la relación de pérdida de resistencia en función del número de ciclos de carga. Después de varios millones de ciclos de carga la curva $S - N$ se vuelve prácticamente horizontal.⁸ La caracterización de la carga se realiza mediante su período T , su relación de amplitudes $\Delta S = S_{max} - S_{min}$ y su relación de reversión $R = S_{min} / S_{max}$.

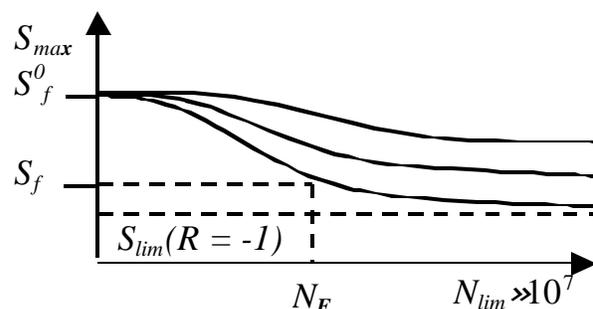


Fig. 2. Curva de Wöhler y resistencia máxima en un punto.

Las curvas de Wöhler permiten determinar la función $f_{red}(N, S_{med}, R)$ de disminución de resistencia por fatiga⁶. De la definición básica de estas curvas se observa que puede ocurrir una disminución de resistencia del material, aún para puntos del sólido sometidos a cargas por debajo del límite elástico. Se denomina N_F al número de ciclos que necesita un punto del sólido sometido a un esfuerzo S_f para alcanzar el umbral del comportamiento elástico.

Particularización de la función de reducción $f_{red}(N, S_{med}, R)$ para el acero A517

Es necesario deducir previamente las expresiones analíticas para las curvas de Wöhler. En el estado virgen ($N = 0$ ciclos), la resistencia es $S_{max} = S_f^0$ y a su vez esta corresponde al umbral de resistencia instantáneo para un problema no cíclico. Se propone que cuando $N \rightarrow \infty$ se alcanza el límite de resistencia a la fatiga:

$$S_{lim} = S_f^0 \left(\frac{1}{1.26} + \frac{R}{3.3} \right) \quad (3)$$

a través de una evolución de la resistencia máxima de la forma⁹:

$$S_{max} = S_f^0 \exp(-A (\log N)^a) \quad (4)$$

Imponiendo $S_{lim} = S_{max}$ ($N=N_{lim}=10^7$), se obtiene el límite de resistencia a la fatiga:

$$S_{lim} = S_f^0 \left(\frac{1}{1.26} + \frac{R}{3.3} \right) = S_f^0 \exp(-A (\log N)^a)$$

$$\rightarrow A = - \frac{\ln \left(\frac{1}{1.26} + \frac{R}{3.3} \right)}{7^a} \quad (5)$$

Para ajustar las curvas de Wöhler se adopta $\alpha = 4(2^{2R})$ tal como recomiendan Suero y Oller.⁹ Al graficar las expresiones (3), (4) y (5) se obtienen las curvas que se muestran en la figura 3. Se observa que la simulación numérica ofrece una buena reproducción de los datos experimentales.^{6,9}

Los resultados obtenidos a partir de las expresiones para las curvas de Wöhler, ecuaciones (3), (4) y (5), se pueden tomar como base para definir las curvas de evolución de la resistencia límite a la

