

Capítulo 6

Validación y aplicación del modelo de predicción de vida

6.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es presentar algunos ejemplos de validación y aplicación del modelo desarrollado en el capítulo 4 y en el capítulo 5 que permitan corroborar la consistencia de su formulismo y de su implementación numérica.

En el apartado 6.2 se presentan varios ejercicios de verificación del modelo. Las primeras pruebas de validación se realizan con un material homogéneo donde se comprueba la respuesta del método de degradación de la resistencia por efecto de la carga cíclica. Mediante estas pruebas se pretende validar la formulación de la fatiga: curvas S-N, degradación de la resistencia residual, acumulación de la degradación, etc. En concreto se realizan pruebas a carga cíclica constante (apartado 6.2.1) y pruebas de acumulación no lineal con cargas cíclicas de características variables (apartado 6.2.2).

El segundo ejercicio de este apartado consiste en el análisis de la degradación de un material compuesto. El segundo ejercicio de validación se trata de analizar la degradación de un composite bi-componente ideal. En el material compuesto se han definido como la adición de dos componentes que trabajan en paralelo. La degradación efectiva del compuesto será, también, la adición de la degradación de los dos componentes. Mediante este ejemplo se pretende comprobar como responde el modelo constitutivo del composite a partir de la teoría de mezclas.

En el apartado 6.3 se presenta un modelo de aplicación para un CFRP. En este ejemplo se elaboran las curvas S-N generalizadas para el conjunto del laminado. Esta información de la degradación a fatiga se incorpora a la formulación del deslizamiento fibra-matriz (DFM), a partir de la cual se obtiene la respuesta a cargas cíclicas del composite. Para ejemplificar el modelo se utiliza una aplicación del laminado en una pieza estructural (una biela).

Finalmente en los apartados 6.4 y 6.5 se presentan dos aplicaciones de la metodología cuyo objetivo principal es demostrar las posibilidades del modelo constitutivo desarrollado en este trabajo como herramienta de diseño para estimar la vida a fatiga de componentes

estructurales de materiales compuestos. El primer ejemplo ilustra la degradación a fatiga de una pieza tubular destinada a la unión de perfiles tubulares de compuestos, y el segundo ejemplo analiza un nuevo diseño de buje de composite para un aerogenerador tradicional de eje horizontal.

6.2. Verificación del modelo de degradación a fatiga

A continuación se presentan una serie de ejercicios de verificación de la metodología de degradación a fatiga propuesta en este trabajo. La implementación se ha realizado en el código de elementos finitos PLCD2.

El ejemplo utilizado es un modelo con un único elemento finito cuadrado, tal como se muestra en la figura 6-1. Dos de sus nodos se encuentran fijos (el 1 y el 4) mientras que a los otros se les impone un desplazamiento en la dirección horizontal (el 2 y el 3). Este desplazamiento impuesto varía en función del tiempo generando una carga cíclica sobre el elemento. Cuando el desplazamiento es positivo el elemento queda cargado a tracción uniaxial y cuando el desplazamiento es negativo el material queda sometido a compresión uniaxial.

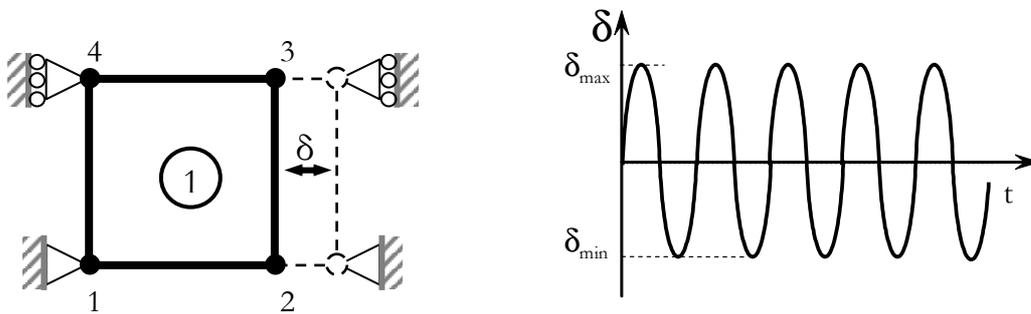


Figura 6-1. Modelo de un único elemento finito y desplazamiento cíclico impuesto.

La ecuación constitutiva utilizada para la degradación de la rigidez del material es un modelo de daño escalar (ver apartado 3.6). El modelo de daño permite un nivel inicial de umbral de daño para esfuerzos a tracción distinto del umbral de daño para la compresión. Este nivel umbral para $N=1$ se degrada debido a la fatiga del material, según la metodología descrita en el capítulo 4, siguiendo unas curvas de vida S-N diferenciadas para la tracción y la compresión.

6.2.1. Comprobación de la degradación a carga cíclica constante

Este primer análisis tiene por objetivo demostrar la capacidad de la metodología propuesta de tratar el efecto que producen en la vida del material los distintos parámetros de la sollicitación: el nivel de tensión cíclica, el valor de la componente media y la degradación simultánea de las resistencias a tracción y compresión del material.

Al modelo descrito en el apartado 6.2 se le aplican casos de carga que produzcan una tensión cíclica de características constantes. Por lo tanto, para verificar el correcto funcionamiento de la metodología de degradación se debe comprobar que el material entra en degradación de su módulo elástico al alcanzar el número de ciclos en que el nivel de tensión aplicado intercepta la curva S-N.

Para este primer ejercicio de verificación tanto de la influencia de la tensión máxima, apartado (a), como de la tensión media, apartado (b), se ha definido un material homogéneo ficticio. Así mismo, se han formulado unas curvas S-N generalizadas ideales y diferenciadas para la tracción y la compresión según las expresiones propuestas por Oller-Salomon, (6-1) y (6-2), utilizando una interpolación para los distintos índices de reversión según los ajustes expresados por las ecuaciones (6-3) y (6-4). Para la acumulación de la resistencia residual también se ha tomado una expresión desarrollada por Oller-Salomon (ver Apéndice B) aunque en este ejemplo, dado que es a carga constante, no tiene influencia en los resultados observados.

$$S_T = S_T^* + (S_{UT} - S_T^*) \cdot [A_T] \left(\frac{\log N}{\log N^*} \right)^\beta \quad (6-1)$$

$$S_C = S_C^* + (S_{UC} - S_C^*) \cdot [A_C] \left(\frac{\log N}{\log N^*} \right)^\beta \quad (6-2)$$

donde, para distintos valores de reversión, se utiliza

$$S_T^*(Q) = S_{0T}^* + \left(\frac{\langle Q \rangle}{|Q|} \cdot S_{UT} - S_{0T}^* \right) \cdot \left(\frac{|Q|}{|Q| + 1} \right)^{\theta_T} \quad (6-3)$$

$$S_C^*(Q) = -S_{0C}^* + \left(\frac{\langle Q \rangle}{|Q|} \cdot S_{UC} + S_{0C}^* \right) \cdot \left(\frac{|Q|}{|Q| + 1} \right)^{\theta_C} \quad (6-4)$$

Los parámetros que definen al material ideal analizado en este ejercicio son los mostrados en la tabla 6-1.

	Resistencia a tracción S_T	Resistencia a compresión S_C
Umbral de daño para $N=1$	$S_{UT} = 100$ MPa	$S_{UC} = -120$ MPa
Umbral de daño para $N^*=10^8$ y $Q=0$	$S^* = 50$ MPa	$S^* = -40$ MPa
Parámetro A	$A_T = 0.99362$	$A_C = 0.99362$
Parámetro β	$\beta_T = 3.35$	$\beta_C = 3.35$
Parámetro θ para la interpolación	$\theta_T = 1.1$	$\theta_C = 1.1$

Tabla 6-1. Características de degradación a fatiga del material ideal utilizado en el ejercicio de la sección 6.1.

Con los parámetros de la tabla 6-1 se obtienen las familias de curvas S-N mostradas en la figuras 6-2 y 6-3. La primera para la resistencia a tracción y la segunda para la resistencia a compresión. Otra forma de representar esta información es mediante las superficies mostradas en los diagramas de la figura 6-4.

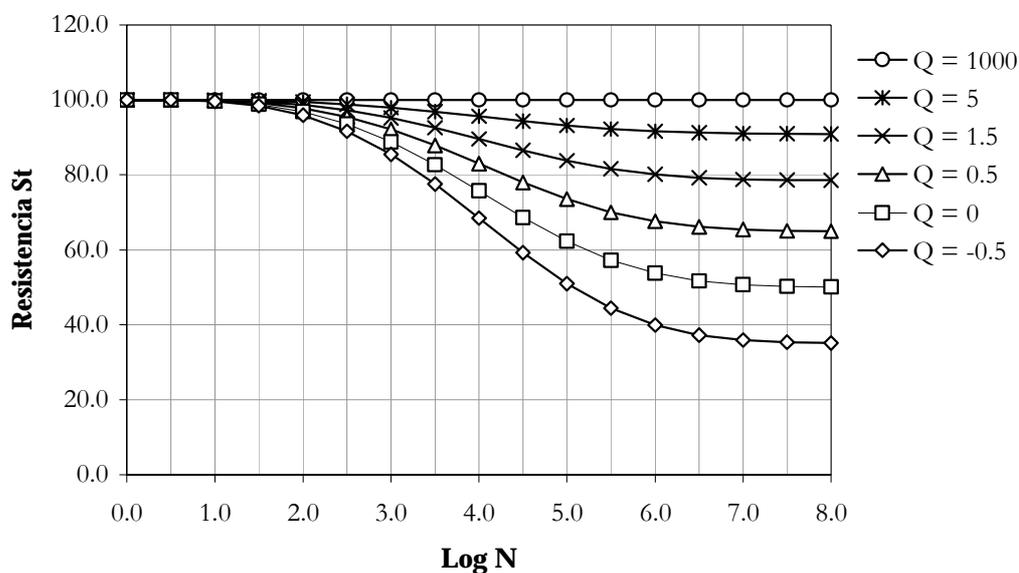


Figura 6-2. Familia de curvas S-N para la resistencia a tracción. Se observa que para $Q=0$ la resistencia evoluciona desde 100 MPa en $N=1$ hasta 50 MPa en $N=10^8$.

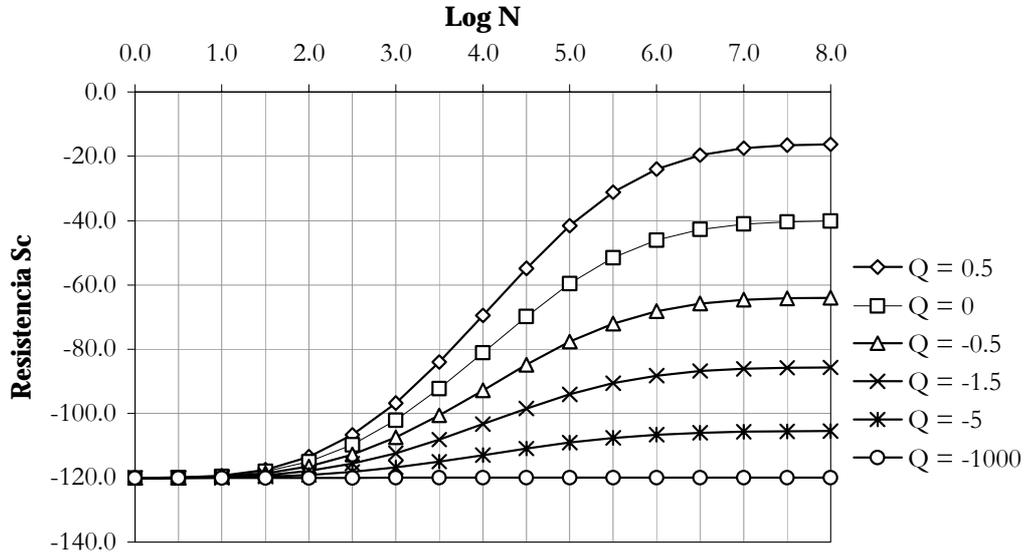


Figura 6-3. Familia de curvas S-N para la resistencia a compresión. Se observa que para $Q=0$ la resistencia evoluciona desde -120 MPa en $N=1$ hasta -40 MPa en $N=10^8$.

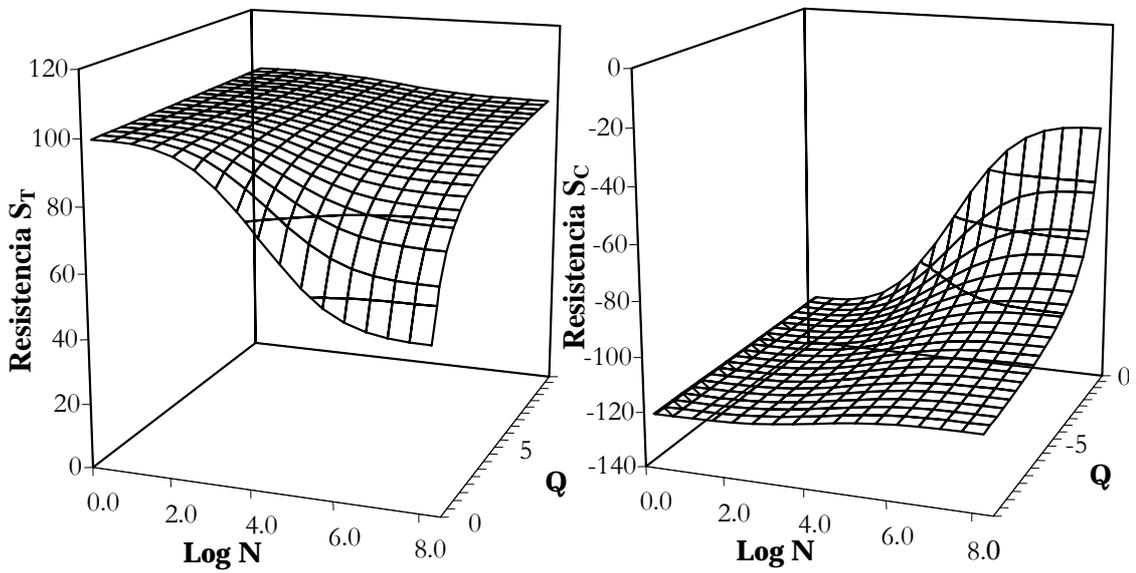


Figura 6-4. Curvas S-N generalizadas para la resistencia a tracción (izquierda) y a compresión (derecha).

(a) Pruebas a distinta tensión máxima

Se somete al modelo a tres pruebas de carga. Cada una de ellas tiene distinta tensión máxima inicial (90 MPa, 80 MPa y 60 MPa) pero mantienen el mismo índice de reversión ($Q=0,5$). Se muestra, en la figura 6-5, que las pruebas con una tensión máxima de 90 y 80 MPa provocan la activación del modelo de daño de la rigidez del material cuando llegan al valor de su curva S-N (para $Q=0,5$), lo cual se pone de manifiesto por la disminución del nivel de tensión a que está sometido el material a partir de ese punto. En cambio, en la tercera prueba, la tensión máxima de 60 MPa no llega a activar el modelo de daño, ya que se trata de una tensión inferior al límite de fatiga del material (que para $Q=0,5$ tiene un valor de 64,9 MPa)

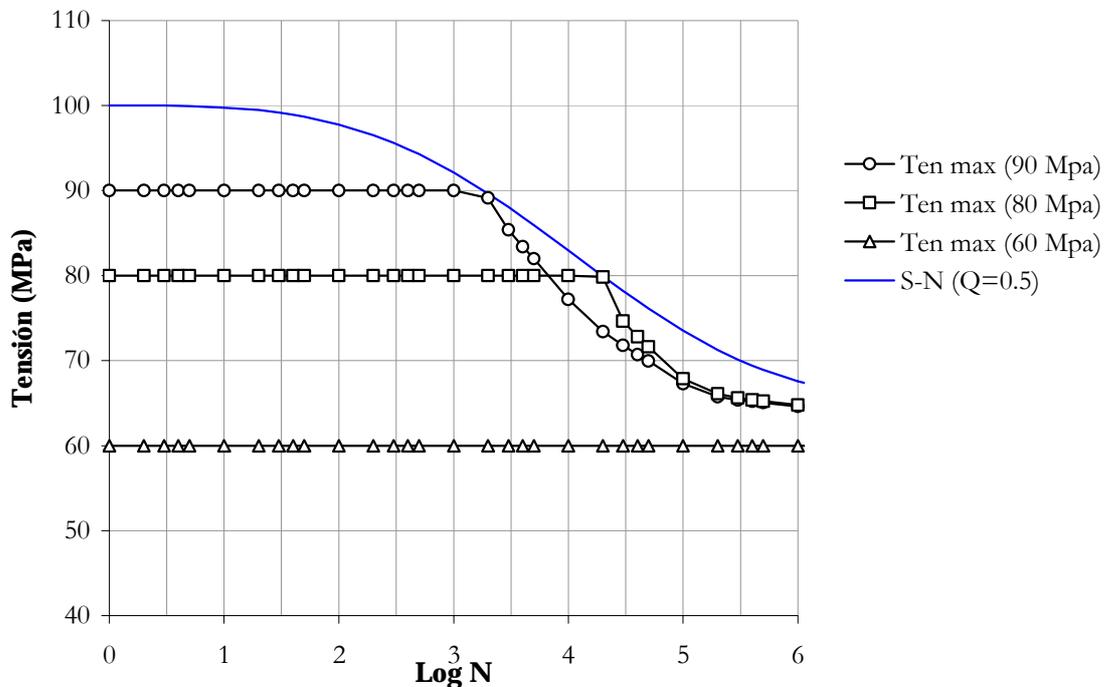


Figura 6-5. Evolución de la tensión máxima para cargas (90, 80 y 60 MPa) con un índice de reversión $Q=0,5$.

Aún así, en los tres casos, el modelo de degradación a fatiga provoca una disminución de la resistencia residual. La diferencia entre los casos de carga de 90 y 80 MPa con respecto al de 60 MPa es que en los primeros la resistencia residual a tracción llega a intersectarse con la evolución de la tensión máxima (sobre la curva S-N, puesto que se trata de una tensión de características constantes), ver figura 6-6, mientras que en la prueba a 60 MPa también se

produce una disminución de la resistencia residual, pero ésta, como se comentó anteriormente, nunca llega a intersectarse con el valor de la tensión máxima (ver figura 6-7).

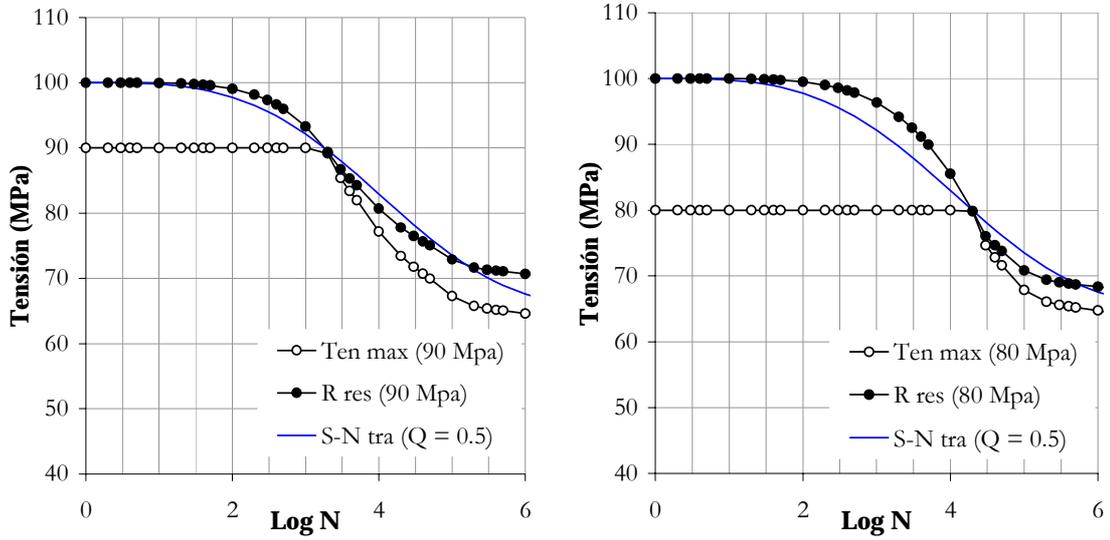


Figura 6-6. Evolución de la tensión máxima y de la resistencia residual a tracción para cargas de 90 y 80MPa, con un índice de reversión $Q=0,5$.

