

Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

TRABAJO FIN DE MÁSTER

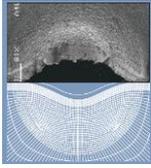
Título de trabajo: Potencialidad de las técnicas de correlación de imágenes en el análisis de la integridad de elementos estructurales

Tutor académico: Cristina Rodríguez González

Departamento: Departamento de construcción e Ingeniería de Fabricación.

Universidad de Oviedo

JULIO 2016



Máster interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Título de trabajo: Potencialidad de las técnicas de correlación de imágenes en el análisis de la integridad de elementos estructurales

Alumno: ISMAEL GARCÍA GARCÍA

Tutor académico: CRISTINA RODRÍGUEZ GONZÁLEZ

Universidad de Oviedo

JULIO 2016

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	6
2	LA CORRELACIÓN DE IMÁGENES DIGITALES	7
2.1	Introducción	7
2.2	Historia	8
3	LA CORRELACIÓN DE IMÁGENES EN LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES....	9
3.1	Procedimiento experimental	11
3.1.1	Obtención de las probetas	11
3.1.2	Ejecución del ensayo	12
3.1.3	Análisis de resultados.....	12
3.2	Conclusiones.....	17
4	LA CORRELACIÓN DE IMÁGENES EN LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIAL BIOLÓGICO (TENDONES)	19
4.1.1	Procedimiento experimental.....	20
4.1.2	Conclusiones.....	26
5	LA CORRELACIÓN DE IMÁGENES EN LA EVALUACIÓN DE LOS CONCENTRADORES DE TENSIÓN	27
5.1	Concentración de tensión en uniones soldadas.....	28
5.1.1	Procedimiento experimental.....	28
5.1.2	Análisis de resultados.....	30
6	CONCLUSIONES	34
7	PRESUPUESTO	35
7.1	Coste de materiales y material fungible	35
7.2	Coste de ensayos realizados durante el proyecto	35
7.3	Horas de ingeniería	35
	REFERENCIAS.....	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Patrón de calibración (izquierda) y detalle de sus características (derecha)	7
Figura 2. Diferentes lentes utilizadas en el equipo GOM ARAMIS.....	8
Figura 3. Disposición del ensayo.	10
Figura 4. Geometría de la probeta de tracción utilizada en el ensayo.	12
Figura 5. Diferentes instantes durante el ensayo estado inicial con la probeta moteada (izquierda), comienzo de la estricción con malla de deformación superpuesta (centro) y detalle del inicio de la rotura (derecha).....	13
Figura 6. Deformaciones en el modelo tridimensional en la zona de estricción	13
Figura 7. Curvas tensión-deformación ingenieril y verdadera	14
Figura 8. Curva real considerando dos procesos de cálculo diferentes.....	15
Figura 9. Estimación del espesor para cada valor de fuerza	16
Figura 10. Curvas tensión-deformación ingenieril, verdadera y real (experimental).....	16
Figura 11. Para un valor de carga aplicada de 15kN (izquierda), valor de las deformaciones (centro) que se producen a lo largo de los puntos contenidos de una sección longitudinal en la probeta (derecha)	17
Figura 12. Para un valor de carga aplicada de 12,5kN (izquierda), valor de las deformaciones (centro) que se producen a lo largo de los puntos contenidos de una sección longitudinal en la probeta (derecha)	18
Figura 13. Medición de ancho con lente de 1 x	20
Figura 14. Equipos utilizados en el desarrollo experimental.	21
Figura 15. Colocación del material sobre el utillaje de ensayo.....	22
Figura 16. Zona visible al inicio del ensayo (izquierda) y malla de cálculo durante el transcurso del ensayo (derecha).....	22
Figura 17. Curva tensión deformación para los tres puntos de medida obtenida a través de la DIC	23
Figura 18. Curva tensión deformación para los tres puntos de medida obtenida con desplazamientos máquina	24
Figura 19 Dimensiones de la muestra número 2	24
Figura 20. Curva tensión-deformación ingenieril obtenida tras la aplicación de la técnica DIC.	25
Figura 21. Curva tensión-deformación ingenieril obtenida con valores máquina.....	26
Figura 22. Distribución de las líneas de fuerza en una singularidad (izquierda) y efecto de la singularidad en las tensiones locales (derecha).....	27
Figura 23. Transmisión de esfuerzos en uniones a tope (izquierda) y en uniones en ángulo (derecha)	28
Figura 24. Geometría de las probetas utilizadas.....	29
Figura 25. Geometría de las probetas utilizadas en el estudio antes de cortar (izquierda) y después de cortar: probetas MIG (centro) y TIG (derecha)	29
Figura 26. Máquina de ensayo MTS 810	30
Figura 27. Campos de deformación en la superficie medida: a) y b) unión tipo MIG y c) y d) unión tipo TIG.....	31
Figura 28. Relación entre la tensión nominal aplicada y la real en la zona del pie de la soldadura para las probetas MIG (izquierda) y TIG (derecha).	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tensión de rotura obtenida utilizando diferentes curvas	16
Tabla 2. Ángulo que forma el metal de aporte y el metal base en la zona del primer cordón de soldadura.....	32
Tabla 3. Coste de materiales y material fungible.....	35
Tabla 4. Coste de ensayos	35
Tabla 5. Horas de ingeniería.....	36
Tabla 6. Resumen del presupuesto	37

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el uso de materiales con propiedades mecánicas cada vez mejores se ha incrementado considerablemente [1]. Este hecho, ha permitido mayor libertad a la hora de diseñar estructuras con una complejidad superior.

En general, la integridad estructural en este tipo de estructuras viene determinada por la capacidad que tienen sus puntos críticos para mantener sus características originales a lo largo del tiempo y bajo las condiciones de operación normales establecidas por el diseño.

Estos puntos críticos, generalmente se sitúan en las uniones entre los elementos que componen el elemento estructural, por lo que el conocimiento del comportamiento de estos elementos resulta de gran transcendencia para el proyectista.

Para estudiar este comportamiento, el proyectista generalmente recurre a cálculos numéricos (utilizando programas de elementos finitos) para lo cual necesita ciertos parámetros (módulo de Elasticidad, coeficiente de Poisson, etc.) que deben ser determinados experimentalmente.

En experimentación, la incorporación de técnicas novedosas en la medida de deformaciones, ha permitido obtener información valiosa para estudiar las propiedades y mejorar la comprensión sobre el comportamiento mecánico real de materiales y componentes.

Una de estas técnicas novedosas es la Correlación De Imágenes digitales (DIC, por sus siglas en inglés), cuya aplicación permite la medición de deformaciones en la superficie de la muestra en tres dimensiones, sin contacto y de forma independiente al material sujeto a ensayo.

En este trabajo, se pretende poner de manifiesto, mediante una serie de ejemplos prácticos, la potencialidad de la técnica de DIC en la evaluación de la integridad estructural, desde un punto de vista que engloba desde la caracterización mecánica hasta el análisis de la integridad en componentes reales.

De esta forma, primeramente se pondrá de manifiesto las ventajas que ofrece la técnica DIC en la caracterización mecánica de materiales. Posteriormente y debido al auge experimentado en los últimos años, se pondrá de manifiesto la aplicabilidad de la técnica en la caracterización mecánica de material biológico. Finalmente, se comentarán la potencialidad de uso en la evaluación de los concentradores de tensión.

2 LA CORRELACIÓN DE IMÁGENES DIGITALES

2.1 Introducción

La Correlación Digital de Imágenes (DIC, por sus siglas en inglés) es una técnica óptica de campo completo que se basa en la toma de imágenes a una muestra previamente pintada con un patrón. Los cambios de posición que experimenta este patrón permiten la medición de desplazamientos y deformaciones mediante la comparación entre la forma inicial o de referencia (sin deformar) y su forma final (deformado).

Para llevar a cabo una medición, generalmente es necesario llevar a cabo un moteado aleatorio en negro sobre un fondo blanco, ambos aplicados mediante la utilización de pintura acrílica mate. El objetivo de este pintado, es conseguir ciertas marcas o “referencias” con el mejor contraste entre sí en las superficies evaluadas, de tal forma que el equipo sea capaz de identificarlas para llevar a cabo la correlación de imágenes.

Esta correlación se lleva a cabo dividiendo la probeta en cuadrados virtuales, denominados facetas, en los cuales se calcula el valor medio de la escala de grises. Con este valor, se busca en la imagen deformada una región o faceta que cumpla con el mismo criterio, pudiendo determinar, mediante un criterio de correlación, el vector de desplazamientos en cada conjunto de facetas procesadas.

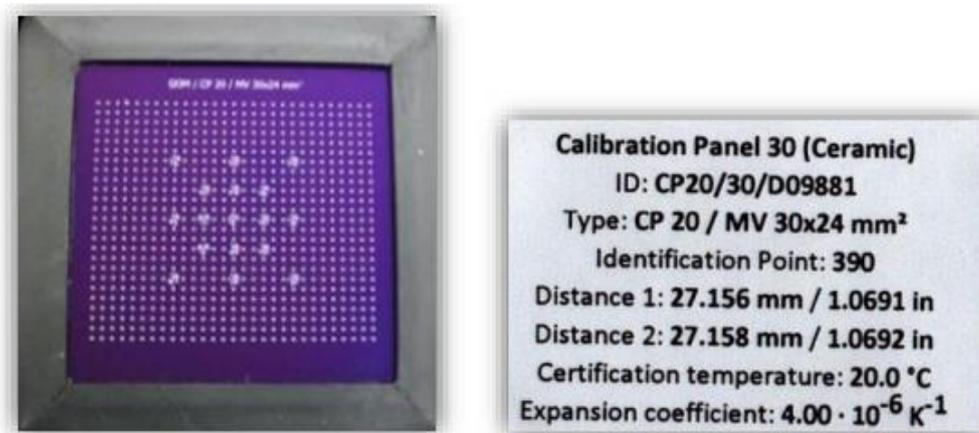


Figura 1. Patrón de calibración (izquierda) y detalle de sus características (derecha)

Previamente al ensayo, debe realizarse un proceso de calibración que consiste en la toma una serie de fotografías a un patrón calibrado (Figura 1) en diferentes posiciones y ángulos con el fin de eliminar errores en la colocación de las cámaras. El proceso de calibración es relativamente sencillo, pero requiere un tiempo de aproximadamente veinte minutos.

Por otro lado, en función de las dimensiones del objeto a medir, serán necesarias unas lentes que deberán elegirse en función de cada uno de las necesidades de cada ensayo. Para las mediciones realizadas en este trabajo, se utilizan las lentes de 50 mm de distancia focal (Figura 2).



Figura 2. Diferentes lentes utilizadas en el equipo GOM ARAMIS

Debido a su simplicidad, y a que por su principio de funcionamiento es una técnica que no requiere contacto, en los últimos años el uso de la técnica de Correlación Digital de Imágenes se ha incrementado sustancialmente, especialmente para el estudio del comportamiento de multitud de problemas en el campo de la mecánica experimental.

2.2 Historia

Algunos de los primeros trabajos en el área de la correlación de imágenes se llevaron a cabo a principios del 1950 por Gilbert Hobrough (1919-2002), quien comparó fotografías análogas obtenidas desde diferentes puntos de vista para registrar las similitudes existentes entre ambas [2]. En 1961, Hobrough diseñó y construyó un instrumento para correlacionar fotografías de alta resolución, siendo así uno de los primeros investigadores en intentar una forma de correlación digital de la imagen para extraer información a partir de la comparación de imágenes.

