

Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Análisis de la iniciación de grietas en fatiga por  
fretting con contacto cilíndrico

Autor: Manuel José Díaz Roldán

Tutor: Carlos Navarro Pintado

Dep. de Ingeniería Mecánica y de los Materiales  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería de las Tecnologías Industriales

# **Análisis de la iniciación de grietas en fatiga por fretting con contacto cilíndrico**

Autor:

Manuel José Díaz Roldán

Tutor:

Carlos Navarro Pintado

Dep. de Ingeniería Mecánica y de los Materiales

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



# Índice General

---

<b>Índice General</b>	<b>5</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>7</b>
1.1 <i>Antecedentes históricos de la fatiga por fretting</i>	9
1.2 <i>Ensayos de fretting</i>	10
1.2.1 Ensayos con geometrías reales	11
1.2.2 Ensayos con geometrías sencillas	11
1.3 <i>Objetivo del proyecto</i>	14
<b>2 Análisis experimental</b>	<b>15</b>
2.1 <i>Probeta 22</i>	16
2.2 <i>Probeta 25</i>	20
2.3 <i>Probeta 30</i>	22
2.4 <i>Probeta 33</i>	24
2.5 <i>Probeta 39</i>	25
2.6 <i>Probeta 40</i>	28
2.7 <i>Probeta 41</i>	30
<b>3 Resultados experimentales</b>	<b>33</b>
<b>4 Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>35</b>
<b>5 Anexos</b>	<b>37</b>
<u>Anexo 1</u> : <i>Procedimiento</i>	37
<u>Anexo 2</u> : <i>Códigos utilizados para la obtención de los perfiles</i>	39
<b>6 Bibliografía</b>	<b>45</b>



# 1 INTRODUCCIÓN

---

Fatiga por fretting es un fenómeno que se produce cuando se tienen dos cuerpos en contacto y al menos a uno de ellos se le aplica una fuerza variable. Se compone, por tanto, de dos sucesos independientes, que actuando conjuntamente acaban generando una fractura en un cuerpo antes de lo esperado.

La fatiga puede aparecer en numerosos materiales, pero no se empezó a mostrar interés por este fenómeno hasta el principio de la revolución industrial (mediados del siglo XIX), cuando se produjo un aumento de las máquinas y estructuras fabricadas con materiales férreos. Se comenzó a observar que aquellas partes de la máquina sometidas a sollicitaciones que varían o se repiten un gran número de veces pueden romperse bruscamente sin previa deformación permanente que se anticipe a la rotura. De manera que, la fatiga se define como un fenómeno por el cuál un componente metálico sometido a cargas variables en el tiempo puede llegar a la rotura completa tras un determinado número de aplicaciones de la carga, siendo dichas cargas de una amplitud menor al límite de rotura. Lo que originan estas cargas variables es una microgrieta, normalmente en la superficie del material, la cuál va creciendo hasta que se produce el fallo. Suelen aparecer a partir de defectos existentes en el material, ya sean externos (un canto vivo) o internos (inclusión en la red cristalina). Dependiendo del entorno y las circunstancias en las que se encuentre este componente se le añaden unos calificativos: fatiga, fatiga a altos números de ciclos, fatiga a bajo número de ciclos, fatiga a altas temperaturas, fatiga con corrosión, fatiga por fretting, etc.

Por otro lado, fretting es un fenómeno de daño superficial que ocurre cuando existen desplazamientos relativos oscilatorios de muy pequeña amplitud entre componentes que se encuentran en contacto bajo presión. Es fácil de identificar porque deja marcas de óxido en las zonas que han estado en contacto producidas por el desprendimiento de fragmentos de material que se encontraban oxidadas o se oxidaron una vez desprendidos. Dependiendo de los materiales en contacto, estas partículas tienen un color característico; por ejemplo, rojo-marrón en los aceros y negro en los aluminios. Existen gran multitud de aplicaciones donde existen sólidos en contacto y que por lo tanto son vulnerables de sufrir fretting; algunos ejemplos son: uniones atornilladas, roblonadas y preajustadas, álabes de turbinas, uniones eje cubo de una transmisión, cables metálicos trenzados, rotores de generadores, rodamientos, implantes artificiales, etc. Es por ello de gran importancia tener un mayor conocimiento de este fenómeno. Es necesario entender los diversos factores que influyen en el fallo por fretting y cómo evitarlos.

En la actualidad existen muchas maneras de paliar los efectos causados por el fretting en un componente. Las más extendidas son el uso de lubricantes, que disminuyen el coeficiente de fricción,

o recubrimientos, que reducen el desgaste. También existen técnicas más sofisticadas como el *Shot peening* o el *Laser Peening* que introducen tensiones residuales de compresión que modifican el estado tensional y la rugosidad superficial mejorando el comportamiento de los componentes sometidos a fatiga por fretting.

Si unimos estos dos fenómenos, como ya adelantábamos al principio, aparece lo que se denomina fatiga por fretting, que es un caso particular de fretting donde uno de los componentes se encuentra bajo la acción de una tensión global. La figura 1.1 muestra esquemáticamente las tensiones y fuerzas que entran en juego. La fuerza  $N$ , que aplica presión manteniendo el contacto entre sólidos, y la fuerza tangencial  $Q$  causan la aparición de unas tensiones locales, las cuales superpuestas con la tensión global, generan una zona de altas tensiones en el contacto que se asemejan al de un concentrador de tensiones. Todo ello desemboca en la prematura iniciación de grietas (respecto al caso donde no existe el contacto). Sin embargo, estas tensiones suelen disminuir rápidamente con la profundidad por lo que el gradiente de tensiones existentes tiene su valor más perjudicial en una zona muy próxima a la superficie del contacto.

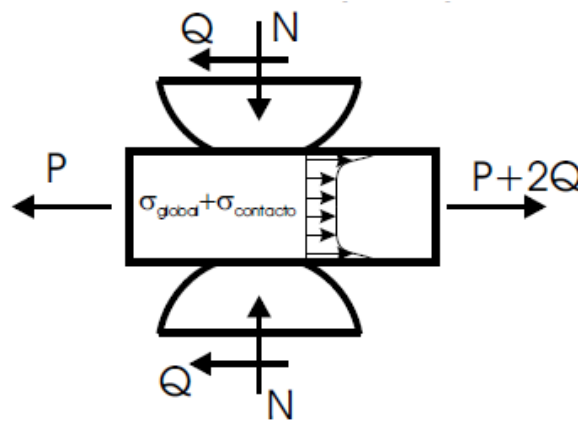


Figura 1.1: Ensayo de fatiga por fretting

Como consecuencia de la fuerza tangencial,  $Q$ , se produce un deslizamiento relativo entre las superficies en contacto. La relación  $Q/N$  determina cuándo se está en condiciones de deslizamiento global ( $Q/N = \mu$ ) o cuándo se tiene deslizamiento parcial ( $Q/N \leq \mu$ ), donde  $\mu$  es el coeficiente de rozamiento global entre las superficies en contacto. En las condiciones de deslizamiento global, se tiene que toda la zona de contacto se encuentra deslizando, mientras que en deslizamiento parcial, una parte de la zona de contacto está adherida y otra está deslizando.

Hay diversos factores que afectan al comportamiento de un sistema frente a la fatiga por fretting, tales como: la geometría de las zonas de contacto, las cargas  $N$  y  $Q$  a las que se encuentra sometido, la tensión global, el coeficiente de rozamiento, el acabado superficial, las propiedades de los materiales, etc. Para estudiar cómo afectan estos factores, se realizan ensayos con una serie de geometrías sencillas de las que se conocen soluciones analíticas de las tensiones y deformaciones. Más adelante incidiremos en estas geometrías, en especial en el contacto cilíndrico.



## 1.1 Antecedentes históricos de la fatiga por fretting

El fenómeno de la fatiga por fretting no empezó a considerarse hasta que Warlow-Davies realizó una serie de ensayos sobre probetas de acero. Consistían en producir un daño por fretting al material, seguido de un ensayo a fatiga. Se observó que la vida se reducía alrededor de un 15% respecto a un ensayo de fatiga pura. En esta línea, años más tarde McDowell realizó un ensayo de fatiga por fretting donde se confirmaban las observaciones de Warlow y Davies. Constató que se producía una disminución de la resistencia a fatiga de entre 2 y 5 veces e incluso mayores. Fenner y Fields también realizaron ensayos de fretting fatiga y demostraron que el fretting acelera enormemente el proceso de iniciación de grietas. Milestone, por su parte, usó en 1970 un contacto cilíndrico por la ventaja de poder calcular analíticamente las tensiones bajo el contacto. De esta forma pudo realizar comparaciones entre los resultados analíticos y experimentales concluyendo que la reducción de vida podía explicarse mediante los concentradores de tensión debidos al fretting.

Entre 1968 y 1972 los japoneses Nishioka y Hirakawa realizaron un extenso estudio del fretting partiendo de una serie de ensayos realizados en contacto cilíndrico con acero. Llegaron a la conclusión de que las condiciones de fatiga por fretting se desarrollan en deslizamiento parcial. Observaron que las tensiones debidas al contacto tienen más influencia en la fase de iniciación y cerca de la superficie mientras que la tensión global aplicada a la probeta influye más sobre la posterior propagación. Además, se dieron cuenta que dentro de la zona de contacto existían una zona de adhesión y otra de deslizamiento. En esta última zona, concluyeron que se iniciaban las grietas, llegando incluso a concretar que estas iniciaban inclinadas respecto a la superficie. Respecto a esto último, Endo y Goto [3] encontraron que las grietas se inician en planos de tensiones tangenciales (fase I) y a una profundidad de 30  $\mu\text{m}$  giran y crecen perpendicularmente a la superficie (fase II). Esto se puede ver gráficamente en la figura 1.2.

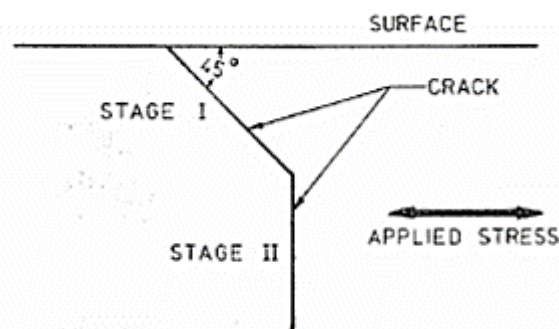


Figura 1.2: Trayectoria de la iniciación de grieta (Waterhouse [4])

En la actualidad dos de las líneas de investigación más activas son la predicción de la vida a fatiga por fretting y el estudio de los paliativos, en concreto el de los tratamientos superficiales. Centrándonos en el primer tema de estudio, este requiere el estudio de las tensiones producidas alrededor de la zona de contacto. Para ello se utilizan criterios de fatiga multiaxial particularizados para el fretting. Algunos de estos criterios son: Smith-Watson-Hopper, Fatemi-Socie, Crossland, etc. A partir de estos criterios de fatiga multiaxial se puede predecir el lugar de iniciación de las grietas e

incluso la orientación. Se encuentra bastante extendido que la grieta inicialmente crece formando un pequeño ángulo respecto a la superficie para posteriormente girar para crecer aproximadamente perpendicular a la misma.

A parte de los modelos, se realizan ensayos interrumpidos para buscar la existencia de grietas. Navarro realizó unos ensayos de este tipo sobre una probeta de aluminio y con un contacto esférico. Consistía en parar el ensayo antes de llegar a la fractura, para posteriormente pulir la probeta hasta llegar a la grieta y fotografiarla. De este modo se obtiene la imagen que se muestra en la figura 1.3 donde se aprecia que la grieta inicia formando un pequeño ángulo respecto a la superficie y después de algunas micras gira hasta crecer con un ángulo de 70-80°.

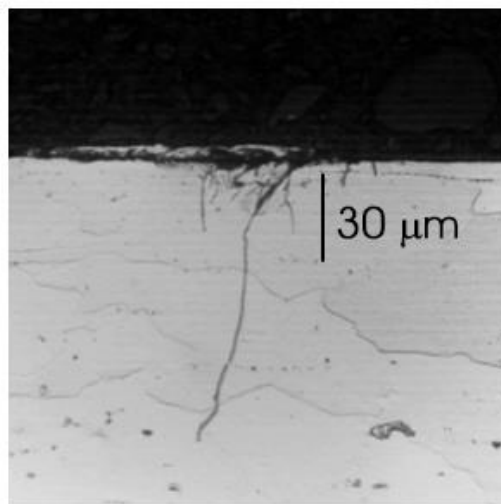


Figura 1.3: Sección de una grieta en el plano de simetría

## 1.2 Ensayos de fretting

Los ensayos de fretting se realizan con la finalidad de analizar las causas que provocan el fenómeno y cuantificar el efecto de cada parámetro involucrado en el proceso. En estos ensayos se estudia entre otros muchos aspectos los siguientes: el modo en qué afectan las cargas a las que se encuentran sometidos los componentes, el comportamiento a fretting de los materiales usados, el lugar y el modo de iniciación de las grietas, la propagación de éstas, de qué forma influyen las condiciones ambientales, etc. Se pueden dividir en dos tipos de ensayos, los que se realizan sobre componentes reales, y los que se hacen con geometrías sencillas. Con ambos tipos de ensayos se trata conocer la respuesta real de los componentes. A continuación se tratarán ambos tipos de ensayos.