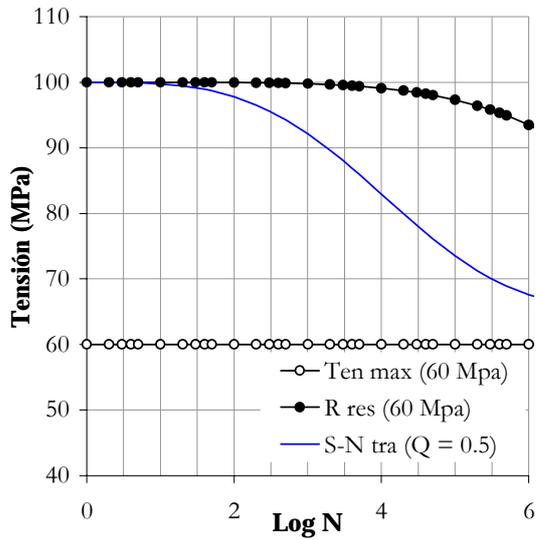


Figura 6-7. Evolución de la tensión máxima y de la resistencia residual a tracción para una carga de 60 MPa, con un índice de reversión $Q=0,5$.

(b) Pruebas con variación de la tensión media

Para comprobar el efecto de la tensión media sobre la degradación a fatiga del modelo, se le aplican distintas sollicitaciones cíclicas, en términos de desplazamientos. Cada una de ellas tiene el mismo desplazamiento máximo y se varía el desplazamiento mínimo. Este desplazamiento cíclico provoca una tensión cíclica con distintos valores de tensión media, dependiendo de la relación entre el desplazamiento máximo y mínimo. Los valores de carga se han escogido para que el modelo no rompa a compresión, para omitir, de momento, el efecto del límite de resistencia a compresión.

Se han realizado tres pruebas, todas ellas con una tensión máxima de 80 MPa y unos índices de reversión distintos ($Q=1$, $Q=0,5$ y $Q=0$). Tal como se observa en la figura 6-8 y de forma ampliada en la figura 6-9 a cada prueba se activa el modelo de daño al coincidir el nivel de tensión máxima con el nivel de la resistencia residual a tracción. Esto siempre ocurre en un punto de la curva S-N, dado que las pruebas hasta ese instante, han sido de tensión cíclica de características constantes.

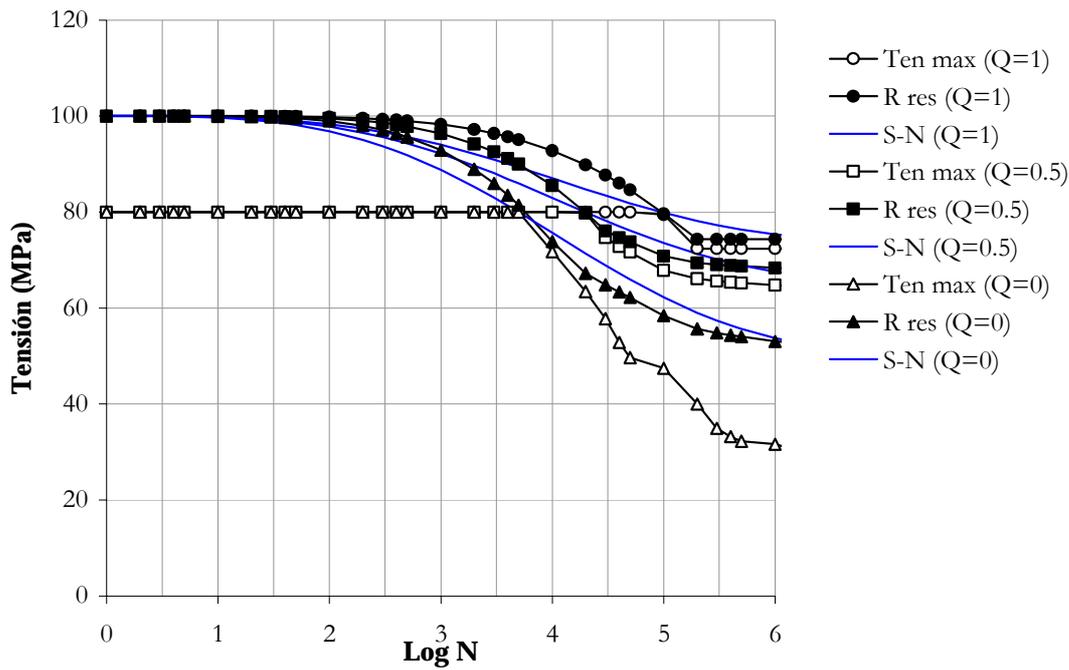


Figura 6-8. Evolución de la tensión máxima y de la resistencia residual a tracción para cargas de 80 MPa de tensión máxima y un índice de reversión Q de 0, 0,5 y 1.

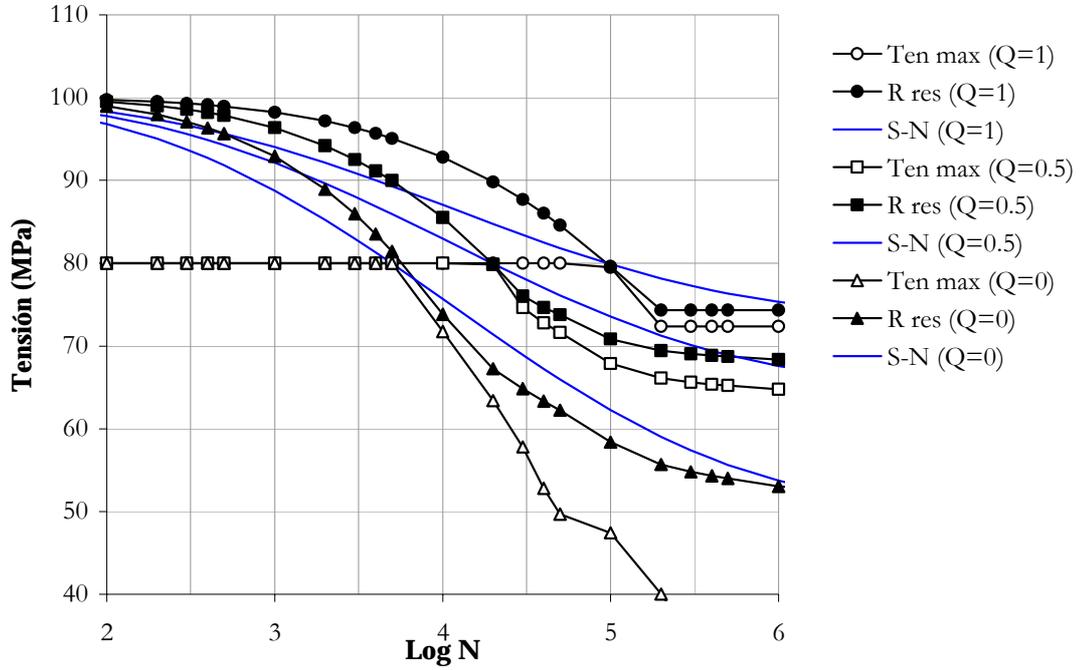


Figura 6-9. Evolución de la tensión máxima y de la resistencia residual a tracción para cargas de 80 MPa de tensión máxima y un índice de reversión Q de 0, 0.5 y 1.

(c) Efecto de la resistencia a tracción y la resistencia a compresión

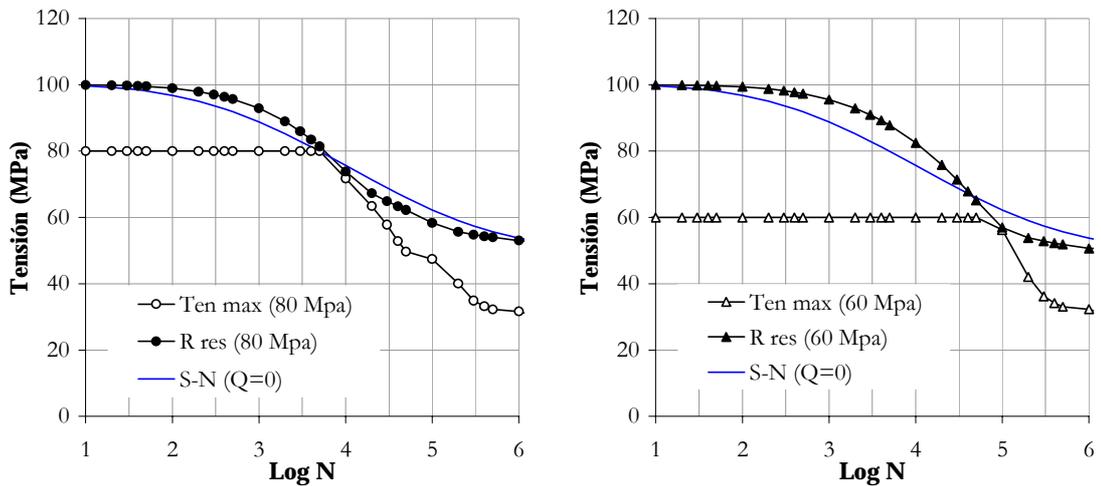


Figura 6-10. Evolución de la tensión máxima y de la resistencia residual a tracción para cargas de 80 MPa y 60 MPa de tensión máxima y un índice de reversión $Q=0$.

En la figura 6-10 puede observarse como con dos pruebas con carga alterna ($Q=0$) se obtiene un comportamiento distinto del material. En efecto, al realizar una prueba con una tensión alterna de tensión máxima 80 MPa y tensión mínima -80 MPa, se observa que el material entra en daño, como en los casos anteriores, cuando la resistencia residual a tracción se encuentra con el nivel de tensión máxima. En cambio, al hacer la prueba con una tensión alterna de tensión máxima 60 MPa y tensión mínima -60 MPa, el material entra en daño antes de intersecarse con el de la curva S-N. Además, en este último caso, se observa como la resistencia residual a tracción se degrada más rápidamente de lo que se esperaría para este nivel de tensión máxima en el que sólo existiera degradación a tracción.

Esta diferencia de comportamiento es debida a que, en el primer caso, el material supera el límite elástico por tracción mientras que en la segunda prueba lo hace por compresión. Ésto puede observarse gráficamente en las figura 6-11 (80 MPa), donde el material supera el umbral de daño por tracción y en la figura 6-12 (60 MPa), donde supera el límite por compresión. Cabe observar que en esta última prueba la resistencia residual a compresión se interseca con el nivel de tensión mínima sobre la curva S-N a compresión (detalle en la figura 6-13).

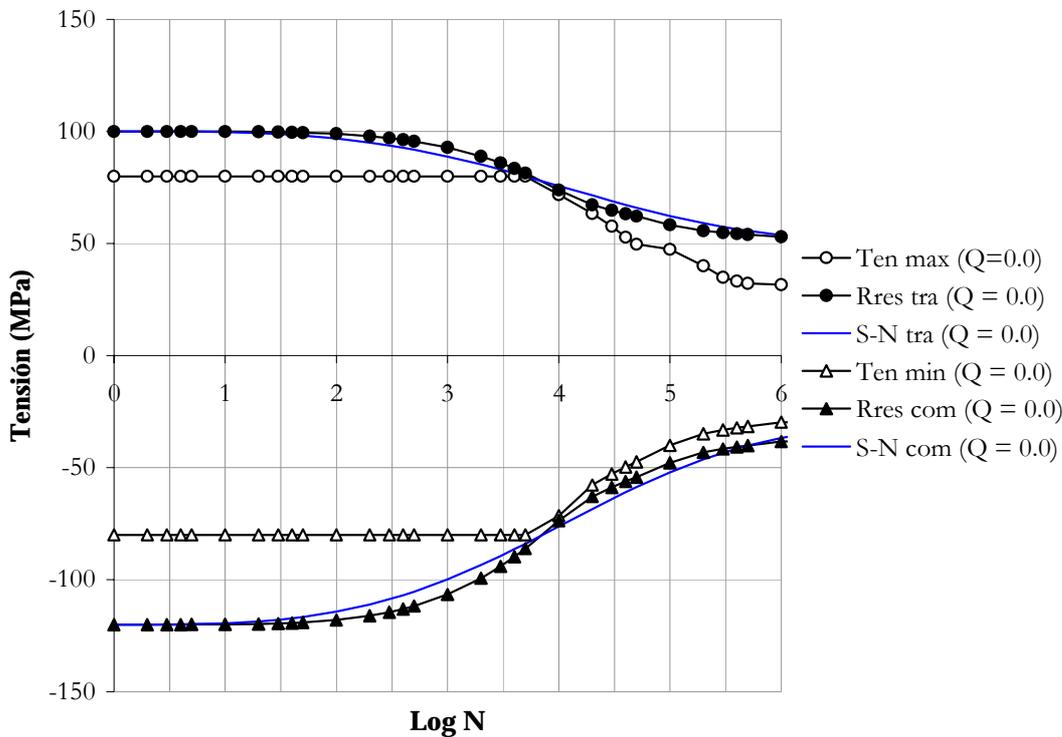


Figura 6-11. Evolución de la tensión máxima y mínima, y de la resistencia residual a tracción y a compresión para una carga alterna de 80 MPa de tensión máxima y -80 MPa de tensión mínima.

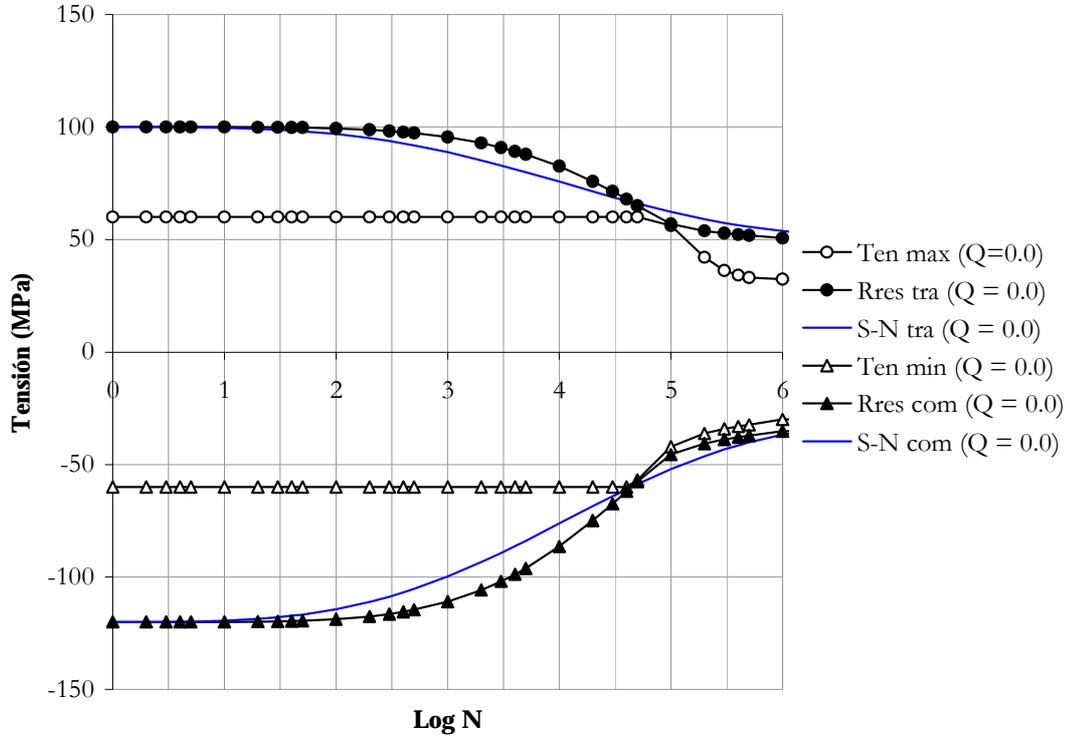


Figura 6-12. Evolución de la tensión máxima y mínima, y de la resistencia residual a tracción y a compresión para una carga alterna de 60 MPa de tensión máxima y -60 MPa de tensión mínima.

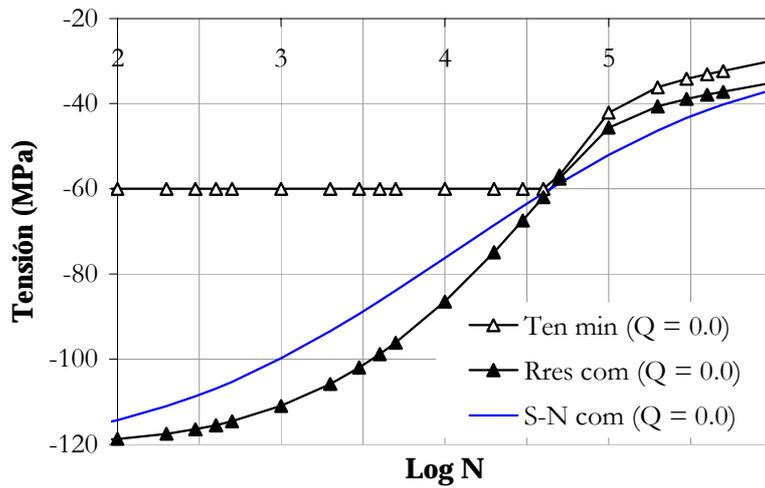


Figura 6-13. Evolución de la tensión mínima y de la resistencia residual a compresión para una carga alterna de 60 MPa de tensión máxima y -60 MPa de tensión mínima.

En la figura 6-14 se presenta otra prueba (-80 MPa de tensión mínima y un índice de reversión $Q = -0.5$) donde el material supera el umbral de daño claramente por compresión.

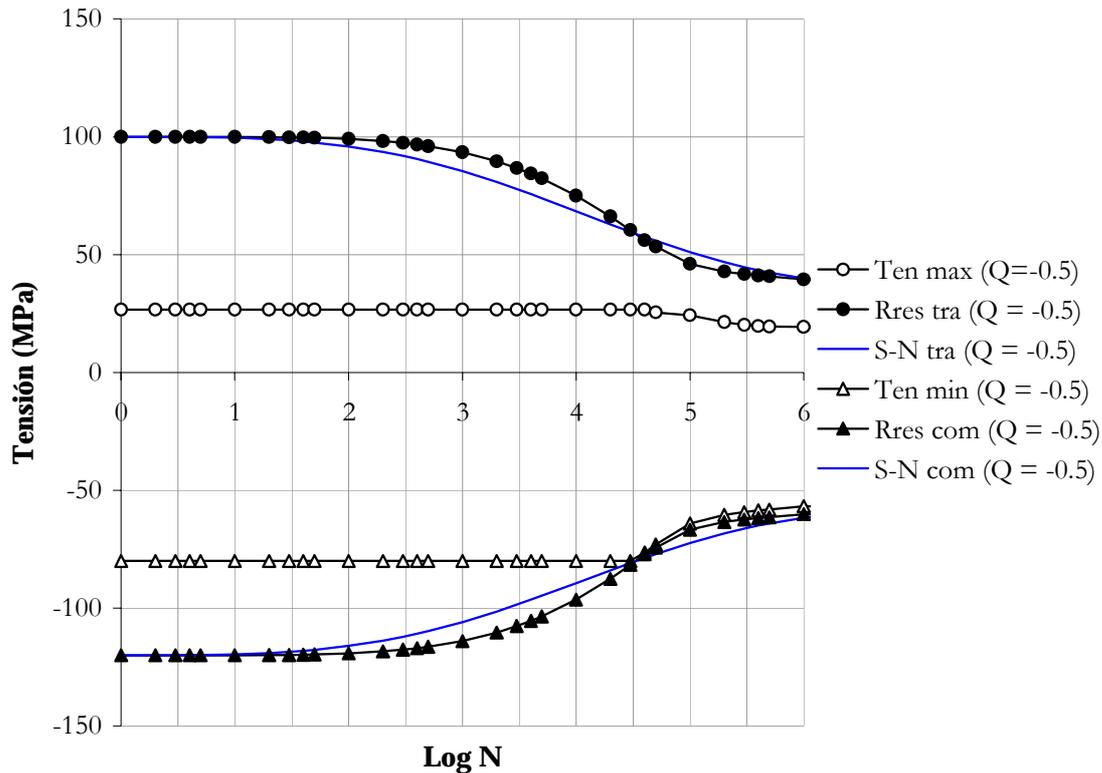


Figura 6-14. Evolución de la tensión máxima y mínima, y de la resistencia residual a tracción y a compresión para una carga de -80 MPa de tensión mínima y un índice de reversión $Q = -0.5$

En la figura 6-15 se presenta una prueba donde tanto la tensión máxima como la mínima son positivas (90 MPa de tensión máxima y un índice de reversión $Q = 2$). Por lo tanto, es obvio que el material supera el umbral de daño por alcanzar la resistencia residual a tracción. Aún así, es interesante observar como el modelo también conduce a una disminución de la resistencia residual a compresión. En consecuencia, esto demuestra que el modelo acopla la degradación a tracción y a compresión, como cabría esperar de la degradación real del material, y que no son evoluciones independientes.

