



# TRABAJO FINAL DE MÁSTER

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MATERIALES

TITULACIÓN:

**MÁSTER EN INGENIERÍA MECÁNICA Y MATERIALES**

TÍTULO:

**IMPLANTACIÓN DE UN MODELO DE FALLO PROGRESIVO POR  
FATIGA PARA CABLES ELABORADOS CON MATERIALES  
REFORZADOS CON FIBRA**

AUTOR: **JESÚS JIMÉNEZ LISÓN**

DIRECTOR: **DR. JOSÉ ALBELDA VITORIA**

CO-DIRECTOR: **EMILIO MARQUÉS CORBÍN**

Valencia a 10 de Septiembre de 2014



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer el apoyo incondicional de mi hermano, mi abuelo y mi tío Paco, los cuales los considero un ejemplo a seguir.

Por otro lado, merecen un especial agradecimiento mis amigos Pons, Pedro y Juan Miguel por los buenos tiempos que hemos pasado y pasaremos.

También quiero dar las gracias a mis compañeros de clase, sobre todo a Iván Millán y Juan Manuel por contribuir a crear un entorno de trabajo agradable y por las innumerables risas en los descansos.

Por último, quiero agradecer a mis dos co-tutores de este trabajo, tanto a José Albelda por su continuo apoyo y orientación como a Emilio Marqués porque sin su aportación este trabajo no habría sido posible además de crear un entorno de trabajo inmejorable.

A todos ellos y a otros muchos que han influido, gracias.



# RESUMEN

Se sabe que todos los materiales sufren degradación de sus propiedades con el paso del tiempo por la aplicación de cargas cíclicas o por condiciones ambientales adversas. Los materiales compuestos también se ven afectado por estas cargas cíclicas lo cual hace necesario crear un procedimiento de cálculo a fatiga para conocer su deterioro, su evolución y su influencia sobre las propiedades mecánicas del material. Actualmente no hay muchos estudios sobre el comportamiento de materiales compuestos frente a fatiga ya que es difícil de cuantificar el daño debido a que los modos de fallo pueden incluir delaminaciones, desuniones, micro-pandeos y rotura en la fibra. Todo esto entre otras cosas hace que las estructuras tengan un elevado coeficiente de seguridad.

Desde la existencia de estos materiales se han creado teorías que persiguen predecir el comportamiento y el fallo del material. Estas teorías van desde los criterios de iniciación de metales hasta los que tienen en cuenta los componentes del material compuesto.

En este trabajo se desarrollará un procedimiento analítico basado en modelos de daño progresivo y daño catastrófico para simular el comportamiento a fatiga de los materiales compuestos, concretamente de un cable de fibra de carbono, algo mucho más complejo que en el caso de los metales.

El modelo de daño progresivo consistirá en el desgaste de las propiedades mecánicas, tanto de la pérdida de rigidez como resistencia. Este modelo se puede aplicar a problemas locales y para predecir la vida a fatiga del material compuesto.

La metodología de cálculo de este procedimiento tiene tres partes diferenciadas: análisis de tensiones, análisis de fallo y degradación de las propiedades. Estas tres partes se realizarán en dos bloques en este trabajo, esto depende del programa a utilizar. En el primer bloque se calculan las tensiones mediante el software de elementos finitos MARC 2010 de MSC Software. En el segundo bloque se realizará el análisis de fallo y la degradación de las propiedades mediante una herramienta creada mediante Visual Basic para Excel.

El procedimiento seguido es dependiente de la realización de ensayos para caracterizar el material, cosa que no está al alcance de este trabajo. Por lo que para validar el programa generado se simulará un ejemplo de otros autores que si han realizado amplios ensayos experimentales.

Una vez validado, se implementa el modelo de daño progresivo en el cable de fibra de carbono. Con este procedimiento se sabrá el estado de daño ante cualquier carga y número de ciclos desde la iniciación hasta el fallo catastrófico.

**Palabras clave:** Cable fibra de carbono, vida a fatiga, modelo de daño progresivo, resistencia residual, rigidez residual, criterios de fallo.

## ABSTRACT

It is well known that all materials suffer degradation of their properties due either to cyclic loads or to the effects of adverse ambient conditions over time. These facts also have an effect on composite materials, whence, it is necessary to create a modelling technique for simulating the fatigue behaviour in these materials. Nowadays, there is a dearth of information relating to the behaviour of composite materials under fatigue loading because of the difficulty for quantifying the damage. This is a consequence of delamination, micro-buckling, dislocation and fiber failure. As a result of these problems, the safety factor is high.

Since the existence of these materials different theories have been created, whose target is to predict the behaviour and the material failure. These researches are found from the metal initialization criteria to those which take into account the different components of the composite materials.

In this research, a model is established based on a residual material property degradation technique and catastrophic damage to simulate fatigue behaviour and predict the fatigue life of composite materials, specifically a carbon fibre cable, which is more complex in comparison with traditional materials.

The material property degradation technique is realized to degrade the material properties, both stiffness and strength. The model is developed in order to simulate cycle-by-cycle behaviour of composite materials under fatigue loading.

This model has three main parts: stress analysis, failure analysis, and material property degradation. These three parts are separated in two work units depending on the software used in each one. Firstly, MARC 2010 is used for the stress analysis and later afterward, the failure analysis and material property degradation are studied using an own code created with Excel Visual Basic.

In order to evaluate the results of the analysis described above it would be necessary to perform a series of experiments, which is beyond the scope of this study. Therefore, in order to validate this code a simulation procedure

of other authors' work is performed, of whom extensive research has been done.

Once the model is validated, it is implemented in the studied geometry; a carbon fibre cable. Using this model is possible to know the extent of the damage for any load and number of cycles from initiation to catastrophic failure.

**Key words:** Carbon fiber cable, progressive damage modelling, fatigue life, residual stiffness, residual strength, failure criteria.



## RESUM

És sabut que tots els materials pateixen degradació de les seues propietats amb el pas del temps per l'aplicació de càrregues cícliques o per condicions ambientals adverses. Els materials compostos també es veuen afectats per aquestes càrregues cícliques la qual cosa fa necessari crear un procediment de càlcul de fatiga per tal de conèixer el seu deteriorament, la seua evolució i la seua influència sobre les propietats mecàniques del material. Actualment no hi ha molts estudis sobre el comportament de materials compostos enfront de fatiga ja que és difícil de quantificar el dany pel fet que els modes de fallada poden incloure laminacions, desunions, microbombaments i ruptura en la fibra. Tot açò entre altres coses fa que les estructures tinguen un coeficient de seguretat elevat.

Des de l'existència d'aquests materials s'han creat teories que perseguixen predir el comportament i la fallada del material. Aquestes teories van des dels criteris d'iniciació de metalls fins als que tenen en compte els components del material compost.

En aquest treball es desenvoluparà un procediment analític basat en models de dany progressiu i dany catastròfic per simular el comportament de fatiga dels materials compostos, concretament d'un cable de fibra de carboni, quelcom molt més complex que en el cas dels metalls.

El model de dany progressiu consistirà en el desgast de les propietats mecàniques, tant per la pèrdua de rigidesa com de resistència. Aquest model es pot aplicar a problemes locals i pot ser utilitzat per tal de predir la vida a fatiga del material compost.

La metodologia de càlcul d'aquest procediment té tres parts diferenciades: anàlisi de tensions, anàlisi de fallada i degradació de les propietats. Aquestes tres parts es realitzaran en dos blocs en aquest treball, depenent del programa utilitzat. En el primer bloc es calculen les tensions per mitjà del programari d'elements finits MARC 2010 de MSC Programari. En el segon bloc es realitzarà l'anàlisi de fallada i la degradació de les propietats amb una eina creada mitjançant Visual Basic per a Excel.

El procediment seguit depèn de la realització d'assajos per a caracteritzar el material, cosa que no està a l'abast d'aqueste treball. Pel que per tal de validar el programa generat se simularà un exemple d'altres autors que si han realitzat amplis assajos experimentals.

Una vegada validat, s'implementarà el model de fallada progressiva al cable de fibra de carboni. Amb este procediment se sabrà l'estat de dany front qualsevol càrrega i nombre de cicles des de l'inici fins a la fallada catastròfica.

**Paraules clau:** Cable fibra de carboni, vida a fatiga, model de dany progressiu, resistència residual, rigidesa residual, criteris de fallada.

# ÍNDICE

RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
RESUM.....	ixi
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>13</b>
<b>2. DESCRIPCIÓN DE LOS CABLES SINTÉTICOS.....</b>	<b>17</b>
<b>3. METODOLOGÍA DE CÁLCULO A FATIGA.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Hipótesis de cálculo .....</b>	<b>22</b>
<b>3.2 Proceso de cálculo .....</b>	<b>22</b>
<b>3.2.1 Criterios de iniciación asociado a los modos de fallo .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.2 Degradación de Propiedades.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.3 Vida a fatiga.....</b>	<b>37</b>
<b>4. APLICACIÓN DEL PROCESO DE CÁLCULO .....</b>	<b>39</b>
<b>4.1 Análisis de tensiones con MSC Marc .....</b>	<b>43</b>
<b>4.2 Pre y Post procesado con Visual Basic Excel .....</b>	<b>44</b>
<b>5. APLICACIÓN DEL PROCESO DE CÁLCULO A UN MODELO REAL</b>	<b>49</b>
<b>5.1 Verificación de la programación.....</b>	<b>49</b>
<b>5.2 Modelo de elementos finitos .....</b>	<b>51</b>
<b>5.3 Geometrías y componentes .....</b>	<b>52</b>
<b>5.4 Materiales .....</b>	<b>53</b>
<b>5.5 Condiciones de contorno.....</b>	<b>55</b>
<b>5.5.1 Condiciones de simetría.....</b>	<b>55</b>
<b>5.5.2 Sustitución del whipping.....</b>	<b>56</b>
<b>5.5.3 Empotramiento del pasador .....</b>	<b>57</b>
<b>5.5.4 Contactos .....</b>	<b>57</b>
<b>5.6 Cargas aplicadas .....</b>	<b>58</b>

<b>6. RESULTADOS</b> .....	59
<b>6.1 Caso 1: Obtención de la carga estática de rotura</b> .....	61
<b>6.2 Caso 2: Fallo por fatiga al 80% de la carga máxima</b> .....	62
<b>6.3 Caso 3: Fallo por fatiga al 75% de la carga máxima</b> .....	67
<b>6.4 Caso 4: Fallo por fatiga al 70% de la carga máxima</b> .....	72
<b>6.5 Caso 5: Fallo por fatiga al 65% de la carga máxima</b> .....	77
<b>6.6 Caso 6: Fallo por fatiga al 60% de la carga máxima</b> .....	82
<b>6.7 Curvas de vida</b> .....	87
<b>7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b> .....	89
<b>7.1 Conclusiones</b> .....	89
<b>7.2 Trabajos futuros</b> .....	90
<b>8. BIBLIOGRAFÍA.</b> .....	91

# Capítulo Uno

# 1

## Introducción

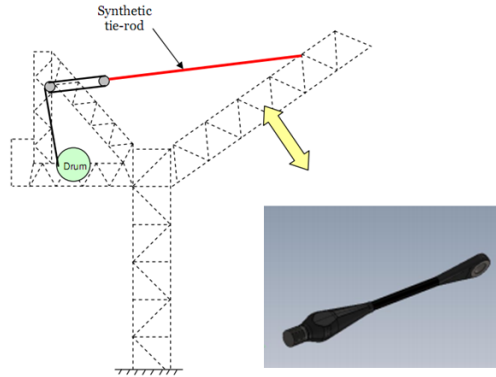
### 1. INTRODUCCIÓN

El presente documento recoge las tareas realizadas para el estudio del comportamiento a fatiga de cables sintéticos de fibra de carbono por medio de modelos analíticos.

Los cables sintéticos fabricados a partir de materiales compuestos se vienen empleando desde hace ya algunos años en el sector naval, en especial en barcos de alta competición (Copa América, Volvo Ocean Race, etc.). Las ventajas con respecto a los tradicionales cables metálicos son claras en términos de resistencia y peso. Otros sectores en los que también se emplean son la construcción y el aeronáutico.



**Figura 1.1: Aplicación de los cables en la construcción de puentes**



**Figura 1.2: Aplicación de los cables de fibra de carbono en grúas**

Tradicionalmente, los cables empleados para este tipo de aplicaciones han sido de acero, material cuyo comportamiento es totalmente conocido en términos de resistencia estática, fatiga, durabilidad, etc.

El objeto del proyecto es el estudio de la viabilidad, desde un punto de vista estructural y frente a cargas de fatiga, de los cables sintéticos empleados en aplicaciones diversas, en sustitución de los tradicionales cables de acero. Para ello se presenta una metodología de cálculo a fatiga para materiales compuestos que permita evaluar su carga máxima.

La fibra reforzada, normalmente fibra de carbono, se utiliza debido a su alta resistencia y rigidez específica, gracias a estas características con su peso ligero amplían el campo de aplicación. A parte de ampliar su campo de aplicación ofrecen un rendimiento mejor. Un claro ejemplo son los cambios que se están experimentando en los cables de las grúas, en los que se están sustituyendo los cables típicos de acero por los cables de materiales compuestos, entre las distintas ventajas podemos encontrar la reducción de peso (60-90%), la mejora a resistencia a fatiga por un factor de tres, reducido coste de mantenimiento, facilidad de manejo, reducido coste de instalación, alta resistencia a la corrosión y una amplia variedad de ensayos no destructivos (NDT) métodos que permiten saber el estado del cable. La reducción de peso genera una mayor capacidad de carga estática y por tanto amplía el ámbito de aplicación. Estos beneficios combinados proporcionan una reducción del costo de por vida.



**Figura 1.3: Grúas con cables de material compuesto**

Pero tiene un problema importante, existe una laguna a la hora de predecir la vida a fatiga y la resistencia residual de una estructura fabricada con material compuesto. Por este motivo, estas estructuras se diseñan con un factor de seguridad alto siendo además necesario realizar ensayos experimentales para conocer mejor su comportamiento.

En este trabajo se desarrollará un procedimiento analítico para evaluar el daño a fatiga de los materiales compuestos, concretamente de un cable de fibra de carbono, algo mucho más complejo que en el caso de los metales.

Los materiales compuestos son anisótropos y heterogéneos, lo que implica que pueden existir múltiples modos de fallo e interactuar entre ellos con distintas relaciones. Estos modos de fallo pueden incluir rotura de la matriz, rotura de la fibra, delaminaciones, desuniones, micro-pandeos,.... Por este motivo es difícil cuantificar el daño a fatiga sufrido por un material compuesto.

En este proyecto se cuantificará el daño a fatiga por la merma en las propiedades mecánicas del material, es decir, disminuyendo su rigidez y resistencia. Este tipo de modelos también se conocen como modelos de fallo progresivo.

Los modelos de fallo progresivo pueden ser aplicados tanto a problemas con campos de tensiones no uniformes que produzcan un daño de material local, como a problemas en los que el objetivo sea predecir la vida a fatiga del material compuesto.

La metodología de cálculo empleada en el proyecto puede dividirse en dos bloques principales. En un primer bloque se calculan las tensiones que aparecen en el cable al aplicar una determinada carga utilizando un software comercial de elementos finitos (en este caso el MARC 2010 de MSC Software). En un segundo bloque se post-procesan las tensiones obtenidas y se calculan las nuevas rigideces y resistencias de los elementos en función del número de ciclos aplicado para posteriormente aplicar un criterio de fallo y saber que elementos han fallado.

Para realizar el segundo bloque ha sido necesario implementar una herramienta adicional desarrollada con Visual Basic para Excel.

El modelo de fallo progresivo permite determinar el estado de daño ante cualquier nivel de carga y número de ciclos desde la iniciación hasta el fallo catastrófico. Sin embargo, el modelo está limitado por la necesidad de caracterizar el material mediante amplios ensayos experimentales. Realizar dichos ensayos para determinar las propiedades mecánicas del material compuesto no está al alcance de este proyecto, así que se partirá de datos experimentales obtenidos por otros autores [1].



2

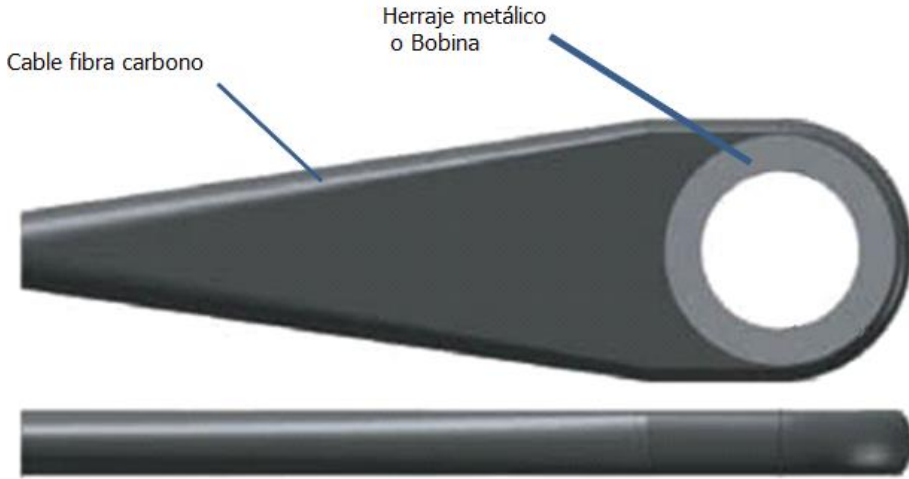
# Capítulo Dos

## Descripción de los Cables Sintéticos

### 2. DESCRIPCIÓN DE LOS CABLES SINTÉTICOS

Para entender el comportamiento del cable y su unión es importante explicar brevemente el proceso de fabricación. En los extremos del cable a construir se sitúan dos herrajes metálicos (ver Figura 2.1). Los cables se construyen directamente a partir de fibras continuas enrolladas sin solución de continuidad alrededor de dichos herrajes, hasta conseguir el diámetro de cable deseado. A continuación, se compacta la madeja de fibras resultante mediante cintas (proceso denominado Whipping) con la misión de lograr la máxima relación de compactación (reducción del diámetro de cable) y proteger las fibras del entorno (humedad, radiación, etc.).

Finalmente, el conjunto se recubre con una camisa tejida de fibra sintética con fines exclusivamente estéticos. De esta forma se obtiene un cable por cuya sección pasan cientos de miles de fibras perfectamente alineadas y sin solución de continuidad. La resistencia estática del cable a tracción es la correspondiente a la propia fibra por lo que se obtienen cables de muy alta resistencia. El punto más débil suele aparecer entonces en la interface cable – herraje.



**Figura 2.1: Geometría típica del cable estudiado en su extremo.**



**Figura 2.2: Cables totalmente terminados.**

Estos cables en concreto portan la vela más grande jamás realizada.

Los modelos de elementos finitos generados para simular el comportamiento del cable (descritos más adelante) reproducen su geometría y cuentan con los componentes principales: cable, foam y herraje metálico.



3

# Capítulo Tres

## Metodología de Cálculo a Fatiga

### 3. METODOLOGÍA DE CÁLCULO A FATIGA

En este capítulo se explica la metodología de análisis empleada para estimar la vida a fatiga de un cable realizado con material compuesto, aunque el procedimiento es válido para cualquier geometría.

Como ya se comentó antes, el proceso de cálculo tiene dos fases perfectamente diferenciadas:

- Una primera fase en la que se ha realizado un modelo de elementos finitos para evaluar las tensiones que aparecen en el cable frente a cargas estáticas
- Una segunda fase en la que se obtienen las nuevas propiedades de los elementos (rigidez y resistencia) en función del número de ciclos realizados, así como sus índices de fallo.

En la primera fase se ha utilizado el software comercial de elementos finitos MARC junto con el preprocesador MENTAT, ambos de MSC Software, mientras que en la segunda se ha desarrollado una aplicación basada en Visual Basic para Excel.

Como se explica más adelante el proceso de cálculo es iterativo.

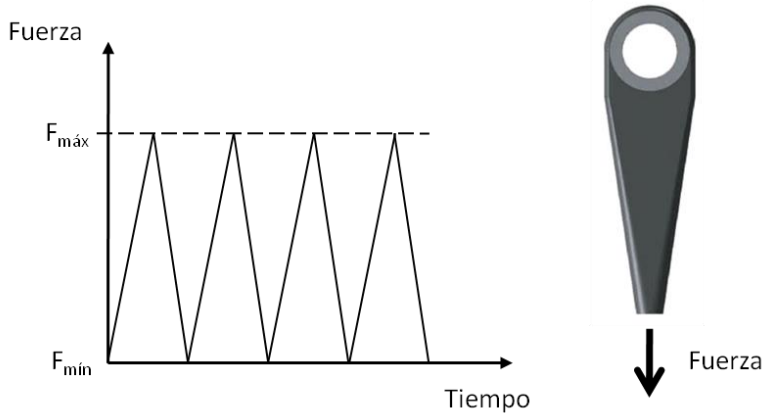
### 3.1 HIPÓTESIS DE CÁLCULO

Las hipótesis realizadas para estudiar la resistencia a fatiga del cable de material compuesto han sido:

- Se considera que el cable se comporta como una lámina unidireccional de material compuesto.
- El modelo matemático realizado es en 2D, considerando el criterio de deformación plana, aunque el procedimiento de cálculo es válido para casos 3D.
- No se considera el fallo progresivo en la zona inferior del cable, ya que las condiciones de contorno en esa zona producen picos de tensiones locales que no existen en la realidad. Los ensayos realizados sobre el cable demuestra además que el fallo por fatiga no se produce en la zona inferior sino en la zona de contacto con el herraje.
- Se considera que el material compuesto es homogéneo y ortótropo, haciendo referencia los subíndices X, Y y Z a las direcciones de la fibra del material, a la dirección transversal en el plano y a la dirección perpendicular al plano respectivamente.
- Sólo se considera el fallo a fatiga en el material compuesto y no en el resto de componentes (herraje, espuma, etc.).