### 1.2.1 Ensayos con geometrías reales

A pesar de los avances en materia de programas de simulación, los cuales cada vez son capaces de recrear mejor el comportamiento real de un componente, no deja de ser imprescindible en muchos casos completar la información mediante ensayos con geometrías reales. O en otros casos, se hace necesario analizar el fallo o mal comportamiento de un componente. Se suelen realizar este tipo de ensayos en los álabes de turbinas, transmisiones de ejes, amortiguadores de automóviles, etc.

El inconveniente de este tipo de ensayos es que solo permiten conocer el comportamiento para el componente estudiado, no pudiéndose extrapolar estos resultados a otros tipos de geometrías. Además, la complejidad de las geometrías reales hace necesario el uso de herramientas numéricas, como el método de los elementos finitos, a fin de poder calcular las tensiones producidas. En algunos casos es posible utilizar geometrías más sencillas que simulen el contacto, lo cual es preferible ya que permite utilizar una solución analítica del estado de tensiones. Es el caso del álabe de una turbina con el eje, que se puede aproximar por el contacto de una superficie plana con esquinas redondeadas contra una superficie plana. En resumen, un ensayo con una geometría real refleja fielmente el comportamiento del componente pero es más complejo de realizar y supone un alto coste económico.

### 1.2.2 Ensayos con geometrías sencillas

La principal ventaja de este tipo de ensayos es que se disponen de soluciones analíticas que permiten obtener el estado de tensiones y deformaciones en la zona del contacto, simplificando en gran medida el estudio del comportamiento de este tipo de ensayos. Las geometrías más utilizadas son el contacto plano, contacto esférico y contacto cilíndrico. A continuación, se comentaran los aspectos más importantes de los ensayos realizados con cada uno de estos tipos de contactos.

El contacto plano tiene la ventaja de que es muy fácil fabricar la probeta requerida. Además, la expresión analítica del estado de tensiones bajo el contacto es bien conocido. Sin embargo, en las esquinas aparece una singularidad, unas tensiones infinitas, lo cual no es posible. Ello obliga a utilizar un modelo elastoplástico que es más complejo que el modelo elástico-lineal. Una manera de solucionar este problema es redondeando las esquinas. Además, esta geometría se aproxima más a la real ya que en la práctica los sólidos nunca tienen aristas vivas. El mayor inconveniente de estos contactos es que requieren de una correcta alineación del punzón y las caras planas que entran en contacto, para que no se produzca una distribución de tensiones asimétrica.

En el contacto entre una esfera y un plano existe la ventaja, frente al contacto plano, que no necesita una alineación entre los componentes, ya que la superficie de contacto es un círculo. También permite una mejor detección de grietas incipientes ya que se sabe que aparecen en las inmediaciones del eje de simetría del sistema y cerca del borde de la zona de contacto en  $x=a$ . El inconveniente de este tipo de contacto es que no se encuentra en la realidad.

Al igual que en los otros, en el contacto cilíndrico se conocen las soluciones analíticas del estado de tensiones. Además, ofrece una ventaja importante y es que permite ser tratado de forma

bidimensional simplificando mucho los cálculos. Por contrapartida, es necesario una correcta alineación al igual que ocurría en el contacto plano. En el siguiente apartado profundizaremos en este tipo de contacto.

### 1.2.2.1 Contacto cilíndrico

En este tipo de ensayos se produce el contacto entre un cilindro y un plano (fig. 1.4). Se aplica una carga  $N$  que mantiene los sólidos en contacto y posteriormente se aplican las cargas variables  $Q$  y  $P$ . La forma del contacto es una banda de semiancho  $a$ . Se pueden distinguir dos zonas en el contacto, una en el interior (zona de adhesión) de tamaño  $2c$ , y otra en ambos extremos de la zona de contacto, donde se produce un deslizamiento. Cuando la carga axial  $P$  no es nula, como ocurre en fatiga por fretting, la zona de adhesión se desplaza hacia un lateral una cantidad  $e$ , llamada excentricidad.

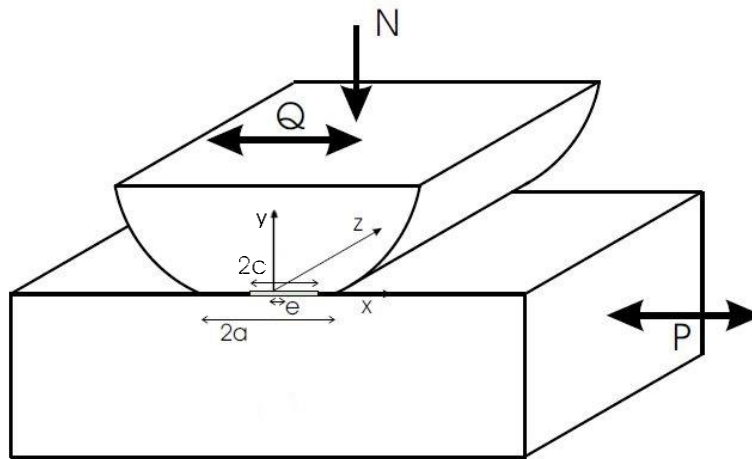


Figura 1.4: Contacto cilíndrico con las fuerzas aplicadas en un ensayo

Con esta geometría no se busca plasmar casos reales, sino disponer de una geometría sencilla que permita conocer bien el estado de tensiones y se disponga de soluciones analíticas para poder aplicar los modelos de fatiga por fretting. En este sentido, se conoce una expresión analítica para el campo de tensiones bajo el contacto en función de las cargas aplicadas en la superficie. Las expresiones que se van a presentar son para el caso en el que el deslizamiento se produce en el mismo sentido en todo el contacto.

La presión normal viene dada por

$$p(x) = p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad (1.1)$$

donde  $p_0$  es la tensión máxima normal debido a  $N$ .

$$p_0 = \frac{2N}{\pi a} \quad (1.2)$$

$$a = \left( \frac{4NR}{\pi E^*} \right)^{1/2} \quad (1.3)$$

El parámetro  $E^*$  es el modulo de Young equivalente para el contacto de materiales similares y  $R$  es el radio del cilindro.

$$E^* = \frac{E}{2(1 - \nu^2)} \quad (1.4)$$

Y suponiendo deformación plana, la tensión tangencial en la zona de deslizamiento es

$$q(x) = \mu p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} \quad |x| \leq a \quad |x - e| \geq c \quad (1.5)$$

mientras que en la zona de adhesión es

$$q(x) = \mu p_0 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} - \frac{c}{a} \mu p_0 \sqrt{1 - \frac{(x - e)^2}{c^2}} \quad |x - e| \geq c \quad (1.6)$$

La excentricidad,  $e$ , de la zona de adhesión viene dada por la expresión

$$e = \frac{a\sigma}{4\mu p_0} \quad (1.7)$$

donde  $\sigma$  es la tensión axial en la probeta debida a la carga  $P$ .

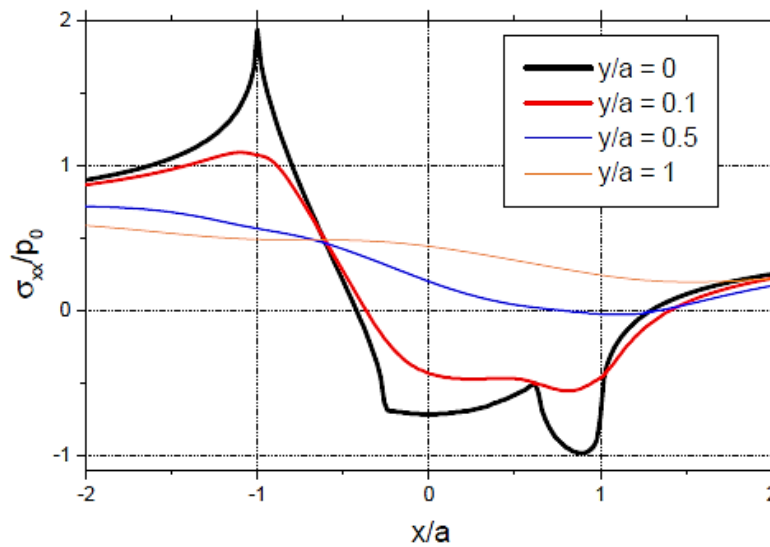


Figura 1.5: Distribución de tensiones normales, adimensionalizadas con  $p_0$ , en la dirección de aplicación de la carga  $P$  (dirección  $x$ ) para cuatro profundidades distintas.

A partir de estas ecuaciones podemos obtener la distribución de los distintos componentes del tensor de tensiones. En la figura 1.5 se muestra un ejemplo de dicha distribución para las tensiones normales en la dirección de aplicación de la carga  $P$  (dirección  $x$ ) para cuatro profundidades distintas. En ella se observa que las tensiones máximas se producen en la superficie y en el borde de la zona de contacto. Además, se ve claramente como disminuye la tensión rápidamente con la profundidad.

Por último, se presenta un ejemplo del cálculo teórico del semiancho de la zona de contacto. Para ello hace falta las propiedades del material, se escoge el aluminio 7075-T651 ( $E=71$  GPa y  $\nu=0.33$ ), un radio del cilindro en contacto,  $R=100$  mm, y la carga normal aplicada,  $N=829$  N/mm. Utilizando las ecuaciones (1.3) y (1.4) se genera un semiancho de la zona de contacto de  $a=1,63$  mm.

### 1.3 Objetivo del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es realizar un análisis experimental de la trayectoria de la iniciación de grieta en probetas ensayadas por fretting fatiga con contacto cilíndrico. Se pretende observar que ocurre en las primeras etapas de la grieta centrándose en varios aspectos, como son el ángulo inicial con el que empieza a crecer o como va variando dicho ángulo conforme vamos profundizando en la probeta. El método que se va a utilizar se basa en la recreación digital de la superficie de fractura, a partir de la cual tendremos una nube de datos con la que poder trabajar.

El motivo de este estudio se basa en la poca información experimental que existe en esta zona de la grieta. Con los resultados de este análisis se podrían mejorar los modelos predictivos ya existentes, los cuales, aunque incluyen la iniciación de grieta en sus modelos, lo hacen de una manera tosca.

## 2 ANÁLISIS EXPERIMENTAL

En este capítulo se desarrollará la mayor parte del trabajo realizado en el proyecto. Vamos a analizar las iniciaciones de grietas de diferentes probetas. Estas probetas han sido ensayadas hasta la fractura mediante la máquina que se presenta en la figura 2.1. Tanto la probeta como el contacto son de Al 7075-T651. Las probetas son de 10x7 mm, siendo el lado de 7 mm donde se produce el contacto. Los ensayos se han realizado manteniendo constante la carga normal  $N$  del contacto cilíndrico contra la probeta y aplicando una tensión axial cíclica  $\sigma$ . Debido a esto, se produce una carga tangencial cíclica  $Q$  por la fricción entre los contactos y la probeta. Cada probeta ha sido sometida a diferentes valores de carga. Los detalles referentes a estos ensayos se encuentran en otra parte [6].

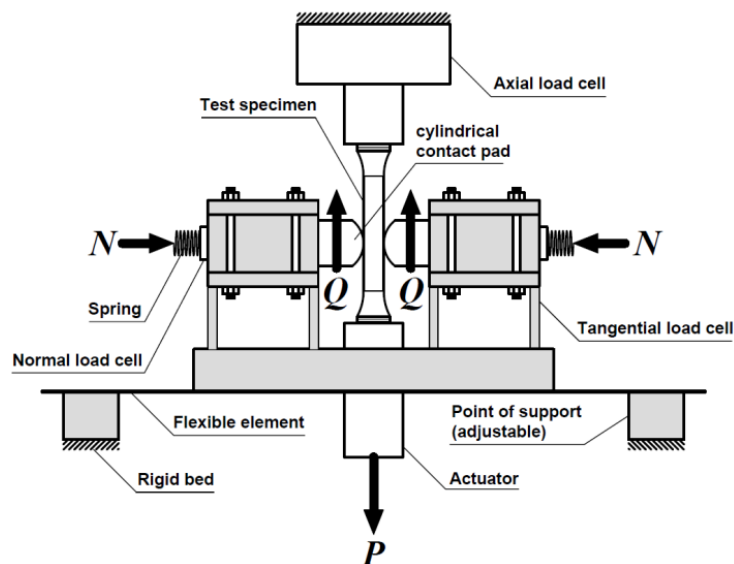


Figura 2.1: Esquema máquina utilizada para la realización de los ensayos

Se han tomado imágenes de la superficie de fractura correspondiente al extremo de la probeta que contiene la huella del contacto y otra que muestra la huella del contacto y la silueta de la fractura. En estas imágenes nos basaremos para señalar las grietas y su punto de iniciación. También, se ha obtenido una imagen digital en 3D de la superficie de fractura mediante un microscopio confocal interferométrico, la cual nos va a permitir obtener la trayectoria de la iniciación de grieta.

Tras probar distintas maneras de estudiar la trayectoria, finalmente se optó por trazar líneas rectas en el plano de la superficie de fractura con inicio en el punto de iniciación de la grieta y con distintos ángulos que van desde  $-45^\circ$  hasta  $45^\circ$  respecto de la perpendicular a la superficie de la probeta. Esto se obtuvo exportando a un archivo de texto la zona deseada de la superficie 3D y creando un programa que tratara los datos y mostrara las trayectorias (Véase Anexo 1 y 2).

