



Estudio del fenómeno de fatiga en viga rotatoria empleando DIC 3D

L. Felipe-Sesé¹, C. Huertas-Charriel¹, A.J. Molina-Viedma¹, J.A. Almazán-Lázaro¹, and F.A. Díaz¹

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, Universidad de Jaén, chuertas@ujaen.es, lfelipe@ujaen.es, ajmolina@ujaen.es, jalmazan@ujaen.es, elalba@ujaen.es, fdiaz@ujaen.es

El análisis del fenómeno de fatiga en vigas rotatorias es de gran interés debido al potencial de fallos catastróficos que presentan las grietas por fatiga en sistemas rotatorios. Estos fallos pueden interrumpir el funcionamiento eficiente y eficaz de las máquinas, lo que ha llevado a un gran interés por parte de los investigadores en este campo. Por otro lado, la técnica experimental de Correlación Digital de Imágenes 3D (3D DIC) se presenta como una herramienta de gran potencial para analizar este fenómeno de manera novedosa y original. 3D DIC es una técnica óptica que permite obtener información cuantitativa precisa sobre el desplazamiento, la deformación y geometría tridimensionales sin contacto ni interferencia con la funcionalidad de la misma. A diferencia de los sensores convencionales de contacto que solo proporcionan resultados discretos y requieren conexión física, DIC ofrece mediciones en un campo completo, lo que permite una mejor comprensión del comportamiento.

Este trabajo presenta un montaje experimental que permite estudiar la evolución del fenómeno de fatiga en una viga rotatoria sin necesidad de parar o ralentizar el ensayo. El proceso consiste en capturar imágenes de manera sincronizada con el giro de la probeta rotatoria. Esta captura se realiza con un sistema estereoscópico de cámaras de alta resolución sin necesidad de recurrir a alta velocidad y mejorando la nitidez de los resultados. Procesando las imágenes con un sistema de 3D-DIC, ha sido posible obtener una serie de mapas de desplazamiento y deformación que permiten el seguimiento del crecimiento de una grieta a lo largo de los ciclos,

De esta manera, se aplica DIC de manera novedosa para su uso en ensayos dinámicos de viga rotatoria, lo cual ofrece un banco de datos con un gran potencial para comprender mejor el comportamiento de las grietas y predecir la vida útil de componentes críticos en diversas industrias, como la energía eólica y la industria automotriz, ferroviaria o aeroespacial.

1. Introducción

La fatiga es un fenómeno que se produce en los materiales cuando se someten a cargas cíclicas repetidas, lo que puede provocar la aparición de grietas y, finalmente, la falla del componente [1], [2]. Este proceso puede ocurrir incluso cuando las tensiones aplicadas están muy por debajo del límite elástico del material. La fatiga es un factor crítico en el diseño de componentes mecánicos, especialmente aquellos que están sujetos a cargas dinámicas como los ejes de rotación [3]. De esta manera, considerando que en un material siempre existirán fisuras microscópicas, habitualmente generadas en zonas donde exista un concentrador de tensión, defecto del material, acabado superficial o imperfección en la fabricación. Estas fisuras van creciendo y uniéndose con cada ciclo de carga que se aplica, provocando un mayor concentrador de tensión y la reducción de la sección resistente, entre otros efectos, produciéndose la rotura de manera súbita [4]. Por ello es importante reducir los concentradores de tensión en el diseño del elemento mecánico, así como prestar especial atención al proceso de fabricación y acabado superficial de la pieza, evitando las discontinuidades o irregularidades tanto externas como internas. Atendiendo a esas restricciones de diseño, se puede prolongar la vida de cualquier componente mecánico. Así, para valorar o estimar la vida de un componente, se recurre a diversos métodos entre los que destaca el método tensión-vida.

El método de tensión-vida, o enfoque S-N, es una técnica ya tradicional pero muy empleada para el análisis de fatiga [1], [2]. Este método se basa en la construcción de una curva S-N, que relaciona la amplitud de la tensión aplicada (S) a un material con el número de ciclos hasta la falla (N). Las pruebas de fatiga se realizan típicamente en máquinas de ensayo de viga rotatoria, en las que la tensión está totalmente invertida y no hay componente media. De esta manera se registra la cantidad de ciclos que soporta una muestra a una tensión dada hasta que se produce un fallo [4]. Los resultados de estas pruebas permiten determinar la resistencia a la fatiga de un material para diferentes niveles de tensión. Es importante tener en cuenta que la vida a la fatiga puede presentar una dispersión considerable debido a las posibles heterogeneidades o defectos microestructurales y las diferencias en las condiciones de prueba [1].

La fatiga en viga rotatoria es un caso particular de fatiga, en el que se basó el método S-N, donde la muestra se somete a un momento de flexión mientras gira alrededor de su eje longitudinal [5]. En cada rotación, cada punto de la superficie de la muestra experimenta un ciclo completo de tensión inversa. Este tipo de prueba es común para evaluar la resistencia a la fatiga de ejes y otros componentes rotatorios, ya que las condiciones de carga son similares a las que se encuentran en aplicaciones reales [3], [5], [6]. Las pruebas de flexión rotatoria son consideradas de las más confiables, ya que la resistencia a la fatiga medida es menor que la obtenida en otros tipos de pruebas [4].

Las máquinas de flexión rotatoria pueden aplicar una carga de flexión de diversas maneras, incluyendo carga en uno o dos puntos, en función de si se ensaya una probeta en flexión pura o no. Igualmente se pueden ensayar diferentes geometrías de probetas, como cilíndricas, cónicas o de tipo reloj de arena [4]. En estos ensayos, la instrumentación se suele centrar en controlar la precisión del momento de flexión aplicado, y se verifica utilizando mediciones dimensionales o especímenes con galgas extensométricas [4]. Por lo tanto, hasta donde se conoce, no hay sistemas de monitorización continua del proceso de fatiga durante el ensayo. Por otro lado, las pruebas se realizan a menudo a temperatura ambiente, pero también se pueden llevar a cabo a temperaturas elevadas.