### 3.2 PROCESO DE CÁLCULO

Un material sometido a fatiga trabaja bajo cargas cíclicas. En el caso concreto del cable, la carga mínima a la que está sometido siempre será 0, mientras que la carga máxima se considerará constante.



**Figura 3.1: Esquema de carga aplicada en el cable**

El proceso de cálculo comienza obteniendo el valor de las tensiones en todos los elementos del cable cuando está sometido a la fuerza máxima y a la fuerza mínima, aplicadas éstas de manera estática. Lógicamente, cuando el cable esté sometido a la fuerza mínima (Fuerza = 0) las tensiones en los elementos serán nulas.

La metodología de cálculo a fatiga empleada se basa en el hecho de que las propiedades del material sometido a cargas cíclicas dependen del número de ciclos soportado y de su estado tensional. Así pues, una vez se dispone del estado tensional de los elementos frente a la carga estática se calcula su vida a fatiga y unas nuevas propiedades de rigidez y resistencia llamadas rigidez y resistencia residuales, que dependen del número de ciclos considerado y de la vida a fatiga del material. El siguiente paso es evaluar el índice de fallo para cada elemento. Si se produce el fallo (superando el índice de fallo) se degradarán automáticamente sus propiedades según la Tabla 3.1; si el elemento no supera el índice de fallo, se merman sus propiedades y se podrá aumentar el número de ciclos hasta el fallo. Una vez se dispone de las nuevas propiedades para los elementos se vuelven a calcular las tensiones y los correspondientes índices de fallo.

Este proceso se repite hasta que el cable no sea capaz de soportar la fuerza aplicada.

Este procedimiento fue utilizado por Mahmood M.Shokrieh [1] e incluye la fatiga del material al hacer que sus propiedades sean función del número de ciclos de carga. Dicho autor evaluó este procedimiento aplicándolo a un

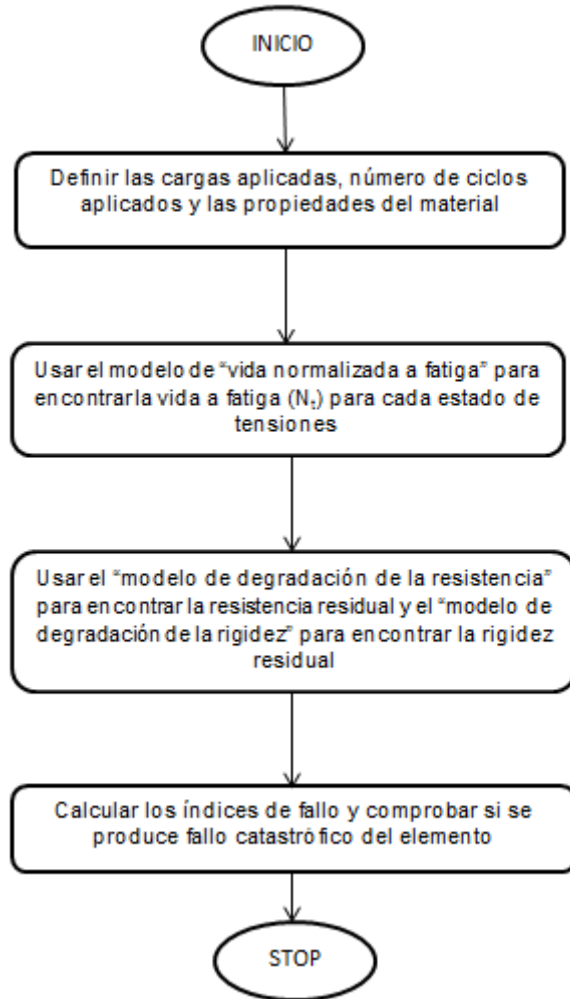
conjunto de laminados unidireccionales con un agujero en el centro, en los que comprobó, mediante datos experimentales, que se adaptaba con un margen de error aceptable a la realidad. Al no disponer de datos experimentales de los materiales del cable para poder evaluar los parámetros necesarios (derivados de ensayos) para llevar a cabo los cálculos se han tomado como referencia los de la tesis de Mahmood M.Shokrieh. Dichos parámetros son dependientes del material pero totalmente independientes de la geometría analizada.

También hay que comentar que existe alguna discrepancia entre este proyecto y el de Mahmood M.Shokrieh como es la consideración del parámetro  $f$  como variable, el uso de este parámetro se verá en el apartado 3.2.3. Él lo considera constante, pero otros autores no [2],[5]. En el caso de los cables se ha considerado variable.

En resumen, se puede decir que el proceso de cálculo empleado es capaz de simular ciclo a ciclo el comportamiento del material compuesto.

La figura siguiente muestra el diagrama de flujo correspondiente a la técnica seguida para la degradación de propiedades.





**Figura 3.2: Diagrama de flujo para la degradación de las propiedades**

A continuación se explica en detalle los distintos modos de fallo considerados, de qué forma se degradan las propiedades del material y los modelos de fallo progresivo para considerar la vida a fatiga.

### 3.2.1 CRITERIOS DE INICIACIÓN ASOCIADO A LOS MODOS DE FALLO.

En la referencia [1] se ha comprobado que los modos de fallo producidos por una carga estática son los mismos que los producidos por cargas de fatiga excepto en que las propiedades del material no son constantes sino que función del número de ciclos, relación de tensiones y su estado tensional, en consecuencia, es posible considerar un criterio de fallo estático para evaluar el fallo por fatiga del material.

Hay numerosos criterios de fallo desde criterios asociados a modos de fallo como son el criterio de máxima tensión [6], el criterio de máxima deformación [6], Hashin [7], Hart-Smith [8] y Hashin&Rotem [9] hasta criterios no asociados a los modos de fallo como son el criterio de Tsai-Hill [6], Tsai-Wu en tensiones [10] y el criterio de Tsai-Wu en deformaciones [10].

Entre los diferentes criterios de fallo no asociados a los modos de fallo el que mejor se adecua es el criterio cuadrático Tsai-Wu, este útil para predecir el fallo pero no identifica el modo de fallo que ha producido la rotura. Por lo tanto, no se podrá degradar las propiedades de las zonas dañadas. Por este motivo el criterio de fallo a escoger estará entre los criterios de fallo asociados a los modos de fallo. El criterio de fallo de máxima tensión y el de máxima deformación son útiles ya que determinan el modo de fallo y son fáciles de aplicar, sin embargo sobreestiman la resistencia al no tener en cuenta la interacción entre modos de fallo, lo cual lo hace bastante conservativo. Otro criterio de fallo es el de Hashin, el cual combina las ventajas de precisión del criterio cuadrático donde se considera la interacción entre las distintas componentes que intervienen en un modo y tiene la habilidad de diferenciar los modos de fallo.

De entre todos los criterios de fallo estático existentes para material compuesto se ha decidido utilizar el criterio de Hashin, ya que es un criterio que se adapta bien al fallo de la fibra de carbono y distingue entre distintos tipos de fallo (fibra o matriz).

En condiciones de fatiga o carga cíclica el material soporta una carga inferior a la que produce el fallo bajo carga estática. El motivo es que al incrementar el número de ciclos, las propiedades del material se degradan, produciéndose el fallo del material para un nivel de tensión inferior al de carga estática.

Como ya se ha comentado antes, las propiedades del material dependerán del número de ciclos ( $n$ ), de las tensiones aplicadas ( $\sigma$ ) y el cociente entre la tensión máxima y mínima ( $\kappa$ ).

Los diferentes modos de fallo son:

- **Fallo por tracción en la fibra ( $\sigma_{xx}>0$ )**: Para este tipo de fallo se ha considerado la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{\sigma_{xx}}{X_t(n, \sigma, k)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}(n, \sigma, k)}\right)^2 = g_{F^+}^2 \quad (3.1)$$

(Si  $g_{F^+} > 1$ , fallará)

Donde:

- $X_t(n, \sigma, k)$  es la resistencia residual a tracción en dirección X.
- $S_{xy}(n, \sigma, k)$  es la resistencia residual a cortadura en el plano XY.

- **Fallo por compresión en la fibra ( $\sigma_{xx}<0$ )**: Para este tipo de fallo se ha considerado la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{\sigma_{xx}}{X_c(n, \sigma, k)}\right)^2 = g_{F^-}^2 \quad (3.2)$$

(Si  $g_{F^-} > 1$ , fallará)

Donde:

- $X_c(n, \sigma, k)$  es la resistencia residual a compresión en dirección X.

- **Fallo por cortadura en la unión fibra matriz ( $\sigma_{xx}<0$ )**: Para este tipo de fallo se ha considerado la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{\sigma_{xx}}{X_c(n, \sigma, k)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}(n, \sigma, k)}\right)^2 = g_{FM}^2 \quad (3.3)$$

(Si  $g_{FM} > 1$ , fallará)

Donde:

- $X_c(n, \sigma, k)$  es la resistencia residual a compresión en dirección X.
- $S_{xy}(n, \sigma, k)$  es la resistencia residual a cortadura en el plano XY.

- **Fallo por tracción en la matriz ( $\sigma_{yy} > 0$ ):** Para este tipo de fallo se ha considerado la siguiente ecuación:

$$\left( \frac{\sigma_{yy}}{Y_t(n, \sigma, k)} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}(n, \sigma, k)} \right)^2 = g_{M^+}^2 \quad (3.4)$$

(Si  $g_{M^+} > 1$ , fallará)

Donde:

- $Y_t(n, \sigma, k)$  es la resistencia residual a tracción en dirección Y.
- $S_{xy}(n, \sigma, k)$  es la resistencia residual a cortadura en el plano XY.

- **Fallo por compresión en la matriz ( $\sigma_{yy} < 0$ ):** Para este tipo de fallo se ha considerado la siguiente ecuación:

$$\left( \frac{\sigma_{yy}}{Y_c(n, \sigma, k)} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}(n, \sigma, k)} \right)^2 = g_{M^-}^2 \quad (3.5)$$

(Si  $g_{M^-} > 1$ , fallará)

Donde:

- $Y_c(n, \sigma, k)$  es la resistencia residual a compresión en dirección Y.
- $S_{xy}(n, \sigma, k)$  es la resistencia residual a cortadura en el plano XY.

- **Fallo por tracción en la dirección normal ( $\sigma_{zz} > 0$ ):** Para este tipo de fallo se ha considerado la siguiente ecuación:

$$\left( \frac{\sigma_{zz}}{Z_t(n, \sigma, k)} \right)^2 = g_{N^+}^2 \quad (3.6)$$

(Si  $g_{N^+} > 1$ , fallará)

Donde:

- $Z_t(n, \sigma, k)$  es la resistencia residual a tracción en dirección Z.

- **Fallo por compresión en la dirección normal ( $\sigma_{zz} < 0$ ):** Para este tipo de fallo se ha considerado la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{\sigma_{zz}}{Z_c(n, \sigma, k)}\right)^2 = g_N^2 \quad (3.7)$$

(Si  $g_N > 1$ , fallará)

Donde:

- $Z_c(n, \sigma, k)$  es la resistencia residual a compresión en dirección Z.

Una vez definidos los distintos modos de fallo que pueden existir en el cable, hay que señalar que los tienen un mayor peso para que se produzca el fallo catastrófico son:

- Fallo por tracción en la fibra.
- Fallo por compresión en la matriz en dirección Y (a la dirección Y se le llamará transversal).
- Fallo por cortadura en la unión fibra matriz.

### 3.2.2 DEGRADACIÓN DE PROPIEDADES

La ruptura de un material compuesto reforzado con fibras cargadas con cargas cíclicas es un proceso progresivo en el que aparecen y combinan distintos mecanismos de degradación. La aparición de pequeñas grietas en la matriz puede concluir con una propagación de las grietas hasta producirse una rotura de fibras en las zonas adyacentes y una delaminación total entre las láminas. Por tanto, el mecanismo que produce la fatiga no se asemeja a la nucleación y propagación de un solo defecto, como en el caso de los metales, si no que se origina por una distribución de defectos que van aumentando con el número de ciclos hasta que se produce la rotura del material.

Una vez establecido un criterio de fallo es necesario definir cuáles serán las propiedades mecánicas residuales de los elementos.

La exactitud del análisis del fallo de un material compuesto está directamente relacionada al modo de fallo escogido y al modelo de degradación de propiedades del material asociado. Donde el criterio de fallo dictamina las condiciones en la que ocurre el daño del material y el modelo de degradación representa las propiedades del material después

del daño ocurrido. Por tanto, la parte del material dañado se descargará cargando la zona no dañada circundante.

El principal desafío de los modelos de degradación es determinar correctamente las propiedades del material dañado.

El comportamiento a fatiga de un material compuesto varía bajo diferentes estados de tensión. Por ejemplo, para un nivel alto de tensión la resistencia residual prácticamente constante y decrece drásticamente cuando alcanza el número de ciclos que produce el fallo. Este comportamiento se describe con el “*sudden death model*” (modelo de degradación total). Sin embargo, para un nivel bajo de tensiones, la resistencia residual decrece gradualmente en función del número de ciclos. El modelo que estudia este comportamiento se llama “*wear out model*” (degradación progresiva). Esto se puede observar en la siguiente figura sacada de [1].

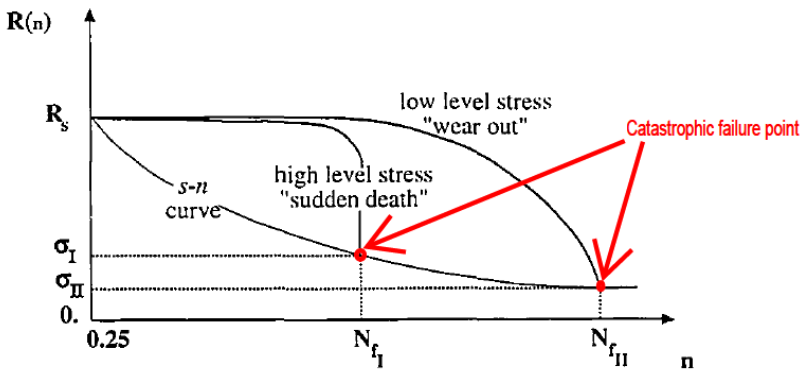


Figura 3.3: Degradación de la resistencia para diferentes estados de carga.

### 3.2.2.1 Modelo de degradación catastrófica

Este modelo se da cuando un elemento ha fallado por un criterio de fallo de los mencionados en el punto 3.2.1 de este documento.

La degradación de la rigidez, por ejemplo la rigidez en la dirección de la fibra ( $E_{xx}$ ), se produce multiplicando por un factor de degradación, FD, el valor de la propiedad correspondiente utilizada en un ensayo estático, es decir, la nueva rigidez en la dirección de la fibra será  $FD_{xx} \cdot E_{xx}$ .

A continuación se presenta como se degradarán las propiedades en función del modo de fallo que se produzca en el cable:

- **Fallo por tracción en la dirección de la fibra:** este tipo de fallo es catastrófico, ya que la rotura de la fibra (que es el componente que soporta la carga) implica una discontinuidad física en el material que no es capaz de soportar carga. La ley de degradación será:

Para las propiedades de rigidez y coeficiente de Poisson:

$$[E_{xx}, E_{yy}, E_{zz}, G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}, \nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}, \nu_{yx}, \nu_{zx}, \nu_{zy}]$$

$$\downarrow \quad (3.8)$$

$$[FD_{xx} \cdot E_{xx}, FD_{yy} \cdot E_{yy}, FD_{zz} \cdot E_{zz}, FD_{xy} \cdot G_{xy}, FD_{xz} \cdot G_{xz}, FD_{yz} \cdot G_{yz}, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$$

Para las propiedades de resistencia:

$$[X_t, Y_t, Z_t, X_c, Y_c, Z_c, S_{xy}, S_{xz}, S_{yz}]$$

$$\downarrow \quad (3.9)$$

$$[FD_{xx} \cdot X_t, FD_{yy} \cdot Y_t, FD_{zz} \cdot Z_t, FD_{xx} \cdot X_c, FD_{yy} \cdot Y_c, FD_{zz} \cdot Z_c, FD_{xy} \cdot S_{xy}, FD_{xz} \cdot S_{xz}, FD_{yz} \cdot S_{yz}]$$

- **Fallo por compresión en la dirección de la fibra:** este tipo de fallo también es catastrófico, ya que la rotura de la fibra implica una discontinuidad física en el material que no es capaz de soportar carga. La ley de degradación será:

Para las propiedades de rigidez y coeficiente de Poisson:

$$[E_{xx}, E_{yy}, E_{zz}, G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}, \nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}, \nu_{yx}, \nu_{zx}, \nu_{zy}]$$

$$\downarrow \quad (3.10)$$

$$[FD_{xx} \cdot E_{xx}, FD_{yy} \cdot E_{yy}, FD_{zz} \cdot E_{zz}, FD_{xy} \cdot G_{xy}, FD_{xz} \cdot G_{xz}, FD_{yz} \cdot G_{yz}, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$$

Para las propiedades de resistencia:

$$[X_t, Y_t, Z_t, X_c, Y_c, Z_c, S_{xy}, S_{xz}, S_{yz}]$$

$$\downarrow \quad (3.11)$$

$$[FD_{xx} \cdot X_t, FD_{yy} \cdot Y_t, FD_{zz} \cdot Z_t, FD_{xx} \cdot X_c, FD_{yy} \cdot Y_c, FD_{zz} \cdot Z_c, FD_{xy} \cdot S_{xy}, FD_{xz} \cdot S_{xz}, FD_{yz} \cdot S_{yz}]$$

- **Fallo por cortadura en la unión fibra matriz:** este tipo de fallo no es catastrófico, ya que las fibras no se han roto y son capaces de aguantar carga en otras direcciones. La ley de degradación será:

Para las propiedades de rigidez y coeficiente de Poisson:

$$[E_{xx}, E_{yy}, E_{zz}, G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}, \nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}, \nu_{yx}, \nu_{zx}, \nu_{zy}]$$

$$\downarrow$$
(3.12)

$$[E_{xx}, E_{yy}, E_{zz}, FD_{xy} \cdot G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}, 0, \nu_{xz}, \nu_{yz}, 0, \nu_{zx}, \nu_{zy}]$$

Para las propiedades de resistencia:

$$[X_t, Y_t, Z_t, X_c, Y_c, Z_c, S_{xy}, S_{xz}, S_{yz}]$$

$$\downarrow$$
(3.13)

$$[X_t, Y_t, Z_t, X_c, Y_c, Z_c, FD_{xy} \cdot S_{xy}, S_{xz}, S_{yz}]$$

- **Fallo por tracción en la dirección de la matriz (dirección Y):** este tipo de fallo no es catastrófico, ya que las fibras no se han roto y son capaces de aguantar carga en otras direcciones. La ley de degradación será:

Para las propiedades de rigidez y coeficiente de Poisson:

$$[E_{xx}, E_{yy}, E_{zz}, G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}, \nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}, \nu_{yx}, \nu_{zx}, \nu_{zy}]$$

$$\downarrow$$
(3.10)

$$[E_{xx}, FD_{yy} \cdot E_{yy}, E_{zz}, G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}, \nu_{xy}, \nu_{xz}, 0, 0, \nu_{zx}, \nu_{zy}]$$

Para las propiedades de resistencia:

$$[X_t, Y_t, Z_t, X_c, Y_c, Z_c, S_{xy}, S_{xz}, S_{yz}]$$

$$\downarrow$$
(3.11)

$$[X_t, FD_{yy} \cdot Y_t, Z_t, X_c, Y_c, Z_c, S_{xy}, S_{xz}, S_{yz}]$$



- **Fallo por compresión en la dirección de la matriz (dirección Y):** este tipo de fallo no es catastrófico, ya que las fibras no se han roto y son capaces de aguantar carga en otras direcciones. La ley de degradación será:

Para las propiedades de rigidez y coeficiente de Poisson:

$$[E_{xx}, E_{yy}, E_{zz}, G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}, \nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}, \nu_{yx}, \nu_{zx}, \nu_{zy}] \quad (3.12)$$

↓

$$[E_{xx}, FD_{yy} \cdot E_{yy}, E_{zz}, G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}, \nu_{xy}, \nu_{xz}, 0, 0, \nu_{zx}, \nu_{zy}]$$

Para las propiedades de resistencia:

$$[X_t, Y_t, Z_t, X_c, Y_c, Z_c, S_{xy}, S_{xz}, S_{yz}] \quad (3.13)$$

↓

$$[X_t, Y_t, Z_t, X_c, FD_{yy} \cdot Y_c, Z_c, S_{xy}, S_{xz}, S_{yz}]$$

- **Fallo por tracción en la dirección normal (dirección Z):** este tipo de fallo no es catastrófico, ya que las fibras no se han roto y son capaces de aguantar carga en otras direcciones. La ley de degradación será:

Para las propiedades de rigidez y coeficiente de Poisson:

$$[E_{xx}, E_{yy}, E_{zz}, G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}, \nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}, \nu_{yx}, \nu_{zx}, \nu_{zy}] \quad (3.14)$$

↓

$$[E_{xx}, E_{yy}, FD_{zz} \cdot E_{zz}, G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}, \nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}, \nu_{yx}, 0, 0]$$

Para las propiedades de resistencia:

$$[X_t, Y_t, Z_t, X_c, Y_c, Z_c, S_{xy}, S_{xz}, S_{yz}] \quad (3.15)$$

↓

$$[X_t, Y_t, FD_{zz} \cdot Z_t, X_c, Y_c, Z_c, S_{xy}, S_{xz}, S_{yz}]$$

- **Fallo por compresión en la dirección de la matriz (dirección Z):** este tipo de fallo no es catastrófico, ya que las fibras no se han roto y son capaces de aguantar carga en otras direcciones. La ley de degradación será:

Para las propiedades de rigidez y coeficiente de Poisson:

$$[E_{xx}, E_{yy}, E_{zz}, G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}, \nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}, \nu_{yx}, \nu_{zx}, \nu_{zy}]$$

↓

$$(3.16)$$

$$[E_{xx}, E_{yy}, FD_{zz} \cdot E_{zz}, G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}, \nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}, \nu_{yx}, 0, 0]$$

Para las propiedades de resistencia:

$$[X_t, Y_t, Z_t, X_c, Y_c, Z_c, S_{xy}, S_{xz}, S_{yz}]$$

↓

$$(3.17)$$

$$[X_t, Y_t, Z_t, X_c, Y_c, FD_{zz} \cdot Z_c, S_{xy}, S_{xz}, S_{yz}]$$

Como es lógico, los factores de degradación varían entre 0 y 1 y para este caso en concreto se han considerado los valores de la siguiente tabla:

Factores de degradación	
$FD_{xx}$	0.01
$FD_{yy}$	0.7
$FD_{zz}$	0.7
$FD_{xy}$	0.01

**Tabla 3. 1**Tabla de degradación

Ninguno de los factores es 0 para evitar problemas numéricos, y se ha considerado un factor de 0.7 en los fallos producidos en la matriz porque el fallo es mayoritariamente por compresión y aunque ésta falle aún conservará un buen porcentaje de su rigidez.