A fin de poder comparar unas grietas con otras, se ha utilizado un único criterio de análisis para todas ellas. No obstante, cabe destacar que dicha comparación solo podrá ser de manera cualitativa debido a que cada probeta ha estado sometida a cargas distintas como ya adelantábamos anteriormente. En primer lugar, se van a trazar rectas de 50  $\mu\text{m}$ . De ser una longitud inferior no seríamos capaces de ver la tendencia de crecimiento de la grieta, viendo solo una línea serpenteante. Además, si nos vamos a longitudes de alrededor de 10  $\mu\text{m}$  o menos entrarían en juego otros aspectos fuera del alcance del proyecto como son el tamaño de grano, lo cual nublaría los datos recogidos sin que se pudiesen sacar resultados concluyentes. En segundo lugar, los perfiles se van a dividir en dos tramos, de los cuales vamos a recoger datos de la longitud del primer tramo y de los ángulos de ambos tramos respecto de la perpendicular a la superficie de la probeta. Los datos han sido tomados de forma manual en cada perfil ya que no era posible utilizar un método automático que dividiera los perfiles en dos tramos diferenciados.

De las 50 probetas ensayadas, se han tomado imágenes de 14 probetas, de entre las cuales encontramos 11 grietas viables para su análisis de 7 probetas distintas. Este bajo número de grietas que se han podido estudiar se debe a varios factores. En primer lugar, muchas grietas se encuentran solapadas unas con otras y a distintos niveles lo que hace que no puedan verse bien o que los datos recogidos no sean fiables al estar una grieta influenciada por otra. Y otro inconveniente, y el más importante, es que la imagen digital tomada no es perfecta, contiene “zonas negras” correspondientes con zonas que no ha podido medir el microscopio y ello impide que puedan sacarse datos completos de una grieta.

Debido a lo explicado anteriormente, en las probetas que vamos a ver aparecen muchas más grietas, a las cuales se hará referencia brevemente explicando su situación particular. Y en cuanto a las grietas que se van a estudiar, en este capítulo se presentaran los resultados individuales de cada una de ellas. Los resultados y conclusiones generales serán mostrados en capítulos posteriores.

## 2.1 Probeta 22

En la probeta 22 contamos con 3 grietas semielípticas viables para su estudio como se muestra en la figura 2.2. Existe una cuarta grieta al lado de la segunda, parte de esta se encuentra debajo de la grieta 2, haciendo imposible su estudio. Con puntos rojos hemos marcado donde se encuentran las iniciaciones de grieta que vamos a estudiar. Las marcas negras (son negras debido a que el material es aluminio) indican la zona de deslizamiento. En un contacto ideal estas marcas serían uniformes a lo largo de la probeta pero debido a la rugosidad de los elementos esto no es así. Se observa que la grieta 1 se inicia al borde de la zona de contacto y las grietas 2 y 3 dentro de la zona de deslizamiento. En muchas ocasiones la zona de iniciación se identifica claramente por una pequeña “colina” que encontramos en medio de la grieta.

La figura 2.3 muestra la iniciación de cada una de las grietas. El rango de colores indica la altura de la superficie respecto a un plano de referencia. El punto blanco marca el punto de iniciación de grieta y a partir del cual se trazaran las rectas con distintos ángulos. El arco marcado en color negro



delimita hasta donde llegan dichas rectas.

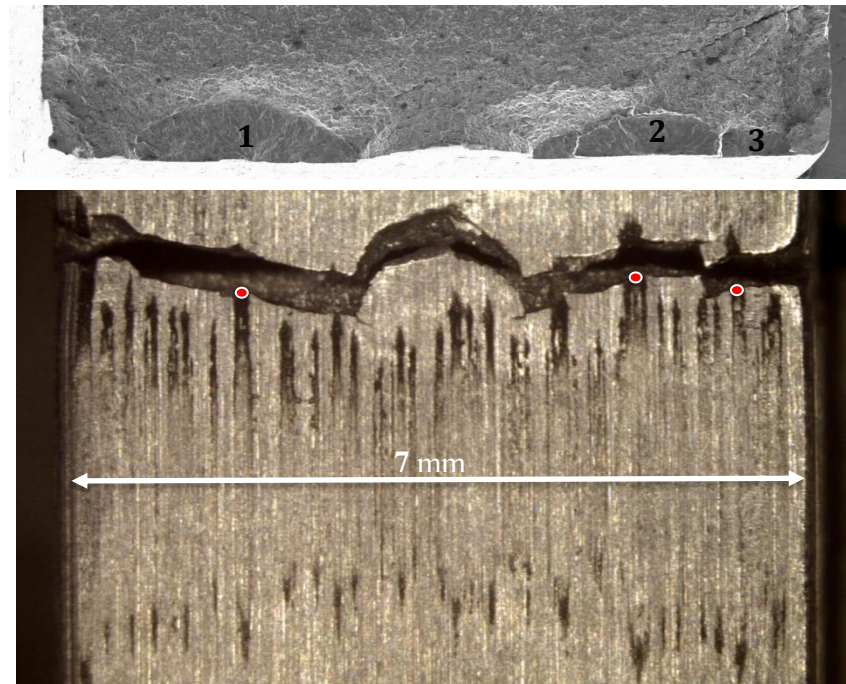


Figura 2.2: Superficie de fractura y huella del contacto.

$N=5800$  N,  $Q=850$  N,  $\sigma=50$  N y  $N_{\text{exp}}=676704$

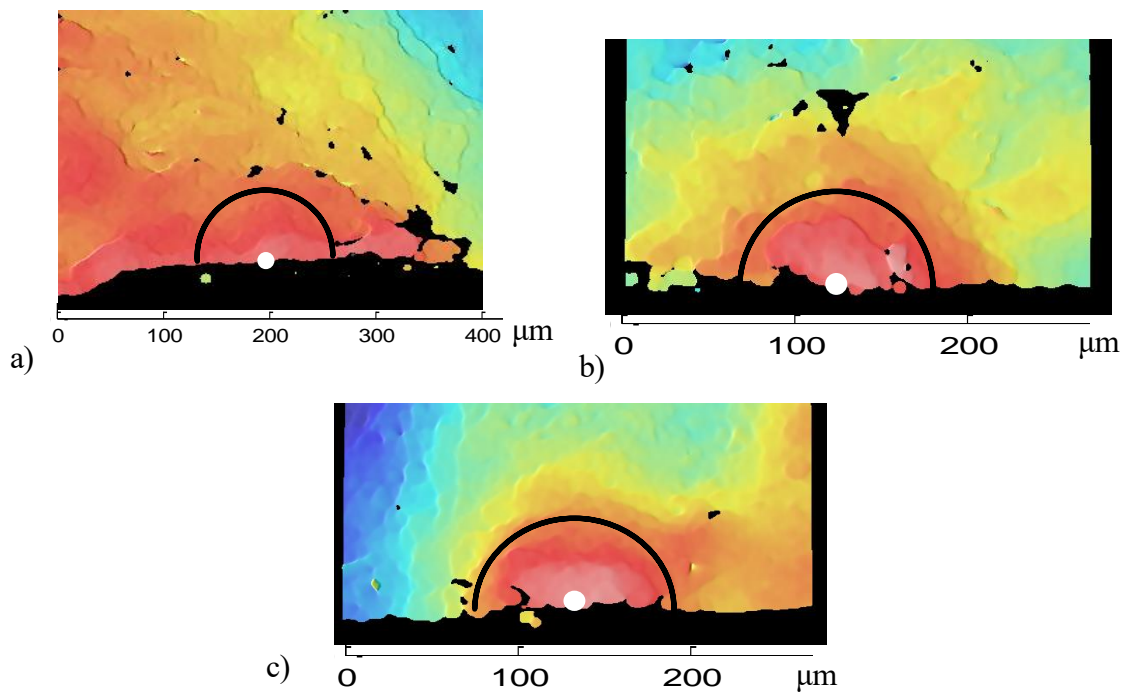


Figura 2.3: Imágenes del microscopio confocal, a) grieta 1 b) grieta 2 c) grieta 3

Podemos observar que la superficie del borde de la grieta no es uniforme y pareciera como si faltara material. Esto se explica porque el microscopio confocal necesita que se le introduzca un rango de alturas en el que se quiere que mida. De manera que, si el punto a medir está fuera de ese rango no será medido. De esta forma, solo nos queda plantear hipótesis sobre esa zona que falta y son las siguientes: la primera es que al fracturar la probeta hay material desprendido y la otra es que haya un ángulo muy pronunciado en la iniciación de la grieta que estemos pasando por alto. De cualquier modo, este aspecto no se ha tenido en cuenta en el análisis, considerando que el inicio de la grieta se corresponde con la primera zona de material medido, ya que en la mayoría de grietas presentes en este documento el material que podría faltar es mínimo, y además, en todas ellas no se han encontrado indicios de esa posible pendiente inicial que comentábamos.

Con respecto a las grietas, en estas imágenes se verifica lo que explicábamos anteriormente y es que estas crecen hacia dentro con un cierto ángulo formándose esa “colina” marcada por el color rojo. Esa primera etapa es la que pretendemos estudiar. Como comentario adicional, en la grieta 1 (primera imagen a la izquierda) se aprecia que la primera zona en rojo es muy amplia. Esto se puede deber a que ha crecido primero hacia los lados, para después seguir creciendo hacia dentro de la probeta de manera semi-elíptica.

A continuación, en la figura 2.4 se muestran los perfiles obtenidos de cada grieta, que van desde  $-45^\circ$  hasta  $45^\circ$  de izquierda a derecha respecto de la perpendicular a la superficie de la probeta. Los perfiles se han adimensionalizado con el semiancho de la zona de contacto ( $a = 1,63 \text{ mm}$ ) calculado de manera teórica mediante un análisis elástico lineal<sup>1</sup>. La trayectoria media, como su nombre indica, se ha obtenido a partir de hacer la media de todos los perfiles. No se han recogido datos de este perfil ya que era redundante. La línea discontinua señala donde se encuentra el contacto.

En estas gráficas se puede apreciar bien la tendencia de crecimiento de las grietas. Tienen una primera etapa de crecimiento casi perpendicular a la superficie de la probeta de unos  $20 \mu\text{m}$  y una segunda etapa en la que crecen con un ángulo de entre 20 y 28 grados. Estos datos se encuentran recogidos en la tabla 2.1, donde aparece el valor de la media de los datos tomados en cada perfil y la dispersión de los mismos calculado mediante la desviación típica. Es necesario matizar que en dicha tabla se observa que el primer tramo de la grieta 1 crece con un ángulo de  $2^\circ$  de media, pero si nos fijamos en su correspondiente gráfica observamos que la grieta se ha iniciado con un ángulo negativo.

---

<sup>1</sup> Explicado en Capítulo 1 : Contacto cilíndrico

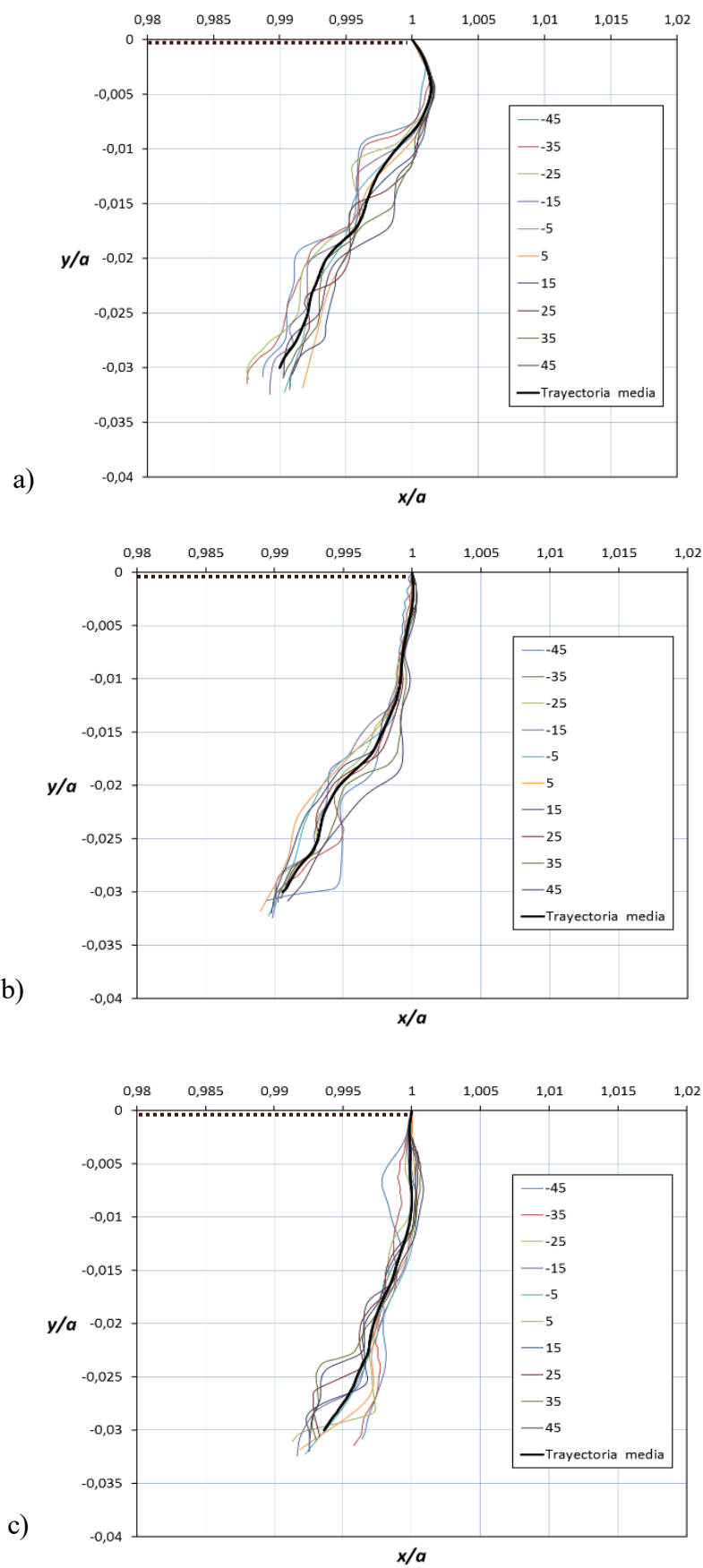


Figura 2.4: Perfiles de grieta: a) grieta 1, b) grieta 2 y c) grieta 3

Tabla 2.1: Datos de la trayectoria de grieta de la probeta 22

PROBETA 22	Media			Dispersión		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3
Longitud 1 <sup>er</sup> tramo ( $\mu\text{m}$ )	17,10	21,10	23,7	5,09	3,78	5,25
Ángulo 1 <sup>er</sup> tramo ( $^\circ$ )	2,14	2,13	7,70	3,48	2,91	3,72
Ángulo 2 <sup>o</sup> tramo ( $^\circ$ )	26,10	20,24	28,00	2,74	5,88	5,08

