

Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

Análisis y simulación del desgaste en cables
de acero sometidos a fatiga

Autor: Samuel González Leva

Tutor: Diego Erena Guardia

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

Análisis y simulación del desgaste en cables de acero sometidos a fatiga

Autor:

Samuel González Leva

Tutor:

Diego Erena Guardia

Profesor Sustituto Interino

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Máster: Análisis y simulación del desgaste en cables de acero sometidos a fatiga

Autor: Samuel González Leva

Tutor: Diego Erena Guardia

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Estudiar en la universidad en tiempos de pandemia. Podría ser el título de una serie de sobremesa, pero es la realidad a la que nos hemos tenido que enfrentar muchos. Una época en la que teníamos tantas incertidumbres e inquietudes que, aprobar o suspender, entregar o no, pasaba a un segundo plano. Confío que, en un futuro, esto no sea más que un mal recuerdo, y no se convierta en una eterna pesadilla.

No obstante, acaba una etapa de mi vida y, quiera o no, es algo de por sí especial. Una etapa en la que he descubierto que estudiar y trabajar al mismo tiempo no es fácil, pero es posible si uno está con las personas indicadas.

En primer lugar, quiero agradecer este trabajo al principal culpable de él. Gracias Diego, por tu implicación, tus consejos y, sobre todo, por tu paciencia. Este largo proceso no habría llegado a su fin sin tu ayuda. Solo espero que de todo lo hecho durante este tiempo, aunque sea una mínima parte, te ayude a ti en un futuro. Y gracias también a Carlos y Jesús por aportar su granito de arena y sus conocimientos a este trabajo.

A mis amigos, en especial a Conorbela y a los Young Boys, gracias por hacerme ver que estudiar o trabajar es mucho más fácil y gratificante cuando uno está rodeado de gente buena. Y a mi gente de Córdoba, gracias por enseñarme que no hay tiempo o distancia capaz de tumbar una amistad cuando ésta es de verdad. Gracias a todo aquel que, al leer esto en algún momento, se le escape una sonrisa y sepa que también va por él.

Gracias también a mi familia, por hacerme ser como soy y por enseñarme que, sin esfuerzo y sin trabajo, no hay recompensa.

Y gracias a mi compañera de confinamiento y de la vida, Alicia, entre otras cosas, por aguantarme. Por esos días en los que no me quería levantar de la silla y por esas noches en las que no me quería ir a la cama, por esos momentos en los que no paraba de hablar y por esos momentos en los que un mal día me mantenían callado; por todo, gracias.

Gracias de corazón a todos, y espero que sigáis en esta nueva etapa que comienza. Quizás acabe de estudiar, al menos en la universidad, pero creo que nunca terminaré de aprender.

Samuel González Leva

Sevilla, 2020

Resumen

Durante la realización de una tesis doctoral, fue necesario realizar unos ensayos de fatiga sobre unos cables de acero. El ensayo consistía en aplicar una tensión al cable y un desplazamiento cíclico en el centro de éste hasta producir el fallo. Los cables de acero estaban formados por siete hilos trenzados y, tras la realización de los ensayos, se observan unas huellas en las zonas de contacto de cada par de hilos. Aunque inicialmente se asume que el origen de dichas marcas es el desgaste, es necesario descartar cualquier otro motivo antes de comenzar con el análisis.

La primera parte del estudio consiste en analizar los datos previos de los que se dispone: los datos de los distintos ensayos, que se encuentran recogidos en un archivo *Excel*; las imágenes de todos los ensayos, obtenidas con un microscopio electrónico de barrido; y un modelo numérico 3D del ensayo completo. Las imágenes del microscopio son de utilidad para seleccionar qué ensayos se consideran de interés para el análisis, ya que se dispone de un gran número de muestras y no es posible analizarlas todas.

Para poder medir con precisión las huellas de los hilos, se acude al CITIUS para utilizar un microscopio confocal, que es una herramienta que permite obtener imágenes tridimensionales de la superficie del hilo. Debido a su complejidad, será necesario realizar una formación para utilizar este microscopio. Una vez obtenidas las mediciones, hay que procesar los datos obtenidos para medir el desgaste producido sobre cada zona de contacto del hilo. Las mediciones se harán solamente sobre el hilo interior de los ensayos elegidos, ya que este hilo es el único que se mantiene recto y tiene las marcas de los otros seis.

Por otro lado, se decide realizar un modelo de elementos finitos bidimensional del contacto entre cada hilo y el hilo interior. La idea es obtener la distribución de presiones de dicho par de contacto para estimar el desgaste que se produciría en ambos y actualizar sus geometrías acorde a éste. Obteniendo nuevamente las presiones, se puede establecer un proceso iterativo que permita predecir el desgaste producido en cada hilo durante el ensayo de fatiga. Para estimar este desgaste, se utiliza el modelo de Archard, un modelo simple que describe el desgaste por deslizamiento. Del modelo 3D mencionado anteriormente se obtienen algunos datos necesarios para este modelo.

Para la programación del modelo numérico, se han asumido ciertas hipótesis que pueden afectar a los resultados obtenidos. Por tanto, es necesario comprobar cómo varían los resultados de éste en función de algunas de sus variables y tomar los valores que mejor los ajusten y, además, faciliten su obtención.

Finalmente, una vez ajustado el modelo numérico, se obtienen unos resultados del desgaste en cada zona de contacto, los cuales se comparan con las mediciones hechas en las imágenes del microscopio confocal. Esto permite conocer la precisión y fiabilidad del modelo, pero también posibles mejoras que se pueden aplicar.

Índice

Agradecimientos	V
Resumen	VII
Índice	IX
Índice de Tablas	XI
Índice de Figuras	XIII
1 Introducción	1
1.1 Descripción del ensayo de fatiga	2
1.2 Propiedades del cable.....	3
1.3 Imágenes de microscopio previas.....	4
1.4 Metodología de trabajo	6
2 Análisis de los datos de los ensayos	7
2.1 Análisis de los datos en Excel	7
2.2 Selección de las muestras.....	8
2.2.1 Inspección visual	8
2.2.2 Análisis de las imágenes	9
2.2.3 Muestras seleccionadas	10
2.3 Modelo 3D.....	11
3 Trabajo de laboratorio	13
3.1 Microscopio confocal.....	13
3.1.1 Preparación de los equipos.....	14
3.1.2 Datos obtenidos	15
3.2 Diseño del útil.....	16
3.3 Realización de una inspección	17
3.3.1 Vista general.....	17
3.3.2 Vista confocal	18
3.3.3 Perfil de la superficie	18
3.4 Determinación del motivo que provoca las marcas sobre el cable.....	18
3.4.1 Cable sin ensayar	19
3.4.2 Cable con precarga y desplazamiento máximos	20
3.4.3 Cable con ensayo de fatiga completo	21

4	Modelo numérico	23
4.1	<i>Modelo de Archard.....</i>	24
4.2	<i>Modelo de ANSYS.....</i>	25
4.2.1	Definición de la geometría.....	26
4.2.2	Actualización de la geometría	29
4.2.3	Condiciones de contorno.....	29
4.3	<i>Modelo de MATLAB</i>	31
4.3.1	Cálculo del desgaste.....	32
4.3.2	Constante de desgaste.....	33
4.4	<i>Validación del modelo.....</i>	34
5	Estudio de los resultados	35
5.1	<i>Extrapolación de los datos.....</i>	36
5.2	<i>Huella sobre el hilo interior.....</i>	38
5.3	<i>Coefficiente de desgaste</i>	41
5.4	<i>Análisis del modelo.....</i>	42
5.4.1	Tamaño del elemento.....	42
5.4.2	Número de iteraciones	44
5.5	<i>Resultados de las simulaciones</i>	46
6	Conclusiones	47
6.1	<i>Análisis cualitativo.....</i>	48
6.2	<i>Análisis cuantitativo.....</i>	49
6.3	<i>Vías de trabajo futuro</i>	50
	Anexo A: Código de ANSYS.....	51
	Anexo B: Código de MATLAB.....	67
	Referencias.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1–1. Composición química AISI 316.	3
Tabla 1–2. Hilos rotos para diferentes ensayos.	5
Tabla 2–1. Datos de los ensayos elegidos.	10
Tabla 3–1. Datos del ensayo 32.	21
Tabla 4–1. Ejemplo de cálculo de carga normal.	31
Tabla 5–1. Datos del ensayo 4.	35
Tabla 5–2. Carga normal en el ensayo 4.	36
Tabla 5–3. Deslizamiento relativo en el ensayo 4.	37
Tabla 5–4. Medidas de las huellas (medidas).	41
Tabla 5–5. Medidas de las huellas (estimadas).	46
Tabla 6–1. Comparativa de las medidas de las huellas.	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Marcas de los hilos.	1
Figura 1-2. Diseño de máquina de ensayos a fatiga.	2
Figura 1-3. Esquema de la aplicación de las fuerzas sobre el cable.	2
Figura 1-4. Dimensiones del cable.	3
Figura 1-5. Orientación de los hilos.	4
Figura 1-6. Orientación de los hilos del ensayo 4.	5
Figura 1-7. Orientación de los hilos del ensayo 9.	5
Figura 1-8. Orientación de los hilos del ensayo 11.	5
Figura 1-9. Orientación de los hilos del ensayo 31.	5
Figura 1-10. Metodología de trabajo.	6
Figura 2-1. Vista general de las muestras.	8
Figura 2-2. Detalle de una de las muestras.	8
Figura 2-3. Ensayo 20.	9
Figura 2-4. Ensayo 31.	9
Figura 2-5. Ensayo 4.	10
Figura 2-6. Ensayo 32.	10
Figura 2-7. Modelo 3D del cable.	11
Figura 3-1. Microscopía confocal.	13
Figura 3-2. Sensofar S Neox.	14
Figura 3-3. Montaje de los equipos.	14
Figura 3-4. Objetivos y especificaciones.	15
Figura 3-5. Diseño del útil.	16
Figura 3-6. Montaje del útil.	16
Figura 3-7. Vista general (Ejemplo).	17
Figura 3-8. Vista confocal (Ejemplo).	18
Figura 3-9. Perfil del hilo (Ejemplo).	18
Figura 3-10. Vista general (Prueba 1).	19
Figura 3-11. Perfil del hilo (Prueba 1).	19
Figura 3-12. Vista general (Prueba 2).	20
Figura 3-13. Perfil del hilo (Prueba 2).	20
Figura 3-14. Vista general (Prueba 3).	21

Figura 3-15. Perfil del hilo (Prueba 3).	21
Figura 4-1. Ciclo del modelo numérico.	23
Figura 4-2. Deslizamiento relativo.	24
Figura 4-3. Par de contacto simplificado.	25
Figura 4-4. Par de contacto cilindro-plano.	26
Figura 4-5. Puntos clave sobre la superficie.	27
Figura 4-6. Superficie de contacto.	27
Figura 4-7. Zonas del área de influencia.	28
Figura 4-8. Mallado de la zona de contacto.	29
Figura 4-9. Distribución de tensiones en las zonas de contacto.	30
Figura 4-10. Diagrama de flujo de la automatización.	32
Figura 4-11. Validación del modelo.	34
Figura 5-1. Extrapolación de la fuerza resultante.	36
Figura 5-2. Extrapolación del deslizamiento.	37
Figura 5-3. Desplazamiento de los hilos.	38
Figura 5-4. Vista general del ensayo 4.	38
Figura 5-5. Vista general de cada zona de contacto.	39
Figura 5-6. Huellas de cada zona de contacto.	40
Figura 5-7. Presiones (1 micra).	42
Figura 5-8. Desgaste y presiones (3 micras).	43
Figura 5-9. Desgaste y presiones (5 micras).	43
Figura 5-10. Desgaste y presiones (8 micras).	44
Figura 5-11. Desgaste para cada constante de desgaste.	45
Figura 5-12. Evolución del número de ciclos con la constante de desgaste.	45
Figura 5-13. Simulación del modelo (ensayo 4).	46
Figura 6-1. Conclusiones.	47
Figura 6-2. Análisis cualitativo en zonas inferior y superior.	48
Figura 6-3. Análisis cualitativo en zona punzón.	48
Figura 6-4. Análisis cualitativo en zona exterior.	49

1 INTRODUCCIÓN

No hay nada como mirar, si quieres encontrar algo.

- J.R.R. Tolkien -

La diferencia, a veces, está en los pequeños detalles. Y es a raíz de esos pequeños detalles de los que surge el objetivo de este proyecto. Como parte de la tesis doctoral de Diego Erena [1], fue necesario realizar una serie de ensayos de fatiga con cables de acero. Es durante estos ensayos en los que se observan unas pequeñas huellas en la superficie de los hilos. El presente Trabajo Fin de Máster “*Análisis y simulación del desgaste en cables de acero sometidos a fatiga*” surge a raíz de analizar dichas marcas.

Un claro ejemplo de estas marcas puede verse en las siguientes imágenes, obtenidas con un microscopio electrónico de barrido durante la realización de la tesis:

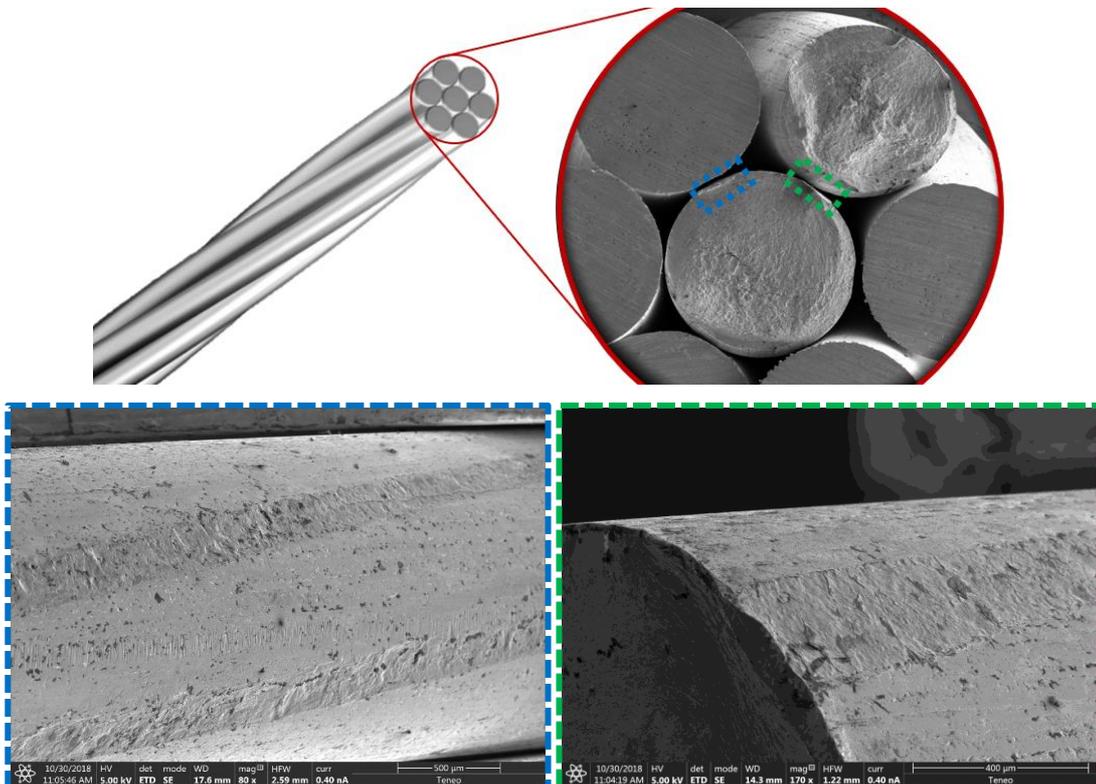


Figura 1-1. Marcas de los hilos.

Se observa cómo dichas marcas no sólo son visibles, sino que alcanzan una mayor profundidad en unas zonas que otras, generando unos planos que alteran la geometría del hilo y, por tanto, la distribución de tensiones y deformaciones a lo largo de la vida a fatiga del cordón.

Aunque se sabe que el origen de dichas marcas es el desgaste, como ya se ha analizado en trabajos como el de Llavori [2], es posible que éste no sea el único motivo. En un primer momento, no se descarta que en dichas marcas haya también deformación plástica.

Como objetivo del trabajo, se quiere diseñar un procedimiento numérico que permita predecir el desgaste por contacto durante el ensayo, y compararlo con los resultados experimentales.

1.1 Descripción del ensayo de fatiga

A modo de recordatorio, hay que mencionar que dichos ensayos se realizaron con una máquina en cuyo diseño formó parte el autor de este proyecto en el Trabajo Fin de Grado “*Diseño de máquina de ensayos a fatiga*” [3], de ahí que cobren especial importancia los resultados de estos.

Aunque el diseño final utilizado en los ensayos difiere del desarrollado en el proyecto (el cuál puede verse en la tesis doctoral), sí que la idea de éste y algunos puntos fueron incorporados. No obstante, la idea del ensayo en ambos casos era la siguiente:

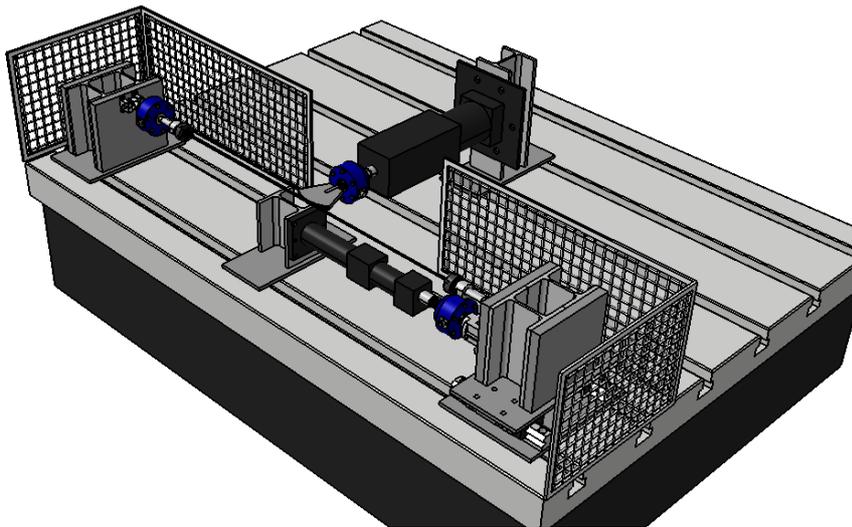


Figura 1-2. Diseño de máquina de ensayos a fatiga.

Básicamente, el ensayo consiste en un cable sujeto a dos soportes de forma que éste tenga una tensión previa, la cual se aplica mediante un actuador, y un segundo actuador que aplica una carga cíclica en el centro de la longitud libre de éste. El ensayo termina cuando, pasado un número de ciclos, se produce el fallo por fatiga y el cable o, mejor dicho, alguno de sus hilos, se rompe.

Un esquema simplificado de cómo se aplican tanto la precarga constante a lo largo del tiempo como el desplazamiento cíclico puede verse en la siguiente figura:

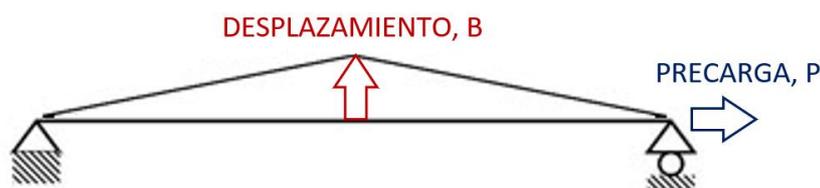


Figura 1-3. Esquema de la aplicación de las fuerzas sobre el cable.

Como parte de la tesis, todos los datos del ensayo quedaron guardados en un archivo *Excel*, el cual será de utilidad en el desarrollo de este trabajo. De todos los datos almacenados en dicho archivo, principalmente nos interesará conocer los siguientes para cada ensayo:

- **Precarga, P**, aplicada.
- **Desplazamiento, B**, de cada ciclo.
- **Vida** del cable en número de ciclos.
- **Hilo(s)** en los que se produce la rotura.

Con estos datos, en un principio, será posible establecer algún tipo de relación entre las condiciones del ensayo y las marcas que aparecen en el cable.

1.2 Propiedades del cable

Un asunto importante durante el análisis de este trabajo será conocer las propiedades y la geometría de los cables de acero utilizados durante los ensayos.

El material utilizado para el cable es acero AISI 316, cuya composición química es la siguiente:

Tabla 1-1. Composición química AISI 316.

Elemento	C	Si (máx.)	Mn (máx.)	P (máx.)	S (máx.)	Cr	Mo	Ni	N
Peso (%)	≤0.07	1.00	2.00	0.045	0.015	17-19	2-2.5	10-13	≤0.11

Este tipo de acero es uno de los aceros inoxidables austeníticos más utilizados, ya que tiene una gran resistencia a la corrosión y una gran resistencia a altas temperaturas. Algunas propiedades físicas que pueden resultar de interés de este tipo de acero son las siguientes [4]:

- **Densidad:** 8 kg/dm^3
- **Módulo elástico:** 210 GPa

Por otro lado, también será importante conocer la geometría de los cables. Cada cable está formado por siete hilos trenzados, cuyas dimensiones son las siguientes:

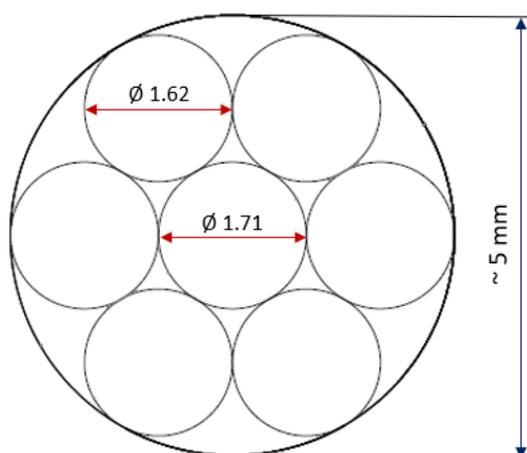


Figura 1-4. Dimensiones del cable.

siendo el diámetro total del cable de 5 mm aproximadamente.

Cabe destacar que, por pura geometría, el diámetro del cable interior es de un grosor algo mayor que el de los hilos exteriores. Así, se tendrán en cuenta los dos siguientes datos, que serán de suma importancia en el desarrollo de este proyecto:

$$\begin{aligned}\varnothing_{\text{exterior}} &= 1.62 \text{ mm} \\ \varnothing_{\text{interior}} &= 1.71 \text{ mm}\end{aligned}\tag{1-1}$$

En un primer momento, se decide que se hará un análisis 2D de un par de contacto simplificado, por lo que el resto de las dimensiones del ensayo no tienen mayor relevancia. Como parte de la tesis, se dispone de un modelo 3D del ensayo, el cuál servirá para la obtención de algunos datos de interés, como se verá más adelante.

1.3 Imágenes de microscopio previas

Como se ha comentado, observaciones previas que formaron parte de la tesis doctoral determinaron la existencia de dichas marcas, por lo que se dispone de material previo sobre el que empezar a trabajar. Una parte importante del estudio será analizar dicho material.

De la mayoría de los ensayos, se tienen imágenes de la sección del hilo fracturada obtenidas mediante un microscopio electrónico de barrido del Centro de Investigación, Tecnología e Innovación (CITIUS). Aunque en este caso las imágenes no se han obtenido durante la realización de este trabajo, sí que se ha hecho uso de otras herramientas, como se verá más adelante.

Haciendo uso de dichas imágenes junto con los datos de *Excel* antes comentados, es posible orientar la disposición de los cables y establecer en cuál de ellos se producen marcas de mayor tamaño ya que, como se ha apuntado, uno de los datos era el hilo que fallaba.

En primer lugar, para orientar la disposición de los cables será necesario establecer una nomenclatura para cada uno de los siete hilos del cable. De aquí en adelante, se ha utilizado la siguiente:

- El **hilo interior** es el situado en el interior del cable, teniendo contacto con los otros seis.
- El **hilo punzón** es el hilo sobre el que se aplica la fuerza del punzón en el ensayo de fatiga.
- El **hilo exterior** es el hilo más alejado de la zona de aplicación de la carga.
- El **hilo vecino 1** y el **hilo vecino 2** son los hilos adyacentes al hilo punzón.
- El **hilo superior** y el **hilo inferior** son los hilos adyacentes al hilo exterior, designándose superior o inferior según quedan situados en el ensayo.

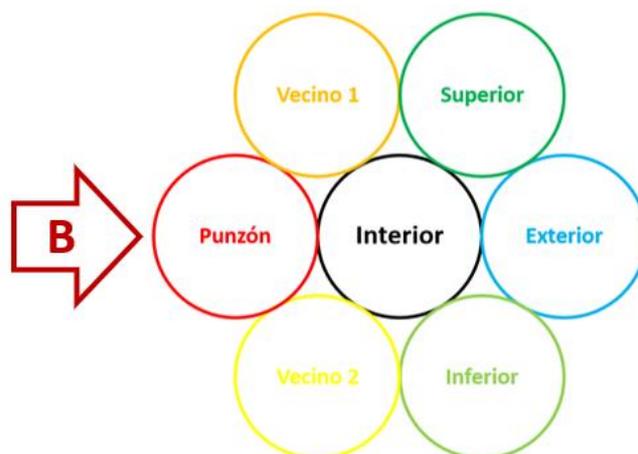


Figura 1-5. Orientación de los hilos.