No obstante, fueron los investigadores de inteligencia artificial y robótica los primeros en comenzar a desarrollar algoritmos basados en la visión y metodologías de visión en estéreo, en paralelo con las aplicaciones de fotogrametría aérea para fotografías. Como señaló Rosenfeld [3], las áreas de énfasis principales de investigación durante los primeros años de procesamiento de imágenes digitales fueron (a) de reconocimiento de caracteres, (b) la microscopía, (c) la medicina y la radiología y (d) fotogrametría / fotografía aérea, con aplicaciones de ingeniería poco frecuentes.

Enseguida fueron patentes las dificultades encontradas durante el posprocesado de los datos de medición registrados fotográficamente, por lo que a continuación se desarrollan (a) métodos para la grabación digital de imágenes que contienen los datos de medición, (b) algoritmos para analizar las imágenes digitales y extraer los datos de medición y (c) diferentes enfoques para la automatización de todo el proceso.

Si bien ya se habían empezado a desarrollar con anterioridad, las mediciones en 3D no habían incrementado su importancia hasta finales de 1996, momento en el que se puso de manifiesto la necesidad de que en las deformaciones medidas en 2D se produjeran en el plano, sin movimientos en la dirección normal al plano, pues de no ser así, movimientos relativamente pequeños fuera del plano, generaban grandes errores en las deformaciones.

3 LA CORRELACIÓN DE IMÁGENES EN LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES

Para llevar a cabo la caracterización mecánica de materiales, es habitual recurrir al ensayo de tracción. El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta normalizada a un esfuerzo uniaxial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la misma. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente, por lo que las velocidades de deformación en un ensayo de este tipo suele ser muy pequeñas. Para materiales metálicos a temperatura ambiente este ensayo se encuentra normalizado por la norma UNE-EN ISO 6892-1 del año 2010.

Durante la realización de este ensayo, se registra tanto la deformación sufrida por la probeta entre dos puntos fijos como la carga asociada a dicha deformación, lo que permite el empleo de curvas características como la tensión ingenieril vs deformación ingenieril (σ_e vs ε_e). Este tipo de curvas, que representan de forma gráfica las propiedades mecánicas del material, no tienen en cuenta los cambios dimensionales que se producen en la sección de la probeta como consecuencia de la aplicación de la carga. Este hecho, da lugar a una incorrecta interpretación de los resultados, sobre todo en materiales susceptibles de experimentar cambios geométricos sustanciales durante los ensayos.

Estos cambios dimensionales, que tienen lugar en un cuerpo sometido a un esfuerzo debido a la necesidad de disipar energía, pueden ser reversibles cuando el material se encuentra en la zona elástico lineal o zona proporcional entre tensiones y deformaciones, irreversibles en la zona plástica o parcialmente irreversibles en la zona visco-elástica.

En este tipo de ensayos, los valores de tensión y deformación son determinados a partir de la carga (F) y de la deformación (ε) medidas experimentalmente. No obstante, para pasar del valor de carga a tensión, es necesario dividir por la sección (A) de la probeta. Si en todo el transcurso del ensayo, se divide por el valor inicial de la sección (A_0) se obtiene lo que se conoce como tensión ingenieril (*Ecuación 1*).

$$\sigma_e = \frac{F}{A_0} \quad \text{Ecuación 1}$$

De la misma forma, si lo que se mide es la deformación, esta puede obtenerse mediante la relación existente entre el incremento de desplazamiento (Δl) entre dos puntos y la longitud inicial entre esos dos puntos (l_0). Es lo que se denomina deformación ingenieril ε_e (*Ecuación 2*).

$$\varepsilon_e = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{Ecuación 2}$$

Si estos dos valores de tensión y deformación se representan en un sistema de coordenadas en el que el eje de coordenadas se representa la tensión y en el de abscisas la deformación, se obtiene la curva tensión deformación ingenieril, a partir de la cual es posible determinar

propiedades del material tales como el módulo de elasticidad o de Young (*Ecuación 3*), el límite elástico o la resistencia a la tracción.

$$\sigma = E * \varepsilon \tag{Ecuación 3}$$

No obstante, la curva ingenieril no representa la realidad. Esto es debido a que, como se comentó con anterioridad, la curva es obtenida (*Ecuación 1*) a partir de la sección inicial (A_0) mientras que en cualquier material y en mayor medida en los materiales que experimentan gran deformación, la sección en instantánea en el momento de producirse la rotura es sustancialmente menor que la inicial, y por lo tanto los valores reales de tensión serán más elevados que los ingenieriles. Este hecho, conlleva a la obtención un valor de tensión inferior del realmente existente en la rotura.

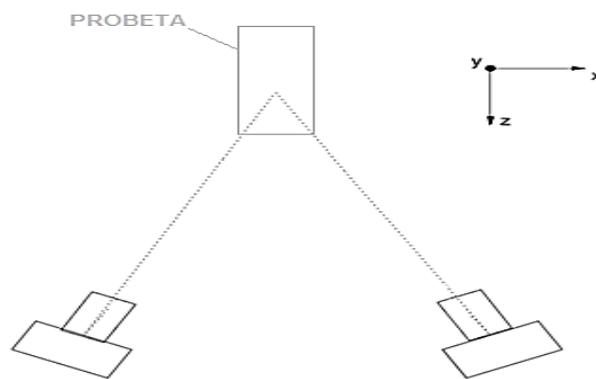


Figura 3. Disposición del ensayo.

Para tener en cuenta este hecho, se utilizan las curvas tensión-deformación verdadera. Estas curvas tienen en cuenta los cambios de dimensiones que experimenta la probeta. Así la tensión verdadera (σ_v) se define como la carga aplicada entre el área (A_i) existente en la sección transversal en el instante en el cual se aplica dicho valor de carga (*Ecuación 4*).

$$\sigma_v = \frac{F}{A_i} \tag{Ecuación 4}$$

Por su parte, la deformación verdadera se obtiene a partir del incremento de deformación en cada uno de los instantes de la deformación (*Ecuación 5*):

$$d\varepsilon = \frac{dL}{L} \rightarrow \varepsilon_v = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L_i}{L_0}\right) \tag{Ecuación 5}$$

Por otro lado, como los cambios experimentados en el volumen de la probeta son prácticamente nulos; pues la pérdida de área de la sección transversal se compensa con el aumento de longitud, puede establecerse la siguiente relación entre las tensiones y deformaciones verdaderas y tensiones y deformaciones ingenieriles:

$$\sigma_v = \sigma_e(1 + \varepsilon_e) \tag{Ecuación 6}$$

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon_e)$$

Ecuación 7

Estas ecuaciones tienen la ventaja de poder convertir los valores ingenieriles en verdaderos pero se basan en la suposición de volumen constante y sólo son válidos hasta el punto en el que comienza la estricción debido a que cuando este fenómeno tiene lugar, no todas las secciones poseen la misma deformación (la deformación es no uniforme a lo largo de la probeta) por lo que las mediciones de deformación y área, de ser necesarias, deben obtenerse experimentalmente en esta zona.

No obstante, si se utilizan métodos convencionales para la medida de deformaciones (galgas o extensómetros) llevar a cabo estas mediciones no es sencillo debido, por una parte a la dificultad de conocer previamente al ensayo la zona en la que se producirá la estricción, y por otro, a la dificultad de medir en cada instante la reducción de área.

La introducción de las técnicas de correlación de imágenes digitales, DIC, ha permitido solucionar en gran medida los problemas que se presentan si se aborda el ensayo desde un punto de vista convencional. Si comparamos la técnica DIC frente a la utilización de galgas extensométricas, mientras que con éstas últimas la deformación solo puede ser medida en un punto y en una dirección (galga unidireccional) o en un punto en hasta tres direcciones (rosetas de deformación), con la aplicación de las técnicas de DIC, es posible medir en toda una superficie en cualquier dirección. Si las dimensiones de esta zona de medición (las cuales dependerán de la óptica utilizada) abarcan el ancho y el alto de toda la probeta, será posible medir las deformaciones longitudinal y transversal en la zona de estricción. Además, será posible estimar la reducción de área en la zona transversal, considerando que la reducción de ancho de la probeta (Δl_T), es proporcional a la medida de deformación transversal (ε_T) que se obtiene experimentalmente (Ecuación 8).

$$\Delta l_T = \varepsilon_T * L$$

Ecuación 8

Por otra parte, como la técnica DIC solo permite realizar mediciones en la zona visible por las cámaras, la deformación en la otra dirección (generalmente el espesor) no puede ser medida experimentalmente de forma directa. No obstante, esta puede estimarse de dos formas:

- 1) Para materiales isótropos, utilizando la misma deformación transversal ε_T calculada anteriormente. Es decir, suponiendo que las deformaciones en las dos direcciones son iguales $\varepsilon_x = \varepsilon_y$, siendo x e y los ejes mostrados en la Figura 3.
- 2) De forma general, estimando que la distancia que se aleja la probeta de las cámaras, medido en un punto de la zona de estricción, es la mitad de la reducción del espesor.

3.1 Procedimiento experimental

3.1.1 Obtención de las probetas

La obtención de las probetas utilizadas en este estudio, se llevó a cabo tras mecanizar una chapa de acero S275JR, siguiendo la geometría típica de probeta para el ensayo de tracción. La geometría final se muestra en la Figura 4. El espesor de la probeta en la zona de menor sección es de 9.58 ± 0.2 mm mientras que el espesor es de 4 ± 0.1 mm.



Figura 4. Geometría de la probeta de tracción utilizada en el ensayo.

Para poder llevar a cabo la correlación de imágenes, la superficie de la probeta mostrada en la Figura 4 fue pintada aplicando un moteado en negro sobre un fondo blanco.

3.1.2 Ejecución del ensayo

La probeta, se sometió a un esfuerzo uniaxial de tracción. El proceso de carga fue realizado en una máquina universal de ensayos, de la firma MTS 810 y con una célula de carga de 100kN. El ensayo se realizó en control de desplazamiento, con una velocidad de ensayo constante de 2 mm/min.

Simultáneamente a la aplicación de la carga, se realizaron mediciones con el equipo ARAMIS 5M de la marca GOM, el cual tras la aplicación de la técnica de correlación de imágenes digitales, permitirá realizar medidas de deformaciones. Dadas las dimensiones de las probetas, se utilizaron lentes de 50 mm de distancia focal, que tras un proceso de calibración utilizando el panel CP20 90x72, permitieron obtener una zona de medida de 125x100mm. La toma de fotografías se realizó a una frecuencia de 1Hz.

El equipo ARAMIS, fue situado de la forma que se muestra en la Figura 3 y conectado a la unidad de control de la máquina MTS, la cual permite obtener valores de fuerza registrados durante el transcurso del ensayo.

3.1.3 Análisis de resultados

La correlación de imágenes se llevó a cabo utilizando el software ARAMIS v6.2. Los diferentes estados durante el transcurso del ensayo, pueden verse en la Figura 5, mientras que el modelo tridimensional generado puede verse en la Figura 6.

