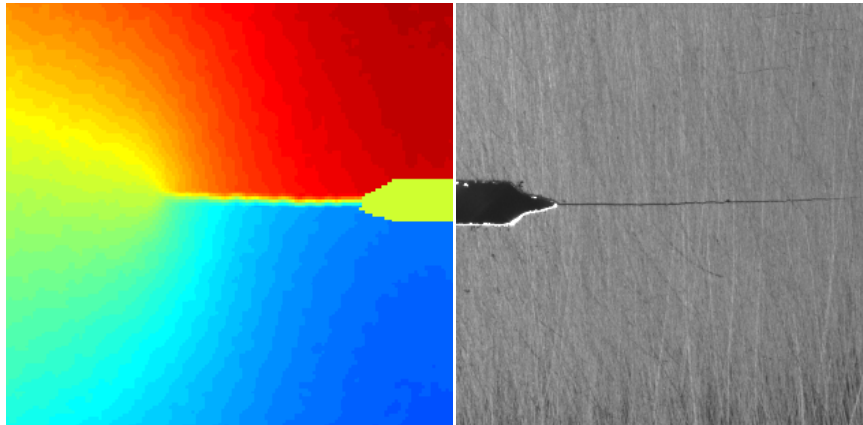




Universidad de Jaén  
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera



# **Práctica 2**

## **Medida experimental de concentradores de tensiones mediante la técnica de DIC-2D**

**Diseño de Máquinas**  
**Grado en Ingeniería Mecánica**

## **Práctica 2. Medida experimental de concentradores de tensiones mediante la técnica de DIC-2D**

**Objetivo:** La segunda sesión de prácticas de laboratorio tiene como objetivo introducir al alumno en la medida experimental en concentradores de tensiones empleando la técnica de campo completo de correlación digital de imágenes (DIC – digital image correlation).

**Resumen:** La práctica consistirá en la realización de un ensayo consistente en la aplicación de distintos niveles de carga sobre una probeta rectangular de policarbonato con un taladro en su parte central. Así, para cada nivel de carga se capturará una imagen, de tal forma que se obtendrán los mapas de desplazamientos y deformaciones en las inmediaciones de la zona del taladro mediante el procesamiento digital de las imágenes empleando DIC. De esta forma, se pretende determinar la distribución experimental de las tensiones y comparar estos resultados con los obtenidos analíticamente a partir del empleo del factor teórico de concentración de tensiones.

### **Descripción de la práctica**

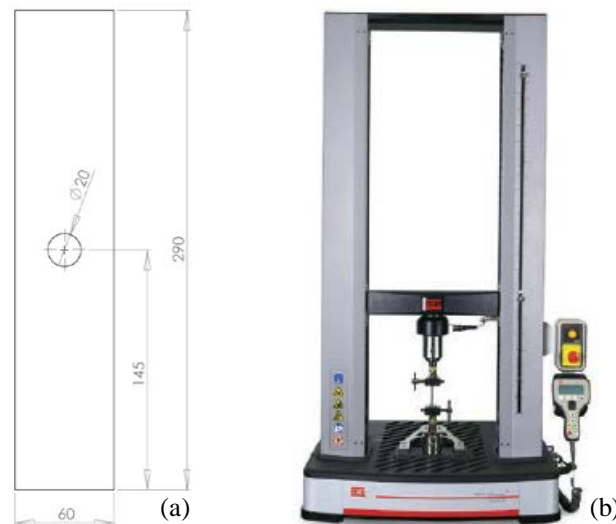
En esta sección se describen las consideraciones oportunas para la correcta realización de la práctica.

### ***Geometría de la probeta***

Las dimensiones de la probeta empleada para la realización de la práctica se muestran en la figura 1a. La probeta está fabricada a partir de una lámina de policarbonato de 4 mm de espesor.

### ***Equipos empleados y realización del ensayo***

La máquina empleada para la realización del ensayo se trata una máquina electromecánica MTS Criterion [1] (modelo 43) con una capacidad de carga de 10 kN (figura 1b). El ensayo consiste en la aplicación de distintos niveles de carga, capturando una imagen para estado de carga. De esta forma, se dispondrá de una secuencia de imágenes a partir de la cual se pueden obtener los campos de desplazamientos y deformaciones a partir de su procesamiento para los distintos niveles de carga. Para el procesamiento de imágenes se empleará el software comercial Vic-2D de la empresa Correlated Solutions [2].