Una vez establecido dicho criterio, comienza el análisis de las imágenes. Para ello, se establece la siguiente metodología de trabajo:

- Localizar en cada imagen el hilo en el que se produce la rotura.
- Determinar la posición del hilo que ha roto según los datos de los ensayos.
- Orientar el gráfico anterior y posicionar el resto de los hilos.

Considerando algunos ensayos como ejemplo y analizando sus imágenes, se tiene lo siguiente:

Tabla 1-2. Hilos rotos para diferentes ensayos.

Ensayo	Precarga, P (N)	Desplazamiento, B (mm)	Hilos rotos		
4	3000	50	-	Interior	Exterior
9	5000	40	Vecino	Interior	Exterior
11	2000	30	-	Interior	Exterior
31	5000	20	-	-	Exterior



Figura 1-6. Orientación de los hilos del ensayo 4.

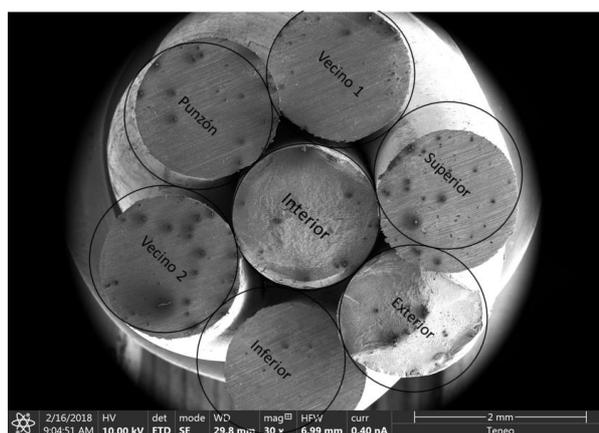


Figura 1-7. Orientación de los hilos del ensayo 9.

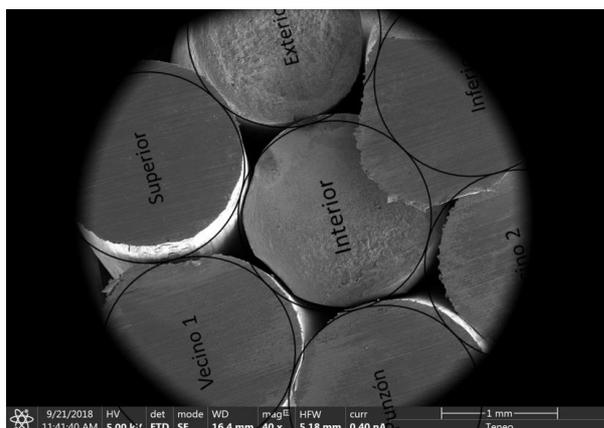


Figura 1-8. Orientación de los hilos del ensayo 11.



Figura 1-9. Orientación de los hilos del ensayo 31.

Para ajustar estas imágenes, se ha tenido en cuenta que, después del análisis de la tesis, se ha observado que la rotura del cable es debido a fatiga, y no a fretting fatiga. Es decir, la cara de fractura y el punto de iniciación de la grieta corresponden con la parte externa del hilo exterior, que es la que está sometida a mayor tensión axial debido a la precarga y la flexión del cable.

1.4 Metodología de trabajo

Una vez conocido el punto de partida y el material disponible, es necesario establecer una metodología de trabajo que nos permita avanzar en el estudio que se quiere hacer. Puesto que dicho análisis abarca diferentes enfoques, se establecen tres ejes de trabajo:



Figura 1-10. Metodología de trabajo.

- **Análisis de los datos de los ensayos**

Puesto que los ensayos forman parte de la tesis de Diego Erena, éstos ya estaban recogidos previo al desarrollo de este trabajo. Como parte de este trabajo estará la gestión de dichos datos para la obtención de información útil.

- **Trabajo de laboratorio**

Con el fin de obtener datos de interés sobre las marcas observadas sobre los cables, se hará uso de microscopios. Como ya se han comentado anteriormente, será necesario hacer uso de otras herramientas de las que se dispone en el CITIUS.

- **Modelo numérico**

La idea final será la de intentar relacionar los datos de los ensayos con las marcas observadas y desarrollar un modelo numérico que sea capaz de predecirlas.

Aunque en un principio puedan parecer procesos independientes y lineales, cada una de las líneas de trabajo está íntimamente relacionada con las otras dos, de manera que el desarrollo de este trabajo ha seguido un proceso constante de retroalimentación, de ensayo y error, y lo que aquí se desarrolla es la conclusión de éstos.

2 ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LOS ENSAYOS

Las ideas tienen que ir tomando forma. Se van haciendo realidad al trabajar en ellas, solo hay que ponerse en marcha.

- Mark Zuckerberg -

Una parte importante de cualquier estudio es analizar los datos de los que ya se dispone. Como ya se ha comentado anteriormente, durante la tesis doctoral de Diego Erena se han recogido una serie de datos y se han obtenido una serie de imágenes con el microscopio cuyo estudio previo será de gran utilidad para no partir de cero.

Aunque ya se ha mencionado, es importante destacar el material previo que ha formado parte del estudio realizado durante la tesis doctoral y del cual se dispone antes del comienzo de este trabajo:

- Un **archivo de Excel** con los datos de todos los ensayos.
- Las **imágenes** obtenidas con el microscopio electrónico de barrido.
- Un **modelo 3D** del ensayo completo.

A continuación, se detalla la importancia de este material y qué utilidad ha tenido en este trabajo.

2.1 Análisis de los datos en Excel

Los datos de todos los ensayos se encuentran guardados en un archivo, lo que hace que puedan utilizarse para sacar conclusiones de ellos sin necesidad de repetir o realizar dichos ensayos.

De dicho archivo, el cual es bastante extenso, principalmente nos interesará conocer los siguientes valores:

- **Número de ensayo**
Es necesario para tener localizadas las muestras. En total, se realizaron 45 ensayos.
- **Precarga, P**
Se han realizado ensayos con un rango de aplicación de precarga de 2000 N a 7000 N.
- **Desplazamiento, B**
Se han realizado ensayos con un rango de desplazamientos de 20 mm a 60 mm.
- **Vida**
Número total de ciclos que ha durado el ensayo hasta el fallo del cable.

2.2 Selección de las muestras

Como se ha visto, se dispone de un gran número de ensayos que analizar, por lo que será necesario determinar qué ensayos pueden resultar de interés y cuáles no. De esta manera, los resultados serán de una mayor fiabilidad y los objetivos del proyecto quedarán suficientemente acotados.

Para la selección de las muestras, se hará lo siguiente:

- Una **inspección visual** de las muestras.
- Un **análisis de las imágenes** del microscopio óptico de barrido.

2.2.1 Inspección visual

En primer lugar, se hizo una inspección visual de las muestras. El objetivo es detectar, a simple vista, qué muestras pueden tener unas marcas más profundas y, por tanto, ser más interesantes para el análisis. Hay que tener en cuenta que la casuística de los ensayos puede hacer que una mala elección de la muestra suponga unos resultados y conclusiones incorrectos.

Algunos ejemplos de las muestras obtenidas durante los ensayos y que están disponibles para analizar pueden verse en la siguiente figura:



Figura 2-1. Vista general de las muestras.

En algunos casos, las marcas en la superficie del hilo son evidentes. Un ejemplo de ello puede verse en la siguiente figura:



Figura 2-2. Detalle de una de las muestras.

2.2.2 Análisis de las imágenes

Como puede verse, es posible observar a simple vista algunas de las huellas de la superficie de los hilos. No obstante, para una mejor elección de las muestras, será necesario analizar estas marcas de una manera más detallada, para lo cual se hará uso de las imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de barrido.

Cabe incidir en el hecho de que las imágenes obtenidas con el microscopio electrónico de barrido no se han obtenido durante la realización de este trabajo, sino que forman parte del material utilizado durante la tesis doctoral, las cuales se han cedido. Por esta razón, no se detalla el proceso necesario para obtenerlas.

Analizando las imágenes del microscopio, se observa que existen ensayos en los que las huellas no se aprecian con claridad. Es posible que, aunque a simple vista puedan verse, dichas marcas no sean lo suficientemente profundas o que incluso cueste distinguirlas. Este tipo de muestras no resultarán de interés ya que será más difícil tomar las medidas de las huellas y, por tanto, los resultados obtenidos serán menos fiables.

Algunos ejemplos de esto pueden verse a continuación:

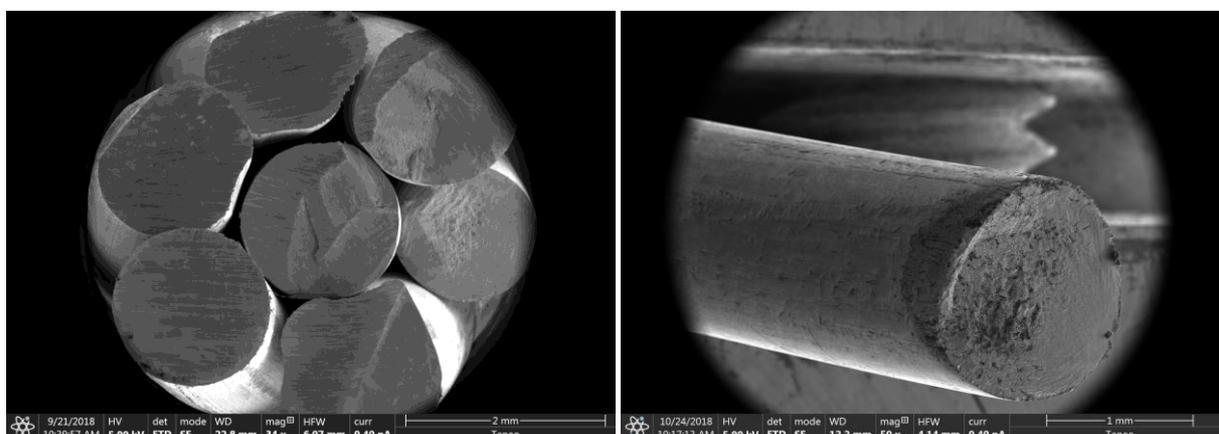


Figura 2-3. Ensayo 20.

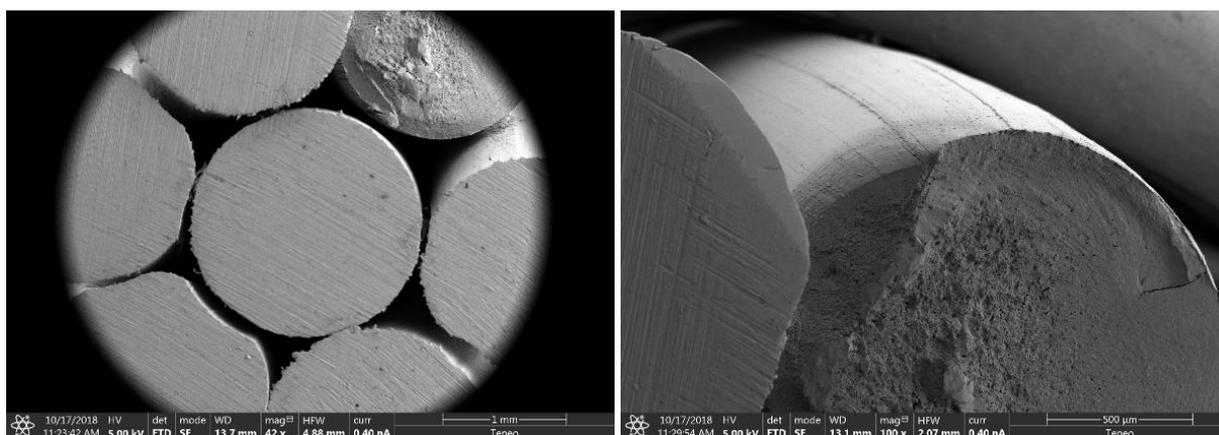


Figura 2-4. Ensayo 31.

Por otro lado, en otras muestras sí que se aprecian unas marcas mucho más pronunciadas y evidentes, corroborando lo que se podía apreciar a simple vista. Este tipo de muestras resultarán de mayor interés ya que facilitarán la medición de las huellas, que se hará por contraste con la superficie previa al desgaste. De esta manera, podrán obtenerse unas conclusiones más fiables entre estas mediciones y los parámetros del ensayo correspondiente.

Algunos ejemplos de esto pueden verse a continuación:

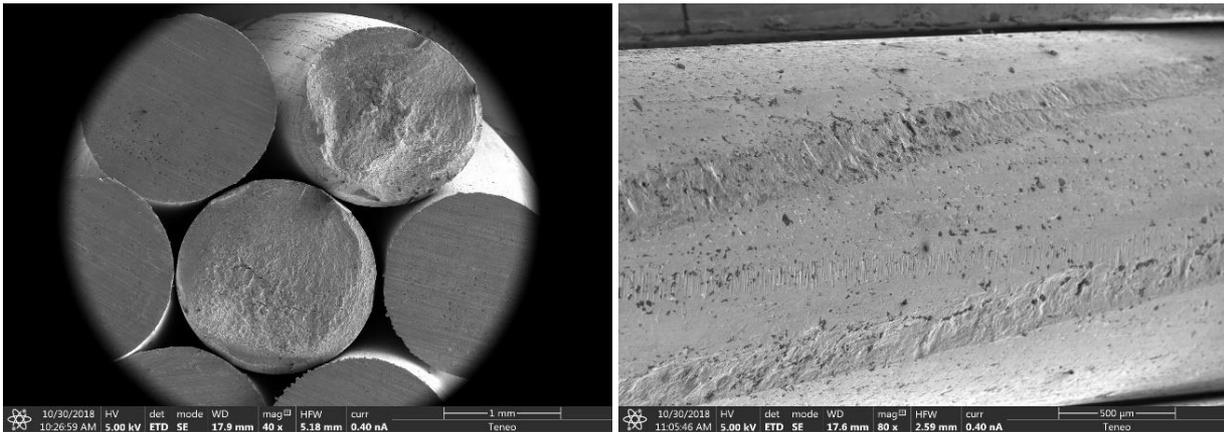


Figura 2-5. Ensayo 4.

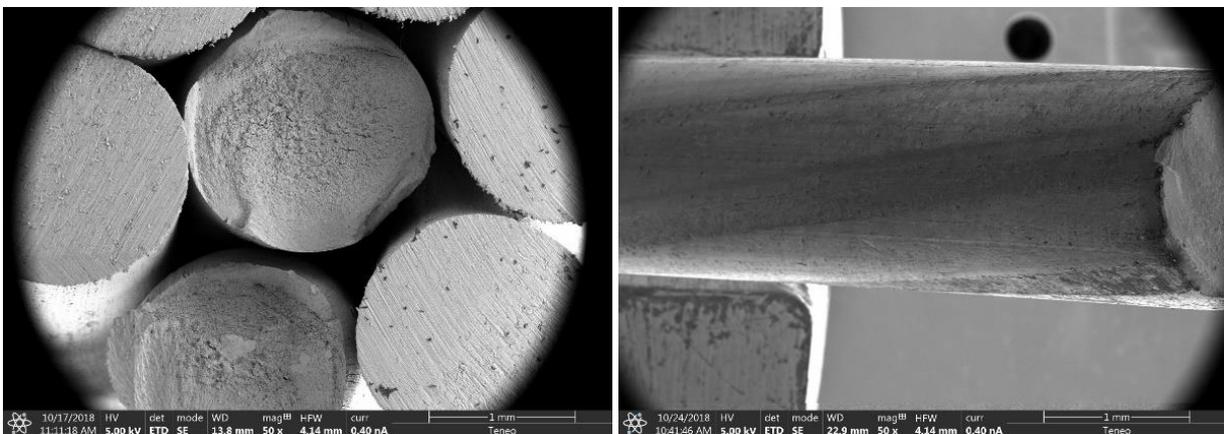


Figura 2-6. Ensayo 32.

2.2.3 Muestras seleccionadas

Después de realizar los análisis anteriores, será necesario tomar un número de muestras que permita acotar la envergadura del trabajo. Como se verá más adelante, la realización de cada medición y su posterior procesamiento requiere una gran inversión de recursos y de tiempo, los cuales son limitados en la realización de este proyecto. Por tanto, un número demasiado elevado de las muestras a analizar pueden poner en riesgo la viabilidad de éste.

Finalmente, se decide tomar las siguientes muestras:

Tabla 2-1. Datos de los ensayos elegidos.

Ensayo	Precarga, P (N)	Desplazamiento, B (mm)	Vida (ciclos)
4	3000	50	33855
32	6000	20	225800

En adelante, estas muestras serán las que se tomen para realizar los análisis correspondientes que se desarrollan en esta memoria.

2.3 Modelo 3D

Durante la realización de la tesis doctoral, se realizó un modelo de elementos finitos del ensayo con el cable completo. Se trata de un modelo elástico 3D que modela el comportamiento global del cable teniendo en cuenta también el contacto entre los distintos hilos. Una vista de cómo se ha modelado dicho cable puede verse en la siguiente figura:

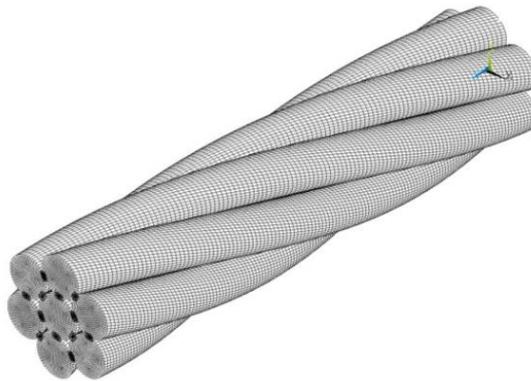


Figura 2-7. Modelo 3D del cable.

De este modelo se han extraído datos de importancia como los siguientes:

- La presión en los distintos pares de contacto del cable interior.
- El desplazamiento relativo entre cada hilo y el hilo interior.

Estos datos se obtendrán justo de la sección central de hilo, que será donde más flexión haya. Además, aproximadamente, es ésta la sección que se ha medido en el laboratorio con el microscopio.

3 TRABAJO DE LABORATORIO

Me enseñaron que el camino del progreso no es ni rápido ni fácil.

- Marie Curie -

Aunque se dispone de imágenes previas obtenidas con un microscopio electrónico de barrido, durante el desarrollo de este trabajo será necesario hacer uso de otras herramientas, con el fin de observar con un mayor detalle las huellas observadas. Para ello, se decide hacer uso de un microscopio confocal, el cual se encuentra en las instalaciones del CITIUS.

Para hacer estas nuevas mediciones, se tomarán las muestras elegidas en el apartado anterior, ya que han determinado ser las de mayor interés. Hay que destacar que estas medidas se harán sobre el hilo interior por ser el que tiene las huellas de los otros seis y, además, ser el único que mantiene la forma cilíndrica perfecta, no helicoidal como el resto, siendo más sencillo realizar las mediciones.

Por otro lado, puesto que las mediciones tendrán la peculiaridad de que deberán hacerse alrededor de toda la superficie del hilo, será necesario diseñar algún proceso o útil que nos permita hacerlo de la forma más precisa posible. Las pequeñas dimensiones del hilo complicarán este aspecto.

3.1 Microscopio confocal

El microscopio confocal es un microscopio que emplea una técnica óptica de imagen para incrementar el contraste y reconstruir imágenes tridimensionales utilizando un *pinhole* espacial, que elimina la luz desenfocada y los destellos de la lente en especímenes que son más gruesos que el plano focal.

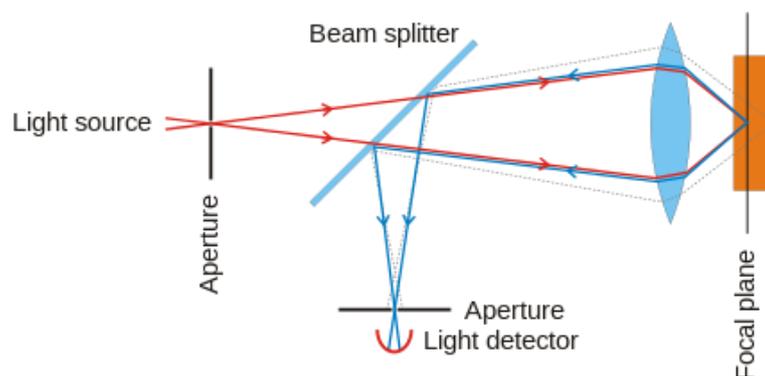


Figura 3-1. Microscopía confocal.

En este caso, puesto que es del que se dispone en el CITIUS, el microscopio utilizado es el modelo *S Neox* de la compañía SENSOFAR [5].



Figura 3-2. Sensofar S Neox.

Hay que destacar que el microscopio *S Neox* tiene más usos aparte de los aquí indicados, como puede verse en su hoja técnica. Sin embargo, para este trabajo, solamente se ha hecho uso de dos modos:

- *Brightfield*
- *Confocal*

El primero de ellos, se ha utilizado para vistas generales, mientras que el segundo, para sacar los perfiles de las huellas. Cuando se observen las imágenes, se verá de forma clara cuáles pertenecen a cada uno de los modos.

3.1.1 Preparación de los equipos

Para realizar cada una de las mediciones, son necesarios los siguientes tres equipos conectados:

- Microscopio
- Controlador del microscopio
- Ordenador



Figura 3-3. Montaje de los equipos.

En cuanto al microscopio, éste cuenta con diferentes objetivos para realizar las mediciones. Las especificaciones de algunos de éstos son las siguientes:

Brightfield							
MAG	2.5X	5X	10X	20X	50X	100X	150X
NA	0.075	0.15	0.30	0.45	0.80	0.90	0.95
WD (mm)	6.5	23.5	17.5	4.5	1.0	1.0	0.2
FOV ¹ (µm)	6800x5675	3400x2837	1700x1420	850x710	340x284	170x142	113x95
Spatial sampling ² (µm)	5.52	2.76	1.38	0.69	0.28	0.14	0.09
Optical resolution ³ (µm)	1.87	0.93	0.46	0.31	0.17	0.15	0.14
Measurement time ⁴ (s)	>3						

Confocal							
Vertical resolution ⁵ (nm)	300	75	25	8	3	2	1
Maximum slope ⁶ (°)	3	8	14	21	42	51	71

Figura 3-4. Objetivos y especificaciones.

Los parámetros más importantes que habrá que tener en cuenta a la hora de seleccionar la lente son los siguientes:

- Aumento (*MAG*)
- Distancia de trabajo (*WD*)
- Campo de visión (*FOV*)
- Resolución
- Pendiente máxima

Hay que tener en cuenta que a medida que se toma un aumento mayor, la resolución aumenta, pero tanto la distancia de trabajo como el campo de visión disminuye. Por tanto, es posible que objetivos con demasiado aumento dificulten o impidan el trabajo que se quiere realizar.

Lo ideal será tomar objetivos con poco aumento para vistas más generales, y hacer inspecciones específicas de ciertas zonas con un aumento mayor.

3.1.2 Datos obtenidos

Una vez realizadas las mediciones, es posible obtener un archivo (*.plx*) con los datos de éstas. Por tanto, una vez obtenido dicho archivo, mediante el software *SENSOSCAN*, es posible procesar dicha información y obtener imágenes y gráficas como las que se verán a continuación.

Este software forma parte de los equipos comentados anteriormente, pero se ha hecho uso de una versión de prueba que ha permitido procesar los datos posteriormente sin necesidad de acudir al CITIUS constantemente.

3.2 Diseño del útil

Con el fin de realizar los ensayos con la mayor precisión posible, es necesario diseñar un útil que permita fijar la pieza de una forma simple y correcta. Además, para darle una mayor utilidad, deberá de poder permitir giros de 60° de una forma exacta, ya que es la distancia angular a la que se encuentra cada contacto. De esta manera, situando una de las huellas, para situar el resto sólo será necesario girar el útil.

Finalmente, se opta por un diseño como el que se muestra a continuación:

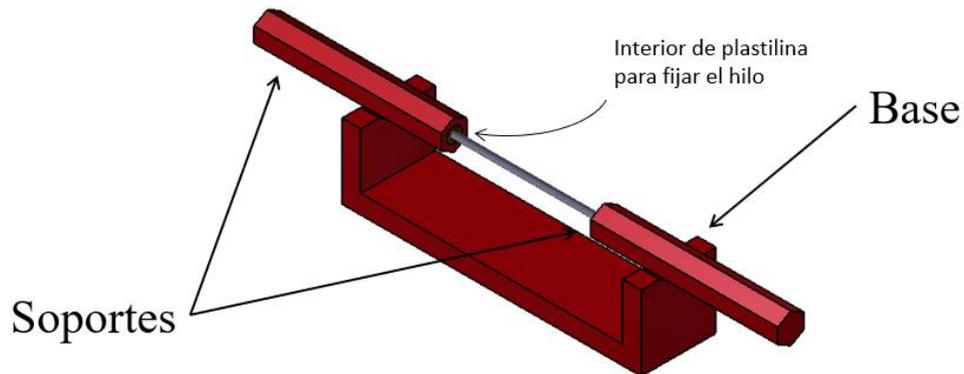


Figura 3-5. Diseño del útil.