## 2.2 Probeta 25

En esta probeta tenemos una única grieta para estudiar, ya que como se puede observar en la imagen de la superficie de fractura (fig. 2.5) las otras dos grietas se encuentran situadas, una en una esquina y la otra a distinto nivel. En la primera no se ha podido identificar bien la iniciación de grieta y en la segunda, dicha iniciación se encuentra en parte tapada por la otra grieta de la derecha que se originó a un nivel superior. En cuanto a la grieta que si se ha podido analizar, esta se ha formado a partir de dos iniciaciones de grieta que rápidamente se han unido. Un claro indicador de este fenómeno son las dos bandas negras que se aprecian en la imagen de la huella del contacto. También observamos que ambas iniciaciones se originan en zona de deslizamiento. Pero aunque hemos marcado ambas con

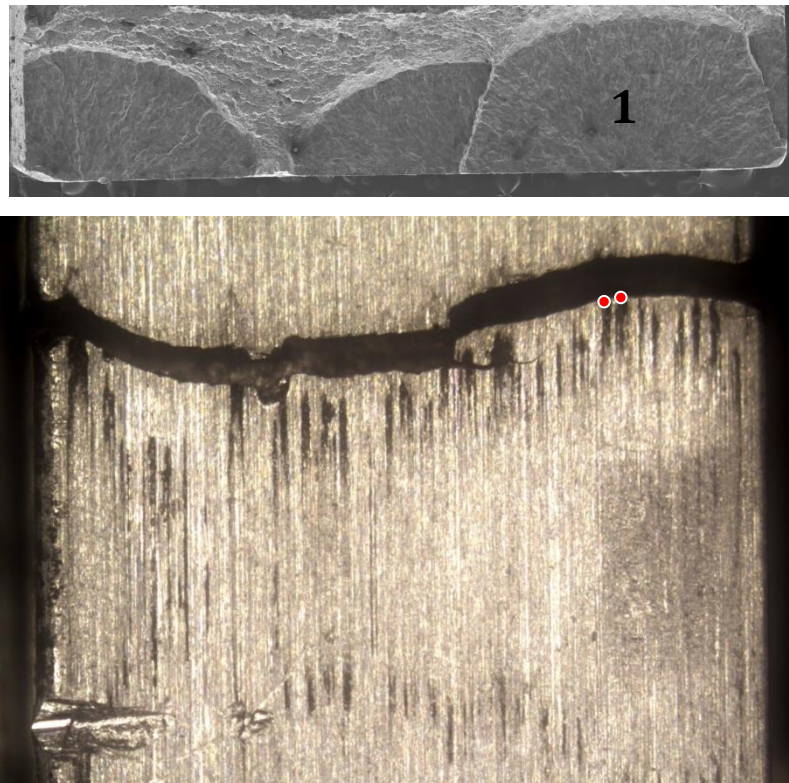


Figura 2.5: Superficie de fractura y huella del contacto.

$N=5800$  N,  $Q=850$  N,  $\sigma=45$  N y  $N_{\text{exp}}= 320765$

un punto rojo, solo podemos analizar una de ellas debido a la falta de información en la otra como se puede comprobar en la figura 2.6. Cabe destacar, que en este caso se ha considerado que a la profundidad a la que vamos a analizar la iniciación, esta no se ve influenciada por la otra, pudiendo ser válida para nuestro estudio. También es interesante comentar que se reafirma esa “colina” que se forma en la iniciación, hecho que es corroborado en los perfiles mostrados en la figura 2.7.

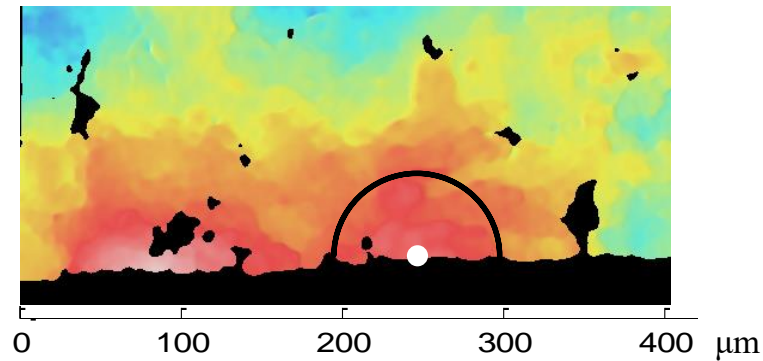


Figura 2.6: Imagen del microscopio confocal

A continuación, se muestran los perfiles en la figura 2.7 y los datos tomados en la tabla 2.2. Los perfiles se han adimensionalizado con el semiancho de la zona de contacto ( $a = 1,63 \text{ mm}$ ). En este caso, se observa que la grieta no inicia perpendicular a la superficie sino que lo hace con un ángulo de  $12^\circ$  y continúa sin variación, de modo que en el segundo tramo la pendiente es menos pronunciada que en la probeta anterior.

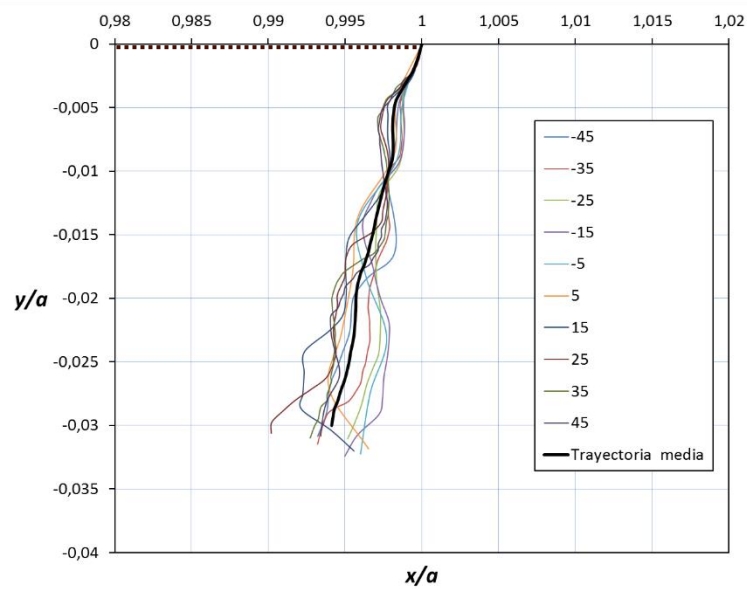


Figura 2.7: Perfiles de grieta

Tabla 2.2: Datos de la trayectoria de grieta de la probeta 25

	Media	Dispersión
Longitud 1 <sup>er</sup> Tramo ( $\mu\text{m}$ )	21,40	3,60
Ángulo 1 <sup>er</sup> Tramo ( $^{\circ}$ )	11,52	3,31
Ángulo 2 <sup>o</sup> Tramo ( $^{\circ}$ )	12,77	7,23

### 2.3 Probeta 30

En la probeta 30 encontramos una única grieta para estudiar. En esta ocasión, no se dispone de la imagen del microscopio electrónico de la superficie de fractura, de manera que será sustituida por la imagen digital con la cual se puede ver profundidad mediante el rango de colores. Esta vez, se identificaron claramente tres grietas más pero dos de ellas no se han podido estudiar debido a que no era posible obtener todo el espectro de ángulos por la presencia de “zonas negras”, y la tercera, que se encuentra en el medio de la probeta, se trata de un caso raro en el que la grieta parece dividirse en 2 partes y a distinto nivel. La iniciación de la grieta a analizar se ha marcado con un punto rojo (figura 2.8). Con más detalle se puede apreciar dicha iniciación en la figura 2.9.

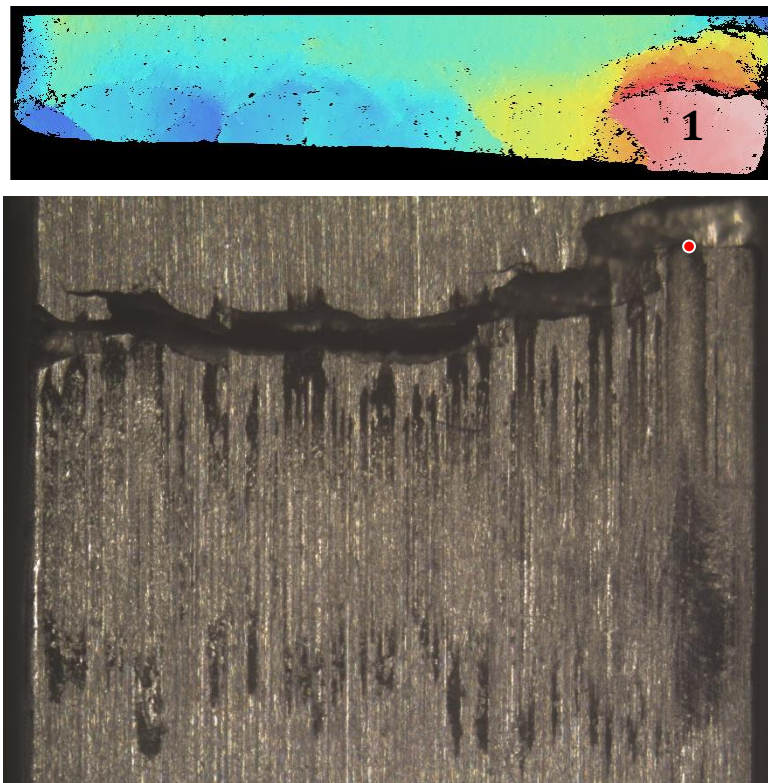


Figura 2.8: Superficie de fractura y huella del contacto.

$N=5800\text{ N}$ ,  $Q=1350\text{ N}$ ,  $\sigma=70\text{ N}$  y  $N_{\text{exp}}= 167324$

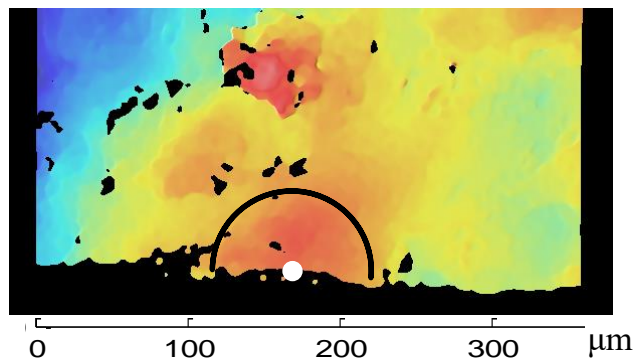


Figura 2.9: Imagen del microscopio confocal

A continuación, se muestran los perfiles adimensionalizados con el semiancho de la zona de contacto ( $a = 1,63 \text{ mm}$ ) en la figura 2.10. Se observa que la grieta crece perpendicular a la superficie del contacto durante las primeras  $30 \mu\text{m}$  y en el segundo tramo crece con una pendiente de  $22^\circ$ , muy similar a la que se presentaba en las grietas de la probeta 22.

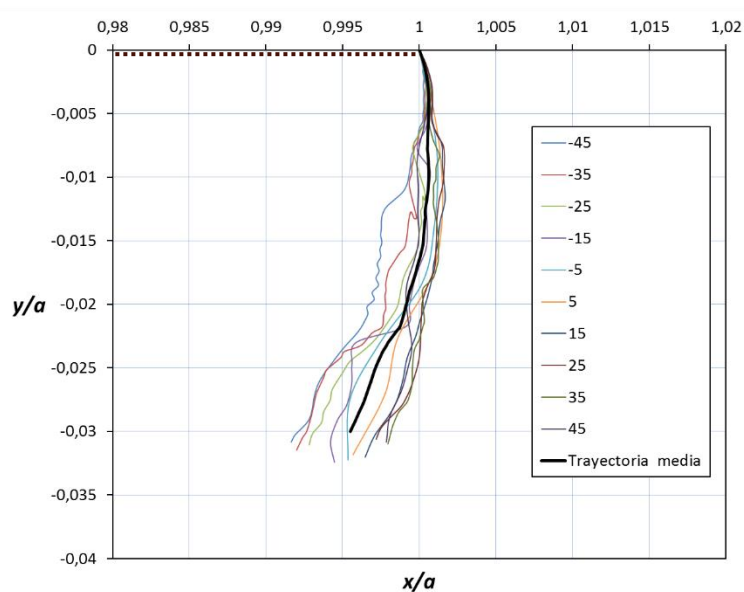


Figura 2.10: Gráfica con los perfiles de grieta

Tabla 2.3: Datos de la trayectoria de grieta de la probeta 30

	Media	Dispersión
Longitud 1 <sup>er</sup> Tramo ( $\mu\text{m}$ )	29,00	4,85
Ángulo 1 <sup>er</sup> Tramo ( $^\circ$ )	0,15	5,38
Ángulo 2 <sup>o</sup> Tramo ( $^\circ$ )	21,75	8,39

## 2.4 Probeta 33

En esta probeta nos encontramos con numerosas posibles grietas para estudiar. No obstante, las grietas de en medio han tenido que ser descartadas debido a su inicio tan irregular (similar al caso que explicábamos en la probeta anterior), y lo mismo ha ocurrido con las de los extremos, las cuales se encontraban en muy mal estado digitalmente hablando (“zonas negras”). Por lo tanto, de nuevo solo conseguimos una grieta para analizar. En la figura 2.11 se puede apreciar la superficie de fractura, donde se encuentra señalada dicha grieta. Si nos fijamos bien, realmente han crecido dos grietas, siendo la más grande (que se encuentra a la derecha) la que vamos a analizar. Esto es posible por el radio tan pequeño de análisis, que permite suponer que no se encuentra aún influenciada por la otra grieta. En la figura 2.12 se puede ver con más detalle.

