

Universidad Nacional de Córdoba  
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales  
Facultad de Ciencias Médicas  
Ingeniería Biomédica

**Medición óptica de deformación de tejidos biológicos  
usando correlación de imágenes digitales para la  
caracterización mecánica del mismo**



Alumnos:

Adamow, Marcos - Matrícula 41.789.719

Contarde, Martín Alejandro - Matrícula 42.126.087

Asesores:

Schneider, Ernesto Matías

Cortese, Ignacio



Córdoba, Octubre de 2023

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>2</b>
2.1. Objetivos generales . . . . .	2
2.2. Objetivos específicos . . . . .	2
<b>3. Marco Teórico</b>	<b>3</b>
3.1. Generalidades . . . . .	3
3.1.1. Definiciones . . . . .	3
3.1.2. Deformabilidad . . . . .	4
3.1.3. Elasticidad, plasticidad y rotura . . . . .	5
3.1.4. Gráfica tensión-deformación . . . . .	6
3.1.5. Tensores de Cauchy y de Green-Lagrange . . . . .	7
3.1.6. Interpretación física del tensor de Cauchy y de Green Lagrange . . . . .	10
3.2. Correlación de imágenes digitales y elección de una librería . . . . .	11
3.2.1. Requisitos planteados . . . . .	11
3.2.2. NCorr DIC . . . . .	12
3.2.3. Py2DIC . . . . .	12
3.2.4. $\mu$ DIC . . . . .	12
3.2.5. Elección del software . . . . .	13
3.3. Paquetes accesorios de $\mu$ DIC . . . . .	14
3.3.1. Paquete IO . . . . .	14
3.3.2. Paquete VirtualLab . . . . .	14
3.4. Paquetes de procesamiento y correlación de DIC . . . . .	15
3.4.1. Funciones B-spline . . . . .	15
3.4.2. Mallador . . . . .	15

3.4.3. Correlacionador . . . . .	16
3.4.4. Post Procesado . . . . .	17
3.5. Andamios de celulosa . . . . .	18
<b>4. Métodos y procedimientos iniciales</b>	<b>22</b>
4.1. Estado del arte . . . . .	22
4.2. Curación de datos . . . . .	23
4.3. Descomposición de videos de ensayos en fotogramas . . . . .	24
4.4. Configuración de grabación para DIC . . . . .	24
4.5. Método de preparación de probetas y muestras para realizar los ensayos . . . . .	27
4.5.1. Proceso de corte de las probetas . . . . .	27
4.5.2. Proceso de moteado de las probetas . . . . .	28
<b>5. Ensayos y validación</b>	<b>31</b>
5.1. Primer ensayo . . . . .	31
5.2. Segundo ensayo . . . . .	32
5.3. Validación 1: HIPS y aluminio . . . . .	34
5.3.1. Análisis de los datos . . . . .	36
5.3.2. Ensayo en aluminio considerando el tiempo inicial a los 12 segundos . . . . .	37
5.4. Validación 2: Poliestireno y aluminio . . . . .	38
5.5. Análisis estadístico de la validación 2 . . . . .	43
5.6. Gráficas de tensión-deformación y cálculo del módulo de Young . . . . .	45
5.7. Estudio de la distribución de la deformación a lo largo del material . . . . .	47
<b>6. Aplicación a muestras biológicas del método</b>	<b>52</b>
6.1. Metodología del ensayo en hojas de espinaca sin descelularizar . . . . .	52
6.2. Metodología del ensayo en hojas de espinaca descelularizada . . . . .	53
6.3. Resultados y discusión . . . . .	54

<b>7. Conclusiones</b>	<b>63</b>
<b>8. Trabajos Futuros</b>	<b>65</b>
8.1. Implementar la correlación de imágenes 3D o estéreo-DIC . . . . .	65
8.2. Correlacionar los valores de deformación obtenidos con una celda de carga de mayor resolución y menor fondo de escala . . . . .	65
8.3. Implementar el método DIC en otro tipo de ensayos, como compresión y fatiga . . . . .	66
8.4. Adquirir una cámara de mejor resolución y lentes ópticos . . . . .	66
<b>9. Bibliografía y Referencias</b>	<b>67</b>
<b>10. Anexo A: Código de python para DIC</b>	<b>70</b>
<b>11. Anexo B: Instructivo de ensayo</b>	<b>75</b>
<b>12. Anexo C: Instructivo de procesamiento de video en software de DIC</b>	<b>76</b>

# Agradecimientos

La carrera la hace uno, pero sería imposible sin la gente que está atrás bancando cada paso, festejando los logros y acompañando cuando las cosas no salen tan bien, por eso queremos agradecer a nuestras familias, amigos y compañeros con los que vivimos esta etapa y compartimos tantos momentos.

También, queremos agradecer a la Universidad Nacional de Córdoba y a los profesores que nos aportaron su experiencia y conocimiento a lo largo de la carrera, alimentando esa curiosidad y pasión por la ciencia y la ingeniería. Como dijo el Dr. Rick Sanchez, a veces la ciencia es más arte que ciencia.

# Resumen

En este proyecto integrador de Ingeniería Biomédica se implementó un método de correlación de imágenes digitales (DIC) para la medición de deformaciones en el Laboratorio de Materiales de la FCEFYN. Uno de los objetivos particulares del proyecto es utilizar este método para caracterizar mecánicamente hojas de espinaca descelularizada.

En una primera instancia se estudió la implementación y validación del método de DIC mediante un software en Python con la librería  $\mu$ DIC [1] de código abierto. Para la validación se ensayaron cinco probetas de aluminio 3003 H14 utilizando simultáneamente una máquina de ensayos de tracción convencional de la marca QCTech, modelo QC-506B1 y el método de DIC aquí desarrollado.

Se utilizó la máquina de ensayos uniaxiales, que permite aplicar deformaciones a velocidad constante, para validar el método de DIC por medio de la comparación de las pendientes obtenidas con cada uno de estos métodos. Es decir, se contrastan los valores entregados por la máquina de ensayos y el de DIC, utilizando los primeros como valores de referencia. Esto resultó en una validación satisfactoria donde el desvío estándar relativo (DER %) de las mediciones por DIC respecto a la máquina de ensayos fue del 2,85 %.

Se realizaron análisis para mostrar el potencial del método como gráficos de distribución de la fuerza a lo largo de la probeta, la caracterización del alargamiento a ruptura de materiales y gráficos de tensión-deformación que permiten el cálculo del módulo de Young de dichos materiales por medio de la pendiente de la zona elástica de las curvas obtenidas.

Por último, se implementó el método para la caracterización mecánica de hojas de espinaca descelularizada a tracción, obteniéndose resultados para alargamiento a ruptura, gráficos de tensión-deformación y el módulo de Young de cada muestra.

Basándonos en los resultados obtenidos en este estudio podemos decir que el DIC es un método válido de medición de deformaciones en ensayos de tracción que aporta información precisa para la determinación de características mecánicas de tejidos biológicos y que además permite obtener información complementaria de dichas características como la distribución de deformaciones.

## Palabras clave

**Correlación de imágenes digitales (DIC) - espinaca descelularizada - ingeniería de tejidos - caracterización mecánica**

# Abstract

In this biomedical engineering integrative project, digital image correlation (DIC) was implemented as a deformation measurement method in the Materials Laboratory of the FCEfyN - UNC.

In the first stage, the implementation and validation of the method was studied. The DIC was implemented by a Python software using the open-source muDIC library. For the validation, a series of five 3003 H14 aluminum specimens were tested by using a conventional tensile machine and the developed DIC method simultaneously.

By allowing the testing machine to apply deformations at constant speed, the method was validated by comparing the slopes obtained with the known slope applied by the machine, resulting in a satisfactory validation where the relative standard deviation (RSD %) of the DIC measurements with respect to the testing machine was 2.85 %.

Several analyses were performed to demonstrate the potential of the method, such as force distribution graphs along the specimen, analysis of the characterization of the elongation at break of materials and correlation of the measured deformation with data obtained from a load cell to obtain stress-strain graphs and calculation of Young's modulus by means of the slope of the elastic zone of the graph.

Finally, the method for the mechanical characterization of decellularized spinach leaves under tensile stress, obtaining the results of elongation at break, making stress-strain graphs and calculating the elastic modulus of each sample.

Based on the results obtained in this study, we can say that DIC is a valid method for measuring deformations in tensile tests that provides accurate information for the determination of mechanical characteristics of biological tissues and also allows obtaining complementary information on these characteristics such as the distribution of deformations.

## Keywords

**Digital image correlation (DIC), decellularized spinach, tissue engineering, mechanical characterization**

# 1. Introducción

El trabajo realizado en el proyecto integrador que aquí se reporta buscó aportar una herramienta al Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFYN) de la Universidad Nacional de Córdoba con potenciales aplicaciones, en particular, para la caracterización de biomateriales. El trabajo se realizó con un enfoque multidisciplinario, integrando áreas como lo pueden ser la Ingeniería Biomédica y Mecánica donde se implementó un método de medición de deformaciones sin contacto por medio de un software de código abierto de correlación digital de imágenes cuyo objetivo final es poder caracterizar mecánicamente hojas de espinaca descelularizada, mostrando así la utilidad y potencial del método en la biomedicina, ya que la caracterización mecánica de tejidos o de biomateriales es fundamental en el estudio de sus posibles aplicaciones y en su valoración [2] [3].

Los métodos de medición sin contacto surgen como una alternativa para evaluar propiedades mecánicas de tejido blando sin perturban las mismas. Además, la técnica de medición de deformaciones por imágenes de un biomaterial o tejido permite estudiar la anisotropía y distribución de las deformaciones, algo que resulta particularmente interesante en el campo de los tejidos dada la heterogeneidad en la distribución de fuerzas en ellos [4].

En este informe se describe el proceso de desarrollo e implementación del método utilizado junto con los procesos de validación del mismo para determinar la calidad de las mediciones de deformaciones que permite realizar. Se describe también la aplicación del mismo a la caracterización mecánica de muestras de un tejido de hoja de espinaca descelularizada producidas y estudiadas por el Laboratorio de Química Orgánica y Biológica de la FCEFYN.