Dicho diseño está formado por los siguientes elementos:

- Una **base** que permita darle robustez y estabilidad al útil.
- Dos **soportes** con forma de prisma hexagonal para permitir los giros de 60° .
- Interior de **plastilina** para fijar el hilo de una forma sencilla.

Para el diseño de las piezas, se ha hecho uso del software *Catia V5* y para su fabricación, se ha utilizado la impresora 3D de los laboratorios. Para dar una imagen más fiel de cómo sería el útil, en la figura siguiente se muestra una imagen del montaje:

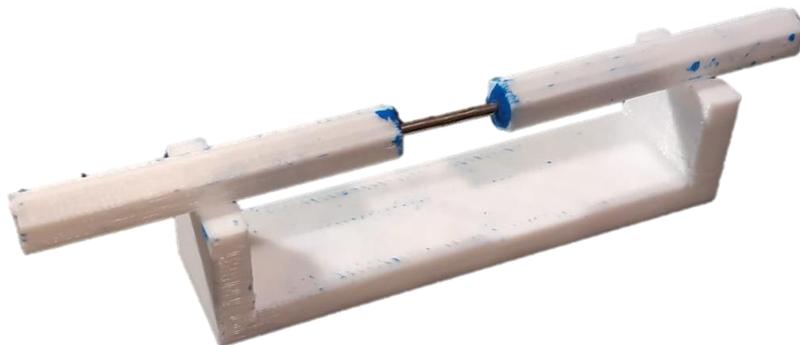


Figura 3-6. Montaje del útil.

3.3 Realización de una inspección

Para realizar una inspección con el microscopio, es fundamental la colocación de la muestra que se quiere observar, ya que de ello dependerá la calidad de la imagen que se obtenga. Hay que tener en cuenta que este microscopio funciona por contraste de luz, por lo que una mala colocación puede aportar unos resultados erróneos.

Como se ha visto anteriormente, se ha diseñado un útil que permite realizar de una manera simple los giros para observar cada huella. No obstante, es importante que, tras cada giro, la pieza quede lo más perpendicular posible a la dirección del objetivo.

La inspección con el microscopio se centrará en obtener tres tipos de imágenes

- Una **vista general** de la zona de inspección.
- Una **vista confocal** de la huella.
- Un **perfil** de la superficie del hilo.

Como se ha indicado, se hará uso de dos de los modos del microscopio.

3.3.1 Vista general

Una vez situado el hilo en la posición correcta, se utiliza el modo *brightfield* para obtener una vista general de la zona de inspección. Esta vista será importante para situar correctamente la inspección, teniéndose una imagen como la que aparece a continuación:

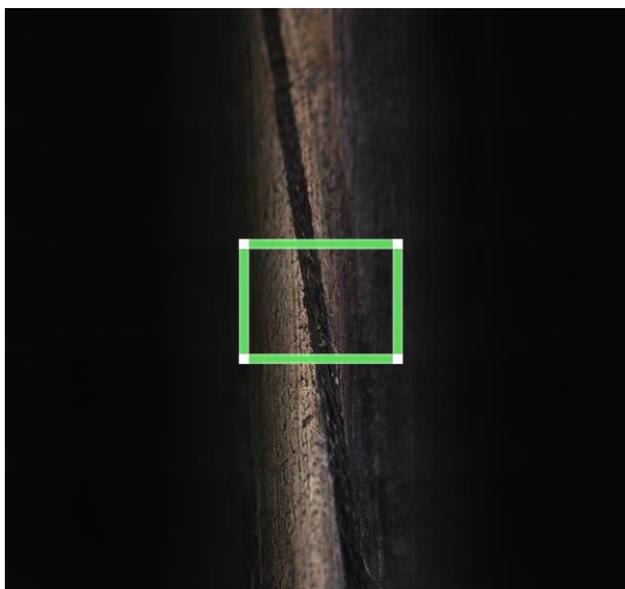


Figura 3-7. Vista general (Ejemplo).

En esta imagen, se observa con claridad la huella sobre el hilo y, como era de esperar, ésta sigue una forma helicoidal. Esto se debe a que el hilo interior se mantiene recto mientras que los otros seis se sitúan a su alrededor formando hélices. Esto provoca que la huella que éstos dejan tenga esa forma.

Un aspecto importante de esta vista es que es posible hacer uso de un patrón de imágenes para abarcar una zona de inspección mayor. Por otro lado, puesto que no es necesaria una alta resolución, también se puede utilizar un objetivo con un aumento menor.

Por último, en dicha zona de inspección es posible indicar la zona o las zonas donde se quiere hacer una inspección más detallada con el modo *confocal*, correspondiendo ésta con el rectángulo que se ve en la *Figura 3-7*.

3.3.2 Vista confocal

Haciendo uso del modo confocal, es posible obtener una reconstrucción de la superficie que se desee. Utilizando la vista general para cuadrar la zona de inspección, se obtiene la siguiente imagen:

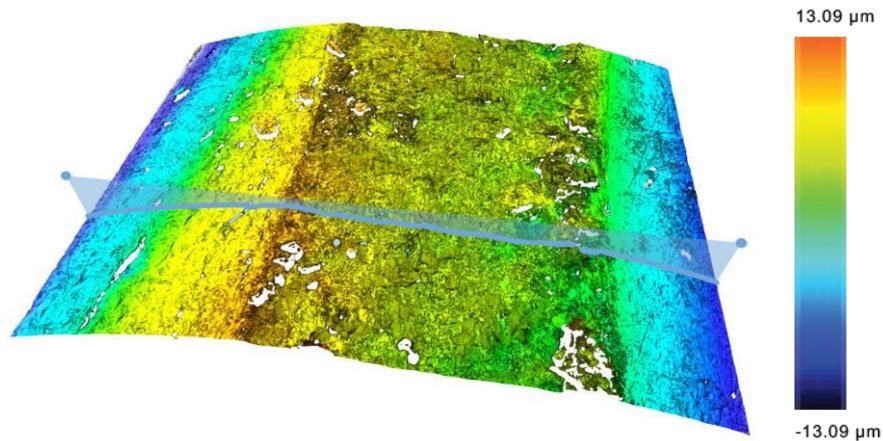


Figura 3-8. Vista confocal (Ejemplo).

Se aprecia un mapa de puntos de la superficie del hilo, donde la escala de colores representa la altitud de cada punto con respecto al punto medio del conjunto, de ahí que algunos valores sean negativos.

3.3.3 Perfil de la superficie

Sobre la superficie de la imagen anterior, es posible intersecar planos para obtener el perfil de ésta:

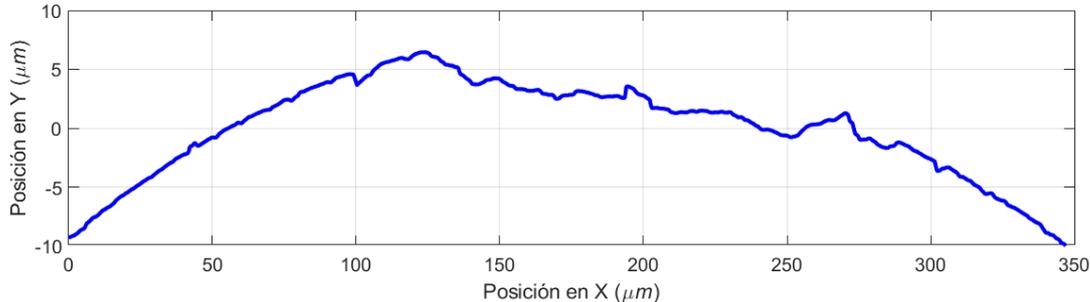


Figura 3-9. Perfil del hilo (Ejemplo).

Se obtiene una línea con la altitud y la posición de cada punto, destacando el hecho de que la escala de la gráfica está en micras, de ahí que las marcas observadas adquieran una especial relevancia. Esta imagen será de gran utilidad para realizar medidas sobre la huella.

3.4 Determinación del motivo que provoca las marcas sobre el cable

Un asunto importante, como se ha mencionado al inicio, es determinar el motivo de las huellas observadas. Aunque en un primer momento se ha considerado que éstas son debidas al desgaste por el roce de los hilos, es necesario verificar que no existe una deformación plástica inicial.

Se plantean tres pruebas distintas para corroborar esto:

- **Prueba 1:** cable sin ensayar.
- **Prueba 2:** cable con precarga y desplazamiento máximos (1 ciclo).
- **Prueba 3:** cable con un ensayo de fatiga completo.

3.4.1 Cable sin ensayar

Como primera parte de las pruebas, se examina un cable sin ningún tipo de ensayo o fuerza aplicada sobre él. Para ello, se toma directamente un trozo del rollo de cable de acero del laboratorio.

El objetivo de esta prueba es determinar si es posible que dichas marcas vengan ya hechas de fábrica, siendo éstas derivadas del proceso de fabricación.

Aunque cuesta localizar dichas marcas, se obtienen las siguientes imágenes de microscopio:

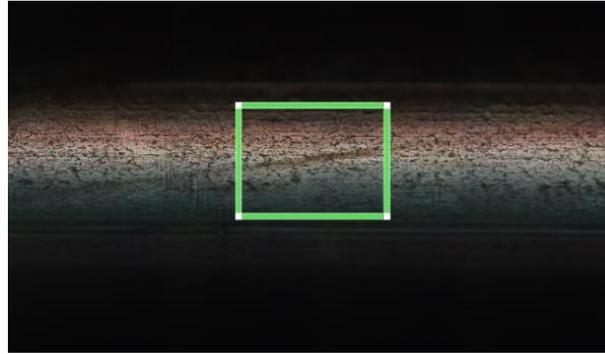


Figura 3-10. Vista general (Prueba 1).

Se observan marcas similares a las del ensayo, pero mucho menos marcadas. Por tanto, es posible que dichas huellas, aunque menos profundas, vengan ya marcadas de fábrica. Para corroborar esto, se obtiene el perfil de la superficie del cable:

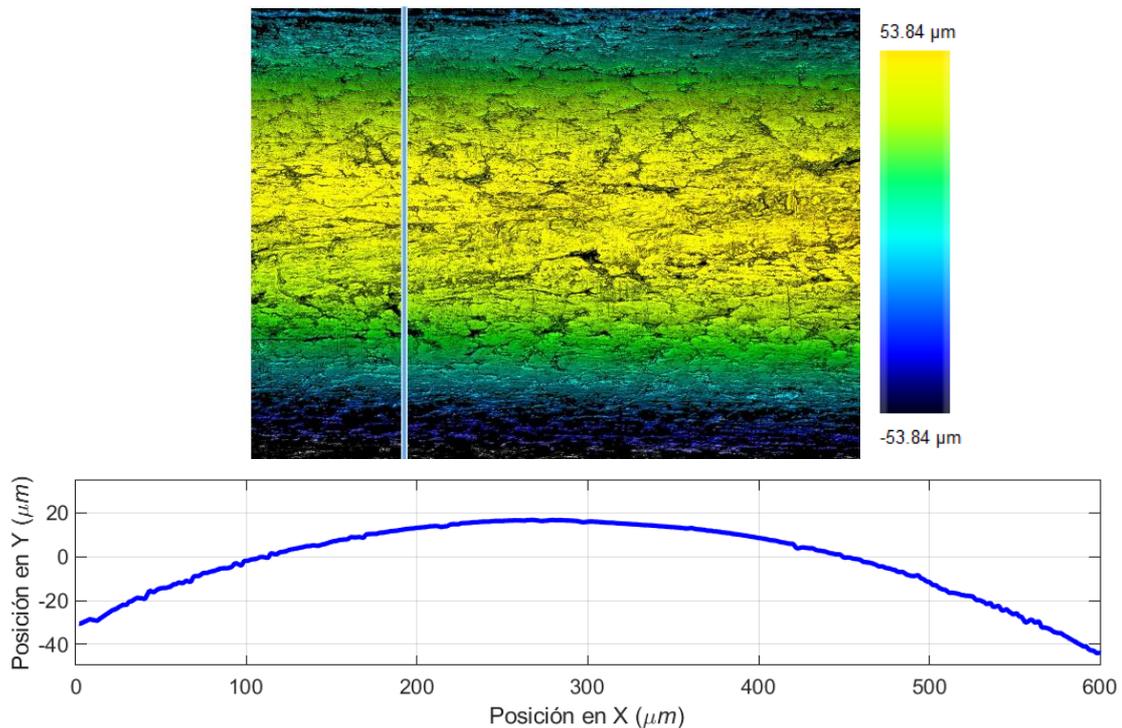


Figura 3-11. Perfil del hilo (Prueba 1).

En este caso, puede verse con mayor detalle cómo las marcas anteriores realmente no se aprecian en el perfil del cable. Es posible que se trate de deformación plástica o desgaste despreciables.

Por tanto, se puede determinar que las huellas observadas no se aprecian previo al ensayo de fatiga.

3.4.2 Cable con precarga y desplazamiento máximos

En segundo lugar, se procede a medir un cable con un solo ciclo. Para ello, se le aplicará la precarga y el desplazamiento más altos de los utilizados en los ensayos. Los valores correspondientes son los siguientes:

- **Fuerza aplicada en la precarga:** $P = 8000 \text{ N}$
- **Desplazamiento del punto medio:** $B = 50 \text{ mm}$

El objetivo de esta observación será determinar si las marcas que aparecen sobre el cable son debidas a las cargas iniciales a las que éste es sometido, apareciendo deformaciones plásticas.

Se obtienen las siguientes imágenes de microscopio:

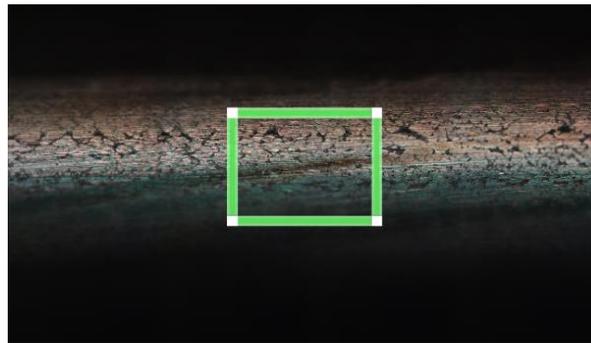


Figura 3-12. Vista general (Prueba 2).

Se observan marcas similares a las observadas en la primera prueba. No obstante, queda verificar si éstas corresponden con una huella o si, como ocurría anteriormente, son sólo una marca visual:

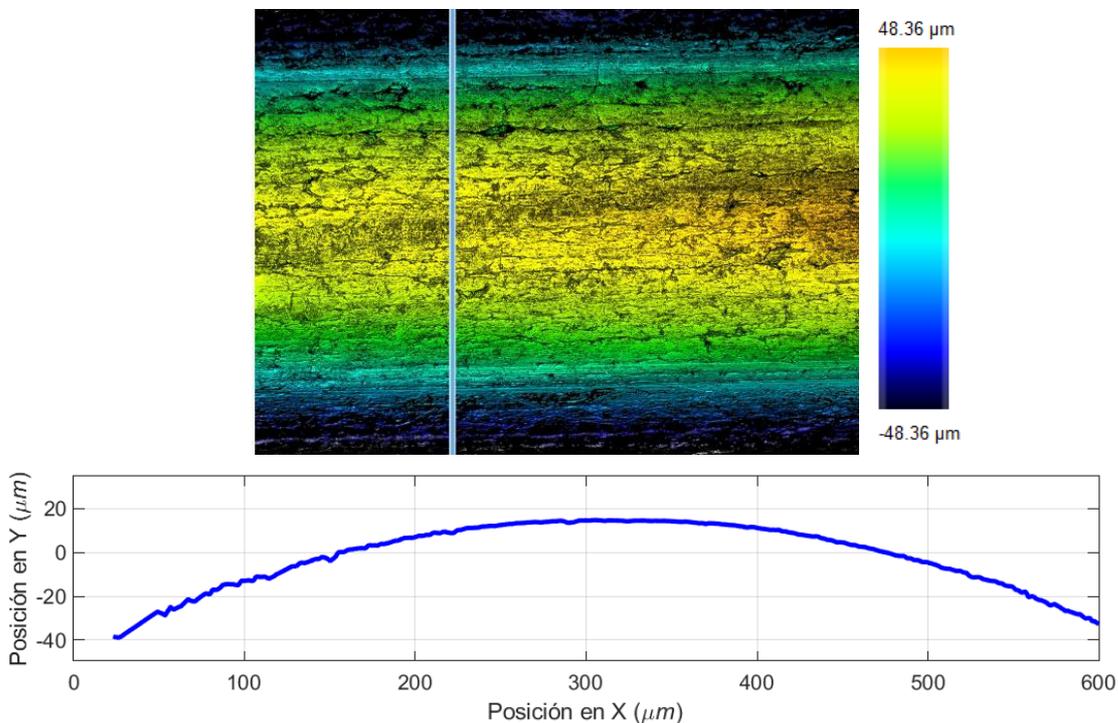


Figura 3-13. Perfil del hilo (Prueba 2).

De nuevo, puede verse cómo las marcas no se aprecian en el perfil del cable. Se puede determinar que dichas huellas no aparecen en el hilo por el mero hecho de aplicar una carga estática sobre el cable, que debería ser suficiente para la aparición de deformación plástica.

Por tanto, se descarta que el origen de las huellas sea deformación plástica.

3.4.3 Cable con ensayo de fatiga completo

Por último, se procede a medir un cable sometido a un ensayo de fatiga completo. Se ha elegido el ensayo número 32, cuyos datos son los siguientes:

Tabla 3–1. Datos del ensayo 32.

Ensayo	Precarga, P (N)	Desplazamiento, B (mm)	Vida (ciclos)
32	6000	20	225800

Se tienen las siguientes imágenes:

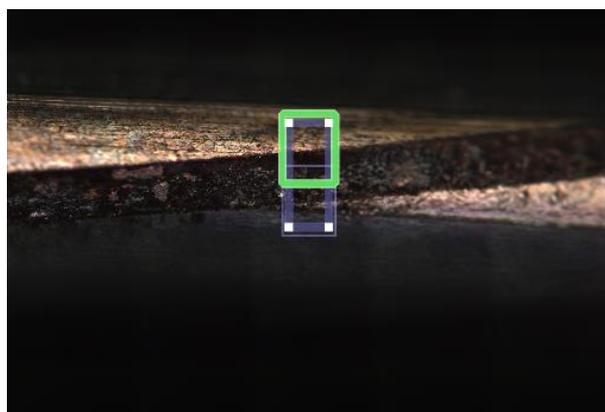


Figura 3-14. Vista general (Prueba 3).

Ahora sí, se observan las marcas con mucha más claridad que en las dos pruebas anteriores. Se observa también el perfil del hilo:

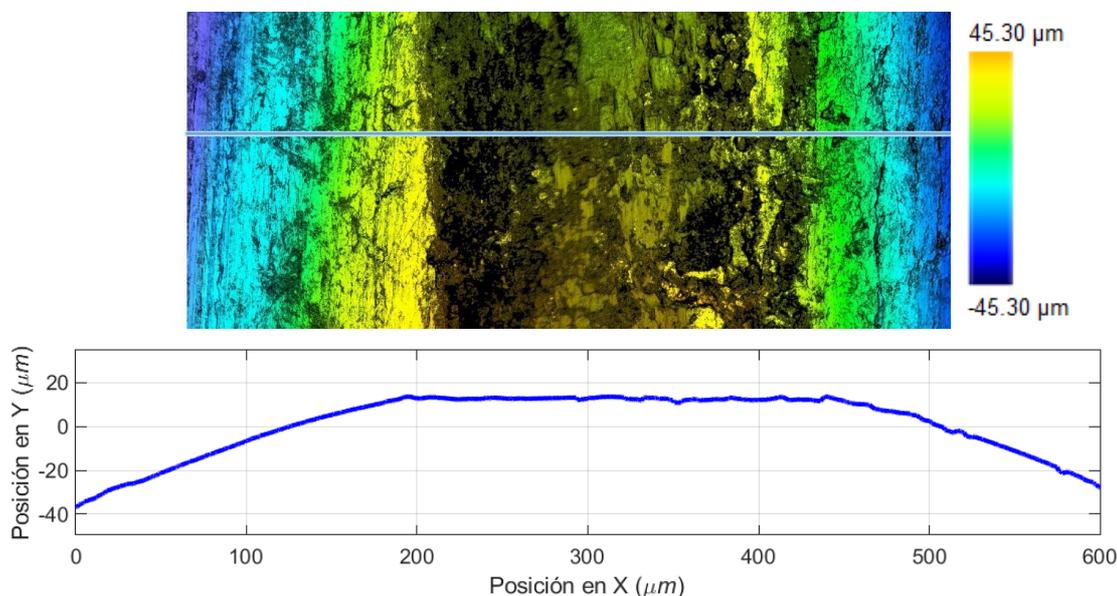


Figura 3-15. Perfil del hilo (Prueba 3).

En este caso, sí se aprecian de una forma clara la huella sobre el hilo, a diferencia de los dos ensayos anteriores. Se puede afirmar que dichas huellas aparecen durante al ensayo de fatiga.

Por tanto, se confirma la hipótesis inicial de que las huellas son solamente debidas al desgaste por el contacto de los hilos durante el ensayo de fatiga.

4 MODELO NUMÉRICO

Los que pueden imaginar cualquier cosa, pueden crear lo imposible.

- Alan Turing -

Una vez obtenidas las conclusiones a raíz de las observaciones en el laboratorio, surge la idea de desarrollar un modelo numérico que ayude a predecir las huellas sobre el hilo. Como ya se ha visto, el motivo de estas huellas es el desgaste producido por el movimiento relativo de los hilos durante el ensayo de fatiga.

Para simular el comportamiento de este desgaste, se hará uso del modelo de Archard, el cual establece una relación lineal entre la presión en un punto y el desgaste producido sobre éste. Del modelo, por tanto, será necesario extraer la presión entre los hilos.

Por otro lado, como ya se comentó anteriormente, la distribución de tensiones dependerá de la forma de los hilos, de manera que irá variando a medida que el cable se desgaste. El modelo, por tanto, deberá ir actualizando la geometría a medida que los hilos se desgastan.

En conclusión, será necesario definir un modelo numérico que sea capaz de obtener una distribución de presiones en las superficies de contacto, calcular el desgaste en cada punto y actualizar la geometría acorde a éste, volviendo a realizar de nuevo todo el proceso hasta que el ensayo de fatiga finalice.

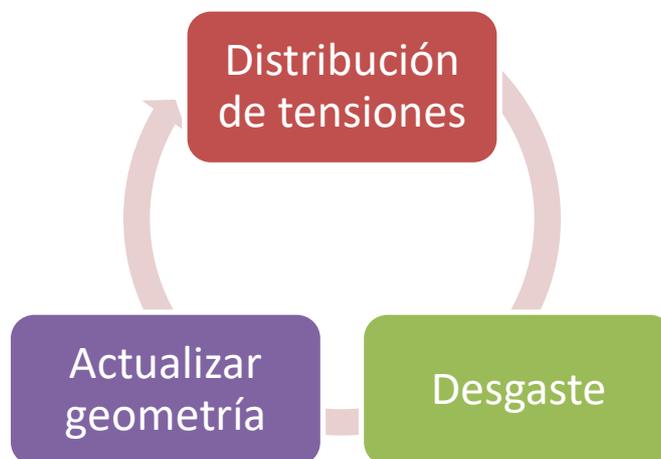


Figura 4-1. Ciclo del modelo numérico.

4.1 Modelo de Archard

El modelo de Archard [6] [7] es un modelo simple que se utiliza para describir el desgaste por deslizamiento, el cual plantea una variación del desgaste inversamente proporcional a la dureza del material y directamente proporcional a la carga normal. La ecuación formulada por Archard establece que:

$$V = \frac{K}{H} \cdot F \cdot s \quad (4-1)$$

donde V es el volumen de material eliminado, K es el coeficiente de desgaste (adimensional), H es la dureza de la superficie, F es la carga normal y s es la distancia de deslizamiento. En adelante, se considerará el parámetro K/H como el coeficiente de desgaste (dimensional).

Dividiendo entre el área de contacto, la ecuación anterior puede ser aplicada a nivel local. Así, en un modelo plano, la expresión que define el desgaste sería [8]:

$$h = \frac{K}{H} \cdot P_c \cdot s \quad (4-2)$$

donde h es la profundidad del desgaste y P_c es la presión.