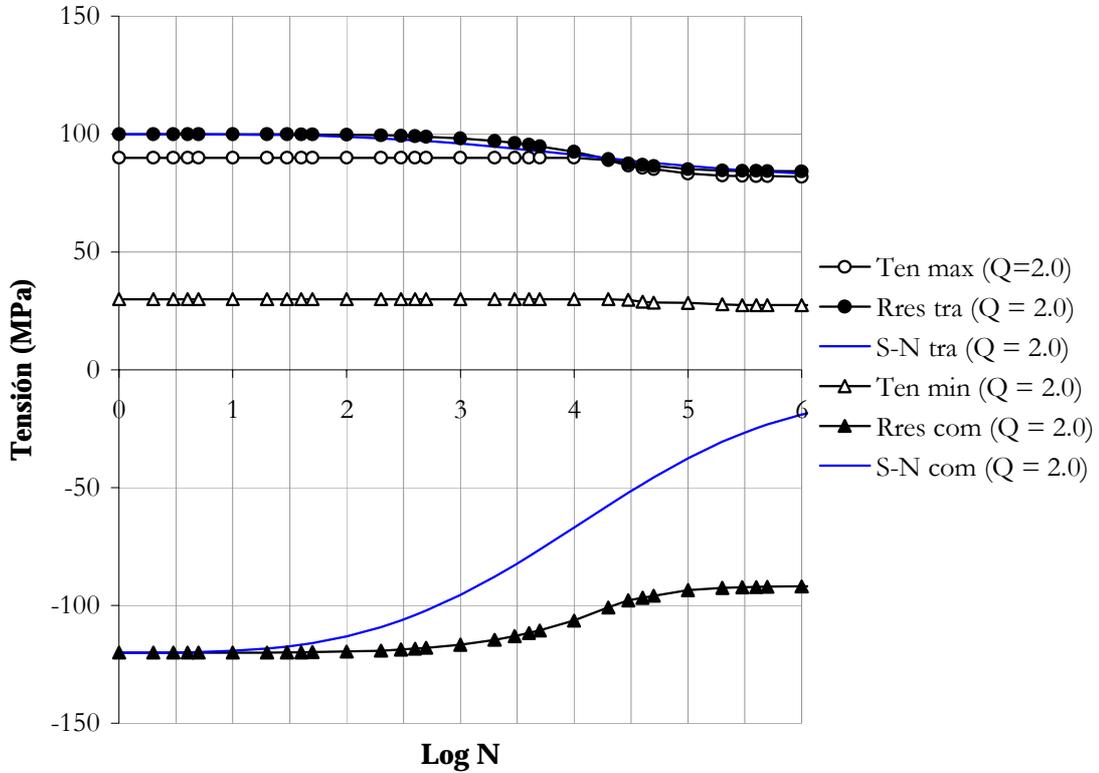


Figura 6-15. Evolución de la tensión máxima y mínima, y de la resistencia residual a tracción y a compresión para una carga de 90 MPa de tensión máxima y un índice de reversión $Q=2$.

En algunos casos, como por ejemplo la prueba mostrada en la figura 6-16, la evolución del nivel de tensión y de la resistencia residual es tal que el material supera el umbral de daño tanto por tracción como por compresión. En esta prueba en concreto (tensión alterna de 90 MPa y -90 MPa de tensiones máxima y mínima inicial), primero lo hace por superación del límite a tracción (aproximadamente a los 1000 ciclos) y más tarde lo hace por superación del límite a compresión (a unos 1500 ciclos). Esto ocurre con más frecuencia cuando las cargas cíclicas tienen características cambiantes. Por lo tanto, es muy importante que el modelo lleve un correcto seguimiento tanto de la evolución de la resistencia residual a tracción como de la evolución de la resistencia residual a compresión durante toda la historia de carga.

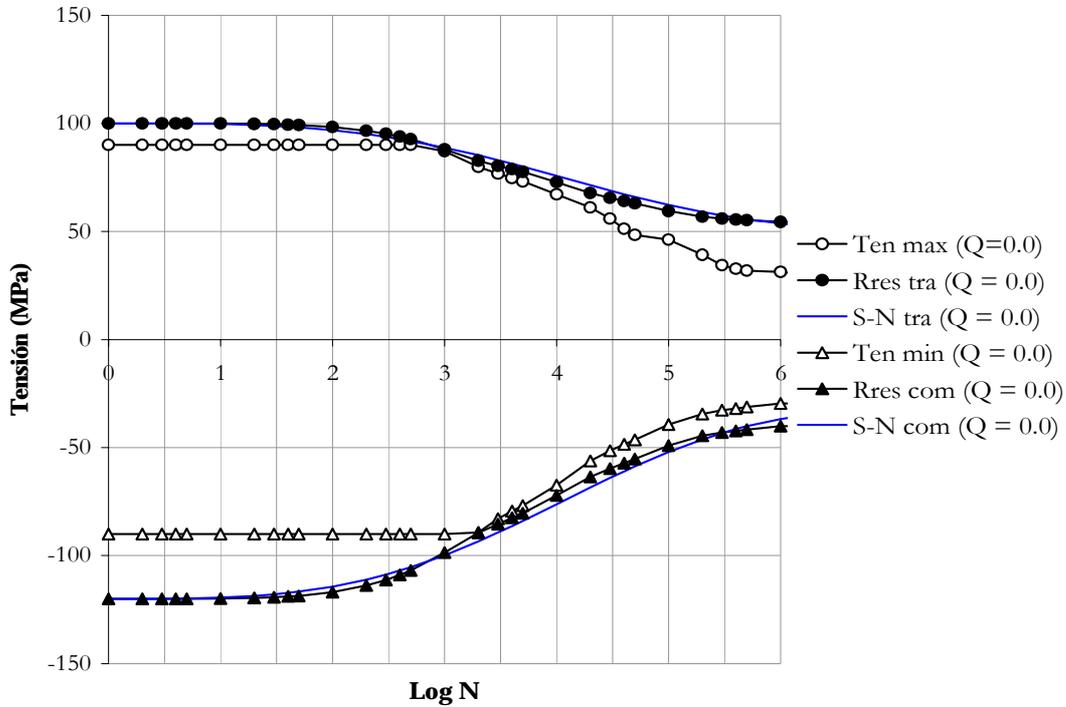


Figura 6-16. Evolución de la tensión máxima y mínima y de la resistencia residual a tracción y a compresión para una carga alterna de 90 MPa de tensión máxima y -90 MPa de tensión mínima y $Q=0$.

6.2.2. Acumulación de la resistencia residual

Este ejemplo de verificación tiene por objetivo demostrar la capacidad de la metodología propuesta para acumular correctamente la evolución de la resistencia residual cuando existen cambios en las características de la tensión cíclica. Para ello se utiliza el mismo modelo que en el apartado anterior, aunque aquí, se han aplicado tensiones cíclicas de características cambiantes.

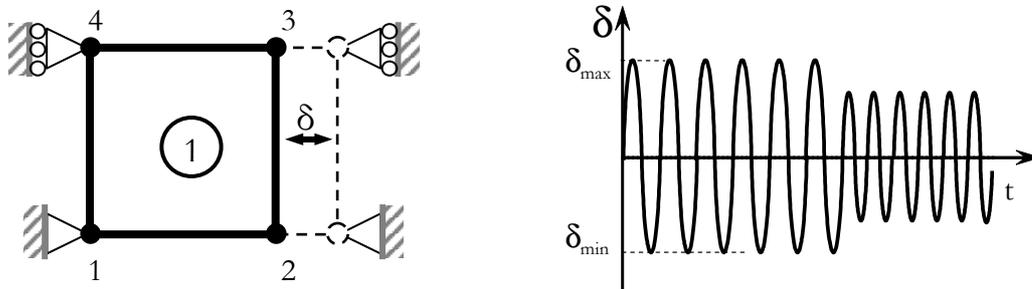


Figura 6-17. Modelo y desplazamiento cíclico impuesto de características cambiantes.

Se ha definido un material homogéneo ficticio que sigue las expresiones (6-1), (6-2), (6-3) y (6-4). Esta vez, se toman los datos mostrados en la tabla 6-2. Las curvas S-N correspondientes se muestran en la figura 6-18. Para la acumulación de la resistencia residual se ha utilizado una expresión desarrollada por Oller-Salomon, la misma para la tracción y la compresión:

$$f_{red} = \frac{S_R}{S_U} \qquad f_{red} = S \left(\frac{\log N}{\log N_F} \right)^\theta \qquad (6-5)$$

El valor de θ también se muestra en la tabla 6-2.

	Resistencia a tracción S_T	Resistencia a compresión S_C
Umbral de daño para $N=1$	$S_{UT} = 110$ MPa	$S_{UC} = -110$ MPa
Umbral de daño para $N^*=10^8$ y $Q=0$	$S^* = 0.60 S_{UT}$	$S^* = 0.80 S_{UC}$
Parámetro A	$A_T = 0.98022$	$A_C = 0.80020$
Parámetro β	$\beta_T = 2.5$	$\beta_C = 1.2$
Parámetro θ para la interpolación	$\theta_T = 1.5$	$\theta_C = 1.5$

Tabla 6-2. Características de las curvas de vida a fatiga S-N.

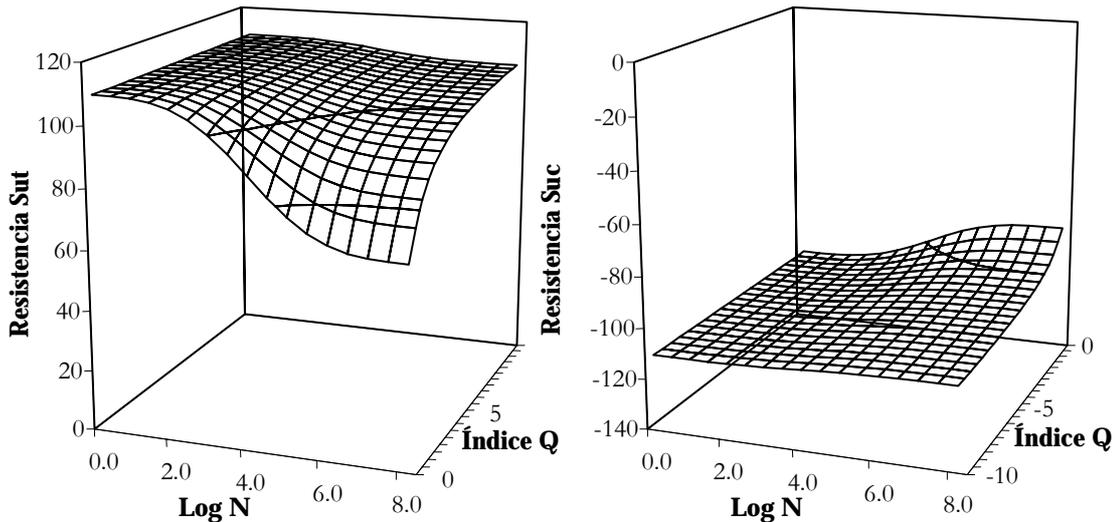


Figura 6-18. Curvas S-N generalizadas para la resistencia a tracción (izquierda) y a compresión (derecha).

(a) Pruebas a tensión constante

Las primeras pruebas se han realizado a una tensión de características constantes, al igual que en el apartado anterior. Se han utilizado dos tipos de cargas cíclicas, una con una tensión alterna ($Q=0$) de amplitud 70 MPa y otra con una tensión alterna con amplitud 90 MPa. En los dos casos la superación del umbral de daño se produce por superación del nivel de resistencia residual a tracción. Con ello se han obtenido las evoluciones de resistencia a tracción y de tensión máxima mostradas en las figuras 6-19 y 6-20.

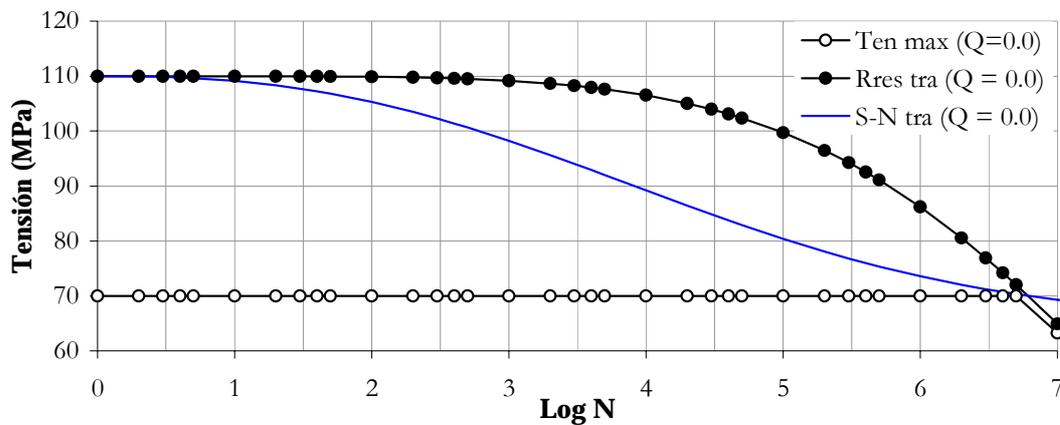


Figura 6-19. Evolución de la tensión máxima y de la resistencia residual a tracción para una carga de 70MPa, con un índice de reversión $Q=0$.

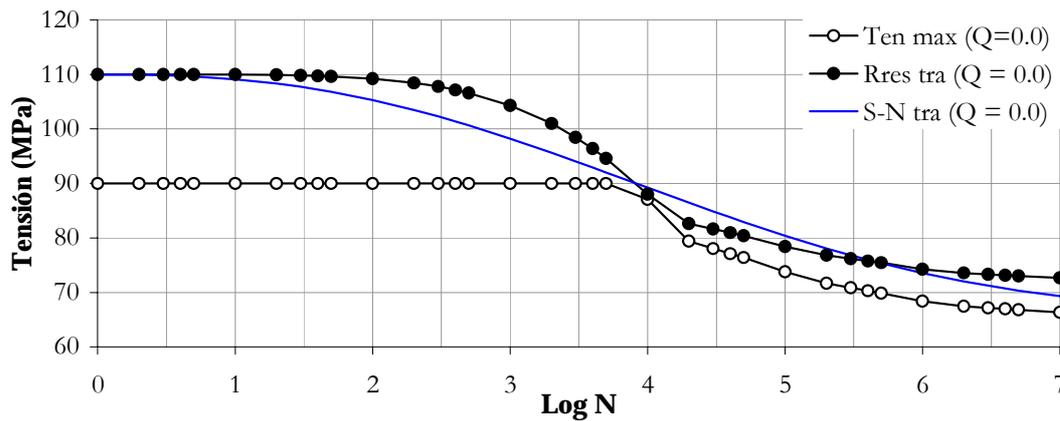


Figura 6-20. Evolución de la tensión máxima y de la resistencia residual a tracción para una carga de 90MPa, con un índice de reversión $Q=0$.

(b) Prueba Alta-Baja (H-L)

En este ejemplo se aplican primeramente 5000 ciclos de tensión alterna de 90 MPa y a continuación la de 70 MPa hasta llegar a la rotura. En las figuras 6-21 y 6-22 se observa la evolución de las tensiones y de la resistencia residual. El cambio en la carga cíclica se evidencia en un cambio en la evolución de la resistencia residual, tanto a tracción como a compresión, aunque sin perder la continuidad de la función (su derivada sí que es discontinua).

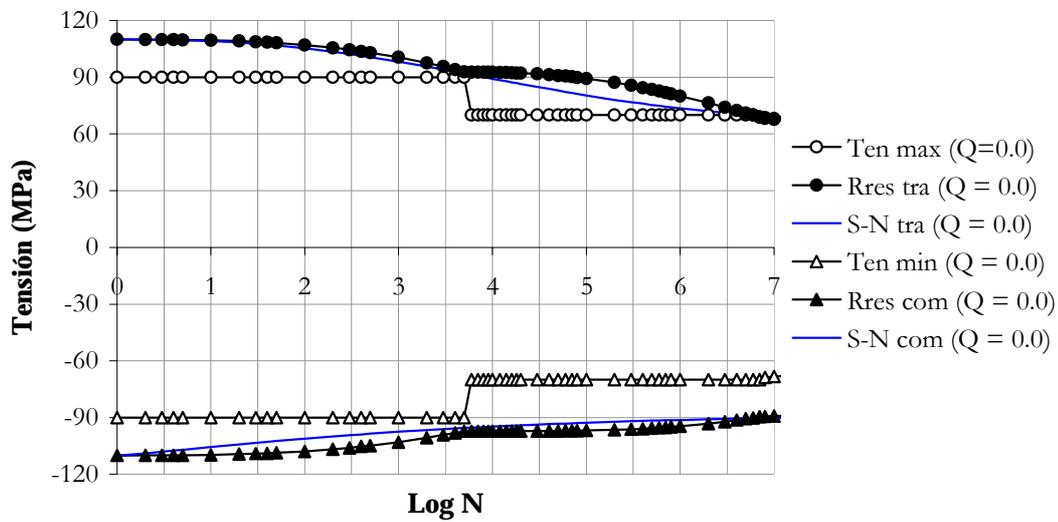


Figura 6-21. Evolución de la tensión máxima y mínima, y de la resistencia residual a tracción y a compresión para una serie de carga H-L de 90MPa a 70 MPa, con un índice de reversión $Q=0$.

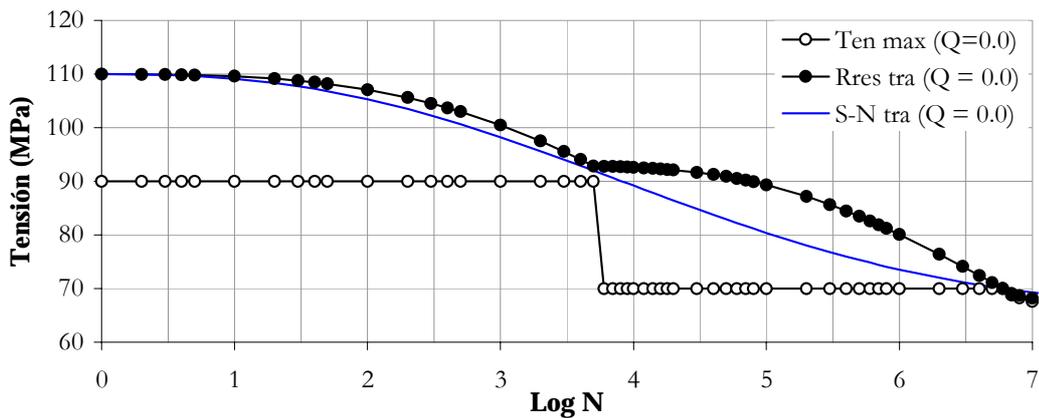


Figura 6-22. Evolución de la tensión máxima y de la resistencia residual a tracción para una serie de carga H-L de 90MPa a 70 MPa, con un índice de reversión $Q=0$.

(c) Prueba Baja-Alta (L-H)

Para esta otra prueba, se aplican primero 5000 ciclos de tensión alterna de 70 MPa y a continuación se aplica la tensión alterna de 90 MPa hasta llegar a la rotura. En las figuras 6-23 y 6-24 se observa la evolución de las tensiones y de la resistencia residual. Aquí se percibe aun con más claridad el cambio en la pendiente de la resistencia residual. También se observa (más claramente en la figura 6-24) como en esta prueba L-H el material entra en daño a un nivel de tensión y número de ciclos por encima de la curva S-N.