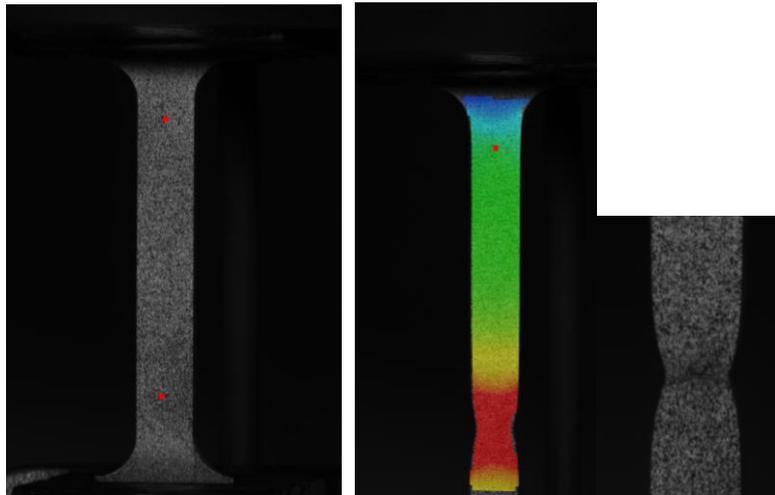


Figura 5. Diferentes instantes durante el ensayo estado inicial con la probeta moteada (izquierda), comienzo de la estricción con malla de deformación sobreimpresa (centro) y detalle del inicio de la rotura (derecha)

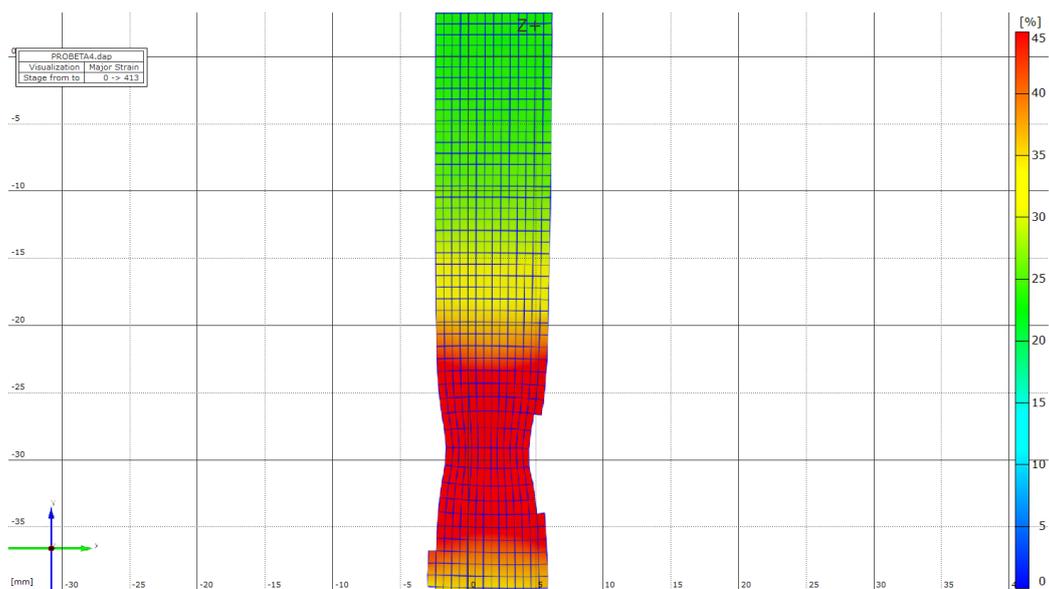


Figura 6. Deformaciones en el modelo tridimensional en la zona de estricción

La deformación ingenieril longitudinal, fue obtenida a partir de la evaluación de la distancia existente entre dos puntos situados en la misma dirección que la correspondiente a la de aplicación de la fuerza y a la altura de la zona en la que se produce la estricción. De forma análoga a la anterior, pero con dirección perpendicular fue realizada la medición de la deformación ingenieril transversal. Por su parte la tensión ingenieril fue calculada utilizando la *Ecuación 1* y considerando un área de 38.32 mm^2 . Esta curva puede verse en la Figura 7, en la que se detalla además la tensión actuante (413 Mpa) en el momento de producirse la carga máxima.

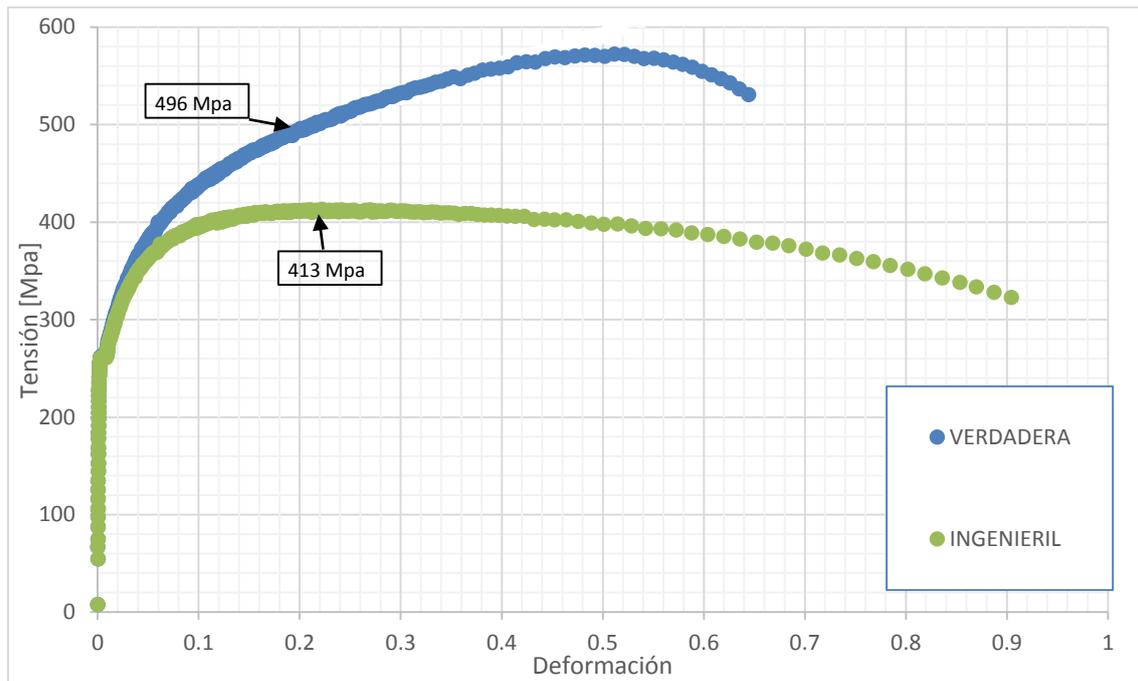


Figura 7. Curvas tensión-deformación ingenieril y verdadera

A partir de la curva ingenieril, fue calculada la curva verdadera utilizando las expresiones mostradas en la Ecuación 6 y en la Ecuación 7. La curva tensión deformación verdadera también se aprecia en la Figura 7. Aunque las ecuaciones solo pueden aplicarse hasta la carga máxima (instante para el cual se produce una tensión de 496 Mpa), la representación de la curva se ha extendido hasta la rotura.

La deformación real fue calculada utilizando el concepto de deformación instantánea, que es la deformación que se produce entre dos medidas consecutivas (Ecuación 9), siendo L la distancia existente en los puntos de referencia y el subíndice 'i' el instante de tiempo en el que se calcula la deformación.

$$\varepsilon_i = \frac{L_i - L_{i-1}}{L_i} \quad \text{Ecuación 9}$$

Por su parte, la tensión real fue obtenida teniendo en cuenta la reducción de área que experimenta la sección. Para ello, primeramente se calculó la disminución del ancho de la probeta siguiendo la expresión mostrada en la Ecuación 10, en la que L_i representa el valor de ancho y ε_r la deformación real.

$$L_f = L_i * (1 + \varepsilon_r) \quad \text{Ecuación 10}$$

Posteriormente, se obtuvo la variación de espesor siguiendo los dos procedimientos explicados en el apartado 3. Las curvas tensión-deformación obtenidas utilizando estos dos procedimientos, se muestran en la Figura 8, en la que la curva Delta Z muestra los resultados que se obtienen calculando la variación de espesor a partir de la variación de la coordenada Z, mientras que la curva Def_cte muestra la que se obtiene considerando iguales las deformaciones en el ancho y espesor de la probeta ($\varepsilon_y = \varepsilon_z$).

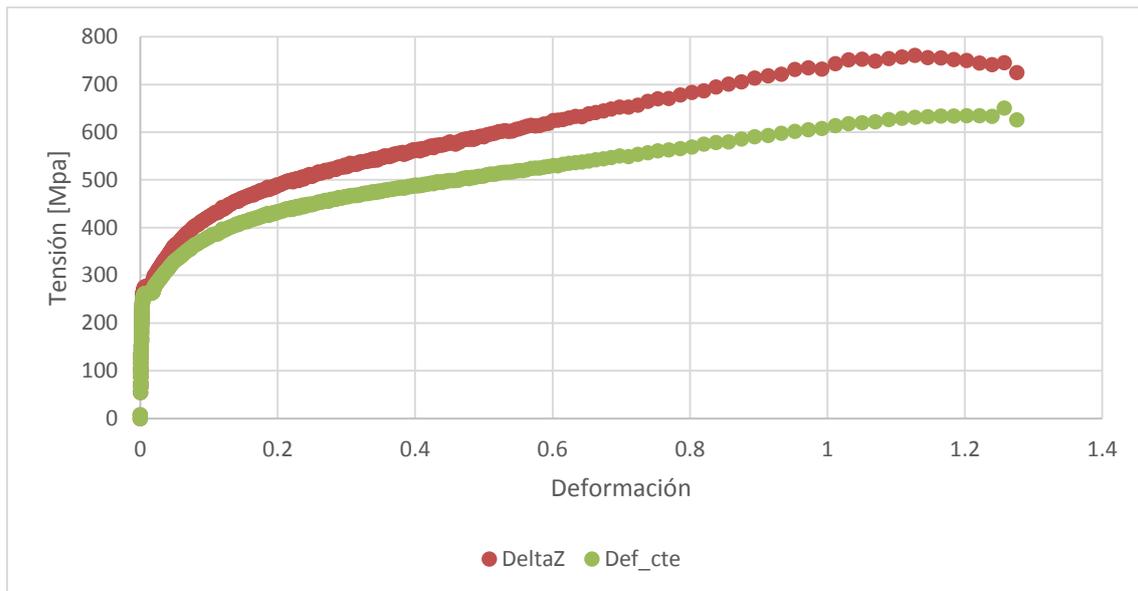


Figura 8. Curva real considerando dos procesos de cálculo diferentes

Como puede apreciarse, existen discrepancias entre los valores obtenidos utilizando estas dos técnicas. No obstante, la medida del espesor una vez se ha producido la rotura de la probeta y en la superficie de fractura, arrojó un valor de entre 1.4-1.6 mm (el espesor no es constante a lo largo de la sección de rotura, siendo más grueso en los extremos y más débil en la parte central), frente a los 1.9mm-2.2mm presentes en las zonas próximas a la superficie de fractura. Si comparamos estos valores con los obtenidos con las dos técnicas comentadas con anterioridad (Figura 9), en la que se obtienen valores del espesor de 2.48 mm para DeltaZ y 2.87 mm para Def_cte, se pone de manifiesto que la aproximación más correcta parece ser la medición de DeltaZ. Para llegar a esta conclusión, hay que tener en cuenta que los valores 2.48 y 2.87 mm son obtenidos no para el instante de rotura, sino para un instante anterior. Esto es debido a que la distorsión del patrón de referencia instantes antes de producirse la rotura es tan grande, que los puntos de la zona de estricción ya no pueden ser correlacionados correctamente.

Las curvas tensión-deformación ingenieril, verdadera y real (experimental) considerando $\varepsilon_y = \varepsilon_z$ se muestran en la Figura 10.