El método desarrollado puede usarse como alternativa de medición de deformaciones de bajo costo y novedosa, complementaria a la obtenida en los ensayos de tracción convencionales realizados con máquinas de ensayo estandarizadas. El método fue desarrollado con elementos accesibles, entre ellos una cámara de teléfono inteligente, software libre (Python) y librerías de acceso libre y/o de código abierto para el mismo.

El desarrollo del proyecto se hizo en tres bloques. El primero consistió en determinar y construir el método a ser utilizado en torno a la librería de Python  $\mu$ DIC lo que se desarrolla en el capítulo "Metodos y procedimientos iniciales"(ver capítulo 4). El segundo bloque se corresponde a la validación de las mediciones realizadas con el método, asociándolas a un patrón conocido convencional, en el capítulo "Ensayos y validación"(ver capítulo 5). Por último se asigna un capítulo a la aplicación del método al tejido de hoja de espinaca descelularizada para el estudio de sus características mecánicas (ver capítulo 6).

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivos generales**

Como objetivos de este proyecto debemos mencionar, en primera instancia, el desarrollo de un código utilizando la librería  $\mu$ DIC que permita el procesado de vídeos y nos entregue mapas de calor de deformación y tablas con los valores de deformación en cada instante de los videos. El código utilizado es de desarrollo propio incorporando como herramienta la librería  $\mu$ DIC (desarrollado por la Norwegian University of Science and Technology [1]) como herramienta de análisis para medir deformaciones.

Con el objeto de validar el método se realizaran estudios comparativos entre los datos obtenidos por el DIC y los datos obtenidos por un ensayo convencional de tracción.

El método desarrollado se aplicará al estudio de muestras biológicas con el objetivo de caracterizarlas mecánicamente.

### **2.2. Objetivos específicos**

El presente proyecto integrador tiene como objetivos específicos los siguientes:

- Implementar y validar el método de medición mediante la realización de ensayos de tracción en distintos tipos de materiales.
- Caracterizar y estudiar las propiedades mecánicas de andamios celulosa descelularizada producidos en la FCEFyN.
- Integrar los conocimientos adquiridos en materias como Biomateriales y Procesamiento de señales.

### 3. Marco Teórico

En esta sección del informe se desarrollan diversos conceptos teóricos cuya interiorización ayuda a la comprensión del mismo. La misma está dividida en tres partes, siendo la primera conceptos teóricos generales de mecánica, en la segunda parte se desarrolla sobre el método de medición implementado y por último se describe el material biológico y su caracterización mecánica.

#### 3.1. Generalidades

##### 3.1.1. Definiciones

Para una correcta comprensión de la caracterización mecánica de materiales, es necesario introducir una serie de definiciones centrales sobre el tema. Dicho esto, es posible definir y diferenciar entre los conceptos Deformación nominal y real y Tensión nominal y real, los cuales son importantes en el campo de la mecánica de materiales ya que ayudan a describir el comportamiento de los materiales bajo carga y a comprender como se deforman y estresan [5].

- **Deformación Nominal:** también conocida como deformación ingenieril, es la deformación sufrida por el material por unidad de longitud en un ensayo de tracción. Se expresa generalmente como un porcentaje.

$$\epsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (1)$$

Donde  $L_f$  es la longitud final del material y  $L_0$  es la longitud original del material.

- **Deformación Real:** es una medida más precisa de la deformación experimentada por un material cuando se somete a carga, especialmente en el caso de grandes deformaciones, ya que se calcula teniendo en cuenta la longitud instantánea o actual del material en cada punto a lo largo de su longitud. Es posible calcularla como el logaritmo natural de la deformación nominal.

$$\epsilon_{real} = \ln\left(\frac{L_f - L_0}{L_0}\right) = \ln(1 + \epsilon) \quad (2)$$

- **Tensión Nominal:** también conocida como tensión ingenieril, es la fuerza aplicada sobre la sección transversal inicial de la muestra.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3)$$

Donde  $A_0$  es la sección transversal inicial del material y  $F$  es la carga o fuerza aplicada sobre este.

- **Tensión Real:** es la fuerza aplicada sobre la sección final o actual de la muestra.

$$\sigma_{real} = \frac{F}{A} \quad (4)$$

Donde  $A$  es la sección transversal actual del material.

### 3.1.2. Deformabilidad

Cuando se busca seleccionar un material para implementarlo en una aplicación determinada, este debe ser seleccionado en base a las propiedades definidas en su caracterización [6]. Una de ellas es la caracterización mecánica, que resulta fundamental a la hora de predecir el comportamiento del material cuando sea sometido a fuerzas, estableciendo el equilibrio o movimiento de los sistemas físicos. Las propiedades de los materiales permiten también definir las aplicaciones de los mismos y la comparación entre ellos para analizar la relación costo-beneficio entre uno y otro, actividades fundamentales en la ingeniería. Ante una acción, todo cuerpo (y por ende, el material del que está hecho) puede responder de dos formas:

- Adquiere una aceleración proporcional a su masa, respondiendo a las leyes de Newton, que no es el caso a analizar en este ensayo.
- Se deforman almacenando energía que compensa el trabajo efectuado por la acción al deformar el propio cuerpo.

Por lo tanto, una de las propiedades que resulta fundamental a la hora de hablar de materiales, es la deformabilidad. Para analizar la deformabilidad de cada material de forma cuantitativa debemos establecer la relación entre la acción aplicada y el grado de deformación sufrido por la pieza.

Definimos, entonces, deformabilidad, como la capacidad de un material de cambiar de forma ante una modificación en el estado tensional del mismo, es decir, ante la acción de cargas externas aplicadas a él.

Estas deformaciones provocan en las distintas secciones del material aproximaciones, separaciones y deslizamientos de las moléculas que delimitan la acción. Esto es lo que se conoce como esfuerzo y es lo que entendemos como tracción, compresión, cizallamiento, etc. La tensión es el valor que se obtiene al dividir la Fuerza aplicada sobre la propiedad geométrica que se opone a la acción. Por lo tanto, en los casos de tracción y compresión, la propiedad geométrica es la sección transversal perpendicular a la acción.

$$\sigma = \frac{F[N]}{A[m^2]} \quad (5)$$

Si hablamos de deformación en esfuerzos axiales (tracción y compresión), se debe mencionar el módulo de Young (E). Esta es una característica mecánica de cada material la cual es una medida de la relación entre la tensión y la deformación en la región elástica del mismo. Ésta relación de la tensión con la deformación se da de la siguiente manera:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (6)$$

Esta ecuación que relaciona tensión y deformación en la región elástica de un material es conocida como Ley de Hooke.

### 3.1.3. Elasticidad, plasticidad y rotura

Cuando se caracteriza la capacidad de deformación de un material, es muy importante definir su elasticidad y su plasticidad para evaluar sus aplicaciones y las cargas a soportar que tendrá el material.

Entendemos por elasticidad a la “capacidad de un material de contraerse, de dilatarse, de deformarse bajo un determinado esfuerzo (compresión, tracción, flexión, etc) y recuperar su forma y su volumen primitivo cuando cesa esta acción” [6]. Es decir, es la capacidad que tiene un cuerpo de deformarse de manera reversible.

Por otro lado, se entiende por plasticidad a la “capacidad de un material de contraerse, de dilatarse, de deformarse bajo un determinado esfuerzo (compresión, tracción, flexión, etc) y conservar indefinidamente esta deformación cuando cesa la acción que la ha provocado” [5]. Por lo tanto, en este caso se habla de una deformación irreversible.

Estas características de los materiales están determinadas por las tensiones a las que se someten, y todos ellos exhiben un comportamiento elástico hasta cierto punto en función de la tensión aplicada. Este punto de transición, en el cual el material deja de comportarse elásticamente y comienza a deformarse plásticamente, se denomina límite elástico. El límite elástico representa la tensión máxima admisible para aplicaciones del material si se desea que la deformación experimentada sea completamente reversible.

Si se sobrepasa el límite elástico, es decir tenemos un comportamiento plástico por parte del material, y seguimos aumentando la tensión a la que está sometido nuestro material y por ende las deformaciones, eventualmente llegaremos al punto de rotura en la que nuestro material se descompone en dos o más unidades. Este punto es caracterizado por la tensión de rotura o deformación de rotura.

Habiendo definido estos tres conceptos generales y comprendiendo los dos límites vistos, se pueden visualizar representados en una gráfica que relacione la tensión a la que se ve sometido el material y la deformación que presenta.

### 3.1.4. Gráfica tensión-deformación

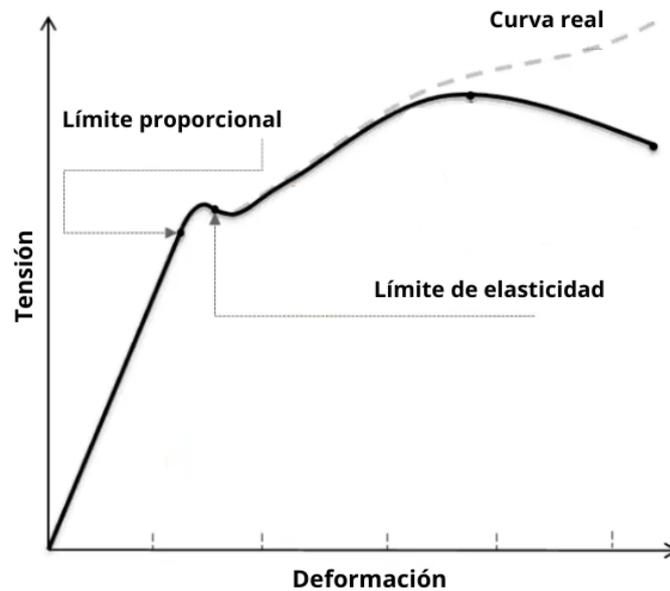


Figura 1: Curva teórica de Tensión-Deformación. Fuente: "material-properties.org"(2023)

[7].

Este gráfico (fig. 1) correlaciona los datos obtenidos en un ensayo de tracción realizado sobre un acero de bajo carbono, teniendo en el eje de abscisas a la deformación sufrida por el material y en ordenadas la tensión a la que es sometido el mismo [7].

Si bien esta gráfica se corresponde con la deformación sufrida por un acero de bajo carbono, es comúnmente utilizada para desarrollar los conceptos vistos anteriormente ya que presenta gran parte de las etapas que un material puede sufrir en un ensayo de tracción.