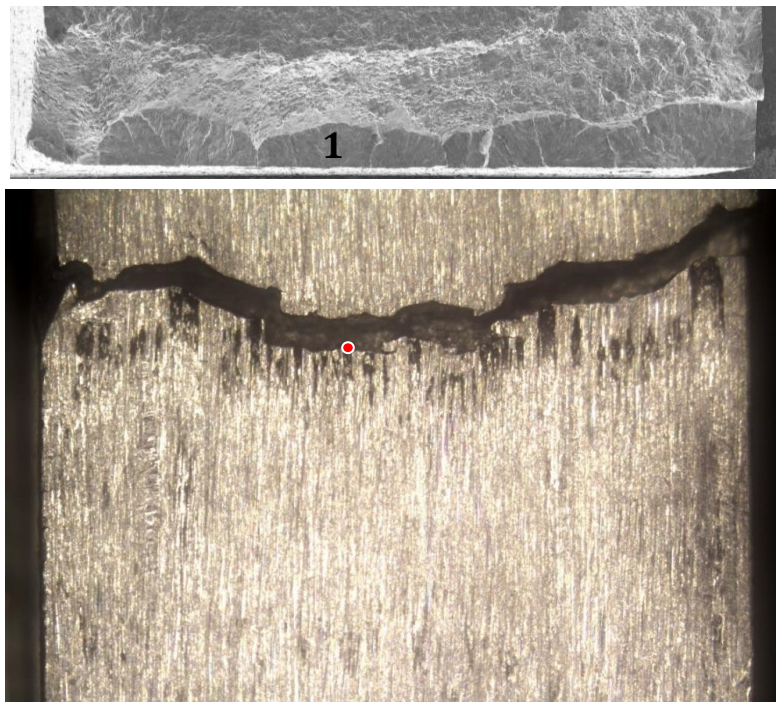


Figura 2.11: Superficie de fractura y huella del contacto.

$N=5800$  N,  $Q=850$  N,  $\sigma=70$  N y  $N_{\text{exp}}=143943$

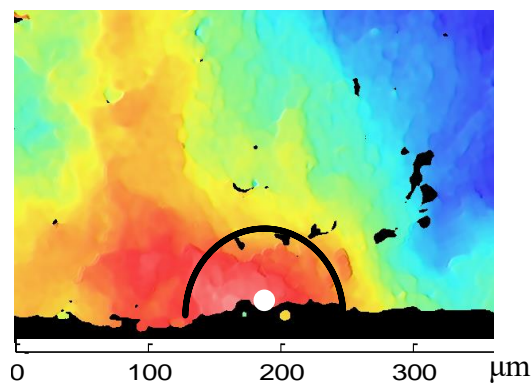


Figura 2.12: Imagen del microscopio confocal



En cuanto a la grieta en cuestión, en la figura 2.13 observamos la gráfica con todos los perfiles, los cuales han sido adimensionalizados con el semiancho de la zona de contacto ( $a = 1,63 \text{ mm}$ ). En ella se observa que la grieta inicia con una pendiente pequeña de  $10^\circ$  y gira hasta tener una pendiente de  $32^\circ$  en su último tramo. Estos datos se encuentran recogidos en la tabla 2.4, donde vemos el valor de la media de los datos tomados en cada perfil y la dispersión de los mismos mediante la desviación típica.

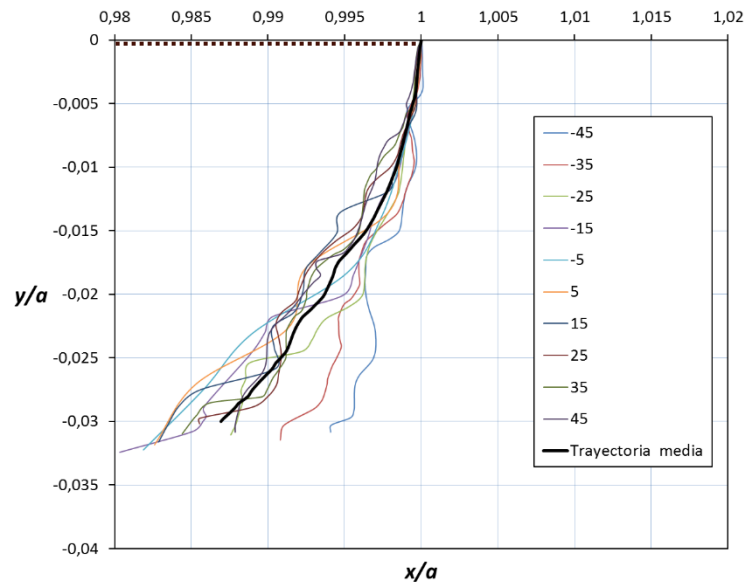


Figura 2.13: Gráfica de perfiles de grieta

Tabla 2.4: Datos de la trayectoria de grieta de la probeta 33

	Media	Dispersión
<b>Longitud 1<sup>er</sup> Tramo (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	21,45	2,99
<b>Ángulo 1<sup>er</sup> Tramo (<math>^\circ</math>)</b>	9,86	3,68
<b>Ángulo 2<sup>o</sup> Tramo (<math>^\circ</math>)</b>	32,34	8,15

## 2.5 Probeta 39

La probeta 39 posee dos grietas para analizar, señalizadas en la figura 2.14. Ambas se han iniciado al borde de la zona de contacto, ya que si nos fijamos en la otra parte de la probeta no se observan signos de deslizamiento (bandas negras). El resto de grietas que se observan a simple vista son producidas por la suma de una amalgama de iniciaciones que no han podido ser concretadas y separadas del resto para su estudio.

En la grieta 1 nos encontramos que el criterio tomado de dividir en dos tramos el perfil no es el más adecuado. En esta ocasión, lo mejor habría sido dividirlo en 3 tramos ya que varios de estos perfiles presentan un pequeño tramo inicial con poca pendiente, seguido de otro pequeño tramo con una pendiente muy pronunciada y terminando con un tramo ya si, similar al segundo tramo de probetas anteriores. No obstante, a fin de poder realizar comparaciones con otras grietas la analizaremos según el criterio adoptado pero teniendo en cuenta este aspecto.

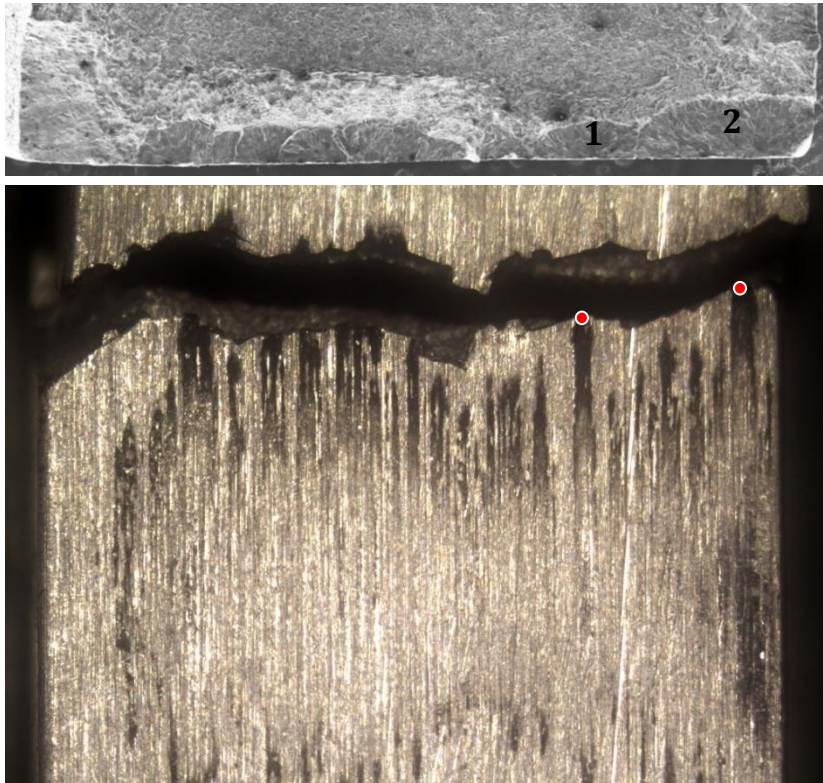


Figura 2.14: Superficie de fractura y huella del contacto.

$N=5800$  N,  $Q=1100$  N,  $\sigma=55$  N y  $N_{exp}= 283110$

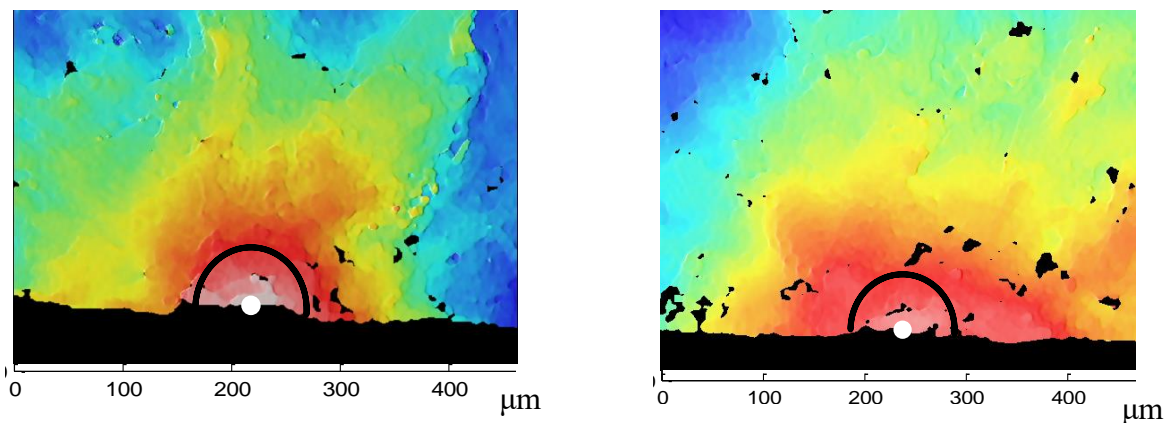


Figura 2.15: Imágenes del microscopio confocal, grietas 1 y 2

En la figura 2.16 podemos ver las dos gráficas referentes a cada una de las grietas. En ellas, los perfiles han sido adimensionalizados con el semiancho de la zona de contacto ( $a = 1,63 \text{ mm}$ ). Comenzando por la grieta 1, he tomado un primer tramo que tiene  $8,5 \mu\text{m}$  de media (tabla 2.5) que coge el inicio de la grieta con poca pendiente ( $9^\circ$ ) y luego un segundo tramo que engloba a la pendiente pronunciada y el resto del perfil ( $21^\circ$ ). Con esto lo que hemos hecho es mayorar el ángulo de ese segundo tramo al incluir en él el tramo de gran pendiente. En cuanto a la grieta 2, en la figura 2.16 se aprecia una trayectoria muy estable, sobretudo en el primer tramo de  $18 \mu\text{m}$ , el cual es casi perpendicular a la superficie del contacto ( $5^\circ$ ) y después un segundo tramo de  $25^\circ$ . En la tabla 2.5 se puede comprobar dicha estabilidad por la baja dispersión de los datos.

Hasta ahora todas las grietas que hemos analizado tenían en su segundo tramo un crecimiento lineal o de 2º orden pero en esta probeta observamos que ambas grietas crecen como una exponencial negativa. En este punto, sería interesante ver qué ocurre si profundizamos más en la probeta.