Para el caso concreto de este ensayo, la distancia de deslizamiento se define como:

$$s = N \cdot 2\delta_z \quad (4-3)$$

siendo $2\delta_z$ el deslizamiento relativo entre los dos hilos a lo largo de un ciclo completo y N el número de ciclos. Para este modelo, sólo se tendrá en cuenta el deslizamiento en la dirección normal a la sección del cable, como se muestra en la siguiente figura:

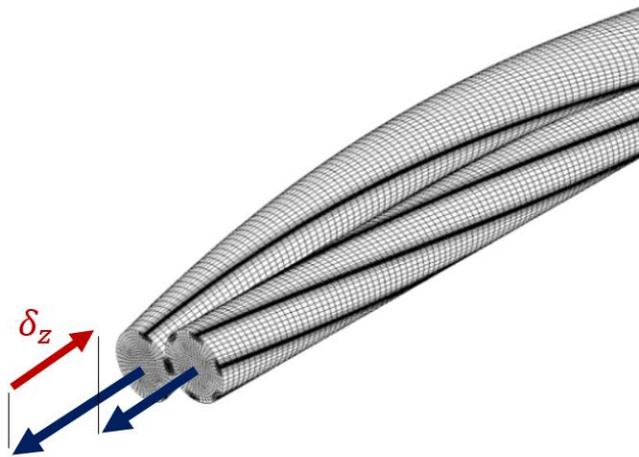


Figura 4-2. Deslizamiento relativo.

Sustituyendo (4-3) en (4-2), quedará la expresión:

$$h = \frac{K}{H} \cdot N \cdot 2\delta_z \cdot P_c \quad (4-4)$$

que será la expresión utilizada en adelante. A modo de simplificación, se considerará que el deslizamiento relativo entre los hilos se mantendrá constante durante todo el ensayo. Así, salvo la distribución de presiones, que dependerá en todo momento de la geometría, el resto de los parámetros serán constantes.

Por tanto, para conocer el desgaste producido sobre un punto, será necesario conocer los siguientes parámetros:

- El **coeficiente de desgaste (K/H)** depende del material y de las condiciones del ensayo. Este valor será necesario estimarlo para el ensayo u obtenerlo de la literatura.
- La **distribución de presiones (P_c)** es desconocida a priori.
- El **número de ciclos (N)** se tiene de los datos del ensayo.
- El **deslizamiento relativo (δ_r)** es desconocido a priori.

Para obtener los dos datos que faltarían, se decide hacer uso de dos modelos numéricos.

Por un lado, el deslizamiento relativo se obtendrá del modelo 3D utilizado durante la tesis, siendo por tanto éste un dato conocido.

Por otro lado, para la distribución de tensiones, como ya se ha comentado, será necesario desarrollar un modelo 2D que permita obtenerla, como se verá a continuación.

4.2 Modelo de ANSYS

Para el modelo numérico, se hará uso del módulo *Mechanical APDL* del software *ANSYS*. Dicho programa permite realizar simulaciones numéricas mediante modelos de elementos finitos, en los cuáles habrá que definir la geometría y las condiciones de contorno. Todo ello se realiza a través de una serie de comandos de texto, resultando de gran ayuda en este trabajo, como se verá más adelante.

Como ya se comentó, considerar la geometría completa del ensayo puede ser un proceso bastante complejo debido al alto número de contactos entre los distintos hilos. Para facilitar este proceso, se decide hacer un análisis 2D de un par de contacto simplificado entre el hilo interior y uno de los exteriores, como se muestra en la siguiente figura:



Figura 4-3. Par de contacto simplificado.

De esta manera, definiendo un valor F y una distancia de deslizamiento para cada par, es posible simular cada uno de los contactos de manera independiente. Estos valores será necesario estimarlos a raíz de las presiones de contacto obtenidas del modelo 3D.

4.2.1 Definición de la geometría

Como se verá más adelante, este apartado es uno de los más relevantes, ya que de él depende la eficacia del modelo. No sólo es necesario definir la geometría del par de contacto, sino que además se debe hacer de manera que permita que ésta se pueda actualizar.

Para definir la geometría de un modelo de *ANSYS*, es necesario seguir el siguiente proceso:

- Definir los **puntos clave (*keypoints*)** de la geometría.
- Trazar **líneas** entre cada par de puntos.
- Definir las **áreas** de mallado.

4.2.1.1 Puntos clave (*keypoints*)

Para definir los puntos clave se hará uso de coordenadas polares. Para ello, se definirá el origen de unos ejes locales en el centro la circunferencia de cada uno de los hilos.

Hay que destacar que sólo será necesario definir los puntos en la zona más cercana al contacto entre los hilos, que son los que se verán influenciados por éste, y no la circunferencia completa. De esta manera, se reduce el número total de elementos y, por tanto, el tiempo de computación.

Para definir esta zona de influencia, se hará uso de la mecánica de contacto de Hertz, la cual define el contacto entre un cilindro y una superficie plana [9]:

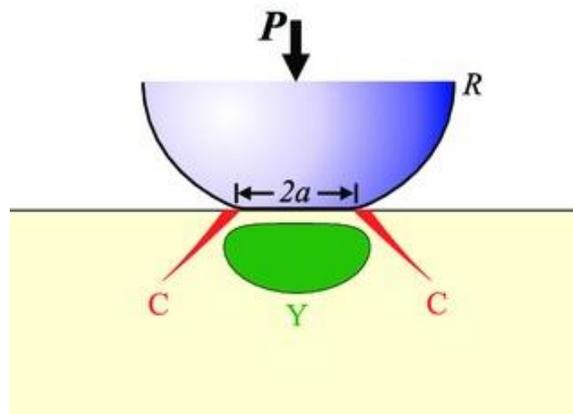


Figura 4-4. Par de contacto cilindro-plano.

Para el caso de dos cilindros en contacto, es común utilizar esta simplificación debido a que la zona de contacto es tan pequeña que puede aproximarse a un contacto plano.

De forma analítica, el semiancho de la zona de contacto puede definirse cómo:

$$a = \sqrt{\frac{8PR(1 - \nu^2)}{\pi E}} \quad (4-5)$$

A partir de este valor, se define un parámetro a_m lo suficientemente grande para que, a medida que se va produciendo el desgaste en la pieza, la zona de influencia siga estando dentro de esta región.

El resto de puntos clave sobre la superficie del hilo se definen a partir de este parámetro, como se muestra en el siguiente gráfico:

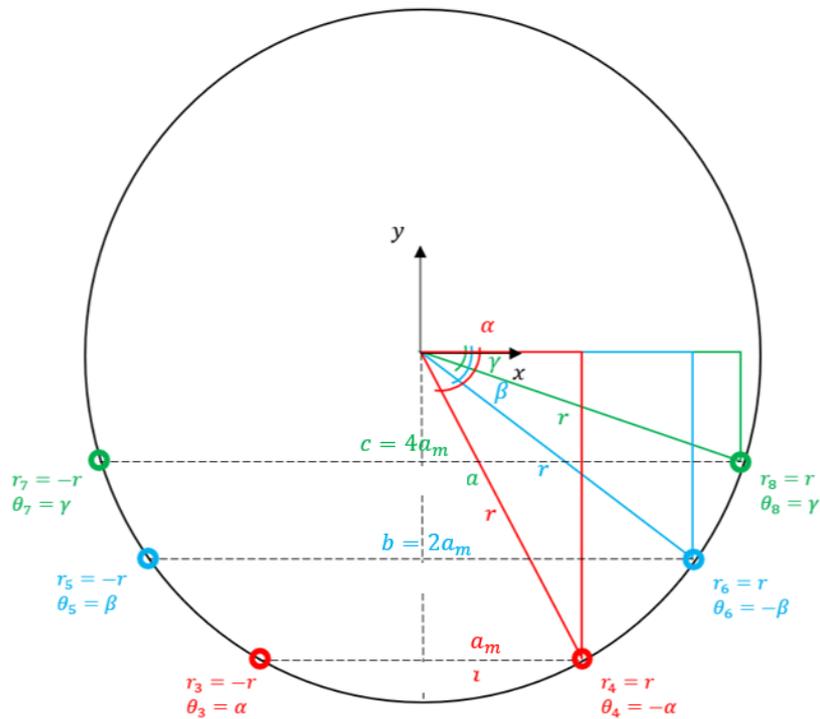


Figura 4-5. Puntos clave sobre la superficie.

4.2.1.2 Líneas entre cada par de puntos

Una vez definidos todos los puntos clave de la geometría, simplemente habrá que unir dichos puntos para formar las distintas líneas, para lo cual seguiremos los siguiente:

- **Líneas curvas** para los trazados del contorno del cable.
- **Líneas rectas** para los trazados interiores.

La región entre los puntos 3 y 4 se denominará superficie de contacto y su ancho será igual a $2a_m$.



Figura 4-6. Superficie de contacto.

Esta zona tendrá un tratamiento especial ya que, aunque se encuentre en el contorno del hilo, no se unirá mediante un trazado curvo, sino que la curva se discretizará como una serie de líneas rectas. Esto es debido a que en esa zona se definirán un alto número de puntos, como se verá más adelante, por lo que el contorno del hilo en esa zona no se definirá uniéndolos distintos puntos mediante trazos curvos, sino con pequeños trazos rectos.

4.2.1.3 Áreas de mallado

Un último paso para terminar la geometría será definir las áreas de mallado que formen ésta.

Como ya se ha comentado, las zonas alejadas de la superficie de contacto no se verán apenas perturbadas durante el análisis, por lo que el mallado de estas zonas no será relevante y se podrán utilizar elementos de mayor tamaño. Por el contrario, la zona de contacto requerirá una malla más fina y mapeada, para que los resultados que se obtengan de ésta sean lo más precisos posible.

De esta forma, se puede dividir la geometría en tres zonas:

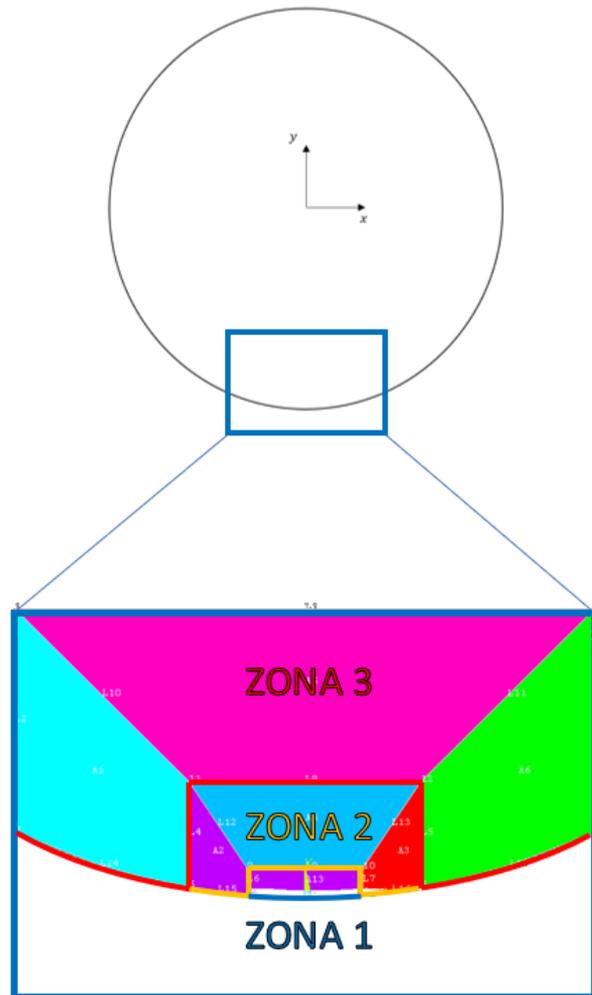


Figura 4-7. Zonas del área de influencia.

Como puede verse en la figura anterior, se divide la geometría en tres zonas:

- La **zona 1** o zona de contacto será la de mayor importancia, puesto que es donde aparecen las tensiones y los cambios de la geometría. En esta zona el mallado será más fino y mapeado, utilizando elementos cuadrados. Esto se verá con más detalle en el siguiente punto.
- La **zona 2** será una zona de transición entre la zona de contacto y el resto de la geometría. El mallado en esta zona se generará de forma automática (elementos triangulares).
- La **zona 3** es la zona más alejada del contacto y, al igual que la zona anterior, apenas se verá afectada por el contacto. Esta malla también se generará de manera automática.

4.2.2 Actualización de la geometría

Como se ha venido comentando, la idea de este modelo es conseguir que, además de obtener los resultados que se desean, sea capaz de ir actualizando la geometría, con el fin de poder obtener la variación en las tensiones que se produce a medida que aumenta el desgaste, siendo éste a su vez proporcional a la presión según el modelo de Archard propuesto.

Para conseguir esto, han sido necesarias dos cosas:

- **Discretizar** la superficie de contacto en un alto número de puntos.
- **Automatizar** la generación de las coordenadas de dichos puntos.

La zona de contacto entre ambos hilos se discretizará en tantos puntos como sea necesario, según el tamaño de elemento elegido, de manera que, una vez se malle dicha región, se tenga un nodo en la posición de cada *keypoint*. Así, puesto que la distribución de presiones será conocida para cada nodo, se podrá determinar el desgaste sufrido en dicho punto.

Haciendo el proceso anterior para cada uno de los puntos de la zona de contacto y desplazando dichos puntos según el desgaste, se tendrá la nueva geometría.

Un ejemplo de discretización de las zonas de contacto se puede ver en las siguientes imágenes:

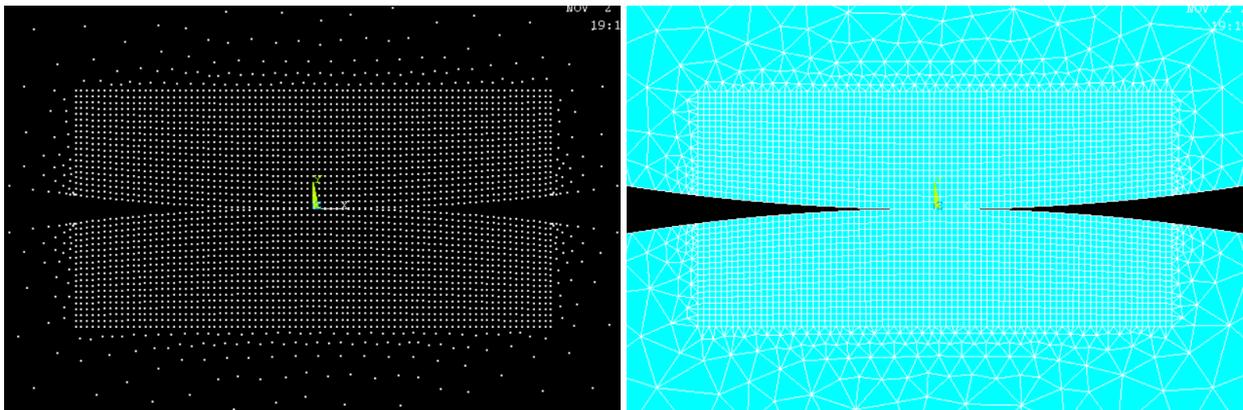


Figura 4-8. Mallado de la zona de contacto.

En la figura anterior también puede observarse, como se comentó en el punto anterior, la malla mapeada utilizada para las zonas de contacto.

Como ya se puede prever, el método anterior requiere el cálculo de un alto número de puntos en cada iteración, por lo que es necesario establecer un proceso automatizado para generar dichos puntos. Para esto, se hará uso del software *MATLAB*, como se verá a continuación.

4.2.3 Condiciones de contorno

Como se observa en la *Figura 4-3*, son dos las condiciones de contorno que se impondrán sobre el modelo:

- **Movimientos impedidos** en la línea inferior del hilo inferior.
- **Fuerza** vertical aplicada sobre el hilo superior.

Como ya se ha comentado, para estimar el valor de la fuerza a aplicar sobre el modelo, se hará uso del modelo 3D utilizado durante la tesis doctoral. De dicho modelo, se obtiene la distribución de tensiones que, como ya es sabido, será diferente en cada una de las zonas de contacto. Para el modelo de Archard, sólo se tendrán en cuenta las tensiones normales, ya que este modelo no contempla el resto de tensiones en el desgaste.

Los valores obtenidos dependerán del ensayo concreto que se quiera simular. A modo de ejemplo, se simula un ensayo con los siguientes valores:

- **Fuerza aplicada en la precarga:** $P = 3000\text{ N}$
- **Desplazamiento del punto medio:** $B = 39.5\text{ mm}$

Cabe destacar que dicho valor de desplazamiento es el máximo que permite el modelo 3D, de manera que, para valores superiores, será necesario realizar una extrapolación.

Del modelo anterior se obtienen las siguientes distribuciones de presiones para cada contacto:

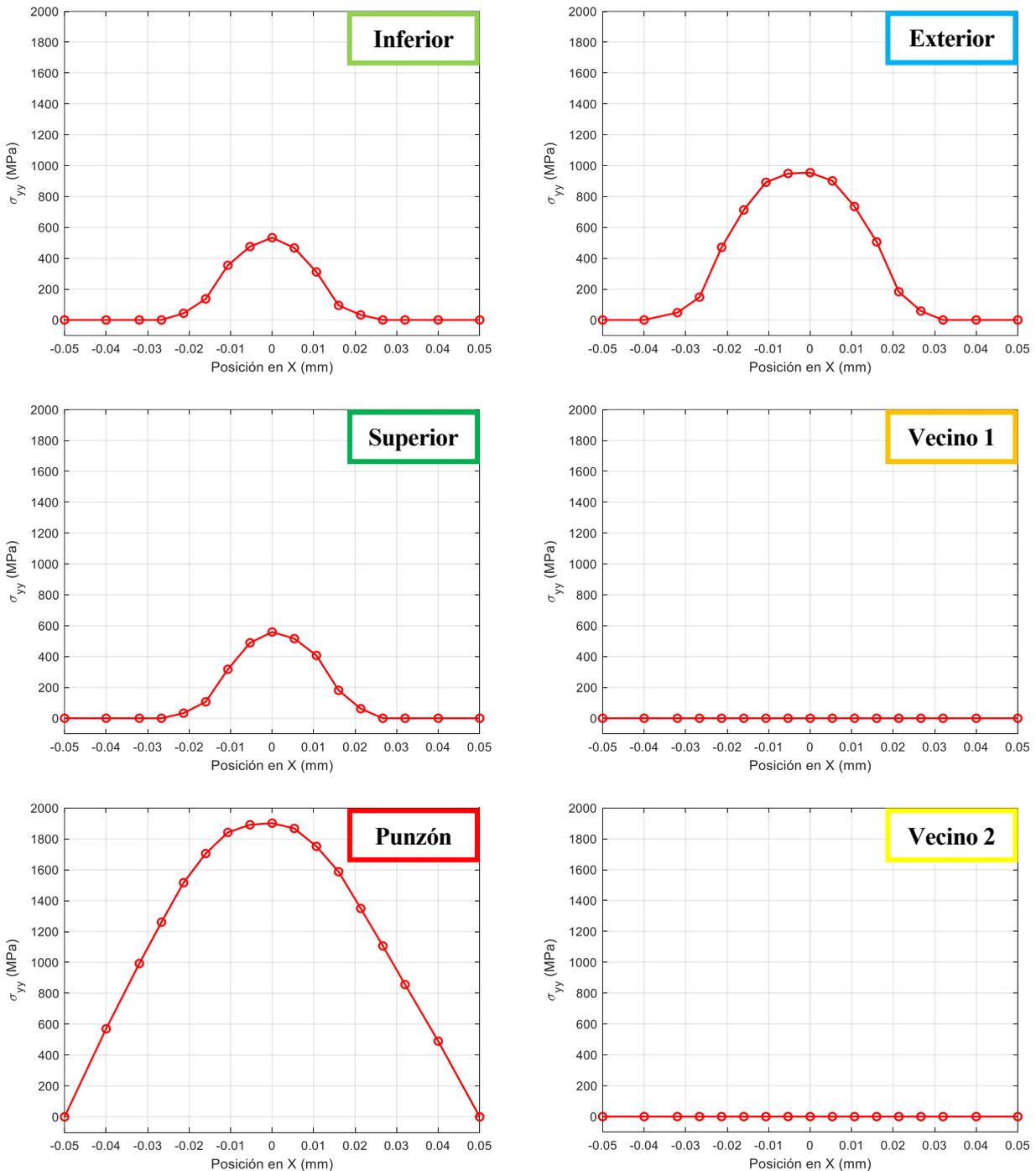


Figura 4-9. Distribución de tensiones en las zonas de contacto.

Hay que indicar que en el eje de abscisas se ha representado posición de cada punto a lo largo de la superficie de contacto, siendo 0 el punto medio; en el eje de ordenadas, se ha representado la presión para cada uno de estos puntos.

De esta distribución de presiones, es posible obtener en cada una de ellas una fuerza por unidad de línea resultante sin más que calcular el área encerrada bajo esta curva. En este caso, se ha hecho uso de la regla de los trapecios:

$$F = \sum_{i=2}^n \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{2} (x_i - x_{i-1}) \quad (4-6)$$

En el ejemplo de la *Figura 4-9*, se obtendría en cada par de contacto los valores de carga normal de la siguiente tabla:

Tabla 4-1. Ejemplo de cálculo de carga normal.

Zona de contacto	Carga normal (N/mm)
Interior	13.06
Exterior	34.85
Superior	14.26
Vecino 1	0
Punzón	99.84
Vecino 2	0

Esta fuerza resultante será la carga aplicada sobre el hilo exterior que se utilizará como condición de contorno para cada par de contacto.

4.3 Modelo de MATLAB

El gran número de puntos que es necesario definir para generar la geometría de *ANSYS* hace que resulte inviable considerar un proceso manual y, por tanto, será necesario utilizar un método que permita su automatización.

Aunque ya se ha venido mencionando anteriormente, cabe destacar dos aspectos importantes que permite *ANSYS*:

- El modelo se programa a través de archivos de texto.
- La aplicación se lanza a través de *MATLAB*.

Esto hace factible automatizar el proceso haciendo uso de la herramienta *MATLAB*, ya que permite generar archivos de texto y ejecutarlos en *ANSYS*, de manera que se realice una nueva simulación por cada incremento de desgaste.

Una vez lanzado en *ANSYS*, es posible extraer un archivo de datos que contenga, entre otros, los valores correspondientes a la distribución de presiones, y utilizar éstos para calcular el desgaste con el modelo de Archard. Con el desgaste obtenido para cada punto, se puede actualizar la geometría y generar un nuevo archivo de texto, repitiendo de nuevo todo el proceso.

Automatizando todo este proceso, se obtendría el desgaste total sufrido por el hilo.

Un esquema de cómo quedaría el proceso iterativo anterior puede verse en el siguiente diagrama de flujo:

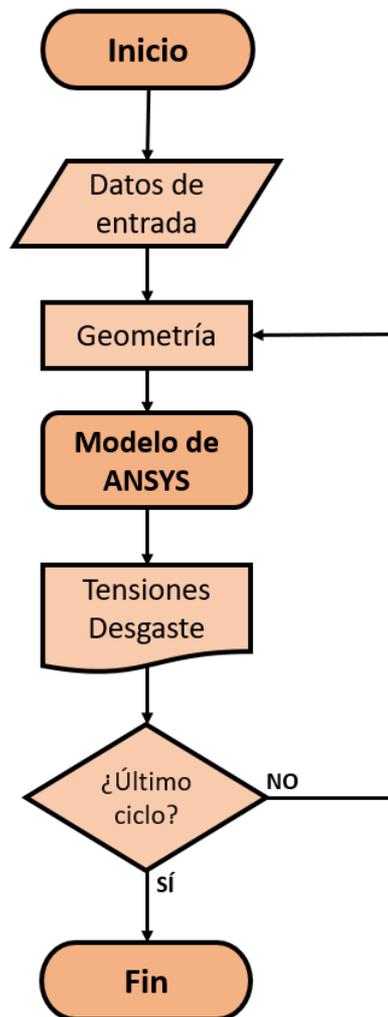


Figura 4-10. Diagrama de flujo de la automatización.

Gran parte del trabajo aquí expuesto ha consistido en hacer un programa que implemente este flujo. No obstante, no forma parte del objetivo de esta memoria entrar a un mayor nivel de detalle sobre el proceso seguido. El código completo puede consultarse en los anexos de este documento.

4.3.1 Cálculo del desgaste

Como ya se ha ido comentando, la idea del modelo numérico es la de ir actualizando la geometría en cada ciclo a través del modelo de Archard, el cual calculará el desgaste de manera proporcional a la distribución de presiones obtenidas del propio modelo. Según se extrae de la ecuación (4-4), se tiene un término de valor constante que define el desgaste por unidad de presión para cada punto:

$$\frac{h}{P_c} = \frac{K}{H} \cdot N \cdot 2\delta_z = cte \quad (4-7)$$

No obstante, puesto que la geometría y la distribución de presiones variarán para cada ciclo, también lo hará el desgaste. Para contemplar esto, será necesario definir un desgaste por cada ciclo, de manera que el desgaste total de la superficie de contacto del hilo será la suma del desgaste obtenido en todos los ciclos. Esto, sin embargo, conllevaría un alto número de iteraciones del programa y, en consecuencia, un alto tiempo de computación.