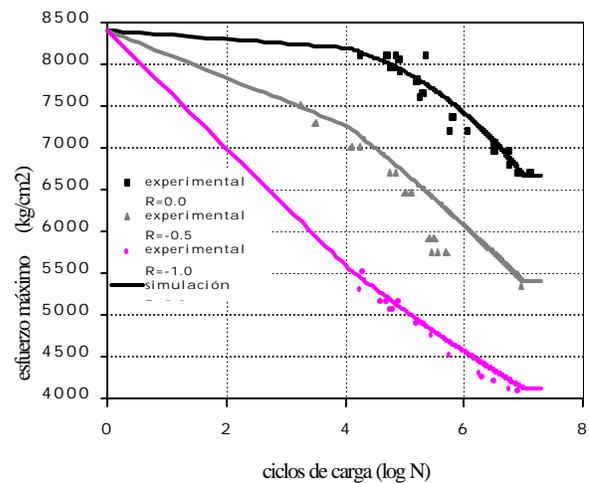


Fig. 3. Simulación numérica de las curvas de Wöhler.

fatiga para el acero sometido a la acción de carga cíclica. Es así que resultan las siguientes aproximaciones⁶:

$$S_f(N=0) = S_f^0 \quad (6)$$

en donde:

$$S_f(N < N_F) = S_f^0 \exp(-B_1 (\log N)^b)$$

$$= S_f^0 f_{red}(N, S_{med}, R) > S_{max}(N) \quad (7)$$

$$S_f(N = N_F) = S_f^0 \exp(-A (\log N)^a) \quad (8)$$

$$S_f(N_F \leq N \leq N_{lim}) = S_f = S_f^0 \exp(-B_1 (\log N)^b)$$

$$= S_f^0 f_{red}(N, S_{med}, R) \quad (9)$$

$$S_f(N \geq N_{lim}) = S_f = S_f^0 \exp(-B_2 (\log N)^b)$$

$$= S_f^0 f_{red}(N, S_{med}, R) \quad (10)$$

$$B_1 = - \frac{\ln \left(\frac{S_{apli}}{S_f^0} \right)}{(\log N_F)^b}, \quad B_2 = - \frac{\ln \left(\frac{S_{lim}}{S_f^0} \right)}{(7)^b} \quad (11)$$

$$b = 4(2^{2R}) \cdot C, \quad N_F = \log^{-1} \left[7 \left(\frac{\ln \left(\frac{S_{apli}}{S_f^0} \right)}{\ln \left(\frac{1}{1.26} + \frac{R}{3.3} \right)} \right)^{1/a} \right] \quad (12)$$

En estas expresiones S_{apli} representa el nivel de esfuerzo aplicado en el punto de análisis. Las ecuaciones (6) a (12) se utilizaron para escribir una subrutina en lenguaje Fortran.⁶ Esta subrutina se incorporó en un programa de análisis estructural¹⁰ para modificar su ley constitutiva de forma tal que se considere el fenómeno de fatiga de acuerdo con el modelo presentado en este trabajo.

APLICACIÓN NUMÉRICA

Se considera una estructura típica de plataforma marina de acero (figura 4). El sistema cuenta con elementos tubulares estructurados en forma de torre.

La plataforma tiene una altura de 42.50 m y está desplantada en una profundidad de agua de 37.50 m. Los elementos tubulares constituyen las dos piernas y un sistema de arriostramientos en “K”. Algunas características geométricas de los elementos estructurales se indican en la figura 4.

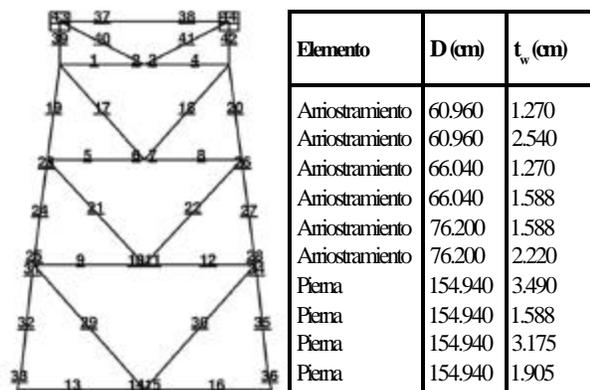
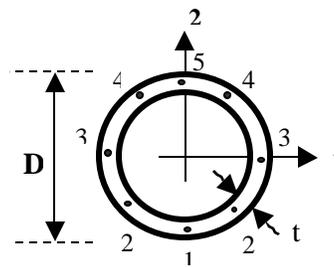


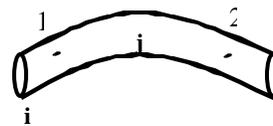
Fig. 4. Modelo de análisis de plataforma marina de acero.