Notar que las leyes de degradación definidas incluyen todas las propiedades correspondientes a un material en 3D. Pese a que el modelo utilizado es en 2D se han definido las leyes de degradación en 3D porque el programa MARC necesita como entrada todas las propiedades del material, aunque luego no las utilice para el cálculo de tensión.

### 3.2.2.2 Modelo de fallo progresivo

Hasta el momento sólo se han degradado las propiedades de los elementos que han fallado según el criterio de fallo establecido en la sección 3.2.1 y no se ha incluido la fatiga del material en ningún sitio. En este punto se abordará el tema de la degradación de propiedades en función de la tensión y del número de ciclos de carga que ha sufrido el material.

Para simular la degradación gradual de las propiedades se han llevado a cabo técnicas para normalizar la degradación de la resistencia, la degradación de la rigidez y la vida a fatiga para un estado tensional y una relación de tensiones.

Según [1] cada vez que el material sufre un ciclo de carga varía sus propiedades mecánicas, disminuyendo su rigidez y resistencia y resultando una rigidez y resistencia residuales.

- **Resistencia residual:**

Durante el estudio de la resistencia residual de materiales compuestos se han realizado diferentes modelos, a continuación se nombrarán alguno de ellos. El primer modelo de resistencia residual mediante el fallo progresivo fue introducido por Halpin [11], este asume que la resistencia residual  $R(n)$  es decreciente con el número de ciclos, por tanto es función de la resistencia frente a carga estática  $R_S$ , del número de ciclos y del número de ciclos hasta el fallo  $N_f$ . Esta teoría fue bien acogida por los investigadores, ejemplo de ello es la aplicación de este mismo modelo por Hanh y Kim [12], Yang [13], Chou y Croman [14] y Sendekyj [15]. Pero la correlación con los datos experimentales no eran consistentes, por lo que otros investigadores incluyeron parámetros para adecuar la curva, como fue el caso de Harris [16], en su ecuación añadió los parámetros  $\beta$  y  $\alpha$ , estos deben ser establecidos después de recoger los datos experimentales. Por tanto en esta ecuación también se tendrá en cuenta el estado tensional en que se encuentra el material. Pero la vida a fatiga del material compuesto no solo depende del estado tensional sino que también de la relación de tensiones que sufre el material, por lo que la ecuación que se va a mostrar a continuación tendrá diferente a la propuesta por Harris la relación de tensiones  $k$ .

En la ecuación que va a estimar la resistencia residual se tiene que tener claro que al incrementar el número de ciclos, bajo un estado tensión

constante, la resistencia a fatiga decrecerá. Después de un número de ciclos determinado llamado ciclos hasta el fallo ( $N_f$ ) la resistencia decrecerá de manera más rápida hasta producirse el fallo.

Si se considera la resistencia del material, la resistencia residual se puede calcular como:

$$R(n, \sigma, k) = \left[ 1 - \left( \frac{\log(n) - \log(0.25)}{\log(N_f) - \log(0.25)} \right)^\beta \right]^{\frac{1}{\alpha}} (R_S - \sigma) + \sigma \quad (3.22)$$

Donde:

- $R(n, \sigma, k)$  representa la resistencia residual en la dirección considerada
- $R_S$  representa la resistencia frente a carga estática en la dirección considerada
- $\beta$  y  $\alpha$  son constantes del material a determinar por ensayos.
- $n$  es el número de ciclos considerado
- $N_f$  es el número de ciclos hasta el fallo para ese nivel de tensión (también llamado vida a fatiga).
- $\sigma$  es la tensión que aparece en el elemento en la dirección considerada.

Esta ecuación es llamada “normalized strength degradation model”. En donde para cada material se deberá determinar mediante ensayos los parámetros independientes  $\beta$  y  $\alpha$ .

- **Rigidez residual:**

Como pasara en el anterior caso también existen diferentes modelos para degradar la rigidez. La rigidez residual también es función del estado tensional y del número de ciclos.

Si se considera la rigidez del material, la rigidez residual se puede calcular como:

$$E(n, \sigma, k) = \left[ 1 - \left( \frac{\log(n) - \log(0.25)}{\log(N_f) - \log(0.25)} \right)^\lambda \right]^{\frac{1}{\gamma}} (E_S - \sigma) + \sigma \quad (3.23)$$

Donde:

- $E(n, \sigma, k)$  representa la rigidez residual en la dirección considerada

- $E_S$  representa la rigidez frente a carga estática en la dirección considerada.
- $\lambda$  y  $\gamma$  son constantes del material a determinar por ensayos.
- $n$  es el número de ciclos considerado.
- $N_f$  es el número de ciclos hasta el fallo para ese nivel de tensión (también llamado vida a fatiga).
- $\sigma$  es la tensión que aparece en el elemento en la dirección considerada.

Con las ecuaciones anteriores pueden evaluarse los valores de rigidez y resistencia para cada ciclo y en cada elemento del modelo.

### 3.2.3 VIDA A FATIGA

En este punto se explica cómo calcula la vida a fatiga  $N_f$ , para utilizarla en las ecuaciones (3.22) y (3.23) y obtener las propiedades residuales del material.

Existen diversas formas de estimar la vida a fatiga de un material compuesto pero la complejidad de la respuesta de estos materiales hace muy difícil desarrollar un modelo universal. El autor Adam [3] propone un método analítico que reduce drásticamente el número de ensayos necesarios para estimar la vida a fatiga del material. Posteriormente ese método fue modificado por Harris [3,4], para ser más generalista. En este proyecto se ha utilizado este método y se le ha llamado modelo de vida a fatiga normalizado.

El modelo a fatiga normalizado relaciona la tensión media ( $\sigma_m$ ), la tensión alternante ( $\sigma_a$ ) y la resistencia a compresión ( $X_c$ ) y a tracción ( $X_t$ ) del material en la ecuación:

$$a = f(1 - q)^u(c + q)^v \quad (3.18)$$

Donde:

$f, u$  y  $v$  son parámetros del material obtenidas de ensayos.

$$a = \sigma_a / X_t$$

$$q = \sigma_m / X_t$$

$$c = X_c / X_t$$

$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$ , es la tensión alternante

$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2$ , es la tensión media

Los exponentes  $u$  y  $v$  (ambos funciones de la vida a fatiga) son normalmente similares en valor, si no las curvas para vida constante serían asimétricas. El parámetro  $f$  según que autor lo considera de un valor u otro. Por ejemplo, describiendo la bibliografía encontrada:

- $f$  es constante a determinar por ensayos. Según Mahmood M.Shokrieh[1].
- $f$  es una función inversa de la relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción, sigue la siguiente ecuación:

$$f = Ac^{-p} \quad (3.25)$$

Donde  $A$  y  $p$  son funciones de la vida a fatiga. Según Beheshty and Harris [5].

- $f$  es variable dependiente de valores sacados de ensayos y dependiente de la vida. Sigue la siguiente ecuación:

$$f = A_f \times (10^{-\log N_f})^{B_f} \quad (3.26)$$

Donde  $A_f$  y  $B_f$  son parámetros obtenidos mediante ensayos y  $N_f$  es la vida a fatiga del material. Según Harris [2].

Por datos experimentales se puede considerar que  $u = v$  [1] y se puede escribir como:

$$u = v = A + B \log N_f \quad (3.27)$$

Considerando las ecuaciones (3.24) y (3.27) la vida a fatiga normalizada se puede escribir como:

$$\frac{\log(a/f)}{\log((1-q)(c+q))} = A + B \log N_f \quad (3.28)$$

Y como:

$$\log\left(\frac{\log(a/f)}{\log((1-q)(c+q))}\right) = A + B \log N_f \quad (3.29)$$

Para las tensiones de cortadura en el plano, ya que se ajusta mejor a los resultados experimentales.

4

# Capítulo Cuatro

## Aplicación del Proceso de Cálculo

### **4. APLICACIÓN DEL PROCESO DE CÁLCULO**

Chou [17] introdujo un procedimiento de cálculo para el daño progresivo mediante carga estática. Su procedimiento resultó ser excesivamente conservativo comparado con los resultados experimentales debido a que en el criterio de fallo utilizado no diferenciaba los modos de fallo. Más tarde Hashin [7] propuso una modificación del criterio de Chou incluyendo diferentes modos de fallo para mejorar la concordancia entre los resultados experimentales y los que predecían el método de Chou.

El procedimiento utilizado por Hashin parte de un modelo de elementos finitos, donde se introducirían las propiedades del material, las condiciones de contorno y el incremento de carga. A continuación se resuelve el problema, se sacan las tensiones y se aplica lo visto en el apartado 3.2.1. Si no se produce el fallo de los elementos se incrementa la carga y se ejecuta otra vez el proceso. Si fallan se modifican las propiedades siguiente lo descrito en el apartado 3.2.2.1, es decir mediante el método de degradación catastrófico. Una vez modificadas se repite el proceso otra vez hasta que se produzca la rotura del material.

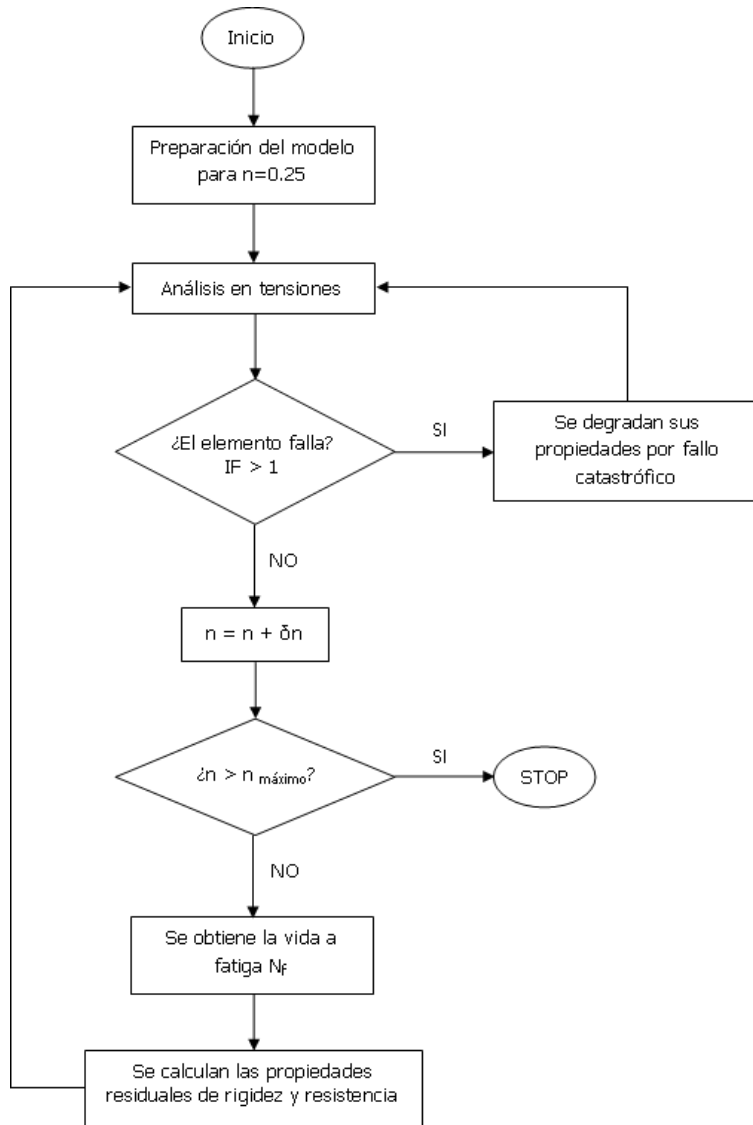
El procedimiento propuesto por Hashin no se puede utilizar para los modelos de fatiga. Por ejemplo si el nivel de carga seleccionado es menor

al nivel de carga que produce el fallo del material no se detectará fallo y por tanto nunca fallará. Para poder emplear este modelo para fatiga en materiales compuestos se modificó de manera que no solo se degradasen las propiedades de manera catastrófica sino que también se degradasen progresivamente.

La principal diferencia entre la degradación progresiva del material a fatiga y bajo carga estática es, por tanto, la existencia de la degradación gradual del material como se explicó en el apartado 3.2.2.2. La inclusión de la degradación gradual del material exige la modificación del algoritmo de cálculo utilizado para el daño progresivo con carga estática. Una vez introducido el procedimiento se va a explicar el modelo seguido en este trabajo.

La siguiente figura muestra un diagrama de flujo del proceso iterativo de cálculo.





**Figura 4.1: Diagrama de flujo del proceso de cálculo.**

Lo primero de todo es preparar el modelo de elementos finitos. En este paso se debe incluir las propiedades del material, la geometría, las condiciones de contorno, la carga de fatiga mínima y máxima, el máximo número de ciclos, incremento del número de ciclos y el número de ciclos máximo predefinido por el usuario. Una vez introducidas esas variables se realiza un análisis de tensiones calculando en cada elemento la tensión máxima y mínima.

La tensión que se debe utilizar es la media de las tensiones en los puntos de Gauss y determinar la relación de tensiones para cada elemento. Una vez que se ha realizado este paso se está en disposición de aplicar el criterio de iniciación asociado a los modos de fallo descrito en el punto 3.2.1. Si algún elemento falla elemento en alguno de esos criterios se aplica el modelo de degradación catastrófica explicada en el punto 3.2.2.1. Una vez degradados esos elementos dañados la matriz de rigidez del modelo de elementos finitos es reconstruida y el análisis de tensiones se ejecutará otra vez. Estas tensiones son examinadas otra vez y si no fallan por ningún modo de fallo el número de ciclos será incrementado, ese número de ciclos incrementado se deberá de decidir al principio. Si el número de ciclos es más grande que el número máximo de ciclos entonces el programa se parará. En cambio, si ese número de ciclos es inferior al número de ciclos máximo las propiedades del material de todos los elementos se cambiarán mediante el método de degradación progresiva explicada en el apartado 3.2.2.2, previamente se ha debido obtener la vida a fatiga del material mediante el proceso explicado en el apartado 3.2.3. Después de cambiar las propiedades del material se realiza otro análisis de tensiones y se vuelve a rehacer el bucle descrito anteriormente hasta que ocurra un fallo catastrófico o que se alcance el número de ciclos máximo.

Una vez descrito las directrices del proceso de cálculo se va a explicar el programa de cálculo que servirá para simular el comportamiento del material ciclo por ciclo, predecir la resistencia residual y la vida a fatiga del problema.

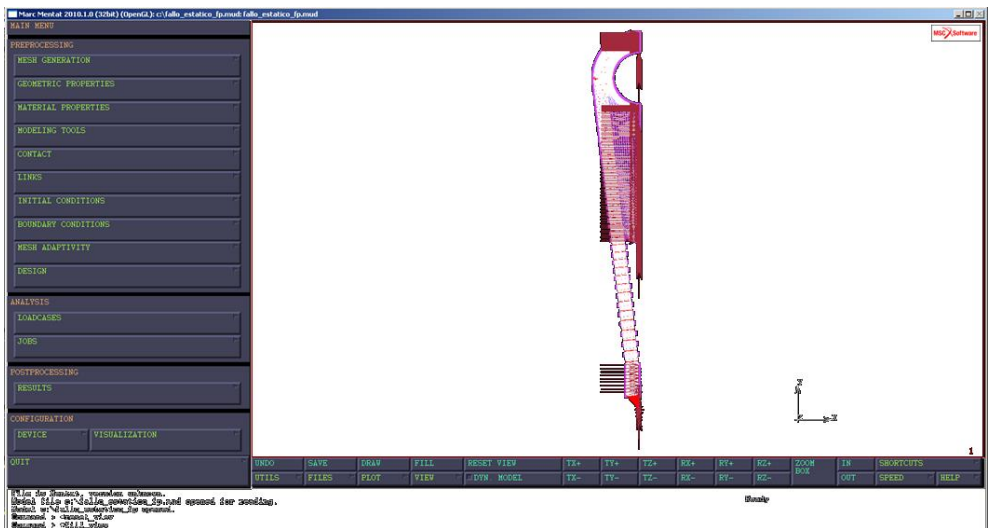
Hay que tener en cuenta que no solo hay que saber las propiedades del material (rigidez, resistencia y vida a fatiga) sino que también se requerirá unos parámetros experimentales como se ha señalado en apartados previos.

Como se comentó anteriormente, el proceso de cálculo está dividido en dos fases totalmente diferenciadas debido al tipo de software empleado.

## 4.1 ANÁLISIS DE TENSIONES CON MSC MARC

Para realizar el primer paso se ha empleado el software MARC 2010 de MSC. En este primer paso como anteriormente se mencionó en el anterior apartado se tiene que definir el modelo de elementos finitos incluyendo las propiedades iniciales (rigidez y resistencia) y las condiciones de contorno. Se hacen dos análisis para determinar las tensiones para la carga de fatiga máxima y mínima.

En la siguiente figura se muestra el modelo de elementos finitos para la geometría del cable a estudiar.



**Figura 4.2: Modelo de elementos finitos en el programa MSC.MARC/MSC.MENTAT**

Obtenidas las tensiones, el trabajo de post-proceso para calcular los índices de fallo y de pre-proceso para calcular las nuevas propiedades de los elementos se realiza con Microsoft Excel.

## 4.2 PRE Y POST PROCESADO CON VISUAL BASIC EXCEL

La siguiente imagen muestra la hoja Excel que se ha programado para realizar el pre-proceso y el post-proceso del estudio a fatiga de un material compuesto, en este caso se ha empleado para estudiar el cable. Esta hoja ha sido una herramienta propia creada.

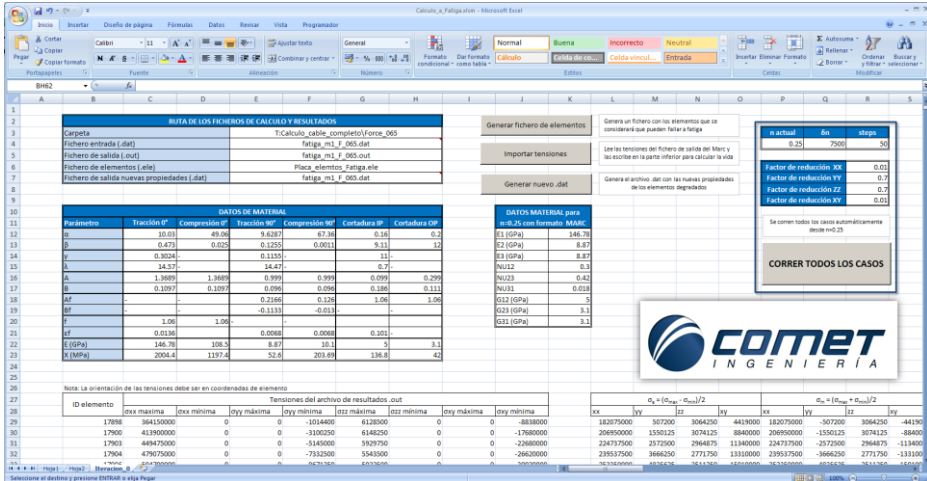


Figura 4.3: Hoja de cálculo para el pre y post-procesado

El uso de la hoja Excel es muy sencillo e intuitivo y disminuye el tiempo de pre y post procesado notablemente y permite que todo el proceso sea automático.