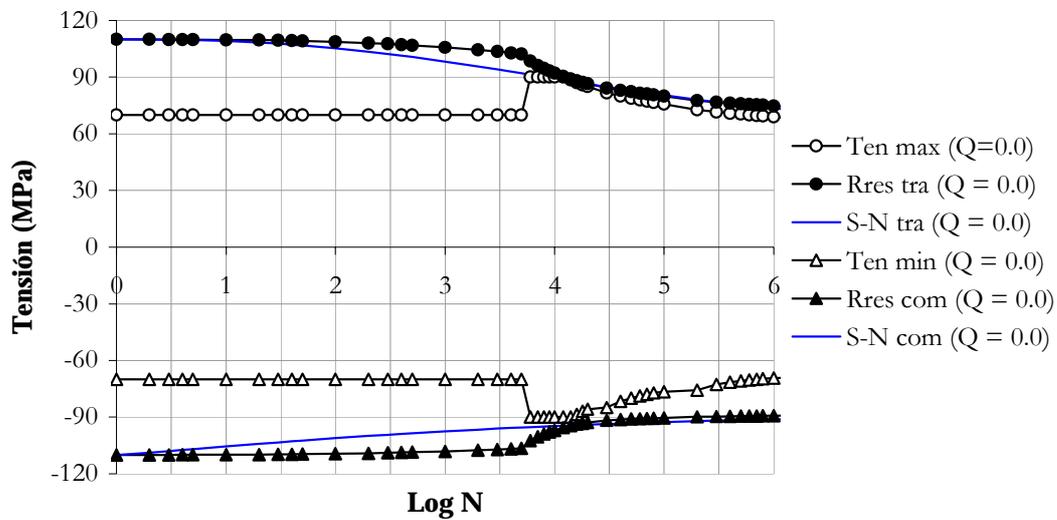


Figura 6-23. Evolución de la tensión máxima y mínima, y de la resistencia residual a tracción y a compresión para una serie de cargas L-H de 70MPa a 90 MPa, con un índice de reversión $Q=0$.

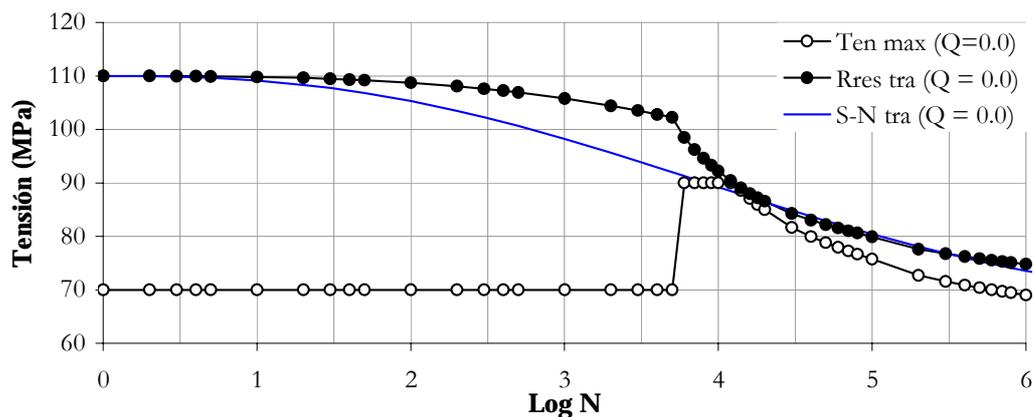


Figura 6-24. Evolución de la tensión máxima y de la resistencia residual a tracción para una serie de cargas L-H de 70MPa a 90 MPa, con un índice de reversión $Q=0$.

(d) Prueba con cambio en el índice de reversión pero tensión máxima constante

En esta prueba se cambian las características de la tensión cíclica sin variar el valor de la tensión máxima (en todos los casos 90 MPa). Cambiando el valor del índice de reversión se varía la curva S-N y, consecuentemente, la evolución de la resistencia residual. En la figura 6-25 el cambio a 5000 ciclos de $Q=0$ a $Q=2$ equivale a un cambio H-L. En la segunda prueba, en la figura 6-26, el cambio a 5000 ciclos de $Q=2$ a $Q=0$ equivale a un cambio L-H. Es interesante observar el distinto grado de degradación alcanzado en uno y otro caso.

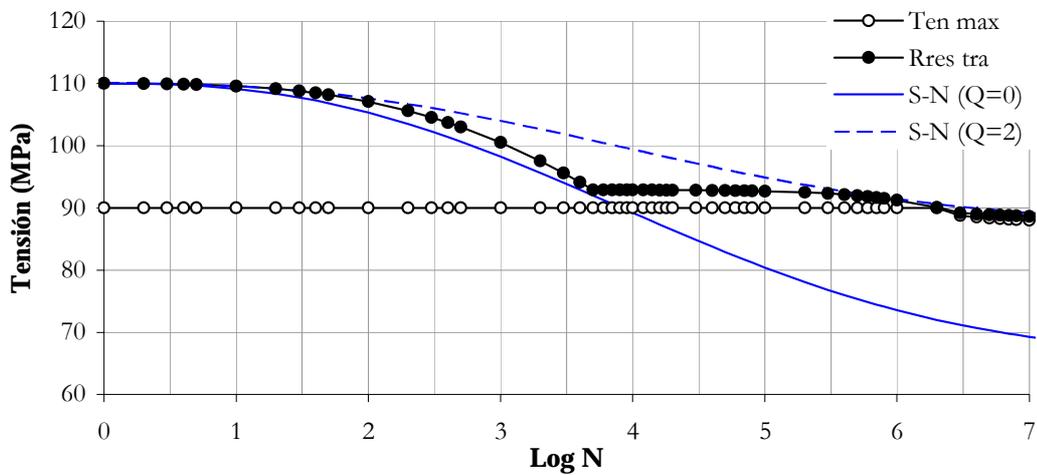


Figura 6-25. Evolución de la tensión máxima y de la resistencia residual a tracción para una carga H-L con una tensión máxima aplicada de 90 MPa, con un cambio en el índice de reversión de $Q=0$ a $Q=2$.

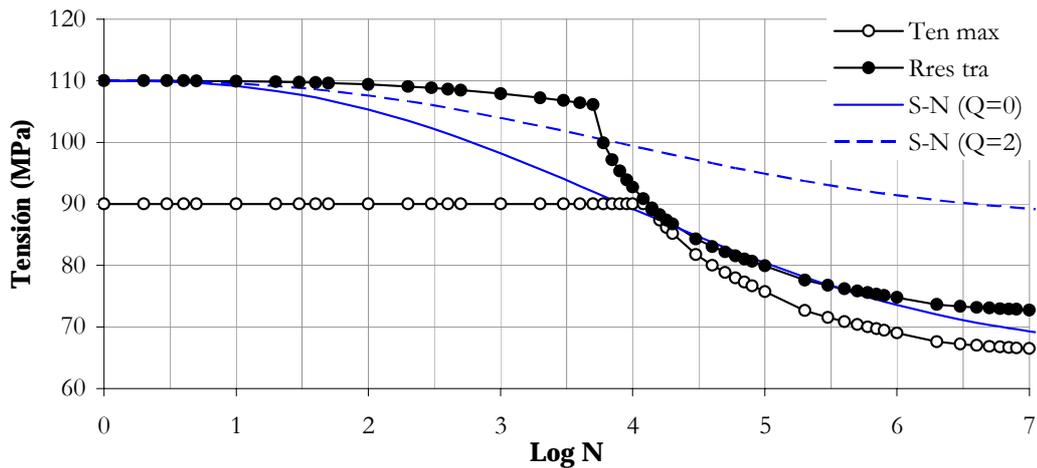


Figura 6-26. Evolución de la tensión máxima y de la resistencia residual a tracción para una carga L-H con una tensión máxima aplicada de 90 MPa, con un cambio en el índice de reversión de $Q=2$ a $Q=0$.

6.2.3. Degradación a fatiga en un compuesto unidireccional

Se presenta como ejemplo, ilustrativo del tratamiento de la fatiga en un composite, el análisis de un compuesto ideal bi-componente sometido a cargas cíclicas *on-axis*. (Mayugo *et al.* 2000). Se trata de un material de dos componentes en configuración en paralelo (ver figura 6-27). Para ello se utiliza el mismo modelo de un único elemento finito que en el apartado anterior.

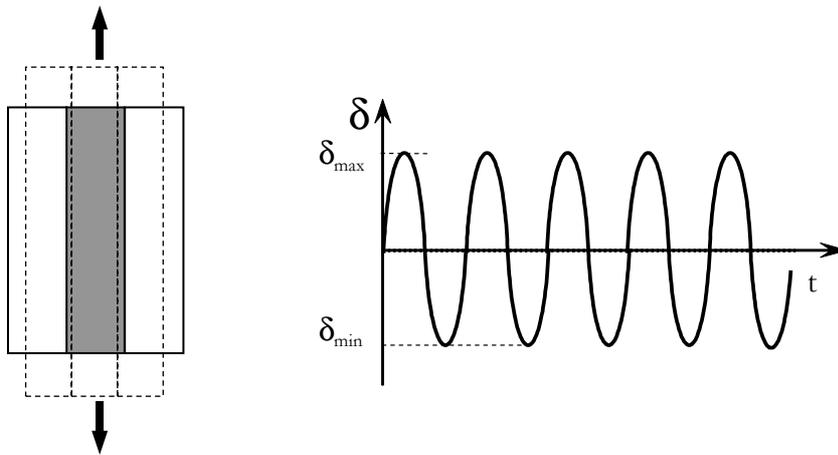


Figura 6-27. Modelo de material compuesto donde dos componentes participan en paralelo.

Las propiedades elásticas y estáticas de los materiales componentes son las mostradas en la tabla 6-3, las de degradación a fatiga (curvas S-N) en la tabla 6-4 y en las figuras 6-28 y 6-29. Estas propiedades son arbitrarias. Los dos componentes se tratan mediante un modelo de daño isótropo. Para simplificar el seguimiento de los resultados se considera que los dos componentes son materiales simétricos con idéntico comportamiento a tracción y a compresión.

	Componente 1	Componente 2
Participación volumétrica	$k_1=0.4$	$k_2=0.6$
Módulo elástico inicial	$E_1= 38 \text{ GPa}$	$E_2= 108 \text{ GPa}$
Límite de discontinuidad elástico	$(S_U)_1= 400\text{MPa}$	$(S_U)_2= 750\text{MPa}$

Tabla 6-3. Características del composite y de sus sustancias componentes.

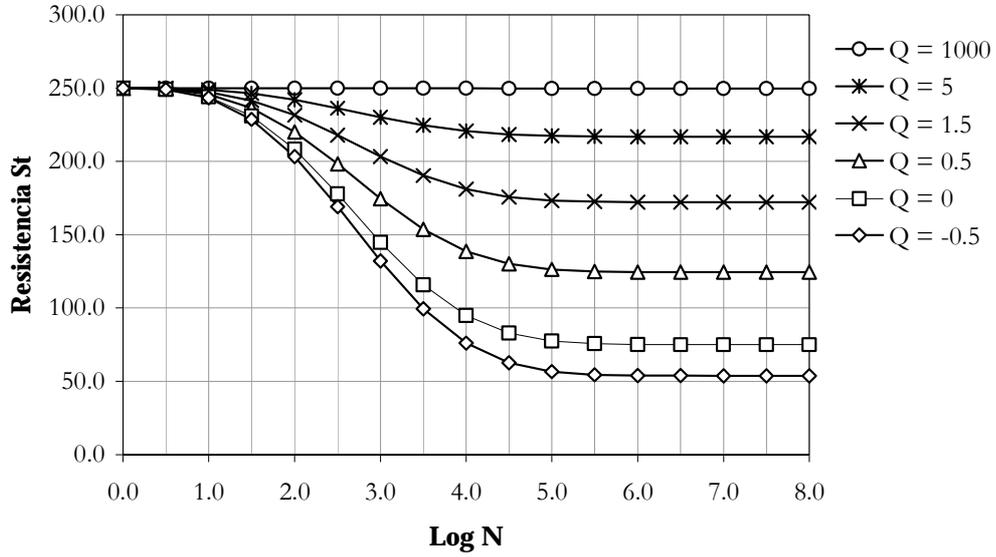


Figura 6-28. Familia de curvas S-N para el componente 1.

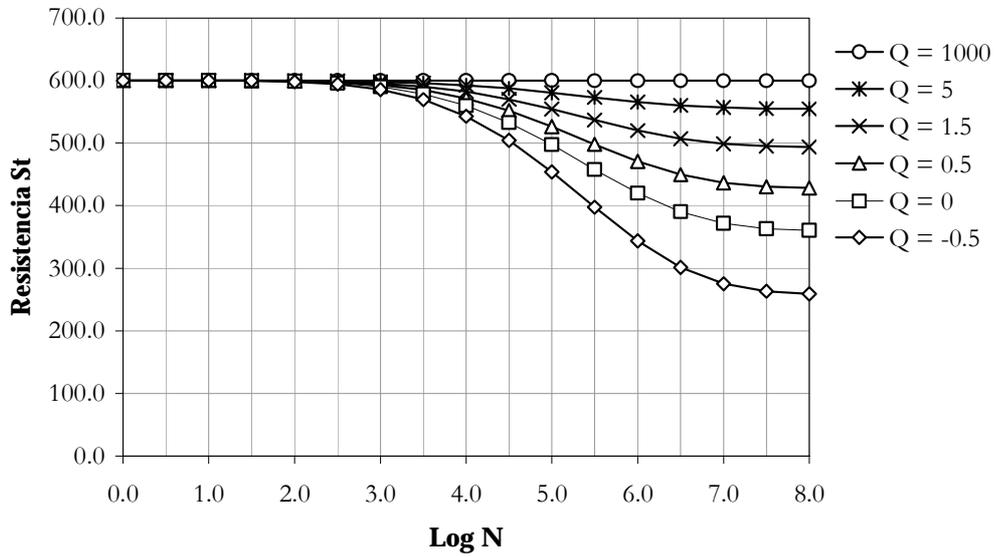


Figura 6-29. Familia de curvas S-N para el componente 2.

	Componente 1	Componente 2
S^*/S donde S^* es el umbral de daño para N^* y $Q=0$	$S^*/S = 0.5$	$S^*/S = 0.6$
Valor de N^*	$N^*=10^5$ ciclos	$N^*=10^7$ ciclos
Parámetro A	$A = 0.9665831$	$A = 0.9998218$
Parámetro β	$\beta = 3$	$\beta = 5$
Parámetro θ	$\theta = 1.15$	$\theta = 1.1$

Tabla 6-4. Características de degradación a fatiga de las sustancias componentes.

Se han realizado dos pruebas de validación de la consistencia del modelo. En las dos se somete el material a una tensión uniaxial totalmente oscilante ($Q=0$, $R=-1$) producida por una deformación de amplitud constante. En la primera prueba la deformación provoca una tensión efectiva máxima en el material compuesto antes de estar dañado de 350 MPa, en la segunda de 500 MPa.

Analizando la evolución de la resistencia residual y las tensiones de los componentes (figura 6-30) se observa cómo primero entra en daño el componente 2 y más tarde el componente 1. Así mismo, se puede observar la evolución de la tensión en el compuesto.

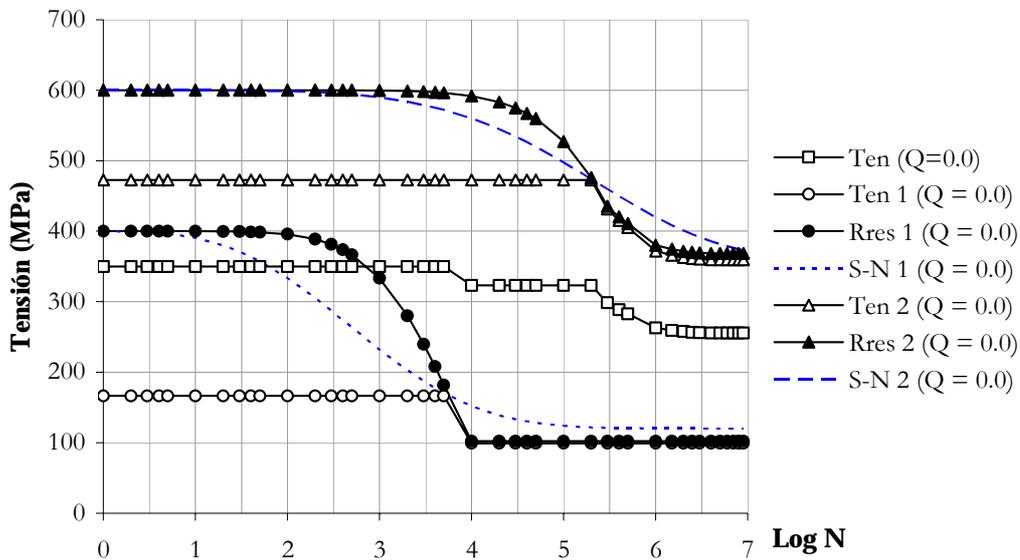


Figura 6-30. Evolución de la tensión en el compuesto y evolución de la tensión máxima y de la resistencia residual a tracción para las sustancias componentes 1 y 2, para un carga que provoca una tensión efectiva de 350 MPa en el composite con $Q=0$.

En la figura 6-31 se observa con más detalle la degradación en la rigidez del componente 1 y del componente 2, de la cual resulta la degradación del material compuesto.

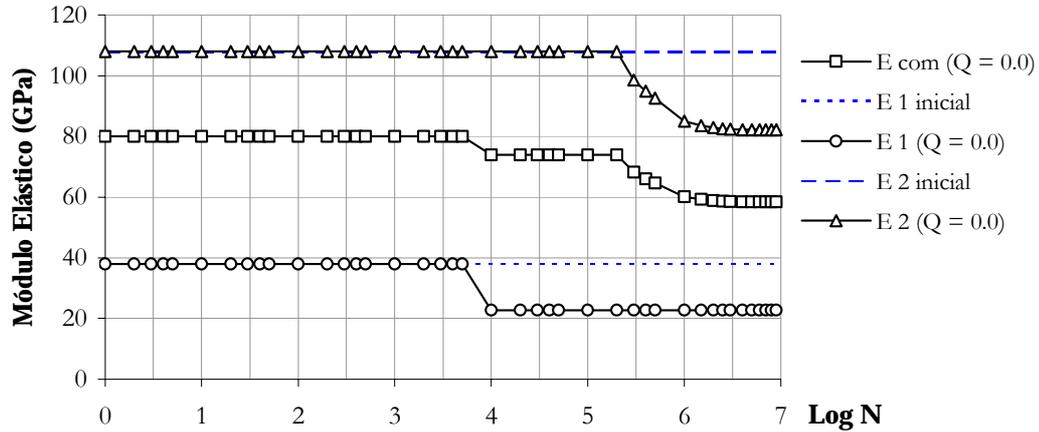


Figura 6-31. Evolución de los módulos elásticos para las sustancias componentes 1 y 2 y para el composite, durante la aplicación de un carga que provoca una tensión efectiva de 350 MPa en el composite con $Q=0$.

En la segunda prueba, donde se aplica en los primeros ciclos de carga una deformación que provoca una tensión efectiva de 500 MPa, aparece daño estático (se supera el umbral de discontinuidad elástico inicial de este componente), incluso antes de empezar la degradación a fatiga. En la figura 6-32 se observa como el módulo elástico inicial del componente 2 es inferior al inicial al termino del primer ciclo de carga ($N=1$, $\log N=0$).

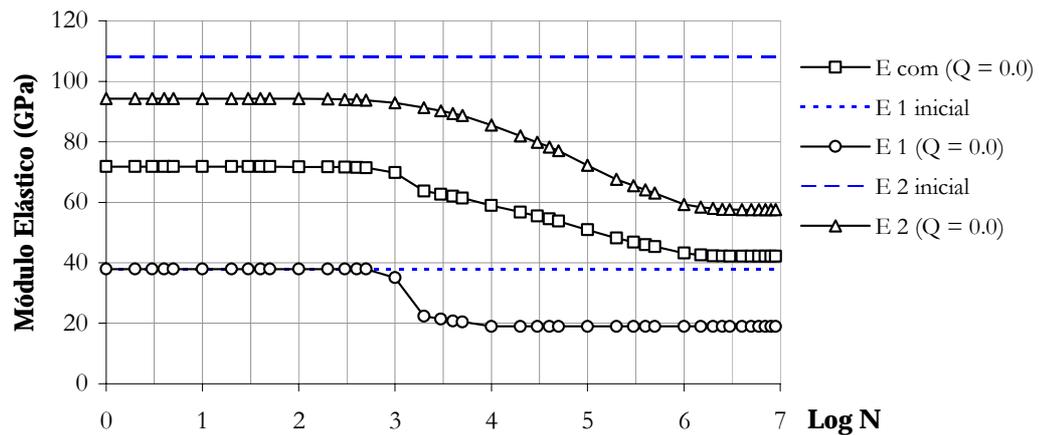


Figura 6-32. Evolución de los módulos elásticos para las sustancias componentes 1 y 2 y para el composite, durante la aplicación de un carga que provoca una tensión efectiva de 500 MPa en el composite con $Q=0$.