En los últimos años, las técnicas ópticas se han convertido en una herramienta importante en la mecánica experimental, ofreciendo la ventaja de obtener información de campo completo sin contacto [8], [9]. Correlación digital de imágenes (DIC) es una técnica óptica que permite medir desplazamientos y deformaciones en la superficie de un componente mediante el análisis de imágenes digitales. De esta manera, esta técnica dispone de un gran potencial para aplicarse a estructuras en rotación para medir las vibraciones, las deformaciones y la aparición y propagación de grietas. De hecho, DIC se ha utilizado también en diferentes estudios básicos de propagación de grieta a fatiga en ensayos no rotatorios [9], [10], [11]. No obstante, hasta la fecha no se ha detectado ningún estudio que monitorice el crecimiento de grieta durante un ensayo de viga rotatoria. Ante esta situación, en este trabajo se ha diseñado un original método experimental para facilitar la comprensión del fenómeno de rotura por fatiga y mejorar la fiabilidad y reproducibilidad de este tipo de ensayos. En concreto, empleando de Correlación digital de Imágenes 3D, se ha diseñado un sistema que monitoriza la zona de aparición de la grieta durante toda la evolución del ensayo sin necesidad de pararlo. Esta técnica facilitará la observación de la aparición y progresión de la grieta, así como la interpretación del fenómeno. En los siguientes apartados, además de la descripción de los conceptos fundamentales y de la metodología empleada, se expondrá cómo se ha llevado a cabo esta nueva metodología sobre una probeta en forma de reloj de arena pudiendo medir parámetros con un alto potencial para la investigación del proceso.

2. Fundamentos

2.1. Principio del ensayo de fatiga

El ensayo de fatiga en viga rotatoria consiste en someter a una pieza a esfuerzos fluctuantes de magnitud repetida o de sentido variable registrando el número de ciclos requeridos para producir su fallo (vida a la fatiga) durante un largo periodo de tiempo simulando las condiciones en las que la pieza va a trabajar. [2]

El ensayo de probeta rotatoria, o ensayo en la máquina de Moore (Figura 1 a) es uno de los más eficaces y utilizados para materiales metálicos. Utilizan pequeñas probetas de sección circular que giran por acción un motor eléctrico. Estas probetas quedarán sometidas a un estado de flexión pura o flexión simple con inversión completa conforme la probeta gira (Figura 1 b) [2].

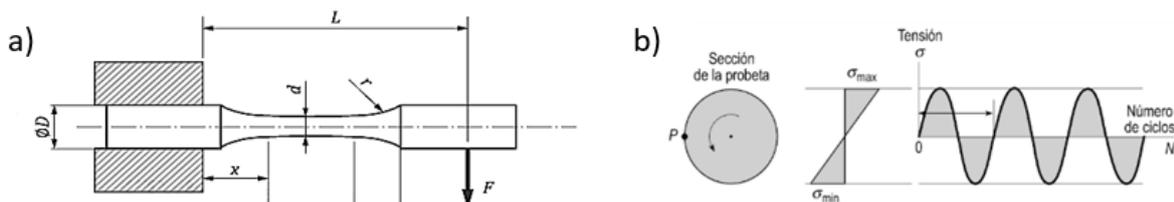
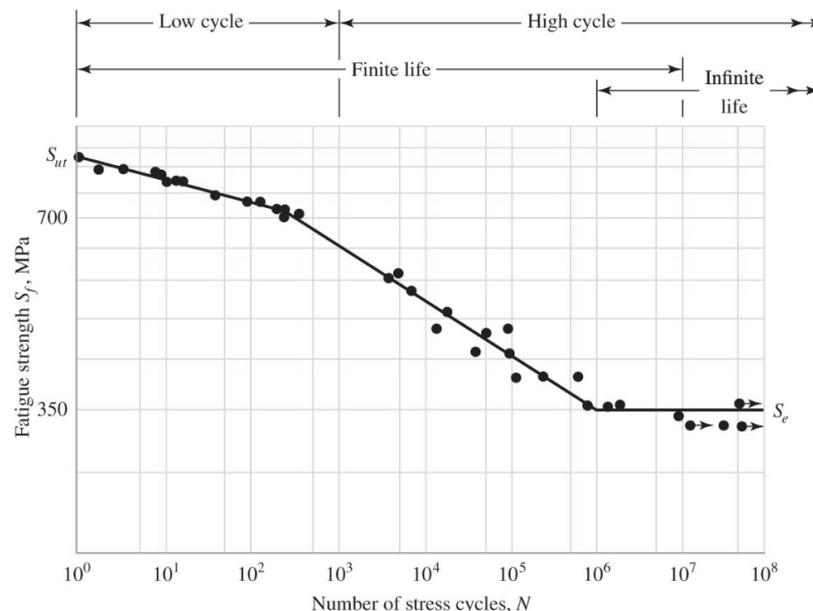


Figura 1: Máquina de probeta rotatoria de Moore [5]. Tensiones variables en un punto P de la probeta [13].

2.2. Método de análisis a fatiga mediante el método de tensión-vida

Para determinar la resistencia de una viga rotatoria bajo la aplicación de cargas de fatiga mediante el método de tensión-vida, se debe partir de una base de datos obtenidos a partir de ensayos de muestras que se someten a esfuerzos fluctuantes completamente invertidos (tensión media igual a cero) y se contabiliza el número de ciclos hasta su rotura. Sin embargo, debido a la naturaleza estadística de la fatiga, se necesita un número muy alto de ensayos para poder hacer un promedio, el cual tendrá cierta incertidumbre. Así se determinará la relación entre tensión aplicada (S) y vida esperada medida en número de ciclos (N) cuya relación típica en los aceros se muestra en la Figura 2, en el llamado diagrama S-N. Los valores mostrados en el eje de ordenadas del diagrama S-N se llama resistencia a la fatiga S_f que suele acompañarse con un subíndice indicando el número de ciclos correspondientes (N) que se estima que soporte hasta la rotura. [2]

**Figura 2:** Diagrama S-N para ensayos en viga rotatoria que muestra la relación entre la tensión alternante totalmente invertida aplicada y la vida en ciclos esperada [2].