La estructura se discretizó en 42 elementos viga-tubo, con tres grados de libertad por nodo, y dos elementos masa con dos grados de libertad, esto hace un total de 44 elementos (figura 3). Los elementos viga-tubo de tres nodos consideran dos puntos de integración de Gauss. Cada uno de estos elementos tiene cinco secciones de integración (figura 5). Se usaron dos masas concentradas para reproducir los pesos de la cubierta y del equipo industrial.

El modelo dinámico de la torre constó de 73 nodos. La longitud característica promedio de los elementos viga-tubo resultó de 377.00 cm. El estado del material se revisó en los puntos de integración de Gauss de cada barra y se consideró que el sistema está empotrado en el lecho marino. Se usaron las



secciones de integración



elemento cuadrático de 3 nodos con dos puntos de integración

Fig. 5. Elemento tubo cuadrático de 3 nodos en el plano.

siguientes propiedades físicas del material: $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_s^0 = 2500.00 \text{ kg/cm}^2$, $\nu_s = 0.29$, $\rho_s = 7.5 \times 10^{-5} \text{ kg/cm}^3$. El peso total de la torre fue de $7.4556 \times 10^6 \text{ kg}$, sin incluir pilotes y conductores. Este peso se concentró en la cubierta superior de la estructura. Las fuerzas de oleaje se modelaron según la ecuación de Morison^{11,12}. Los coeficientes de Morison que se utilizaron son $C_m = 1.05$ y $C_D = 1.20$.

Conviene mencionar que el efecto de cargas secuenciales de oleaje sobre la vida por fatiga de las plataformas marinas de acero es un área de creciente interés en el cálculo de estos sistemas. Esto se debe a que el oleaje es una combinación de cargas de amplitud y período variables. En pruebas controladas de laboratorio se ha demostrado que las magnitudes relativas y el número de ciclos de aplicación de la carga, son variables importantes del problema^{1,2,4,13}.

Por este motivo se consideró la acción de una secuencia de cargas de oleaje tal que, durante un período de dos meses, se aplicó a la plataforma una ola con altura $H = 100 \text{ cm}$, longitud $L = 3903.23 \text{ cm}$ y período $T = 5.0 \text{ s}$. Después de este lapso de tiempo se aplicó, durante 10 meses, una ola con altura $H = 100 \text{ cm}$, longitud $L = 2498.10 \text{ cm}$ y período $T = 4.0 \text{ s}$.

A partir de ese momento se continuó con la acción de los máximos de la carga a fin de reproducir los efectos de la misma durante un intervalo de análisis de 25 años que es la vida útil de este tipo de

estructuras. El uso de los valores extremos del proceso de carga de oleaje se justifica porque el curso de acción entre extremos consecutivos no se considera importante.¹³ Esto hace posible el uso de un algoritmo rápido de cálculo de fatiga basado en la mecánica del daño continuo.⁶

La aplicación de la secuencia de cargas de oleaje, durante 25 años, originó la degradación en los arriostramientos del nivel más inferior de la plataforma, elementos 29, 30 y 32 del modelo de análisis. En la figura 6 se indican el nivel de daño y la fracción de la resistencia original al cabo de 25 años de carga de oleaje.