Si en lugar de tomar el número de ciclos total se toma un valor n , igual a un número de iteraciones del modelo, y se toma un desgaste por unidad de presión de valor ϕ_{desg} en cada iteración, se debe cumplir que:

$$\frac{K}{H} \cdot N \cdot 2\delta_z = \phi_{\text{desg}} \cdot n = \text{cte} \quad (4-8)$$

Por tanto, cada iteración del modelo supondrá $\frac{N}{n}$ ciclos del ensayo. De esta manera, se presupone una linealidad entre el número iteraciones del modelo y el desgaste producido en cada iteración. Será necesario comprobar que esta hipótesis es correcta.

El número de iteraciones necesarias del modelo para alcanzar el mismo desgaste se puede obtener de la ecuación (4-8) como:

$$n = \frac{1}{\phi_{\text{desg}}} \cdot \frac{K}{H} \cdot N \cdot 2\delta_z \quad (4-9)$$

En adelante, dicho valor ϕ_{desg} se denominará constante de desgaste. El número de iteraciones dependerá del valor de dicha constante, ya que el resto es conocido y de valor constante.

Finalmente, se puede concluir que, para cada punto situado en x , el desgaste total producido será:

$$h(x) = \sum_{i=1}^n h_i(x) = \sum_{i=1}^n \phi_{\text{desg}} \cdot P_{c_i}(x) \quad (4-10)$$

4.3.2 Constante de desgaste

Como se ha visto en el punto anterior, la constante de desgaste puede definirse como el desgaste producido sobre la superficie del hilo por cada unidad de presión en cada iteración del modelo. Al depender de manera inversamente proporcional al número de ciclos, un valor alto supondrá un número bajo de iteraciones, y viceversa.

No obstante, no todos los valores son admisibles para la constante de desgaste. Tomar un valor demasiado alto puede producir un desgaste demasiado brusco en ciertas zonas de la geometría y, por tanto, generar errores en el modelo. Tras varias pruebas, se ha observado que el valor máximo de la constante de desgaste a partir del cual se observan picos en las gráficas y el modelo no converge es:

$$\phi_{\text{desg}} = 10^{-7} \frac{mm}{MPa} \quad (4-11)$$

En teoría, no hay valor mínimo para dicha constante, aunque éste vendrá dado por el número de iteraciones, ya que un valor demasiado bajo puede conllevar un número demasiado elevado de iteraciones. No obstante, esto también supondrá un desgaste más suave de la geometría y, en principio, una evolución más fiel a la real.

Hay que tener en cuenta que el valor de la constante de desgaste no es un valor real, sino un promedio o estimación del desgaste producido en cada iteración, por lo que tomar un valor u otro puede arrojar resultados distintos. En el análisis de los resultados, se analizará la relación entre el desgaste estimado y el valor dado a la constante de desgaste.

4.4 Validación del modelo

Antes de comenzar con el proceso iterativo, será necesario comprobar que los datos que se obtienen del modelo son correctos y, así, dar por válido el modelo. Para ello, se compararán la curva de la distribución de presiones obtenida a través del modelo y la curva analítica, que según la referencia [9] seguirá la expresión:

$$\sigma_y(x, 0) = -p_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \quad -a \leq x \leq a \quad (4-12)$$

siendo p_0 el valor de la presión máxima de contacto, definida por:

$$p_0 = \frac{2F}{\pi a} \quad (4-13)$$

Representando gráficamente ambas curvas, se tiene lo siguiente:

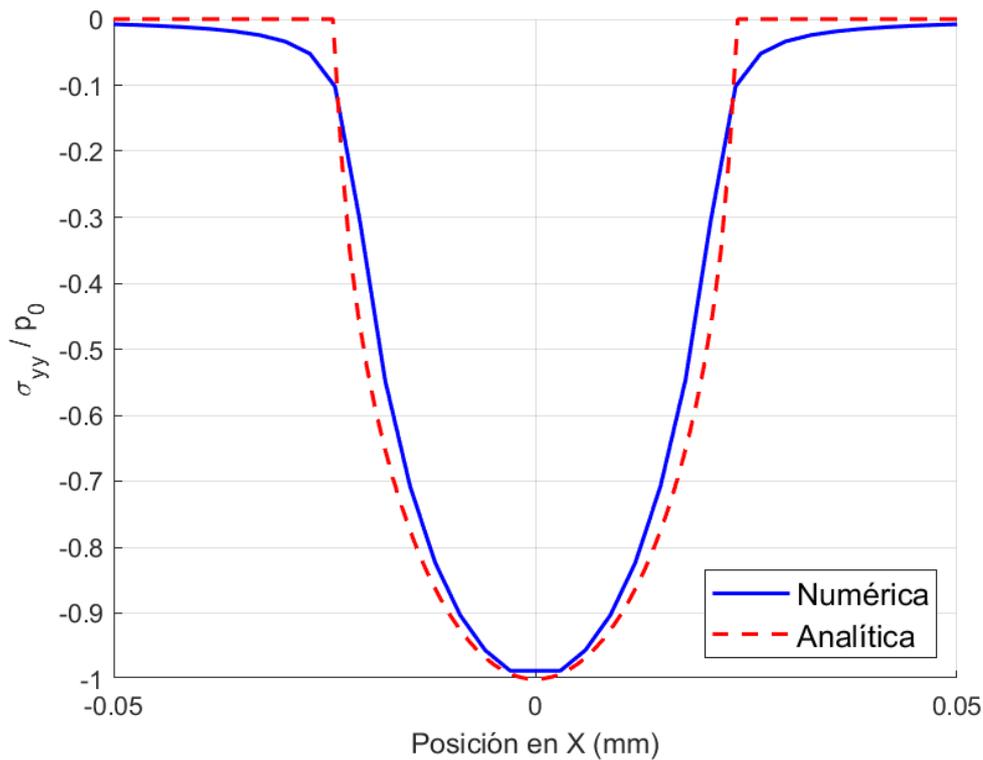


Figura 4-11. Validación del modelo.

Por tanto, la distribución de presiones obtenida del modelo se ajusta a la curva teórica, y se puede considerar que el modelo propuesto es válido.

5 ESTUDIO DE LOS RESULTADOS

Si buscas resultados distintos, no hagas siempre lo mismo.

- Albert Einstein -

Como se ha visto en el apartado anterior, se dispone de un modelo que debería ser capaz de predecir el desgaste sufrido en cada zona de contacto por cada par de hilos. No obstante, este desgaste dependerá de una serie de parámetros que, a priori, no son todos conocidos. La validez y precisión del modelo dependerán de estos parámetros y de cómo se obtengan.

En este punto, se tomará uno de los ensayos realizados sobre el cable para comparar la estimación del modelo numérico con las observaciones hechas en el laboratorio. En este caso, el ensayo elegido es el número 4, cuyos datos son los siguientes:

Tabla 5–1. Datos del ensayo 4.

Ensayo	Precarga, P (N)	Desplazamiento, B (mm)	Vida (ciclos)
4	3000	50	33855

Para realizar esta comparación, el proceso que habría que seguir para éste y para cualquier otro ensayo que se quiera analizar es el siguiente:

- Si fuese necesario, **extrapolar los datos** obtenidos del modelo 3D para estimar las fuerzas y los deslizamientos en cada zona de contacto para el valor de desplazamiento correspondiente al ensayo.
- **Identificar la posición de cada huella** según el hilo de contacto.
- De las imágenes del microscopio, **medir la huella del desgaste**, obteniendo la profundidad y el ancho.
- **Definir el valor del coeficiente de desgaste** que se va a utilizar.
- Tras la simulación del modelo, **comparar los resultados** de las dimensiones (ancho y profundidad) que definen la huella obtenidos con las mediciones del laboratorio.

Adicionalmente, también resultará de interés analizar cómo afectan algunos parámetros del modelo a los resultados obtenidos.

5.1 Extrapolación de los datos

Como ya se ha comentado, el modelo 3D utilizado no permite llegar a ciertos valores de desplazamiento. Debido a la complejidad del modelo, en algunos casos, la convergencia de los resultados es imposible cuando se aplica un desplazamiento demasiado alto. Por tanto, para llegar al valor de desplazamiento correspondiente al ensayo 4, será necesario realizar una estimación.

Con el fin de que la estimación se realice de una manera más precisa, se han utilizado diferentes modelos aplicando un desplazamiento de menor valor que sí permite la convergencia y, a partir de los resultados de estos, extrapolar.

Para el caso de la carga normal en cada zona de contacto, los valores obtenidos se reflejan en la siguiente tabla y en la *Figura 5-1*:

Tabla 5-2. Carga normal en el ensayo 4.

Desplazamiento, B (mm)	Carga normal, F (N)					
	Inferior	Exterior	Superior	Vecino 1	Punzón	Vecino 2
0	0	0	0	0	0	0
3.36	0.5	0.84	0.55	0	2.41	0
4.28	0.68	1.18	0.74	0	3.35	0
5.93	1.10	1.86	1.20	0	5.28	0
8.4	1.77	2.98	1.93	0	8.43	0
13.04	3.2	5.78	3.47	0	16.29	0
23.48	6.99	14.84	7.52	0	41.6	0
37.8	12.34	32.51	13.54	0	91.01	0
39.5	13.06	34.85	14.26	0	99.84	0
50	17.5	47.6	18.7	0	133.1	0

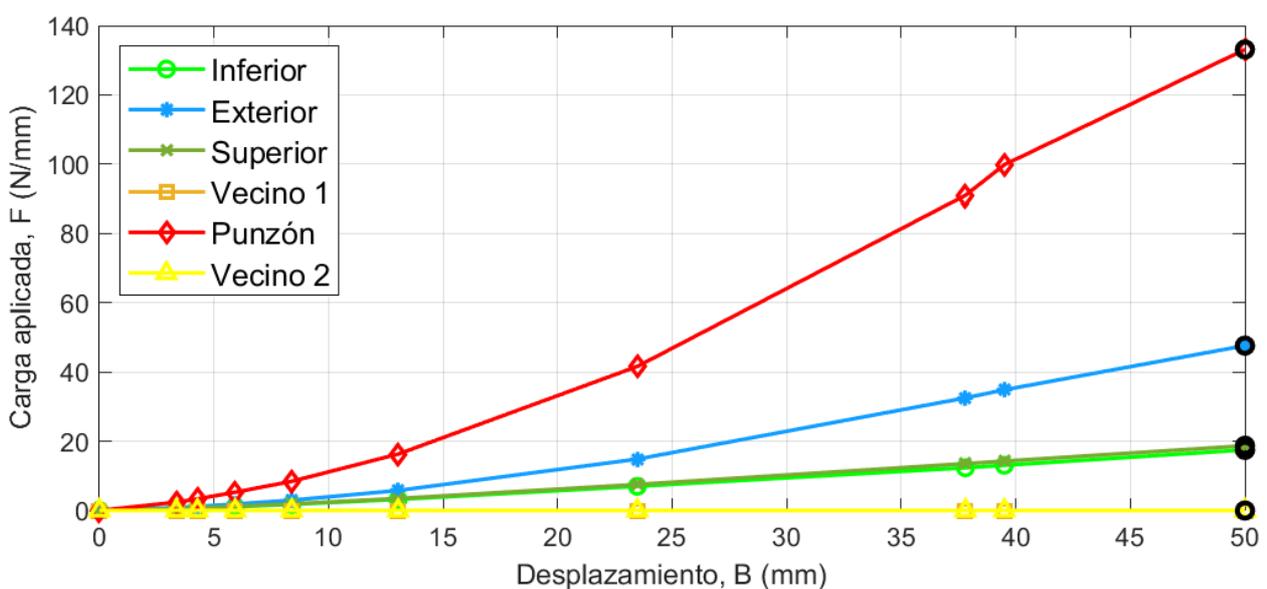


Figura 5-1. Extrapolación de la fuerza resultante.

Para el caso del deslizamiento relativo en cada zona de contacto, los valores obtenidos se reflejan en la siguiente tabla y en la *Figura 5-2*:

Tabla 5-3. Deslizamiento relativo en el ensayo 4.

Desplazamiento, B (mm)	Deslizamiento, δ_z (μm)					
	Inferior	Exterior	Superior	Vecino 1	Punzón	Vecino 2
0	0	0	0	0	0	0
3.36	0.8	0.08	0.7	0	0.04	0
4.28	1.1	0.10	0.9	0	0.06	0
5.93	1.6	0.12	1.4	0	0.08	0
8.4	2.3	0.19	2	0	0.15	0
13.04	3.9	0.29	3.5	0	0.25	0
23.48	8.9	0.61	8	0	0.58	0
37.8	18.0	1.07	16.1	0	1.24	0
39.5	19.3	1.15	17.2	0	1.59	0
50	27.1	1.5	24.1	0	1.8	0

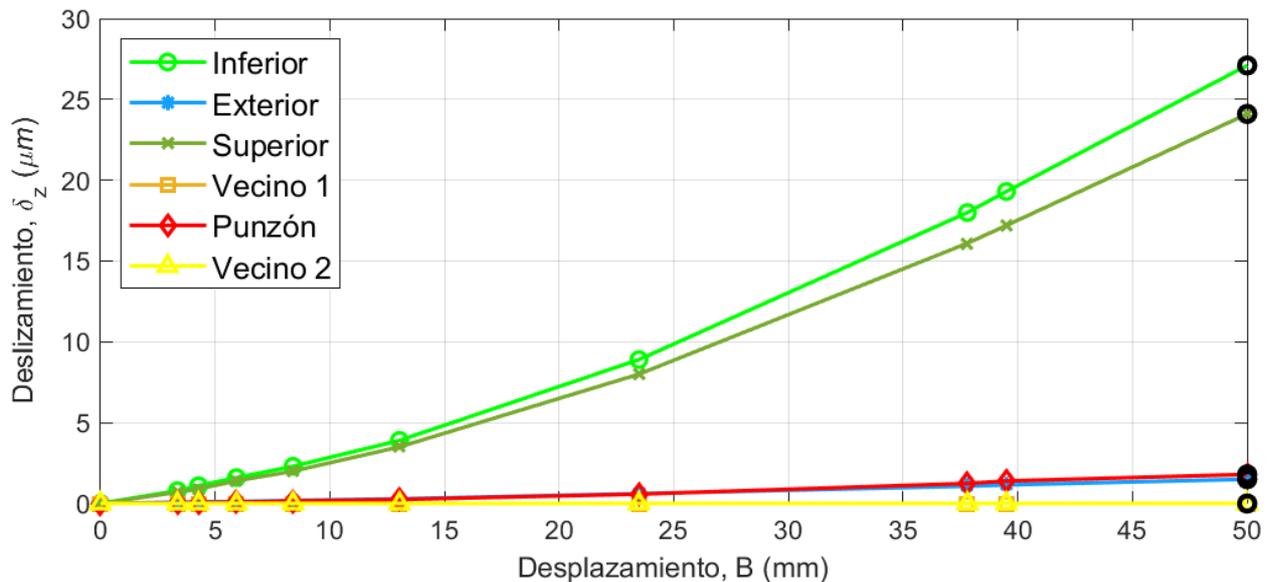


Figura 5-2. Extrapolación del deslizamiento.

Como ya se había observado en las gráficas de la *Figura 4-9*, no hay presión en las zonas correspondientes a los hilos vecinos y, por consiguiente, la fuerza resultante es nula; también es nulo el deslizamiento. Por tanto, no será posible realizar un análisis numérico sobre esas dos zonas.

Como puede verse en la *Figura 1-5*, ambas zonas se corresponden con las adyacentes al hilo punzón, en el cual se aplica la carga en el modelo 3D.

La razón por la que es posible que esto ocurra es que, puesto que la fuerza en el modelo se aplica a través del hilo punzón, ésta se transmite directamente al hilo interior. Al no haber ninguna otra fuerza ejercida, el hilo interior se desplaza y no hay contacto entre éste y los hilos vecinos. Esto hace que los valores medidos en ambas zonas sean nulos.

Un esquema simplificado del desplazamiento que se produce en los hilos de la sección central del cable al aplicar la fuerza del punzón puede verse en la siguiente figura:

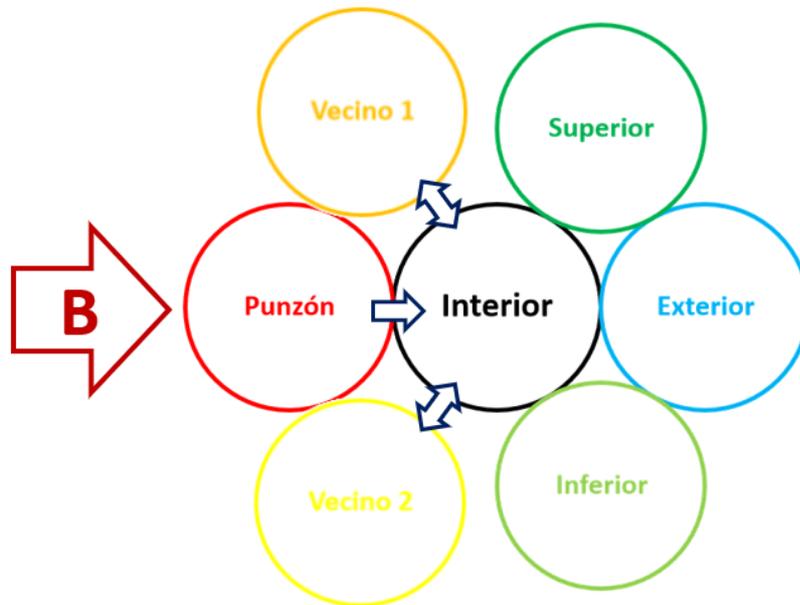


Figura 5-3. Desplazamiento de los hilos.

Hay que destacar que en las imágenes del microscopio sí se observa desgaste en esta zona, pero las simplificaciones hechas sobre los modelos numéricos no permiten su simulación.

5.2 Huella sobre el hilo interior

En el apartado 3 de este documento, se vio cómo realizar las observaciones con un microscopio confocal y, con éstas, obtener imágenes de la zona de contacto y el perfil de la superficie. Además, haciendo uso de *MATLAB*, se puede superponer una circunferencia de radio igual al hilo y medir de una forma más fácil el tamaño de la huella.

En primer lugar, es necesario situar cada una de las zonas de contacto ya que, como se ha ido viendo durante todo el trabajo, el tamaño de la huella, así como la fuerza y el deslizamiento, dependerá de la zona en la que se esté midiendo.

Haciendo uso de las imágenes del microscopio de barrido y conociendo cuál es el hilo que rompe, podemos situar cada par de contacto del hilo interior y medir su huella:

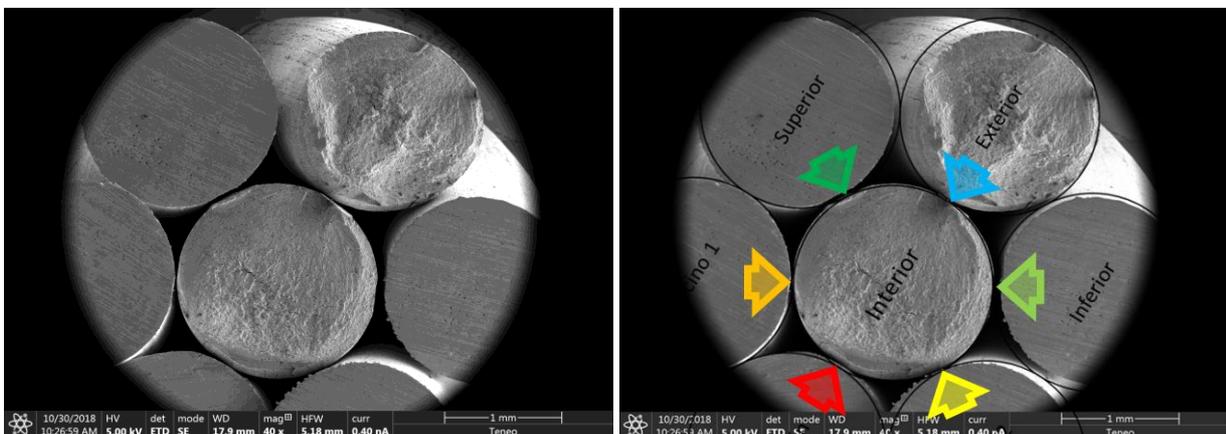


Figura 5-4. Vista general del ensayo 4.

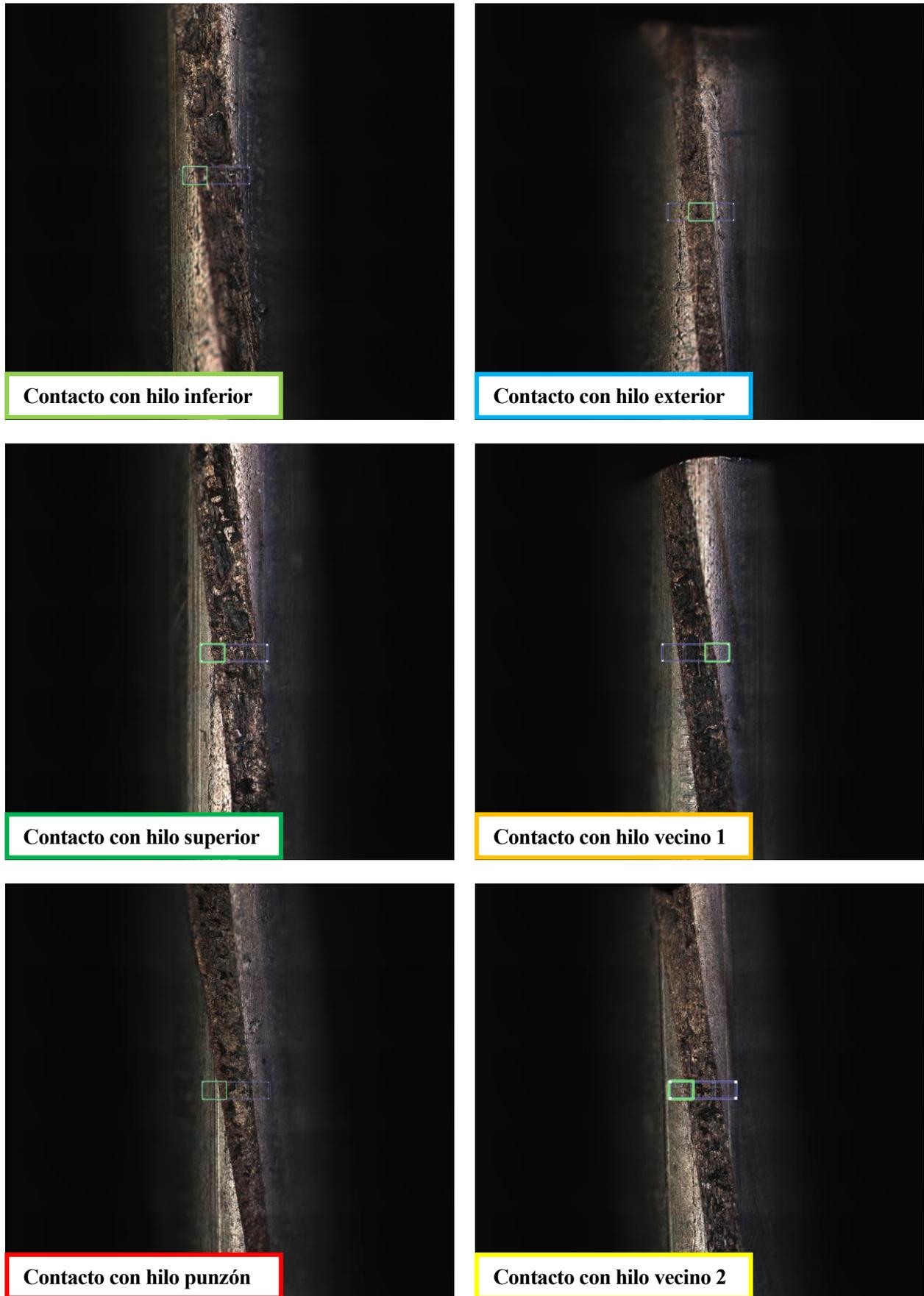


Figura 5-5. Vista general de cada zona de contacto.