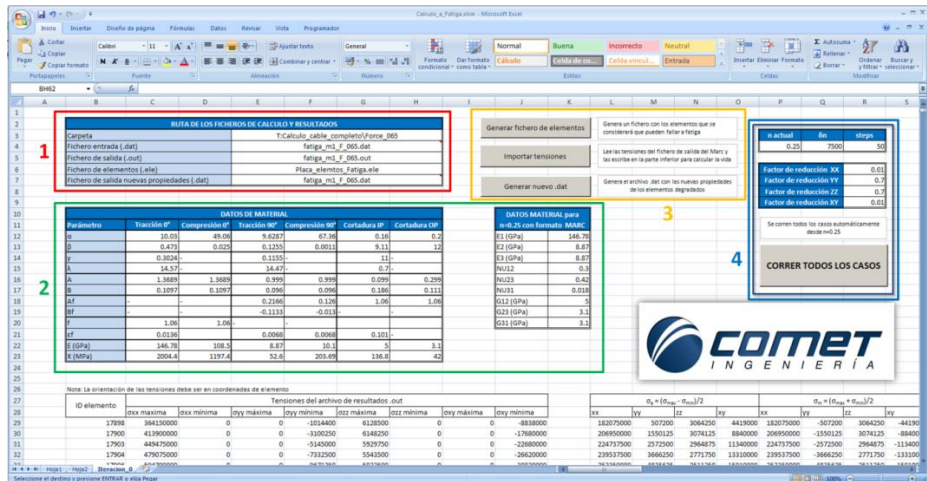


Figura 4.4: División de la hoja Excel de cálculo por zonas

La imagen anterior marca una serie de zonas sobre la Excel desarrollada que permiten explicar mejor su funcionamiento:

- Zona roja (1): Se introduce la ruta en la que se encuentran los ficheros de trabajo. Para que la hoja funcione se necesitan cuatro ficheros, describiéndolos en orden descendente respecto la hoja de cálculo:
  - Será necesario disponer de una ruta donde se encuentran los ficheros y donde se escribirán nuevos ficheros.
  - Un fichero de entrada \*.dat que contiene el modelo de elementos finitos. Este fichero contiene el modelo sin degradar del problema, por tanto tendrá las propiedades del material inicial. Respecto a este fichero MSC.MARC/MSC.MENTAT realizará el análisis de tensiones.
  - Un fichero de resultados \*.out que contiene las tensiones en los elementos del modelo de elementos finitos. Este fichero de salida, generado por el programa MSC.MARC/MSC.MENTAT servirá para implementar las tensiones en la hoja de cálculo.
  - Un fichero de elementos .ele que contiene los elementos que se estudiarán a fatiga (no tiene sentido estudiar en nuestro caso en particular a fatiga los elementos del foam ni del herraje).
  - Un fichero de salida \*.dat que contiene las nuevas propiedades de rigidez y resistencia de los elementos. Este fichero de salida será generado por la hoja de cálculo Excel, tendrá el formato destinado para ser procesado por el programa de elementos finitos.
- Zona verde (2): Se introducen todos los datos del material. Estos datos se han obtenido de manera experimental. En esta zona se observan los siguientes parámetros:
  - $\gamma$  y  $\lambda$ : Son parámetros constantes del material cuya finalidad es adecuar la curva experimental con la ecuación que da la rigidez normalizada residual. Dicha ecuación es 3.23.
  - $\alpha$  y  $\beta$ : Parámetros constantes del material para ajustar los datos experimentales con los de la ecuación de la resistencia normalizada residual 3.22.
  - E y X: Son la rigidez y la resistencia del material.
  - A, B y f: Son parámetros que se obtienen mediante ensayos y sirven para calcular la vida a fatiga del modelo aplicando la ecuación vista en el apartado 3.2.3. En el modelo de

estudio del cable los valores de  $f$  que más se ajustan a la curva normalizada de la vida a fatiga es para la dirección  $xx$  y  $xy$  es la del modelo de M.Shokrieh y para la dirección  $yy$  y  $zz$  se ha empleado la del modelo de Harris (1992). Para este último se calculan los parámetros  $A_f$  y  $B_f$  mediante técnicas experimentales.

- Zona amarilla (3): Esta zona ha sido programada mediante Visual Basic. Hay tres botones que se utilizan para el cálculo manual, es decir, si sólo es necesario generar un archivo \*.dat o leer el archivo \*.out. Los tres botones son:
  - o Generar fichero de elementos: Genera un fichero con los elementos que se considerará que pueden fallar a fatiga. Estos elementos son los que se van a degradar mediante las técnicas anteriores, es importante escoger la zona de estudio para evitar errores y para abordar el problema con mayor eficacia.
  - o Importar tensiones: Lee las tensiones del fichero de salida del MARC (\*.out) y las escribe en la parte inferior para calcular la vida a fatiga, los índices de fallo y las nuevas propiedades de los elementos. La siguiente imagen muestra donde escribe las tensiones.

ID elemento	Tensiones del archivo de resultados .out							
	oxx máxima	oxx mínima	oyy máxima	oyy mínima	ozz máxima	ozz mínima	oxy máxima	oxy mínima
17898	364150000	0	0	-1014400	6128500	0	0	-8838000
17900	413900000	0	0	-3100250	6148250	0	0	-17680000
17903	449475000	0	0	-5145000	5929750	0	0	-22680000
17904	479075000	0	0	-7332500	5543500	0	0	-26620000

**Figura 4.5: Zona de la hoja de cálculo donde se escriben las tensiones**

El resto de bloques sirven para calcular todo lo necesario para poder llevar a cabo el proceso de degradación por fatiga, es decir, la vida a fatiga, las tensiones alternantes, las tensiones medias,  $q$ ,  $c$ ,  $a$ ,  $f$ , los índices de fallo y las nuevas propiedades de resistencia y rigidez ya degradadas.

- o Generar nuevo \*.dat: Genera el archivo \*.dat con las nuevas propiedades de rigidez y resistencia de los elementos. Este si no ha sufrido un fallo catastrófico o no ha alcanzado el número máximo de ciclos será el utilizado para el siguiente análisis.

- Zona Azul (4): Aquí se puede ejecutar el programa de forma automática. Para que se pueda ejecutar de manera automática se tiene que definir el número de ciclos ( $n$ ), cual es el incremento ( $\delta n$ ) y cuantos pasos se realizan. También permite variar los factores de degradación para cada dirección. Este botón permite realizar todo el proceso descrito en el apartado 3. de manera automática.

Una vez se alcance el número de ciclos máximo se tiene que coger los archivos de salidas \*.out y leer en el MSC.MARC/ MSC.MENTAT las deformaciones para cada número de ciclos y así simular el comportamiento a fatiga del cable. Se sacará una gráfica donde se podrá observar perfectamente la vida a fatiga del material. Las siguientes imágenes muestran un ejemplo del cable deformado y una gráfica donde se puede observar perfectamente a cuantos ciclos se produce el fallo catastrófico. Son datos para un 80% su carga de rotura.

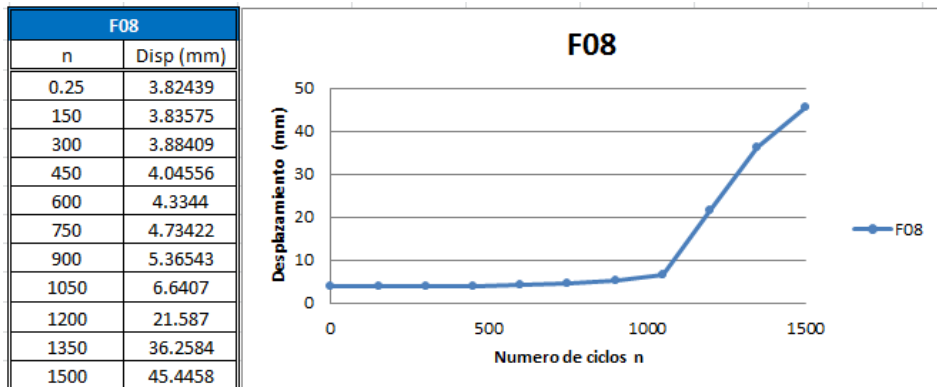
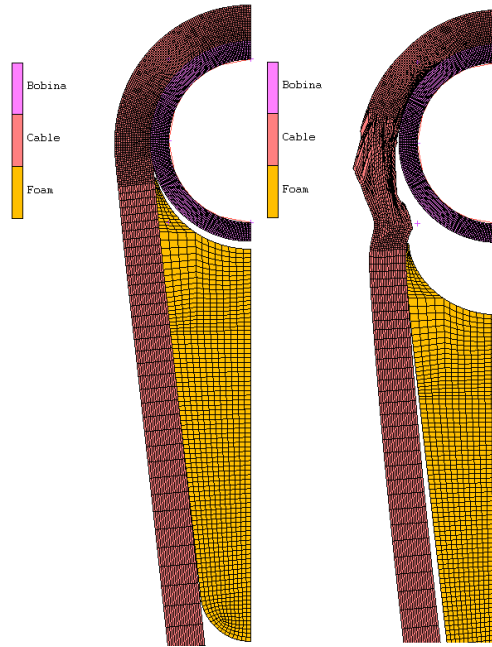


Figura 4.6: Tabla y gráfica donde se observa la vida a fatiga



**Figura 4.7: Deformación del cable antes y después de la rotura.**

En la Figura 4.6 se observa perfectamente que el cable tiene una vida aproximadamente de 1050 ciclos ya que después ya no opone prácticamente resistencia. Realmente este valor es aproximado, no quiere decir que justo a los 1050 ciclos rompe, como se ha comentado en apartados anteriores no existe una regla universal que de un resultado exacto para la vida a fatiga, ni siquiera para la fatiga en metales que está mucho más desarrollado. Incluso suponiendo que el procedimiento fuese exacto se pueden cometer errores al sacar los parámetros experimentales necesarios, en el modelo de elementos finitos y en el incremento del número de ciclos (a menor incremento mayor exactitud).



5

# Capítulo Cinco

## Aplicación del Proceso de Cálculo a un Modelo Real

### 5. APLICACIÓN DEL PROCESO DE CÁLCULO A UN MODELO REAL.

Antes de aplicarlo al problema de estudio se va a verificar si la programación del modelo es correcta. Para ello se va a realizar el mismo ejemplo que se expone Shokrieh en su tesis doctoral [1], la cual ha sido la base de este trabajo.

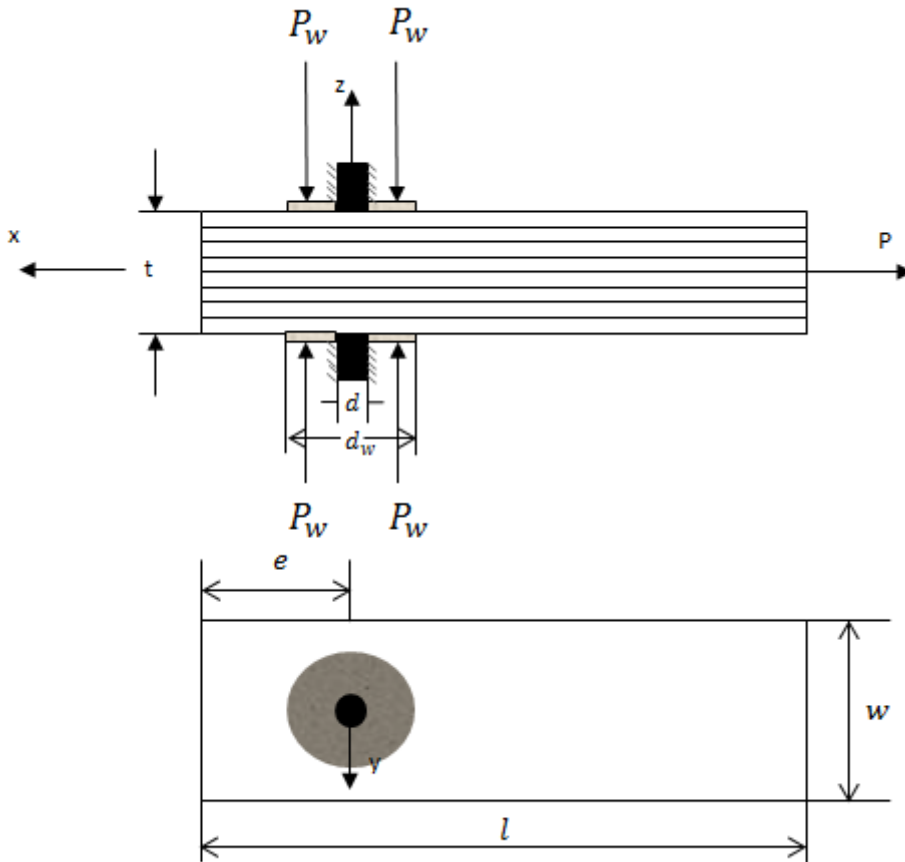
#### 5.1 VERIFICACIÓN DE LA PROGRAMACIÓN

Para validar el programa se va a utilizar uno de los ejemplos presentados por Shokrieh [1].

Dicho problema consiste en una placa de material compuesto con un agujero cargado con un perno. El espesor tiene un ancho de  $w = 25.4 \text{ mm}$ , la longitud es de  $l = 101.6 \text{ mm}$ , el espesor es de  $t = 2.336 \text{ mm}$  de cada lámina con un total de 16, la distancia del agujero respecto al borde es  $e = 25.4 \text{ mm}$ , el diámetro del agujero  $d = 6.35 \text{ mm}$  y el diámetro de la

arandela es de  $d_w = 18.8 \text{ mm}$ . La placa tiene capas con orientación arbitraria. El perno está fijo con una carga de 2.48 MPa y en el otro extremo de la placa se aplica una carga de 1 kN, cual es menor a la carga de iniciación asociado a los modos de fallo.

En la siguiente figura se mostrará la geometría del problema anteriormente descrito, esta geometría esta sacada de la tesis original [1].



**Figura 5. 1 Geometría para la verificación de la programación.**

Las condiciones de contorno, materiales y como se ha modelado cada parte de este complicado problema viene explicado en el apartado 3.3 de [1].

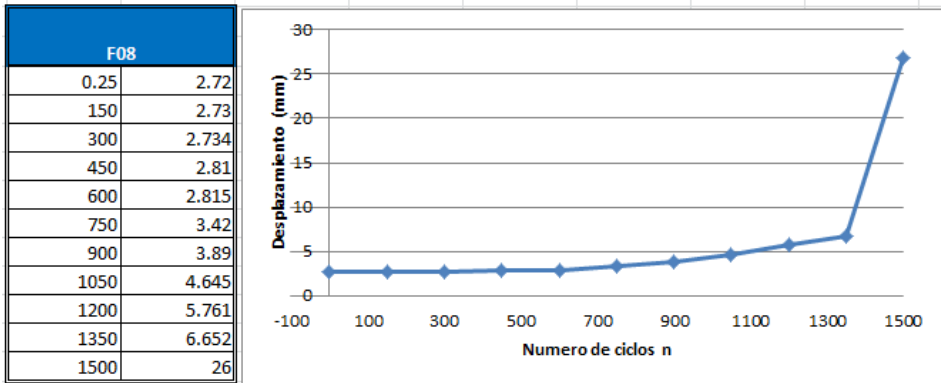


Figura 5.2: Verificación de la programación.

CARGA	Vida experimental	Vida M.Shokrieh	Vida Tesis
<b>80%</b>	1202 ciclos	1494 ciclos	1350 ciclos

Tabla 5.1: Verificación de los resultados.

## 5.2 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Se ha generado un modelo matemático de la estructura empleando el código de elementos finitos MSC/MARC versión 2010. El modelo se ha realizado a partir de la geometría habitual en este tipo de cables.

Puesto que tanto la geometría analizada como las cargas aplicadas poseen un plano de simetría a lo largo del eje longitudinal del cable, es posible realizar sólo la mitad del modelo y aplicar condiciones de simetría. De esta forma se consigue reducir el número de elementos del modelo a la mitad, reduciendo significativamente los tiempos de cálculo.

Es posible reducir el modelo geométrico en 3D a un modelo simplificado de análisis en 2D, ya que, intuitivamente se puede analizar una única rebanada y extrapolar los resultados al cable en 3D. Se considerará la hipótesis de deformación plana, ya que tanto por el espesor como por la restricción del movimiento de los nodos de las caras externas, es la mejor opción.

Las propiedades de los materiales empleados se han indicado en 5.4.

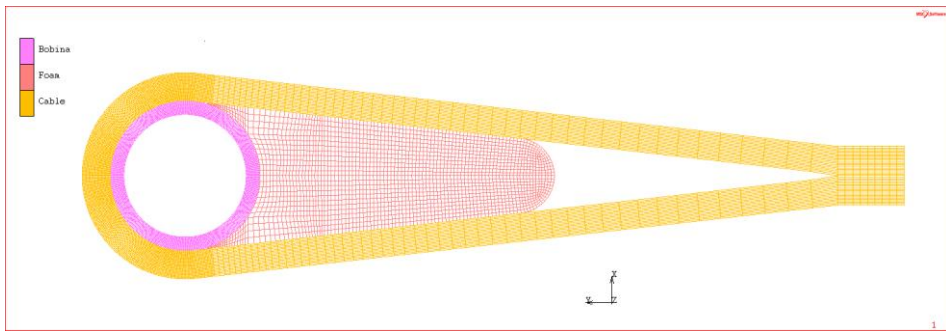
A continuación se muestra el modelo de elementos finitos (FEM) generado.

### 5.3 GEOMETRÍAS Y COMPONENTES

La Figura 5.1 muestra el modelo completo del cable que compone de cuatro partes o piezas:

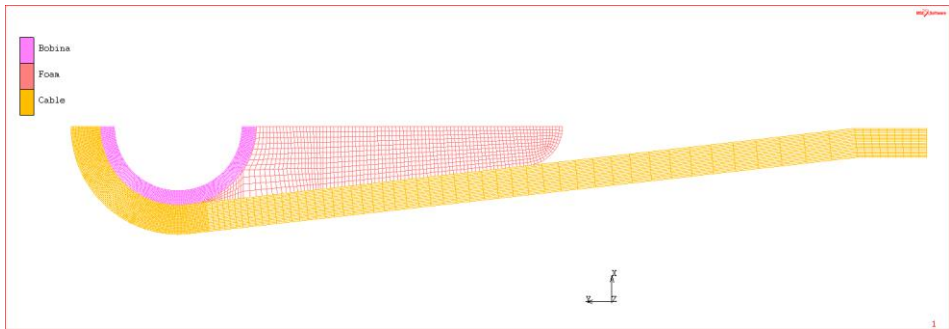
- El cable de fibra.
- El herraje metálico o bobina.
- El Foam o espuma
- El pasador metálico (no mostrado en la imagen).
- El pasador metálico se ha modelado como un cuerpo rígido y no deformable representado por una curva que se sitúa en el interior del herraje.

El pasador metálico se ha modelado como un cuerpo rígido y no deformable representado por una curva que se sitúa en el interior del herraje.



**Figura 5.3: Modelo de elementos finitos completo del cable.**

La figura anterior muestra el modelo completo del cable, pero tal y como se comentó en el párrafo anterior, para los análisis se considerará únicamente “medio” modelo (ver Figura 5.2), ya que por la geometría del cable y el tipo de cargas aplicadas se pueden aplicar condiciones de simetría.



**Figura 5.4: Modelo de elementos finitos simétricos del cable.**

## 5.4 MATERIALES

Las tablas siguientes muestran las propiedades de los materiales empleados en el modelo de elementos finitos. Estas propiedades son “dummy”, es decir, no son propiedades reales del cable sino que han sido impuestas para comprobar el comportamiento del cable como si fuese real.

Material	Acero
Componentes	Herraje metálico
Módulo de rigidez, E	193 GPa
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0.3

**Tabla 5.2: Propiedades del acero.**

Material	CoreCell™ A-500
Componentes	Foam
Módulo de rigidez, E	81 GPa
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0.3

**Tabla 5.3: Propiedades del CoreCell™ A-500.**

Material	Composite AS4/3501
Componentes	Cable
Módulo de elasticidad $E_{11}$	150.491 GPa
Módulo de elasticidad $E_{22}$	17.076 GPa
Módulo de elasticidad $E_{33}$	17.076 GPa
Coefficiente de Poisson $\nu_{12}$	0.335
Coefficiente de Poisson $\nu_{21}$	0.038
Coefficiente de Poisson $\nu_{23}$	0.332
Módulo a cortadura $G_{12}$	4.532 GPa
Módulo a cortadura $G_{23}$	6.410 GPa
Módulo a cortadura $G_{13}$	4.532 GPa

**Tabla 5.4: Propiedades de rigidez del Composite AS4/3501.**

En la tabla anterior se muestran las propiedades referidas a las direcciones 1, 2 y 3. Esto se debe a que los materiales compuestos de fibra larga poseen propiedades diferentes en función de la dirección considerada.

Las direcciones 1, 2 y 3 se corresponden con:

- Dirección 1: se corresponde con la dirección longitudinal de las fibras.
- Dirección 2: se corresponde con la dirección transversal de las fibras contenida en el plano
- Dirección 3: se corresponde con la dirección transversal de las fibras contenida fuera del plano.

La siguiente tabla muestra las propiedades resistentes del material compuesto empleado en la fabricación del cable de carbono.

<b>Material</b>	<b>Composite AS4/3501</b>
Componentes	Cable
Resistencia a tracción longitudinal (dirección 1)	2450 MPa
Resistencia a compresión longitudinal (dirección 1)	1570 MPa
Resistencia a tracción transversal (dirección 2)	70 MPa
Resistencia a compresión trasversal (dirección 2)	190.4 MPa
Resistencia a tracción transversal (dirección 3)	70 MPa
Resistencia a compresión trasversal (dirección 3)	190.4 MPa
Resistencia a cortadura plana (dirección 12)	98 MPa
Resistencia a cortadura plana (dirección 23)	98 MPa
Resistencia a cortadura plana (dirección 31)	98 MPa

**Tabla 5.5: Propiedades de resistencia del Composite AS4/3501.**

Al igual que ocurría con las propiedades elásticas de la fibra de carbono, las propiedades resistentes también varían con la dirección considerada. Sólo se han considerado las propiedades resistentes de la fibra de carbono, ya que es el material sobre el que se estudia el fallo a fatiga.

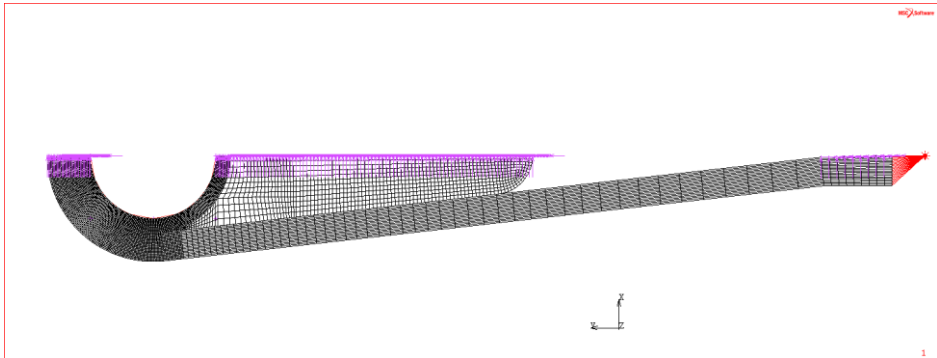
## **5.5 CONDICIONES DE CONTORNO**

Las condiciones de contorno empleadas son:

- Condición de simetría respecto al eje X
- Restricción de los desplazamientos en el eje X, en la zona opuesta al herraje, en sustitución del Whipping.
- Empotramiento del pasador.
- Contactos pasador-herraje-cable-foam.