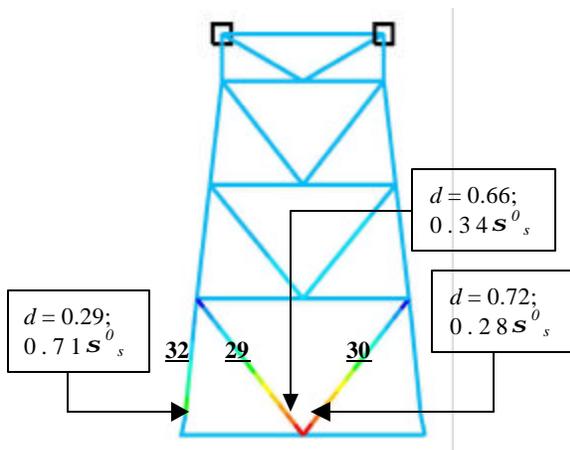


Fig. 6. Degradación en los arriostramientos del nivel más inferior.

En la figura 7, se muestra la evolución de la resistencia por daño y fatiga en estos arriostramientos. Se observa el carácter tridimensional de la curva como consecuencia del acoplamiento entre los fenómenos de daño y fatiga.

Del análisis de esta superficie se concluye que el elemento más afectado por la secuencia de cargas de oleaje es el elemento 30 pues en él se alcanza un valor máximo de daño de 0.72 (siendo 1.00 el daño total en la pieza) y una disminución de la resistencia de hasta 28% respecto de su valor original.

La utilidad de las curvas del tipo de la figura 7 radica en que pueden incorporarse en una estrategia de inspección y reparación de la estructura. En este sentido la revisión de la resistencia residual de la plataforma marina permite establecer si se ajusta o no a los requisitos de diseño con que fue concebida.

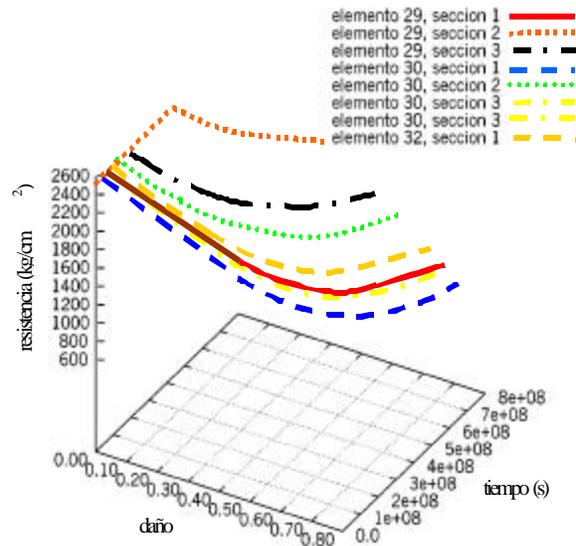


Fig. 7. Evolución de la resistencia por daño y fatiga.

Al mismo tiempo ayuda a fijar directrices sobre las acciones necesarias para prolongar su vida útil. De igual manera, estas curvas pueden utilizarse desde la etapa de concepción de la estructura pues permiten la evaluación de diferentes geometrías y combinaciones de carga. Esto proporciona una herramienta analítica para llevar a cabo estudios paramétricos que sirven de base para el desarrollo de recomendaciones de diseño.

CONCLUSIONES

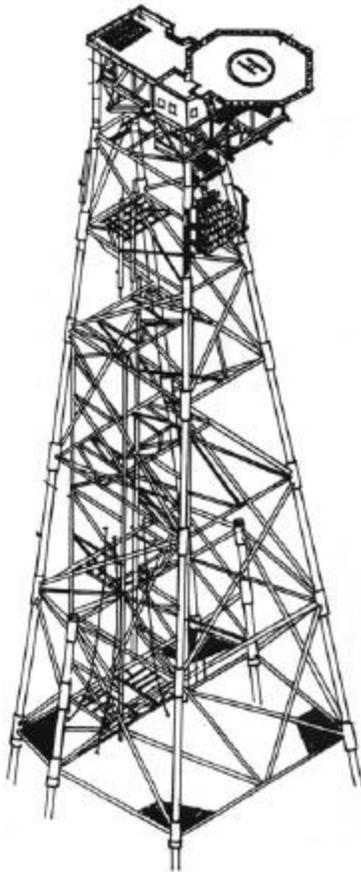
Se ha presentado un modelo analítico, basado en la mecánica del daño continuo, para determinar la evolución de la resistencia del material en estructuras sometidas a carga cíclica. El modelo se ha particularizado para el caso del acero y la aplicación se ha realizado en plataformas marinas sometidas a carga de oleaje. Las ecuaciones mostradas permiten modificar la ley constitutiva del material e incluir este comportamiento dentro de programas de análisis estructural.