Debido a este proceso de daño inicial, al terminar el primer ciclo el material ya está dañado e impide que el material alcance la tensión máxima efectiva de 500 MPa. El material carga una tensión máxima efectiva de 448 MPa, tal como puede observarse en la figura 6-33.

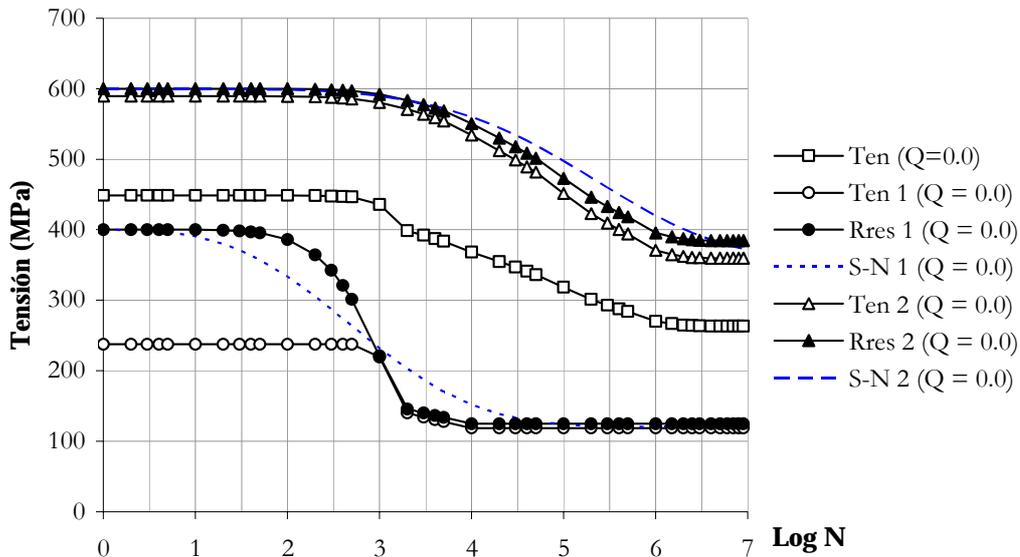


Figura 6-33. Evolución de la tensión en el compuesto y evolución de la tensión máxima y de la resistencia residual a tracción para las sustancias componentes 1 y 2, para un carga que provoca una tensión efectiva de 500 MPa en el composite con $Q=0$.

6.3. Ejemplo de aplicación en un compuesto Carbono-Epoxy con DFM

Uno de los mayores problemas que tiene la aplicación de la metodología presentada en este trabajo es la falta de experimentación sobre el comportamiento a fatiga de cada uno de los componentes que forman parte de un composite. Difícilmente se encuentra en la bibliografía experimentos sobre la degradación a fatiga de una matriz polimérica o del refuerzo sin que formen parte de un laminado y ésta es la información que debiera sustentar el modelo propuesto. Normalmente la única información empírica disponible son las curvas S-N para el conjunto del laminado que se quiere analizar.

Una forma de paliar esta carencia, es utilizar los datos experimentales disponibles sobre el comportamiento a fatiga del laminado (conjunto fibra-matriz) para simular la degradación de la interfase entre matriz y refuerzo. En muchos compuestos, como los CFRP, la aparición de DFM es la causante de la degradación del material. Mediante una normalización de los datos experimentales proporcionados por las curvas S-N, éstos se incorporan a la formulación del DFM., presentada en el apartado 5.4.2., como una degradación de la capacidad de adherencia entre la fibra y la matriz.

A continuación se presenta un ejemplo donde se aplica la metodología de la degradación de fatiga a través de la degradación del DFM. En concreto, se trata de una biela de CFRP cuya geometría se muestra en la figura 6-34.

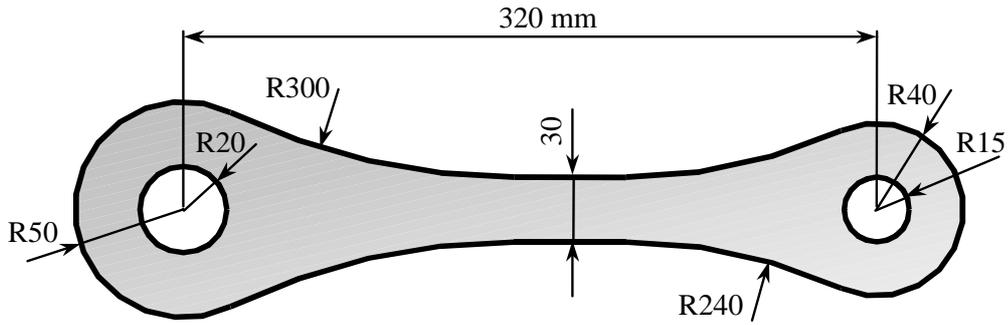


Figura 6-34. Geometría de la biela de T300/5208.

La pieza esta fabricada a partir de un laminado de T300/5208, las propiedades de cada uno de sus componentes se muestran en la tabla 6-5. El laminado utilizado tiene una secuencia de apilado de $[0_2/45/-45]_6$,

	Fibra T300	Matriz epoxy 5208
Participación volumétrica inicial (κ)	0.7	0.3
Módulo elástico inicial (E_{11})	230 GPa	2.6 GPa
Módulo de rigidez (G_{12})	104 GPa	0.97 GPa
Coefficiente de Poisson (ν_{12})	0.22	0.38
Límite de discontinuidad elástico a tracción (S_{UT})	3 654 MPa	58.6 MPa
Límite de discontinuidad elástico a compresión (S_{UC})	1 096 MPa	187.6 MPa

Tabla 6-5. Características de la fibra T300 y de la matriz epoxy 5208.

Mediante una regresión de los datos experimentales de Jamison *et al.* (1984) sobre este laminado y de la aplicación de la ley de Goodman, para obtener una extrapolación de los datos para cualquier valor de índice de reversión, se pueden obtener una familia de curvas

S-N generalizadas. A través de una normalización de estas curvas S-N se obtiene la expresión normalizada de la degradación de la interfase fibra-matriz, lo que activará la degradación de la rigidez. En la figura 6-35 se muestra la familia de curvas normalizadas que se ha obtenido para este material. Estas curvas S-N normalizadas se aplican tanto a tensiones que produzcan degradación por tracción como tensiones que la produzcan por compresión

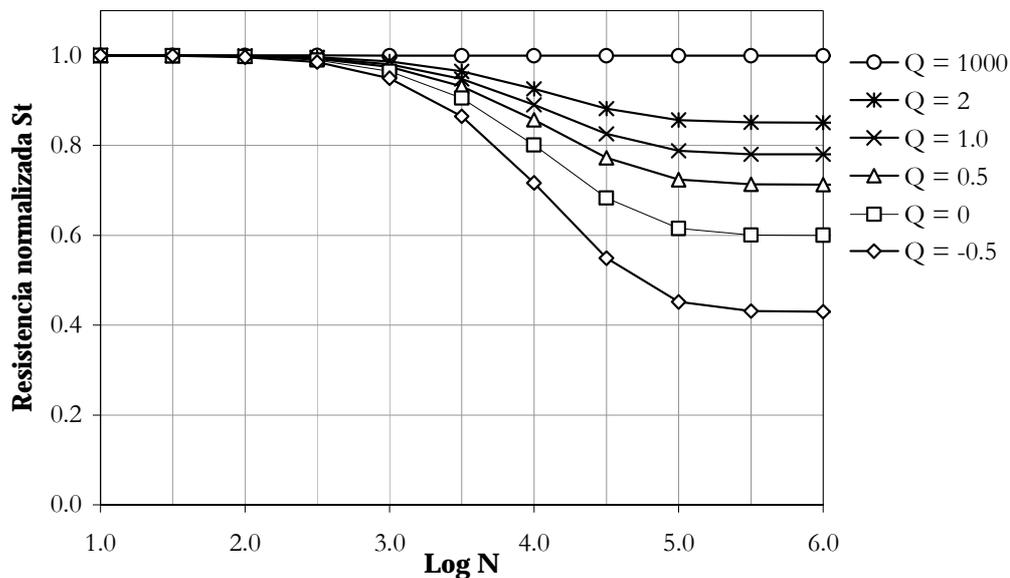


Figura 6-35. Familia de curvas S-N para el componente 2.

La biela está sometida a una sollicitación de tracción cíclica donde la carga mínima es un 10% de la carga máxima (la relación de reversibilidad en las cargas es de $R=0,1$) (ver figura 6-36). La carga se aplica controlando el desplazamiento de los extremos de la biela. Esto provoca que no se produzca una fuerza de características constantes a lo largo del tiempo.

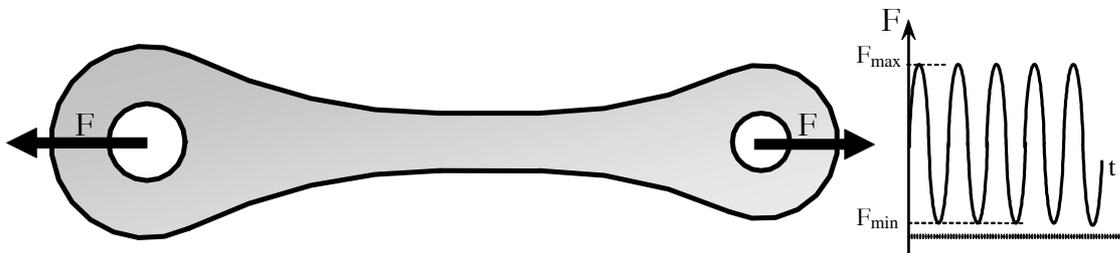


Figura 6-36. Evolución de la carga a lo largo del tiempo en la biela de T300/5208. La fuerza sobre los extremos de la biela se consigue controlando los desplazamientos entre sus dos extremos.

La disminución de la fuerza sobre la biela y de la tensión en sus puntos se explica por el daño acumulado a lo largo de la historia de carga la pieza. Aparece deslizamiento entre la fibra y la matriz, lo que activa el modelo de daño, y el módulo elástico de la pieza va disminuyendo y, en consecuencia, también lo hacen las tensiones.

En la figura 6-37 se muestra la distribución de la tensión vertical global en el composite y en cada una de sus sustancias componentes cuando alcanzan su valor máximo durante el primer ciclo de carga. En la figura 6-38 se muestran las mismas distribuciones cuando han transcurrido los primeros 100 000 ciclos de carga.

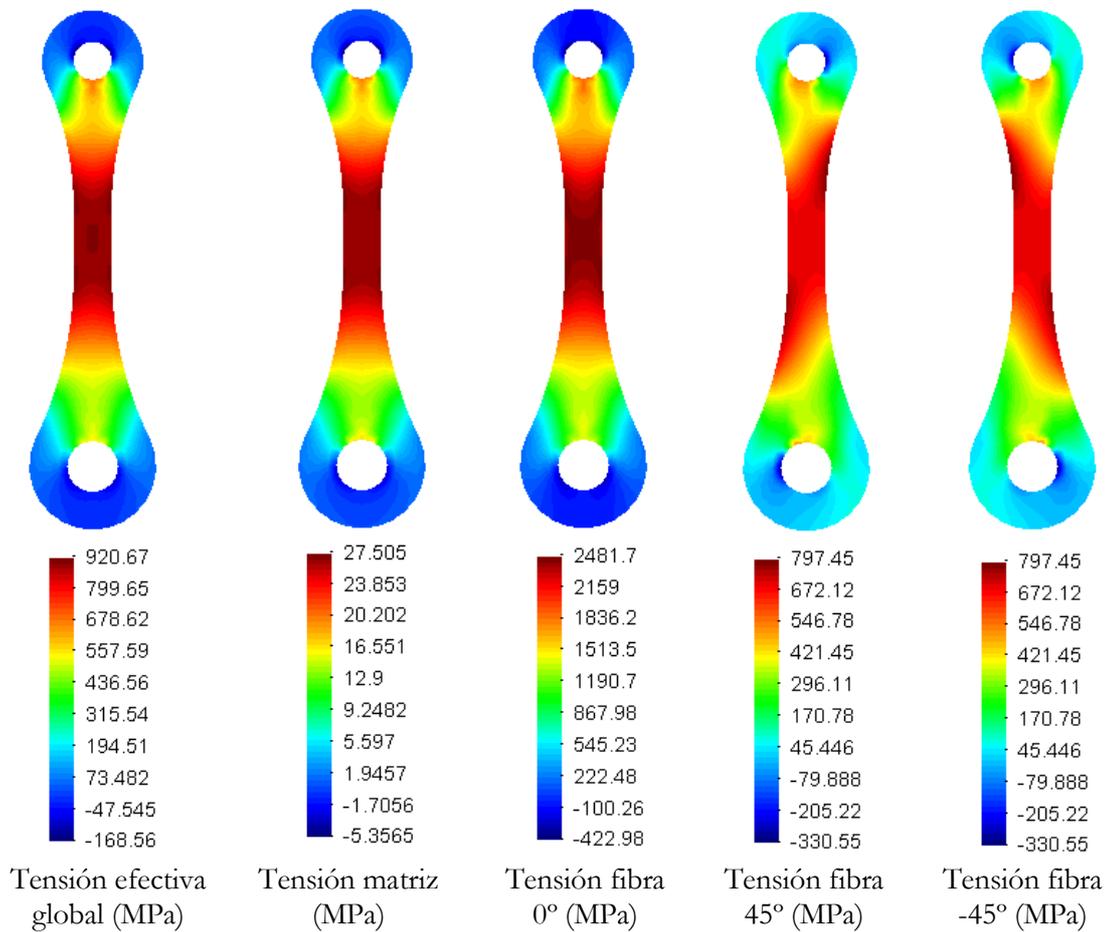


Figura 6-37. Tensión efectiva global, de la matriz y de las capas de refuerzo en la dirección vertical a N=1.

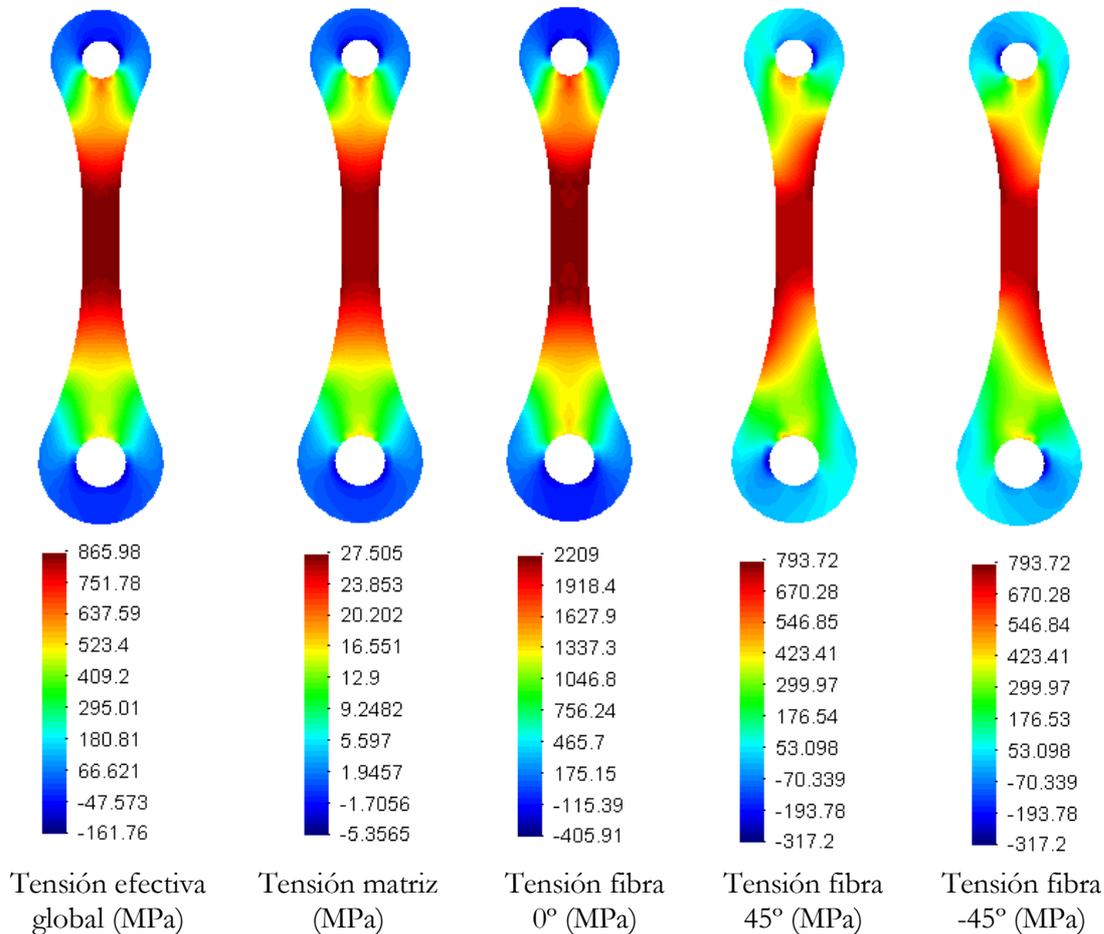


Figura 6-38. Tensión efectiva global, de la matriz y de las capas de refuerzo en la dirección vertical a $N=10^5$.

Puede observarse como la fase donde aparecen diferencias más significativas entre los dos instantes mostrados es la de 0° . Cuando se analiza en qué fases de refuerzo ha aparecido deslizamiento fibra-matriz se observa que únicamente se ha degradado la resistencia residual en la capa a 0° . También se observa que ésta es la única donde aparece daño.

En la figura 6-39 se puede observar el valor normalizado de la resistencia residual a tracción en distintos momentos de la aplicación de la carga cíclica. A partir de los 100 000 ciclos la disminución de la resistencia residual es prácticamente imperceptible ya que el nivel de tensión máxima en la capa de refuerzo no llega a superar el valor límite a fatiga para que éste siga disminuyendo.

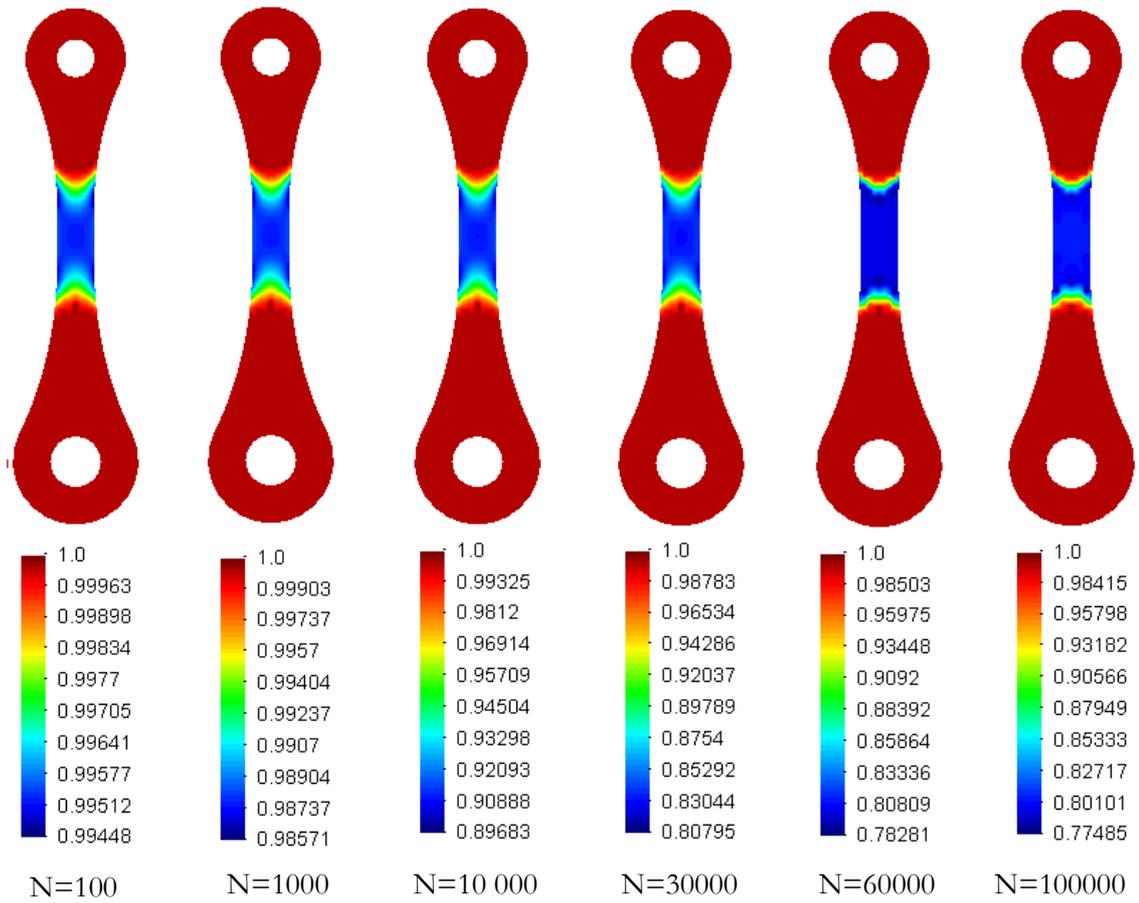


Figura 6-39. Evolución del factor de reducción de la resistencia a tracción a lo largo de la vida de la pieza.