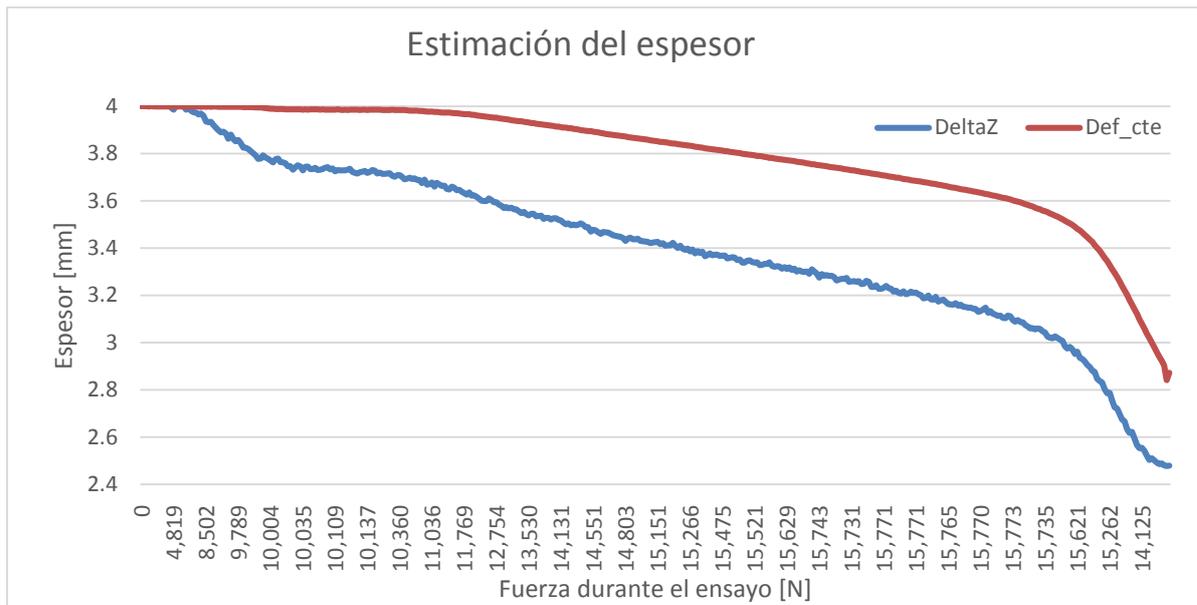


Figura 9. Estimación del espesor para cada valor de fuerza

Una vez analizadas las diferentes curvas, se ponen de manifiesto las diferencias existentes en los valores estimados para la tensión de rotura (o tensión en el punto en el que se produce la rotura, es decir en el último punto de cada una de las gráficas) según se utilice uno u otro procedimiento (Tabla 1).

Tabla 1. Tensión de rotura obtenida utilizando diferentes curvas

Curva	Tensión en el punto de rotura [Mpa]	Diferencia
Ingenieril	322.84	0
Verdadera	530.84	+64,43%
Real_Def_Cte	626.32	+94,00%
Real_DeltaZ	725.34	+124,67%

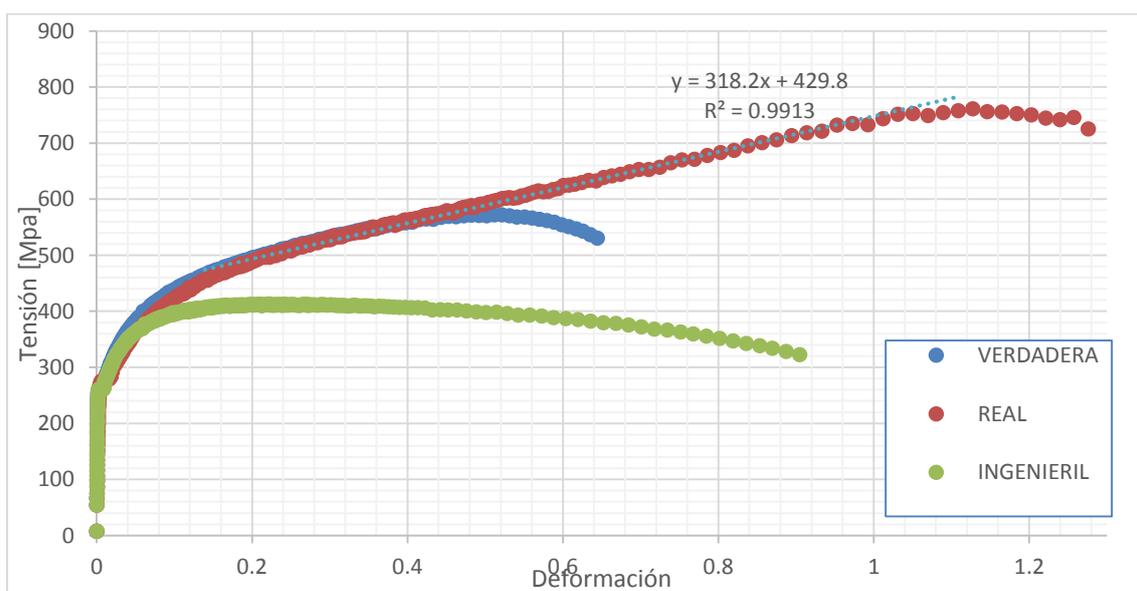


Figura 10. Curvas tensión-deformación ingenieril, verdadera y real (experimental)

3.2 Conclusiones

Por las razones expuestas con anterioridad, se puede concluir que la curva tensión deformación ingenieril sólo es válida en la zona elástico-lineal, pues no tiene en cuenta las variaciones dimensionales que experimenta la probeta en su sección. Estas variaciones dan lugar a que ciertas propiedades mecánicas del material sean estimadas con valores muy por debajo de su valor real.

Por otro lado, la curva tensión deformación verdadera, sólo es válida hasta el punto en el que se alcanza la tensión máxima en la curva ingenieril, o lo que es lo mismo, hasta el momento en el que comienza la estricción. Esto es debido a que a partir de este momento, la deformación no es uniforme a lo largo de la probeta, siendo mayor en la zona de estricción que en el resto de la probeta. Este fenómeno, ha podido ser corroborado mediante la medición y posterior comparación de las deformaciones en dos posiciones diferentes: una antes de alcanzar el valor de fuerza máxima (Figura 11) y otro tras rebasarse dicho valor (Figura 12). Mientras que antes de alcanzarse la fuerza máxima, todos los puntos de la sección longitudinal presentan las mismas deformaciones (gráfica central de la Figura 11) no ocurre lo mismo cuando se supera dicha carga máxima (inicio de la estricción), pues los puntos situados en la zona de estricción, presentan deformaciones notablemente superiores a las del resto de la probeta (gráfica central de la Figura 12).

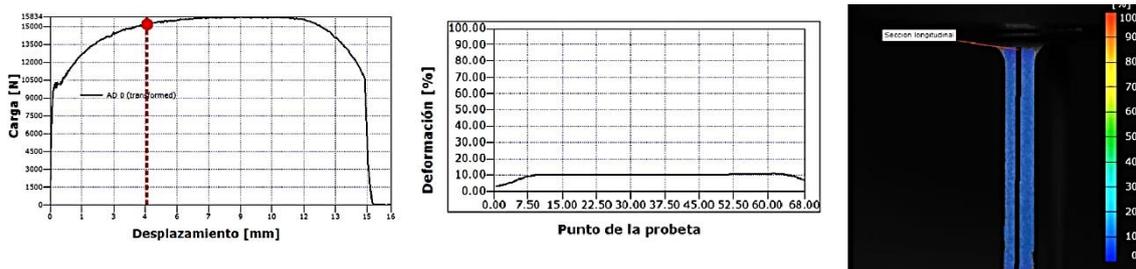


Figura 11. Para un valor de carga aplicada de 15kN (izquierda), valor de las deformaciones (centro) que se producen a lo largo de los puntos contenidos de una sección longitudinal en la probeta (derecha)

Con la medición de deformaciones utilizando la técnica de correlación de imágenes digitales, es posible obtener parámetros reales en un rango muy superior al que se obtendría si se utilizasen otras técnicas. En este ejemplo, si se utiliza la curva tensión deformación verdadera, los valores reales solamente abarcarían el rango de deformación comprendido entre 0% y 30% (Figura 10) mientras que con la aplicación de DIC se llegan a obtener valores hasta el 100% de deformación, es decir, la información disponible aumenta en un 70%.

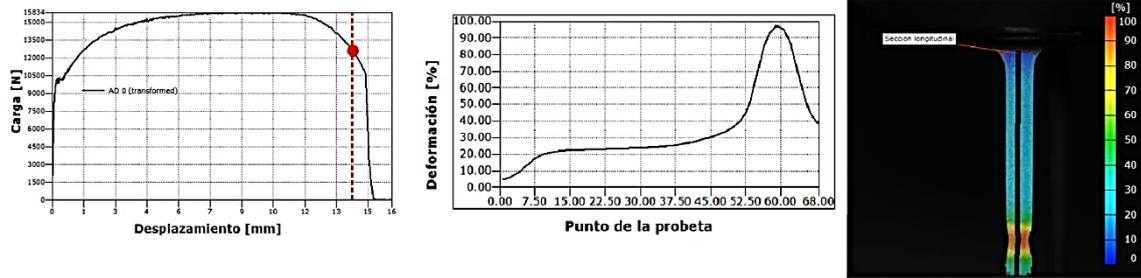


Figura 12. Para un valor de carga aplicada de 12,5kN (izquierda), valor de las deformaciones (centro) que se producen a lo largo de los puntos contenidos de una sección longitudinal en la probeta (derecha)

4 LA CORRELACIÓN DE IMÁGENES EN LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIAL BIOLÓGICO (TENDONES)

La importancia de la caracterización mecánica de material biológico, surge en la segunda mitad del siglo XX coincidiendo con el desarrollo de las investigaciones en el campo de la biomecánica. Sin embargo, abordar el estudio de este tipo de elementos no es sencillo, debido a su delicadez e irregularidad geométrica. En consecuencia, en la literatura existen discrepancias en la estimación de sus propiedades mecánicas.

Los tendones, que son los elementos encargados de unir los músculos a los huesos, y por tanto, los responsables de transmitir las fuerzas generadas por la musculatura a los puntos de origen e inserción en el esqueleto óseo, son conocidos como tejidos colagenosos formados por fibras paralelas. Están conformados por pocas células (20 % del volumen tisular total) y una matriz extracelular (80% del volumen tisular total) de la cual el 70% está compuesta de agua y el 30% restante por colágeno y elastina, principalmente.

Estructuralmente, cuando a un tendón se le aplica una pequeña fuerza que provoque al menos una deformación equivalente al 4% de la longitud inicial, las fibras que forman el tendón se vuelen paralelas, lo que permite resistir cargas uniaxiales. Cuando esta carga cesa, el tendón recupera su forma inicial.

La realización de un ensayo mecánico en este tipo de material, y por consiguiente, la determinación de las propiedades mecánicas, no es evidente debido a varias razones: (a) La sección no es constante y, además, debido a su baja consistencia, existe una importante dificultad a la hora de medir la sección en todos los puntos (b) Las propiedades mecánicas son viscoelásticas, por lo cual resultan dependientes del tiempo y de la temperatura (c) la muestra debe estar bañada durante el transcurso del ensayo, a fin de evitar las pérdida de agua y por tanto, un cambio en sus propiedades (d) Las deformaciones locales en la superficie, varían en función de la densidad de colágeno existente en la estructura de la zona de medida.

Por otro lado, para llevar a cabo un ensayo mecánico en este tipo de materiales, se suele utilizar una máquina universal de ensayos, la cual debe estar provista de las mordazas de sujeción adecuadas que permitan evitar el deslizamiento del material sujeto a ensayo. Mientras el registro de la fuerza actuante se realiza directamente con la máquina de ensayo, la obtención de las deformaciones se realiza a partir de la variación de posición del puente de la propia máquina, pero al ser el espécimen de espesor y ancho variables, las deformaciones provocadas en la probeta como consecuencia de la aplicación de la carga, no serán uniformes a lo largo de la probeta sino que éstas variarán dependiendo de la sección de medida, por lo que para conocer los datos con total exactitud, se deberían realizar mediciones a lo largo de todas las secciones de la probeta. Además, la realización de este ensayo desde un punto de vista convencional (mediante la utilización de galgas o extensómetros), no parece adecuada debido a la imposibilidad de añadir al material, elementos que interfieran en sus propiedades.