**Figura 1.** Dimensiones de la probeta empleada para la realización del ensayo mediante DIC (a) y máquina electromecánica empleada para la realización del ensayo (b)

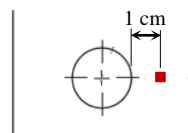
### Referencias

- [1] [https://www.mts.com/ucm/groups/public/documents/library/mts\\_006225.pdf](https://www.mts.com/ucm/groups/public/documents/library/mts_006225.pdf)
- [2] <http://www.correlatedsolutions.com/vic-2d/>

### Memoria a entregar

En la memoria a entregar se han de realizar las siguientes tareas:

1. Calcular las distribuciones de tensiones ( $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ , y  $\tau_{xy}$ ) a partir de los mapas de deformaciones ( $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$ , y  $\epsilon_{xy}$ ).
2. Trazar los perfiles horizontal y vertical de las tensiones a lo largo del taladro.
3. Identificar sobre la imagen el punto en el que las tensiones adquieren su valor máximo. Calcular las tensiones y direcciones principales correspondientes a dicho estado tensional.
4. Calcular las tensiones y direcciones principales para el estado de tensiones situado 1 cm a la derecha del borde del taladro:



5. Calcular el factor de concentración de tensiones obtenido a partir de los datos experimentales y compararlo con el factor obtenido de forma teórica. Además, se pide determinar el valor máximo para la tensión de forma analítica y compararlo con el valor obtenido a partir de los mapas experimentales.

6. Calcular los mapas de deformaciones diferenciando los mapas de desplazamientos obtenidos mediante DIC. Para ello, se ha de implementar en Matlab el siguiente tensor de deformaciones:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)\end{aligned}\tag{1}$$

Comparar estos mapas calculados con los aportados por el software.

Se valorará positivamente la discusión de los resultados obtenidos a partir del análisis de los puntos anteriores. Asimismo, se valorará positivamente el trabajo autónomo que el alumno considere oportuno para la correcta elaboración del informe o la memoria de la práctica. Por último, se recomienda añadir una sección donde se recojan las conclusiones alcanzadas y/o valoración personal acerca de la práctica planificada.

Para la entrega de la práctica se dispondrá de un enlace de entrega de ejercicios para poder subir el archivo. Dicho enlace se encontrará habilitado dos semanas después de que los datos de la realización de la práctica estén disponibles.

### Anexo: Introducción a la técnica de correlación digital de imágenes

La correlación digital de imágenes (DIC) es una técnica óptica de campo completo que se emplea para la medida de desplazamientos y deformaciones en elementos mecánicos. DIC trabaja analizando una secuencia de imágenes digitales de un modelo o una probeta desde un estado inicial (indeformada) hasta un estado final (deformada). Los campos de desplazamientos y deformaciones pueden determinarse de forma directa en 2D y 3D, en función de si estos campos se encuentran en el plano o fuera del mismo respectivamente.

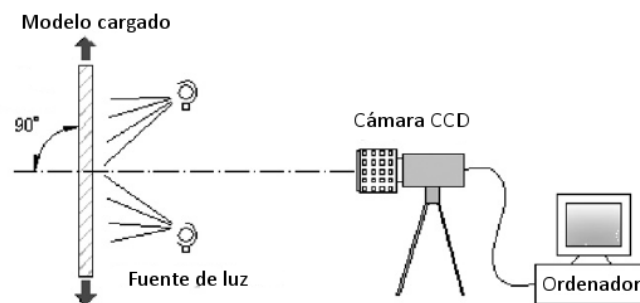
En general, la implementación de la técnica de DIC-2D comprende los tres pasos que se indican a continuación:

- 1- Preparación del modelo y del equipo.
- 2- Captura de las imágenes.
- 3- Procesado de las imágenes capturadas.

A continuación se desarrolla cada uno de estos pasos.

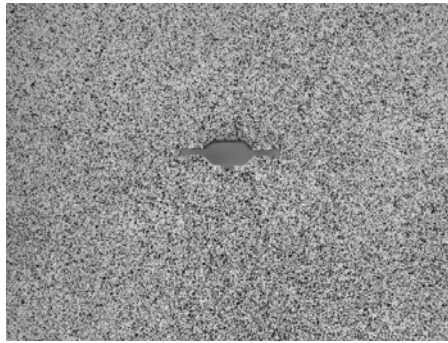
#### 1. Preparación del modelo y equipo

En la figura 2 se muestra el esquema del montaje experimental que se emplea normalmente en la técnica de DIC.



**Figura 2.** Montaje experimental típico empleado para la implementación de DIC

La superficie del modelo ha de tener una distribución de intensidad de grises, la cual se obtiene a través de la aplicación aleatoria de puntos negros sobre fondo blanco (speckle) sobre la superficie del modelo (figura 3). Por otro lado, la cámara ha de disponerse con su eje perpendicular a la superficie del modelo.