6.4. Ejemplo de aplicación en el diseño de una pieza de CFRP

A continuación se analiza la degradación de la resistencia que sufre un elemento estructural de material composite. A diferencia de los casos anteriores, aquí se utiliza un modelo simplificado que sólo contempla el comportamiento lineal del material.

Con esta simplificación sólo se puede realizar un seguimiento de los límites de rotura del material sin determinar como éstos afectan a la redistribución de esfuerzos en el elemento estructural. Por lo tanto, en este análisis no se persigue obtener el comportamiento real de la pieza, tan sólo se pretende obtener, de forma cualitativa, las zonas críticas, susceptibles de sufrir o a romper por fatiga. Ésta puede ser una información muy útil en el proceso de diseño de la pieza, e incluso en un proceso certificación de ella.

En este ejemplo se analiza una pieza de composite de fibra de carbono (CFRP) utilizada como pieza de unión entre distintos elementos integrantes de una estructura tubular, sometida a cargas cíclicas. En la figura 6-40 se muestra un esquema de la pieza estudiada.

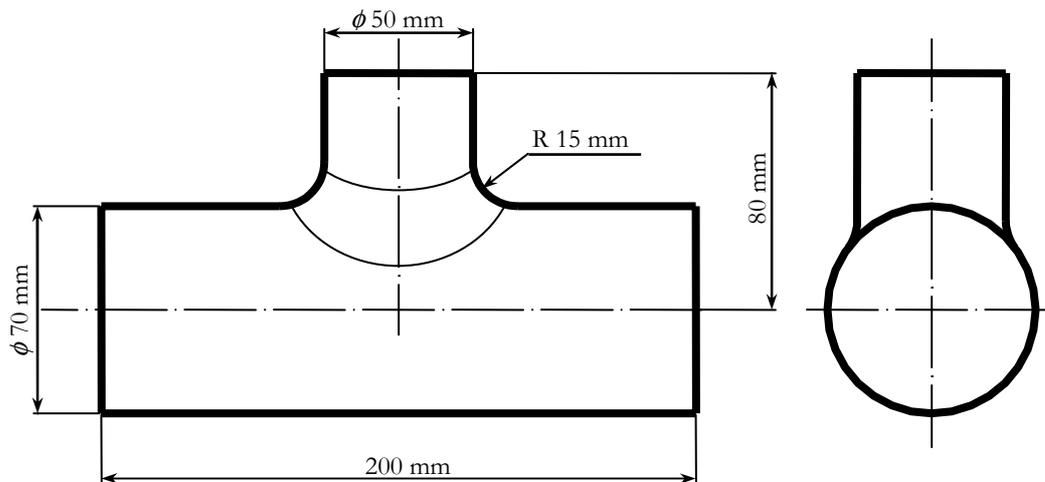


Figura 6-40. Elemento estructural para la unión entre elementos tubulares de CFRP con un laminado $[(\pm 45, 0_2)_2]_s$

Para el análisis de la pieza con esta metodología simplificada se ha utilizado un programa de elementos finitos comercial (ANSYS). En él se ha definido un modelo (ver figura 6-41) formado por elementos placa laminados (*laminated shell*, *SHELL99* en ANSYS) que permiten definir al laminado mediante la introducción de las propiedades de cada lámina unidireccional. Las condiciones de contorno que se han definido son dos apoyos en el eje del cilindro horizontal alejados entre ellos una distancia de 240 mm. Se han considerado

dos posibles fuerzas aplicadas a un punto del eje del cilindro vertical a 100 mm del eje del cilindro horizontal.

Las dos fuerzas que se han considerado están contenidas en el plano horizontal: la fuerza F_1 en dirección longitudinal del tubo horizontal y la fuerza F_2 en la dirección perpendicular al eje del tubo horizontal..

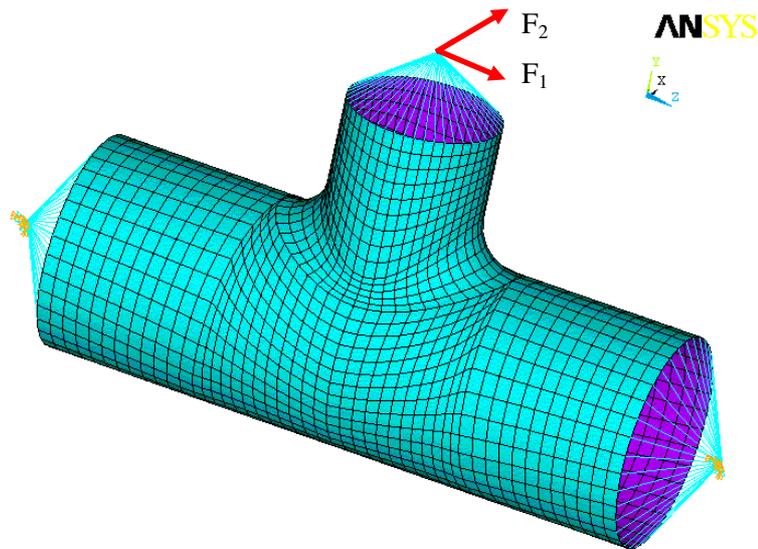


Figura 6-41. Modelo de elementos finitos. Se pueden observar los apoyos y las fuerzas aplicadas en los extremos de la pieza.

6.4.1. Propiedades del CFRP

	Fibra de carbono T800	Matriz de epoxy
Densidad	1810 Kg/m ³	1380 Kg/m ³
Participación volumétrica	0.7	0.3
Módulo elástico	(longitudinal) 294 GPa (transversal) 8,8 GPa	4,6 Gpa
Coefficiente de Poisson	0,20	0.36
Límite de discontinuidad elástico	5490 MPa	58,6 MPa
Deformación última	1,9 %	—

Tabla 6-6. Características del composite y de sus sustancias componentes.

La pieza está fabricada por un laminado de matriz de epoxy reforzada por fibras de carbono T800 según un una secuencia de apilamiento de $[(\pm 45, 0)_2]_s$. De este laminado se tienen las características básicas mostradas en la tabla 6-6.

Tomando los resultados experimentales de Gathercole *et al.* (1994) se obtienen las curvas de degradación que se muestran en la figura 6-42. Como puede apreciarse en estas curvas S-N la simple representación de la mayoría de los resultados en función de la tensión máxima y del índice de reversibilidad no permite formular unas curvas generalizadas S-N coherentes tal como requiere el modelo.

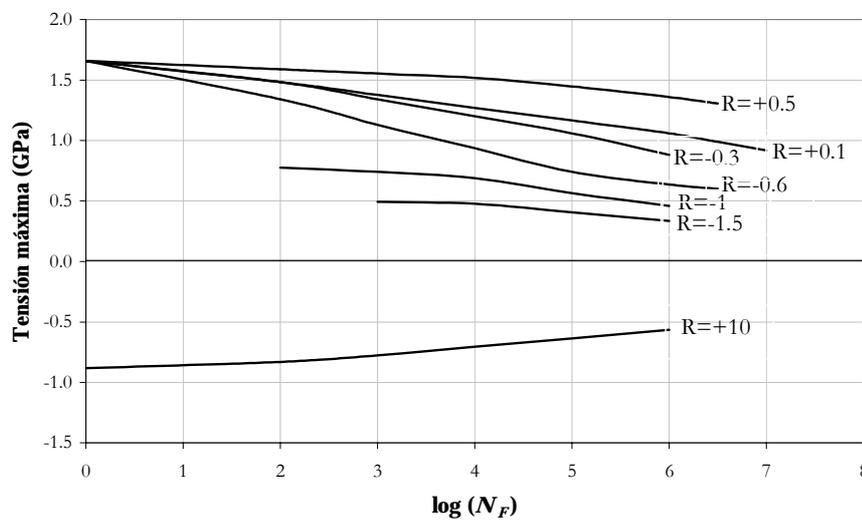


Figura 6-42. Familia de curvas S-N para distintos índices de reversión R , de un laminado $[(\pm 45, 0)_2]_s$ de T800/epoxy (Gathercole *et al.* 1994)

Por lo tanto, en primer lugar, tal como se indica en el procedimiento descrito en este trabajo en el apartado 4.4.3 del capítulo 4, es necesario separar los datos experimentales en dos grandes grupos: los que se han obtenido por rotura a tracción y los que se han obtenido por rotura a compresión. Para distinguir unos resultados experimentales de los otros es útil representar las curvas S-N como curvas de vida constante en el plano σ_a - σ_m (ver figura 6-43). Los valores máximos en esta representación (unidos por una línea de puntos en la figura 6-43) son los valores críticos que permiten separar las roturas por compresión (a la izquierda de la línea de puntos) de las roturas por tracción (a la derecha).

De este modo se obtienen las dos familias de curvas, que se muestran en la figura 6-44. La primera familia la forman los resultados experimentales que provocan una rotura a tracción, y estos se representan en función del valor máximo de la tensión cíclica. La segunda familia esta formada por el conjunto de resultados experimentales que provocan

una rotura a compresión, estos se formulan en función del valor mínimo de la tensión cíclica. Como puede observarse cada una de las familias de curvas en $N=1$ toma el valor de resistencia estática a tracción o a compresión.

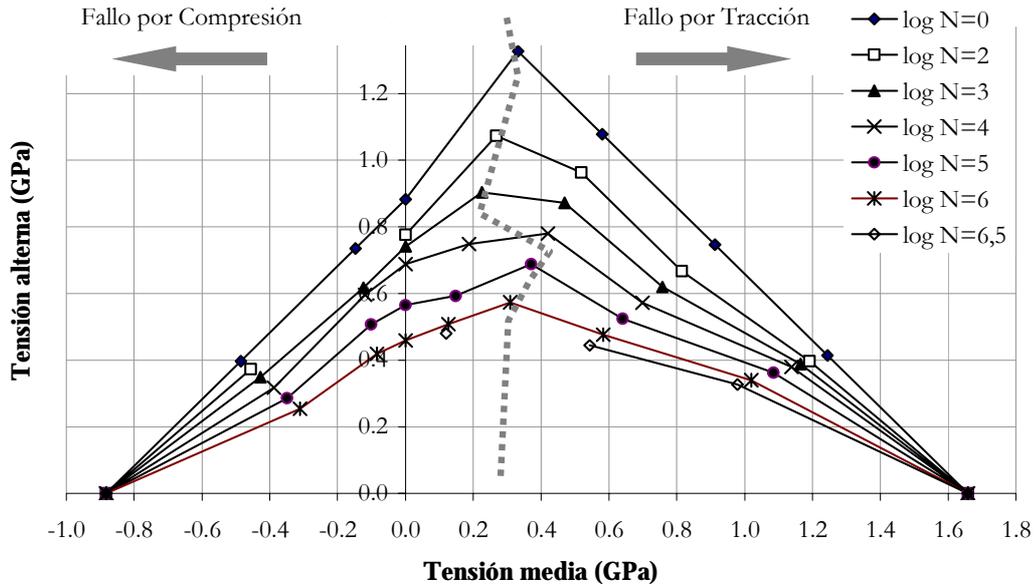


Figura 6-43. Representación mediante curvas de vida constante en el plano σ_a - σ_m de los datos experimentales obtenidos por Gathercole *et al.* 1994 para un laminado $[(\pm 45,0)_2]_s$ de T800/epoxy

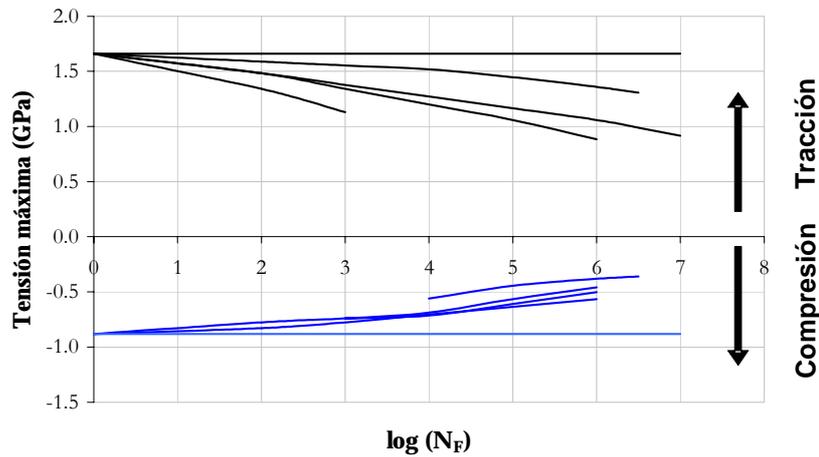


Figura 6-44. Curvas S-N para la tracción en función de la tensión máxima (en la parte superior) y curvas S-N para la compresión en función de la tensión mínima (en la parte inferior).

De cada una de las familias de curvas S-N se hace separadamente una regresión de los datos experimentales para obtener las curvas S-N generalizadas que se utilizan en el modelo de degradación a fatiga. Para ello se utiliza la formulación sugerida por Oller-Salomon según las siguientes expresiones.

$$S = S_e + (S_U - S_e) \cdot \left[\frac{S^* - S_e}{S_U - S_e} \right] \left(\frac{\log N}{\log N^*} \right)^\beta \quad (6-6)$$

donde la regresión para distintos índices de reversión se hace mediante

$$S^*(Q) = S_0^* + \left(\frac{\langle Q \rangle}{|Q|} \cdot S_U - S_0^* \right) \cdot \left(\frac{|Q|}{|Q|+1} \right)^\theta \quad (6-7)$$

$$S_e(Q) = S_{e0} + \left(\frac{\langle Q \rangle}{|Q|} \cdot S_U - S_{e0} \right) \cdot \left(\frac{|Q|}{|Q|+1} \right)^\theta \quad (6-8)$$

Para la acumulación de la resistencia residual se ha utilizado, también, una evolución propuesta por Oller-Salomon, tanto para la tracción como para la compresión, según las expresiones

$$f_{red} = \frac{S_R}{S_U} \quad f_{red} = S \left(\frac{\log N}{\log N_F} \right)^\theta \quad (6-9)$$

	Resistencia a tracción	Resistencia a compresión
Resistencia última (S_U)	1660 MPa	886 MPa
Límite a fatiga (S_{e0}) para $Q = 0$	399 MPa	356 MPa
Resistencia (S_0^*) para $N^*=10^7$ ciclos para $Q=0$	399,4 MPa	450 MPa
Parámetro β	2,6682	1,225
Parámetro θ	1,2	1,02

Tabla 6-7. Parámetros de la regresión efectuada a partir de los datos experimentales de las curvas S-N para el laminado carbono/epoxy.

Con estas expresiones se realiza una regresión para la curva de tracción y otra para la curva de compresión a partir de los valores experimentales, obteniéndose los parámetros mostrados en la tabla 6-7 que definen la rotura a tracción en función de la tensión máxima y a compresión en función de la tensión mínima para cualquier número de ciclos y índice de reversión Q .

En la figura 6-45 se muestra gráficamente como quedan definidas las curvas de resistencia a tracción para las tensiones máximas y resistencia a compresión para las tensiones mínimas.

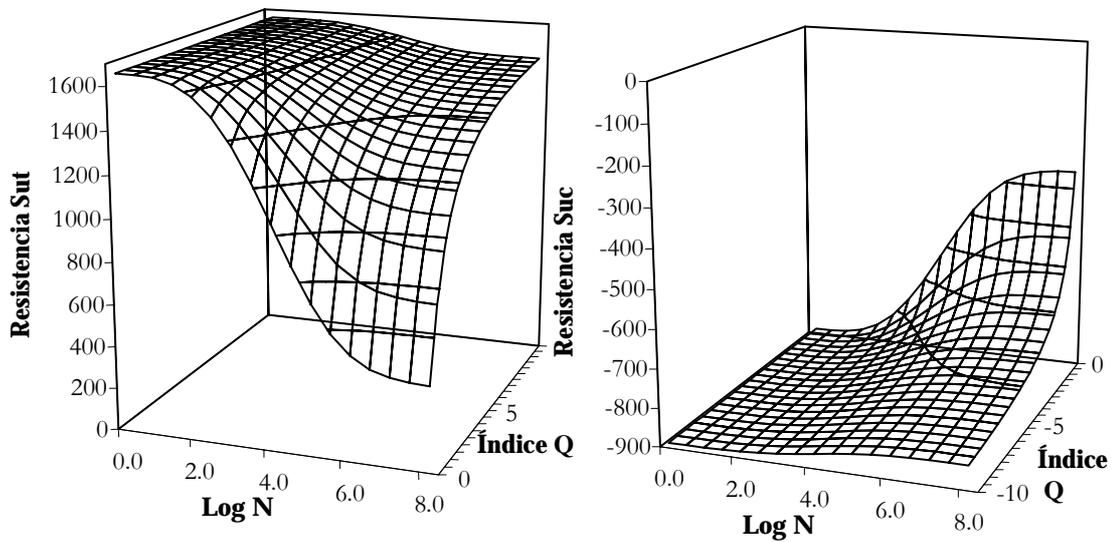


Figura 6-45. Curvas S-N para la tracción en función de la tensión máxima (izquierda) y curvas S-N para la compresión en función de la tensión mínima (derecha).

6.4.2. Casos de carga

La ventaja de la metodología utilizada en este ejemplo es que es posible estudiar un número indeterminado de casos de carga a partir de unos pocos análisis por elementos finitos. Tan sólo es necesario resolver el modelo lineal por FEM para cada una de las cargas externas aplicadas. Por lo tanto, se obtienen los resultados del comportamiento lineal para cada *carga unitaria* representativa de cada carga externa aplicada en el modelo. En este caso, dado que sólo se le aplican dos fuerzas tan sólo ha sido necesario analizar el modelo dos veces para obtener los resultados para las *cargas unitarias*.

A partir de los resultados para estas cargas unitarias es posible obtener la degradación de cada una de las capas del compuesto para cualquier combinación de F_1 y F_2 .

A continuación, y a modo de ilustración de lo que permite obtener y analizar esta herramienta de análisis de la fatiga, se presentan algunos casos de carga.

(a) Caso de carga A

En este caso de carga actúan simultáneamente tanto la fuerza F_1 como la fuerza F_2 según las características mostradas en la siguiente tabla hasta una vida de 1 000 000 de ciclos.

	F_1	F_2
F_a (N)	6000	6000
F_m (N)	2000	2000
Φ (°)	0	45

Tabla 6-8. Características de la carga cíclica aplicada

En la figura 6-46 se muestra la degradación que ha sufrido la pieza de compuesto por la aplicación de la historia de carga definida en la tabla 6-8. Se observan los valores de degradación en las 3 capas más exteriores del laminado, ya que son en este caso las más críticas. En concreto se observa la degradación que sufren tanto las resistencias a tracción (diagramas de contorno de la columna izquierda) como a compresión (diagramas de contorno de la columna derecha). Las zonas en color rojo son indicativas de una disminución de la resistencia a los 10^6 ciclos poco significativas, mientras que las zonas en azul el factor de reducción ha llevado a la resistencia a un valor mínimo.

En la figura 6-47 se muestra la evolución, en función del número de ciclos, de la degradación en la lámina que se revela más crítica (aquí también los diagramas de contorno de la columna izquierda son los de la resistencia a tracción y los de la columna derecha son los de la resistencia a compresión).

En esta evolución puede observarse una de las grandes limitaciones de la metodología simplificada que se utiliza en este ejemplo de aplicación. Las zonas que no aparecen degradadas a bajos ciclos de carga permanecen no degradadas a lo largo de toda su historia de cargas, siempre y cuando ésta no cambie sus características. Esto es debido a que en este modelo simplificado no se degradan las propiedades elásticas del material y, consecuentemente, no se contempla una redistribución de esfuerzos entre capas de laminado o entre distintas zonas de la pieza. En definitiva, de la aplicación de esta metodología no debe esperarse una modelización de su comportamiento real, sino una estimación cualitativa de la degradación del material.