Los resultados conseguidos en la aplicación permiten obtener gráficas de evolución de la resistencia por daño y fatiga que pueden utilizarse tanto para fines de revisión de una estructura construida como para propósitos de diseño de una estructura a proyectar.

Es necesario realizar una calibración más amplia del modelo presentado aquí para justificar su generalización. Sin embargo los resultados mostrados en este y otros trabajos^{6,14} indican que el colapso progresivo por fatiga de la estructura está gobernado por el colapso de sus componentes próximas al fondo del mar y esta situación controla la capacidad resistente de la plataforma marina ante la acción del oleaje. En síntesis, la plataforma marina se comporta de manera semejante a una viga empotrada cuya sección más débil está próxima al sitio de empotre. Este es el comportamiento que se observa con frecuencia en plataformas marinas fijas.^{6,14}

REFERENCIAS

1. Byers, W. G., Marley, M. J., Mohammadi, J., Nielsen, R. J., and Sarkani, S. (1997), "Fatigue Reliability Reassessment Applications: State of the Art Paper", *Journal of Structural Engineering ASCE*, 123(3):277-285.



2. Dover, W. D. (1991), "Chapter 15: Fatigue Behaviour of Offshore Structures", Volume II of "Offshore Structures", Krieger Publishing Co.
3. Dowling, N. E. (1999), "Mechanical Behavior of Materials", Prentice-Hall.
4. Kutt, T. V. and Bieniek, M. P. (1998), "Cumulative Damage and Fatigue Life Prediction", *AIAA Journal*, 26(2):213-219.
5. Jubran, J. S. and Cofer, W. F. (1991), "Ultimate Strength Analysis of Structural Components Using the Continuum Damage Mechanics Approach", *Computers & Structures*, 39(6):741-752.
6. Ruiz Sibaja, Alejandro (2001) "Análisis de Fatiga en Plataformas Marinas de Acero Mediante Mecánica Del Daño Continuo", tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.
7. Chaboche, J. L. (1974), "Une Loi Différentielle d'Endommagement de Fatigue Avec Accumulation Non Linéaire", *Revue Française de Mécanique*, 50-51.
8. Partón, V. Z. (1990), "Mecánica de la Destrucción. De la Teoría a la Práctica", Mir.
9. Suero, A. y Oller, S. (1998), "Tratamiento del Fenómeno de Fatiga Mediante la Mecánica de Medios Continuos", Monografía CIMNE, 45.
10. ABAQUS Version 5.8-16 (1999), "Theory Manual", Hibbitt, Karlson and Sorensen, Inc.
11. Brebbia, C. E. and Walker, S. (1979), "Dynamic Analysis of Offshore Structures", Newness-Butterworths.
12. Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. (1998), "Water Mechanics for Engineers and Scientist", Prentice-Hall.
13. Agerskov, H. and Pedersen, N. T. (1992), "Fatigue Life of Offshore Steel Structures Under Stochastic Loading", *Journal of Structural Engineering ASCE*, 118(8):2101-2117.
14. Sudati Sagrilo, L. V. e Prates de Lima, E. C. (1997), "Un Procedimento Simplificado para Análisis de Confiabilidad Estructural de Plataformas Marítimas Fijas", *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 13(2):149-163.