**Figura 3.** Speckle aleatorio aplicado sobre la superficie del modelo analizado

## 2. Captura de una secuencia de imágenes

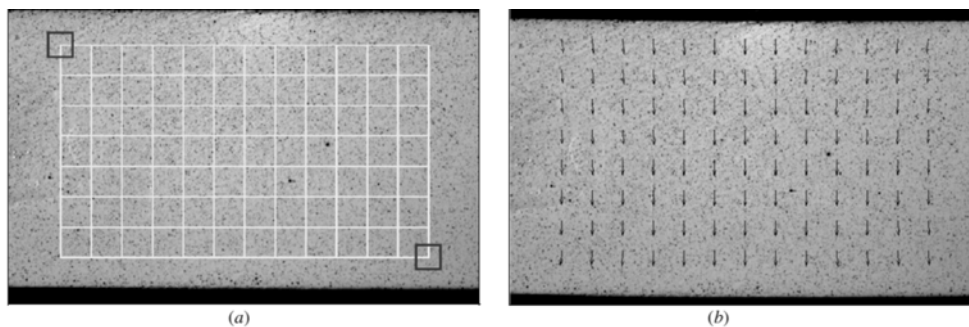
Una vez preparado el modelo y montado el equipo, se lleva a cabo la captura de una secuencia de imágenes, donde cada imagen corresponde a cada valor de carga aplicado, desde un estado inicial o de referencia (indeformado) hasta un estado final (deformado).

## 3. Procesamiento de las imágenes

Tras la captura de las imágenes, mediante técnicas de procesamiento de imagen, se calcula el desplazamiento de cada uno de los puntos presentes en la superficie del modelo, comparando la imagen a estudiar con la imagen anterior correspondiente a la secuencia.

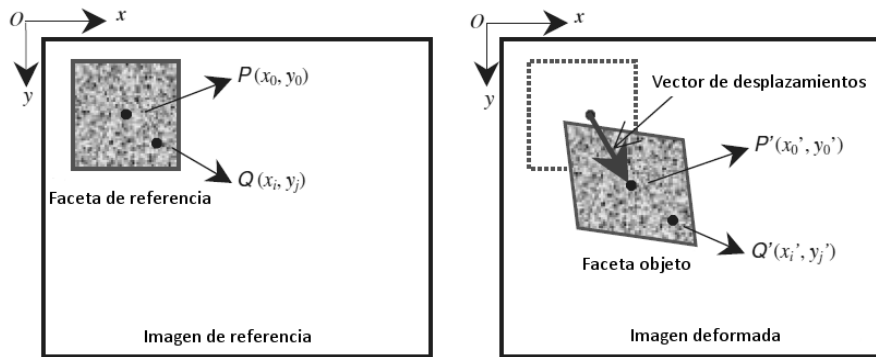
### 3.1. Principios básicos

Para la implementación de la técnica de DIC, en primer lugar, el área de cálculo (región de interés) en la imagen de referencia es especificada o definida, la cual se divide uniformemente en una malla virtual (figura 4a), denominándose a cada región establecida (normalmente cuadrada) faceta. Sobre cada una de las facetas se calculará el valor medio existente de la intensidad y se buscará la misma faceta en la imagen deformada. Los desplazamientos en cada punto de la malla virtual son calculados para obtener el campo completo de desplazamientos (figura 4b).



**Figura 4.** a) Rejilla del área de interés en la imagen de referencia, b) vector de desplazamientos de la imagen deformada

El principio básico de DIC es el seguimiento o rastreo de los mismos puntos entre las dos imágenes capturadas antes y después de la deformación (figura 5). Para calcular los desplazamientos de un punto  $P$ , se elige una faceta de referencia cuadrada de  $(2M + 1) \times (2M + 1)$  píxeles centrada en el punto  $P(x_0, y_0)$  de la imagen de referencia y que será seguida en la imagen deformada. Para evaluar el grado de similitud entre la faceta de referencia y la deformada, es necesario predefinir un criterio de correlación [correlación cruzada (CC) o un criterio de correlación de suma de diferencias cuadradas (SSD)]. Así, la diferencia entre la posición del centro de la faceta de referencia y la posición del centro de la faceta deformada establece el vector de desplazamientos del punto  $P$ , como se muestra en la figura 5.



**Figura 6.** Esquema de la faceta de referencia antes y después de la deformación

### 3.2. Función de forma/función de asignación del desplazamiento

Es razonable asumir que la forma de la faceta de referencia cambie con respecto a la de la imagen deformada. Sin embargo, con base a la suposición de continuidad de la deformación de un objeto sólido deformado, un conjunto de puntos vecinos en la faceta de referencia permanecen como vecinos en la faceta objeto. Así, como se muestra en la figura 6, las coordenadas del punto  $Q(x_i, y_i)$  alrededor del centro de la faceta de referencia pueden ser asignadas al punto  $Q'(x_i', y_i')$  en la faceta objeto de acuerdo con la denominada función de forma o función de asignación del desplazamiento:

$$\left. \begin{aligned} x_i' &= x_i + \varepsilon(x_i, y_j) \\ y_j' &= y_j + \eta(x_i, y_j) \end{aligned} \right\} (i, j = -M : M) \quad (1)$$