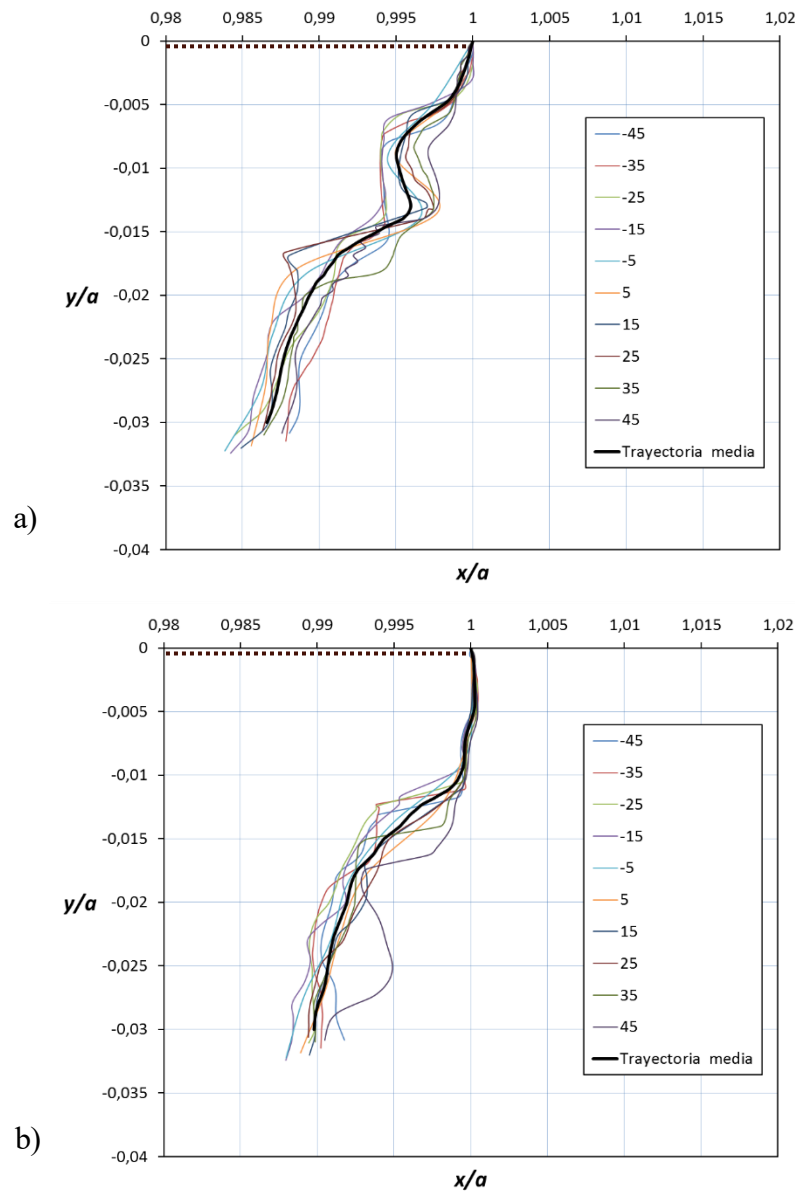


Figura 2.16: Gráfica de los perfiles de grieta, a) grieta 1 y b) grieta 2

Tabla 2.5: Datos de la trayectoria de grieta de la probeta 39

PROBETA 39	Media		Dispersión	
	G1	G2	G1	G2
Longitud 1 <sup>er</sup> tramo ( $\mu\text{m}$ )	8,45	17,90	6,30	2,42
Ángulo 1 <sup>er</sup> tramo ( $^\circ$ )	9,21	4,64	5,55	2,03
Ángulo 2 <sup>o</sup> tramo ( $^\circ$ )	21,13	25,44	3,56	1,89

## 2.6 Probeta 40

En la probeta 40 nos encontramos con 2 grietas para su estudio. Existe una tercera a la izquierda de la grieta 2 pero que se encuentra obstruida por la misma, haciéndola crecer hacia un lado y no de forma semielíptica como es normal, con lo cual la hemos descartado. En la figura 2.17 observamos que las dos grietas analizables se han originado al borde de la zona de contacto. La grieta 1 ha crecido de forma semielíptica, mientras que la grieta 2 está formada por varias iniciaciones de grieta que se han ido uniendo, de las cuales analizaremos solo una de ellas. En la figura 2.18 se pueden apreciar con más detalles ambas iniciaciones.

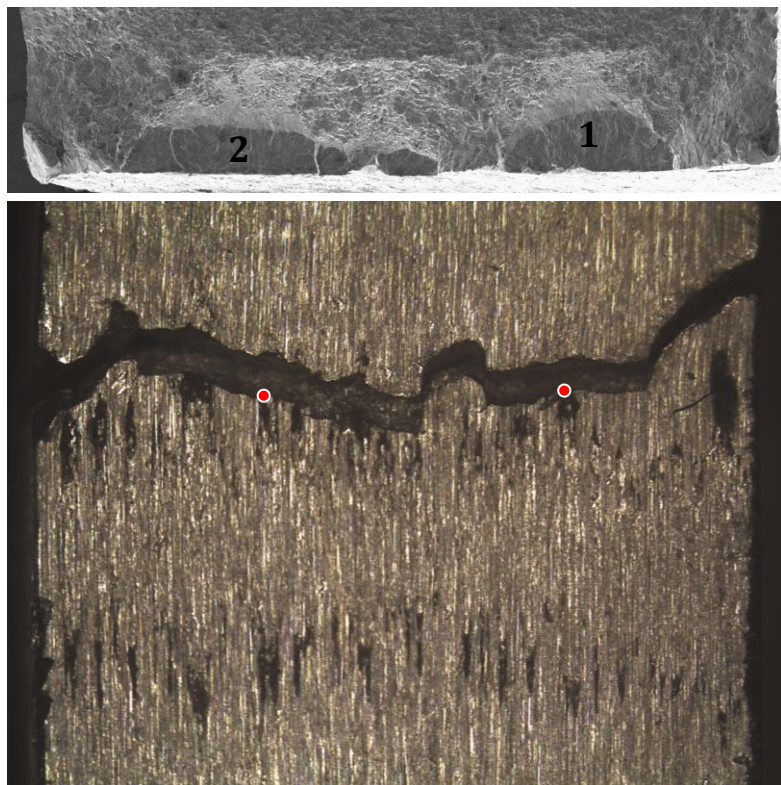


Figura 2.17: Superficie de fractura y huella del contacto.

$N=3690$  N,  $Q=850$  N,  $\sigma=70$  N y  $N_{\text{exp}}= 193503$

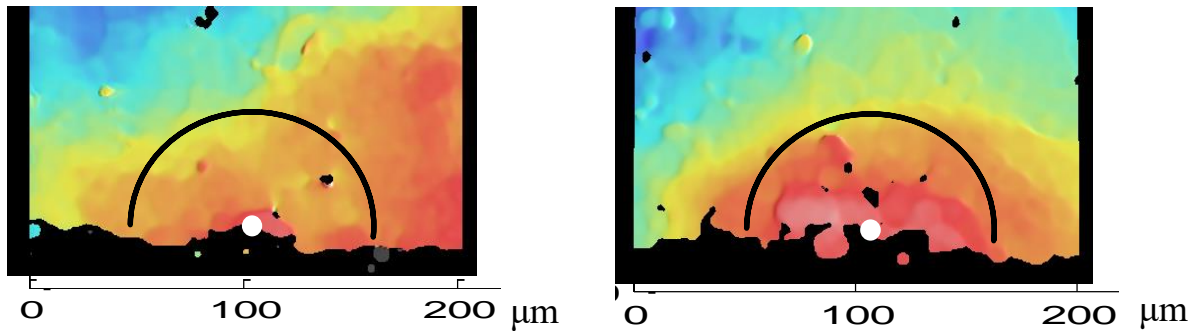


Figura 2.18: Imágenes del microscopio confocal, grietas 1 y 2

Al igual que ocurría en la probeta 39, en la grieta 1 nos aparece otro caso donde habría que dividir el perfil en 3 tramos (Figura 2.19). Esta vez, el primer tramo incluye a la pendiente pronunciada ya que el tramo inicial, casi perpendicular a la superficie del contacto, es muy corto ( $4\ \mu\text{m}$ ). De manera que, tenemos un primer tramo de  $10\ \mu\text{m}$  con una pendiente de  $45^\circ$  y un segundo tramo con una pendiente muy suave ( $9^\circ$ ) respecto a los más de  $20^\circ$  que tenían la mayoría de las grietas vistas hasta el momento. En esta ocasión, hemos sacrificado representar ese primer tramo tan parecido al de las demás probetas para mostrar fielmente como es el tramo más largo. En cuanto a la grieta 2, esta presenta bastante dispersión en los datos pero no obstante nos da una idea de su trayectoria. Como podemos ver en la figura 2.20 y en los datos de la tabla 2.6, inicia con una pendiente negativa de  $2,95^\circ$  de media para pasar en su segundo tramo a tener una pendiente positiva de casi  $30^\circ$ , de las mayores pendientes vistas hasta ahora.

Como ya hemos comentado en probetas anteriores, los perfiles han sido adimensionalizados con el semiancho de la zona de contacto, que en este caso es de  $1,30\ \text{mm}$ , puesto que la carga normal ha cambiado.

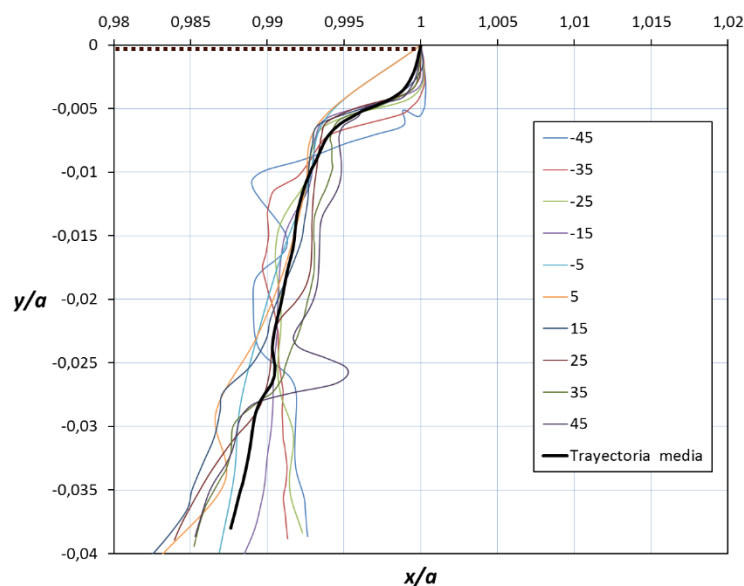


Figura 2.19: Gráfica de los perfiles de la grieta 1

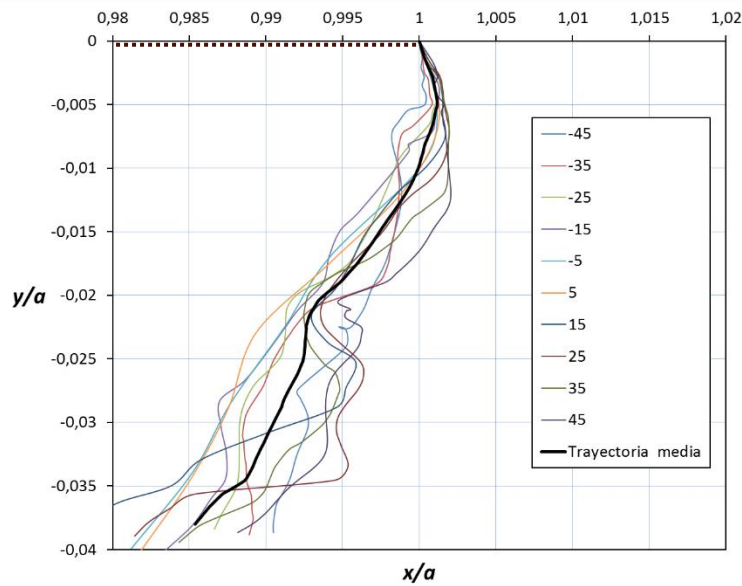


Figura 2.20: Gráfica de los perfiles de la grieta 2

Tabla 2.6: Datos de la trayectoria de grieta de la probeta 40

PROBETA 40	Media		Dispersión	
	G1	G2	G1	G2
Longitud 1 <sup>er</sup> tramo ( $\mu\text{m}$ )	9,70	14,20	2,91	4,32
Ángulo 1 <sup>er</sup> tramo ( $^{\circ}$ )	44,67	-2,95	3,75	6,76
Ángulo 2 <sup>o</sup> tramo ( $^{\circ}$ )	9,42	29,04	9,54	6,13

## 2.7 Probeta 41

Esta probeta es la última que falta por analizar. En ella nos encontramos con una grieta para su análisis (fig. 2.21). Se trata de una grieta pequeña originada a distinto nivel de las grietas contiguas que se ha iniciado en zona de deslizamiento. En la figura 2.22 podemos observar la iniciación con más detalle. Las demás grietas visibles no han podido estudiarse debido al principal problema encontrado hasta ahora y son la “zonas negras” que se encuentran alrededor de la zona de iniciación.