Por todas estas razones, los resultados de los ensayos mecánicos son muy variables debido a la gran cantidad de factores que bien pueden alterar sus propiedades o bien generar

incertidumbre en la medición. Para superar estas dificultades, diferentes autores han propuesto [4] la utilización de técnicas de medición óptica, tales como la interferometría holográfica o la interferometría de moteado. No obstante, estas técnicas son muy sensibles a pequeños desplazamientos, y por lo tanto resultan poco apropiados para materiales deformables tales como tejidos biológicos. Otras técnicas ópticas, como por ejemplo la interferometría Moiré, requieren la preparación de un patrón regular en la superficie de la muestra que puede ser muy difícil de ejecutar en estos materiales de geometría irregular. Debido a ello, todas estas técnicas han encontrado recientemente una aplicación muy limitada debido a su complejidad en el uso práctico. Una técnica óptica prometedora para el campo biomecánica es la correlación de imágenes digitales (DIC) [5] al ser ésta capaz de superar muchas de estas limitaciones.

4.1.1 Procedimiento experimental

4.1.1.1 Obtención de las probetas y ejecución del ensayo

Las probetas se obtuvieron a partir de muestras de un tendón procedente de la tibia de cerdo. Las muestras, fueron descongeladas durante un periodo de 18 horas a temperatura ambiente. Debido a la irregularidad de la sección, ésta fue medida utilizando técnicas fotográficas (Figura 13).

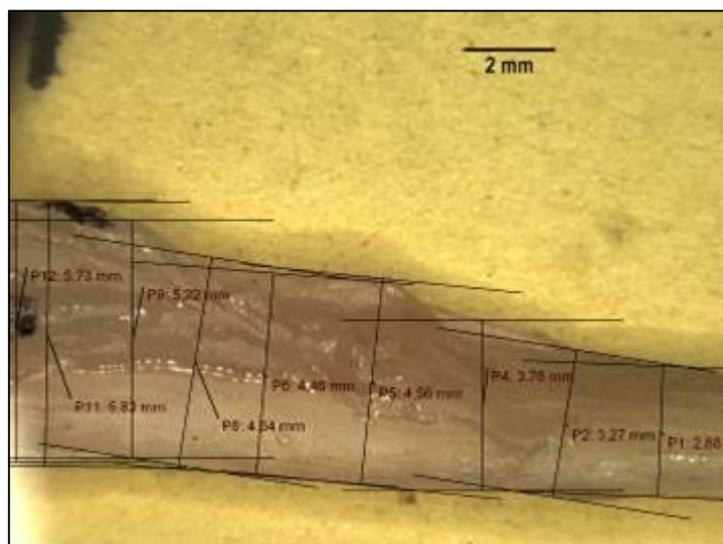


Figura 13. Medición de ancho con lente de 1 x

Una vez realizado el proceso de medida, los tendones son pintados por uno de los laterales con pintura acrílica mate, mientras que por el otro, fue hidratado con solución salina de forma continua durante la ejecución del ensayo.

Una vez obtenidas las probetas, éstas fueron sometidas a un esfuerzo creciente de tracción. El proceso de carga fue realizado en una máquina de ensayos electromecánica, de la firma MTS modelo Synergie y con una célula de carga de 100 N de capacidad de carga (Figura 14), utilizando una velocidad de ensayo de 10 mm/min. Por otra parte, la sujeción de las probetas se llevó a cabo en los extremos de las mismas mediante la utilización de mordazas mecánicas, tal y como se muestra en la Figura 15. Para evitar posibles deslizamientos, la probeta fue pegada mediante la utilización de cianocrilato.

Para la aplicación de técnicas de correlación de imágenes digitales, se utilizó el equipo ARAMIS 5M de la marca GOM. Dadas las dimensiones de las probetas, se utilizaron lentes de 50 mm de distancia focal, que tras un proceso de calibración utilizando el panel CQCCP20 30x24, permitieron obtener una zona de medida de 35x29mm.



Figura 14. Equipos utilizados en el desarrollo experimental.

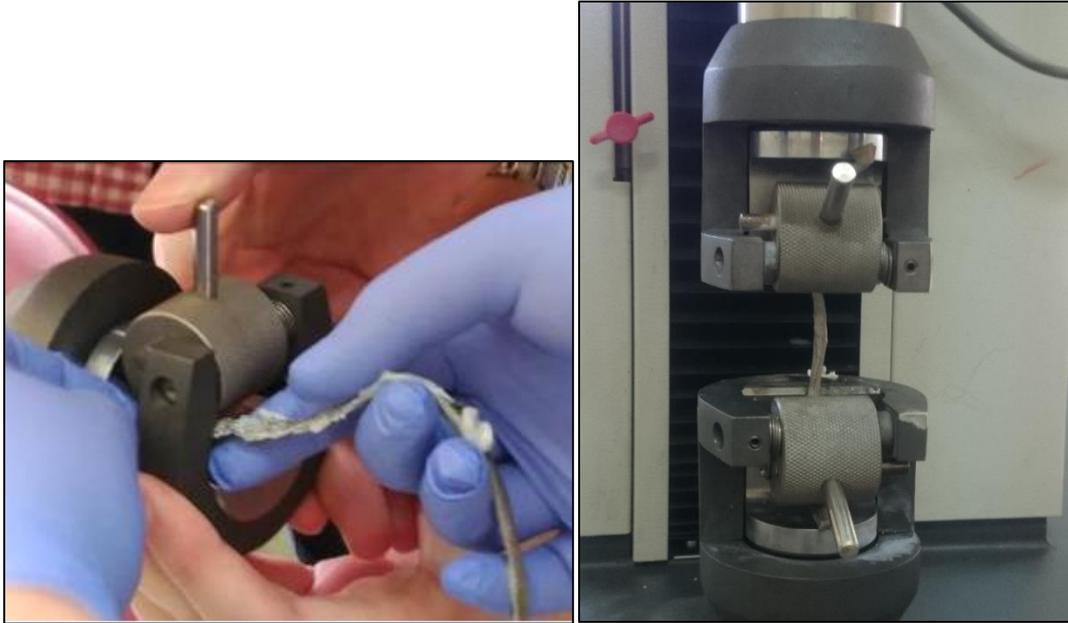


Figura 15. Colocación del material sobre el utillaje de ensayo

4.1.1.2 Análisis de resultados

Una vez realizados los ensayos, se procede al posprocesado de los datos. En los primeros ensayos, y debido a la irregularidad de la sección, las deformaciones fueron medidas en tres posiciones diferentes, de la forma que se refleja en la Figura 16. De esta manera, se midieron deformaciones en distintas zonas: zona de mayor sección (Def superior), en la zona de menor sección (menor sección) y en otra zona intermedia entre ambas (Def media).

A partir de diferentes mediciones a lo largo del tendón y considerando un espesor constante de unos 1.5 mm, se determinó que la sección media es de unos 7.4 mm², mientras que la mínima se sitúa en los 3.93 mm².

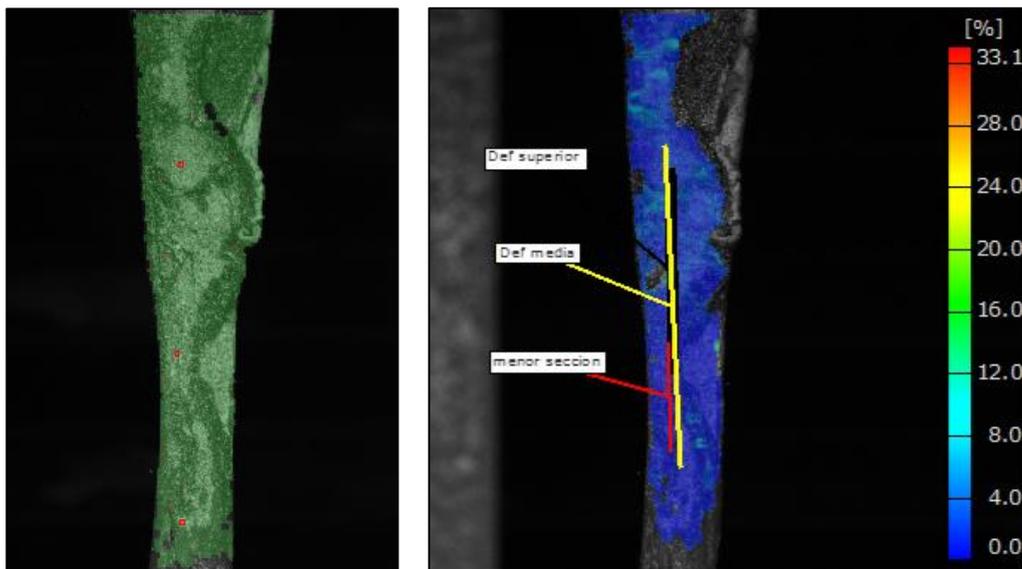


Figura 16. Zona visible al inicio del ensayo (izquierda) y malla de cálculo durante el transcurso del ensayo (derecha)

Las curvas tensión-deformación ingenieril obtenida con la técnica de DIC se muestra en la Figura 17. En ella, se presentan sobreimpresos los ajustes mediante recta de regresión lineal en las diferentes zonas junto al coeficiente de determinación R^2 . Los valores de tensión son obtenidos utilizando un valor de sección inicial de 6.3 mm^2 , que corresponde con el valor medio medido en la zona al inicio del ensayo.

En el gráfico se observa como tras una zona inicial de menor pendiente, típica en el ensayo de estos materiales [6] en el que se produce el ajuste de los distintos elementos presentes en el sistema de carga, la curva rigidiza y presenta una pendiente que podría considerarse de unos 1000 MPa, valor probable en este tipo de material.

Debido a los elevados desplazamientos que se producen en el transcurso del ensayo, con la configuración de las cámaras utilizada, no fue posible registrar el transcurso del ensayo hasta rotura, ya que las zonas de la probeta visibles por las cámaras al inicio del ensayo pasaban a ser zonas no visibles durante el avance del ensayo. Debido a ello, solo fue posible alcanzar valores de deformación del 5%.

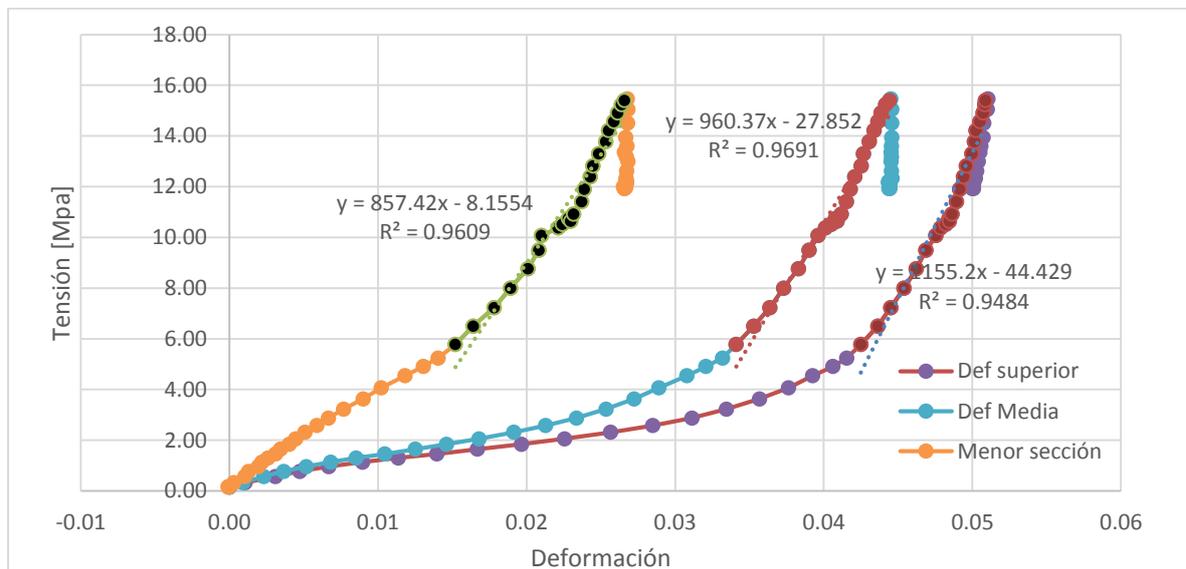


Figura 17. Curva tensión deformación para los tres puntos de medida obtenida a través de la DIC

Por esta razón, y al objeto de ver el comportamiento global de los tendones en la Figura 18 se ha representado la curva de tracción obtenida tomando como valores de deformación el desplazamiento máquina dividido entre la distancia inicial entre mordazas. Como puede observarse, tras la zona inicial recogida por el equipo de DIC, la carga cae y posteriormente el tendón vuelve a endurecerse y alargarse aunque no llega a alcanzar los valores de rigidez mostrada inicialmente.