Como se puede apreciar, se pasa de la duración de un solo ciclo cuando se aplica una tensión alternante de valor tensión última (S_{ut}) a un valor S_e denominado límite de resistencia a fatiga, por debajo del cual, se supone que la pieza tendría una vida considerada infinita o superior a un millón de ciclos ($N=10^6$). Desde $N = 1$ hasta $N=1.000$ ciclos, por lo general se clasifica como fatiga de bajos ciclos, como se indica en la Figura 2. En consecuencia, la fatiga de altos ciclos se relaciona con el fallo correspondiente a ciclos de esfuerzos mayores que 10^3 ciclos. [2]

Estos valores de resistencia y ciclos están definidos para un tipo de material concreto con un tamaño, acabado o condiciones ambientales específicas, para poder ajustar estos valores de resistencia cuando ciertas condiciones varían se precisa de una serie de parámetros de ajuste. En este caso, estos parámetros se denominan parámetros de Marin [2].

Por otro lado, cuando las condiciones de tensión media no son iguales a cero, existen diferentes criterios para poder relacionar la resistencia a la fatiga del material a las condiciones de tensión alternante y media específicas. Entre otros, destacan los criterios de fatiga de Goodman, por su simplicidad, y de la asociación ASME, por su mejor ajuste a los resultados experimentales [2].

2.3. Crecimiento de grieta

Dentro de la fractura lineal-elástica, se distinguen tres etapas de fatiga diferenciadas, dependiendo del agrietamiento: la etapa I es invisible para el observador, donde se supone un desplazamiento de cristal que se extiende a través de granos contiguos, inclusiones e imperfecciones. En la fatiga de etapa II se produce la extensión de la grieta, este avance produce evidencia que puede observarse en la micrografía de un microscopio electrónico. La etapa III de la fatiga se asocia con una rápida aceleración del crecimiento de la grieta y después de la fractura. Las grietas por fatiga surgen y crecen cuando los esfuerzos varían y existe alguna tensión en cada ciclo de esfuerzo [2].

En la Figura 3 puede observarse la longitud de grieta a como función de N a partir de una grieta inicial a_i y para tres niveles de esfuerzo $(\Delta\sigma)_3 > (\Delta\sigma)_2 > (\Delta\sigma)_1$. Donde $\Delta\sigma$ es $\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}}$ [2].

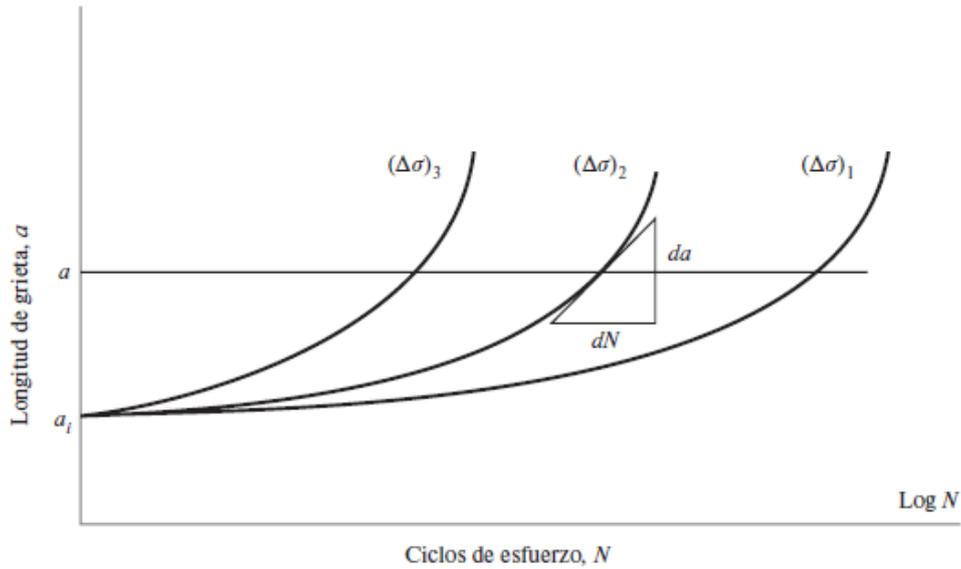


Figura 3: Longitud de grieta para distintos niveles de esfuerzo en función de los ciclos de carga [2].

2.4. Correlación digital de imágenes

Correlación digital de imágenes (DIC, por sus siglas en inglés) es una técnica óptica de campo completo que se basa en la adquisición de imágenes digitales durante el ensayo de una probeta. Las variaciones de forma que experimenta este patrón a lo largo del ensayo permiten calcular los desplazamientos y deformaciones mediante la comparación de la probeta en su estado inicial (considerándolo como el de referencia) hasta su estado final (deformado) [8] [14] [15].

Para su utilización es necesario tener en cuenta que para un estudio de la deformación o desplazamiento en dos dimensiones se emplea una única cámara, sin embargo, si fuera preciso analizar los resultados en tres dimensiones, se precisa un sistema de visión estereoscópico que permita percepción espacial, el cual está compuesto por dos cámaras observando la misma área de interés para poder realizar el análisis [8].

El principio básico de este método consiste en seguir cada una de las agrupaciones de píxeles, denominadas facetas, en las imágenes capturadas durante el proceso de deformación de la probeta. Para establecer cuánto se ha desplazado o deformado un punto $P(x_0, y_0)$, es necesario partir de una imagen de referencia (normalmente la del estado inicial) y en ella se establecerá una faceta (ventana cuadrada) cuyas dimensiones son $2M+1$ píxeles, donde M es la distancia desde el punto de referencia hasta el borde de la ventana. Posteriormente se rastrea esta faceta en cada una de las imágenes tomadas para así establecer la deformación que ha experimentado la probeta durante el ensayo con respecto a la imagen de referencia [8].

Normalmente, para facilitar el proceso de las facetas, se recurre a generar un patrón aleatorio o moteado superficial. Lo cual se puede conseguir mediante la aplicación de base de pintura blanca sobre la superficie, y posteriormente se genera un moteado aleatorio de color negro (también llamado Speckle) para generar el máximo contraste posible (Figura 3) de forma que el software, empleando los algoritmos necesarios, pueda realizar un seguimiento de los puntos que se encuentran sobre ese recubrimiento y así conseguir crear un mapa del campo completo de las deformaciones que ha sufrido la probeta durante el ensayo [8].