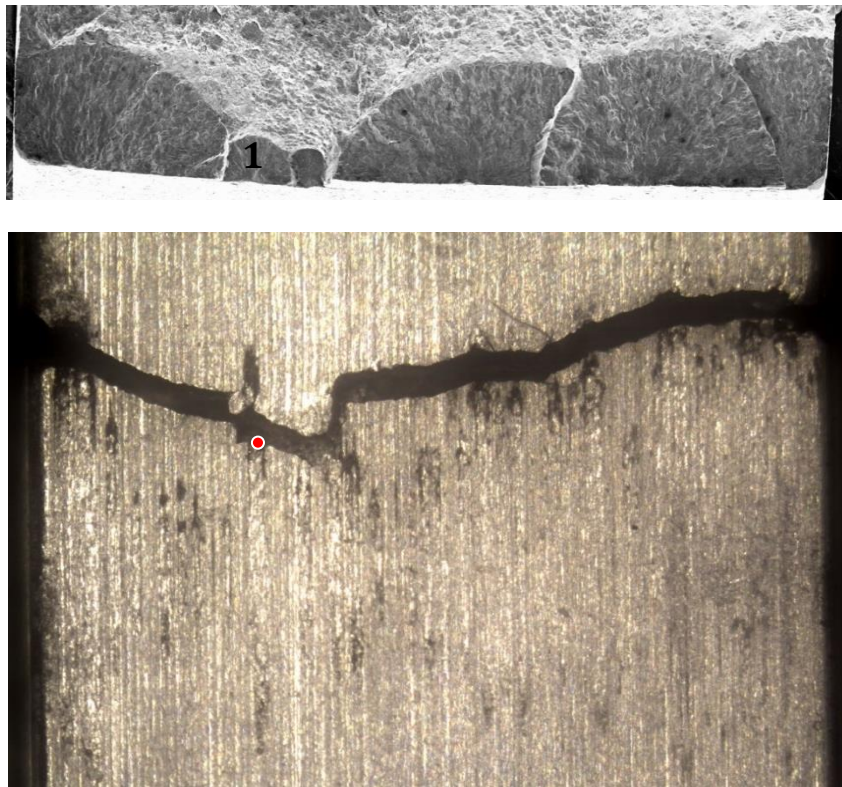


Figura 2.21: Superficie de fractura y huella del contacto.

$N=3690$  N,  $Q=850$  N,  $\sigma=70$  N y  $N_{exp}=256356$

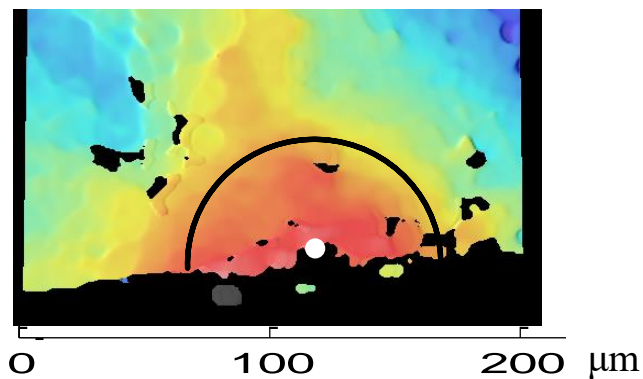


Figura 2.22. Imágenes del microscopio confocal

A continuación, se muestran los perfiles de la iniciación de grieta en la figura 2.23 junto con los datos obtenidos en la tabla 2.7. Los perfiles han sido adimensionalizados mediante el semiancho de la zona del contacto ( $a = 1.30$  mm). De nuevo se puede comprobar, como ya hemos visto en repetidas ocasiones, que la grieta inicia casi perpendicular a la superficie del contacto ( $4^\circ$ ) y luego continúa de forma lineal con una pendiente de unos  $26^\circ$ .

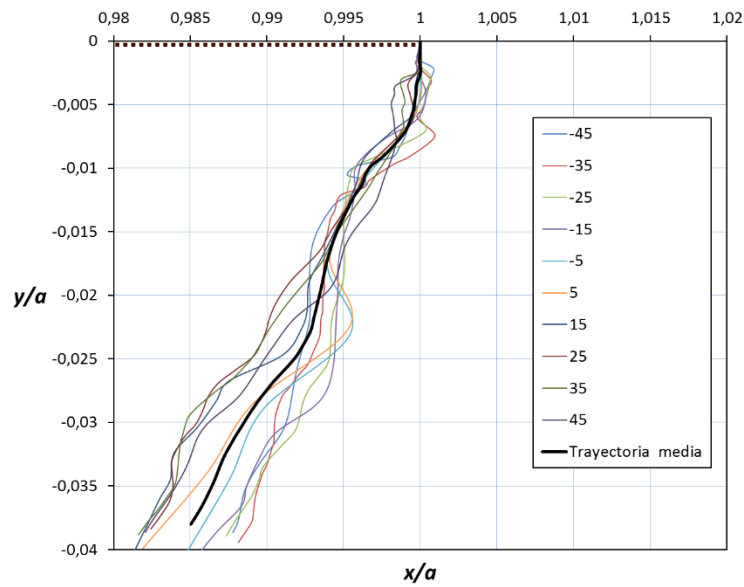


Figura 2.23: Gráfica de los perfiles de grieta

Tabla 2.7: Datos de la trayectoria de grieta de la probeta 41

	Media	Dispersión
<b>Longitud 1<sup>er</sup> Tramo (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	8,50	1,35
<b>Ángulo 1<sup>er</sup> Tramo (<math>^{\circ}</math>)</b>	4,55	5,86
<b>Ángulo 2<sup>o</sup> Tramo (<math>^{\circ}</math>)</b>	25,58	3,18

Se trata por tanto de una grieta que puede resumir bien lo que hemos estado viendo hasta ahora y que deja claro que hay un patrón que generalmente siguen las grietas sometidas a fretting fatiga con contacto cilíndrico. En el siguiente capítulo, se analizarán estos datos en conjunto.



### 3 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo, presentaremos los resultados obtenidos de cada grieta de manera conjunta para compararlos y de ese modo ser capaces de evaluar los distintos aspectos que tienen en común todas las grietas.

Para realizar una evaluación cualitativa se va a mostrar en una gráfica las trayectorias medias de cada grieta (fig. 3.1). Se encuentran distribuidas por probetas debido a que cada una estuvo sometida a unas cargas distintas. Cabe mencionar, como ya se expuso en el capítulo anterior, que los perfiles se encuentran adimensionalizados con un parámetro que solo depende del valor de la carga normal  $N$  aplicada (puesto que las demás variables están referidas al material y geometría de la probeta). Esto afecta a la longitud de la trayectoria adimensionalizada, explicándose así que encontremos tres trayectorias, correspondientes a las probetas 40 y 41, que son más largas que el resto.

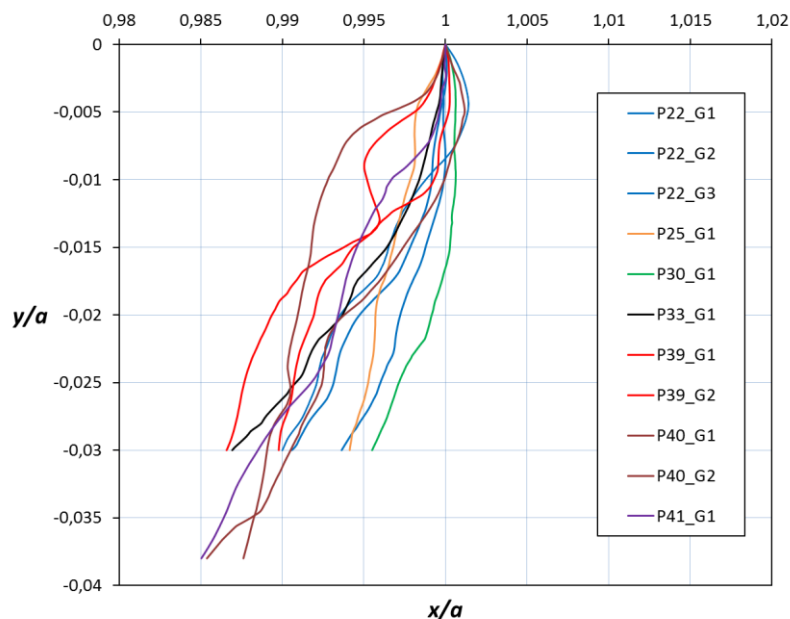


Figura 3.1: Gráfica con la trayectoria media de grieta de todas las probetas

En esta gráfica observamos que todas presentan una iniciación con una pendiente casi perpendicular a la superficie del contacto. Se trata de una pendiente suave, de pocos grados y normalmente positiva. Posteriormente, a medida que se va profundizando en la probeta, dicha trayectoria gira aumentando la inclinación de la misma. Se aprecia que todas tienen un crecimiento muy similar salvo las grietas de la probeta 39 y la grieta 1 de la probeta 40. Sin embargo, estas tres grietas si tienen semejanza entre ellas presentando una trayectoria similar a una exponencial negativa

en su segundo tramo. Además, es interesante ver que una vez pasado el primer tramo de iniciación, la trayectoria de crecimiento de las grietas, sobre todo las grietas que pertenecen a una misma probeta (22 y 39, con la excepción de la 40), es muy parecido, casi paralelo. Todo ello nos hace confirmar que las grietas no inician de forma aleatoria.

Pues bien, ahora vamos a poner número a estas observaciones realizadas a simple vista, es decir, vamos a realizar un análisis cuantitativo de la trayectoria. Para ello, hemos reunido todos los datos de cada grieta en tres tablas. La primera y segunda referentes a la longitud y ángulo del primer tramo, respectivamente; y la tercera respecto al ángulo del segundo tramo. En ellas se corroboran las primeras impresiones, y es que tenemos que la trayectoria tiene un primer tramo corto, con una longitud alrededor de los 20  $\mu\text{m}$  en la mayoría de los casos, y que crece con una pendiente de entre 0 y 10°. Cabe mencionar que, en ocasiones dicho ángulo de inicio es negativo como en la grieta 2 de la probeta 40 y en la grieta 1 de la probeta 22 (aunque no se encuentra representado así en la tabla). En el siguiente tramo se incrementa la pendiente, como hemos visto anteriormente en las gráficas, pasando a tener un ángulo de unos 20-30°. Como excepciones, nos encontramos con la grieta de la probeta 25 y la grieta 1 de la probeta 40, las cuales crecen con una pendiente menor, 13° y 9°, respectivamente.

Tabla 3.1: Datos de la longitud del primer tramo de todas las probetas

Longitud 1 <sup>er</sup> Tramo	P22			P25	P30	P33	P39		P40		P41
	G1	G2	G3	G1	G1	G1	G1	G2	G1	G2	G1
Media	17,10	21,10	23,70	21,40	29,00	21,45	17,90	8,45	9,70	14,20	8,50
Desviación	5,09	3,78	5,25	3,60	4,85	2,99	2,42	6,30	2,91	4,32	1,35

Tabla 3.3: Datos del ángulo del primer tramo de todas las probetas

Ángulo 1 <sup>er</sup> Tramo	P22			P25	P30	P33	P39		P40		P41
	G1	G2	G3	G1	G1	G1	G1	G2	G1	G2	G1
Media	2,14	2,13	7,70	11,52	0,15	9,86	4,64	9,21	44,67	-2,95	4,55
Desviación	3,48	2,91	3,72	3,31	5,38	3,68	2,03	5,55	3,75	6,76	5,86

Tabla 3.2: Datos del ángulo del segundo tramo de todas las probetas

Ángulo 2 <sup>o</sup> Tramo	P22			P25	P30	P33	P39		P40		P41
	G1	G2	G3	G1	G1	G1	G1	G2	G1	G2	G1
Media	26,10	20,24	28,00	12,77	21,75	32,34	25,44	21,13	9,42	29,04	25,58
Desviación	2,74	5,88	5,08	7,23	8,39	8,15	1,89	3,56	9,54	6,13	3,18

## 4 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

A lo largo de este trabajo se han constatado diversos hechos sobre la fatiga por fretting. Se comprueba que las grietas inician en el borde de la zona de contacto, pero también en zona de deslizamiento como se ha podido observar en las imágenes de la huella del contacto. Las grietas que se originan tienen forma semielíptica tanto en la etapa de iniciación como en la de propagación. Estas grietas se originan a través de toda la banda del contacto y a distintos niveles, llegando a tener en una probeta muchas iniciaciones de grieta, las cuales en numerosas ocasiones se unen observando así, a simple vista, un mínimo de tres grietas propagadas.

En cuanto a la trayectoria de grieta, se han encontrado similitudes y diferencias respecto a otros autores. Comenzando con el ángulo de iniciación de grieta, los resultados difieren de los de Endo y Goto donde observaban un ángulo de iniciación de  $45^\circ$ . En cambio, si son similares a los observados por Navarro o Nishioka y Hirakawa, que concluían que las grietas iniciaban con una cierta inclinación. En este trabajo se ha cuantificado que dicha inclinación es de unos  $0-10^\circ$  respecto de la perpendicular a la superficie del contacto y en sentido horario, siendo mucho menor de lo que se había observado hasta ahora. En algunos casos, se observan pequeños ángulos negativos al inicio pero que rápidamente giran volviendo a crecer con una inclinación positiva. Navarro observó en sus ensayos con contacto esférico que el tamaño del primer tramo era de unos  $20-30\ \mu\text{m}$ , lo cual se ha confirmado, obteniéndose un tramo de alrededor de  $20\ \mu\text{m}$ . Tras pasar ese primer tramo la grieta gira, cambiando su inclinación. Según Endo y Goto o Navarro entre otros, la grieta gira para crecer casi perpendicular a la superficie,  $0^\circ$  y  $10-20^\circ$ , respectivamente. En el análisis realizado en este trabajo se obtiene una inclinación un tanto mayor de unos  $20-30^\circ$ .

En este punto, puesto que el rango de estudio es muy pequeño ( $50\ \mu\text{m}$ ) habría que profundizar en la probeta y analizar como continua la trayectoria para poder confirmar si esa inclinación de  $20-30^\circ$  se mantiene o por el contrario se va haciendo cada vez menor como sugieren otros estudios. También, sería interesante investigar que modelos predictivos de fatiga multiaxial se ajustan mejor a esta trayectoria, Fatemi-Socie o SWT entre otros, ya que cada modelo trata la iniciación de grieta de formas distintas. Ello también contribuiría a mejorar dichos modelos.