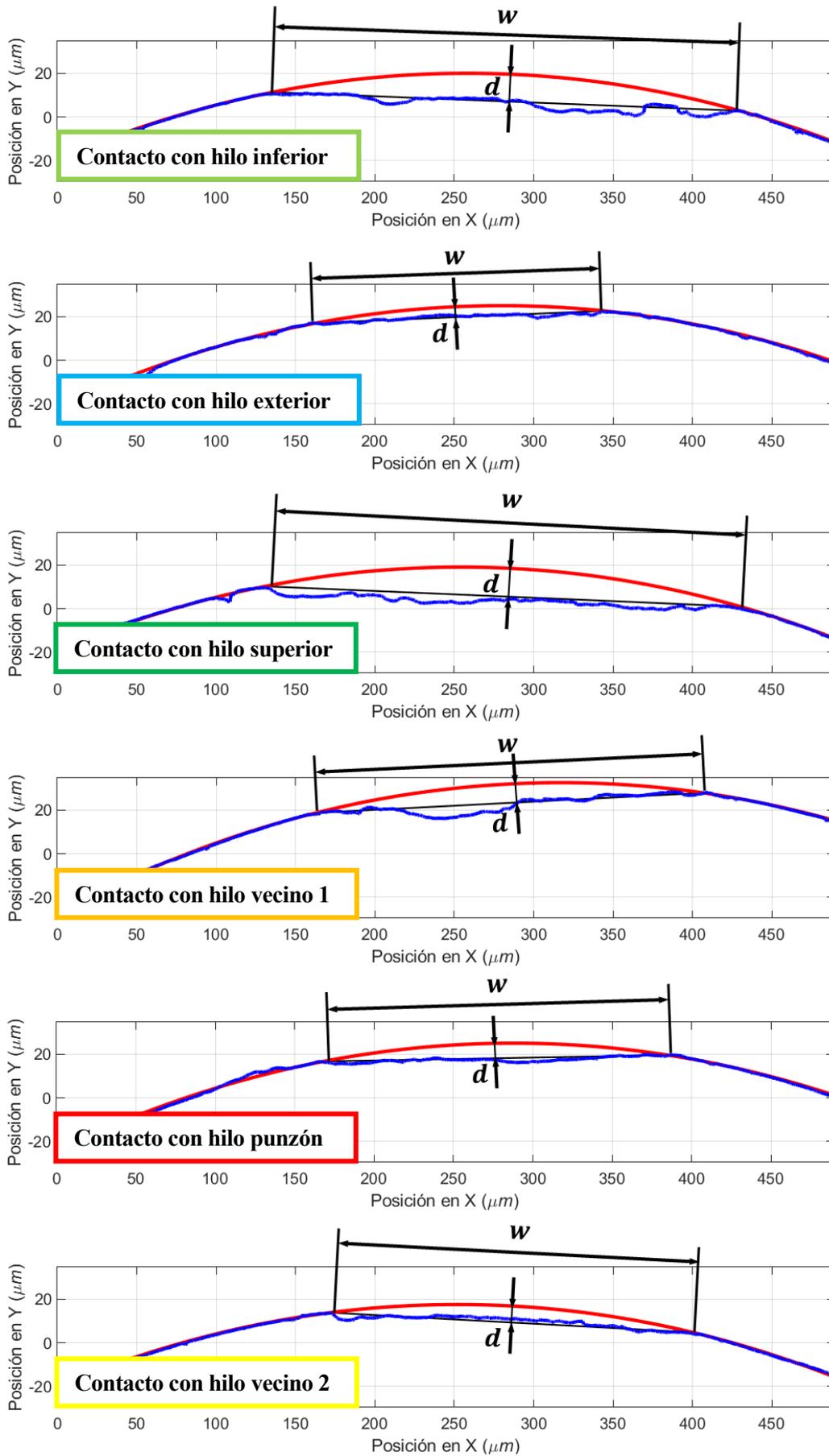


Figura 5-6. Huellas de cada zona de contacto.

Se medirá, para cada huella, el ancho y la profundidad de ésta. Las medidas obtenidas para cada zona de contacto se encuentran recogidas en la siguiente tabla:

Tabla 5-4. Medidas de las huellas (medidas).

Zona de contacto	Profundidad, d (μm)	Ancho, w (μm)
Inferior	13	290
Exterior	6	180
Superior	13	300
Vecino 1	8	240
Punzón	7	220
Vecino 2	7	230

Estos valores servirán para comparar la huella real con la obtenida a través del modelo numérico.

5.3 Coeficiente de desgaste

Como se ha venido comentando, antes de comenzar con la simulación del modelo, será necesario establecer el valor del coeficiente de desgaste. Este coeficiente define el desgaste que sufrirá la pieza por cada unidad de fuerza y unidad de deslizamiento.

No obstante, el valor de este coeficiente no tendrá un valor fijo para un material dado, sino que dependerá, en gran parte, de las condiciones del ensayo. Algunos parámetros que afectan al valor de este coeficiente son:

- La presión de contacto.
- La velocidad de deslizamiento.
- El ángulo que forman los hilos.

Esta relación entre el valor de coeficiente de desgaste y las condiciones del ensayo se analiza en la tesis doctoral de Aitor Cruzado [10]. En esta referencia, no obstante, se establece un valor fijo del coeficiente de desgaste para las simulaciones numéricas que realiza.

En adelante en este trabajo, se tomará el siguiente valor del coeficiente de desgaste:

$$\frac{K}{H} = 3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \quad (5-1)$$

Hay que incidir en la diferencia entre el coeficiente de desgaste y la constante de desgaste. El primero, es un parámetro físico que depende del material y de las condiciones del ensayo; el segundo, es un parámetro definido para el modelo numérico. Aunque estén relacionados, como refleja la ecuación (4-8), no representan lo mismo.

Es importante remarcar esta diferencia ya que, más adelante, se verá cómo afecta el valor de la constante de desgaste a los resultados obtenidos del modelo, pero el coeficiente de desgaste tomará el mismo valor en cada situación.

5.4 Análisis del modelo

Una vez se tienen todos los valores para el modelo numérico, se puede empezar con las simulaciones. No obstante, para comprobar la validez del modelo, hay que realizar un análisis de cómo algunos parámetros pueden afectar a los resultados obtenidos. Hay que tener en cuenta que las simplificaciones hechas hasta llegar al modelo final pueden alterar los resultados.

Para dicho análisis, se comprobará cómo afectan a los resultados los dos siguientes parámetros:

- El **tamaño del elemento** del mallado de la zona de contacto. Este parámetro determinará el número de puntos en los que se discretizará la superficie de contacto y, lo que es más relevante, el número de elementos que contendrá la malla de la zona de contacto. Puesto que el tamaño de los elementos de las otras zonas es mucho mayor, el peso de la computación recaerá sobre esta zona. Por tanto, el tamaño del elemento incidirá directamente en el tiempo de computación de cada iteración.
- La **constante de desgaste** para cada iteración del modelo. Este valor determina el desgaste por unidad de presión producido en cada iteración del modelo. Cuanto mayor sea este parámetro, menos iteraciones requerirá el modelo para simular el ensayo completo. Por tanto, la constante de desgaste incidirá directamente en el número de iteraciones.

Para hacer este análisis, se ha tomado la zona de contacto del hilo inferior del ensayo 4, cuyos valores pueden verse en las *Tablas 5-2* y *5-3*.

5.4.1 Tamaño del elemento

Como parte del estudio para optimizar el modelo, se ha analizado cómo afecta el tamaño del elemento de la zona de contacto a la huella obtenida. Para ello, se han tomado varios tamaños distintos y se ha obtenido la huella:

- Tamaño de elemento: 1 μm

En la *Figura 5-7*, se observa la distribución de presiones para cada iteración, yendo desde el celeste (primera iteración) hasta el verde (última iteración).

Para este caso, al tomar un tamaño de elemento tan pequeño, la distribución de presiones no es suave, lo que provoca que el desgaste sobre la superficie no sea uniforme y se genere una geometría discontinua. Así, el modelo no converge.

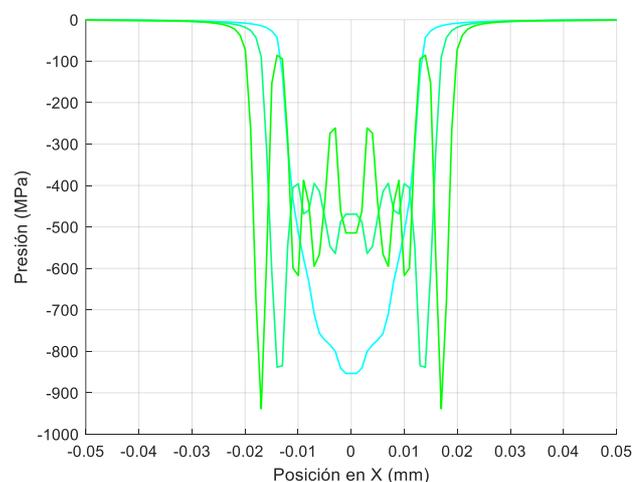


Figura 5-7. Presiones (1 micra).

- Tamaño de elemento: $3 \mu m$

Con un tamaño de elemento algo más grande, no se produce ningún error en el modelo. Aunque aparecen algunas imperfecciones en las curvas de presiones, éstas no generan las suficientes discontinuidades sobre la geometría para que el modelo falle.

En la *Figura 5-8*, se observa la posición de la superficie de contacto de cada hilo en cada iteración. El hilo interior va desde el rosa (primera iteración) hasta el azul (última iteración), mientras que el hilo exterior va desde el rosa (primera iteración) hasta el rojo (última iteración). Aunque se aprecie que las superficies se desplazan, sólo es por la representación gráfica, ya que el contacto entre ambos hilos se mantiene en cada iteración del modelo.

La profundidad del desgaste medido, para ambos hilos, es de $6.7 \mu m$.

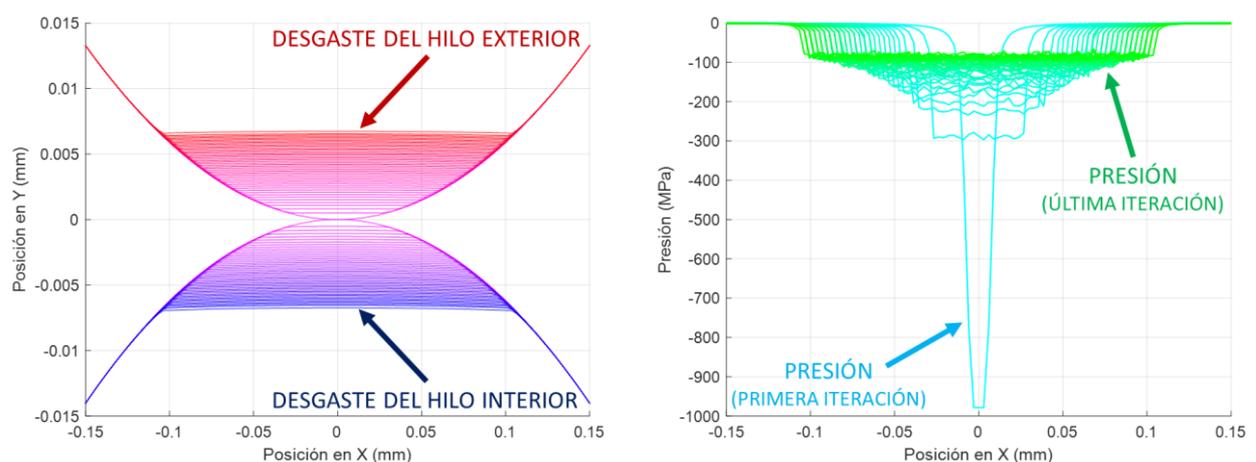


Figura 5-8. Desgaste y presiones (3 micras).

- Tamaño de elemento: $5 \mu m$

Aumentando aún más el tamaño de elemento, el modelo sigue convergiendo, obteniéndose unos resultados similares. Además, la distribución de presiones es más suave y, por tanto, la geometría en cada iteración seguirá siendo continua.

La profundidad del desgaste medido, para ambos hilos, es de $6.7 \mu m$.

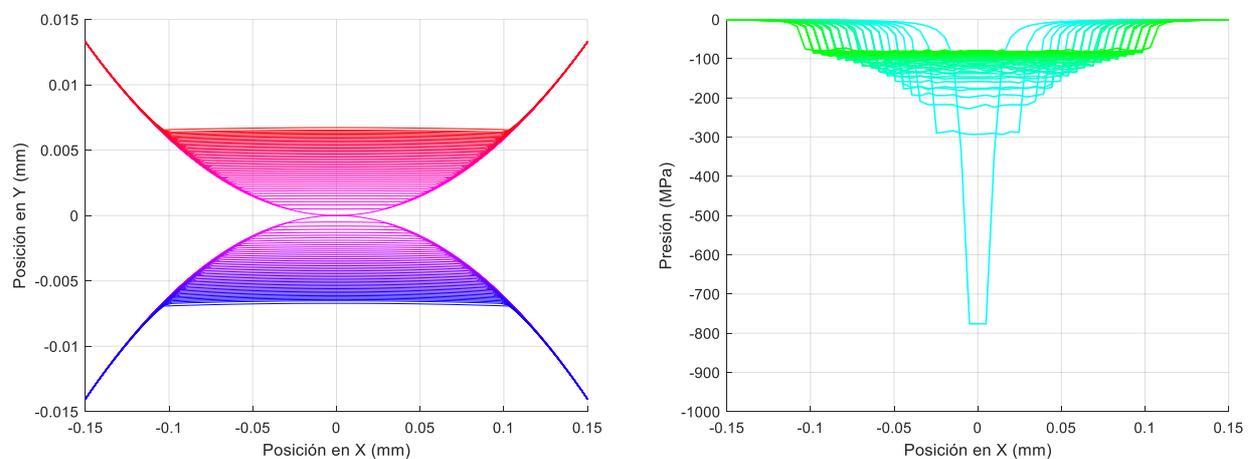


Figura 5-9. Desgaste y presiones (5 micras).

- Tamaño de elemento: $6 \mu m$

Aunque el programa no da errores según se aumenta el tamaño del elemento, se observa cómo éste puede no ser del todo preciso, ya que, en algunas zonas, la distribución de presiones toma unos valores constantes que no son reales, y eso es debido a que la malla no es suficientemente fina.

La profundidad del desgaste medido, para ambos hilos, es de $6.7 \mu m$.

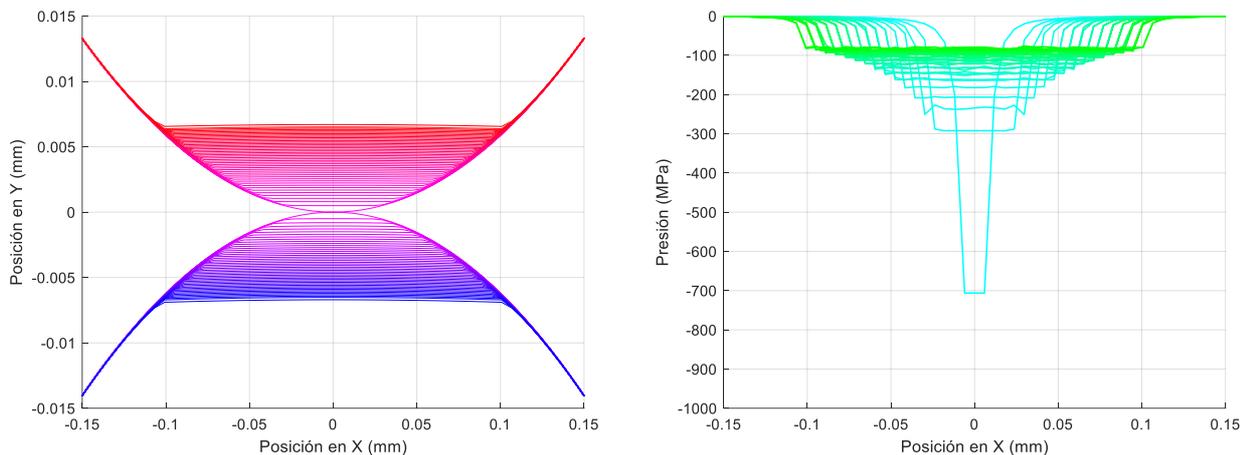


Figura 5-10. Desgaste y presiones (6 micras).

Como se puede concluir, el tamaño del elemento parece no influir en la estimación de la huella, ya que el resultado es prácticamente el mismo, con la excepción de que un elemento demasiado pequeño puede hacer que el modelo no converja.

En todas las simulaciones han sido necesarias 918 iteraciones del modelo, valor obtenido a través de la ecuación (4-9).

Un parámetro que se comentó y no se ha tenido en cuenta es el tiempo de computación que, como es de suponer, será mayor cuanto menor sea el tamaño de cada elemento, ya que harán falta más elementos para abarcar la misma superficie. Por tanto, no interesan tamaños demasiado pequeños que eleven demasiado el tiempo de simulación sin aportar valor a los datos obtenidos.

Finalmente, se decide que el tamaño óptimo que permite un bajo tiempo de computación y que, además, las gráficas obtenidas se ajusten a la distribución real sea:

$$t_{elem} = 5 \mu m \quad (5-2)$$

En adelante, será este valor el que se tome para el mallado de la zona de contacto.

5.4.2 Número de iteraciones

Como parte del estudio para optimizar el modelo, se ha analizado también cómo el valor de la constante de desgaste (ϕ_{desg}) afecta a la huella obtenido.

Hay que recordar que la constante de desgaste relaciona los ciclos reales con las iteraciones del modelo, de manera que cuanto menor sea el valor tomado, menos ciclos del ensayo supondrá y, en consecuencia, serán necesarias más iteraciones del modelo.

Para hacer este análisis, se obtendrá la huella para varios valores de la constante de desgaste:

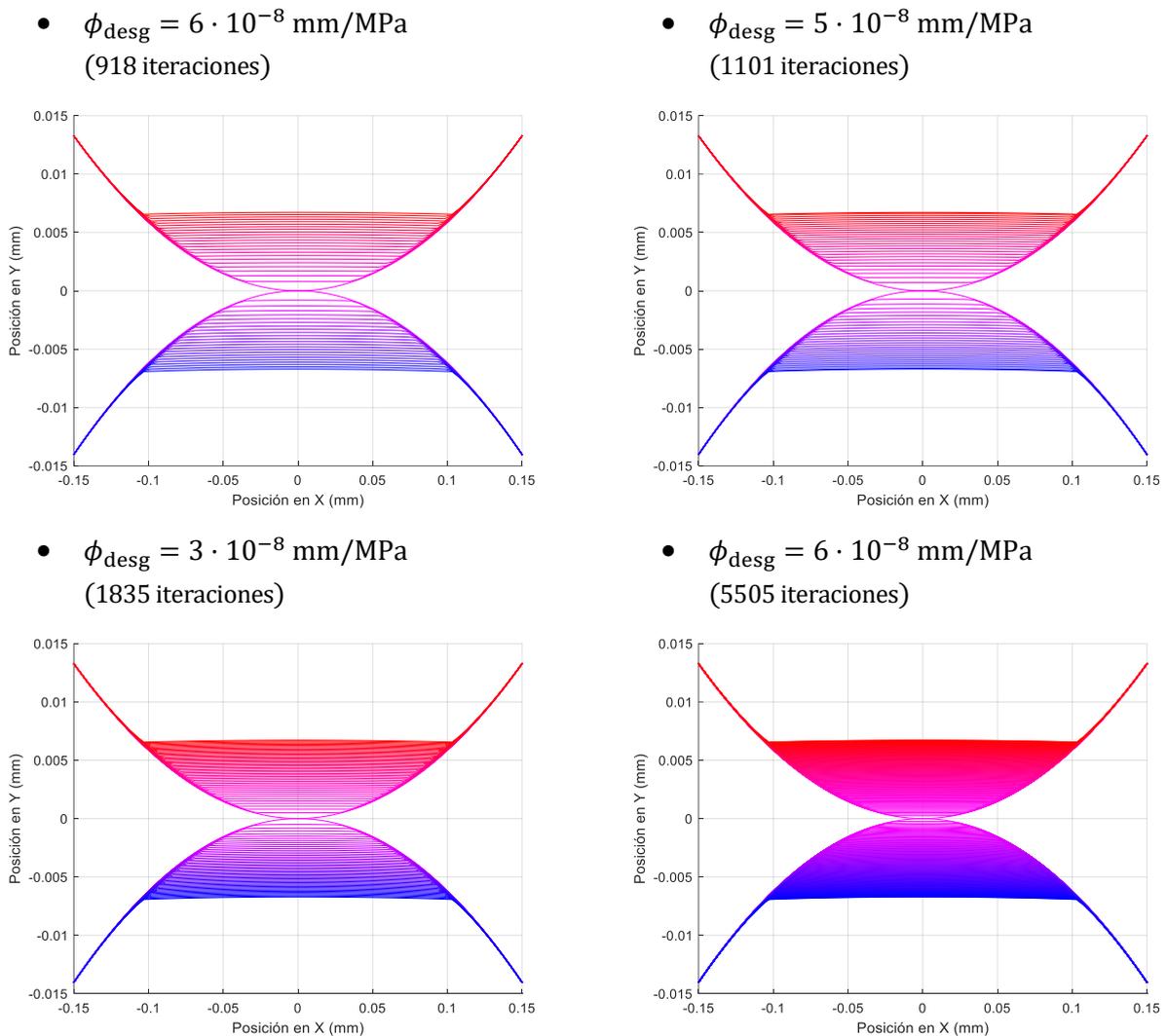


Figura 5-11. Desgaste para cada constante de desgaste.

La profundidad del desgaste medido, para ambos hilos y en todos los casos, es de $5.3 \mu\text{m}$.

Como se puede ver, el valor de la constante de desgaste no altera al desgaste medido, sino que solamente varía el desgaste por iteración, aumentando el número de iteraciones necesarias para alcanzar el mismo valor de desgaste. Esta relación puede verse en la siguiente gráfica:

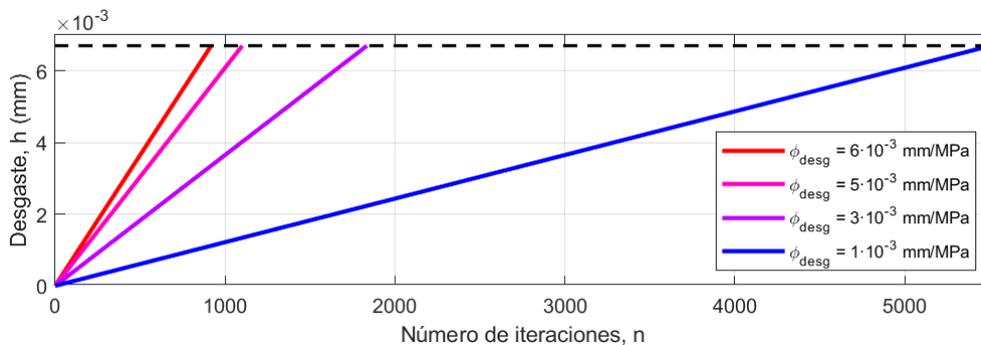


Figura 5-12. Evolución del número de ciclos con la constante de desgaste.

Teniendo en cuenta que se tiene un valor máximo a partir del cual el modelo no converge y con el objetivo de minimizar el tiempo de computación, se tomará en adelante:

$$\phi_{\text{desg}} = 6 \cdot 10^{-8} \frac{\text{mm}}{\text{MPa}} \tag{5-3}$$

5.5 Resultados de las simulaciones

Una vez analizados los resultados del modelo, se pueden lanzar las diferentes simulaciones. Para el caso del ensayo 4, se obtienen los siguientes resultados:

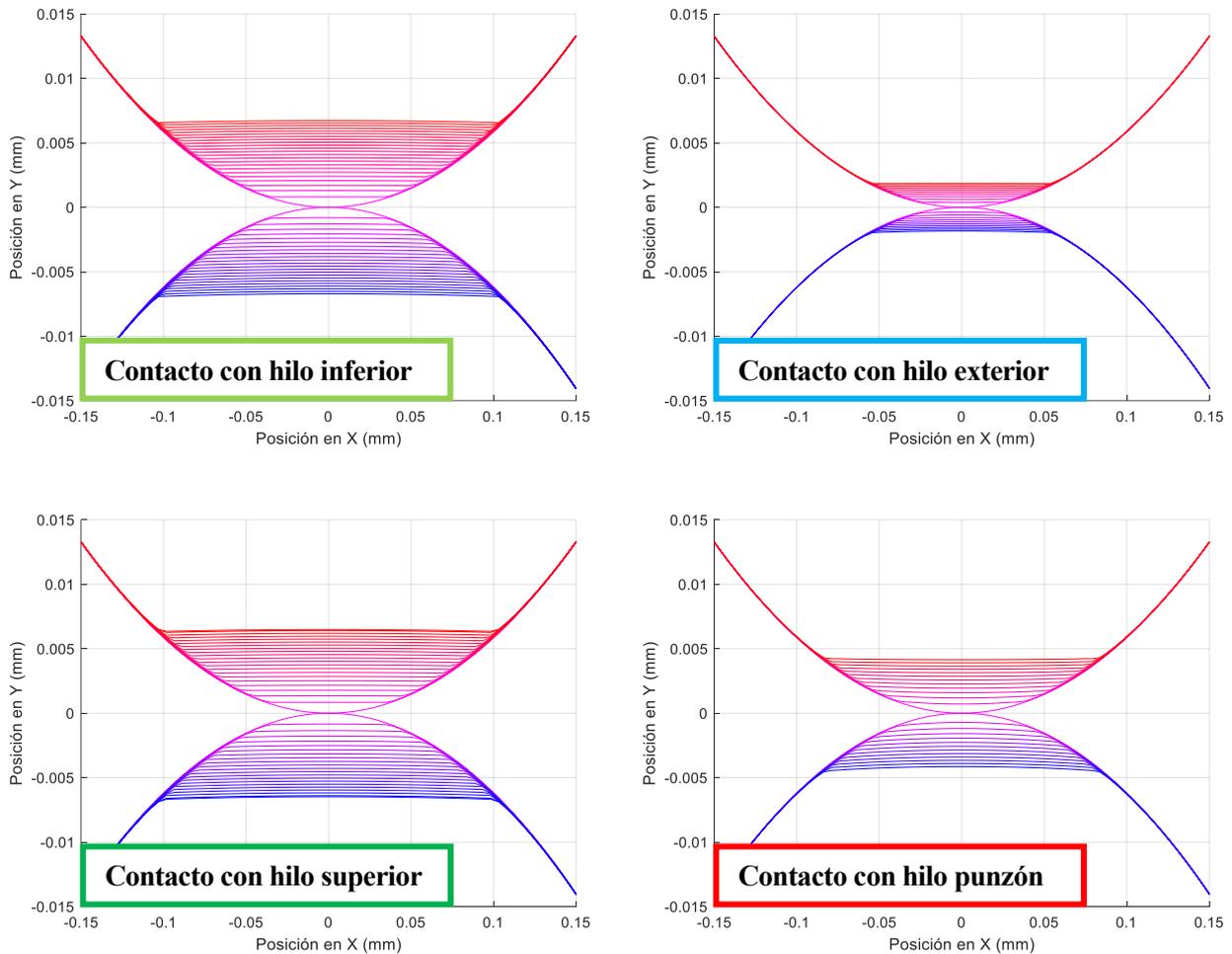


Figura 5-13. Simulación del modelo (ensayo 4).