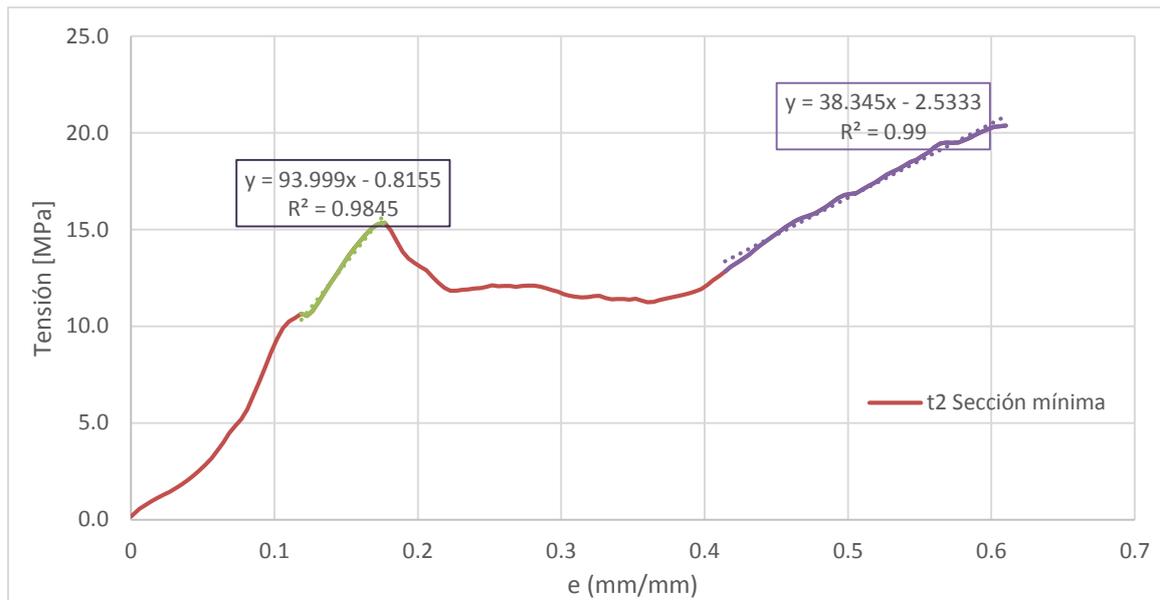


Figura 18. Curva tensión deformación para los tres puntos de medida obtenida con desplazamientos máquina

Como puede apreciarse, si lo que pretende obtenerse es el módulo elástico, existen notables diferencias en función del procedimiento empleado en la estimación de las deformaciones así como en función del área empleada. Esto es debido a que, si para la estimación de deformaciones se utiliza la relación carga-desplazamiento proporcionada por la máquina de ensayos, los resultados variarán sustancialmente en función del volumen de material contenido entre las mordazas. No obstante, con la técnica de DIC sí se consiguen similitudes a la hora de estimar el módulo elástico, independientemente de la zona medida.

Con objeto de evaluar la variabilidad en los resultados obtenidos, el ensayo se repitió sobre otras 5 muestras. No obstante, la dificultad del ensayo junto con otros problemas derivados de la mala calidad de los tendones hizo que solo se obtuvieran buenos resultados en otra de las probetas. En este caso, se utilizó una probeta de unos 4 milímetros de ancho y unos 2 milímetros de espesor (Figura 19).



Figura 19 Dimensiones de la muestra número 2

El mismo procedimiento de ensayo seguido en el apartado anterior, se repitió para esta muestra. No obstante, en este caso el proceso de calibración del equipo de correlación de imágenes se llevó a cabo utilizando el panel CP20 90x72, que permite ampliar la zona de medida hasta los 125x100mm, frente a los 30x24mm del caso anterior.

La curva tensión-deformación ingenieril obtenida mediante el procedimiento de DIC se muestra en la Figura 20, mientras que en la Figura 21 se representa la curva de tracción estimando las deformaciones a partir de los valores de desplazamiento de la máquina. Los valores de tensión corresponden a una sección de 11.5 mm² y a una longitud inicial entre mordazas de 35 mm.

En este caso, fue posible realizar las mediciones con la técnica DIC hasta el momento de rotura, llegando a valores de deformación del 12% y apreciándose, tras las rotura, una deformación remanente de un 10%.

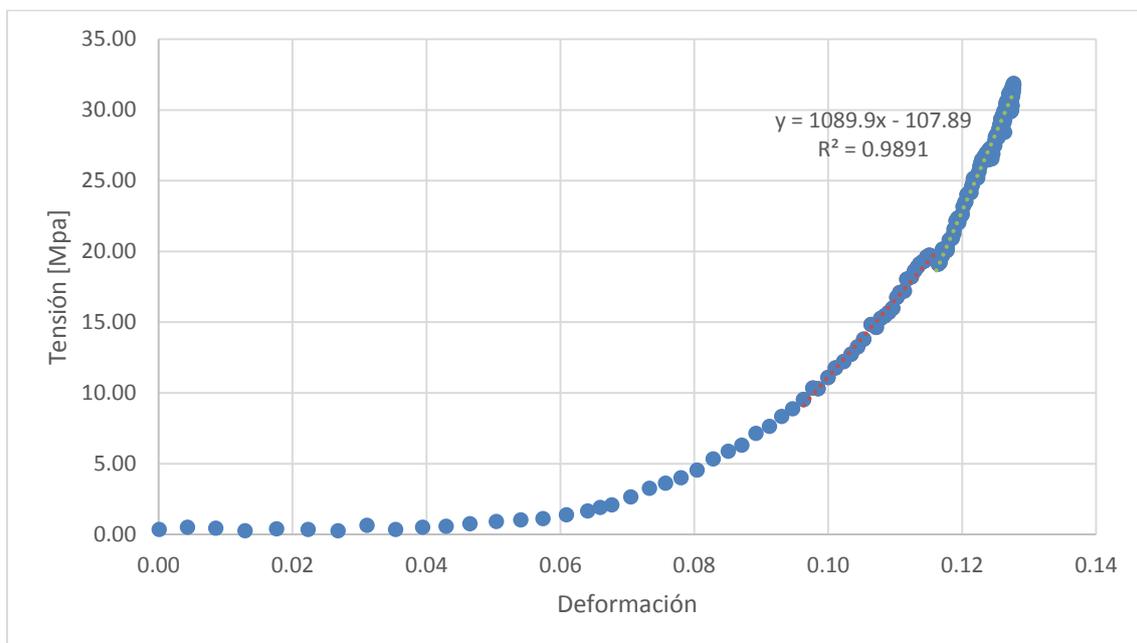


Figura 20. Curva tensión-deformación ingenieril obtenida tras la aplicación de la técnica DIC

Como en el caso anterior, existen diferencias notables en función de la metodología empleada a la hora de estimar las deformaciones. Como puede apreciarse por comparación de la Figura 20 y la Figura 21, tanto los valores obtenidos como la forma de la gráfica presentan diferencias. No obstante, los valores obtenidos reflejan de nuevo un valor de módulo elástico de unos 1000 MPa.



Figura 21. Curva tensión-deformación ingenieril obtenida con valores máquina.

4.1.2 Conclusiones

En la estimación de las propiedades mecánicas, si se utilizan los valores máquina para estimar las deformaciones, se inducen errores debido a dos razones: (a) La sección no es constante en la zona de medida y (b) los desplazamientos debidos a deformaciones en los utillajes de la máquina y a posibles deslizamientos de la probeta, no pueden ser desacoplados de la medición. No obstante, si se utiliza la técnica DIC para la medición de deformaciones, los movimientos de sólido rígido de la probeta son directamente desacoplados mientras que las posibles deformaciones o movimientos en los utillajes, no afectan a la medición. Por este motivo, en los ensayos se observan discrepancias en los resultados obtenidos en función del método de medición empleado.

La técnica DIC, ha sido capaz de obtener desplazamientos con elevada exactitud y precisión. Sin embargo, para obtener una medición exacta y precisa de estos parámetros, es necesario una buena preparación de la superficie a medir, así como una buena configuración de hardware y software. En este tipo de material, la preparación no es sencilla por dos razones: (a) la irregularidad geométrica y (b) al tratarse de tejidos que deben estar en contacto con líquidos la adherencia de la pintura queda limitada.

Pese a estas dificultades, se ha conseguido aplicar la técnica DIC sobre material biológico (en este caso tendones) y, gracias a las ventajas que ofrece esta técnica, es previsible un aumento de su utilización en aplicaciones biomecánicas.

5 LA CORRELACIÓN DE IMÁGENES EN LA EVALUACIÓN DE LOS CONCENTRADORES DE TENSIÓN

En elementos estructurales, debido a la presencia de singularidades geométricas (agujeros, defectos, cambios bruscos de sección, etc.), la transmisión de los esfuerzos no es suave (Figura 22), lo que implica que en ciertos puntos de estas singularidades se produzca una transmisión brusca de esfuerzos que originan tensiones notablemente superiores a las nominales. Es lo que se conoce como puntos con concentración de tensiones.

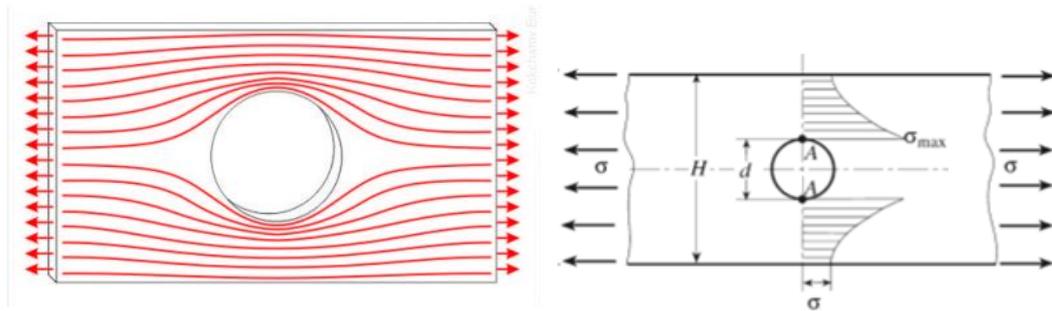


Figura 22. Distribución de las líneas de fuerza en una singularidad (izquierda) y efecto de la singularidad en las tensiones locales (derecha)

Para tener en cuenta estos incrementos de tensiones en zonas localizadas, diferentes autores propusieron el factor de concentración de tensiones, que conceptualmente puede entenderse como las veces que hace falta multiplicar las tensiones existentes en un punto lejano a la singularidad, para obtener el valor de tensiones existentes en la zona de dicha singularidad (Ecuación 11). Así, el factor teórico de concentración de tensiones (K_t) es un factor que se aplica para estimar la tensión real (σ_{real}) en secciones de piezas con discontinuidades geométricas en las que se produce el fenómeno de concentración de tensiones y que están sometidas a un esfuerzo $\sigma_{teór.}$. Este factor mayorará el cálculo de la tensión teórica obtenida a partir de los valores de la sollicitación y de la geometría de la sección, permitiendo estimar el valor de tensión máxima que se produce en la discontinuidad y que es superior a la obtenida con el cálculo teórico.

$$\sigma_{real} = K_t * \sigma_{teor \text{ ó } nom} \quad \text{Ecuación 11}$$

El subíndice 't' en K_t significa que el valor de este factor es exclusivamente dependiente de la geometría, es decir, el material utilizado no influye a la hora de calcular el factor teórico de concentración de esfuerzos.