Si sólo existe la traslación de sólido rígido entre la faceta de referencia y la deformada, en otras palabras, los desplazamientos de cada punto en la faceta son los mismos, entonces una función de forma de orden cero puede ser empleada:

$$\begin{aligned}\varepsilon_0(x_i, y_j) &= u \\ \eta_0(x_i, y_j) &= v\end{aligned}\quad (2)$$

Obviamente, la función de forma de orden cero no es suficiente para describir el cambio de forma de la faceta deformada. Así, la función de forma de primer orden que permite la traslación, rotación, deformaciones tangenciales, normales y sus combinaciones de la faceta es más comúnmente utilizada:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1(x_i, y_j) &= u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \\ \eta_1(x_i, y_j) &= v + v_x \Delta x + v_y \Delta y\end{aligned}\quad (3)$$

Además de esto, la función de forma de segundo orden puede ser utilizada para describir estados de deformación más complicados de la faceta deformada:

$$\begin{aligned}\varepsilon_2(x_i, y_j) &= u + u_x \Delta x + u_y \Delta y + \frac{1}{2} u_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} u_{yy} \Delta y^2 + u_{xy} \Delta x \Delta y \\ \eta_2(x_i, y_j) &= v + v_x \Delta x + v_y \Delta y + \frac{1}{2} v_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} v_{yy} \Delta y^2 + v_{xy} \Delta x \Delta y\end{aligned}\quad (4)$$

En las ecuaciones (2) – (4),  $\Delta x = x_i - x_0$ ,  $\Delta y = y_i - y_0$ ;  $u$  y  $v$  son las componentes del desplazamiento en las direcciones  $x$  e  $y$  del centro de la faceta de referencia  $[P(x_0, y_0)]$ ;  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $v_x$  y  $v_y$  son los gradientes del desplazamiento de primer orden de la faceta de referencia; y  $u_{xx}$ ,  $u_{xy}$ ,  $u_{yy}$ ,  $v_{xx}$ ,  $v_{xy}$  y  $v_{yy}$  son los gradientes del desplazamiento de segundo orden de la faceta de referencia.

### 3.3. Criterio de correlación

Como se mencionó con anterioridad, para evaluar el grado de similitud entre las facetas de referencia y deformada, un criterio de correlación debe ser definido antes del análisis de correlación. Aunque existen distintas definiciones de criterios de correlación, estos criterios pueden ser divididos en dos grupos: un grupo integra los criterios de correlación cruzada (CC) y el otro grupo los criterios de correlación de suma de diferencias cuadradas (SSD). Estos criterios se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 1.** Criterios de correlación más empleados

Criterios de correlación cruzada	Definición
Criterio de correlación cruzada (CC)	$C_{CC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_j) g(x'_i, y'_j)$
Criterio de correlación cruzada normalizada (NCC)	$C_{NCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \frac{f(x_i, y_j) g(x'_i, y'_j)}{\bar{f} \bar{g}}$
Criterio de correlación cruzada normalizada cero (ZNCC)	$C_{ZNCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \frac{[f(x_i, y_j) - f_m][g(x'_i, y'_j) - g_m]}{\Delta f \Delta g}$



Criterios de suma de diferencias cuadradas	Definición
Suma de diferencias cuadradas (SSC)	$C_{SSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - g(x'_i, y'_j)]^2$
Suma normalizada de diferencias cuadradas (NSSD)	$C_{NSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[ \frac{f(x_i, y_j)}{\bar{f}} - \frac{g(x'_i, y'_j)}{\bar{g}} \right]^2$
Suma normalizada cero de diferencias cuadradas (ZNSSD)	$C_{ZNSSD} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left[ \frac{f(x_i, y_j) - f_m}{\Delta f} - \frac{g(x'_i, y'_j) - g_m}{\Delta g} \right]^2$

Donde:  $f(x_i, y_j)$  y  $g(x'_i, y'_j)$  son la intensidad de la luz en escala de grises existente en la faceta de referencia y en la faceta deformada respectivamente

$$f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_j) \quad (5)$$

$$g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M g(x'_i, y'_j) \quad (6)$$

$$\bar{f} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_j)^2} \quad (7)$$

$$\bar{g} = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M g(x'_i, y'_j)^2} \quad (8)$$

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - f_m]^2} \quad (9)$$

$$\Delta g = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x'_i, y'_j) - g_m]^2} \quad (10)$$

Los subíndices  $i$  y  $j$  hacen referencia a la fila y columna de cada uno de los píxeles presentes en las facetas en que se ha dividido el área de interés. De tal forma que el criterio de correlación empleado se aplicará a cada una de las facetas.