Las dimensiones de las huellas correspondientes al hilo interior se encuentran recogidas en la siguiente tabla:

Tabla 5-5. Medidas de las huellas (estimadas).

Zona de contacto	Profundidad, d (μm)	Ancho, w (μm)
Inferior	6.7	210
Exterior	1.8	110
Superior	6.5	210
Vecino 1	-	-
Punzón	4.1	165
Vecino 2	-	-

6 CONCLUSIONES

La vida es el arte de sacar conclusiones suficientes a partir de datos insuficientes.

- Samuel Butler -

Finalizado el proceso para crear un modelo que sea capaz de predecir las huellas de desgaste aparecidas sobre la superficie del hilo interior de un cable trenzado de siete hilos ensayado a fatiga, quedaría pendiente hacer un análisis más exhaustivo de los resultados obtenidos y ver qué conclusiones se pueden sacar de ellos.

Para hacer posible la realización de dicho modelo numérico, son varias las hipótesis y simplificaciones que se han ido tomando a lo largo de todo el proceso, siendo las principales:

- Se ha considerado cada par de contacto entre el hilo interior y cada uno de los otros de forma aislada. De esta manera, se han obviado los posibles contactos entre los hilos exteriores.
- Se han supuesto constantes tanto la carga aplicada sobre cada par de contacto como el deslizamiento relativo entre ambos hilos. De esta manera, se han obviado las posibles variaciones de carga y deslizamiento que pudiera haber a lo largo del ensayo a medida que los hilos se desgastan.
- Se ha tomado un modelo simplificado del desgaste, como es el modelo de Archard, que sólo tiene en cuenta la presión de contacto y el deslizamiento relativo entre cada hilo.

Para extraer las conclusiones del trabajo y analizar la validez de los resultados, con el fin de comprobar si las simplificaciones hechas afectan a los resultados, se han hecho dos tipos de análisis:

- Un **análisis cualitativo** para valorar si el modelo predice cómo se desgastaría el hilo.
- Un **análisis cuantitativo** para valorar si el modelo predice cuánto se desgastaría el hilo.



Figura 6-1. Conclusiones.

6.1 Análisis cualitativo

Se analiza cómo se ha desgastado cada zona de contacto tanto en el modelo como en la muestra real:

- **Zona de desgaste hilos inferior y superior**

En estas zonas, se observa que las presiones en las zonas de contacto son bastante más bajas que en los hilos situados en el eje de aplicación de la carga. Sin embargo, los deslizamientos relativos son mucho más altos (orden de magnitud superior) en estos hilos debido a la flexión del cable durante el desplazamiento.

En consecuencia, tanto en las imágenes del microscopio confocal como en el modelo numérico, en estas zonas se observan las huellas de mayor tamaño.

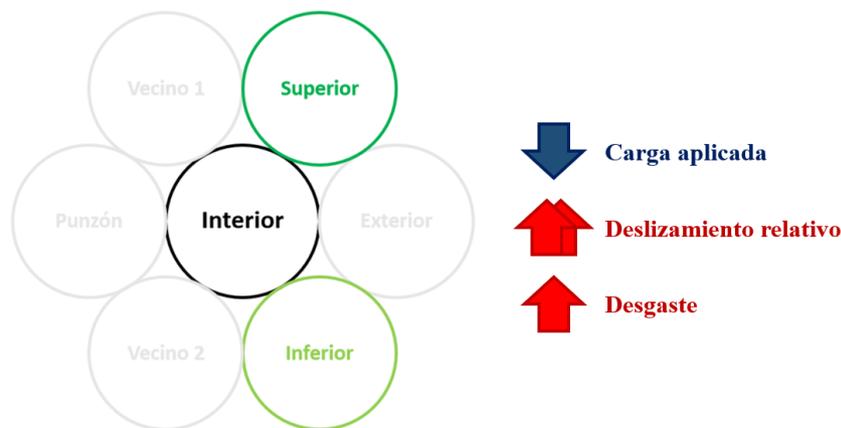


Figura 6-2. Análisis cualitativo en zonas inferior y superior.

- **Zona de desgaste hilo punzón**

En esta zona, la presión de contacto es máxima, mucho mayor (orden de magnitud superior) a la medida en los hilos inferior y superior, debido a que sobre el hilo punzón se aplica la carga. Por otro lado, el deslizamiento relativo es mucho más bajo (orden de magnitud inferior) ya que el hilo punzón está alineado con el hilo interior respecto a la dirección del desplazamiento del cable.

En consecuencia, tanto en las imágenes del microscopio confocal como en el modelo numérico, en esta zona se observa una huella de un tamaño algo menor que la de las zonas de contacto de los hilos inferior y superior.

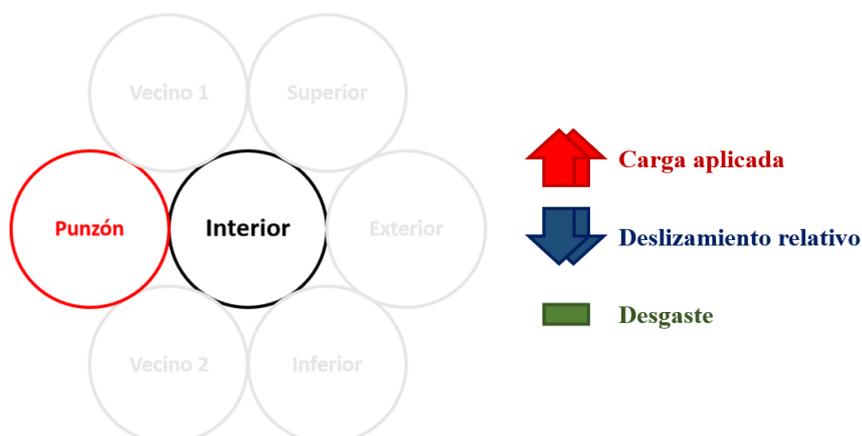


Figura 6-3. Análisis cualitativo en zona punzón.

- **Zona de desgaste hilo exterior**

En esta zona, la presión de contacto es varias veces mayor que la medida en los hilos inferior y superior, pero menor que la presión de contacto en la zona del hilo punzón. Esto es debido a que la carga del punzón se reparte por el resto de contactos antes de llegar al hilo exterior. Además, al igual que con el hilo punzón, el deslizamiento relativo en esta zona es mucho más bajo (orden de magnitud inferior).

En consecuencia, tanto en las imágenes del microscopio confocal como en el modelo numérico, en esta zona se tiene una huella de menor tamaño en comparación a la observada en las demás zonas de contacto.

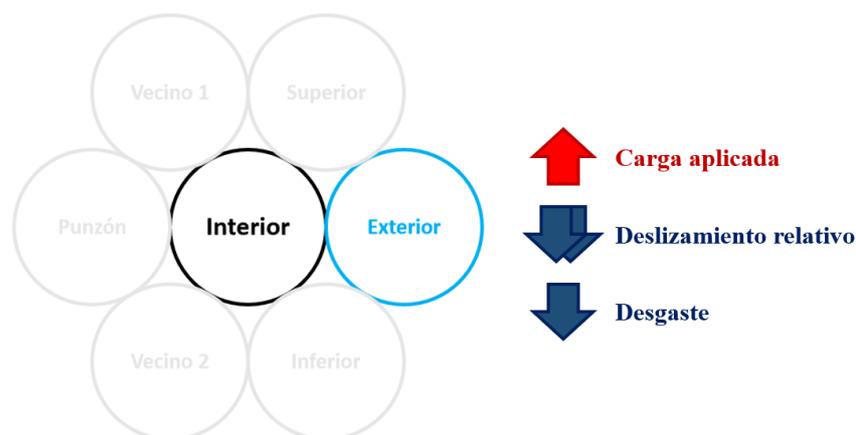


Figura 6-4. Análisis cualitativo en zona exterior.

En conclusión, se puede decir que el modelo aquí expuesto obtiene una distribución del desgaste en cada zona de contacto similar a la que aparece en los hilos ensayados, a excepción de los hilos vecinos, los cuales no ha sido posible simular. Por tanto, desde un punto de vista cualitativo, el modelo es válido y podría ayudar a predecir el desgaste.

6.2 Análisis cuantitativo

Se analiza cuánto se ha desgastado cada zona de contacto tanto en el modelo como en la muestra real. Para ello, se realiza una comparativa entre los valores medidos con las imágenes del microscopio confocal y los valores obtenidos a través del modelo numérico, los cuales se muestran en la siguiente tabla

Tabla 6–1. Comparativa de las medidas de las huellas.

Zona de contacto	Profundidad, d (mm)		Ancho, w (mm)	
	Estimado	Medido	Estimado	Medido
Inferior	6.7	13	210	290
Exterior	1.8	6	110	180
Superior	6.5	13	210	300
Vecino 1	-	8	-	240
Punzón	4.1	7	165	220
Vecino 2	-	7	-	230

Como puede observarse, existe una discrepancia entre los valores estimados y los valores medidos. Esto puede deberse a algunas de las hipótesis tomadas o a múltiples factores. Algunos de los motivos podrían ser:

- El valor del coeficiente de desgaste depende de las condiciones del ensayo. No obstante, en este trabajo se ha tomado un valor para un acero similar utilizado en otro análisis, por lo que es posible que este valor subestime al valor real. Como consecuencia, se tendrá un desgaste estimado inferior al que realmente habría.
- El modelo aquí presentado establece que las superficies de contacto de ambos hilos se desgastan por igual. Sin embargo, según se ha observado en las muestras de los ensayos, esto no se cumple, y siempre uno de los dos hilos en contacto se desgasta más que el otro.
- El modelo de Archard propuesto es un modelo predictivo basado en un único mecanismo de desgaste, de manera que no puede describir procesos que incluyan otros mecanismos, como pueden ser el desgaste adhesivo o el desgaste a tres cuerpos [11]. Por tanto, es posible que se tengan múltiples mecanismos de desgaste que no puedan predecirse con el modelo propuesto.

En conclusión, se puede decir que el modelo no predice con exactitud el desgaste aparecido sobre los hilos. No obstante, los fundamentos sobre los que éste se basa hacen posible su mejora, con el fin de que los resultados se ajusten a los reales.

6.3 Vías de trabajo futuro

El objetivo de este trabajo ha sido el de comprobar que era posible crear un modelo simplificado que permita predecir el desgaste en cables de acero. Los resultados, aunque no exactos, son los suficientemente esperanzadores para determinar que ésta es una vía de investigación posible y que este modelo puede utilizarse para investigaciones futuras.

No obstante, la simplicidad del modelo permite que éste tenga un amplio abanico de posibles mejoras futuras, como pueden ser:

- Realizar el mismo proceso de medición y simulación para más ensayos, con el fin de obtener mayor cantidad de datos.
- Incluir en el modelo otros parámetros que lo hagan más complejo, como un desgaste asimétrico o los contactos entre todos los hilos.
- Encontrar un valor del coeficiente de desgaste K/H que prediga con mayor exactitud el desgaste en este tipo de ensayos.

ANEXO A: CÓDIGO DE ANSYS

```
FINISH
/CLEAR
/FILNAME,fichero_ansys
/prep7
*AFUN,DEG
/PNUM,KP,1
/PNUM,LINE,1
/PNUM,AREA,1
seltol,10e-15
!DATOS DE ENTRADA
r_ext=0.855000
r_int=0.810000
P=100.0
E=210000
nu=0.3
pi=3.1416
am=2e-1
!ÁNGULOS
fact_beta=2
fact_gamma=4
r=r_ext
alpha_e=acos(am/r)
beta_e=acos(fact_beta*am/r)
gamma_e=acos(fact_gamma*am/r)
r=r_int
alpha_i=acos(am/r)
beta_i=acos(fact_beta*am/r)
gamma_i=acos(fact_gamma*am/r)
t_elem=0.002000
/prep7
SHPP,on
ET,1,plane182
KEYOPT,1,3,2 !Deformacion plana
ET,6,plane182
KEYOPT,6,3,2 !Deformacion plana
MP,EX,1,E
MP,NUXY,1,NU
MP,MU,1,MU
MSHAPE,0,2D !MESH TYPE IS SELECTED
MSHKEY,1
!SISTEMA DE COORDENADAS LOCALES
LOCAL,12,0,0,r_ext-0.000005,0,
LOCAL,13,1,0,r_ext-0.000005,0,
LOCAL,14,0,0,-r_int+0.000005,0,180,0,0
LOCAL,15,1,0,-r_int+0.000005,0,180,0,0
!GEOMETRIA HILO EXTERIOR
!creacion de keypoints
r=r_ext
alpha=alpha_e
beta=beta_e
gamma=gamma_e
csys,12
k,1,-r*cos(gamma),-r+fact_gamma*am
k,2,r*cos(gamma),-r+fact_gamma*am
csys,13
k,3,-r,alpha
k,4,r,-alpha
k,5,-r,beta
k,6,r,-beta
k,7,-r,gamma
k,8,r,-gamma
```

```

csys,12
k,9,-am,-r+0.5*am
k,10,am,-r+0.5*am
k,11,-fact_beta*am,-r+fact_beta*am
k,12,fact_beta*am,-r+fact_beta*am
!creacion de lineas
csys,12
l,1,2
l,1,7
l,2,8
l,11,5
l,12,6
l,9,3
l,10,4
l,11,12
l,9,10
l,11,1
l,12,2
l,11,9
l,10,12
csys,13
l,7,5
l,5,3
l,4,6
l,6,8
!creacion de areas
al,14,2,10,4
al,4,12,6,15
al,13,5,16,7
al,9,12,8,13
al,10,1,11,8
al,11,3,17,5

!GEOMETRIA HILO INTERIOR
!creacion de keypoints
csys,14
r=r_int
alpha=alpha_i
beta=beta_i
gamma=gamma_i
k,13,-r*cos(gamma),-r+fact_gamma*am
k,14,r*cos(gamma),-r+fact_gamma*am
csys,15
k,15,-r,alpha
k,16,r,-alpha
k,17,-r,beta
k,18,r,-beta
k,19,-r,gamma
k,20,r,-gamma
csys,14
k,21,-am,-r+0.5*am
k,22,am,-r+0.5*am
k,23,-fact_beta*am,-r+fact_beta*am
k,24,fact_beta*am,-r+fact_beta*am
!creacion de lineas
csys,14
l,13,14
l,13,19
l,14,20
l,23,17
l,24,18
l,21,15
l,22,16
l,23,24

```

```
1,21,22
1,23,13
1,24,14
1,23,21
1,22,24
csys,15
1,19,17
1,17,15
1,16,18
1,18,20
!creacion de areas
al,31,19,27,21
al,21,29,23,32
al,30,22,33,24
al,26,29,25,30
al,27,18,28,25
al,28,20,34,22

!SUPERFICIE CONTACTO HILO INTERIOR
csys,12
k,25,-0.200000,-0.831279
k,26,-0.197112,-0.831969
k,27,-0.194223,-0.832648
k,28,-0.191330,-0.833317
k,29,-0.188436,-0.833977
k,30,-0.185539,-0.834626
k,31,-0.182640,-0.835265
k,32,-0.179739,-0.835894
k,33,-0.176835,-0.836513
k,34,-0.173930,-0.837122
k,35,-0.171022,-0.837721
k,36,-0.168112,-0.838310
k,37,-0.165201,-0.838888
k,38,-0.162287,-0.839457
k,39,-0.159371,-0.840015
k,40,-0.156454,-0.840564
k,41,-0.153534,-0.841102
k,42,-0.150613,-0.841630
k,43,-0.147690,-0.842148
k,44,-0.144765,-0.842655
k,45,-0.141838,-0.843153
k,46,-0.138910,-0.843640
k,47,-0.135979,-0.844118
k,48,-0.133048,-0.844585
k,49,-0.130114,-0.845042
k,50,-0.127180,-0.845488
k,51,-0.124243,-0.845925
k,52,-0.121305,-0.846351
k,53,-0.118366,-0.846767
k,54,-0.115425,-0.847173
k,55,-0.112483,-0.847569
k,56,-0.109539,-0.847954
k,57,-0.106594,-0.848329
k,58,-0.103648,-0.848694
k,59,-0.100701,-0.849049
k,60,-0.097752,-0.849394
k,61,-0.094803,-0.849728
k,62,-0.091852,-0.850052
k,63,-0.088900,-0.850366
k,64,-0.085946,-0.850669
k,65,-0.082992,-0.850963
k,66,-0.080037,-0.851246
k,67,-0.077081,-0.851518
k,68,-0.074124,-0.851781
```

```
k,69,-0.071166,-0.852033
k,70,-0.068207,-0.852275
k,71,-0.065248,-0.852507
k,72,-0.062287,-0.852728
k,73,-0.059326,-0.852939
k,74,-0.056364,-0.853140
k,75,-0.053402,-0.853331
k,76,-0.050438,-0.853511
k,77,-0.047475,-0.853681
k,78,-0.044510,-0.853841
k,79,-0.041545,-0.853990
k,80,-0.038580,-0.854129
k,81,-0.035614,-0.854258
k,82,-0.032648,-0.854376
k,83,-0.029681,-0.854485
k,84,-0.026714,-0.854583
k,85,-0.023746,-0.854670
k,86,-0.020779,-0.854747
k,87,-0.017811,-0.854814
k,88,-0.014843,-0.854871
k,89,-0.011874,-0.854918
k,90,-0.008906,-0.854954
k,91,-0.005937,-0.854979
k,92,-0.002969,-0.854995
k,93,0.002969,-0.854995
k,94,0.005937,-0.854979
k,95,0.008906,-0.854954
k,96,0.011874,-0.854918
k,97,0.014843,-0.854871
k,98,0.017811,-0.854814
k,99,0.020779,-0.854747
k,100,0.023746,-0.854670
k,101,0.026714,-0.854583
k,102,0.029681,-0.854485
k,103,0.032648,-0.854376
k,104,0.035614,-0.854258
k,105,0.038580,-0.854129
k,106,0.041545,-0.853990
k,107,0.044510,-0.853841
k,108,0.047475,-0.853681
k,109,0.050438,-0.853511
k,110,0.053402,-0.853331
k,111,0.056364,-0.853140
k,112,0.059326,-0.852939
k,113,0.062287,-0.852728
k,114,0.065248,-0.852507
k,115,0.068207,-0.852275
k,116,0.071166,-0.852033
k,117,0.074124,-0.851781
k,118,0.077081,-0.851518
k,119,0.080037,-0.851246
k,120,0.082992,-0.850963
k,121,0.085946,-0.850669
k,122,0.088900,-0.850366
k,123,0.091852,-0.850052
k,124,0.094803,-0.849728
k,125,0.097752,-0.849394
k,126,0.100701,-0.849049
k,127,0.103648,-0.848694
k,128,0.106594,-0.848329
k,129,0.109539,-0.847954
k,130,0.112483,-0.847569
k,131,0.115425,-0.847173
k,132,0.118366,-0.846767
```

```
k,133,0.121305,-0.846351
k,134,0.124243,-0.845925
k,135,0.127180,-0.845488
k,136,0.130114,-0.845042
k,137,0.133048,-0.844585
k,138,0.135979,-0.844118
k,139,0.138910,-0.843640
k,140,0.141838,-0.843153
k,141,0.144765,-0.842655
k,142,0.147690,-0.842148
k,143,0.150613,-0.841630
k,144,0.153534,-0.841102
k,145,0.156454,-0.840564
k,146,0.159371,-0.840015
k,147,0.162287,-0.839457
k,148,0.165201,-0.838888
k,149,0.168112,-0.838310
k,150,0.171022,-0.837721
k,151,0.173930,-0.837122
k,152,0.176835,-0.836513
k,153,0.179739,-0.835894
k,154,0.182640,-0.835265
k,155,0.185539,-0.834626
k,156,0.188436,-0.833977
k,157,0.191330,-0.833317
k,158,0.194223,-0.832648
k,159,0.197112,-0.831969
k,160,0.200000,-0.831279
l,3,25
l,25,26
l,26,27
l,27,28
l,28,29
l,29,30
l,30,31
l,31,32
l,32,33
l,33,34
l,34,35
l,35,36
l,36,37
l,37,38
l,38,39
l,39,40
l,40,41
l,41,42
l,42,43
l,43,44
l,44,45
l,45,46
l,46,47
l,47,48
l,48,49
l,49,50
l,50,51
l,51,52
l,52,53
l,53,54
l,54,55
l,55,56
l,56,57
l,57,58
l,58,59
l,59,60
```

```
1,60,61
1,61,62
1,62,63
1,63,64
1,64,65
1,65,66
1,66,67
1,67,68
1,68,69
1,69,70
1,70,71
1,71,72
1,72,73
1,73,74
1,74,75
1,75,76
1,76,77
1,77,78
1,78,79
1,79,80
1,80,81
1,81,82
1,82,83
1,83,84
1,84,85
1,85,86
1,86,87
1,87,88
1,88,89
1,89,90
1,90,91
1,91,92
1,92,93
1,93,94
1,94,95
1,95,96
1,96,97
1,97,98
1,98,99
1,99,100
1,100,101
1,101,102
1,102,103
1,103,104
1,104,105
1,105,106
1,106,107
1,107,108
1,108,109
1,109,110
1,110,111
1,111,112
1,112,113
1,113,114
1,114,115
1,115,116
1,116,117
1,117,118
1,118,119
1,119,120
1,120,121
1,121,122
1,122,123
1,123,124
```

```
1,124,125
1,125,126
1,126,127
1,127,128
1,128,129
1,129,130
1,130,131
1,131,132
1,132,133
1,133,134
1,134,135
1,135,136
1,136,137
1,137,138
1,138,139
1,139,140
1,140,141
1,141,142
1,142,143
1,143,144
1,144,145
1,145,146
1,146,147
1,147,148
1,148,149
1,149,150
1,150,151
1,151,152
1,152,153
1,153,154
1,154,155
1,155,156
1,156,157
1,157,158
1,158,159
1,159,160
1,160,4
lsel,S,LINE,,35,171
cm,sup_contactol,LINE
lsel,A,LINE,,6
lsel,A,LINE,,7
lsel,A,LINE,,9
cm,area_contactol,LINE
al,area_contactol
aglu,1,2,3,4,5,6,7,13
!mallado del area de contacto
lccat,sup_contactol
LESIZE,sup_contactol,t_elem
LESIZE,6,t_elem
LESIZE,7,t_elem
amesh,13

!SUPERFICIE CONTACTO HILO EXTERIOR
csys,14
k,161,-0.200000,-0.784920
k,162,-0.197112,-0.785651
k,163,-0.194223,-0.786370
k,164,-0.191330,-0.787079
k,165,-0.188436,-0.787777
k,166,-0.185539,-0.788464
k,167,-0.182640,-0.789140
k,168,-0.179739,-0.789806
k,169,-0.176835,-0.790461
k,170,-0.173930,-0.791106
```

```
k,171,-0.171022,-0.791740
k,172,-0.168112,-0.792363
k,173,-0.165201,-0.792975
k,174,-0.162287,-0.793576
k,175,-0.159371,-0.794167
k,176,-0.156454,-0.794747
k,177,-0.153534,-0.795316
k,178,-0.150613,-0.795874
k,179,-0.147690,-0.796422
k,180,-0.144765,-0.796959
k,181,-0.141838,-0.797485
k,182,-0.138910,-0.798000
k,183,-0.135979,-0.798505
k,184,-0.133048,-0.798998
k,185,-0.130114,-0.799481
k,186,-0.127180,-0.799953
k,187,-0.124243,-0.800415
k,188,-0.121305,-0.800865
k,189,-0.118366,-0.801305
k,190,-0.115425,-0.801734
k,191,-0.112483,-0.802152
k,192,-0.109539,-0.802559
k,193,-0.106594,-0.802956
k,194,-0.103648,-0.803341
k,195,-0.100701,-0.803716
k,196,-0.097752,-0.804080
k,197,-0.094803,-0.804433
k,198,-0.091852,-0.804775
k,199,-0.088900,-0.805107
k,200,-0.085946,-0.805427
k,201,-0.082992,-0.805737
k,202,-0.080037,-0.806036
k,203,-0.077081,-0.806324
k,204,-0.074124,-0.806601
k,205,-0.071166,-0.806868
k,206,-0.068207,-0.807123
k,207,-0.065248,-0.807368
k,208,-0.062287,-0.807602
k,209,-0.059326,-0.807825
k,210,-0.056364,-0.808037
k,211,-0.053402,-0.808238
k,212,-0.050438,-0.808428
k,213,-0.047475,-0.808608
k,214,-0.044510,-0.808776
k,215,-0.041545,-0.808934
k,216,-0.038580,-0.809081
k,217,-0.035614,-0.809217
k,218,-0.032648,-0.809342
k,219,-0.029681,-0.809456
k,220,-0.026714,-0.809559
k,221,-0.023746,-0.809652
k,222,-0.020779,-0.809733
k,223,-0.017811,-0.809804
k,224,-0.014843,-0.809864
k,225,-0.011874,-0.809913
k,226,-0.008906,-0.809951
k,227,-0.005937,-0.809978
k,228,-0.002969,-0.809995
k,229,0.002969,-0.809995
k,230,0.005937,-0.809978
k,231,0.008906,-0.809951
k,232,0.011874,-0.809913
k,233,0.014843,-0.809864
k,234,0.017811,-0.809804
```

```
k,235,0.020779,-0.809733
k,236,0.023746,-0.809652
k,237,0.026714,-0.809559
k,238,0.029681,-0.809456
k,239,0.032648,-0.809342
k,240,0.035614,-0.809217
k,241,0.038580,-0.809081
k,242,0.041545,-0.808934
k,243,0.044510,-0.808776
k,244,0.047475,-0.808608
k,245,0.050438,-0.808428
k,246,0.053402,-0.808238
k,247,0.056364,-0.808037
k,248,0.059326,-0.807825
k,249,0.062287,-0.807602
k,250,0.065248,-0.807368
k,251,0.068207,-0.807123
k,252,0.071166,-0.806868
k,253,0.074124,-0.806601
k,254,0.077081,-0.806324
k,255,0.080037,-0.806036
k,256,0.082992,-0.805737
k,257,0.085946,-0.805427
k,258,0.088900,-0.805107
k,259,0.091852,-0.804775
k,260,0.094803,-0.804433
k,261,0.097752,-0.804080
k,262,0.100701,-0.803716
k,263,0.103648,-0.803341
k,264,0.106594,-0.802956
k,265,0.109539,-0.802559
k,266,0.112483,-0.802152
k,267,0.115425,-0.801734
k,268,0.118366,-0.801305
k,269,0.121305,-0.800865
k,270,0.124243,-0.800415
k,271,0.127180,-0.799953
k,272,0.130114,-0.799481
k,273,0.133048,-0.798998
k,274,0.135979,-0.798505
k,275,0.138910,-0.798000
k,276,0.141838,-0.797485
k,277,0.144765,-0.796959
k,278,0.147690,-0.796422
k,279,0.150613,-0.795874
k,280,0.153534,-0.795316
k,281,0.156454,-0.794747
k,282,0.159371,-0.794167
k,283,0.162287,-0.793576
k,284,0.165201,-0.792975
k,285,0.168112,-0.792363
k,286,0.171022,-0.791740
k,287,0.173930,-0.791106
k,288,0.176835,-0.790461
k,289,0.179739,-0.789806
k,290,0.182640,-0.789140
k,291,0.185539,-0.788464
k,292,0.188436,-0.787777
k,293,0.191330,-0.787079
k,294,0.194223,-0.786370
k,295,0.197112,-0.785651
k,296,0.200000,-0.784920
l,15,161
l,161,162
```

```
1,162,163
1,163,164
1,164,165
1,165,166
1,166,167
1,167,168
1,168,169
1,169,170
1,170,171
1,171,172
1,172,173
1,173,174
1,174,175
1,175,176
1,176,177
1,177,178
1,178,179
1,179,180
1,180,181
1,181,182
1,182,183
1,183,184
1,184,185
1,185,186
1,186,187
1,187,188
1,188,189
1,189,190
1,190,191
1,191,192
1,192,193
1,193,194
1,194,195
1,195,196
1,196,197
1,197,198
1,198,199
1,199,200
1,200,201
1,201,202
1,202,203
1,203,204
1,204,205
1,205,206
1,206,207
1,207,208
1,208,209
1,209,210
1,210,211
1,211,212
1,212,213
1,213,214
1,214,215
1,215,216
1,216,217
1,217,218
1,218,219
1,219,220
1,220,221
1,221,222
1,222,223
1,223,224
1,224,225
1,225,226
```