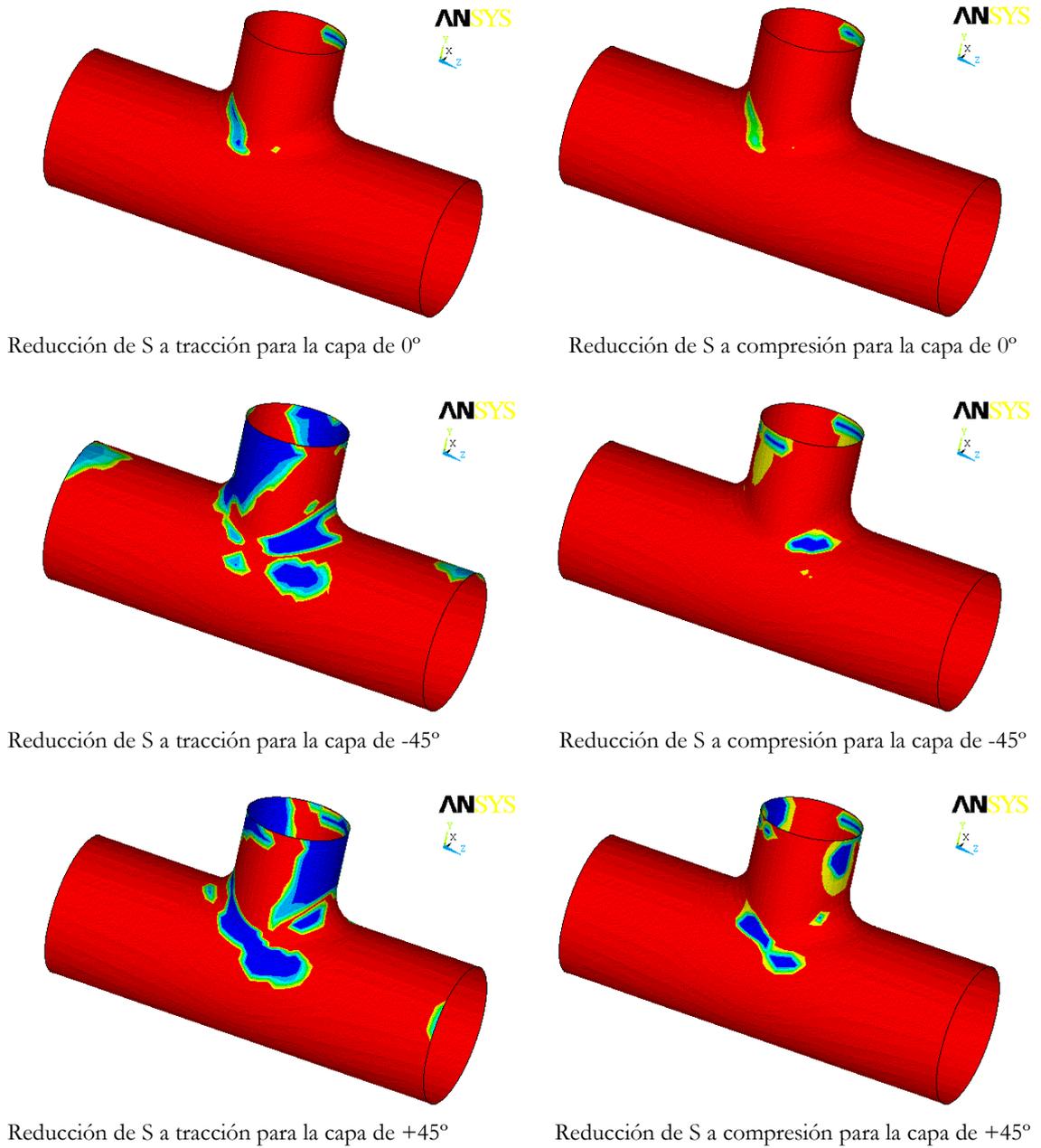


Figura 6-46. Factor de reducción de los límites de resistencia estáticos para las tres capas exteriores de la pieza, 0°, -45° y +45° para una vida de 100 000 de ciclos

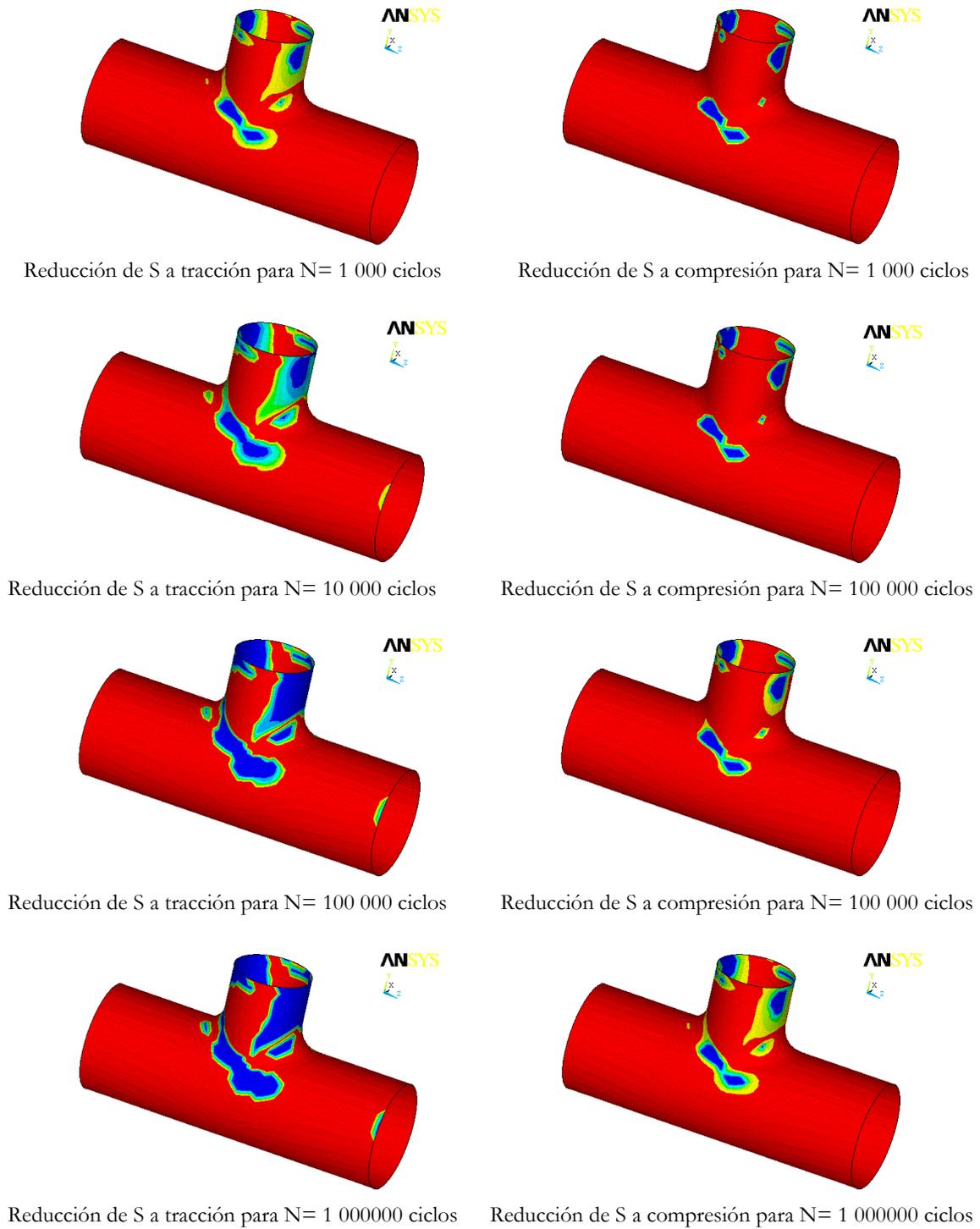


Figura 6-47. Factor de reducción de los límites de resistencia estáticos para la capa exterior de 45°

(b) Caso de carga B

En este caso sólo la fuerza F , actúa con un valor de componente media de 2000 N y una componente alterna de 6000 N.

En la figura 6-48 se observa la evolución del factor de reducción de la resistencia residual a compresión en la lámina más crítica del material. Si, por ejemplo, se quiere limitar la degradación a un 80% de su valor inicial esta pieza no tendría una vida efectiva en servicio superior a los 10 000 ciclos.

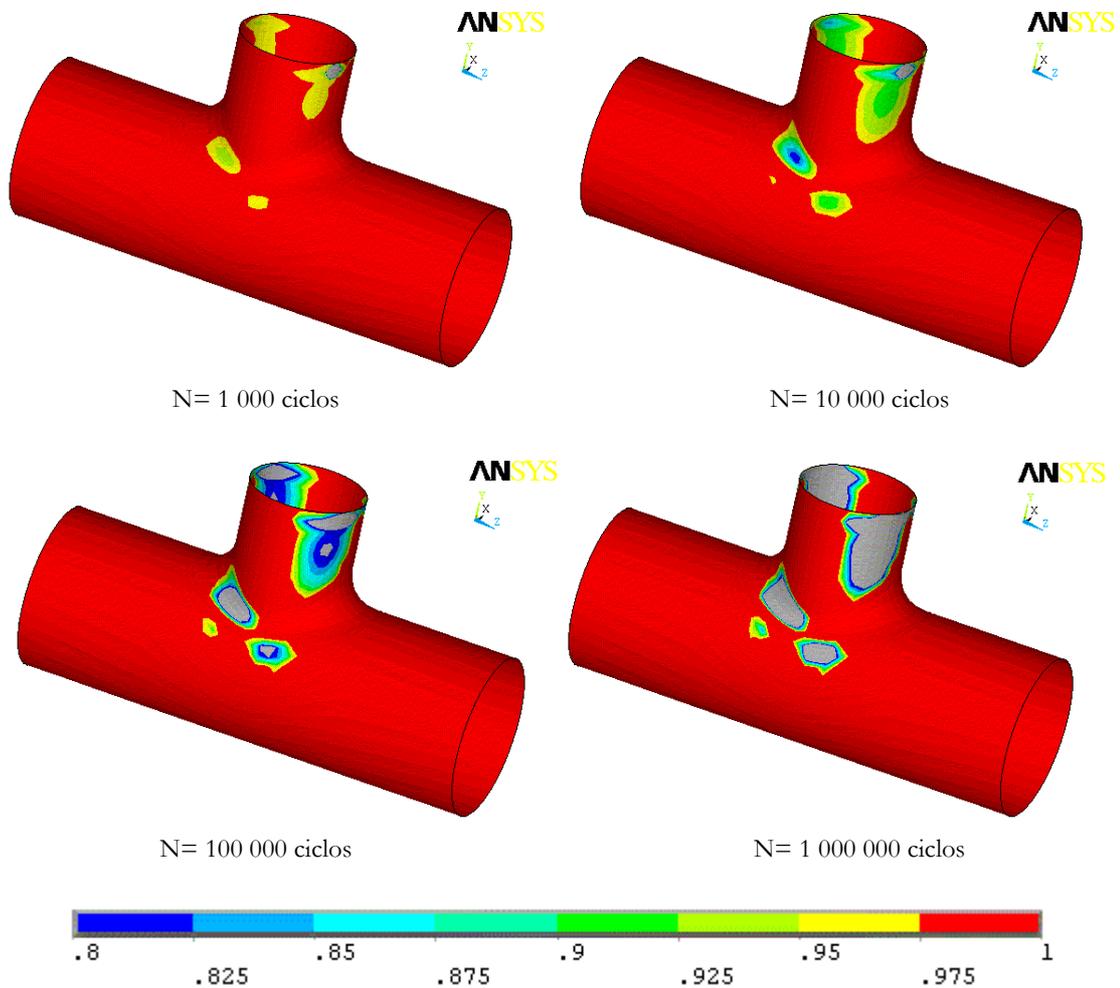


Figura 6-48. Factor de reducción de los límites de resistencia estáticos para la capa exterior de 45°

(c) Casos de carga C y D

En estos dos casos se analiza el efecto de la distinta secuencia de aplicación de las cargas. Tanto la fuerza F_1 como la fuerza F_2 se aplican según los valores y rangos de número de ciclos especificados en las tablas 6-9 y 6-10.

De hecho, en los dos casos de carga, se aplican los mismos ciclos de carga, pero en una secuencia diferente. Dado que el modelo utiliza una formulación de acumulación de la degradación a fatiga no lineal, el resultado obtenido de su degradación es distinto en cada caso. Esta acumulación no lineal de la degradación a fatiga es independiente del análisis lineal del comportamiento del componente mediante las cargas unitarias.

	F₁		F₂	
Rango N (ciclos)	0-1 ·10 ⁵	1 ·10 ⁵ -2 ·10 ⁵	0-1 ·10 ⁵	1 ·10 ⁵ -2 ·10 ⁵
F_a (MPa)	6000	0	0	6000
F_m (MPa)	0	0	0	0
Φ (°)	0	0	0	0

Tabla 6-9. Características de la carga cíclica aplicada para el caso de carga C

	F₁		F₂	
Rango N (ciclos)	0-1 ·10 ⁵	1 ·10 ⁵ -2 ·10 ⁵	0-1 ·10 ⁵	1 ·10 ⁵ -2 ·10 ⁵
F_a (MPa)	0	6000	6000	0
F_m (MPa)	0	0	0	0
Φ (°)	0	0	0	0

Tabla 6-10. Características de la carga cíclica aplicada para el caso de carga D

En las figuras 6-49 y 6-50 se observa como la carga F_1 degrada mucho más durante los primeros 10 000 ciclos que la carga F_2 . Además lo hace en zonas ligeramente distintas.

También se observa como la degradación obtenida al final de la historia de carga es distinta para los dos casos de carga.

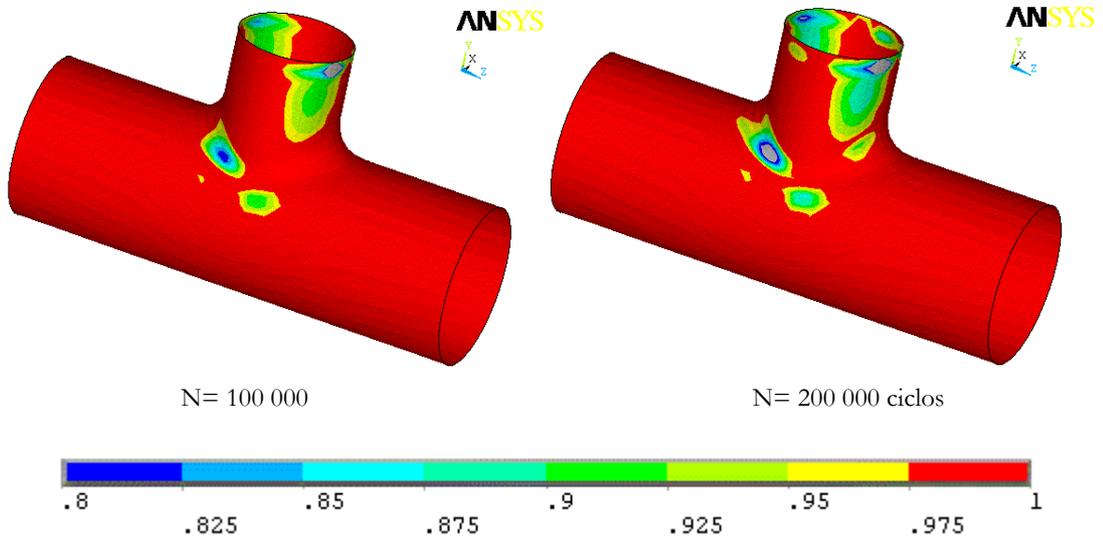


Figura 6-49. Factor de reducción de los límites de resistencia estáticos para la capa exterior de 45° para el caso de carga C

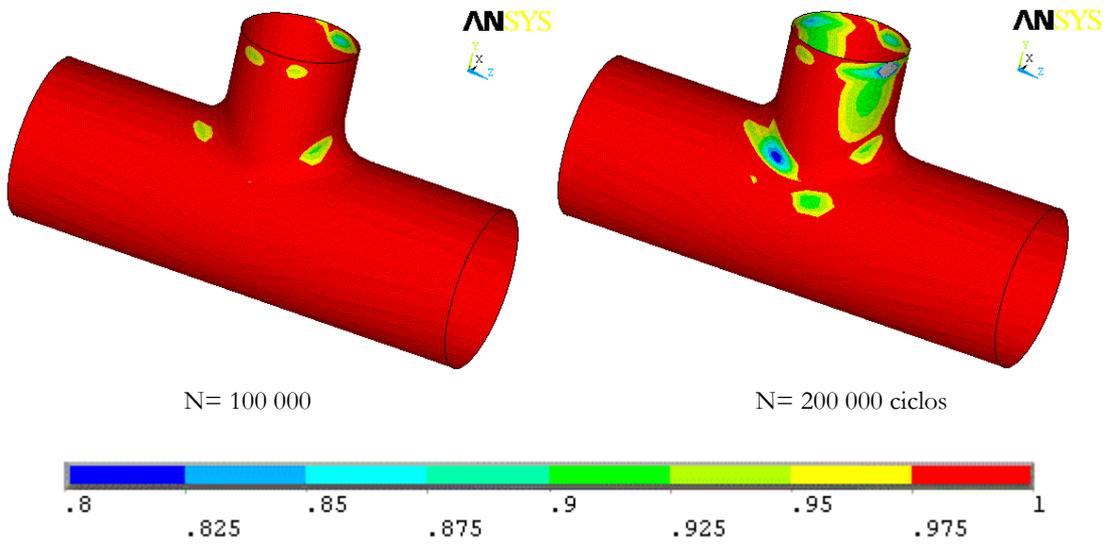


Figura 6-50. Factor de reducción de los límites de resistencia estáticos para la capa exterior de 45° para el caso de carga D

6.5. Análisis a fatiga de un buje de composite para un aerogenerador

A continuación se presenta el análisis de la degradación a fatiga de un elemento estructural de composite sometido a cargas cíclicas. La metodología presentada en este trabajo representa una herramienta de diseño eficiente para tratar esta problemática en componentes estructurales reales. El análisis de la degradación a fatiga se realiza durante la fase de diseño de forma, siendo necesaria esta comprobación.

El elemento estudiado es un buje de aerogenerador, pieza que permite la conexión entre las palas y el eje de rotación principal de la turbina. Se trata de un buje para un aerogenerador de eje horizontal con 3 palas (denominado aerogenerador *estilo danés*, la tipología más frecuente en este tipo de máquinas). Esta pieza usualmente se fabrica mediante fundición de acero, pero el buje estudiado presenta un nuevo diseño (pieza de color rojo en la figura 6-51 y esquema de la figura 6-52), que aprovecha las ventajas aportadas por el material compuesto en cuanto a sus mejores resistencia y rigidez específicas. De esta forma es posible obtener un diseño en composite mucho más ligero que con la tradicional fundición y con menos restricciones geométricas.

Esta característica permite aumentar el diámetro del molino sin necesidad de utilizar alargadores en las palas (pieza que se coloca entre el buje y cada pala para alargar su longitud y en consecuencia el área de barrido) pues se puede aumentar la distancia entre la brida de unión con la pala al eje de rotación. De hecho, este nuevo diseño del buje elimina los alargadores de las palas de una arquitectura habitual de un aerogenerador.

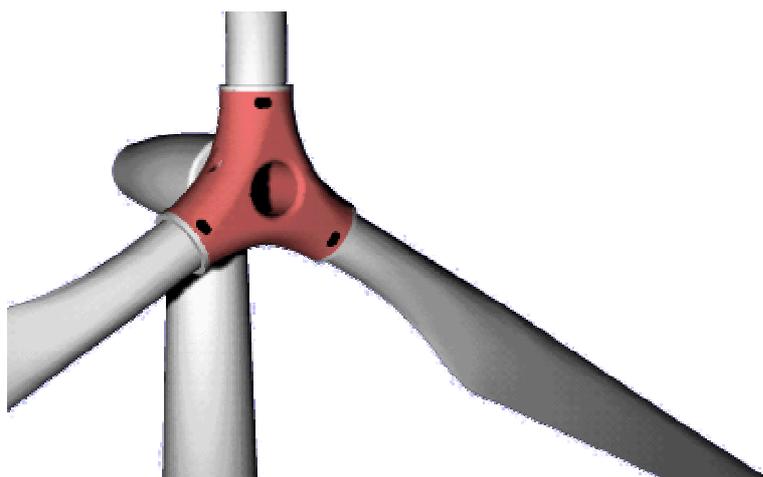


Figura 6-51. El buje es la pieza que une las tres palas de un aerogenerador con su eje principal.