En una primera instancia, la gráfica muestra una relación lineal entre tensión y deformación hasta el límite de proporcionalidad, donde la relación comienza a presentar curvaturas. Durante esta primera etapa se considera que el material se mantiene dentro de la región elástica, por lo que todo el proceso es reversible. También, en esta región se mantiene la relación establecida por la ley de Hooke (eq. 6) entre tensión y deformación.

A partir del límite de proporcionalidad comienza la zona plástica, donde un aumento en la tensión implica un proceso irreversible y el cuerpo no volverá a sus dimensiones originales. Como se puede ver en la gráfica, en un comienzo existe una zona de fluencia y luego la curva continúa hasta llegar al límite de máxima resistencia a la tracción. En este punto, si se continúa aplicando tensión, eventualmente el material comenzará a ceder, reducirá la tensión ejercida y se producirá una fractura. Eventualmente se alcanza el punto de fractura, donde el material se separa físicamente. En este punto, la deformación es máxima y el material se separa pero la tensión puede ser menor a la tensión ejercida en el punto de máxima resistencia a la tracción.

### 3.1.5. Tensores de Cauchy y de Green-Lagrange

A continuación se describe un desarrollo resumido de los Tensores de Cauchy y de Green-Lagrange en los cuales se basa matemáticamente el método de correlación de imágenes digitales para el cálculo del alargamiento unitario. Es aconsejado consultar la bibliografía correspondiente para mayor detalle [8] [9].

Se considera una partícula  $P$  en la configuración de referencia  $\Omega_0$ , y que ocupa el punto  $P'$  en la configuración actual  $\Omega_t$ , y una partícula  $Q$  situada en un entorno diferencial de  $P$  y cuyas posiciones relativas respecto de esta, en los instantes de referencia y actual, vienen dadas por  $d\mathbf{X}$  y  $d\mathbf{x}$  (fig. 2).

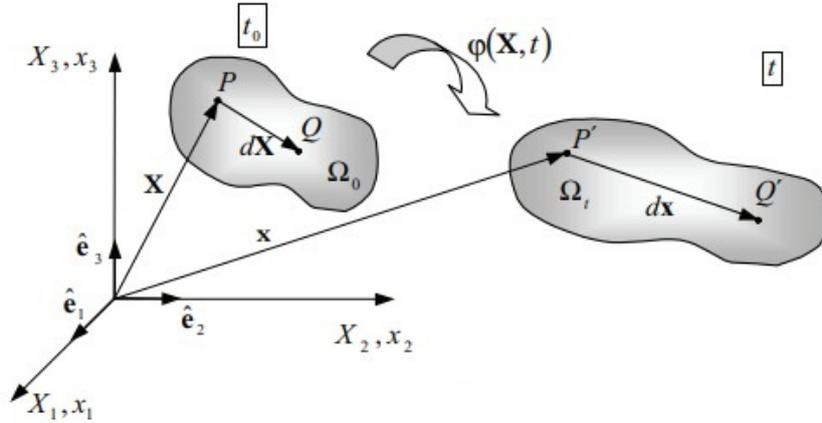


Figura 2: Esquemmatización de cuerpo bajo deformación. Fuente: Olivelli y Agelet (2000). [9]

Planteando las ecuaciones de movimiento:

$$\mathbf{x} = \varphi(\mathbf{X}, t) \quad (7)$$

$$x_i = \varphi_i(X_1, X_2, X_3, t) \quad (8)$$

Diferenciando con respecto a las coordenadas materiales  $\mathbf{X}$  resulta la ecuación fundamental de la deformación.

$$dx_i = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} dX_j \quad (9)$$

$$d\mathbf{x} = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{X} \quad (10)$$

Esta última ecuación define el tensor gradiente material de deformación.

$$F_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial X_j} \quad (11)$$

El tensor gradiente de deformación  $\mathbf{F}(\mathbf{X}, t)$ , contiene la información del movimiento relativo, a lo largo del tiempo  $t$ , de todas las partículas materiales en el entorno diferencial de una posición dada, identificada por sus coordenadas materiales  $\mathbf{X}$ . En efecto, proporciona la evolución del vector de posición relativa  $d\mathbf{x}$  en función de la correspondiente posición relativa  $d\mathbf{X}$  en el instante de referencia. En este sentido, si se conoce el valor de  $\mathbf{F}(\mathbf{X}, t)$  se dispone de la información asociada al concepto general de la deformación.

Se considera ahora una partícula del medio continuo, que ocupa el punto del espacio  $P$  en la configuración material, y otra partícula  $Q$  de su entorno diferencial separada de la anterior por el segmento  $d\mathbf{X}$  (de longitud  $dS = \sqrt{d\mathbf{X}d\mathbf{X}}$ ) siendo  $d\mathbf{x}$  (de longitud  $ds = \sqrt{d\mathbf{x}d\mathbf{x}}$ ) su homólogo en la configuración actual. Ambos vectores diferenciales están relacionados por el tensor gradiente de deformación  $\mathbf{F}(\mathbf{X}, t)$  mediante (fig. 3):

$$d\mathbf{x} = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{X} \quad (12)$$

$$dx_i = F_{ij}dX_j \quad (13)$$

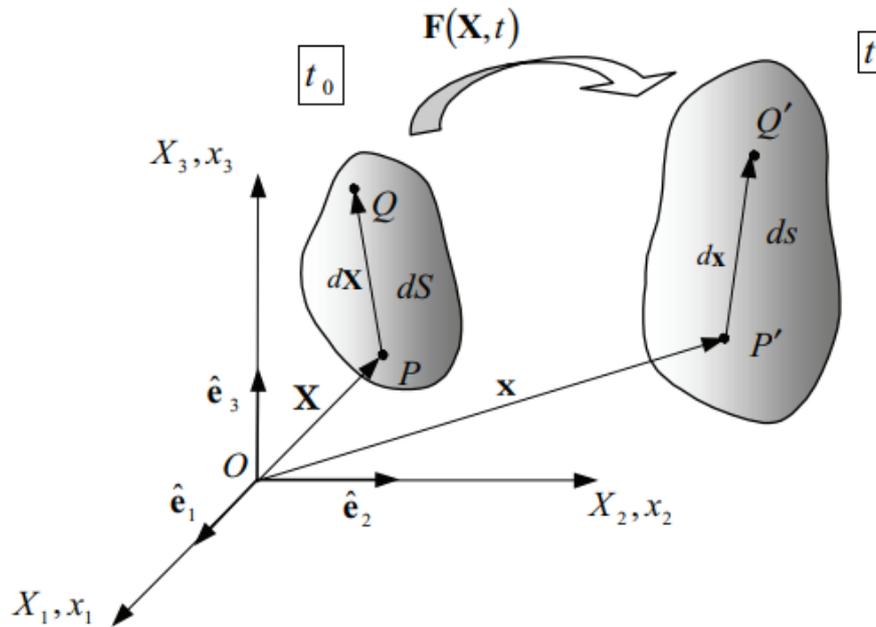


Figura 3: Representación de deformación diferencial. Fuente: Olivelli y Agelet (2000). [9].

Puede escribirse entonces:

$$(ds)^2 = d\mathbf{x} \cdot d\mathbf{x} = [d\mathbf{x}]^T \cdot [d\mathbf{x}] = [\mathbf{F} \cdot d\mathbf{X}]^T \cdot [\mathbf{F} \cdot d\mathbf{X}] = d\mathbf{X} \cdot \mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F} \cdot d\mathbf{X} = d\mathbf{X} \cdot \mathbf{C} \cdot d\mathbf{X} \quad (14)$$

$$(ds)^2 = dx_k \cdot dx_k = F_{ki} \cdot dX_i \cdot F_{kj} \cdot dX_j = dX_i \cdot F_{ki} \cdot F_{kj} \cdot dX_j = dX_i \cdot F_{ik}^T \cdot F_{kj} \cdot dX_j \quad (15)$$

El tensor de deformación de Cauchy  $\mathbf{C} = \mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F}$  es un tensor simétrico.

$$(dS)^2 = d\mathbf{X} \cdot d\mathbf{X} = [d\mathbf{X}]^T \cdot [d\mathbf{X}] = [\mathbf{F}^{-1}d\mathbf{x}]^T \cdot [\mathbf{F}^{-1} \cdot d\mathbf{x}] = d\mathbf{x} \cdot \mathbf{F}^{-T} \cdot \mathbf{F}^{-1} \cdot d\mathbf{x} \quad (16)$$

$$(dS)^2 = dX_k \cdot dX_k = F_{ki}^{-1} \cdot dx_i \cdot F_{kj}^{-1} \cdot dx_j = dx_i \cdot F_{ki}^{-1} \cdot F_{kj}^{-1} \cdot dx_j = dx_i \cdot F_{ik}^{-T} \cdot F_{kj}^{-1} \cdot dx_j \quad (17)$$

$$(ds)^2 - (dS)^2 = d\mathbf{X} \cdot \mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F} \cdot d\mathbf{X} - d\mathbf{X} \cdot d\mathbf{X} = d\mathbf{X} \cdot \mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F} \cdot d\mathbf{X} - d\mathbf{X} \cdot \mathbf{1} \cdot d\mathbf{X} \quad (18)$$

$$(ds)^2 - (dS)^2 = d\mathbf{X} \cdot (\mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F} - \mathbf{1}) \cdot d\mathbf{X} = 2 \cdot d\mathbf{X} \cdot \mathbf{E} \cdot d\mathbf{X} \quad (19)$$

Donde  $\mathbf{E}$  se denomina tensor material de deformación o tensor de deformación de Green-Lagrange.

$$\mathbf{E}(\mathbf{X}, t) = \frac{1}{2} \cdot (\mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F} - \mathbf{1}) \quad (20)$$

Estiramiento: en el punto material  $P$  (o en el punto espacial  $P'$ ) en la dirección material  $T$  (o en la dirección espacial  $t$ ) es la longitud del segmento diferencial deformado  $\overline{P'Q'}$  por unidad de longitud del segmento diferencial original  $\overline{PQ}$  (fig. 4).

Considérese ahora una partícula  $P$  en la configuración de referencia y otra partícula  $Q$ , situada en un entorno diferencial de  $P$  (fig. 4).