### **5.5.1 CONDICIONES DE SIMETRÍA**

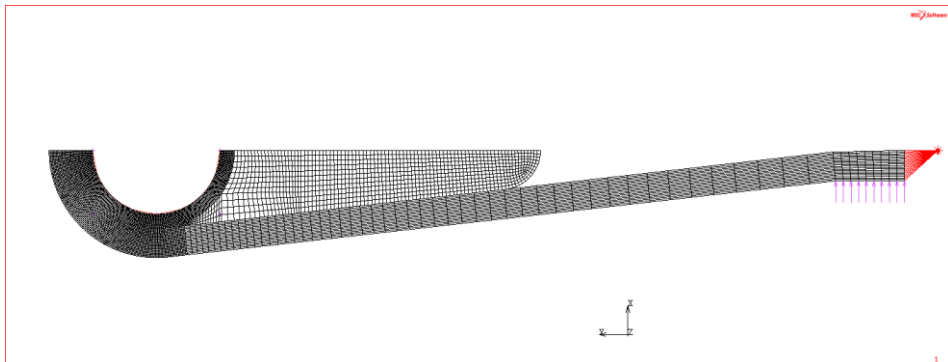
La condición de simetría respecto al eje X consiste en restringir los desplazamientos de los nodos contenidos en el plano de simetría en el eje X y los giros en los ejes Z e Y.



**Figura 5.5: Condición de contorno de simetría.**

### 5.5.2 SUSTITUCIÓN DEL WHIPPING

El Whipping es el atado que se realiza en el cable cuando se juntan ambos ramales. Con este atado se pretende unir los dos ramales del cable en uno sólo y evitar que se abra. Para simular el Whipping se han restringido los desplazamientos de los nodos en eje X. Dicha zona se ha obviado en el proceso de cálculo de fallo de material, dado que a partir de los ensayos existentes, se demuestra que no es una zona crítica.



**Figura 5.6: Condiciones de contorno del Whipping.**



### 5.5.3 EMPOTRAMIENTO DEL PASADOR

Como ya se ha comentado anteriormente el pasador se ha modelado (representado por una curva semicircular) como un cuerpo rígido y fijo (con velocidad cero en todas las direcciones).

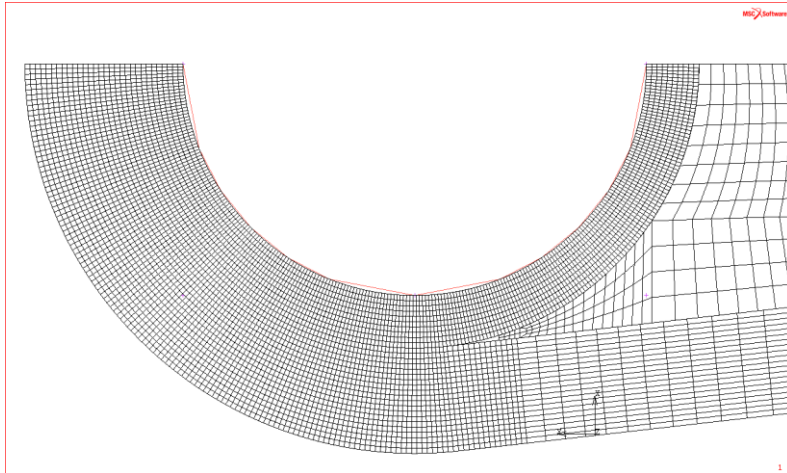


Figura 5.7: Pasador.

### 5.5.4 CONTACTOS

La siguiente tabla muestra los contactos entre las distintas piezas junto con sus coeficientes de rozamiento.

	Herraje	Foam	Cable	Pasador
Herraje	-	Contacto ( $\mu = 0.5$ )	Contacto ( $\mu = 0.4$ )	Contacto ( $\mu = 0.8$ )
Foam	Contacto ( $\mu = 0.5$ )	-	Contacto ( $\mu = 1$ )	No hay contacto
Cable	Contacto ( $\mu = 0.4$ )	Contacto ( $\mu = 1$ )	-	No hay contacto
Pasador	Contacto ( $\mu = 0.8$ )	No hay contacto	No hay contacto	-

Tabla 5.6: Tabla de contactos del modelo de elementos finitos.

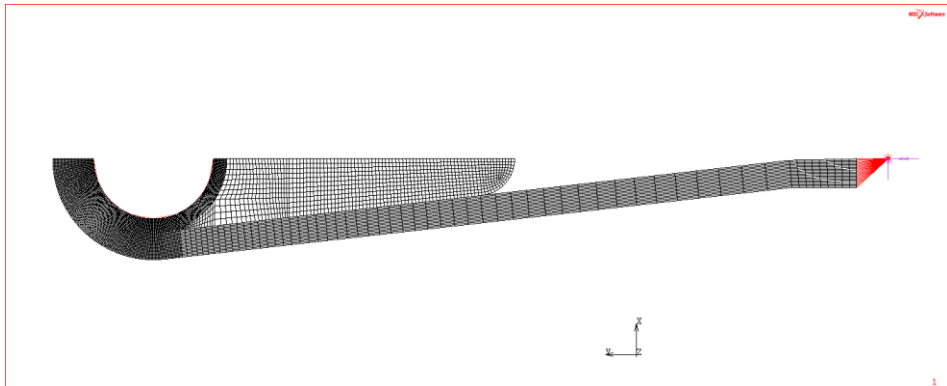
## 5.6 CARGAS APLICADAS

La carga aplicada consiste en carga puntual de tracción en el extremo del cable opuesto al herraje. Para analizar la vida a fatiga del cable se consideraran distintas magnitudes de la carga aplicada.

Primero se analiza un caso estático aplicando una fuerza que evoluciona de forma lineal desde 0 hasta 1000 kN con incrementos de 10 kN para estimar la carga máxima que es capaz de soportar el cable ( $F_{\text{máx}}$ ). Una vez obtenida la carga máxima que es capaz de soportar el cable se realizan cuatro análisis a fatiga con distintos porcentajes de la carga máxima aplicada.

Los casos de carga realizados son:

- Caso 1: Aplicación de fuerza de 0 a 1000 kN
- Caso 2: Carga máxima =  $0.80 F_{\text{máx}}$  ; Carga mínima = 0
- Caso 3: Carga máxima =  $0.75 F_{\text{máx}}$  ; Carga mínima = 0
- Caso 4: Carga máxima =  $0.70 F_{\text{máx}}$  ; Carga mínima = 0
- Caso 5: Carga máxima =  $0.65 F_{\text{máx}}$  ; Carga mínima = 0
- Caso 6: Carga máxima =  $0.60 F_{\text{máx}}$  ; Carga mínima = 0



**Tabla 5.7: Punto de aplicación de la carga.**

6

# Capítulo Seis

# Resultados

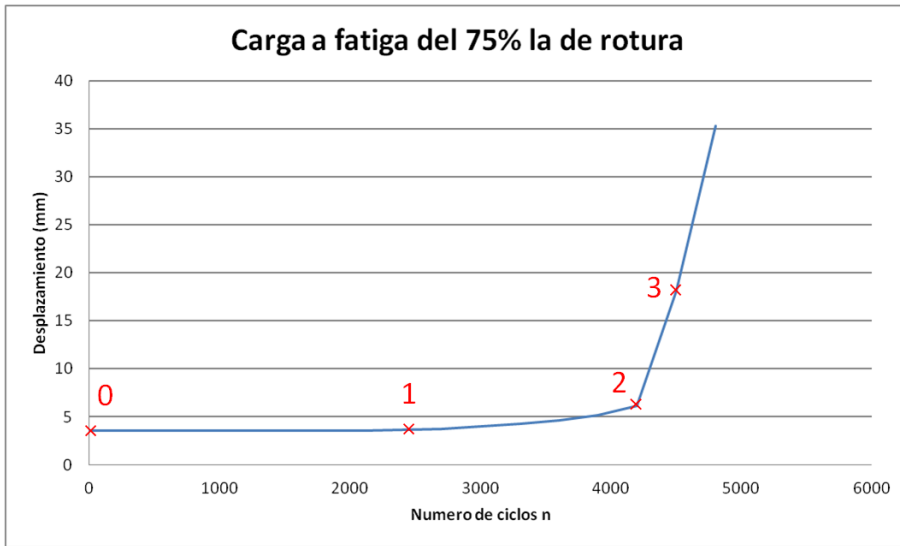
## 6. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de los análisis para los casos de carga contemplados en la sección 5.6.

Como ya se comentó en 3.2.1 hay que señalar que los modos de fallo que tienen un mayor peso para que se produzca la rotura total son:

- Fallo por tracción en la fibra.
- Fallo por compresión en la matriz en dirección Y (a la dirección Y se le llamará transversal).
- Fallo por cortadura en la unión fibra matriz.

La imagen siguiente muestra una gráfica en la que se representa el desplazamiento del punto de aplicación de carga frente al número de ciclos.



**Figura 6.1: Puntos de cambio en el proceso de fatiga.**

En la gráfica anterior se observa que existen tres tramos diferenciados en el proceso de fatiga del cable, los cuales coinciden con las tres fases que se dan en el proceso de fatiga de los metales:

- Primera fase (0-1): en esta fase no se modifica la rigidez inicial del cable, ya que no varía el desplazamiento del punto de aplicación de carga cuando aumenta el número de ciclos. En esta fase se produce la nucleación o inicio de grieta.
- Segunda fase (1-2): en esta fase varía la rigidez del cable con el número de ciclos, esto se debe a que existe un crecimiento de la grieta iniciada (por analogía con los metales).
- Fase final (2-3): en esta fase se produce el fallo por fractura del cable, ya que no es capaz de soportar el nivel de carga aplicada.

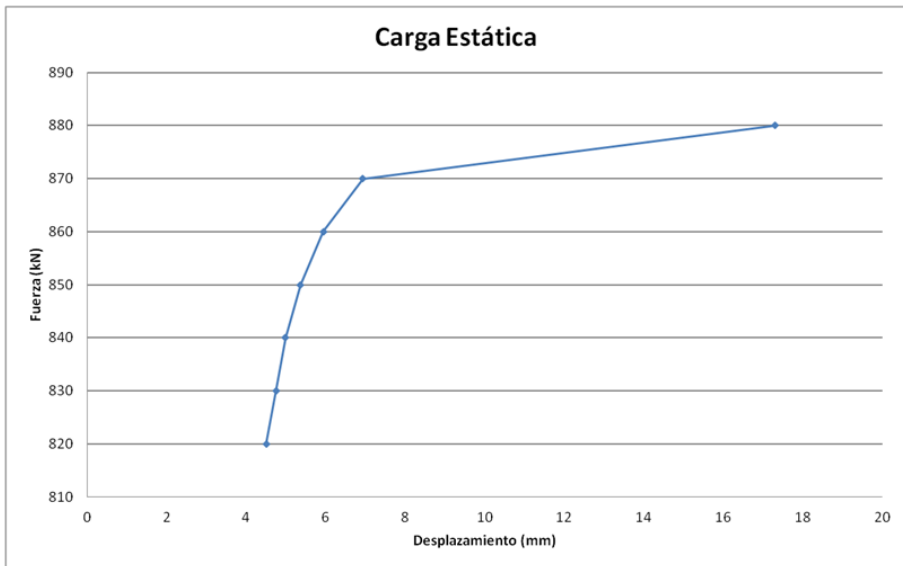
Todos los casos de carga considerados (excepto para el caso de carga estática) tendrán la misma estructura:

- Se mostrará un gráfico representando el desplazamiento del punto de aplicación de carga frente al número de ciclos.
- Se mostrará los elementos que han fallado para:
  - El primer ciclo de carga (punto 0, ver Figura 6.1).
  - Momento en el que empieza el crecimiento de grieta (punto 1, ver Figura 6.1).
  - Instante anterior al fallo por rotura (punto 2, ver Figura 6.1).
  - Instante posterior al fallo por rotura (punto 3, ver Figura 6.1).

## 6.1 CASO 1: OBTENCIÓN DE LA CARGA ESTÁTICA DE ROTURA

En este caso de carga se obtiene la fuerza máxima que es capaz de soportar el cable.

La siguiente gráfica muestra la fuerza aplicada frente al desplazamiento del punto de aplicación.



**Figura 6.2: Curva de fuerza-desplazamiento obtenida aplicando una carga estática.**

Se observa que la carga última antes de la rotura es de **870 kN**. Valor que se toma como referencia para los posteriores casos a fatiga.

La siguiente imagen muestra las diferentes deformaciones para el instante anterior y posterior a la rotura.

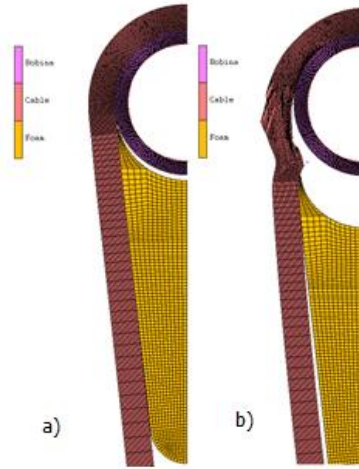


Figura 6.3: Deformaciones para el instante anterior a la rotura a) y para el instante posterior b).

## 6.2 CASO 2: FALLO POR FATIGA AL 80% DE LA CARGA MÁXIMA

Se aplica una carga cíclica de **0-696 kN**. La imagen siguiente muestra como varía el desplazamiento conforme se aumenta el número de ciclos.

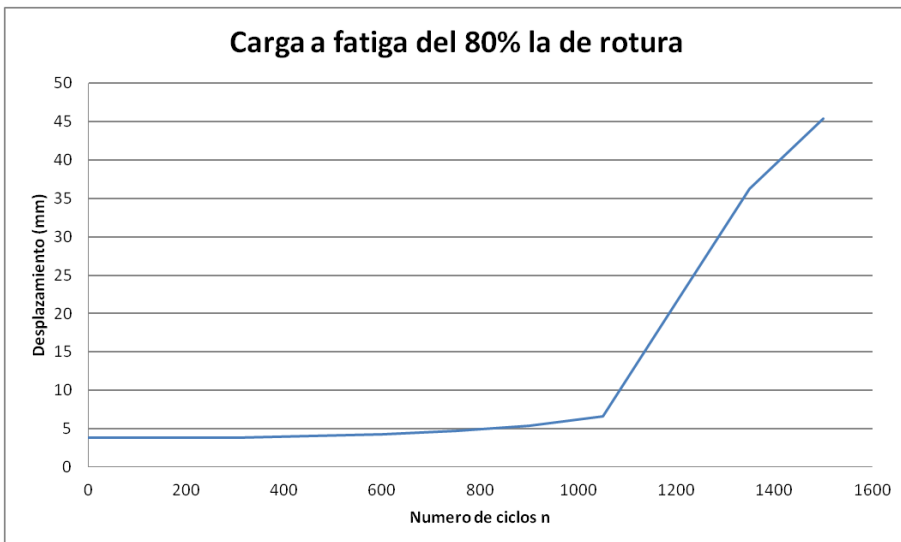


Figura 6.4: Desplazamiento-número de ciclo aplicando el 80% la carga de fallo estático.

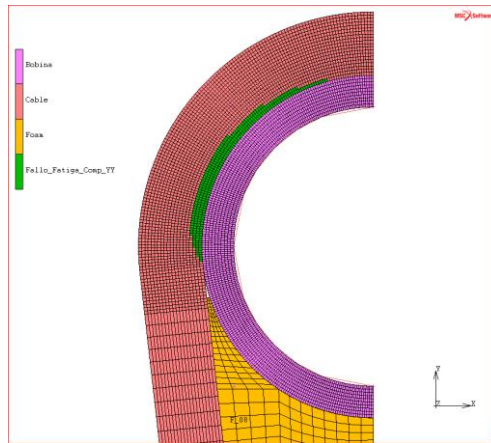
El cable es capaz de soportar **1050 ciclos** de carga.

La fase de crecimiento de grieta comienza a partir de los **350 ciclos** aproximadamente.

A continuación se muestran las imágenes correspondientes a los elementos que han fallado para los puntos 0, 1, 2, 3 (ver Figura 6.1)

- Punto 0. Primer ciclo de carga.

La imagen siguiente muestra los elementos que fallan en el primer ciclo de carga. Sólo fallan elementos en la dirección transversal por compresión.



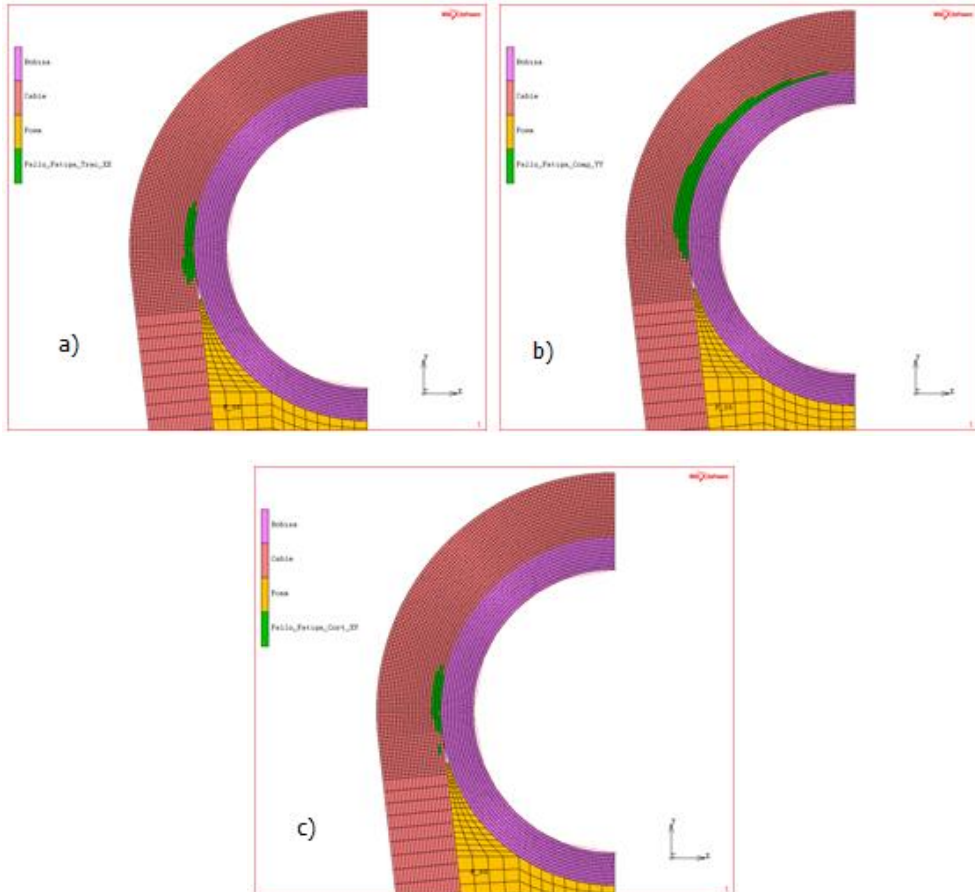
**Figura 6.5: Elementos que han fallado por compresión en la dirección transversal para un 80% de la carga a fallo estático.**

Este modo de fallo no es catastrófico y por tanto el cable puede seguir trabajando.

- Punto 1. Inicio de crecimiento de grieta.

Se ha considerado que el inicio del crecimiento de grieta comienza en **350 ciclos**.

La imagen siguiente muestra los elementos que fallan en el instante en que se inicia el crecimiento de la grieta por fatiga.



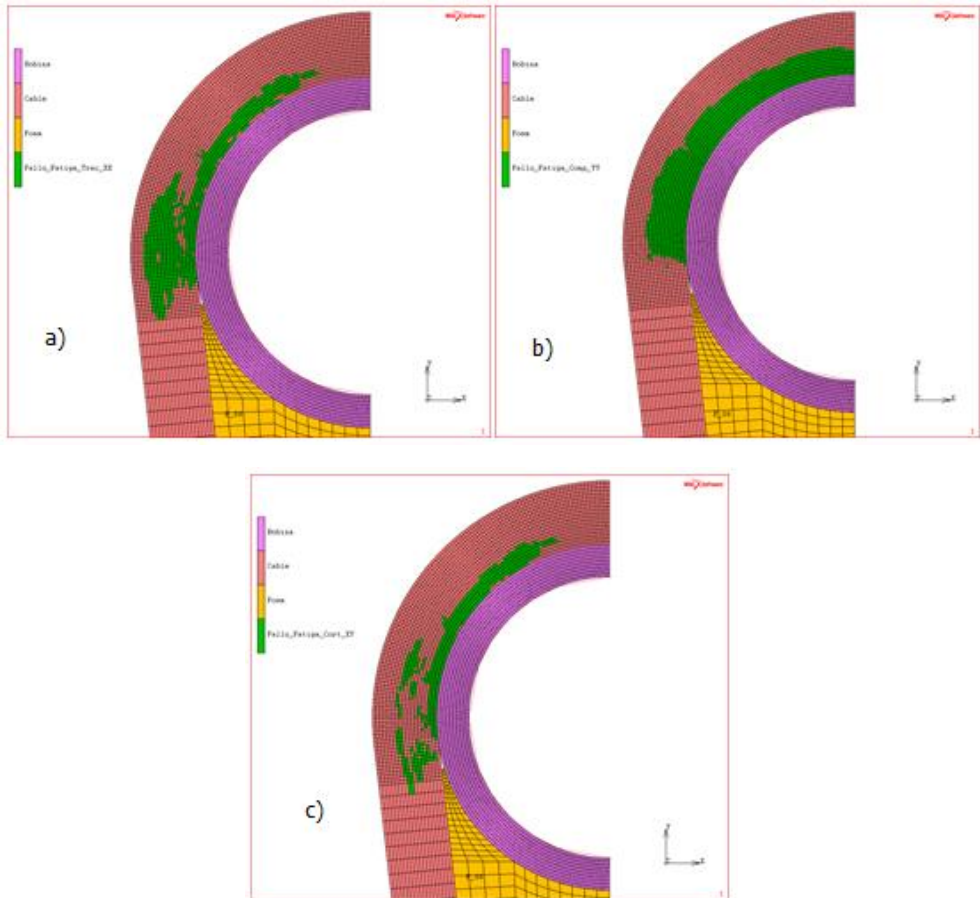
**Figura 6.6: Elementos que han fallado por tracción en la dirección longitudinal a), en la dirección transversal b) y por cortadura en el plano c) para un 80% de la carga de fallo estático (punto 1).**



- Punto 2. Instante anterior al fallo por rotura.