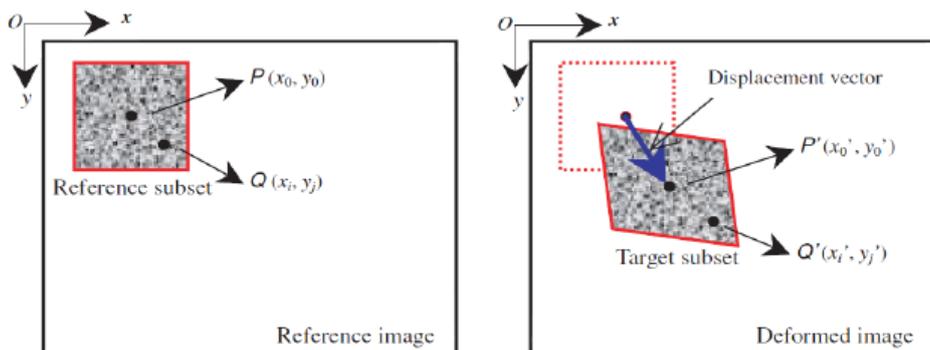


Figura 4: Esquema de procesado de análisis en DIC-2D [8].

En cualquier caso, el sistema de visión debe calibrarse. Para la realización de DIC 2D puede ser suficiente con conocer la relación de magnificación pixel/mm. No obstante, la calibración de DIC 3D es algo más meticulosa ya que el programa necesita conocer las propiedades ópticas de cada cámara, así como la orientación y posición de cada cámara entre ellas y la probeta, es decir, los parámetros intrínsecos y extrínsecos del montaje óptico. Para ello se suele recurrir a la captura de imágenes de patrones cuadrículados calibrados y a algoritmos de correlación entre estas imágenes capturadas por las cámaras. Una vez que las posiciones relativas entre las dos cámaras son conocidas y todos los parámetros de formación de imágenes son los mismos, las coordenadas absolutas en tres dimensiones de cualquier punto de la superficie en el espacio se pueden calcular. Si este cálculo se realiza para cada punto de la superficie del objeto, el contorno de la superficie 3D del objeto puede ser determinado en todas las áreas que se observan por ambas cámaras [8] [15].

3. Metodología

3.1. Montaje experimental

La máquina de fatiga empleada permite realizar ensayos de fatiga en viga rotatoria sometida a flexión simple, siendo esa una de las opciones disponibles en la norma ISO 1143. Para ello se dispone una carga, en forma de pesas, sobre un basculante largo y articulado que apoya sobre una célula de carga K – U9C de 2kN de Hottinger Brüel & Kjaer, mostrada en la Figura 5. Esta célula permite conocer con suficiente precisión la fuerza ejercida sobre el extremo de la probeta. El acople entre la célula de carga y la probeta se realiza mediante un sistema de rodamiento que permite que esta última gire libremente a la vez que soporta la carga, tal y como se observa en la Figura 7.

**Figura 5:** Célula de carga empleada.

En lo referente al sistema de captura de imágenes, es importante destacar que las cámaras precisan un pulso TTL (0-5V) para comandar una captura. Para conseguir este pulso, se recurre a un sensor fotoeléctrico, el cual está alimentado por una placa Arduino. Este sensor puede ajustarse para cerrar el circuito cuando detecta una pequeña marca blanca dispuesta en el sistema portaprobetas. Esta señal se recoge por el sistema Arduino para contabilizar una vuelta y comandar el pulso TTL.

Al tratarse de un elevado número de ciclos y, por ende, de imágenes a almacenar y procesar, se consideró el criterio de guardar únicamente una de cada diez imágenes. Esto permitió obtener un número suficiente de datos como para contemplar el proceso de fractura por fatiga, pero reduciendo el costo de almacenaje y procesamiento. Con este objetivo se desarrolló un programa en lenguaje Python que guarda una imagen cada 10 pulsos TTL.

Todo el este sistema de señales se encuentra en una caja de mando desde donde se puede comandar la puesta en marcha de la máquina, el regulador de velocidad del motor, la activación de la cámara y la puesta a 0 del número de revoluciones como se muestra en la Figura 6. Todo ello pudiendo ser comandado a una distancia segura de la propia máquina.



Figura 6: Caja de mando.

En lo referente al sistema óptico, el tamaño y las connotaciones del movimiento de la probeta hacen que el montaje experimental precise ciertas características especiales. La primera decisión que se tomó fue la elección del objetivo de la cámara. Este tenía que ser adecuado para el campo de visión y espacio donde se iba a utilizar las cámaras. Se escogió un objetivo de 35 mm con una apertura focal de 1.6 y dos cámaras Allied Vision Mako U-130B de 1128x1024 pixeles. Dado que la velocidad de rotación de la probeta es relativamente alta, 400 rpm, la captura de imagen debe ser rápida y su tiempo de exposición bajo. Esto conlleva que la cantidad de luz recogida por el sensor de la cámara puede ser reducida, por lo que es necesario un sistema de iluminación adicional sobre la zona de estudio. De esta manera, el montaje para la realización del ensayo se muestra en la Figura 7. Como se observa, las cámaras están enfocando la probeta desde la parte superior. De esta manera, se podrá procesar la zona sometida a tracción y por lo tanto donde la grieta tiende a abrirse. Esto permitirá optimizar el proceso de visualización del efecto de generación y propagación de grieta.

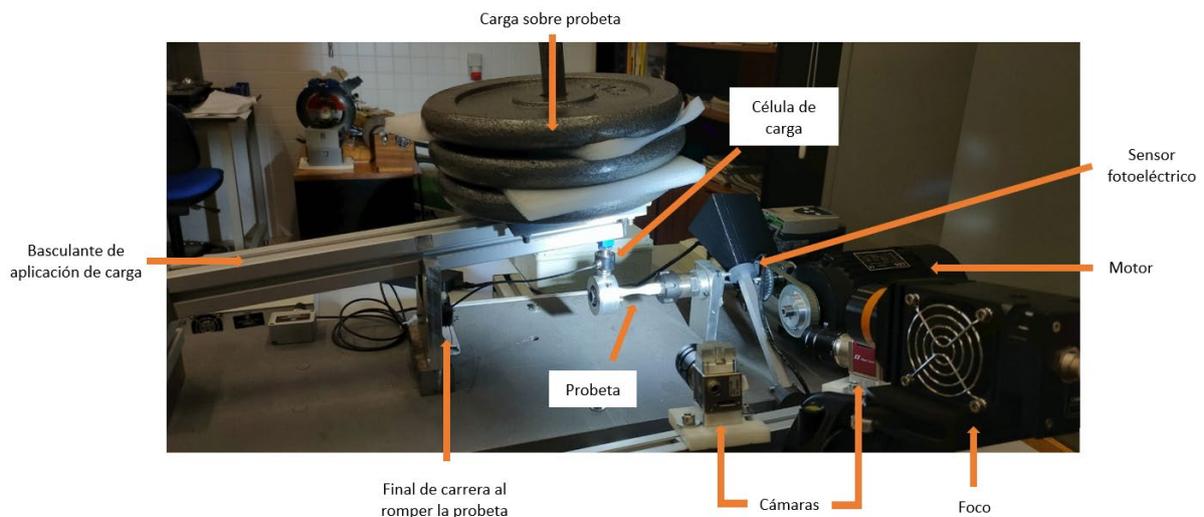


Figura 7: Montaje final ensayo de ensayo de probeta rotatoria.