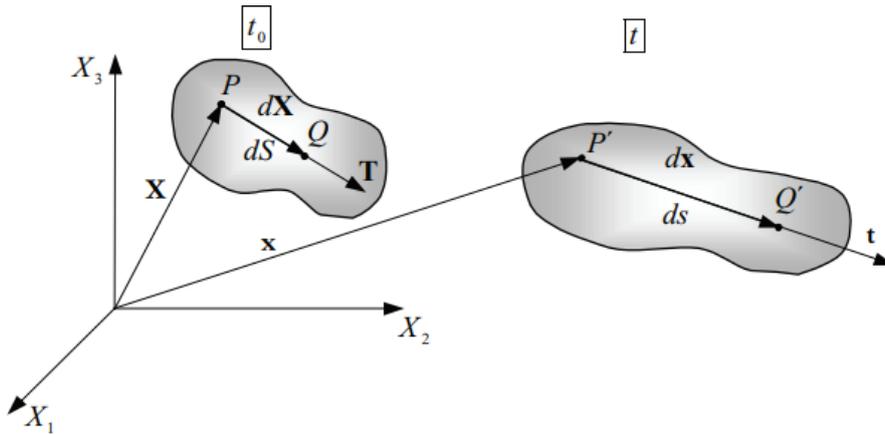


Figura 4: Diferencial de deformación en un tiempo  $t$  respecto a un tiempo  $t_0$ . Fuente: Olivelli y Agelet (2000).

[9].

Las correspondientes posiciones en la configuración actual vienen dadas por los puntos del espacio  $P'$  y  $Q'$  de tal forma que la distancia entre ambas partículas en la configuración de referencia,  $dS$ , se transforma en  $ds$  en el instante actual. Sean  $\mathbf{T}$  y  $\mathbf{t}$  vectores unitarios en las direcciones  $\overline{PQ}$  y  $\overline{P'Q'}$ , respectivamente.

$$\text{Estiramiento} = \lambda_T = \lambda_t = \frac{\overline{P'Q'}}{\overline{PQ}} = \frac{ds}{dS} \quad (21)$$

Alargamiento unitario: en el punto material  $P$  (o en el punto espacial  $P'$ ) en la dirección material  $\mathbf{T}$  (o en la dirección espacial  $\mathbf{t}$ ) es el incremento de la longitud del

segmento diferencial deformado  $\overline{P'Q'}$  por unidad de longitud del segmento diferencial original  $\overline{PQ}$ .

$$\text{Alargamiento unitario} = \epsilon_T = \epsilon_t = \frac{\Delta \overline{P'Q'}}{\overline{PQ}} = \frac{ds - dS}{dS} \quad (22)$$

También podemos relacionar estas propiedades con los tensores de deformación considerando que  $d\mathbf{X} = \mathbf{T} \cdot dS$  y  $d\mathbf{x} = \mathbf{t} \cdot ds$ :

$$(ds)^2 - (dS)^2 = 2d\mathbf{X} \cdot \mathbf{E} \cdot d\mathbf{X} = 2(dS)^2 \mathbf{T} \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{T} \quad (23)$$

Y dividiendo por  $(dS)^2$ :

$$\left(\frac{ds}{dS}\right)^2 - 1 = \lambda^2 - 1 = 2 \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{T} \Rightarrow \lambda = \sqrt{1 + 2 \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{T}} \quad (24)$$

$$\left(\frac{ds}{dS}\right)^2 - 1 = \lambda^2 - 1 = 2 \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{T} \Rightarrow \epsilon = \lambda - 1 = \sqrt{1 + 2 \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{T}} - 1 \quad (25)$$

El tensor material de deformación contiene información sobre los estiramientos y alargamientos unitarios para cualquier dirección en un entorno diferencial de una partícula dada.

### 3.1.6. Interpretación física del tensor de Cauchy y de Green Lagrange

La expresión que define el tensor de Cauchy se puede transformar en:

$$\mathbf{T} \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{T} = \frac{(ds)^2}{(dS)^2} = \lambda^2 \quad (26)$$

Donde  $\lambda$  es el alargamiento relativo. Por otra parte, a partir de la expresión correspondiente al tensor de Green-Lagrange se tiene:

$$\mathbf{T} \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{T} = \frac{(ds)^2 - (dS)^2}{2(dS)^2} = \frac{\lambda^2 - 1}{2} \quad (27)$$

Para tener una interpretación física de esta última expresión podemos operar sobre la ecuación (27):

$$\frac{(ds)^2 - (dS)^2}{2(dS)^2} = \frac{ds - dS}{dS} \frac{ds + dS}{dS + dS} \quad (28)$$

La primera fracción es el alargamiento unitario ingenieril. La segunda fracción es, en general, distinta de 1. Sin embargo, si las deformaciones del medio son pequeñas, su valor será próximo a la unidad. Por lo tanto, el tensor de Green-Lagrange,  $\mathbf{E}$ , mide el alargamiento unitario en la teoría de pequeñas deformaciones [10].

## 3.2. Correlación de imágenes digitales y elección de una librería

La correlación de imágenes digitales es el método de medición de deformaciones que se implementó a lo largo de éste proyecto. Este método de medición óptica es capaz de determinar la deformación en la superficie de una probeta que es sometida a una fuerza [11]. Para lograr medir correctamente la deformación con este método, se deben obtener imágenes digitales de la probeta con sus dimensiones originales e imágenes tomadas a lo largo del ensayo de deformación (en el caso de este trabajo son ensayos de tracción). Además, la probeta debe tener un moteado en su superficie que se contraste de forma correcta con el color de la probeta. De esta manera, durante el procesado, el software es capaz de dividir la imagen en subgrupos los cuales son identificados por el moteado contenido en ese área en particular y se realiza una correlación de la posición de estos subgrupos en la imagen anterior, es decir, un análisis del denominado flujo óptico [12].

Si bien no es un método sumamente complejo, su implementación requiere de una serie de pasos que deben ser cumplidos para que se posibilite un buen rendimiento del mismo, además de conocer el principio de funcionamiento de éste para tener las mejores condiciones de ensayo. Por lo tanto se debe, antes de continuar, elegir una librería que nos permita realizar un código para implementar el DIC.

En esta sección, se define el proceso y los criterios utilizados para seleccionar y definir el software destinado a realizar la correlación digital de imágenes. Se plantea una serie de requisitos que debe cumplir con el objetivo lograr un proyecto académico-científico de código abierto, de bajo costo, adaptable a diversidad de aplicaciones y con la mayor trazabilidad posible.

### 3.2.1. Requisitos planteados

Se define la siguiente lista de requisitos y razones que debe cumplir el software para que el proyecto permita alcanzar los objetivos propuestos:

- Open source: se plantea la necesidad de un software de código abierto debido a su posibilidad de ser intervenido y adaptado según necesidad, además de no representar costos extra en el proyecto.
- Plataforma libre: idealmente debe poder implementarse en una plataforma gratis como Python, octave o similares, ya que entornos como Matlab requieren licencias costosas las cuales se busca en este caso evitar.
- Bien documentado: para garantizar su valor científico y aplicabilidad, es necesario que el software a utilizar sea acompañado de una documentación completa que permita utilizarlo y manejarlo conociendo en detalles sus procedimientos y fundamentos de operación.
- Adaptable: por la variedad de proyectos que se plantean en el laboratorio de materiales, es ideal que el software permita una gran versatilidad y potenciales desarrollos para aplicaciones diversas dentro del ámbito del ensayo y caracterización de materiales.

- Accesible: resulta completamente necesario que para poder hacer llegar esta tecnología a la comunidad de investigadores sea un software económico y accesible

Se analizan los siguientes software candidatos a ser aplicados en este proyecto:

### 3.2.2. NCorr DIC

El software NCorr DIC [13] es una herramienta de análisis de imágenes diseñada con el fin de ser utilizada en mecánica experimental y ciencia de materiales. Fue desarrollado y publicado en 2014 por el Georgia Institute of Technology implementando algoritmos de correlación modernos.

Permite obtener información detallada sobre el comportamiento mecánico y la medición de deformaciones por correlación digital de imágenes.

Es una herramienta open source desarrollada para ser implementada en MATLAB pero con sus algoritmos escritos en C++ para mayor rendimiento y eficiencia. Presenta una extensa documentación, incluyendo formas de implementación, teoría y fundamentos de los algoritmos utilizados y los métodos y datasets utilizados de validación en su desarrollo.

### 3.2.3. Py2DIC

Py2DIC [14] es una herramienta de correlación digital de imágenes desarrollada por el Geodesy and Geomatics Division of the Sapienza University of Rome y publicada en 2019.

Es un software local gratis, open source y multiplataforma que utiliza el método de “template matching” que está ampliamente estudiado e implementado. Ofrece un método de medición de desplazamientos y deformaciones implementado en Python aprovechando las capacidades de la biblioteca OpenCV con una GUI que enfrasca sus funciones permitiendo facilidad de uso al usuario, a expensas de una menor adaptabilidad.

Este software se encuentra ampliamente documentado por sus desarrolladores, incluyendo instrucciones de instalación y uso, por lo que se considera orientado a investigación con poca experiencia en programación pero con la limitación de .

### 3.2.4. $\mu$ DIC

El software  $\mu$ DIC [1] abarca un conjunto de herramientas para correlación digital de imágenes formuladas como una biblioteca de Python. Fue desarrollado por el departamento de ingeniería estructural de la Norwegian University of Science and Technology y publicado en el año 2019.

Es una herramienta open source donde en la plataforma GitHub podemos acceder a la totalidad de su código fuente, sumado a que en esta plataforma los desarrolladores mantienen un sistema de versionado donde dan lugar a mejoras, avances, correcciones e incluso discusión en un estilo de foro respecto a dudas, soluciones y aplicaciones.

Esta biblioteca fue completamente desarrollada como código de Matlab y posteriormente reescrita al lenguaje Python y aplicada a este. Además, se encuentra junto a una amplia documentación que incluye desde una descripción funcional y operacional de cada paquete que incluye  $\mu$ DIC hasta ejemplos de aplicaciones. Adicionalmente, incorpora un paquete denominado VirtualLab que permite simulaciones para ejecutar prácticas y puesta a punto del software previo a su aplicación.