El fallo del cable por fatiga aparece para **1050 ciclos**.

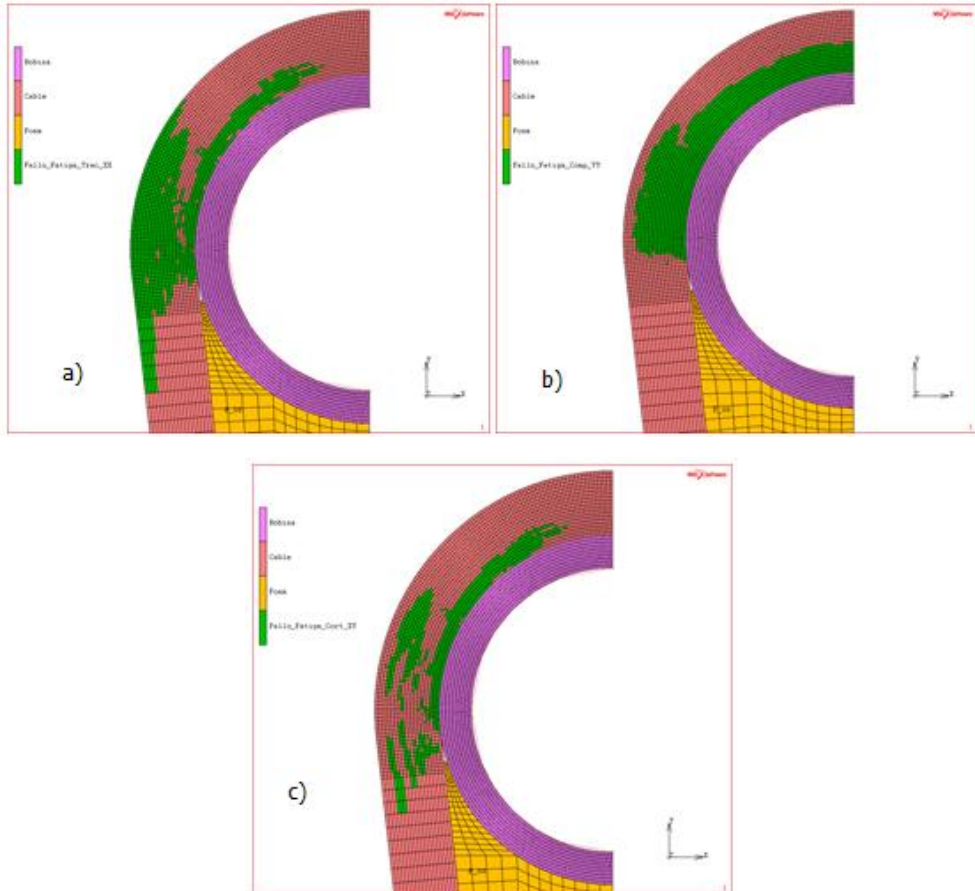
Las imágenes siguientes muestran los elementos que fallan en el instante anterior al fallo por rotura.



**Figura 6.7: Elementos que han fallado por tracción en la dirección longitudinal a), en la dirección transversal b) y por cortadura en el plano c) para un 80% de la carga de fallo estático (punto 2).**

- Punto 3. Instante posterior al fallo por rotura.

Las imágenes siguientes muestran los elementos que fallan en el instante posterior al fallo por rotura.



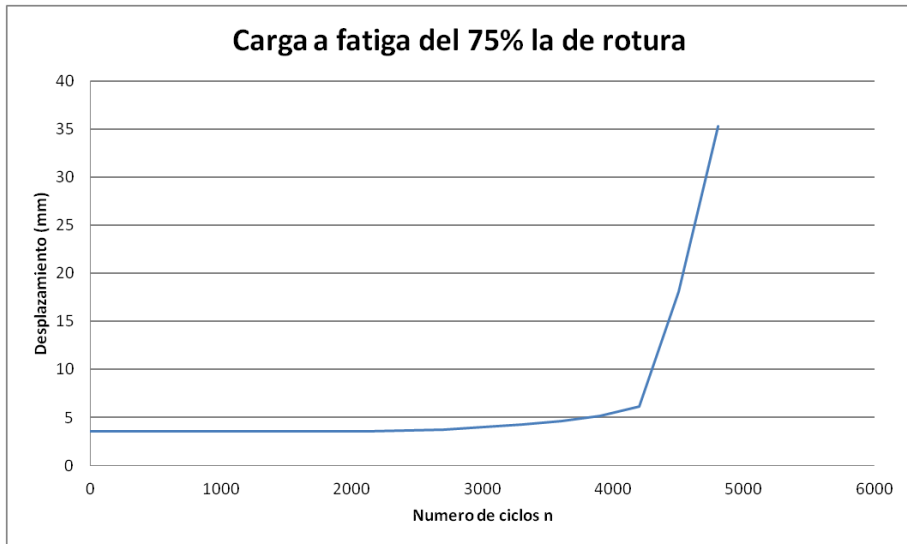
**Figura 6.8: Elementos que han fallado por tracción en la dirección longitudinal a), en la dirección transversal b) y por cortadura en el plano c) para un 80% de la carga de fallo estático (punto 3).**

Se observa perfectamente que en este estado el cable no es capaz de transmitir ningún tipo de carga ya que todos los elementos de una sección han fallado en la dirección de la fibra y por tanto no existe continuidad en el cable.

### 6.3 CASO 3: FALLO POR FATIGA AL 75% DE LA CARGA MÁXIMA

Se aplica una carga cíclica de **0-652.5 kN**.

La imagen siguiente muestra como varía el desplazamiento conforme se aumenta el número de ciclos.



**Figura 6.9: Gráfico desplazamiento-número de ciclos aplicando un 75% de la carga de fallo estático**

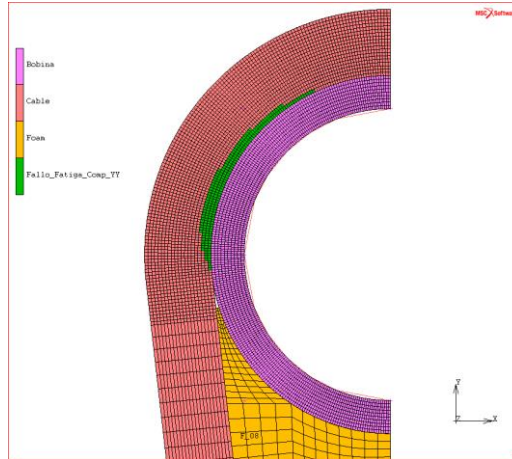
El cable es capaz de soportar **4200 ciclos** de carga.

La fase de “crecimiento de grieta” comienza a partir de los **2400 ciclos** aproximadamente.

A continuación se muestran las imágenes correspondientes a los elementos que han fallado para los puntos 0, 1, 2, 3 (ver Figura 6.1).

- Punto 0. Primer ciclo de carga.

La imagen siguiente muestra los elementos que fallan en el primer ciclo de carga. Sólo fallan elementos en la dirección transversal por compresión.



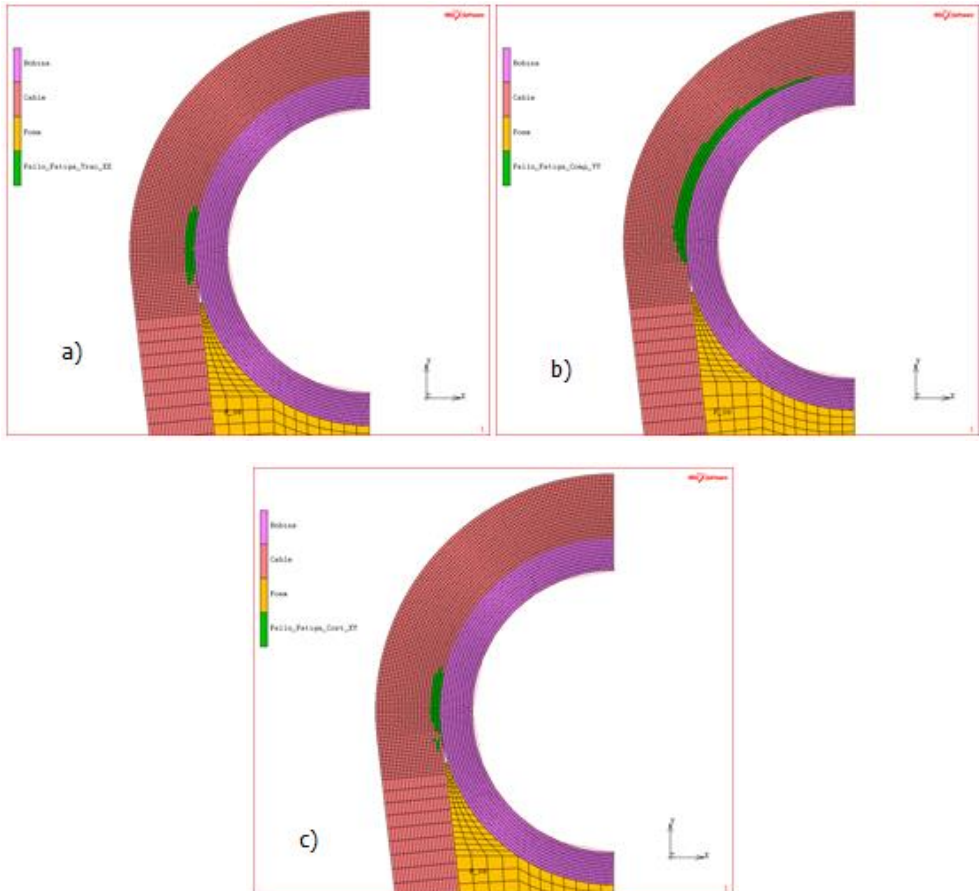
**Figura 6.10: Elementos que han fallado por compresión en la dirección transversal para un 75% de la carga de fallo estático.**

Este modo de fallo no es catastrófico y por tanto el cable puede seguir trabajando. Además, se aprecia que la zona de fallo es menor que en el caso anterior.

- Punto 1. Inicio de crecimiento de grieta.

Se ha considerado que el inicio del crecimiento de grieta comienza en **2400 ciclos**.

La imagen siguiente muestra los elementos que fallan en el instante en que se inicia el crecimiento de la grieta por fatiga.

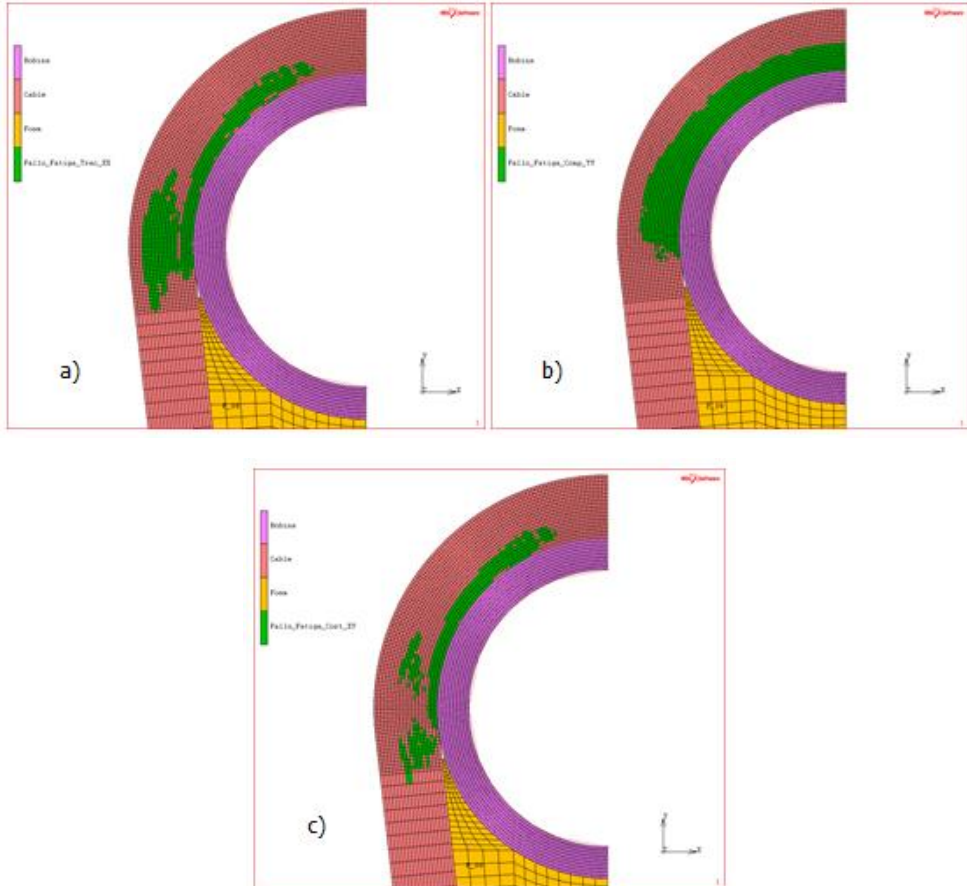


**Figura 6.11: Elementos que han fallado por tracción en la dirección longitudinal a), en la dirección transversal b) y por cortadura en el plano c) para un 75% de la carga de fallo estático (punto 1).**

- Punto 2. Instante anterior al fallo por rotura.

El fallo del cable por fatiga aparece para **4200 ciclos**.

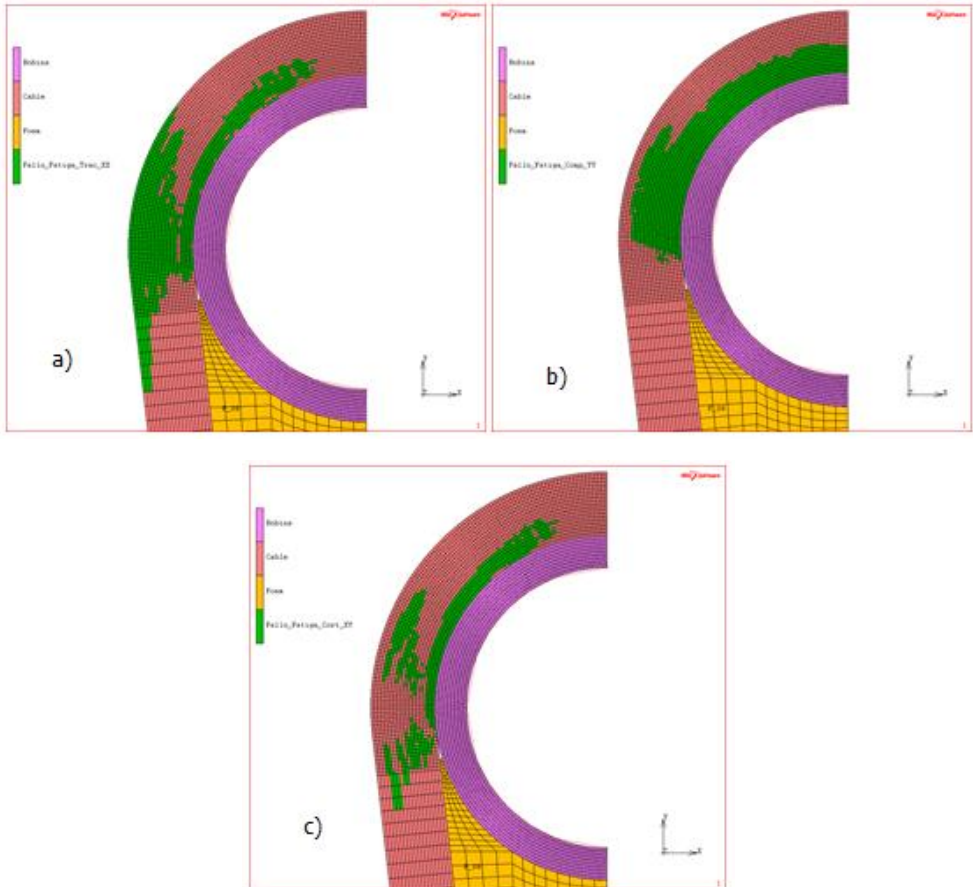
Las imágenes siguientes muestran los elementos que fallan en el instante anterior al fallo por rotura.



**Figura 6.12: Elementos que han fallado por tracción en la dirección longitudinal a), en la dirección transversal b) y por cortadura en el plano c) para un 75% de la carga de fallo estático (punto 2).**

- Punto 3. Instante posterior al fallo por rotura.

Las imágenes siguientes muestran los elementos que fallan en el instante posterior al fallo por rotura.



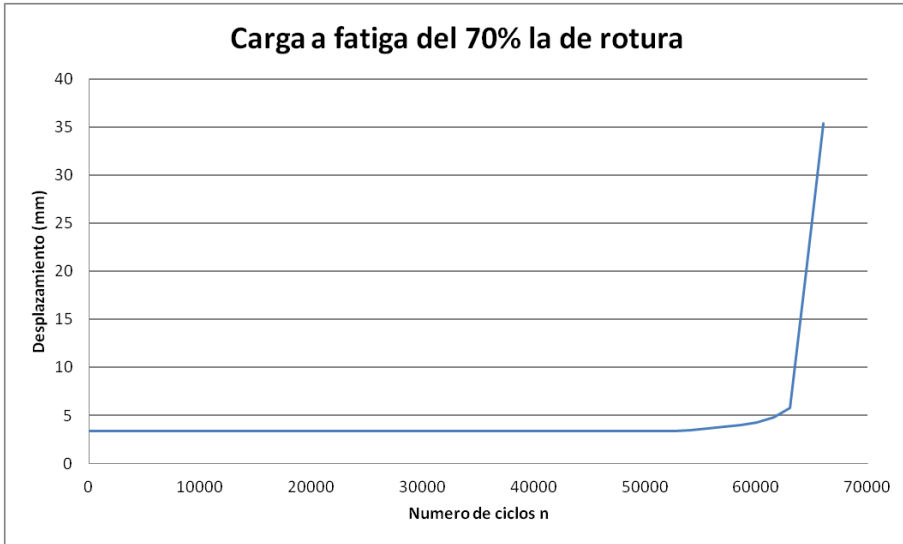
**Figura 6.13: Elementos que han fallado por tracción en la dirección longitudinal a), en la dirección transversal b) y por cortadura en el plano c) para un 75% de la carga de fallo estático (punto 3).**

Se observa perfectamente que en este estado el cable no es capaz de transmitir ningún tipo de carga ya que todos los elementos de una sección han fallado en la dirección de la fibra y por tanto no existe continuidad en el cable.

## 6.4 CASO 4: FALLO POR FATIGA AL 70% DE LA CARGA MÁXIMA

Se aplica una carga cíclica de **0-609 kN**.

La imagen siguiente muestra como varía el desplazamiento conforme se aumenta el número de ciclos.



**Figura 6.14: Gráfico desplazamiento-número de ciclos aplicando un 70% de la carga de fallo estático.**

El cable es capaz de soportar **63000 ciclos** de carga.

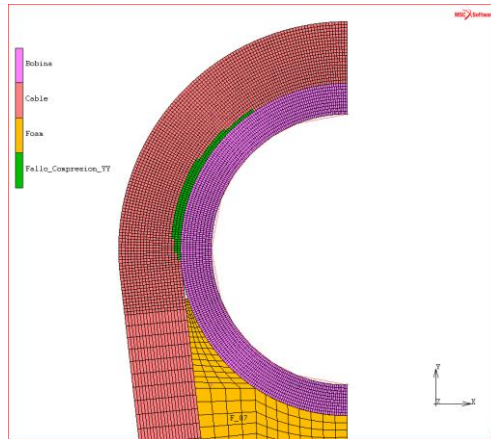
La fase de crecimiento de grieta comienza a partir de los **52500 ciclos** aproximadamente.

A continuación se muestran las imágenes correspondientes a los elementos que han fallado para los puntos 0, 1, 2, 3 (ver Figura 6.1).



- Punto 0. Primer ciclo de carga.

La imagen siguiente muestra los elementos que fallan en el primer ciclo de carga. Sólo fallan elementos en la dirección transversal por compresión.



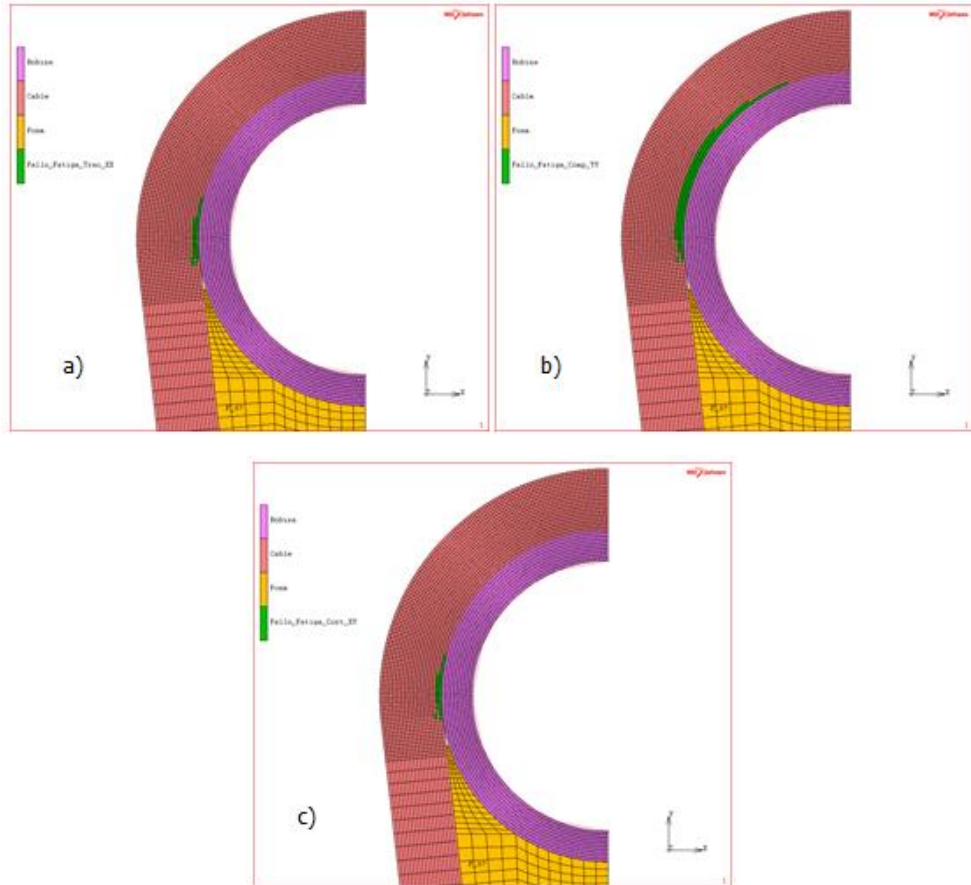
**Figura 6.15: Elementos que han fallado por compresión en la dirección transversal para un 70% de la carga de fallo estático.**

Este modo de fallo no es catastrófico y por tanto el cable puede seguir trabajando. Además, se aprecia que la zona de fallo es menor que en el caso anterior.