1,226,227
1,227,228
1,228,229
1,229,230
1,230,231
1,231,232
1,232,233
1,233,234
1,234,235
1,235,236
1,236,237
1,237,238
1,238,239
1,239,240
1,240,241
1,241,242
1,242,243
1,243,244
1,244,245
1,245,246
1,246,247
1,247,248
1,248,249
1,249,250
1,250,251
1,251,252
1,252,253
1,253,254
1,254,255
1,255,256
1,256,257
1,257,258
1,258,259
1,259,260
1,260,261
1,261,262
1,262,263
1,263,264
1,264,265
1,265,266
1,266,267
1,267,268
1,268,269
1,269,270
1,270,271
1,271,272
1,272,273
1,273,274
1,274,275
1,275,276
1,276,277
1,277,278
1,278,279
1,279,280
1,280,281
1,281,282
1,282,283
1,283,284
1,284,285
1,285,286
1,286,287
1,287,288
1,288,289
1,289,290

```

1,290,291
1,291,292
1,292,293
1,293,294
1,294,295
1,295,296
1,296,16
lssel,S,LINE,,173,309
cm,sup_contacto2,LINE
lssel,A,LINE,,23
lssel,A,LINE,,24
lssel,A,LINE,,26
cm,area_contacto2,LINE
al,area_contacto2
aglu,7,8,9,10,11,12,14
!mallado del area de contacto
lccat,sup_contacto2
LESIZE,sup_contacto2,t_elem
LESIZE,23,t_elem
LESIZE,24,t_elem
amesh,14

!MALLADO DEL RESTO DE ÁREAS
MSHAPE,1,2D !MESH TYPE IS SELECTED
MSHKEY,0
amesh,1
amesh,2
amesh,3
amesh,4
amesh,5
amesh,6
amesh,7
amesh,8
amesh,9
amesh,10
amesh,11
amesh,12

!*****
!*****CONSTRUCCIÓN DEL PAR DE CONTACTO -INICIO-*****
!*****
/COM, CONTACT PAIR CREATION - START
  CM,_NODECM,NODE
  CM,_ELEMCM,ELEM
  CM,_KPCM,KP
  CM,_LINECM,LINE
  CM,_AREACM,AREA
  CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,MU
MAT,1
R,3
REAL,3
ET,2,169
ET,3,171
R,3,R,,1,1E-10,
RMORE,,1.0E20,0.0,1.0,1
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
KEYOPT,3,2,0
KEYOPT,3,3,0
KEYOPT,3,4,0
KEYOPT,3,5,3
KEYOPT,3,7,0

```

```

KEYOPT,3,8,0
KEYOPT,3,9,0
KEYOPT,3,10,2
KEYOPT,3,11,0
KEYOPT,3,12,0
!Generate the target surface
LSEL,S,,,sup_contacto1
NSLL,S,1
CM,_TARGET,NODE
TYPE,2
ESLN,S,0
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
!Generate the contact surface
LSEL,S,,,sup_contacto2,
NSLL,S,1
CM,_CONTACT,NODE
TYPE,3
ESLN,S,0
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
/COM, CONTACT PAIR CREATION - END

!*****
!*****CONSTRUCCIÓN DEL PAR DE CONTACTO -FIN-*****
!*****

!CONDICIONES DE CONTORNO
csys,12
r=r_ext
N,,0,-r+1.1*fact_gamma*am,
masternl=node(0,-r+1.1*fact_gamma*am,0)
SELTOL,10e-15
ET,80,MASS21
R,80,1E-10,1E-10,1E-10,1E-10,1E-10,1E-10
TYPE,80
REAL,80

```

```

E,mastern1
SELTOL,10e-15
NSEL,S,LOC,Y,-r+fact_gamma*am
NSEL,a,node,,mastern1
CERIG,mastern1,all,,,
ALLSEL,ALL

csys,14
r=r_int
NSEL,S,LOC,Y,-r+fact_gamma*am
D,all,all
allsel,all
D,mastern1,ux,0
D,mastern1,rotz,0

FINISH

/SOLU

NLGEOM,ON
EQSLV,pcg
OUTRES,ALL,ALL !SOLUTION OPTIONS
!NSUB,250,2500,15
DELTIM,0.001,0.001,0.1
!SF,nodos_pres,PRES,10
F,MASTERN1,fy,-P!/nodemax
!F,mastern2,fx,q2
ALLSEL
SOLVE

FINISH

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!   POSTPROCESO DE RESULTADOS   !!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

/post1
/GRAPHICS,FULL
set,1,last
lsel,S,LINE, ,sup_contacto1
nsl1,s,1
nset,u,loc,x,0
cm,nodos_map1,node
lsel,S,LINE, ,sup_contacto2
nsl1,s,1
nset,u,loc,x,0
cm,nodos_map2,node

csys,12
set,1,last
nset,S,NODE, ,nodos_map1
*get,numnode,node,,count
*DIME,nodos_map1,ARRAY,numnode,1, , ,
*vget,nodos_map1,node,,nlist !almacena los nodos seleccionados
nn=numnode
ALLSEL
*DIME,TABLA_AUX,ARRAY,nn,6
*DO,I,1,nn,1
cor_x=nx(nodos_map1(I,1))
cor_y=ny(nodos_map1(I,1))
TABLA_AUX(I,1,1)=cor_x
TABLA_AUX(I,2,1)=cor_y
*get,sy,node,nodos_map1(I,1),s,y
TABLA_AUX(I,3,1)=sy

```

```
*ENDDO

csys,14
set,1,last
nset,S,NODE,,nodos_map2
*get,numnode,node,,count
*DIM,nodos_map2,ARRAY,numnode,1,, , ,
*vget,nodos_map2,node,,nlist !almacena los nodos seleccionados
nn=numnode
ALLSEL
*DO,I,1,nn,1
  cor_x=nx(nodos_map2(I,1))
  cor_y=ny(nodos_map2(I,1))
  TABLA_AUX(I,4,1)=cor_x
  TABLA_AUX(I,5,1)=cor_y
  *get,sy,node,nodos_map2(I,1),s,y
  TABLA_AUX(I,6,1)=sy
*ENDDO

allsel,all

*CREATE,'MACRO_ESCRIT',' ',' '
*CFOPEN,info,dat,,
*VWRITE,TABLA_AUX(1,1,1),TABLA_AUX(1,2,1),TABLA_AUX(1,3,1),TABLA_AUX(1,4,1),
TABLA_AUX(1,5,1),TABLA_AUX(1,6,1),
((SP)6E14.6,' ')
*CFCLOS
*END

*USE,MACRO_ESCRIT
```


ANEXO B: CÓDIGO DE MATLAB

```
close all
clc
clear all

global t_elem
global P
global r_ext
global r_int

P=100;

r_ext=1.71/2;
r_int=1.62/2;

t_elem=0.002;
Tam_Elem

M=dlmread('info.dat');
M=[ones(1,6);M;ones(1,6)];

parametros

x_coord_e = M(2:length(M)-1,1);
x_coord_i = M(2:length(M)-1,1);
y_coord_e = -sqrt(r_ext^2-x_coord_e.^2);
y_coord_i = -sqrt(r_int^2-x_coord_i.^2);

h_desg_e=0;
h_desg_i=0;
desp_m_e=-r_ext-y_coord_e(floor(length(y_coord_e)/2));
desp_m_i=-r_int-y_coord_i(floor(length(y_coord_i)/2));
desg_m_e=desp_m_e;
desg_m_i=desp_m_i;

iter=1;

for i=1:iter

    sist_coord(-desg_m_e,-desg_m_i)

    k_p=24;
    k_p=sup_contacto1(x_coord_e,y_coord_e,h_desg_e,k_p);

    k_p=sup_contacto2(x_coord_i,y_coord_i,h_desg_i,k_p);

    sel_nodos(x_coord_e)

    system('copy
Parametros.txt+Desgaste.txt+Geom_Cilindros.txt+Sup_Contacto1.txt+Sup_Contacto2.t
+Mallado.txt+Contacto.txt +CC_RESULT.txt+Nodos.txt+POST.txt fichero_ansys.mac')
    system('SET KMP_STACKSIZE=4096k &
"C:\Program Files\ANSYS Inc\v150\ansys\bin\winx64\ANSYS150.exe" -b -i ansys -i
"fichero_ansys.mac" -o "feaoutt.txt" ')

    M=dlmread('info.dat');
    x_coord_e = M(2:length(M)-1,1);
    y_coord_ep = M(2:length(M)-1,2);
    x_coord_i = M(2:length(M)-1,4);
    y_coord_ip = M(2:length(M)-1,5);
```

```

S_y_e = M(2:length(M)-1,3);
S_y_i = M(2:length(M)-1,6);

for k=1:length(S_y_e)
    if S_y_e(k) > 0
        S_y_e(k) = 0;
    end
end

for k=1:length(S_y_i)
    if S_y_i(k) > 0
        S_y_i(k) = 0;
    end
end

j=1-(i-1)/(iter-1);

figure(1)
hold on
plot(x_coord_e,y_coord_ep+r_ext,'Color',[1 0 j])
plot(x_coord_i,-y_coord_ip-r_int,'Color',[j 0 1])

figure(2)
hold on
plot(x_coord_e,-S_y_e,'Color',[0 1 j])
plot(x_coord_i,S_y_i,'Color',[0 j 1])

h_desg_e = h_desg_e + 6e-8*S_y_e;
h_desg_i = h_desg_i + 6e-8*S_y_i;

desg_m_e = desp_m_e + h_desg_e(floor(length(h_desg_e)/2));
desg_m_i = desp_m_i + h_desg_i(floor(length(h_desg_i)/2));

Coord_Xe{i}=x_coord_e;
Coord_Xi{i}=x_coord_i;
Coord_Ye{i}=y_coord_ep;
Coord_Yi{i}=y_coord_ip;
Sigma_Ye{i}=S_y_e;
Sigma_Yi{i}=S_y_i;
save('Variables.mat','Coord_Xe','Coord_Xi','Coord_Ye','Coord_Yi','Sigma_Ye',
'Sigma_Yi')

end

function Tam_Elem

global r_ext
global r_int

parametros

fileID = fopen('Parametros.txt','a');
fclose(fileID);

x_coord = 0;
y_coord_e = -r_ext;
y_coord_i = -r_int;

sist_coord(0,0);

k_p=24;
k_p=sup_contacto1(x_coord,y_coord_e,0,k_p);

```

```

sup_contacto2(x_coord,y_coord_i,0,k_p);

sel_nodos(x_coord)

system('copy
Parametros.txt+Desgaste.txt+Geom_Cilindros.txt+Sup_Contacto1.txt+Sup_Contacto2.t
fichero_ansys.mac')
system('SET KMP_STACKSIZE=4096k & "C:\Program Files\ANSYS
Inc\v150\ansys\bin\winx64\ANSYS150.exe" -b -i ansys -i "fichero_ansys.mac" -o
"feaoutt.txt" ')

end

function parametros

global t_elem
global P
global r_ext
global r_int

fileID = fopen('Parametros.txt','w');

fprintf(fileID,' FINISH\n');
fprintf(fileID,' /CLEAR\n');
fprintf(fileID,' /FILENAME,fichero_ansys\n');

fprintf(fileID,' /prep7\n');
fprintf(fileID,' *AFUN,DEG\n');
fprintf(fileID,' /PNUM,KP,1\n');
fprintf(fileID,' /PNUM,LINE,1\n');
fprintf(fileID,' /PNUM,AREA,1\n');
fprintf(fileID,' seltol,10e-15\n');

fprintf(fileID,' !DATOS DE ENTRADA\n');
fprintf(fileID,' r_ext=%1.6f\n',r_ext);
fprintf(fileID,' r_int=%1.6f\n',r_int);

fprintf(fileID,' P=%1.1f\n',P);
fprintf(fileID,' E=210000\n');
fprintf(fileID,' nu=0.3\n');
fprintf(fileID,' pi=3.1416\n');

fprintf(fileID,' am=2e-1\n');

fprintf(fileID,' !ÁNGULOS\n');
fprintf(fileID,' fact_beta=2\n');
fprintf(fileID,' fact_gamma=4\n');
fprintf(fileID,' r=r_ext\n');
fprintf(fileID,' alpha_e=acos(am/r)\n');
fprintf(fileID,' beta_e=acos(fact_beta*am/r)\n');
fprintf(fileID,' gamma_e=acos(fact_gamma*am/r)\n');
fprintf(fileID,' r=r_int\n');
fprintf(fileID,' alpha_i=acos(am/r)\n');
fprintf(fileID,' beta_i=acos(fact_beta*am/r)\n');
fprintf(fileID,' gamma_i=acos(fact_gamma*am/r)\n');

fprintf(fileID,' t_elem=%1.6f\n',t_elem);

fprintf(fileID,' /prep7\n');
fprintf(fileID,' SHPP,on\n');
fprintf(fileID,' ET,1,planel82\n');
fprintf(fileID,' KEYOPT,1,3,2 !Deformacion plana\n');
fprintf(fileID,' ET,6,planel82\n');
fprintf(fileID,' KEYOPT,6,3,2 !Deformacion plana\n');

```

```

fprintf(fileID, ' MP,EX,1,E\n');
fprintf(fileID, ' MP,NUXY,1,NU\n');
fprintf(fileID, ' MP,MU,1,MU\n');
fprintf(fileID, ' MSHAPE,0,2D !MESH TYPE IS SELECTED\n');
fprintf(fileID, ' MSHKEY,1\n');

fclose(fileID);

end

function sist_coord(desg_m_e,desg_m_i)

fileID = fopen('Desgaste.txt','w');
fprintf(fileID, '!SISTEMA DE COORDENADAS LOCALES\n');
fprintf(fileID, ' LOCAL,12,0,0,r_ext-1.6f,0,\n',desg_m_e);
fprintf(fileID, ' LOCAL,13,1,0,r_ext-1.6f,0,\n',desg_m_e);
fprintf(fileID, ' LOCAL,14,0,0,-r_int+1.6f,0,180,0,0\n',desg_m_i);
fprintf(fileID, ' LOCAL,15,1,0,-r_int+1.6f,0,180,0,0\n',desg_m_i);

fclose(fileID);

end

function k_p=sup_contactol(x_coord,y_coord,h_desg,k_p)

y_coord=y_coord-h_desg;

fileID = fopen('Sup_Contactol.txt','w');
fprintf(fileID, 'csys,12\n');

for j=1+k_p:length(x_coord)+k_p
x=round(x_coord(j-k_p),6);
y=round(y_coord(j-k_p),6);
fprintf(fileID, ' k,%1.0f,%1.6f,%1.6f\n',j,x,y);
end

if length(x_coord)==1
fprintf(fileID, 'csys,13\n');
end

fprintf(fileID, ' l,%1.0f,%1.0f\n',3,1+k_p);

for j=1+k_p:length(x_coord)+k_p-1
fprintf(fileID, ' l,%1.0f,%1.0f\n',j,j+1);
end

fprintf(fileID, ' l,%1.0f,%1.0f\n',length(x_coord)+k_p,4);

fprintf(fileID, ' lsel,S,LINE, ,%1.0f,%1.0f\n',11+k_p,
length(x_coord)+k_p+11);
fprintf(fileID, ' cm,sup_contactol,LINE\n');

fprintf(fileID, ' lsel,A,LINE, ,6\n');
fprintf(fileID, ' lsel,A,LINE, ,7\n');
fprintf(fileID, ' lsel,A,LINE, ,9\n');

fprintf(fileID, ' cm,area_contactol,LINE\n');
fprintf(fileID, ' al,area_contactol\n');
fprintf(fileID, ' aglue,1,2,3,4,5,6,7,13\n');

fprintf(fileID, ' lccat,sup_contactol\n');
fprintf(fileID, ' LESIZE,sup_contactol,t_elem\n');
fprintf(fileID, ' LESIZE,6,t_elem\n');
fprintf(fileID, ' LESIZE,7,t_elem\n');

```

```

    fprintf(fileID, ' amesh,13\n');
    fclose(fileID);

    k_p=length(x_coord)+k_p;
end
function k_p=sup_contacto2(x_coord,y_coord,h_desg,k_p)

    y_coord=y_coord-h_desg;

    fileID = fopen('Sup_Contacto2.txt','w');
    fprintf(fileID,'csys,14\n');

    for j=1+k_p:length(x_coord)+k_p
        x=round(x_coord(j-k_p),6);
        y=round(y_coord(j-k_p),6);
        fprintf(fileID,' k,%1.0f,%1.6f,%1.6f\n',j,x,y);
    end

    if length(x_coord)==1
        fprintf(fileID,'csys,15\n');
    end

    fprintf(fileID,' l,%1.0f,%1.0f\n',15,1+k_p);

    for j=1+k_p:length(x_coord)+k_p-1
        fprintf(fileID,' l,%1.0f,%1.0f\n',j,j+1);
    end

    fprintf(fileID,' l,%1.0f,%1.0f\n',length(x_coord)+k_p,16);

    fprintf(fileID,' lsel,S,LINE, ,%1.0f,%1.0f\n',13+k_p,
length(x_coord)+k_p+13);
    fprintf(fileID,' cm,sup_contacto2,LINE\n');

    fprintf(fileID,' lsel,A,LINE, ,23\n');
    fprintf(fileID,' lsel,A,LINE, ,24\n');
    fprintf(fileID,' lsel,A,LINE, ,26\n');

    fprintf(fileID,' cm,area_contacto2,LINE\n');
    fprintf(fileID,' al,area_contacto2\n');
    fprintf(fileID,' aglue,7,8,9,10,11,12,14\n');

    fprintf(fileID,' lccat,sup_contacto2\n');
    fprintf(fileID,' LESIZE,sup_contacto2,t_elem\n');
    fprintf(fileID,' LESIZE,23,t_elem\n');
    fprintf(fileID,' LESIZE,24,t_elem\n');
    fprintf(fileID,' amesh,14\n');

    fclose(fileID);
end
function sel_nodos(x_coord)

    if length(x_coord)==1
        n_nodos=0;
    else
        n_nodos=1;
    end

    fileID = fopen('Nodos.txt','w');

```

```
fprintf(fileID, '/post1\n');
fprintf(fileID, '/GRAPHICS, FULL\n');

fprintf(fileID, 'set, 1, last\n');

fprintf(fileID, 'lset, S, LINE, , sup_contacto1\n');
fprintf(fileID, 'nsl1, s, %1.0f\n', n_nodos);
fprintf(fileID, 'nset, u, loc, x, 0\n');
fprintf(fileID, 'cm, nodos_map1, node\n');

fprintf(fileID, 'lset, S, LINE, , sup_contacto2\n');
fprintf(fileID, 'nsl1, s, %1.0f\n', n_nodos);
fprintf(fileID, 'nset, u, loc, x, 0\n');
fprintf(fileID, 'cm, nodos_map2, node\n');

fclose(fileID);

end
```

REFERENCIAS

- [1] D. Erena, «Paliativo frente a la fatiga por fretting y análisis del proceso de fatiga en cordones metálicos,» *Tesis Doctoral*, 2019.
- [2] Í. Llavori, «Simulación numérica y validación experimental de fenómenos de desgaste y fatiga por fretting en aceros trefilados de reducido diámetro,» *Tesis Doctoral*, 2016.
- [3] S. González, «Diseño de máquina de ensayos a fatiga,» *Trabajo Fin de Grado*, 2016.
- [4] Acerinox, «EN 1.4401 / AISI 316,» [En línea]. Available: <https://www.acerinox.com>.
- [5] Sensofar, «Non-contact 3D optical profiler,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.sensofar.com/>.
- [6] J. F. Archard, Contact and Rubbing of Flat Surfaces, *Journal of Applied Physics*, 1953.
- [7] J. F. Archard y W. Hirst, *The Wear of Metals under Unlubricated Conditions*, Royal Society, 1956.
- [8] G. Jordano, C. Navarro, J. Vázquez y J. Domínguez, «Measuring Wear in a Fretting Test with a Confocal Microscope,» 2018.
- [9] D. Nowell y D. Hills, *Mechanics of Fretting Fatigue*, Springer.
- [10] A. Cruzado García, «Finite element modelling and experimental validation of fretting wear in thin steel wires,» *Tesis Doctoral*, 2012.
- [11] Y. Chen, H. Jing, X. Liao y R. Kang, Research on the Wear Mechanism Coupling Modeling of Spool Valve, *Proceedings of the Reliability and Maintainability Symposium, IEEE*, 2015.