### 3.2.5. Elección del software

Tras estudiar profundamente las opciones previamente mencionadas, finalmente la elección fue la de aplicar el software  $\mu$ DIC como herramienta de correlación digital de imágenes en el desarrollo de este proyecto. La decisión se fundamenta en que  $\mu$ DIC cumplía satisfactoriamente la totalidad de los requisitos planteados previamente, ya que como biblioteca open source del lenguaje Python permitía una excelente adaptabilidad a diferentes aplicaciones, no representaba ningún costo tanto la biblioteca como la plataforma donde aplicarla y se encontraba acompañada de una buena y detallada documentación tanto funcional como operacional.

El mismo será implementado incorporándolo al desarrollo de un código programado en Python 3 utilizando la IDE Visual Studio Code. Se puede acceder al código desarrollado en el Anexo A.

Para aplicar lo anteriormente explicado, se utiliza la librería  $\mu$ DIC, la cual fue seleccionada entre diversas opciones en un proceso descrito en la sección correspondiente (sección 3.2.5). Esta librería resulta fundamental en el presente trabajo debido a que es utilizada como base para generar el código de todo lo que infiere a procesado de imágenes. La librería es de código abierto escrito en Python con el objetivo de brindar una librería completa y fácil de usar para el procesado de imágenes mediante la técnica DIC y que a su vez esté comprobada científicamente sin dejar de ser un lenguaje de programación de alto nivel fácilmente comprensible [1].

Esta librería utiliza una serie de herramientas matemáticas para manipular los datos y obtener así los mejores resultados posibles. Para discretizar los mapas de deformación, se utilizan funciones B-Spline de forma tal que el usuario pueda especificar la cantidad de nodos de continuidad requerido en su aplicación y en consecuencia la resolución, lo cual se describe en profundidad más adelante (sección 3.4.1). También utiliza el método de Newton-Raphson para minimizar la diferencia de la suma de los cuadrados entre la imagen de referencia y la imagen actual.

Las diferentes funciones que este software es capaz de realizar abarcan todas las partes del método DIC, por lo que resulta fundamental explicar cada una de ellas, lo cual se realiza en la próxima subsección (3.3). El autor de la librería describe cinco partes de su código con diferentes funciones cada una, que hacen a la arquitectura del software un

todo que permite extraer de una secuencia de imágenes un campo de deformación. Estas partes podemos pensarlas como dos paquetes accesorios que son IO y VirtualLab y tres paquetes principales en el procesado donde se concentra el procedimiento completo de correlación de las imágenes, los cuales son Mallador, Correlacionador y Post Procesado.

### 3.3. Paquetes accesorios de $\mu$ DIC

A continuación se describen los paquetes que integran la librería implementada  $\mu$ DIC. Se puede profundizar más en estos paquetes consultando la bibliografía correspondiente [1].

#### 3.3.1. Paquete IO

Este paquete nos permite importar las imágenes a procesar y reorganizarlas en nuevas carpetas dentro de nuestro sistema.

#### 3.3.2. Paquete VirtualLab

Este paquete brinda una serie de módulos que nos permiten aplicarle modificaciones virtuales a las imágenes para conocer las distorsiones introducidas durante la adquisición de las mismas. Estos módulos nos permiten generar un patrón de manchas o moteado de forma sintética, nos permiten deformar estos patrones de una forma conocida y también posibilitan modelar errores introducidos por la cámara como el factor de relleno y la excentricidad del píxel. De estos errores el principal que podríamos necesitar determinar es el de excentricidad de píxel para corregir errores de paralaje de la cámara, ya que el factor de relleno es propio del sensor utilizado. De esta forma, podemos subdividir el paquete en subpaquetes o módulos, según lo que nos permiten realizar:

- El primer módulo es el que nos permite generar un patrón de manchas o moteado de forma virtual, usando un ruido conocido. Nos permiten también variar la resolución, el tamaño y el grado de enfoque que tendrán las manchas.
- El módulo de deformaciones nos permite deformar de manera conocida y arbitraria la imagen virtualmente moteada. De esta forma conocemos el valor que nos debería entregar el método al medir las deformaciones.
- El módulo de submuestreo nos permite, valga la redundancia, submuestrear las imágenes, eliminando distorsiones por factor de relleno o por la excentricidad del píxel. Se modela la cámara como si fuera una grilla donde cada píxel de la cámara cubre una región finita de la imagen. La escala de grises de la imagen cubierta por el píxel de la cámara se integra, dando como resultado el valor de gris del píxel.
- El módulo Noiseinjector nos permite introducir ruido a las imágenes submuestreadas.

## 3.4. Paquetes de procesamiento y correlación de DIC

A continuación, se describen los bloques de procesado y correlación que concentran la funcionalidad del cálculo de deformaciones de la librería  $\mu$ DIC [1], enfocado principalmente a los fundamentos matemáticos con los que esta funciona. Sin embargo, a pesar de no ser un paquete de esta librería, primero se dará mención y una breve introducción a lo que son las B-splines, un tipo de función fundamental para el funcionamiento de este método.

### 3.4.1. Funciones B-spline

Una función B-Spline es una función que puede utilizarse para describir la forma de los segmentos que componen las llamadas curvas B-spline. Dichas curvas son usadas para representar una superficie o un campo de deformación de un objeto a lo largo de un área. Esto se hace por medio de la combinación de dos conjuntos de curvas B-Spline en dos direcciones perpendiculares.

Este método surge como una mejora sobre el método de correlación de imágenes por subsets que se usaba anteriormente [12], siendo una alternativa robusta, acertada y computacionalmente eficiente. Cada conjunto de curvas B-spline se parametriza mediante puntos de control en sus respectivas direcciones. Estos puntos de control son los que definen como se curvan las curvas B-spline, cuyos coeficientes son desconocidos inicialmente y se obtienen optimizando la correspondencia de intensidades (valores en la escala de grises) entre dos imágenes en el proceso de correlación de imágenes. Esto se logra buscando el mínimo en la suma de errores cuadrados por medio del método de Newton-Raphson.

Una vez finalizado el proceso de correlación, los desplazamientos y gradientes de desplazamiento para cada posición en la superficie estudiada se obtienen por sustitución directa en la función B-spline.

De este modo, se puede discretizar el campo de deformación pudiendo el usuario incluso especificar el grado de los polinomios de interpolación que componen los segmentos de las curvas B-spline y el grado de continuidad por el que mejor se adapte a la aplicación.

En caso de precisar profundizar en estos conceptos, se recomienda revisar la bibliografía "The NURBS Book. Monographs in Visual Communications", por Piegl, L. and Tiller, W., 1996 [15], principalmente los capítulos 2 y 3.

### 3.4.2. Mallador

El paquete Mallador contiene las herramientas para generar y manipular la malla, la cual determina el área de la imagen que será procesada en la correlación, además de permitir definir en cuantas subsecciones de igual tamaño será dividida esta área determinada. Las funciones B-spline previamente descritas son usadas para discretizar el

campo de deformación en una grilla de  $k \times l$  puntos de control, siendo  $k$  y  $l$  números enteros definidos por el usuario. De este modo, las coordenadas  $\mathbf{x}(u, v)$  de la superficie B-spline son dadas por:

$$\mathbf{x}(u, v) = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^l N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \mathbf{m}_{ij} \quad (29)$$

Donde  $N_{ip}$  y  $N_{jq}$  son las funciones base de la curva B-spline,  $u$  y  $v$  son las coordenadas de la spline y  $p$  y  $q$  definen el orden del polinomio de interpolación de las correspondientes funciones B-spline.  $\mathbf{m}_{ij}$  contiene las coordenadas de los puntos de control de la superficie B-spline. la ecuación (29) puede ser reescrita como:

$$\mathbf{x}(u, v) = \mathbf{A}(u, v) \mathbf{n} \quad (30)$$

Donde  $\mathbf{A}(u, v)$  es una matriz que contiene los valores de las funciones B-spline y  $\mathbf{n}$  es un vector que contiene las posiciones de los puntos de control definidos.

### 3.4.3. Correlacionador

El paquete correlacionador contiene todas las instrucciones necesarias para realizar las rutinas de correlación digital de imágenes. Se utiliza un método Newton-Raphson modificado para minimizar la diferencia de la sumatoria de los cuadrados entre la escala de grises de la imagen de referencia y la actual.

El objetivo de la rutina de correlación es encontrar la coordenada para cada píxel  $\mathbf{x}$  tal que:

$$I_C(\mathbf{x}) = I_R(\mathbf{x}_0) \quad (31)$$

Donde  $I_C(\mathbf{x})$  es la intensidad en la escala de grises en la imagen actual en el píxel  $\mathbf{x}$  y  $I_R(\mathbf{x}_0)$  es la intensidad en la escala de grises en la imagen de referencia en el píxel  $\mathbf{x}_0$ . Como en aplicaciones reales la ecuación (31) no puede ser calculada de forma directa, se debe aproximar mediante minimizar la suma de errores cuadrados y utilizando el valor en la escala de grises de ambas imágenes como criterio de correlación. Entonces, de la diferencia de la sumatoria de los cuadrados utilizando un punto de control podemos obtener la siguiente ecuación:

$$R = \|\vec{I}_C(\mathbf{n}) - \vec{I}_R(\mathbf{n}_0)\|^2 \quad (32)$$

siendo  $\mathbf{n}_0$  la posición inicial del punto de control. Por lo tanto, el punto que mejor satisface la ecuación (32) es:

$$\min_n R \quad (33)$$

Si aplicamos el método de Newton-Raphson para obtener un valor numérico se obtiene:

$$\nabla \nabla R(\mathbf{n}_i) [\mathbf{n}_{i+1} - \mathbf{n}_i] = - \nabla R(\mathbf{n}_i) \quad (34)$$

donde  $i$  aumenta su valor en cada iteración. El término  $\nabla \nabla R(\mathbf{n}_i)$  se puede simplificar asumiendo que  $I_C(\vec{\mathbf{n}}) \approx I_R(\vec{\mathbf{n}}_0)$  y utilizando los gradientes en la escala de grises de la imagen de referencia en vez de la actual, obtenemos:

$$\mathbf{n}_{i+1} = \mathbf{n}_i + (\mathbf{b}^T \mathbf{b})^{-1} \mathbf{b}^T \Delta \bar{\mathbf{I}}_i \quad (35)$$

donde

$$\mathbf{b} = \frac{\delta I_R}{\delta \mathbf{x}} \mathbf{A} \quad (36)$$

Siendo  $\Delta \bar{\mathbf{I}}_i$  la diferencia en la escala de grises entre la imagen actual y la de referencia.