- Punto 1. Inicio de crecimiento de grieta.

Se ha considerado que el inicio del crecimiento de grieta comienza en **52500 ciclos**.

La imagen siguiente muestra los elementos que fallan en el instante en que se inicia el crecimiento de la grieta por fatiga.

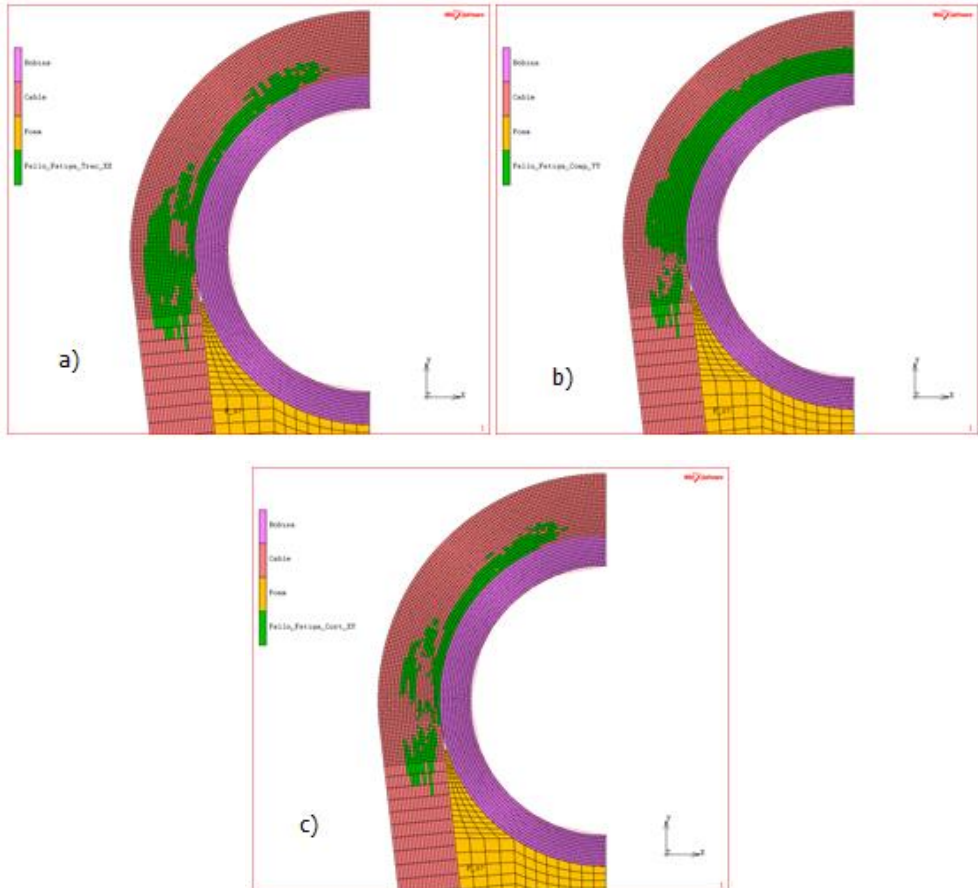


**Figura 6.16: Elementos que han fallado por tracción en la dirección longitudinal a), en la dirección transversal b) y por cortadura en el plano c) para un 70% de la carga de fallo estático (punto 1).**

- Punto 2. Instante anterior al fallo por rotura.

El fallo del cable por fatiga aparece para **63000 ciclos**.

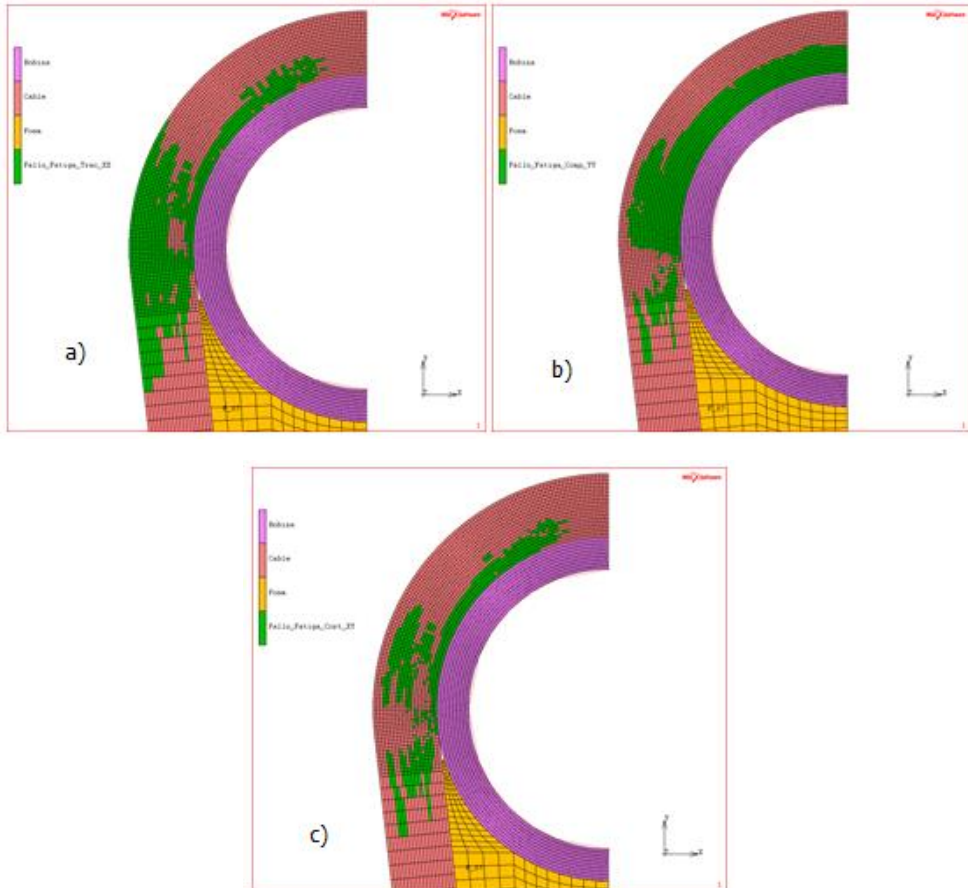
Las imágenes siguientes muestran los elementos que fallan en el instante anterior al fallo por rotura.



**Figura 6.17: Elementos que han fallado por tracción en la dirección longitudinal a), en la dirección transversal b) y por cortadura en el plano c) para un 70% de la carga de fallo estático (punto 2).**

- Punto 3. Instante posterior al fallo por rotura.

Las imágenes siguientes muestran los elementos que fallan en el instante posterior al fallo por rotura.



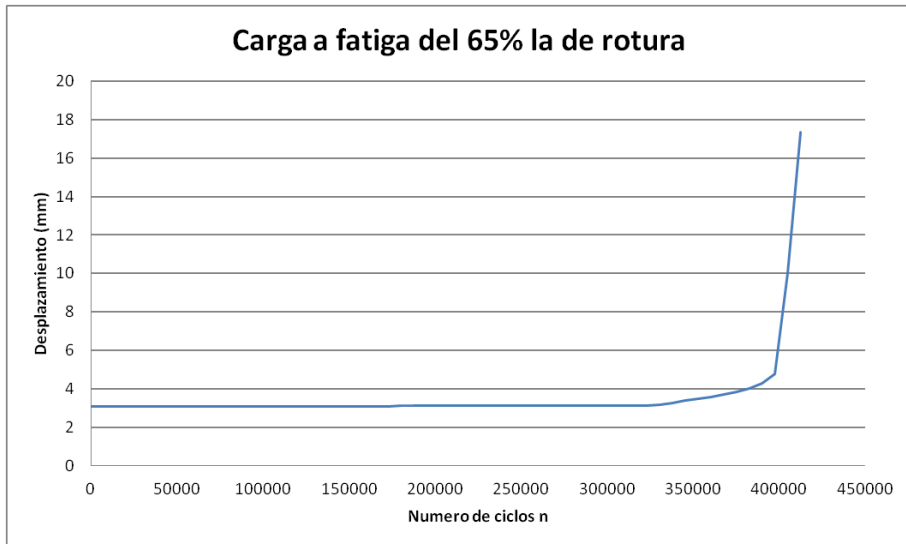
**Figura 6.18: Elementos que han fallado por tracción en la dirección longitudinal a), en la dirección transversal b) y por cortadura en el plano c) para un 70% de la carga de fallo estático (punto 3).**

Se observa perfectamente que en este estado el cable no es capaz de transmitir ningún tipo de carga ya que todos los elementos de una sección han fallado en la dirección de la fibra y por tanto no existe continuidad en el cable.

## 6.5 CASO 5: FALLO POR FATIGA AL 65% DE LA CARGA MÁXIMA

Se aplica una carga cíclica de **0-565.5 kN**.

La imagen siguiente muestra como varía el desplazamiento conforme se aumenta el número de ciclos.

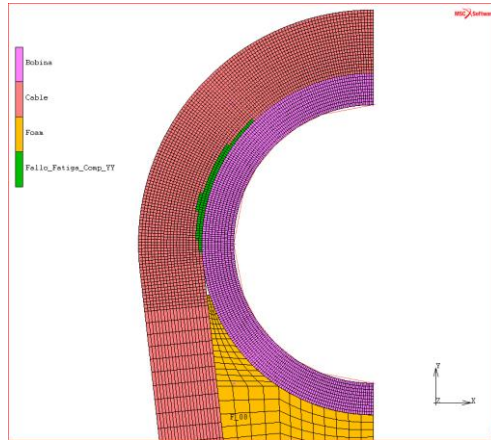


**Figura 6.19: Gráfico desplazamiento-número de ciclos aplicando un 65% de la carga de fallo estático.**

El cable es capaz de soportar **397500 ciclos** de carga.

La fase de crecimiento de grieta comienza a partir de los **337500 ciclos** aproximadamente.

A continuación se muestran las imágenes correspondientes a los elementos que han fallado para los puntos 0, 1, 2, 3 (ver Figura 6.1).



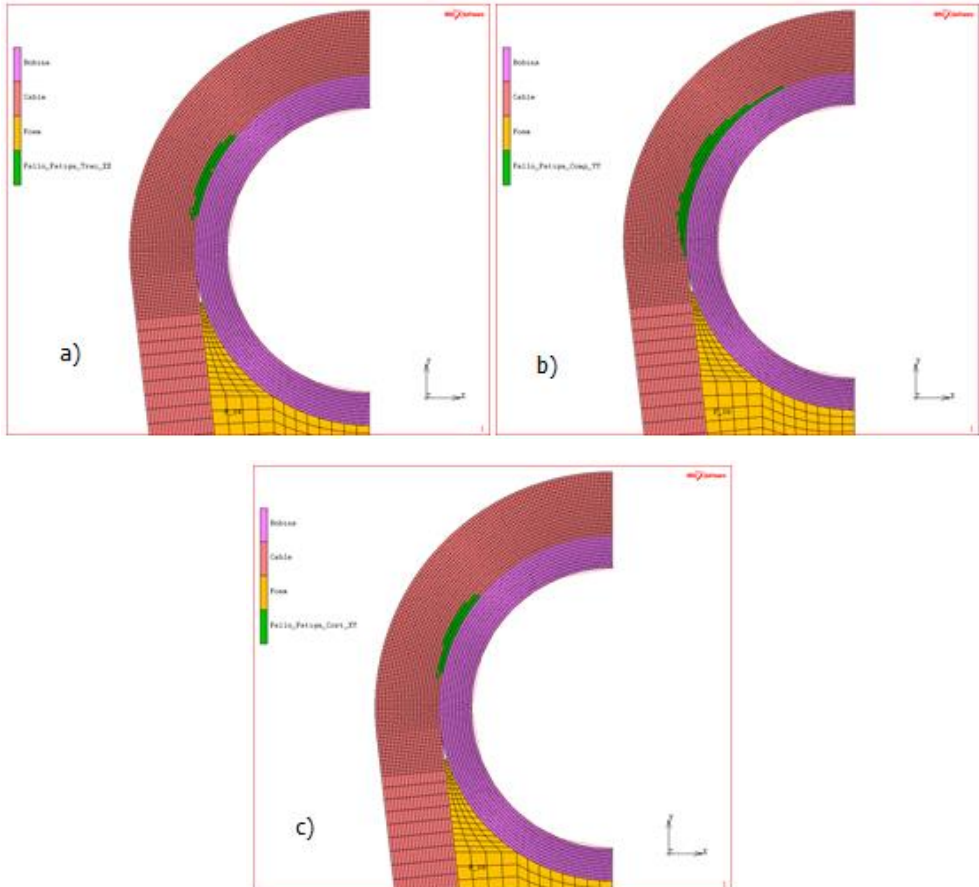
**Figura 6.20: Elementos que han fallado por compresión en la dirección transversal para un 65% de la carga de fallo estático.**

Este modo de fallo no es catastrófico y por tanto el cable puede seguir trabajando. Además, se aprecia que la zona de fallo es menor que en el caso anterior.

- Punto 1. Inicio de crecimiento de grieta.

Se ha considerado que el inicio del crecimiento de grieta comienza en **337500 ciclos**.

La imagen siguiente muestra los elementos que fallan en el instante en que se inicia el crecimiento de la grieta por fatiga.

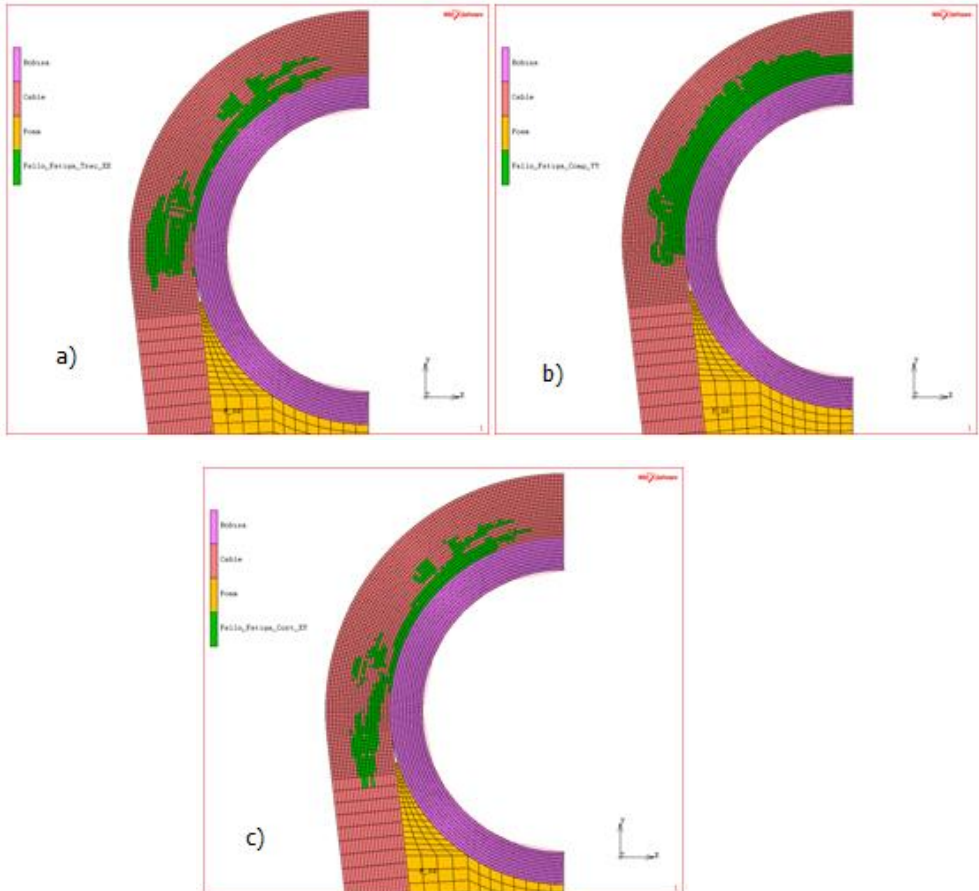


**Figura 6.21: Elementos que han fallado por tracción en la dirección longitudinal a), en la dirección transversal b) y por cortadura en el plano c) para un 65% de la carga de fallo estático (punto 1).**

- Punto 2. Instante anterior al fallo por rotura.

El fallo del cable por fatiga aparece para **397500 ciclos**.

Las imágenes siguientes muestran los elementos que fallan en el instante anterior al fallo por rotura.

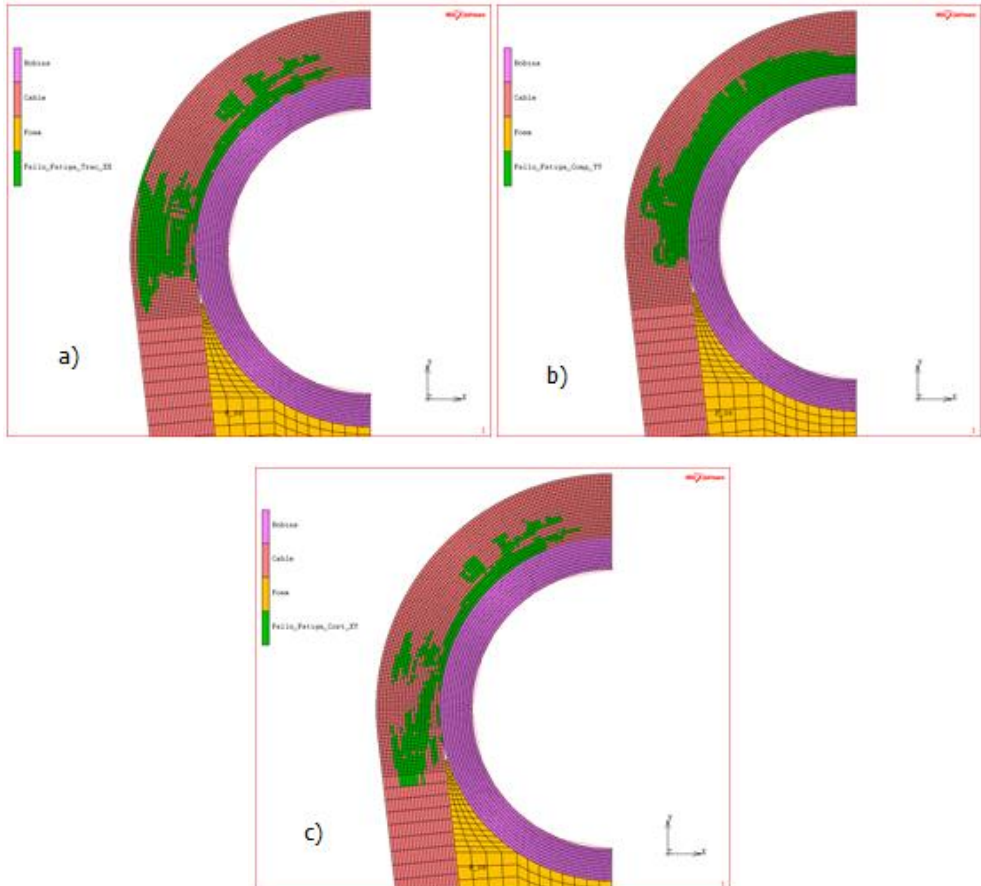


**Figura 6.22: Elementos que han fallado por tracción en la dirección longitudinal a), en la dirección transversal b) y por cortadura en el plano c) para un 65% de la carga de fallo estático (punto 2).**



- Punto 3. Instante posterior al fallo por rotura.

Las imágenes siguientes muestran los elementos que fallan en el instante posterior al fallo por rotura.



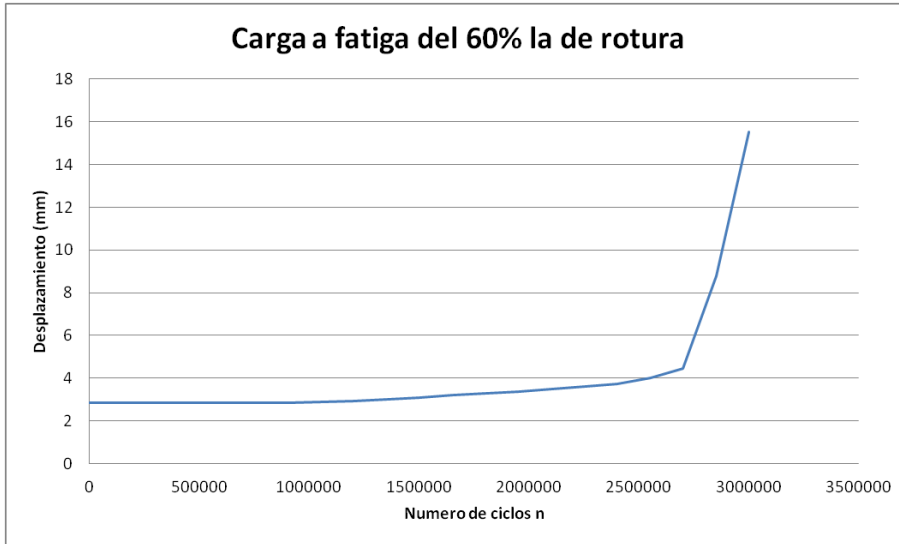
**Figura 6.23: Elementos que han fallado por tracción en la dirección longitudinal a), en la dirección transversal b) y por cortadura en el plano c) para un 65% de la carga de fallo estático (punto 3).**

Se observa perfectamente que en este estado el cable no es capaz de transmitir ningún tipo de carga ya que todos los elementos de una sección han fallado en la dirección de la fibra y por tanto no existe continuidad en el cable.