En el caso de que estos elementos con singularidades se sometieran a cargas cíclicas, se producirían, en las zonas gobernadas por la presencia de concentradores de tensiones, variaciones de tensiones superiores a las nominales, lo que inevitablemente provoca un fallo más temprano del elemento resistente. Por esta razón, es necesario un buen diseño geométrico que permita minimizar la concentración de tensiones.

5.1 Concentración de tensión en uniones soldadas

La mayor parte de las estructuras se forman mediante la unión de dos o más elementos capaces de transmitir esfuerzos entre los diferentes elementos que la conforman. Para poder llevar a cabo esta buena transmisión de los esfuerzos y por tanto, garantizar su integridad, es necesario asegurar la mejor continuidad de las piezas.

No obstante, debido a la geometría de la unión, la transmisión de esfuerzos se hace en muchas ocasiones de modo indirecto, ya que para pasar el esfuerzo de una pieza a otra se la obliga previamente a desviarse de su trayectoria normal, lo que genera una transmisión brusca de esfuerzos. Es el caso de las uniones soldadas en ángulo (Figura 23), mientras que en el caso de soldadura a tope, la transmisión es directa.

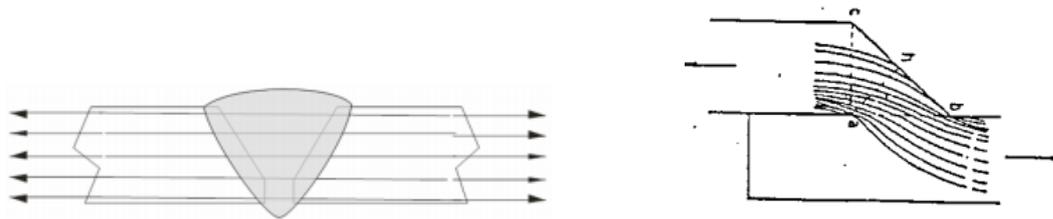


Figura 23. Transmisión de esfuerzos en uniones a tope (izquierda) y en uniones en ángulo (derecha)

En las uniones en las que esta transmisión de esfuerzos no es suave, se origina un complejo estado tensional en el cordón que generalmente se traduce en la aparición de concentración de tensiones generada por la geometría de la junta en la zona de acuerdo entre el metal depositado y la chapa base (Weld toe). Pese a ello, esta tipología de uniones es necesaria en multitud de aplicaciones industriales por lo que su diseño y cálculo debe abordarse con el mayor de los conocimientos.

Cuando este tipo de uniones no puede evitarse, es necesario tener presente que la soldadura ejerce un severo efecto concentrador de tensiones que reduce significativamente la resistencia a fatiga. Para abordar este cálculo y poder garantizar su integridad, generalmente se acude al empleo de categorías de detalle [7]. No obstante, esta forma de abordar el cálculo, no tiene en cuenta de forma precisa la geometría de la unión [8] ni el nivel de tensiones residuales [9,10].

Para analizar la influencia de la geometría del cordón en el efecto concentrador de tensiones, se llevaron a cabo ensayos experimentales sobre probetas con diferente geometría de cordón. Esta diferencia, observable a simple vista, es la resultante de llevar a cabo la unión con dos métodos de soldeo diferentes: cuando se utiliza el proceso Metal Inert Gas (MIG) o el Tungsten Inert Gas (TIG).

5.1.1 Procedimiento experimental

5.1.1.1 Obtención de las probetas

Las probetas utilizadas en este estudio, se obtuvieron tras soldar un taco cuadrado de 50 mm de lado y unos 25 mm de espesor del mismo tipo de material base (DIN 30CrMo5-2 con límite elástico, $\sigma_y \approx 800 \text{ MPa}$) a una base de apoyo de unos 10 mm de espesor. El metal de aporte utilizado, es un acero inoxidable austenítico del tipo AWS A5.9-93 ER 307-15 (mod) nº 1.4370 EN 12072 G 18 8 Mn, suministrado como varilla TIG de diámetro 3.25mm, y de bobina de hilo

de diámetro 1.2 mm para la soldadura MIG. La unión entre ambas chapas [11], se llevó a cabo mediante la aplicación de una serie de cordones en ángulo alrededor de todo el perímetro de la unión. Para completar el proceso MIG, fue necesaria la aplicación de 4 cordones, mientras que, debido a las características del proceso, se necesitaron 7 en el caso de las probetas soldadas mediante TIG (Figura 24).

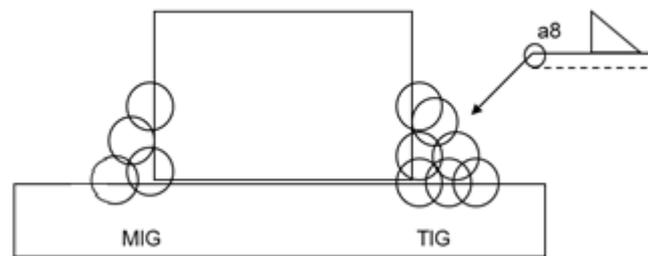


Figura 24. Geometría de las probetas utilizadas

A continuación, se procedió al corte de las mismas siguiendo la línea a trazos mostrado en la Figura 25. Las probetas obtenidas tras el proceso de corte, se muestran en la Figura 25. Como puede observarse a simple vista, se aprecia un contorno más suave en la probeta ejecutada mediante la técnica de soldeo TIG frente a la probeta MIG, en la cual el cambio de sección debido al metal de aporte, es mucho más brusco.



Figura 25. Geometría de las probetas utilizadas en el estudio antes de cortar (izquierda) y después de cortar: probetas MIG (centro) y TIG (derecha)

Por último, debido a la necesidad de aplicar técnicas de DIC para evaluar las deformaciones, las probetas fueron pintadas aplicando un moteado en negro sobre un fondo blanco, ambos

aplicados mediante la utilización de pintura acrílica mate. El objetivo de este pintado, es conseguir ciertas marcas o “referencias” con el mejor contraste entre sí en las superficies evaluadas, de tal forma que el equipo sea capaz de identificarlas para llevar a cabo la correlación de imágenes.

5.1.1.2 Ejecución del ensayo

Una vez obtenidas las probetas, se sometieron a un esfuerzo uniaxial de tracción. El proceso de carga fue realizado en una máquina universal de ensayos, servohidráulica de la firma Material Testing Systems (MTS) modelo 810 y con 100kN de capacidad de carga (Figura 26). La sujeción de las probetas se llevó a cabo en los extremos de las mismas mediante la utilización de mordazas planas hidráulicas que permiten mantener la presión constante durante el transcurso del ensayo, a fin de evitar posibles deslizamientos.

Simultáneamente a la aplicación de la carga, se realizaron medidas de deformaciones utilizando el equipo de correlación de imágenes digitales modelo ARAMIS 5M de la marca GOM. Dadas las dimensiones de las probetas, se utilizaron lentes de 50 mm de distancia focal, que tras un proceso de calibración utilizando el panel CQCCP20 30x24, permitieron obtener una zona de medida de 35x29mm.

El equipo ARAMIS, fue conectado a la unidad de control de la máquina MTS, de tal forma que para cada toma de imágenes obtenidas en el ensayo, se registra la fuerza medida por la célula de carga de la máquina MTS 810.



Figura 26. Máquina de ensayo MTS 810

5.1.2 Análisis de resultados

En la Figura 27, se recogen los resultados obtenidos en la superficie medida de las probetas. En la parte derecha se pueden ver, mediante código de color, los campos de deformaciones presentes en las zonas identificadas en la parte izquierda de la figura, para el valor de carga máximo (400 MPa para TIG y 350 MPa para MIG). La deformación representada en color rojo, corresponde a la deformación cuyo valor es más elevado, mientras que los valores más bajos se representan mediante color azul.

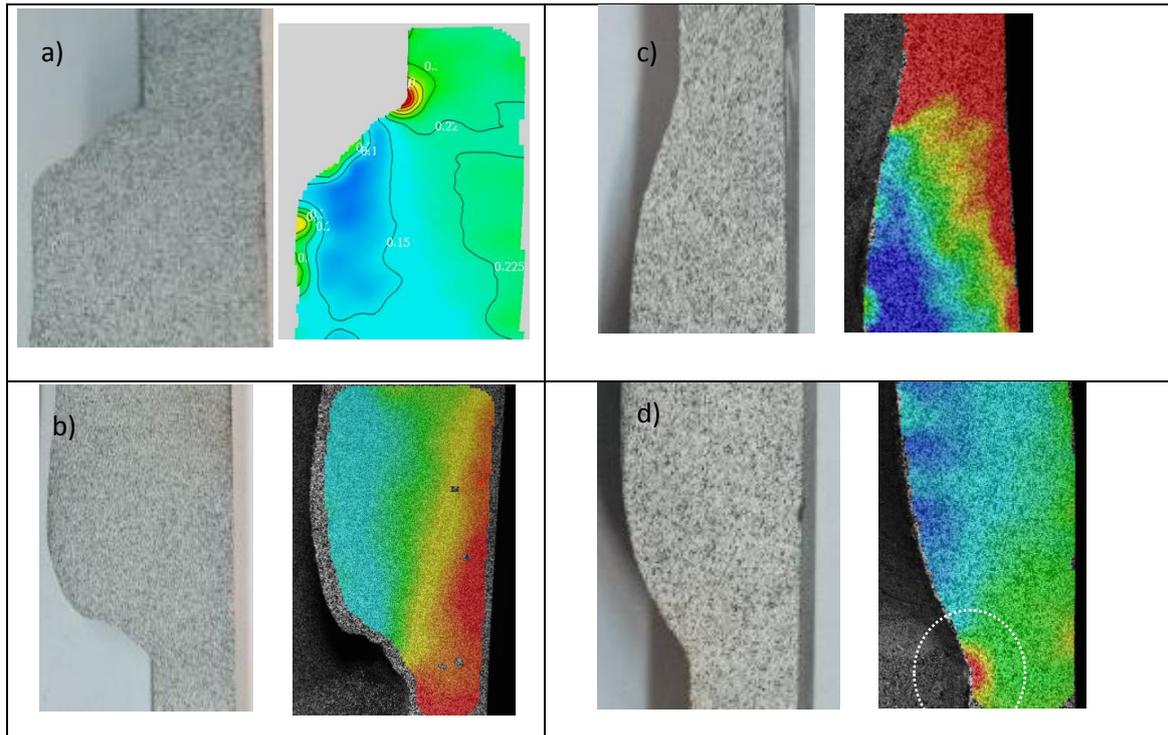


Figura 27. Campos de deformación en la superficie medida: a) y b) unión tipo MIG y c) y d) unión tipo TIG.

Como puede apreciarse, existen determinadas localizaciones en los que las deformaciones son mucho más elevadas. Los valores de deformación más elevados aparecen siempre en la zona de unión entre el primer cordón y la chapa base (pie de la soldadura). Por esta razón, se procedió a tomar los valores de deformación en esas zonas para distintos valores de carga.