Una vez que se establece el montaje, se procede a realizar la calibración óptica de las cámaras, que es un paso esencial, pues para poder realizar los cálculos internos del programa que determinan los desplazamientos y la deformación de los puntos estudiados, era necesario que el programa conozca la situación relativa de una cámara con respecto a otra. El proceso de calibración se basa en la captura imágenes de la placa de calibración con un espaciado de 4mm con pequeñas variaciones de su orientación intentando conseguir capturas con giros en los tres ejes (X, Y, Z) como se muestra en la Figura 8.

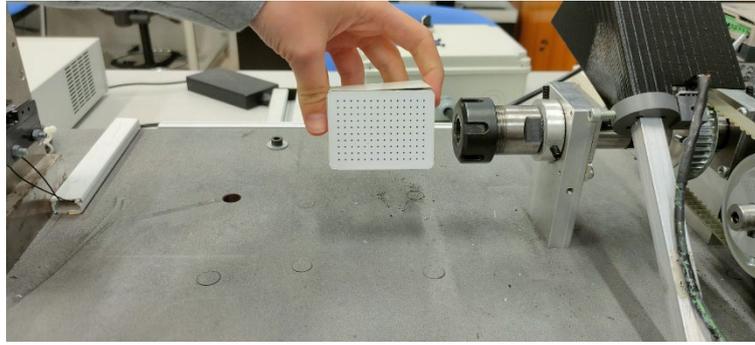


Figura 8: Proceso de calibración óptica.

3.2. Probeta empleada

Para la realización del ensayo a fatiga se ha empleado una probeta tipo reloj de arena tal y como se observa en la Figura 9. Este tipo de probeta se basa en la norma ISO 1143 y han sido realizadas mediante un proceso de torneado a partir de acero F-114, siendo éste adecuado para los fines docentes del trabajo ya que pueden ser realizadas en otras asignaturas del área de ingeniería de fabricación.

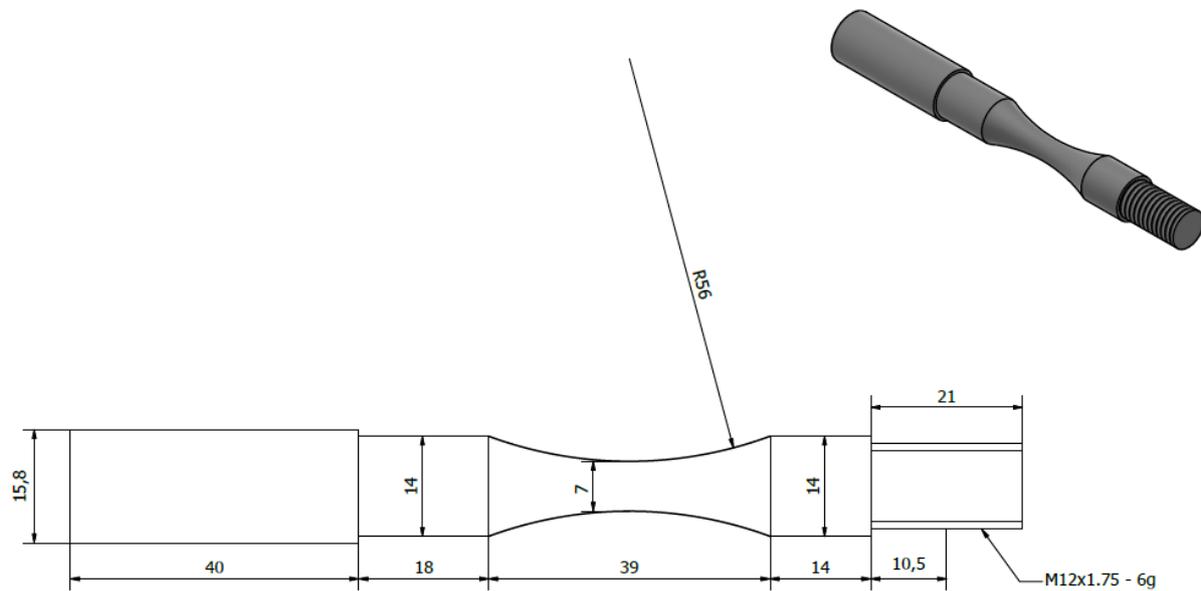


Figura 9: Plano de la probeta empleada para el ensayo.

Como consecuencia de la geometría, el material, las condiciones de ensayo y el acabado superficial específicas de la probeta, se puede determinar el diagrama S-N.

Para calcular el valor superior del diagrama S-N, S_{ut} , se debe multiplicar la resistencia última del acero empleado en la probeta, de 717 MPa para el acero F-114, por un factor de resistencia a fatiga de 0.84. Esto da un valor de $S_{ut} = 602$ MPa.

Por otra parte, para el cálculo de S_e o límite de resistencia a la fatiga se emplea la ecuación (1), donde S_e' es de valor igual a la mitad de la resistencia última del material y los factores k son los llamados factores de Marin, que modifican el límite a fatiga debido a geometrías, acabados superficiales, temperatura y otros factores.

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot S_e' \quad (1)$$

El valor de S_e , suponiendo una superficie mecanizada, una temperatura ambiente de 20 °C y dada la geometría de la probeta, es de 285 MPa.