## 6.6 CASO 6: FALLO POR FATIGA AL 60% DE LA CARGA MÁXIMA

Se aplica una carga cíclica de **0-522 kN**.

La imagen siguiente muestra como varía el desplazamiento conforme se aumenta el número de ciclos.



**Figura 6.24: Gráfico desplazamiento-número de ciclos aplicando un 60% de la carga de fallo estático.**

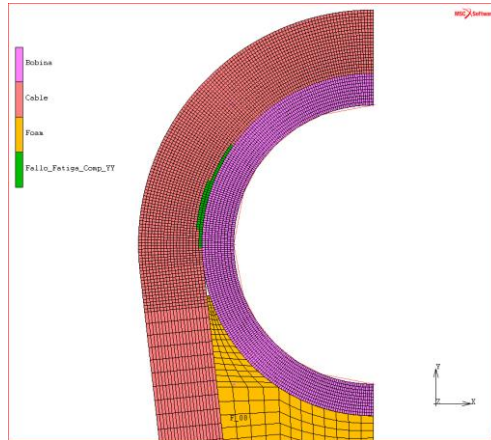
El cable es capaz de soportar **2700000 ciclos** de carga.

La fase de crecimiento de grieta comienza a partir de los **1350000 ciclos** aproximadamente.

A continuación se muestran las imágenes correspondientes a los elementos que han fallado para los puntos 0, 1, 2, 3 (ver Figura 6.1).

- Punto 0. Primer ciclo de carga.

La imagen siguiente muestra los elementos que fallan en el primer ciclo de carga. Sólo fallan elementos en la dirección transversal por compresión.



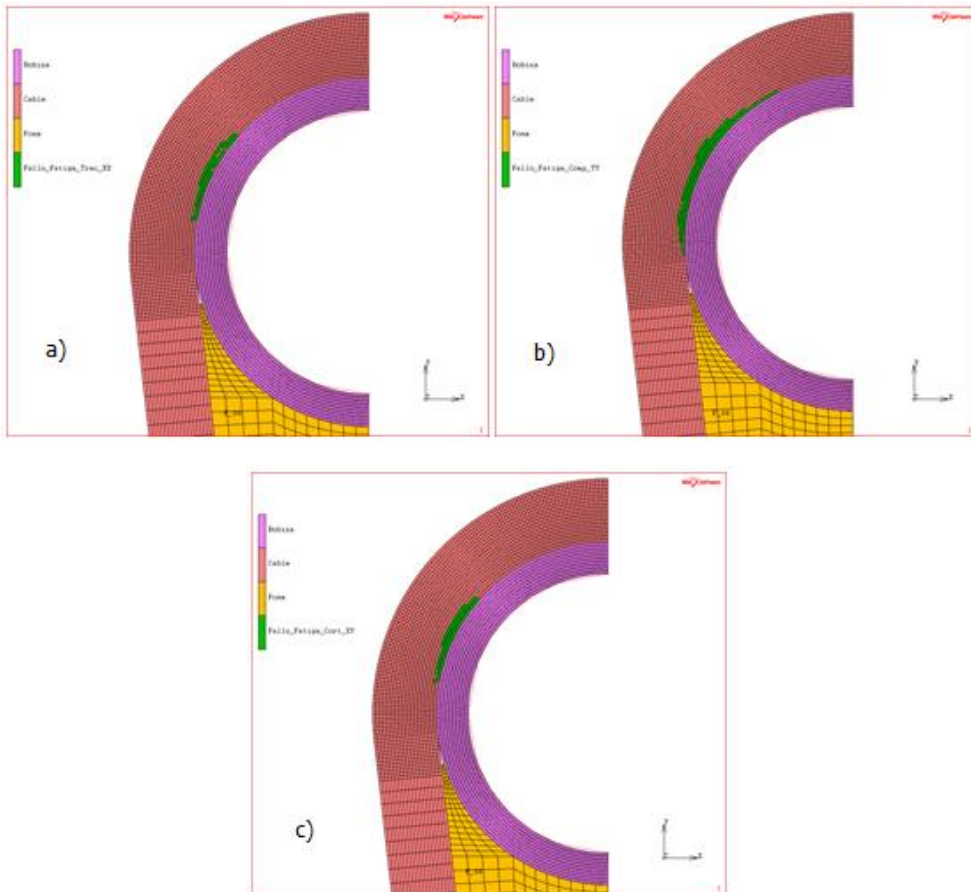
**Figura 6.25: Elementos que han fallado por compresión en la dirección transversal para un 60% de la carga de fallo estático.**

Este modo de fallo no es catastrófico y por tanto el cable puede seguir trabajando. Además, se aprecia que la zona de fallo es menor que en el caso anterior.

- Punto 1. Inicio de crecimiento de grieta.

Se ha considerado que el inicio del crecimiento de grieta comienza en **1350000 ciclos**.

La imagen siguiente muestra los elementos que fallan en el instante en que se inicia el crecimiento de la grieta por fatiga.

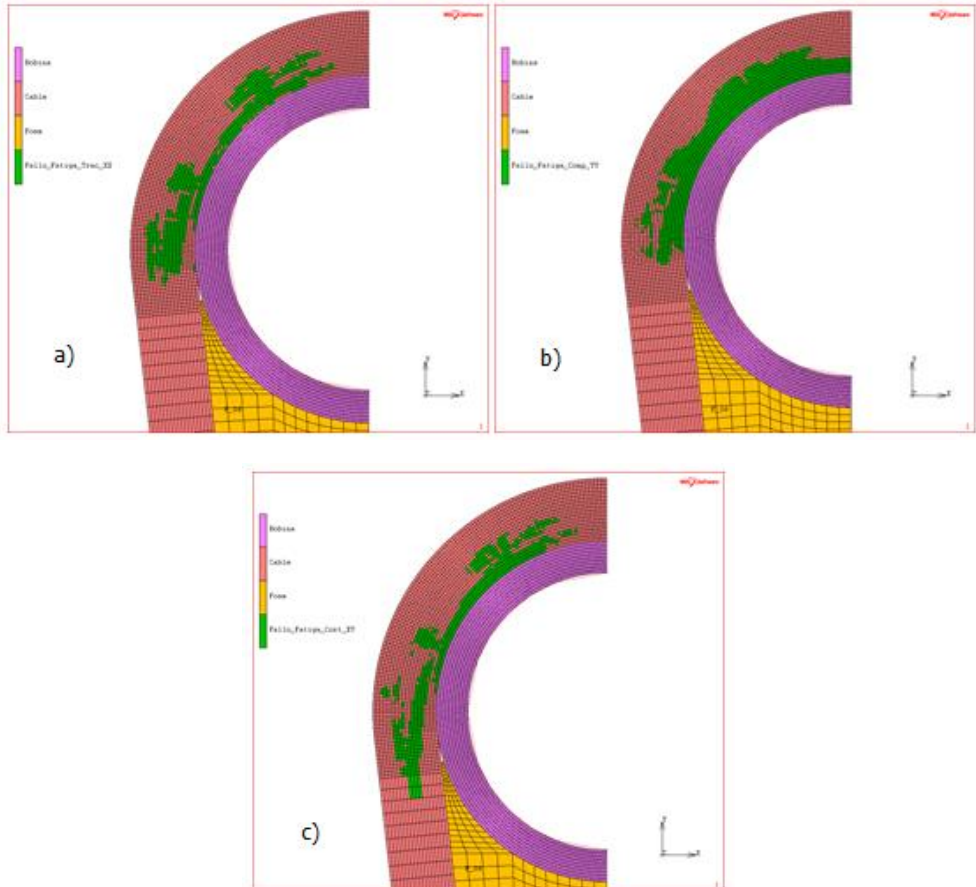


**Figura 6.26: Elementos que han fallado por tracción en la dirección longitudinal a), en la dirección transversal b) y por cortadura en el plano c) para un 60% de la carga de fallo estático (punto 1).**

- Punto 2. Instante anterior al fallo por rotura.

El fallo del cable por fatiga aparece para **397500 ciclos**.

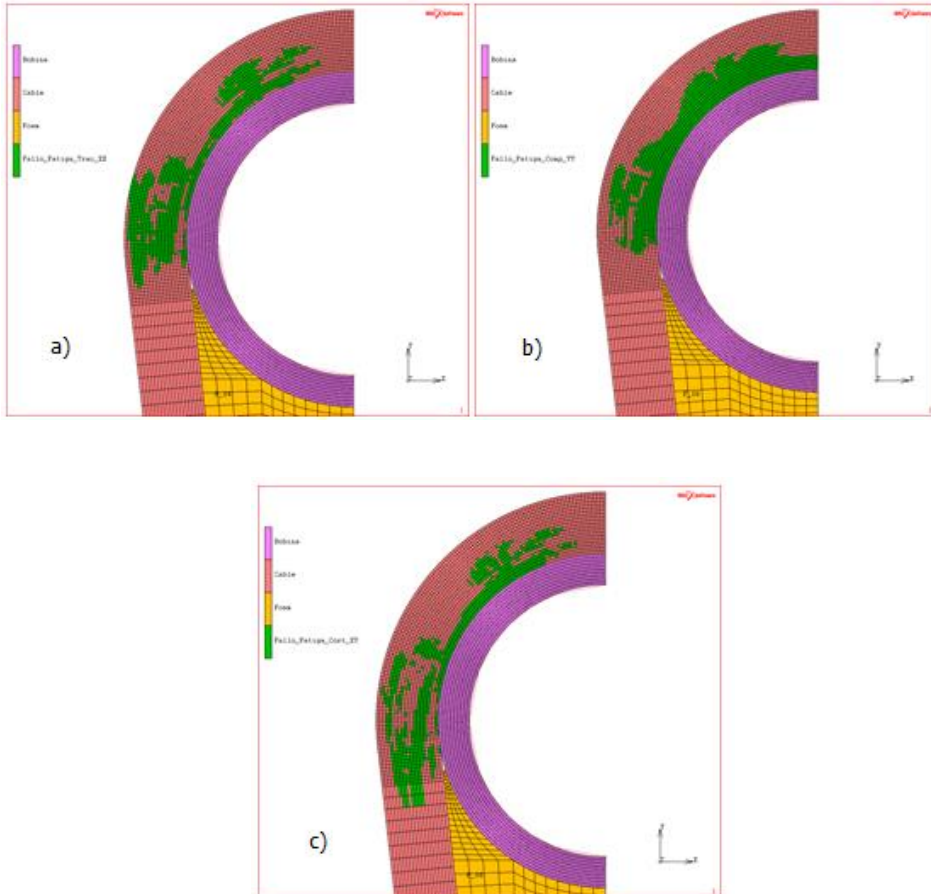
Las imágenes siguientes muestran los elementos que fallan en el instante anterior al fallo por rotura.



**Figura 6.27: Elementos que han fallado por tracción en la dirección longitudinal a), en la dirección transversal b) y por cortadura en el plano c) para un 60% de la carga de fallo estático (punto 2).**

- Punto 3. Instante posterior al fallo por rotura.

Las imágenes siguientes muestran los elementos que fallan en el instante posterior al fallo por rotura.



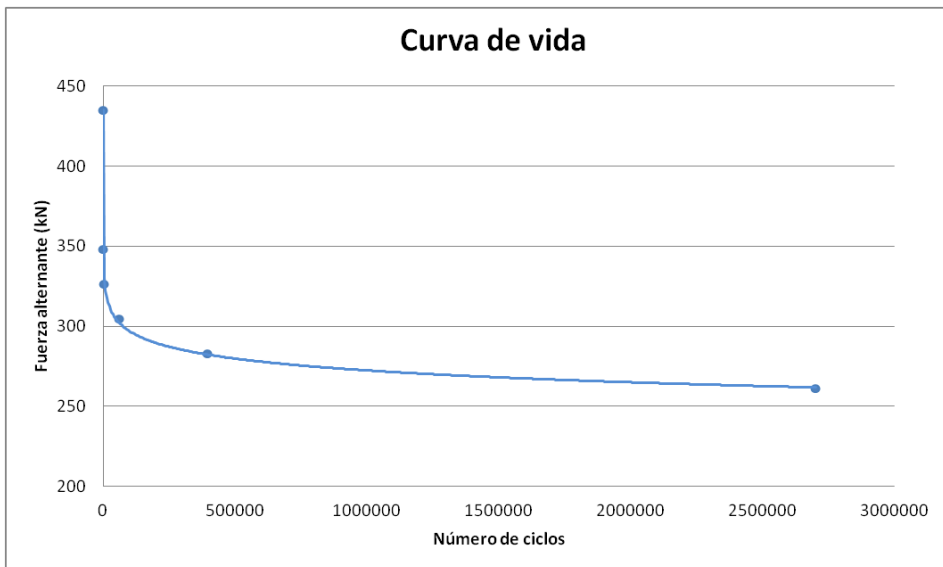
**Figura 6.28: Elementos que han fallado por tracción en la dirección longitudinal a), en la dirección transversal b) y por cortadura en el plano c) para un 60% de la carga de fallo estático (punto 3).**

Se observa perfectamente que en este estado el cable no es capaz de transmitir ningún tipo de carga ya que todos los elementos de una sección han fallado en la dirección de la fibra y por tanto no existe continuidad en el cable.

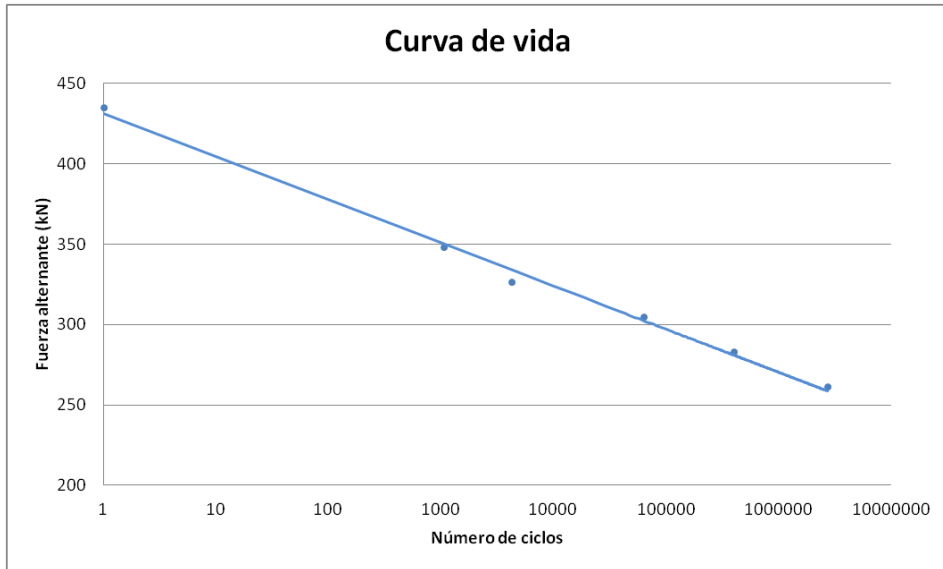
## 6.7 CURVAS DE VIDA.

Con todos los análisis descritos anteriormente se puede obtener una curva de vida. Estas curvas servirán para estimar la vida de este prototipo de cables en función de las cargas alternantes aplicadas.

No será válida para otras geometrías, diferentes materiales y diferentes volúmenes de fibra, para estas habría que realizar otro análisis como el descrito en este proyecto, algo que será relativamente sencillo si se tienen las herramientas de cálculo creadas para la realización de este proyecto.



**Figura 6.29: Curva Fa-n para el cable de fibra de carbono analizado, escala lin-lin.**



**Figura 6.30: Curva Fa-n para el cable de fibra de carbono analizado, escala lin-log.**

Aquí se observa algo parecido a lo que sucede en los metales, para los cuales cuando se somete el material a un ciclo de tensiones suficientemente severo, se iniciará una serie de fallos que causarán el fallo total del componente. En consecuencia cuanto mayor sea la carga aplicada menor será el número de ciclos para alcanzar el fallo. También se puede observar que las curvas tienen una tendencia asintótica el cual predice el límite de fatiga.



7

# Capítulo Siete

## Conclusiones y Trabajos Futuros

### 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

#### 7.1 CONCLUSIONES

A partir del trabajo realizado en el presente proyecto se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Se ha utilizado un procedimiento para simular el comportamiento de un material compuesto bajo cargas cíclicas, es decir, bajo condiciones de fatiga. Este procedimiento permite conocer el nivel de vida de un material aplicando reglas de degradación progresiva e instantánea en sus propiedades.
- Con el procedimiento descrito se puede predecir en que zona de la pieza se produce la rotura. Esta zona es aproximada ya que el método no considera la interacción de los modos de fallo, por tanto no se puede saber con exactitud si es un único modo el que produce la rotura o una combinación de varios.
- Realizando el análisis para diferentes estados de carga se puede obtener la curva de vida del prototipo, que servirá para predecir la vida frente a diferentes cargas cíclicas. Obtener estas curvas de

vida mediante el método de los elementos finitos tendrá asociado un ahorro de coste y tiempo importante frente a los ensayos experimentales. Además, se ha desarrollado una herramienta que automatiza todos los pasos del procedimiento: la obtención del estado tensional, la degradación de las propiedades y el cálculo del nivel de vida.

- La curva de vida generada para el cable de fibra de carbono tiene características similares a las curvas de vida de metales frágiles puesto que la fibra de carbono tiene una rotura de este tipo. En las figuras correspondientes se observa perfectamente que se ajusta a una línea de tendencia logarítmica por la cual el nivel de vida aumentará conforme baje la amplitud de la carga.

## 7.2 TRABAJOS FUTUROS

Para extender el trabajo realizado se proponen los siguientes trabajos futuros:

- Realización de ensayos experimentales para obtener los parámetros del material necesarios para el cálculo de la vida a fatiga, resistencia residual, rigidez residual y propiedades elásticas del material.
- Realización de ensayos a fatiga de los cables y otros componentes para validar realmente el modelo de fatiga progresiva utilizada.
- Se ha implantado un programa de cálculo utilizando el programa EXCEL por simplicidad pero esto no es lo más eficiente desde el punto de vista computacional. Sería importante realizar una implantación del modelo más eficiente con otros programas.
- Evaluar la posibilidad de reducción de la zona de estudio para disminuir el coste computacional.
- El modelo de degradación explicado no tiene en cuenta el efecto de la frecuencia de aplicación de la carga y podría ser recomendable generar un modelo capaz de considerar los efectos de las frecuencias

8

# Capítulo Ocho

## Bibliografía

### 8. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] “Progressive Fatigue Damage Modeling of Composite Materials”. Mahmood M.Shokrieh. (Feb 1996).
- [2] “Fatigue Life Predicción for Carbon Fibre Composites”. T. Adam, N. Gathercole, H. Reiter y B. Harris. (1992).
- [3] “Fatigue Life Prediction for Hybrid Composites” T. Adam, G. Fernando, R. F. Dickson, H. Reiter y B. Harris. (1989).
- [4] “Life prediction for Fatigue of T800/524 Carbon-Fibre Composites”. N. Gathercole, H. Reiter, T. Adam y B. Harris. (Nov 1994).
- [5] “An empirical fatigue-life model for high performance fibre composites with and without impact damage”. MH Beheshty, B.Harris y T. Adam (1999).
- [6] “Composite Design”, S. W. Tsai, 4th Edition, Think Composites, Dayton, 1988.
- [7] "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites", Z. Hashin, Journal of Applied Mechanics, Vol. 47, (1980), pp. 329-334.

- **[8]** M.J. Hinton, A.S. KADDOUR, and P.D. Soden, "A comparison of the predictive capabilities of current failure theories for composite laminates, judged against experimental evidence." *Composites Science and Technology*, no. 62, pp. 1725-1797, 2002.
- **[9]** Z. Hashin and A. Rotem, "A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials," *J. Compos. Mater*, no. 7, pp. 7448-7464, 1973.
- **[10]** S. W. Tsai and E. M. Wu, "A General Theory of Strength for Anisotropic Materials," *Journal of Composite Materials*, vol. 5, no. 1, pp. 58-80, January 1971.
- **[11]** J. C. Halpia, K. L. Jerina and T. A. Johnson, "Characterization of Composites for the Purpose of Reliability Evaluation," *Analysis of the Test Methods for High Modulus Fibers and Composites*, ASTM STP 521, (1973), pp. 5-64.
- **[12]** H. T. Hahn and R, Y. Kim, "Proof Testing of Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 9, July 1975, pp, 297-312.
- **[13]** J. N. Yang and M. D. Liu, "Residual Strength Degradation Model and Theory of Periodic Proof Tests for Graphite/Epoxy Laminates," *Journal of Composite Materials*, Vol. II, (1977), pp. 176-202.
- **[14]** P. C. Chou and R, Croman, "Residual Strength in Fatigue Based on the Strength-Life Equal Rank Assumption," *Journal of Composite Materials*, Vol. 12, (1978), pp. 177-194.
- **[15]** P. G. P, Sendekyj, "Filling Models to Composite Materials Fatigue Data," *Test Methods and Design Allowable for Fibrous Composites*, ASTM STP 734, C. C. Chamis, Ed. (1981), pp. 245-260.
- **[16]** T. Adam, R. F. Diekson, G. Fernando, B. Harris and H. Reiter. "The Fatigue Behaviour of Kevlar/Carbon Hybrid Composites," *IMechE Conference Publications (Institute of Mechanical Engineers)*. Vol. 2. (1986). pp. 329-335.
- **[17]** S. C. Chou, O. Orringer and J. H. Rainey, "Post Failure Behavior of Laminates II – Stress Concentration," *Journal of Composite Materials*, Vol. II. (1976), pp. 71-78.