A partir de los valores de carga aplicada, es posible obtener la tensión nominal, sin más que dividir por la sección transversal en el punto de medida, que en este caso se corresponde con la zona de la chapa base situada a la altura del primer cordón de soldadura.

Por otro lado, la tensión local ha sido calculada utilizando los valores de deformación experimentales, mediante el uso de la ley de Hooke y suponiendo un valor del módulo elástico, $E=205$ GPa. A partir de estos valores, mediante la expresión mostrada en la *Ecuación 11* se obtiene el valor del factor concentrador de tensiones K_t . Los resultados obtenidos se recogen, de forma gráfica, en la Figura 28. La pendiente de la relación entre la tensión local y la tensión nominal será el factor de intensidad de tensiones.

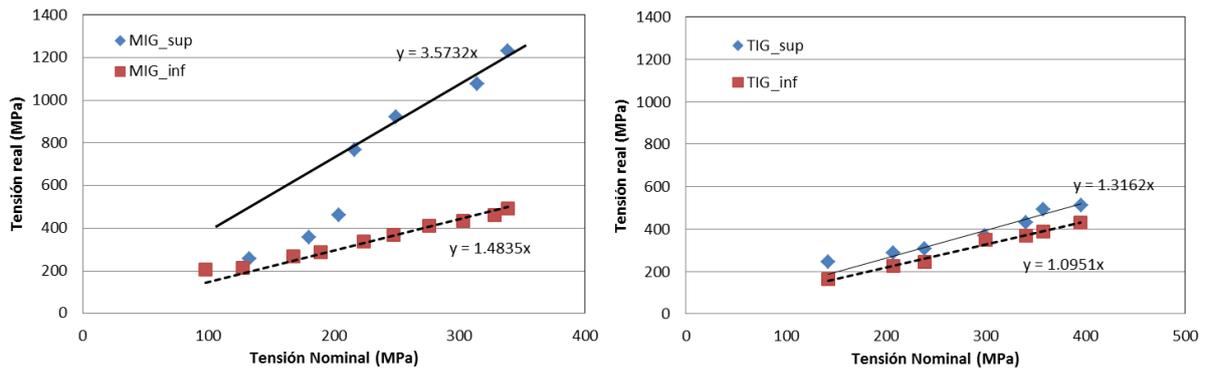


Figura 28. Relación entre la tensión nominal aplicada y la real en la zona del pie de la soldadura para las probetas MIG (izquierda) y TIG (derecha).

Una vez mostrados los resultados anteriores, puede deducirse que para las probetas MIG, por un lado, la tensión nominal no supera en ningún momento los 350 MPa, valor inferior al límite elástico del material base ($\sigma_y \approx 800 \text{ MPa}$), mientras que por otra parte, la tensión real calculada en los puntos más solicitados es muy superior, llegando a rebasar los 1200 MPa, valor próximo a la resistencia mecánica del material.

Estos valores tan elevados de deformación y por tanto de tensión local, tienen su origen en cambio brusco de sección que experimenta la probeta debido al metal de aporte en la zona de acuerdo entre el primer cordón de soldadura y el metal base, zona en la que existe un elevado ángulo en el perfil de acuerdo, tal y como se desprende de las mediciones realizadas en el cordón de soldadura mostradas en la Tabla 2. Estos resultados, están de acuerdo con los obtenidos por Lee et al [12] en los que se concluye que la vida a fatiga de un elemento resistente disminuye al aumentar el ángulo.

Tabla 2 Ángulo que forma el metal de aporte y el metal base en la zona del primer cordón de soldadura.

Probeta	Ángulo [grados]
TIG_INF	18º
TIG_SUP	26º
MIG_INF	39.5º
MIG_SUP	55º

Según los valores anteriores, puede deducirse que el valor del factor concentrador de tensiones obtenido para el perfil ejecutado mediante soldadura MIG en la zona superior (zona en la que existe un ángulo de 55º) puede considerarse igual a 3.5 (los valores iniciales no se tienen en cuenta porque están afectados por los bajos valores de carga manejados en esa zona). Por otro lado, si se observa el perfil del concentrador en la zona inferior de la probeta MIG (Figura 27, zona inferior), en el que existe una transición mucho más suave (rondando los 40º), se origina un concentrador de tensiones $K_t=1.5$, un 50% inferior al correspondiente al caso anterior.

En cuanto a los resultados obtenidos para las probetas TIG, puede observarse como existe un concentrador de tensiones muy inferior al anterior caso analizado. Mientras que en el caso de la zona superior (en la que se tiene un radio de acuerdo de 26 grados), se obtiene un factor de concentrador tensiones de 1.3, en el caso de la zona inferior, en el que existe un radio de

acuerdo de 18º se observa un incremento en las tensiones de un 10% respecto a las nominales ($K_t=1.1$).

6 CONCLUSIONES

La simplicidad y versatilidad de la aplicación de las técnicas de correlación de imágenes, ha permitido ampliar su uso en multitud de problemas en el campo de la mecánica experimental, especialmente para el estudio del comportamiento mecánico de diferentes materiales y componentes.

La técnica DIC, es capaz de obtener desplazamientos con elevada exactitud y precisión. Sin embargo, para obtener una medición exacta y precisa de estos parámetros, es necesario una buena preparación de la superficie a medir mediante la realización de un patrón de referencia, así como una buena configuración de hardware y software. La preparación de la superficie, no siempre es sencilla, sobre todo en superficies muy irregulares y delicadas, como puede ser en el caso de material biológico.

La aplicación de técnicas de correlación de imágenes digitales en la determinación de propiedades mecánicas, ha permitido obtener parámetros reales experimentales en un rango mucho más amplio al que se obtendrían si se utilizasen otras técnicas, lo que permite una mejor comprensión de su comportamiento.

Además, la aplicación de técnicas DIC en uniones complejas, en las cuales existen singularidades geométricas, permite determinar cuáles son los puntos críticos y cuantificar los efectos que éstos tienen sobre la integridad del componente.

Gracias a las ventajas que ofrece esta técnica y a su carácter eminentemente práctico, es previsible un aumento de su utilización en multitud de campos, pero especialmente en la caracterización mecánica de materiales así como en multitud de aplicaciones biomecánicas.

7 PRESUPUESTO

El presente presupuesto trata de cuantificar económicamente las horas de ingeniería destinadas a la realización del proyecto así como los gastos de material que han tenido lugar durante la realización y la documentación del mismo. Los costes se desglosan en diferentes tipos:

- Coste de materiales y material fungible.
- Coste de los equipos empleados.
- Coste de horas de ingeniería.

7.1 Coste de materiales y material fungible

Se engloban dentro de este apartado los materiales necesarios para la puesta en marcha de la parte experimental del proyecto.

Tabla 3. Coste de materiales y material fungible

Nº UD	CONCEPTO	PRECIO/UNIDAD (€)	TOTAL (€)
1	Probeta de acero S275 JR, mecanizada, para ensayo a tracción	75	75
1	Probeta de acero de alta resistencia, soldada mediante procedimiento TIG	110	110
1	Probeta de acero de alta resistencia, soldada mediante procedimiento TIG	90	90
1	Sierra de cinta bi-metal M42 (8% co)	29,90	29,90
<u>TOTAL</u>			304,9

7.2 Coste de ensayos realizados durante el proyecto

Este apartado engloba los diferentes costes debido al uso de los equipos para la realización del proyecto.

Tabla 4. Coste de ensayos

Nº UD	CONCEPTO	PRECIO/UNIDAD (€)	TOTAL (€)
6	Equipo correlación de imágenes digitales GOM ARAMIS 5M	80	480
1	Ensayos tracción MTS Synergie	50	50
5	Ensayo tracción MTS 810	60	60
1	Mediciones en microscopio	30	30
<u>TOTAL</u>			620

7.3 Horas de ingeniería

Se engloban las horas de ingeniería en tres fases:

Desarrollo experimental: Engloba el tiempo dedicado a la preparación de los ensayos así como al tiempo destinado a la realización de la parte experimental.

Análisis de resultados: comprende el tiempo dedicado al análisis de la parte experimental y a la valoración de los resultados.

Elaboración de documentación: abarca el tiempo dedicado a la búsqueda de información para conocer el estado del arte así como a la generación de documentación.

Tabla 5. Horas de ingeniería

Nº HORAS	CONCEPTO	PRECIO/HORA (€)	TOTAL (€)
80	Desarrollo experimental	20	1.600
120	Análisis de resultados	20	2.400
45	Elaboración de documentación	20	900
<u>TOTAL</u>			4.900

Tabla 6. Resumen del presupuesto

ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN				
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DE PROYECTO				
Nº	NÚMERO DE UNIDADES	DESIGNACIÓN DE LAS OBRAS	PRECIO DE LAS UNIDADES (€)	PRECIOS TOTALES
1	-	Materiales y material fungible	-	304,90
2	-	COSTE DE EQUIPOS	-	620
3	245	HORAS DE INGENIERÍA	20	4.900
Total antes de beneficios e impuestos (€)				5.824,9
BENEFICIO INDUSTRIAL en € (6%)				349,44
TOTAL ANTES DE IMPUESTOS en €				6.173,44
Impuestos en € (21% de I.V.A)				1.296,42
TOTAL EN €				7.469,86
El presupuesto de ejecución de este proyecto asciende a la cantidad de SIETE MIL CUATROCIENTOS SESENTA Y NUEVE EUROS CON OCHENTA Y SEIS CÉNTIMOS Gijón, 21 de Julio de 2016				

REFERENCIAS

- [1] Grässer, O., et al. "High strength Fe–Mn–(Al, Si) TRIP/TWIP steels development—properties—application." *International Journal of Plasticity* 16.10 (2000): 1391-1409.
- [2] Anon. Gilbert Louis Hobrough. *The Photogrammetric Record*, 18(104):337–340, 2003.
- [3] A. Rosenfeld. From image analysis to computer vision: An annotated bibliography, 1955-1979. *Computer Vision and Image Understanding*, 84:298–324, 2001.
- [4] Palanca, M., Tozzi, G., & Cristofolini, L. (2016). The use of digital image correlation in the biomechanical area: a review. *International biomechanics*, 3(1), 1-21.
- [5] Sutton, M. A., Orteu, J. J., & Schreier, H. (2009). *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*. Springer Science & Business Media.
- [6] Nordin, M., & Frankel, V. H. (2004). *Biomecánica de los tendones y ligamentos. Biomecánica Básica del Sistema Musculoesquelético*. (3ªEd). McGrawHill-Interamericana. Madrid.
- [7] EN 1993-1-9:2005. Eurocode 3: design of steel structures – Part 1–9: fatigue. European Committee of Standardization.
- [8] WILLIAMS, H. E., et al. *The effects of weld geometry on the fatigue behavior of welded connections*. University of Illinois Engineering Experiment Station. College of Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign., 1970
- [9] Nguyen, T. Ninh, and Muhammad Abdul Wahab. "The effect of weld geometry and residual stresses on the fatigue of welded joints under combined loading." *Journal of Materials Processing Technology* 77.1 (1998): 201-208.
- [10] Y. X. Yu, B. L. He, H. H. Yu, J. P. Shi, "Research about the Effect of Residual Stress on the Fatigue Life of Cruciform Joint of 16MnR Steel", *Advanced Materials Research*, Vol. 382, (2011) 400-403. Pfaffikon Switzerland, Trans Tech Publications Ltd.
- [11] J. G. Cabezas, G. Ismael, C. Rodríguez. Nuevas metodologías aplicadas para incrementar la vida a fatiga de las uniones soldadas. III International Congress & 21st technical sessions on welding and Joining Technologies, Gijón, 17-19 Mayo 2016.
- [12] Lee, Chin-Hyung, et al. "Effect of weld geometry on the fatigue life of non-load-carrying fillet welded cruciform joints." *Engineering Failure Analysis* 16.3 (2009): 849-855.