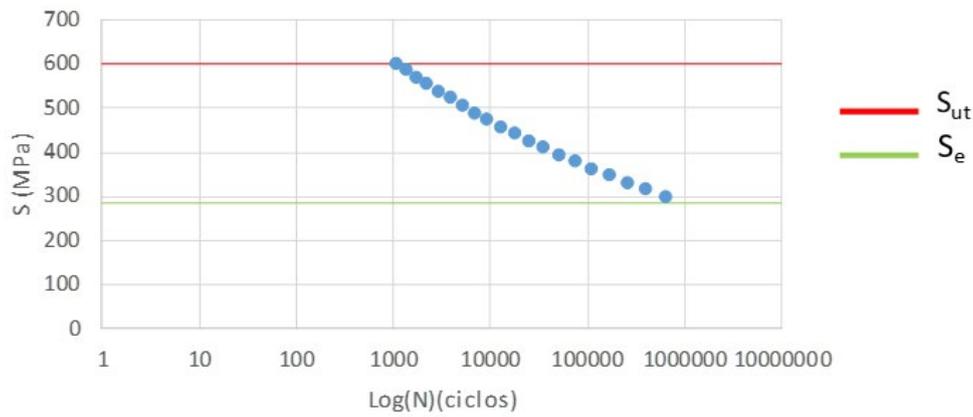


Figura 10: Diagrama S-N para la probeta de ensayo.

4. Resultados y discusión

A continuación, se muestran los resultados obtenidos tras ensayar la probeta reloj de arena. Se hará especial mención a los resultados capaces de obtener con la técnica DIC.

La masa seleccionada para este ensayo fue de 30 kg, que repercute en una carga medida por la célula de 281.7N. Esta carga genera una tensión alternante máxima situada en la zona de menor sección de 368 MPa, lo cual, según el diagrama S-N, conllevarían un total de 94289 ciclos.

DIC 3D permite la medida de forma, desplazamiento y deformación unitaria. La deformación unitaria a lo largo del eje longitudinal será el mejor indicativo para detectar el avance de la grieta que se forma y avanza durante el ensayo. Esto es debido a que, al capturar imágenes lateralmente, en la zona donde la probeta está a tracción, tenderá a abrirse la grieta y aparecerá una deformación positiva. Justo lo contrario ocurrirá en la zona en que la probeta está a compresión. Es por esto por lo que la deformación unitaria es un parámetro muy sensible que destaca la aparición de grietas, pese a que, al ser un valor diferencial del desplazamiento, los campos pueden presentar más ruido que los campos de desplazamiento.

Como se ha comentado, se prevé que la rotura sea en el punto central de la misma, ya que es donde más tensión se genera al ser la zona de menor sección. En la Figura 11 se observa cómo se está formando la grieta en la probeta en un punto de 253920 ciclos. Debido al ángulo de incidencia de las cámaras, se ve únicamente la zona traccionada de la probeta. En la zona inferior de la misma debe aparecer una distribución similar con valores de deformación negativos, a causa del esfuerzo de compresión sufrido.

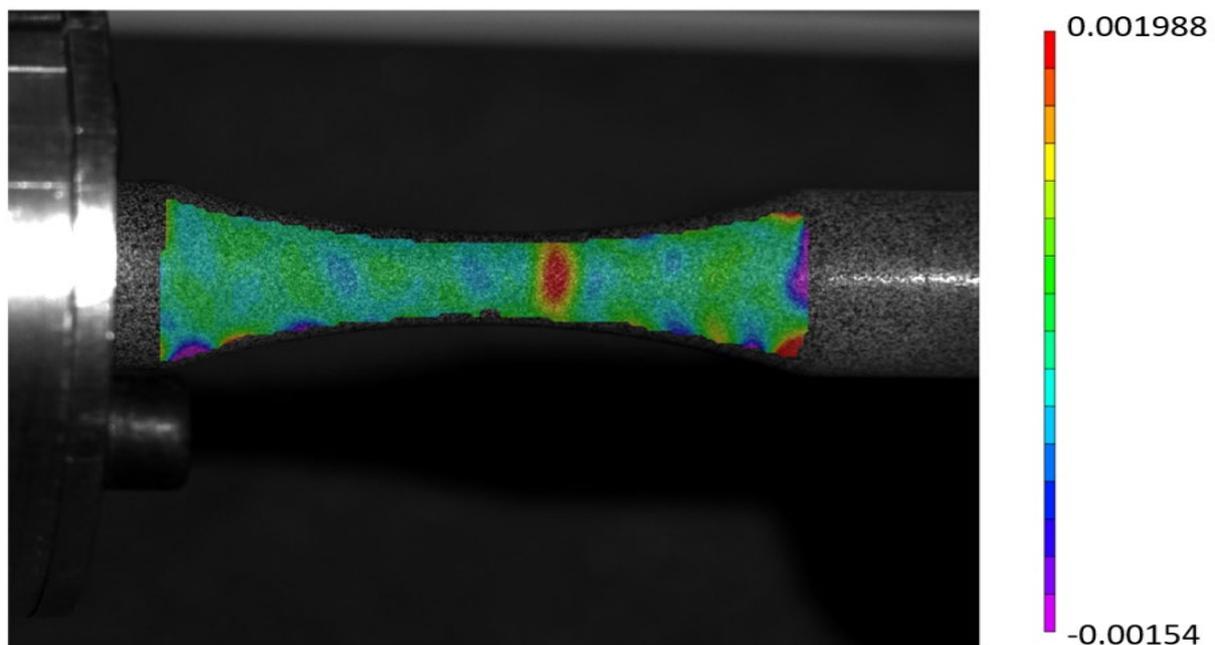


Figura 11: Deformación unitaria a lo largo del eje longitudinal.

Siguiendo con el análisis de la deformación unitaria, se puede obtener la evolución de la deformación en el punto de máxima deformación a lo largo del número de imágenes hasta la rotura, como muestra la Figura 12. Como se puede apreciar, la deformación unitaria permanece prácticamente constante y positiva por estar sometida a tracción durante todo el ensayo hasta que, llegado a un punto, la tendencia cambia y comienza a aumentar momento en que el tamaño de la grieta crece hasta que finalmente alcanza un valor máximo, donde la probeta rompe definitivamente. Se observa también que la rotura estuvo en los 271.000 ciclos cuando el estudio teórico predijo unos 201840 ciclos. Estas diferencias pueden achacarse a la propia incertidumbre del proceso de fatiga o que el acabado superficial no estuviera totalmente definido por los parámetros teóricos. No obstante, es cierto que sería necesario una batería de ensayos más numerosa para realizar unas conclusiones más fundadas sobre las fuentes de discrepancia.