### 3.4.4. Post Procesado

Basándonos en la superficie B-spline  $\mathbf{x}_t(u, v)$  a un tiempo  $t$  dado, el gradiente de deformación para cada punto del material se puede calcular como:

$$\mathbf{F}_t = \begin{vmatrix} x_{t,u} & x_{t,v} \\ y_{t,u} & y_{t,v} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_{0,u} & y_{0,v} \\ x_{0,u} & y_{0,v} \end{vmatrix}^{-1} \quad (37)$$

Siendo los componentes de  $\mathbf{F}_t$  derivadas parciales de las coordenadas espaciales con respecto a  $u$  y  $v$ . Basándonos en el gradiente de deformación  $\mathbf{F}_t$  y recordando la ecuación (14) podemos calcular los tensores de Cauchy-Green:

$$\mathbf{C}_t = \mathbf{F}_t^T \cdot \mathbf{F}_t = \lambda_t^2 = (\epsilon_t + 1)^2 \quad (38)$$

Recordando también las ecuaciones (25) y (26) podemos desarrollar:

$$\mathbf{T} \cdot \mathbf{C}_t \cdot \mathbf{T} = 1 + 2 \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{E}_t \cdot \mathbf{T} = \lambda_t^2 = (\epsilon_t + 1)^2 \quad (39)$$

Al ser el alargamiento unitario por definición en la dirección del vector dirección unitario  $\mathbf{T}$ .

$$\mathbf{C}_t = \lambda_t^2 = (\epsilon_t + 1)^2 \quad (40)$$

$\lambda_t$  equivale a la deformación nominal mientras que  $\epsilon$  es la deformación unitaria definida al inicio del marco teórico (sección 3.1.1) y puede ser despejado como la raíz cuadrada de los valores propios de  $\lambda_t^2$  hallados mediante descomposición espectral, teniendo así como resultado la deformación ingenieril que estábamos buscando. De manera complementaria, es posible determinar el valor de la deformación real ( $\epsilon_{real}$ ), como:

$$\epsilon_{real} = \ln(\lambda_t) = \ln(\epsilon_t + 1) \quad (41)$$

De éste modo, queda descrito el proceso matemático por medio del cual  $\mu$ DIC determina la deformación por medio de la representación con funciones B-spline.

### 3.5. Andamios de celulosa

Es una realidad que hoy por hoy existe una gran cantidad de personas que requieren un trasplante de órgano y que nunca logran obtenerlo: se estima [16] que sólo un 15 % logra conseguirlo. Pese al avance que se vio en las últimas décadas, los trasplantes autólogos y los implantes sintéticos no han logrado suplir totalmente esta demanda. En este contexto, resulta muy importante la ingeniería en tejidos para desarrollar nuevas alternativas y traer soluciones a esta necesidad.

La ingeniería en tejidos [2] es una disciplina que tiene grandes avances de manera constante y que uno de los grandes desafíos que enfrenta es generar andamios. Los andamios son estructuras que sirven de plataforma de anclaje celular y también cumplen la función de sostén para poder desarrollar sobre ellas nuevos tejidos/órganos con el objetivo de que éstos puedan ser implantados en personas que lo necesiten.

Los andamios tienen estructuras tridimensionales cuya función se basa en ser una matriz temporaria con una arquitectura definida según su aplicación, compuesta por determinados materiales que permiten la colonización, migración, crecimiento y diferenciación de las células guiando a la regeneración del tejido objetivo para el cual fue ideado. Además, no deben generar respuestas negativas por parte del receptor por lo que deben ser biocompatibles. En resumen, deben cumplir con los siguientes requisitos:

- Los andamios deben ser biocompatibles para que las células se puedan adherir y desarrollar de forma correcta.
- No deben generar una respuesta inflamatoria significativa.
- Los andamios deben presentar una alta porosidad para permitir infiltración celular, remodelado y crecimiento, así como también la extracción de los desechos celulares.
- Cuando las células produzcan su propia matriz extracelular el andamio debería degradarse, dando lugar a los nuevos tejidos.

Ante esta serie de requerimientos surgen algunas alternativas, entre ellas obtener andamios de colágeno o generar andamios sintéticos.

El colágeno es la proteína que forma el estroma o matriz de una gran cantidad de nuestros órganos como pueden ser la piel, los huesos y otros tejidos. Para obtener estos andamios se deben descelularizar tejidos animales, obteniendo como producto la matriz extracelular de los mismos (fig. 5), conservando en esta matriz tanto las propiedades mecánicas como estructurales. Si bien esta alternativa ha tenido buenos resultados [17], la obtención de productos derivados de animales tiene varias limitantes como lo pueden ser su elevado costo de producción, su alto impacto ambiental, la dificultad de obtener un producto biocompatible y el desafío de producirlo cumpliendo con normas éticas.



*Figura 5: Estroma de corazón de rata descellularizado. Fuente: Aubin et al. (2013) [17].*

La generación de andamios sintéticos presenta aún hoy en día diversas dificultades. A nivel constructivo, es de gran dificultad para los métodos existentes actuales generar un andamio que cumpla con todas las características fundamentales, incluso con tecnologías de última generación como impresoras 3D. La porosidad óptima es casi imposible de obtener y la cantidad de materiales biodegradables y biocompatibles es limitada, pese a haber intentado con una gran cantidad de materiales [18] entre ellos cerámicos, metales, vidrios bioactivos, polímeros, etc.

Ante esta falta de una solución es que emerge la necesidad de innovar en este campo y surgen los andamios de celulosa (fig. 6). La celulosa es un polímero natural que cumple un rol análogo al del colágeno pero en el reino vegetal. Este biopolímero es el componente principal de las paredes celulares vegetales y a nivel macroscópico cumple una función estructural, dando soporte a las células de los diferentes tejidos. Es por eso que en la ingeniería en tejidos se comenzó a estudiar los andamios de celulosa como un potencial reemplazo a los andamios de colágeno, para lo cual primero deben cumplir con los condicionantes previamente mencionados para ser aptos para esta aplicación, relacionados a sus características y función.



*Figura 6: Hoja de espinaca descelularizada producida por el laboratorio de Química Orgánica y Biológica de la FCEfyN.*

Estos andamios de celulosa, al igual que los andamios de colágeno, son obtenidos mediante un proceso de descelularización en el cual se obtiene una matriz acelular con determinadas propiedades mecánicas, químicas y estructurales. Además, estos andamios presentan las siguientes ventajas:

- Ya se han investigado estructuras de celulosa para diferentes aplicaciones biomédicas, obteniendo datos que sugieren excelentes desempeños en su biocompatibilidad [19].
- Presentan una red vascular que permite la distribución de fluidos que se asemeja al sistema vascular presente en los mamíferos, que va desde grandes vasos hacia redes de microcapilares. Estas estructuras microcapilares aún no han podido ser replicadas con impresiones 3-D.
- Las plantas son una fuente sustentable de la materia prima, lo que permitiría reducir el impacto ambiental y económico.
- Ensayos han demostrado el gran desempeño que muestran los andamios de celulosa a la hora de ser repoblados con células humanas.

Dada la gran variedad de materia prima vegetal que existe, nos encontramos con una enorme cantidad de potenciales andamios que cumplen con todos los puntos mencionados arriba, pero que a su vez poseen características morfológicas y mecánicas completamente diferentes.

Para poder desarrollar las potenciales aplicaciones de cada uno de estos andamios de celulosa en biomedicina es necesario primero lograr una propia caracterización de dicho material. Específicamente en la caracterización mecánica del material, es donde se encuentra aplicado el método de correlación de imágenes digitales como alternativa de medición de deformaciones del material de estudio, permitiendo determinar alargamiento unitario del material en ensayos de tracción.

Al ser DIC un método de medición de deformaciones basado en el flujo óptico como se describió en esta sección, se lo considera una alternativa interesante y válida para estos ensayos ya que permite medir sin contacto evitando introducir distorsiones mayores. [20]

En resumen, habiendo definido brevemente los conceptos implicados en la caracterización mecánica, los fundamentos de la correlación de imágenes digitales y qué son los andamios de celulosa a estudiar, es posible comprender en las siguientes secciones la aplicación del método DIC implementado para caracterizar mecánicamente los andamios de espinaca descelularizada producidos en la FCEFyN y la interpretación de sus resultados.

## 4. Métodos y procedimientos iniciales

Este capítulo está destinado a establecer el marco de trabajo que sustentará la obtención de datos y el análisis de las próximas secciones. Se describe el procedimiento mediante el cual se realiza la curación de datos, la preparación de probetas y la definición de los métodos de ensayo, que son esenciales para garantizar la validez y la confiabilidad de nuestra investigación. Se inicia la sección con una breve introducción con el estado del arte, donde se plasman algunos trabajos que pueden ser contrastados con este informe.

### 4.1. Estado del arte

Como ya se mencionó previamente (ver sección 3.2), la correlación de imágenes digitales presenta características que la hacen una herramienta que puede aportar información importante. La medición de deformación sin contacto puede ser de gran ayuda en casos donde el contacto simplemente no sea posible o pueda introducir errores indeseados. También aporta información a la hora de medir deformación sobre cuerpos con propiedades anisotrópicas, como es el caso, generalmente, de los biomateriales.

Por estos motivos es que se ha implementado con múltiples finalidades en los últimos años, con aplicaciones que van desde la evaluación de la respuesta de tejidos a daños mecánicos [21] hasta ser utilizado como método de medición en la tracción producida en las interfaces de los materiales [22].

Se han reportado [23] resultados obtenidos con errores de un orden de magnitud del 0.1 %. Este error se obtuvo al contrastar la información brindada por el método DIC en un punto y la información otorgada por una galga extensiométrica colocada en el mismo punto. En este caso se realizaban ensayos de tracción indirecta, BTS por sus siglas en inglés, donde se le aplican cargas en dos puntos diametralmente opuestos a discos del material a caracterizar. Tradicionalmente, las deformaciones se miden mediante galgas extensiométricas colocadas en la superficie del material. Además, para aplicar el patrón o moteado sobre la superficie del material, se utilizaron aerosoles que imprimieron motas de entre 13-15 micrones. La obtención de las imágenes fue realizada con cámaras digitales que si bien están disponibles al público general, son de uso profesional.