# 5 ANEXOS

## Anexo 1: Procedimiento

Vamos a mostrar el procedimiento seguido paso a paso desde la toma de imágenes de la probeta hasta llegar a obtener y analizar los perfiles de grieta. También incluimos en este anexo algunos aspectos técnicos de las herramientas utilizadas.

### 1. Notas preliminares

Es importante conocer previamente las referencias y conceptos que serán utilizados en el procedimiento (Figura 1).

- El eje Z se corresponde con el eje longitudinal.
- El eje Y va en el sentido hacia fuera de la probeta.
- El eje X va en el sentido hacia fuera del contacto cilíndrico.
- Los perfiles que se van a tomar se encuentran en un plano perpendicular al plano de la grieta (Y-Z).
- Los diferentes ángulos ( $\phi$ ) para la toma de perfiles tienen como punto de partida la perpendicular a la superficie del contacto (a). Dichos perfiles serán denominados perfiles inclinados.

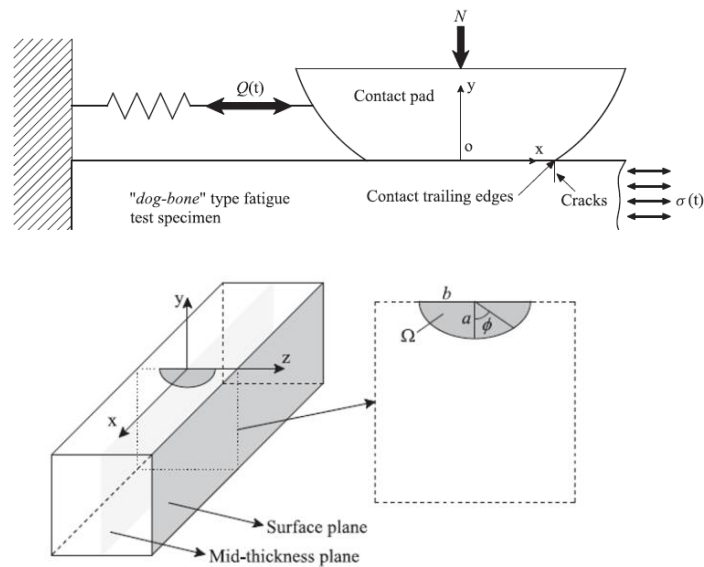


Figura 5.1. Referencias utilizadas en la grieta

## 2. Procedimiento

### 2.1. Obtención del material necesario para el análisis de grietas

- Tomar imagen de la superficie de rotura correspondiente al lado de la probeta que tiene el contacto cilíndrico. Se realizará mediante un microscopio electrónico de barrido.
- Tomar imagen de la cara del contacto haciendo coincidir las dos superficies de fractura.
- Obtener una superficie en 3-D de la fractura correspondiente al lado de la probeta que tiene el contacto cilíndrico. Se realizará mediante un microscopio confocal interferométrico (Sensofar). La superficie obtenida tiene una resolución en el plano de la grieta (plano Y-Z) de  $0,65 \mu\text{m}$  y en altura (eje X) de  $2\text{-}3 \mu\text{m}$ .

### 2.2. Análisis de grietas

#### 2.2.1. Identificación de las iniciaciones de grieta de la probeta

1. Inspeccionar visualmente las imágenes del microscopio electrónico (superficie de fractura y cara del contacto) para identificar las grietas.
2. Analizar la superficie 3-D mediante un programa de tratamiento de imágenes (SensoScan).
  - a. Ver el perfil longitudinal de la grieta en la superficie del contacto y acotar la ubicación de la iniciación de grieta. Se debe localizar una zona elevada respecto al resto del perfil que indica la zona de iniciación de grieta.
  - b. Hacer zoom en dicha zona de la superficie y a través del rango de colores y la experiencia, definir la longitud de la iniciación de grieta y el centro de la misma.

#### 2.2.2. Obtención y tratamiento de los datos

1. Obtener un archivo que contenga una nube de puntos de la zona de iniciación de grieta.
2. Filtrar los datos para eliminar los puntos negros de la imagen que se corresponden con puntos que no ha medido el microscopio confocal interferométrico y a los cuales el programa da un valor fijo del orden de  $10^5$ . (Véase Anexo 2, código 1)
3. Obtener los perfiles inclinados creando un programa que tiene como datos de entrada: el archivo, la coordenada Z del centro de la iniciación de grieta tomado anteriormente, la longitud del perfil ( $50 \mu\text{m}$ ) y los ángulos  $\phi$  deseados (Véase Anexo 2, código 2)

#### 2.2.3. Análisis de los perfiles

1. Dividir los perfiles en dos tramos bien diferenciados.
2. Tomar la longitud y el ángulo del primer tramo y el ángulo del segundo tramo. Siendo  $0^\circ$  el eje perpendicular a la superficie del contacto.
3. Repetir los 2 pasos anteriores de forma manual para cada perfil de la grieta.
4. Hacer la media y la desviación típica de los datos recogidos.

## **Anexo 2: Códigos utilizados para la obtención de los perfiles**

En este anexo adjuntamos los códigos utilizados para la obtención de los perfiles que nos han permitido realizar el análisis de la trayectoria de la iniciación de grieta. Consta de dos códigos que realizan varias funciones cada uno. El primero se encarga de preparar y filtrar el archivo de datos que contiene la nube de puntos de la zona de iniciación. El segundo trata los datos para obtener cada uno de los perfiles y la trayectoria media.

### **Código 1: Preparación y filtrado de datos**

```
clear all
close all
clc

s=load('P22_G1.dat'); %Cargar nube de puntos. El archivo cuenta con tres
                    %columnas referentes a unos ejes x y z predefinidos
                    %por el programa del que se extrajeron
cg=1735.058; %Punto de la iniciación de grieta supuesto (eje z)

%CONTEO DE PUNTOS EN EL EJE Y
w=2;
while s(w,2) == s(1,2)
    w=w+1;
end;
w=w-1;

%REORDENAR NUBE DE PUNTOS PARA POSTERIOR TRATAMIENTO
%La nube de puntos viene dada de una forma que complica su edición y
%tratamiento, con lo cual es necesario reordenar.
f=1;
for j=1:w
    for k=1:length(s)
        if s(k,1) == s(j,1);
            p(f,:)=s(k,:);
            f=f+1;
        end
    end
end

%CAMBIO VALORES DE Y
%Hacemos que y=0 coincida con el punto de iniciación de la grieta
i=length(p);
while p(i,1)>cg
    i=i-1;
end
u=0;
while p(i,3)>=1e5
    i=i-1;
    u=u+1;
end
y=p(i,2);

j=length(s);
```

```

k=length(s);
while k~=0
    while j~=0 && s(j,2) == s(k,2)
        a(j)=u*(-0.645);
        j=j-1;
    end
    k=j;
    u=u-1;
end
s(:,2)=a;

%VOLVEMOS A REORDENAR LA NUBE DE PUNTOS
f=1;
for j=1:w
    for k=1:length(s)
        if s(k,1) == s(j,1);
            p(f,:)=s(k,:);
            f=f+1;
        end
    end
end

%FILTRADO DE DATOS
%Es necesario eliminar los puntos negros que son aquellos que el microscopio
%no pudo medir y los introduce en el archivo como un valor del orden de 10^5
k=1;
for i=1:size(p,1)
    if (p(i,3)<1e5)
        b(k,:)=p(i,:);
        k=k+1;
    end
end

%REORDENAR MATRIZ
%Reordenamos la matriz según las referencias utilizadas en el proyecto
c(:,1)=b(:,3);
c(:,2)=b(:,2);
c(:,3)=b(:,1);

%GUARDADO DE MATRIZ EN OTRO ARCHIVO
save('FP22_G1.dat','c','-ASCII');

```



**Código 2: Tratamiento de datos para la obtención de los perfiles y la trayectoria media**

```

close all
clear all
clc

%PARAMETROS
interv=50; %Profundidad en micrómetros
cg= 1735.058; %Punto de la iniciación de grieta supuesto (eje z)
ai=5; %Angulo inicial
af=45; %Angulo final
s=load('FP22_G1.dat'); %Carga un archivo con la nube de puntos ya filtrada
sa=1298; %Valor del semiancho de la zona de contacto

%OBTENCIÓN DE PERFILES
%Perfiles de ÁNGULOS NEGATIVOS respecto de la perpendicular a la superficie en
%sentido horario.
m=1;
for a=af:-10:ai
    i=length(s);
    while s(i,3)>cg %Busco lugar en el que se encuentra el punto de iniciación
        i=i-1;
    end
    p(1,:)=s(i,:); %Primer punto del perfil
    f=2;
    z=0;
    y0=s(i,2);
    j=i;
    w=0;
    while interv > (z/sind(a)) && w==0 %Busca puntos del perfil hasta llegar a
        %la profundidad deseada.
        z=z+0.645;
        while w==0 && s(j,3)>(cg-z);
            j=j-1;
            if j==0
                w=1;
            end
        end
        end
        if w==0
            y1=z/tand(a);
            y=y0+y1;
            k=j;
            while single(y)>(single(s(k,2)))
                k=k-1;
            end
            p(f,:)=s(k,:);
            %Parche para que el eje y(p(:,2)) sea creciente siempre y permita
            %interpolación la curva.
            if p(f-1,2)==p(f,2)
                p(f-1,2)=p(f,2)-1.1;
                if p(f-2,2)==p(f-1,2)
                    p(f-2,2)=p(f-2,2)-0.5;
                end
            end
            end
            %Parche para que el eje y(p(:,2)) sea creciente siempre y poder
            %interpolación.
            if p(f-1,2)>p(f,2)
                p(f-1,2)=p(f,2)-0.4;
            end
            %%%%%%%%%Fin parche%%%%%%%%

```

```

        f=f+1;
    end
end

%Organizar datos del perfil
b=-p(:,2)./cosd(a); %Magnitud real del perfil (eje Y)
c=p(:,1); %eje X
d=[c,b];

%Adimensionalizar con el semiancho de la zona de contacto (sa)
ref=sa-d(1,1);
d(:,1)=d(:,1)+ref;
d=d./sa;
%Guardar los datos cada perfil
ang=num2str(a);
text=strcat('-',ang,'.txt');
save(text,'d','-ASCII');
%Trayectoria media. Interpolación
t=0:-0.0002:-0.038;
x=interp1(d(:,2),d(:,1),t);
S(:,m)=x'; %Los puntos interpolados (eje X) se guardan consecutivamente
m=m+1;

clear p b c d x
end

%Perfiles de ÁNGULOS POSITIVOS respecto de la perpendicular a la superficie en
%sentido horario.
%El proceso es idéntico que el anterior
for a=af:-10:ai
    i=length(s);
    while s(i,3)>cg
        i=i-1;
    end
    p(1,:)=s(i,:);
    f=2;
    z=0;
    y0=s(i,2);
    j=i;
    w=0;
    while interv > (z/sind(a)) && w==0
        z=z+0.645
        while w==0 && s(j,3)<(cg+z);
            j=j+1;
            if j==length(s)+1
                w=1;
            end
        end
    end
    if w==0
        y1=z/tand(a);
        y=y0+y1;
        k=j;
        while single(s(k,2))>single(y)
            k=k+1;
        end
        p(f,:)=s(k,:);
        %Parche
        if p(f-1,2)==p(f,2)
            p(f-1,2)=p(f,2)-0.645;
            if p(f-2,2)==p(f-1,2)

```

```

        p(f-2,2)=p(f-2,2)-0.5;
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
f=f+1;
end
end
%Organizar datos del perfil
b=-p(:,2)./cosd(a);
c=p(:,1);
d=[c,b];

%Adimensionalizar
ref=sa-d(1,1);
d(:,1)=d(:,1)+ref;
d=d./sa;

%Guardar
ang=num2str(a);
text=strcat(ang, '.txt');
save(text, 'd', '-ASCII');

%Trayectoria media. Interpolación
t=0:-0.0002:-0.038;
x=interp1(d(:,2),d(:,1),t);
S(:,m)=x'; %Continua añadiendo los puntos interpolados (eje X)
m=m+1;

clear p b c d x
end

%CÁLCULO DE LA TRAYECTORIA MEDIA
r=zeros(length(S),1);
for j=1:10 %Sumatorio de los puntos interpolados (eje x) de cada perfil para
    %cada valor de y
    r(:,1)=S(:,j)+r(:,1);
end
L=r./10; %Media
plot(L,t); %Obtención de la gráfica
LM=[L t'];
text2='LM_P22_G1.txt';
save(text2, 'LM', '-ASCII'); %Se guarda la trayectoria media en un archivo

```



## 6 BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] C. Navarro, Tesis Doctoral “*Iniciación y Crecimiento de Grietas en Fatiga por Fretting*” (2005).
- [2] J. Vázquez, Tesis Doctoral “*Efecto de las Tensiones Residuales en la Fatiga por Fretting*” (2010).
- [3] K. Endo, H. Goto y T. Fukunaga, (1974) “*Behaviors of frictional force in fretting fatigue*”. Bull. JSME 17(108), 647–654.
- [4] R.B. Waterhouse, (1981) “*Fretting Fatigue*”.
- [5] J. Vázquez, S. Astorga, C. Navarro and J. Domínguez, (2016) “*Analysis of Initial Crack Path in Fretting Fatigue*”. Frattura ed Integrità Strutturale, **37**, 38-45.
- [6] J. Vázquez, C. Navarro, J. Domínguez, (2014). “*Effect of the model's geometry in fretting fatigue life prediction*”. Frattura ed Integrità Strutturale. **30**, 109-117.