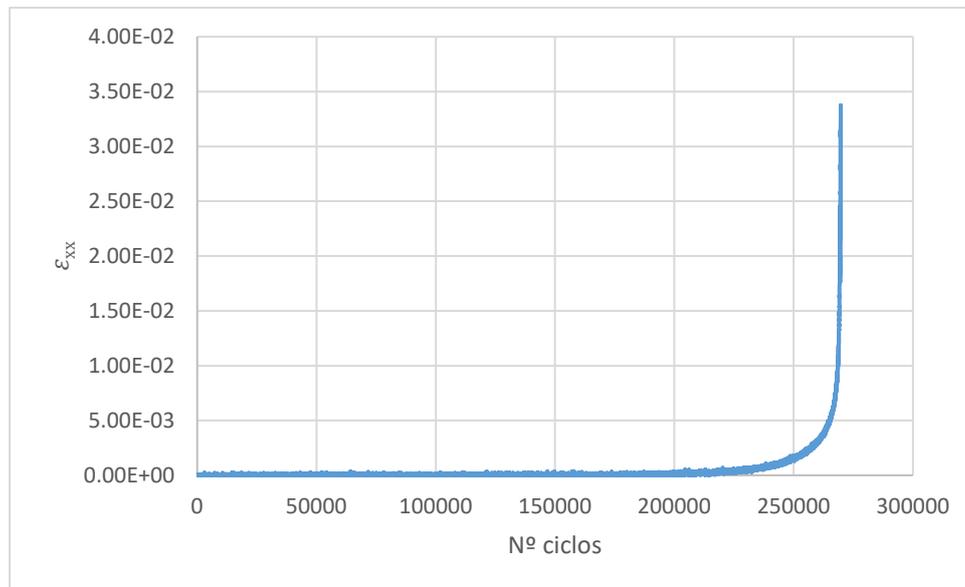


Figura 12: Evolución de la deformación unitaria frente al número de ciclos.

Se puede considerar que la deformación unitaria no representa adecuadamente el evento al estar generándose una grieta, por lo tanto, una vez localizado el punto de generación e la grieta se ha medido la apertura de la misma. Para ello se monitorizó el desplazamiento en el eje longitudinal de dos puntos distintos de la probeta próximos a la grieta, pero uno a cada lado de la misma. La anchura de la grieta se calculó por tanto como la resta del desplazamiento de un punto menos el del otro, para cada imagen capturada. El resultado se muestra en la Figura 13. Se observa una tendencia similar a la deformación unitaria, donde el valor es constante y prácticamente nulo hasta los 200000 ciclos, momento en el que comienza a aumentar la anchura de la grieta exponencialmente hasta su fractura.

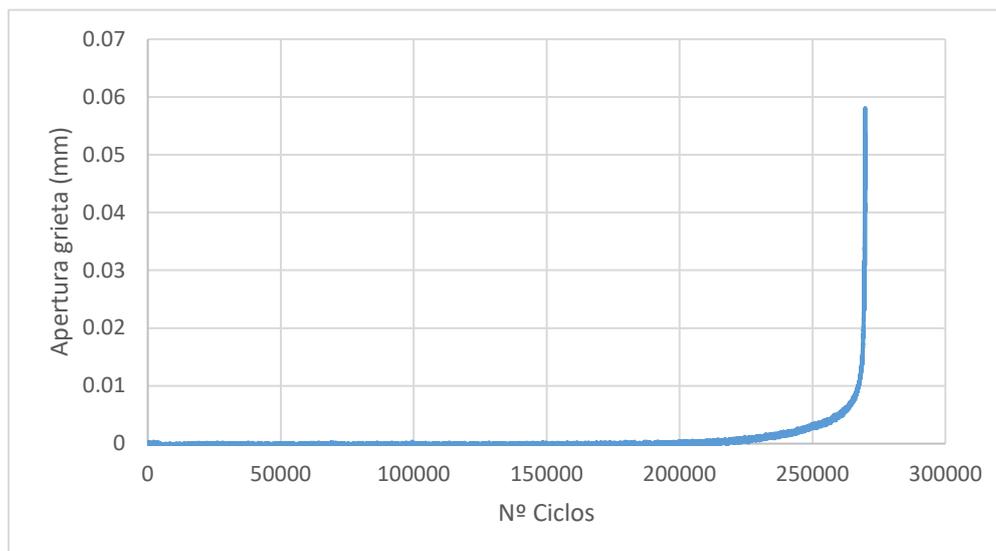


Figura 13: Evolución del ancho de grieta frente al número de ciclos.

Por último, asociado al crecimiento de la grieta, se considera que habrá una reducción de la rigidez y, por lo tanto, un aumento del desplazamiento. Así, en la Figura 14, se representa el desplazamiento de un punto cercano al voladizo de la probeta en función de los ciclos transcurridos. De este modo puede comprobarse cómo al crecer la grieta y acercarse a la fractura, el desplazamiento en el extremo en voladizo de la probeta crece con la misma tendencia que la apertura de la grieta. No obstante, se observa que la pérdida de rigidez no es tan destacable hasta los últimos ciclos antes de la rotura.