Otros ensayos [24] han mostrado resultados similares, obteniendo errores en la medición de deformación mediante la técnica DIC de un 1 %. En este caso se utilizó la medición de deformaciones para poder cuantificar la deformación durante la fabricación de chapas de metal sometidas a cargas varias durante su moldeado. La información otorgada mediante DIC fue contrastada con el método tradicional utilizado hasta el momento para medir deformaciones punto por punto: Se utilizan hojas de metal a las que se le imprimen círculos en su superficie. Al someter esta hoja a deformaciones, dichos círculos comienzan a perder su simetría y se convierten en elipses. Midiendo los ejes de estas elipses y contrastándolas con el diámetro de los círculos iniciales se puede calcular la deformación a la que estuvo sometida el material. Estos cálculos pueden ser realizados manualmente o mediante software específicos.

Resulta evidente la utilidad que representa la medición de deformaciones mediante

DIC equivalente con los métodos tradicionales que suelen consumir más recursos y cuyos resultados no presentan discrepancias significativas. Sumado a esto, surgen ventajas de la aplicación del DIC considerando la información complementaria recién mencionada que aporta.

## 4.2. Curación de datos

Este proceso fue necesario de ser realizado posterior a extraer los datos de la máquina de ensayos. Al finalizar cada ensayo el software QCTech que sirve de interfaz de control de la máquina, permite exportar en formato de archivo .csv los valores muestreados en cada instante del ensayo. Sin embargo, estos valores exportados no se encuentran debidamente normalizados, por los que se realiza una serie de pasos de curación para poder ser luego debidamente analizados y graficados.

Como se mencionó antes, los datos se obtienen en un archivo de valores separados por coma, formato que se puede abrir y tratar en aplicaciones de hojas de cálculo como Google Sheets o Microsoft Excel, aunque también podría ser procesado con un script desarrollado en Python con herramientas como la biblioteca Pandas. En esta serie de ensayos, se decidió utilizar hojas de cálculo por simplicidad, aunque podría agilizarse con el desarrollo de un script.

Los datos que se obtienen consisten en dos columnas, donde una columna corresponde al desplazamiento de los agarres de la máquina en milímetros y la otra columna corresponde a la carga en kilogramos fuerza medida por la celda de carga de tracción.

El primer paso de la curación consiste en unificar el formato de los valores, debido a que la máquina utiliza el "." como separador decimal para valores menores a 1. Realizar ese cambio permite unificar criterios en la manera en que se procesan los valores para luego poder analizar estos datos junto con los aportados por el ensayo de DIC. Esto se resuelve simplemente seleccionando la totalidad de las celdas y utilizando la función de "Buscar y reemplazar" que integra el software de hoja de cálculo.

En segunda instancia, se debe normalizar los valores medidos mayores a 1, dado que en la conversión de archivo .csv a .xlsx la hoja de cálculo los interpretaba como millones, esto se corrigió de manera práctica con una función condicional que seleccionaba únicamente los valores mayores a 1 y los dividía por un millón <sup>1</sup>, mientras mantenía los valores menores a 1.

Terminados estos dos pasos, los datos exportados por la máquina se encontraban debidamente curados y normalizados para poder ser analizados posteriormente.

---

<sup>1</sup>Esto se debe a que, por algún error de compatibilidad de software, la máquina de ensayos devolvía los valores mayores a 1 multiplicados por este número.

### 4.3. Descomposición de videos de ensayos en fotogramas

Como se describió con anterioridad, el software  $\mu$ DIC implementado para realizar la correlación de imágenes digitales toma para su procesamiento una serie de imágenes o fotogramas. En nuestro caso, dado que se buscó tomar imágenes con la mayor frecuencia posible para aumentar la cantidad de datos se optó por realizar la grabación de un video por cada una de las muestras sometidas a tracción en los ensayos, permitiendo esto tomar 30 imágenes o fotogramas por segundo.

El software  $\mu$ DIC no considera el ingreso de videos como entrada, por lo que se presentó la necesidad de descomponer cada video grabado en los fotogramas que lo formaban y almacenarlos nombrados en orden dentro de un directorio para que se pueda indicar al software dicha ruta para su acceso. Sin embargo, dado la gran cantidad de ensayos también se planteó la necesidad de automatizar este proceso e incorporarlo dentro del script de Python desarrollado para optimizar los tiempos de ensayo.

Considerando todo lo mencionado, fue que se desarrollo un bloque de código basado principalmente en la librería libre de Python OpenCV, donde se automatizó la descomposición en fotogramas del video asignando a cada imagen extraída el nombre "IMG\_XXXX" donde "XXXX" es un número de 0000 a 9999 según el número de fotograma que corresponde, siendo esto suficiente para procesar videos de más de 5 minutos lo que fue suficiente para el uso dado. Además, a fines de darle versatilidad al script, dado que en muchas ocasiones se desea repetir el procesamiento de un mismo video modificando la malla, parámetros de configuración, etc. según sea el caso, se adicionó una interfaz de usuario sencilla e intuitiva para que el usuario pueda decidir entre descomponer un video en fotogramas al comenzar a procesar o utilizar una carpeta con fotogramas que fueron extraídos previamente y así ocupar menores tiempos.

El bloque de código referido puede verse en la sección de Anexos A (Sección 10).

### 4.4. Configuración de grabación para DIC

Con el fin de mitigar errores y hacer repetibles las mediciones, era necesario definir una configuración de montaje para realizar los ensayos y grabaciones del mismo que permita adquirir la información de la mejor manera posible con los recursos disponibles.

Esta configuración cobra especial importancia cuando para la implementación de DIC para la medición de deformaciones se busca grabar videos de ensayos en que se aplica una fuerza de tracción sobre una muestra para posteriormente descomponerlos en fotogramas y procesarlos con un software.

Para esta configuración se requería un dispositivo que sea capaz de mantener en una posición fija a la cámara que graba el video del ensayo y a la vez permita colocar éste último en el mismo eje que la probeta sometida a ensayo, lo que disminuiría de forma considerable el error por paralaje. Al mismo tiempo, se debe contar con una iluminación homogénea y de intensidad suficiente para resaltar y captar claramente el contraste del moteado, ya que el software procesa las imágenes en escala de grises por lo que sombras

o reflejos podrían introducir ruidos indeseados a la imagen, principalmente a la hora de formar los "subsets" (sección 3.4.2). De este modo, la configuración propuesta sería basado en el siguiente esquema (fig. 7) tomado de "Full-field Speckle Pattern Image Correlation with B-Spline Deformation Function.", por Cheng et al., 2002. [12]:

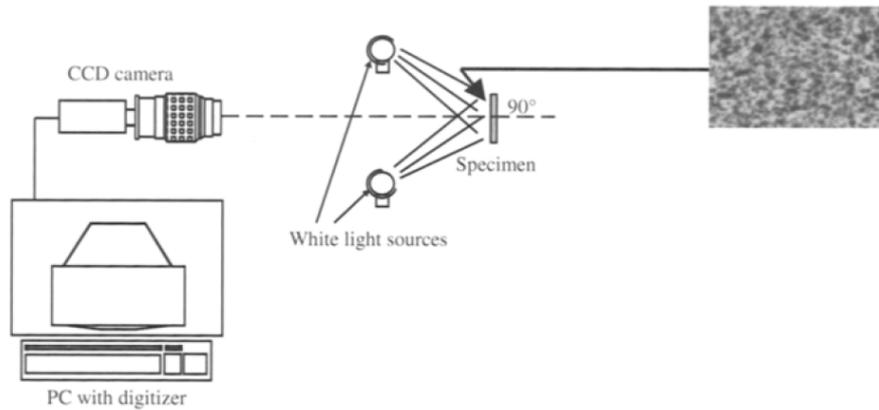


Figura 7: Esquema de sistema de captura de imágenes para la medición bidimensional de deformaciones en la superficie de una muestra por correlación de imágenes digitales

Las características buscadas fueron reunidas por un simple trípode con aro de iluminación LED de calidez e intensidad ajustable lo que tiene una serie de ventajas:

- El aro LED entrega iluminación homogénea y suficiente para el contraste del moteado en la muestra, eliminando la incidencia de sombras.
- El trípode permite sostener firmemente la cámara, de forma que la imagen obtenida esté en el mismo eje que la probeta.
- Otra ventaja del trípode es que permite la traslación del setup completo debido a su independencia de la máquina de ensayos y su peso liviano. De esta forma, podría ser trasladado a cualquier máquina de ensayos para aplicar el método.
- El trípode tiene un soporte para smartphone, lo que permite colocar nuestra cámara y utilizarla como sensor para la captura de los videos a analizar

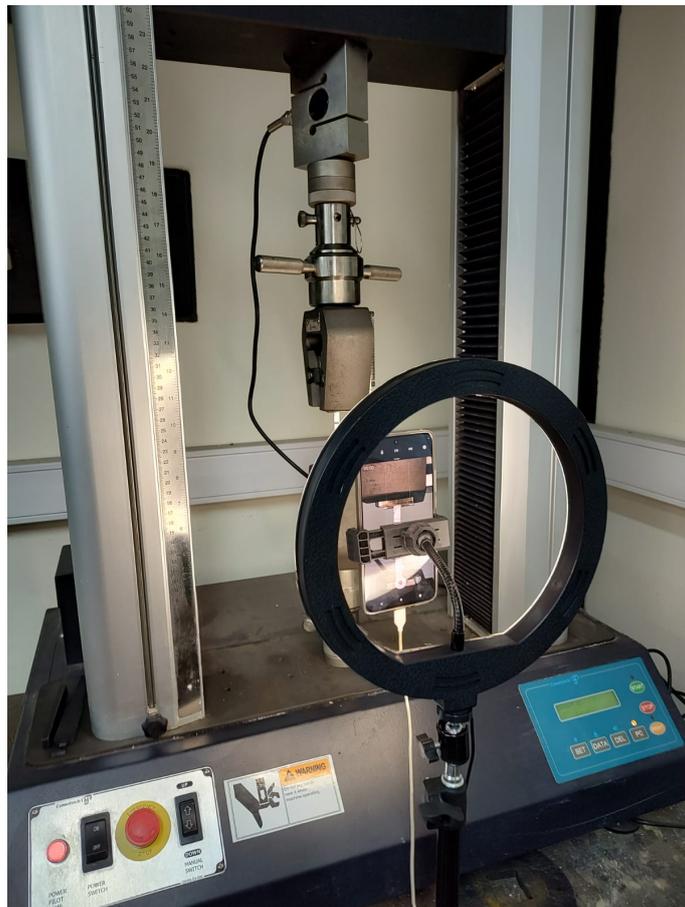
De esta forma, reuniendo el trípode y el sensor, podemos obtener un setup de adquisición de la información adecuado para las aplicaciones requeridas en nuestro caso.