El diseño y producción de un prototipo de este elemento en material composite de fibra de vidrio para un aerogenerador de 750 kW de potencia se ha realizado en el marco del proyecto europeo COMHUB¹⁹ financiado por la UE.

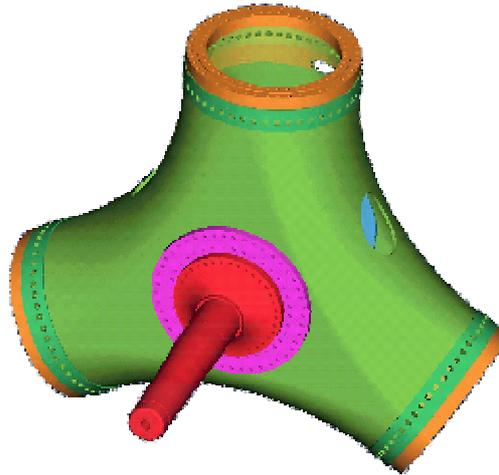


Figura 6-52. Representación del buje para aerogenerador. El buje objeto del diseño es para una turbina de 750 KW del fabricante MADE. El buje tiene un diámetro de 4 metros, la distancia entre la brida de unión con la pala al eje de rotación es de 2 metros.

(a) Propiedades del material

El material utilizado en la producción del buje de compuesto es un laminado de fibra de vidrio con resina epoxy. En la mayoría de las zonas de la pieza se ha utilizado un apilamiento de capas con la secuenciación $(0, \pm 45, 90)$. Esto ha proporcionado al material unas características elásticas cuasi-isótropas: los módulos de elasticidad del laminado son $E_{11} = E_{22} = 15,1$ GPa y $G_{12} = 5,8$ GPa.

Mediante pruebas estáticas se han obtenido los valores para la resistencia última estática a tracción $S_{UT} = 317,5$ MPa y para la resistencia estática a compresión $S_{UC} = 336,6$ MPa.

También se ha caracterizado el material a fatiga. En la figura 6-53 se muestran las curvas S-N obtenidas experimentalmente para este material para pruebas a tracción-tracción, a tracción-compresión y a compresión-compresión.

¹⁹ Proyecto europeo ERK6-CT1999-00008: "Innovative Composite Hub for Wind Turbines" (1999) con NOI (Alemania), Universitat de Girona, TUV (Alemania) y MADE (España)

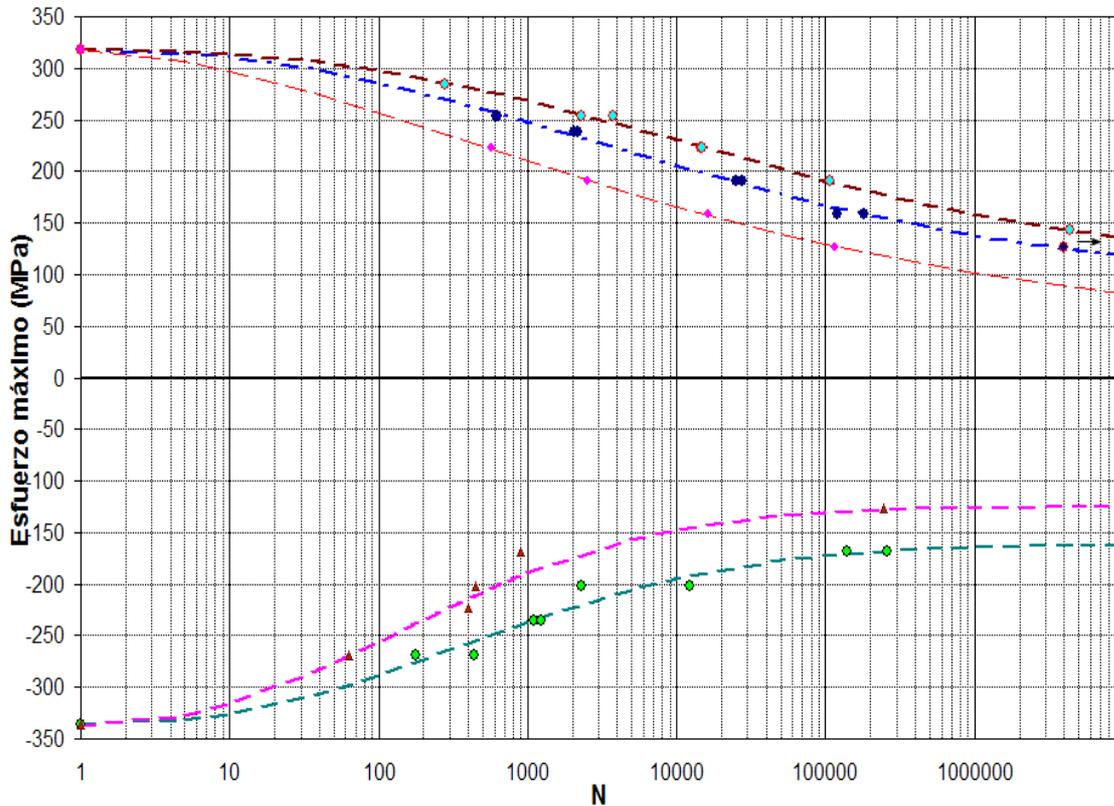


Figura 6-53. Familia de curvas S-N para distintos índices de reversión Q , aquí se observan las regresiones unidimensionales tanto a tracción como a compresión

A partir de estos datos se realiza una regresión bidimensional linealizable lo que permite obtener dos expresiones en función de N y Q . Una representativa de la curva S-N asociada a la resistencia a tracción y la otra es la curva S-N asociada a la resistencia a compresión.

Para la acumulación de la degradación a fatiga de las resistencias iniciales se utiliza el modelo de acumulación lineal de Palmgren-Miner.

(b) Definición del caso de carga

Se considera que cada una de las palas provoca tres tipos de carga sobre el buje en cada una de las bridas de unión entre buje y pala. Según la dirección de la carga se denominan:

- Cargas a *flap*: en dirección del eje de rotación de la turbina. Son las cargas provocadas por el impacto del viento en la turbina.

- Cargas a *edge*: en dirección de avance de la pala durante la rotación de la turbina. Son las cargas provocadas por las vibraciones durante la rotación por el movimiento de las palas si se para la rotación del rotor.
- Cargas a *pitch*: en la dirección longitudinal de cada pala. Cargas provocadas por el choque del viento contra las palas. Provocan un movimiento a torsión.

El número de sollicitaciones externas que provoca cada pala sobre el buje son seis: FX, FY, FZ y MX, MY, MZ. Corresponden a las fuerzas y los momentos a *flap*, *edge* y *pitch* (ver figura 6-54). Por lo tanto, sobre el buje debe analizarse el efecto de 18 cargas simultáneas: seis en cada una de las tres palas.

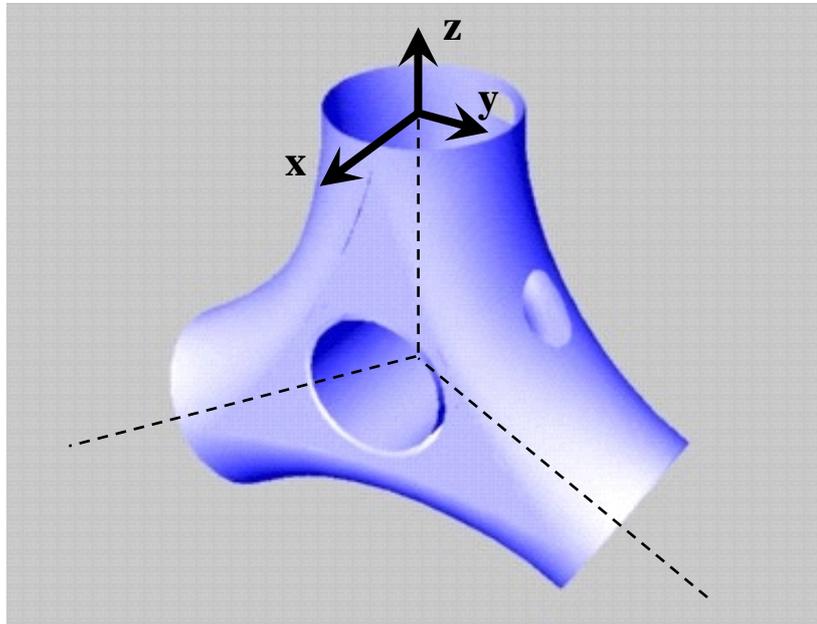


Figura 6-54. Direcciones X, Y, Z asociadas a una de las palas

Para cada sollicitación externa se aplica un historial de carga que tiene que corresponder al periodo de vida de la pieza. Este periodo según los organismos certificadores de estas máquinas (Germanised Lloyd, TÜV, etc.) se estima en 20 años.

Para organizar esta información, todas las combinaciones resultado del número de sollicitaciones y de los periodos de vida de la pieza (secuenciación de las fuerzas, el número de ciclos que tiene cada incremento de carga, valor medio, amplitud, desfase, etc.), se hace uso de una formulación matricial mediante las denominadas *matrices de Markov*. Cada elemento de la *matriz de Markov* es una combinación de las componentes alterna y media de la carga y del número de ciclos en los que la pieza estará sometida durante su vida. La suma de todos sus elementos representa la vida total de la pieza.

En este caso en particular, al utilizarse un modelo de acumulación lineal de degradación la secuencia de aplicación de los distintos casos de carga que define la *matriz de Markov* no influye en el resultado final.

Al tener las tres palas la misma geometría se puede considerar que el rotor presenta simetría con respecto al eje de rotación. Por lo tanto, cada una de las palas recibe el mismo valor de carga pero con un desfase entre las cargas de 120° (debido a que es un aerogenerador de 3 palas) debido a la rotación del eje de aerogenerador.

(c) Resultados obtenidos

Para ilustrar los resultados obtenidos se muestran las siguientes figuras de la degradación sufrida del material en dos instantes de la aplicación de la carga: un millón de ciclos y 100 millones de ciclos. Puede observarse como la degradación sigue totalmente la simetría de la geometría. La degradación se muestra en función del parámetro D, donde

$$D \equiv \frac{S_u - S_R}{S_u - S} \qquad D \equiv \frac{1 - f_{red}}{1 - s} \qquad (6-10) \text{ y } (6-11)$$

Un valor de D nulo significa que no existe degradación de la resistencia por fatiga. Un valor de D igual a la unidad indica que el material está totalmente degradado.

La degradación del material se muestra diferenciando el material base de alguno de los refuerzos más importantes que contempla su diseño.

En la observación de todos los resultados se observa como el COMHUB no sufre prácticamente ningún daño a fatiga.

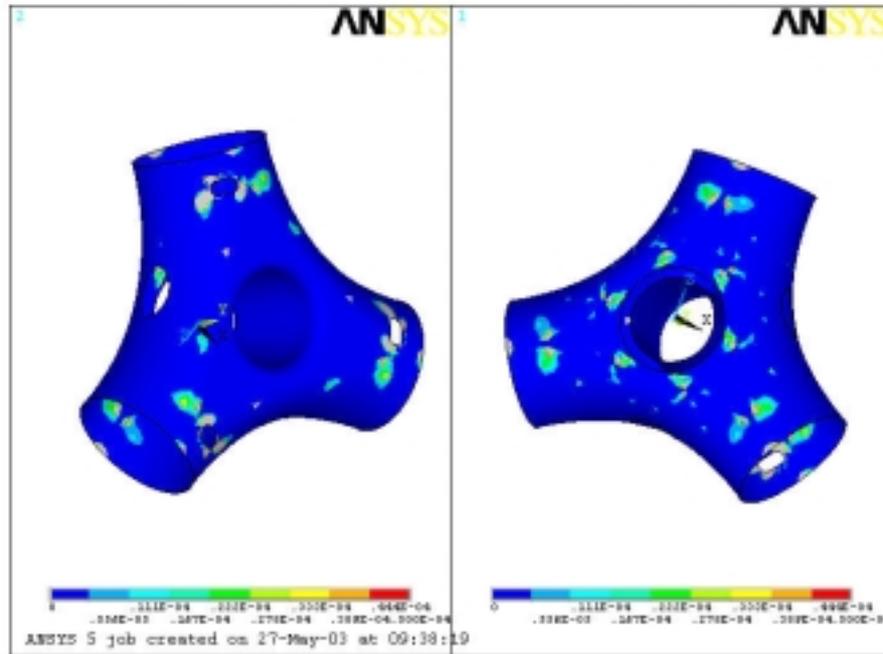


Figura 6-55. Valores de D en la capa externa del material base. Vista anterior y posterior

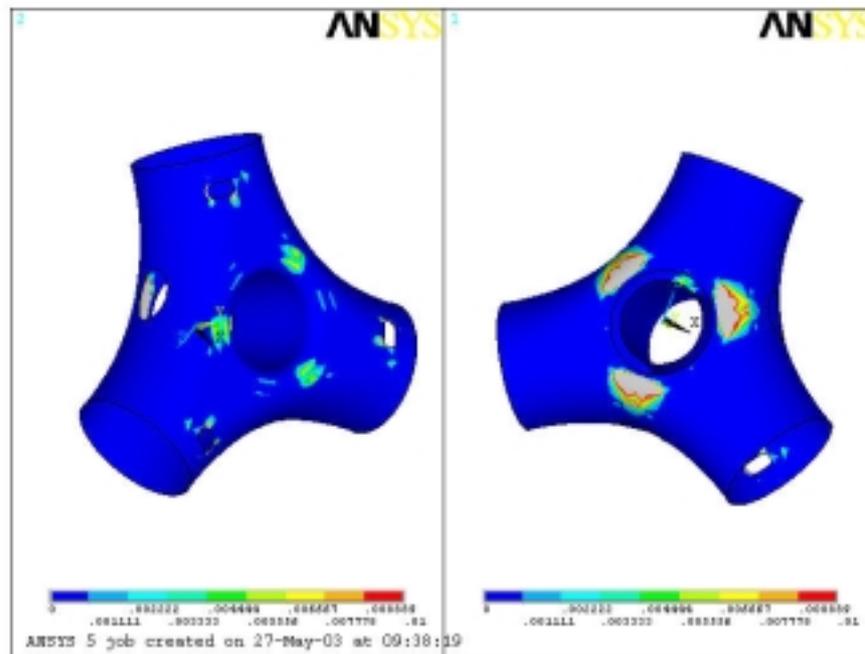


Figura 6-56. Valores de D en la capa interna del material base. Vista anterior y posterior

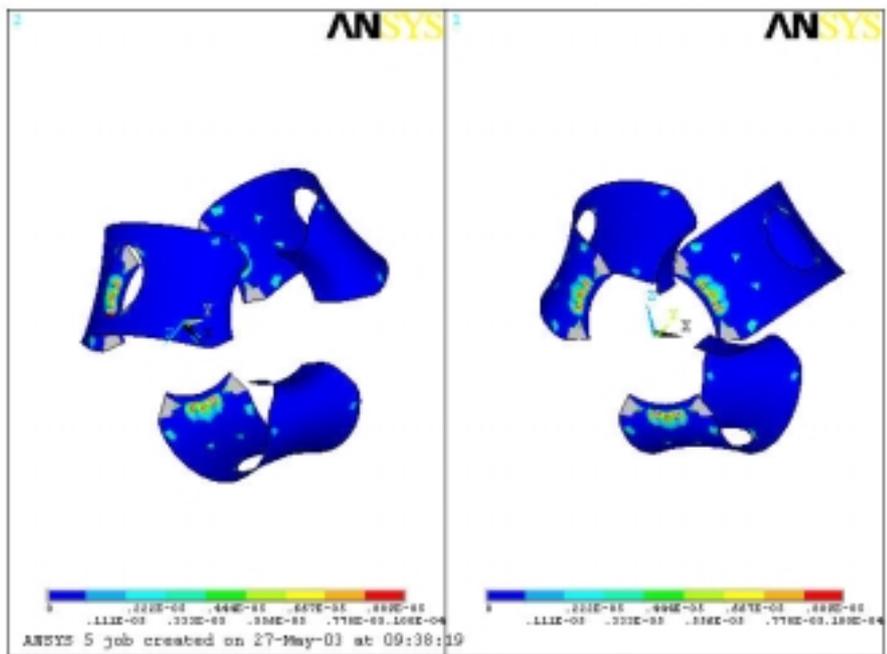


Figura 6-57. Valores de D en la capa externa del refuerzo. Vista anterior y posterior

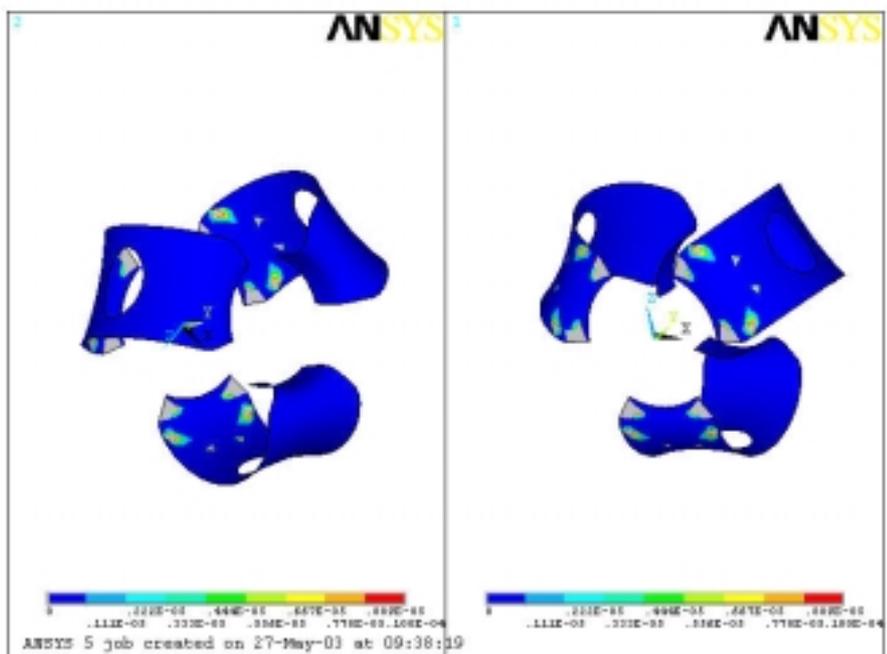


Figura 6-58. Valores de D en la capa interna del refuerzo. Vista anterior y posterior

6.6. Referencias

- Adam, T., N. Gathercole, H. Reiter y B. Harris. (1994). Life Prediction for Fatigue of T800/5245 Carbon-Fiber Composites .2. Variable-Amplitude Loading. *International Journal of Fatigue* **16**, no. 8: 533-547.
- Gathercole, N., H. Reiter, T. Adam y B. Harris. (1994). Life Prediction for Fatigue of T800/5245 Carbon-Fiber Composites .1. Constant-Amplitude Loading. *International Journal of Fatigue* **16**, no. 8: 523-532.
- Mayugo, J.A., Costa, J., Blanco, N. y Oller, S. (2001). A constitutive model for the fatigue life prediction of composite materials based on continuum damage mechanics. En . Brugge (Belgie): European Society of Composite Materials (ESCM).
- Mayugo, J.A., Trias, D., Blanco, N., Oller, S. y Costa, J. (2002). Predicción de la vida a fatiga mediante un modelo de degradación integrado en la mecánica de medios continuos. En *Métodos Numéricos en Ingeniería V*. Madrid: Sociedad Española de Métodos Numéricos en Ingeniería (SEMNI).
- Mayugo, J.A., Trias, D., Oller, S. y Costa, J. (2001). Predicción de la vida a fatiga en un material compuesto mediante un modelo de degradación de sus componentes. Parte I: Modelo Constitutivo Determinista. En *MATCOMP 01*, editado por A. Fernandez-Canteli, F.J. Belzunce y F. París. Gijón: AEMAC.
- Mayugo, J.A., Trias, D., Oller, S. y Costa, J. (2001). Predicción de la vida a fatiga en un material compuesto mediante un modelo de degradación de sus componentes. Parte II: Modelo Constitutivo con Función de Degradación Probabilística. En *MATCOMP 01*, editado por A. Fernandez-Canteli, F.J. Belzunce y F. París. Gijón: AEMAC.