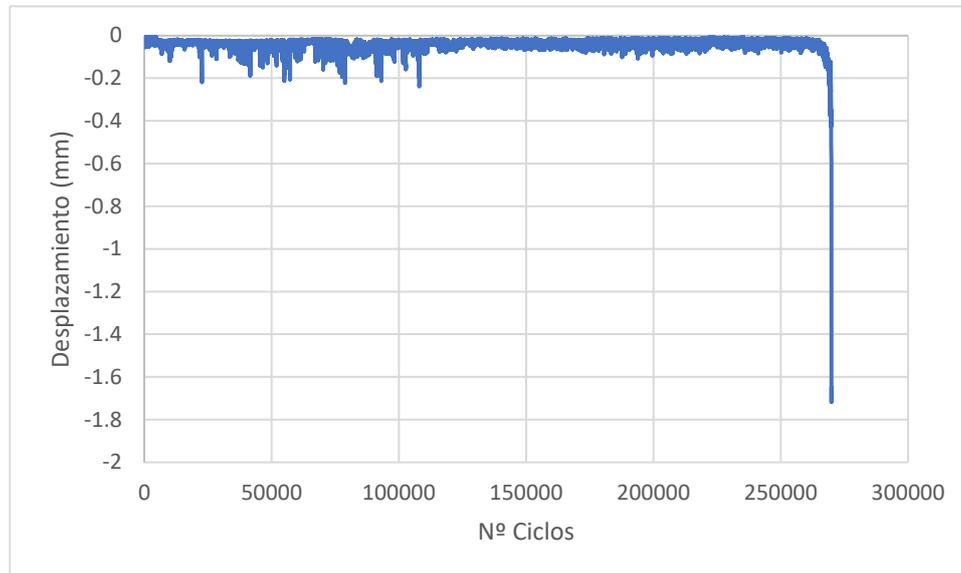


Figura 14: Desplazamiento en el extremo en voladizo en función del número de ciclos.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado un novedoso método para la monitorización del proceso de fatiga en viga rotatoria, haciendo uso de técnicas ópticas en campo completo que permiten observar en la totalidad de la superficie de estudio los desplazamientos y deformaciones sufridos. Además, se ha monitorizado el proceso de apertura y crecimiento de grieta haciendo uso de estos mismos resultados arrojados por el análisis computacional de imágenes.

En concreto, ha podido medirse la apertura de grieta y cómo ésta ha afectado a otros parámetros como el desplazamiento del extremo en voladizo de la probeta o la deformación unitaria cerca del área de la grieta. Se puede apreciar también cómo el crecimiento de la grieta permanece constante e indetectable para la mayor parte del ensayo hasta que se alcanza un determinado número de ciclos de carga, en el que el crecimiento se produce de manera exponencial hasta la rotura de la probeta. Esto pone de manifiesto la necesidad de desarrollar un procedimiento fiable que logre monitorizar con suficiente exactitud el proceso de fatiga de un material, que depende en gran medida de la resolución de los instrumentos para la adquisición de datos. Aun así, los resultados logrados son satisfactorios, obteniendo una adecuada cantidad de datos para caracterizarlo.

De esta manera, este trabajo ha establecido una herramienta novedosa que permite la obtención de resultados precisos y detallados en el ámbito de la fatiga de materiales, que puede servir para futuras líneas de investigación o incluso para la aplicación industrial a la hora de predecir la vida útil de componentes clave o realizar controles durante su uso. De este modo, al realizar sucesivos ensayos y recopilar suficientes datos, se pretende hallar discrepancias entre los resultados teóricos y los obtenidos experimentalmente.

6. Agradecimientos

Trabajo realizado gracias al Proyecto PID2022-141618OA-I00 INTEGROPTICS financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER, UE.

7. Referencias

- [1] LEE, Y.L., PAN, J., HATHAWAY, R.B. y BARKEY, M.E., 2004. *Fatigue testing and analysis: Theory and practice*. S.l.: s.n. ISBN 9780750677196.

- [2] Budynas, Richard G y Keith Nisbett, J. Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. 8º ed. Mc Graw Hill. 2017
- [3] RASTOGI, V. y KUMAR, C., 2009. A brief review on dynamics of a cracked rotor. *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2009, ISSN 1023621X. DOI 10.1155/2009/758108.
- [4] UNIVERSIDAD DE BURGOS, 2016. La fatiga de los materiales-Concepto-Grupo GIE. Recurso online. Publicado el 4 de noviembre de 2016 [consulta: Mayo de 2019].
- [5] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2021. ISO 1143:2021 Metallic materials — Rotating bar bending fatigue testing., vol. 2021
- [6] CARPINTERI, A., BRIGHENTI, R. y SPAGNOLI, A., 2000. Fatigue growth simulation of part-through flaws in thick-walled pipes under rotary bending. *International Journal of Fatigue*, vol. 22, no. 1, ISSN 01421123. DOI 10.1016/S0142-1123(99)00115-2.
- [7] DE FREITAS, M. y FRANÇOIS, D., 1995. Analysis of Fatigue Crack Growth in Rotary lknBend Specimens and Railway Axles. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 18, no. 2, ISSN 14602695. DOI 10.1111/j.1460-2695.1995.tb00152.x.
- [8] Sutton, Michael A., Orteu, Jean Jose, Schreier, Hubert; Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Springer, Nueva York, 2009.
- [9] NIEZRECKI, C., BAQERSAD, J. y SABATO, A., 2018. *Digital Image Correlation Techniques for NDE and SHM*. S.l.: s.n. ISBN 9783319300504.
- [10] ANNAMDAS, V.G.M., CHEW, Y., PANG, J.H.L., HOH, H.J., ZHOU, K. y SONG, B., 2014. Fatigue growth analysis of pre induced surface defects using piezoelectric wafer based impedance method and digital image correlation system. *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 33, no. 3, ISSN 15734862. DOI 10.1007/s10921-014-0237-9.
- [11] DÍAZ, F.A., VASCO-OLMO, J.M., LÓPEZ-ALBA, E., FELIPE-SESÉ, L., MOLINA-VIEDMA, A.J. y NOWELL, D., 2020. Experimental evaluation of effective stress intensity factor using thermoelastic stress analysis and digital image correlation. *International Journal of Fatigue*, vol. 135, no. November 2019, ISSN 01421123. DOI 10.1016/j.ijfatigue.2020.105567.
- [12] VASCO-OLMO, J.M., DÍAZ, F.A., GARCÍA-COLLADO, A. y DORADO-VICENTE, R., 2015. Experimental evaluation of crack shielding during fatigue crack growth using digital image correlation. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. S.l.: s.n., pp. 223-237. vol. 38. DOI 10.1111/ffe.12136.
- [13] Avilés, Rafael ; Análisis de fatiga en máquinas, Ediciones Paraninfo, (2005)
- [14] Sutton, Michael A. et al. "The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements". *Optics and Lasers in Engineering*. Volume 46, Issue 10, October 2008.
- [15] B. Pan et al. Two-dimensional image correlation for inplane displacement and strain measurement: a review. *Measurement Science Technology*, Vol. 20 Núm. 6, 2009