El aro led del trípode era necesario conectarlo a alimentación mediante cable tipo USB-A, por lo que era conectado a la PC de la máquina de ensayos que se encuentra en el Laboratorio de Materiales de la FCEfyN.

La cámara utilizada fue la cámara de un smartphone Motorola Edge 30, debido a que era la cámara que se encontró disponible y accesible a la hora de realizar el proyecto, con el fin de buscar validar y aplicar el método con una inversión mínima buscando demostrar su potencial. La cámara al momento de grabar era configurada a una velocidad de grabación de 30 fotogramas por segundo, la máxima que toleraba, y

una resolución de 2160 x 3840 píxeles con el fin de captar el máximo detalle posible. Además, para evitar la deformación dada por la cámara tipo macro, se aplicaba un zoom de amplitud por dos, esto permitía que solo grabe la cámara principal del smartphone evitando deformaciones y un mejor enfoque en la superficie de la muestra ensayada.

Este montaje descrito se incorporó en el Laboratorio de Materiales de la FCEfyN junto con la máquina de ensayos de tracción convencional presente, dado que esta sería la que aplique las deformaciones a las muestras de los ensayos, además de contar con mediciones convencionales las cuales podríamos usar de parámetro para validar el método de medición por DIC. La máquina en cuestión es una máquina de ensayos de tracción COMETECH QC-506B1 con una celda de carga de tracción de 500 Kgf. Finalmente, la configuración montada puede observarse en la imagen a continuación (fig. 8):



*Figura 8: Configuración montada para el sistema de captura de imágenes para la medición bidimensional de la superficie de una muestra por correlación de imágenes digitales*

De este modo, se logró construir un montaje de bajo costo y buen rendimiento. Sin embargo, para aprovechar al máximo el potencial de este método, se plantea en el capítulo de trabajos futuros (sección 8) posibles mejoras en el mismo.

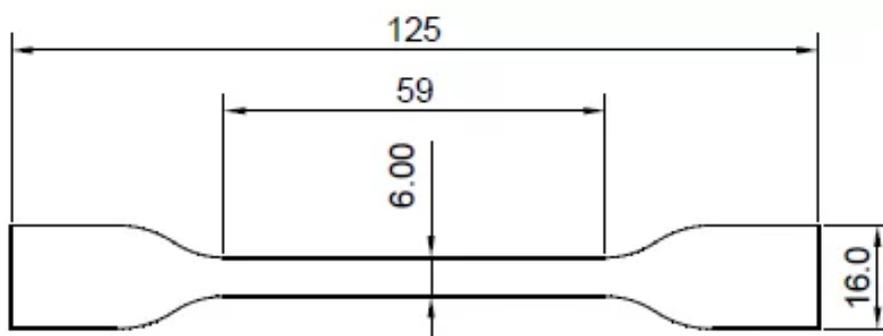
## 4.5. Método de preparación de probetas y muestras para realizar los ensayos

La preparación adecuada de las probetas es un paso esencial en los ensayos de medición de deformaciones por correlación de imágenes digitales, ya que influye significativamente en la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos. En esta sección, se describe el proceso de preparación de las probetas destinadas a los ensayos de tracción que se realizaron en este trabajo, señalando las diferencias entre las probetas utilizadas para validación del método y la muestra utilizada para aplicación biológica.

### 4.5.1. Proceso de corte de las probetas

Para poder construir probetas uniformes y consistentes del mismo tamaño para los ensayos de validación, se utilizó un troquel de corte del Laboratorio de Materiales de la FCEFYN, el cual aplicado sobre planchas del material a cortar y aplicando la fuerza suficiente con una prensa manual permitía fabricar probetas de manera eficiente y repetible, con el objetivo de evitar introducir errores en los ensayos y en el proceso de validación.

Las medidas del troquel utilizado son las siguientes (fig. 9):



*Figura 9: Troquel utilizado para la construcción de probetas de aluminio y poliestireno para los ensayos de validación (medidas en milímetros).*

A modo de ilustrar el proceso de corte, en la siguiente imagen (fig. 10) se puede observar el resultado del proceso de corte de probetas de aluminio utilizadas:



*Figura 10: Probetas de aluminio cortadas por medio de troquelado a partir de láminas*

Cabe resaltar que este método de corte fue utilizado para la trazabilidad de probetas en los ensayos de validación, ya que en el caso de los tejidos biológicos como el de la espinaca descelularizada utilizada en la aplicación biomédica del método por las características intrínsecas del tejido no es posible realizar este tipo de corte. En los tejidos biológicos se debe analizar el tipo de corte a ejercer para cada caso en particular, en nuestro caso al momento de ensayar el tejido de hoja de espinaca descelularizada se le realizaron cortes con un bisturí en forma de hueso de perro, dado que es la manera como lo realizaba el Laboratorio de Química Orgánica y Biológica de la facultad.

#### **4.5.2. Proceso de moteado de las probetas**

Para poder implementar el método de correlación digital de imágenes para la medición de deformaciones por detección de flujo óptico, es necesario aplicar un patrón aleatorio de puntos o marcas en la superficie de la probeta o muestra, a lo cual nos referimos como moteado o speckle pattern [12].

El moteado de las probetas debe ser aleatorio, las motas deben tener buen contraste con el color de la probeta y deben tener un tamaño lo suficientemente grande para que sea posible distinguirlo de manera clara con la resolución de la cámara disponible y lo suficientemente pequeño para permitir obtener la máxima resolución posible al momento de aplicar el mallado en el software de DIC, como se explica en la sección correspondiente (sección 3.4.2), permitiendo obtener resultados más precisos. Si bien uno podría sospechar que la pintura empleada podría afectar las propiedades del tejido biológico o del material a ensayar, en la práctica la potencial influencia es despreciable dado al mínimo espesor de las motas [4].

Es por esto que para las probetas de aluminio de los ensayos de validación, por su color metalizado, fue necesario primero aplicarles una fina capa de esmalte cobertor blanco y sobre esta aplicar las motas. Para el moteado, en las probetas de validación fue utilizado un cepillo de cerdas finas, el cual era empapado en pintura acrílica de color

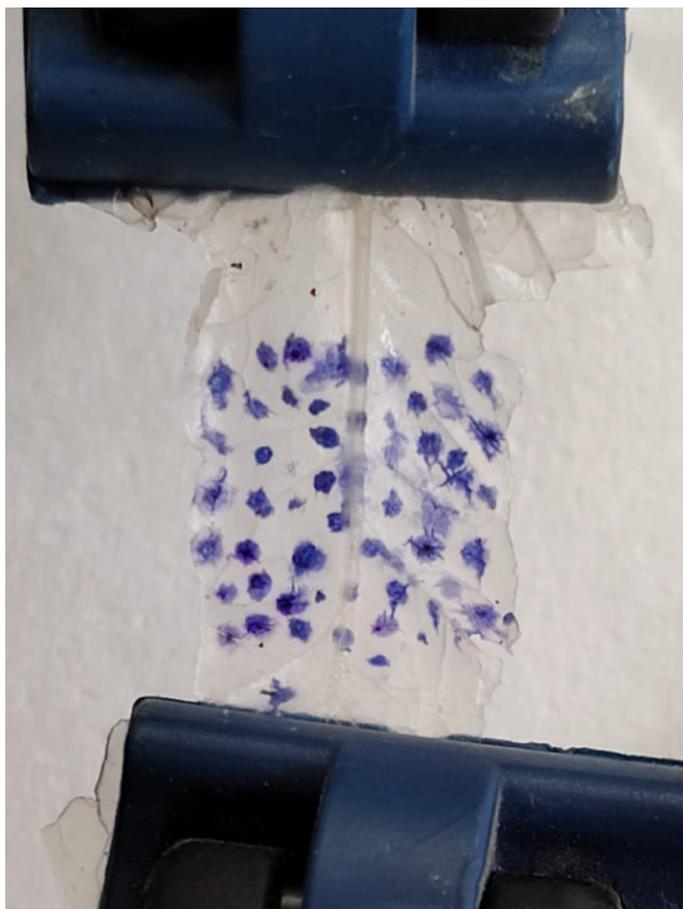
negro y por arrastre de las cerdas se salpicaba levemente las probetas aplicando el patrón de puntos aleatorios en su superficie. Por otro lado, para las muestras de poliestireno, por su color blanco característico solo era necesario aplicar el patrón de puntos aleatorios en color negro dado que el contraste ya era suficiente. Se puede observar un ejemplo del resultado de la aplicación del moteado de las probetas en la siguiente imagen (fig. 11):



*Figura 11: Resultado de la aplicación de capa de esmalte blanco con speckle pattern negro sobre probetas de aluminio para ensayos de validación*

Sin embargo, éste método funciona correctamente para muestras secas como las usadas para el proceso de validación, pero en el caso de aplicar este método de medición a muestras de tejidos biomédicos los cuales deben ensayarse hidratados puede presentar distintos problemas.

Se probaron algunas alternativas y se determinó que en el caso de tejidos que se pueden disponer secos previo al ensayo, es mejor aplicar un moteado con este método del cepillo de cerdas finas o aplicar un spray a una distancia de aproximadamente medio metro, esperar un tiempo corto a su secado y luego hidratarlo de manera normal, mientras que en tejidos que se disponen únicamente de manera húmeda como fue el caso de la espinaca descelularizada que es transportada sumergida en glicerol, se encontró que fue útil y no afectó al tejido a ensayar la aplicación del moteado de manera manual con un marcador de fibra fina sobre la superficie del tejido, sin necesidad de aplicar ninguna pintura adicional para mejorar el contraste. Se puede observar un ejemplo del resultado de la aplicación del speckle pattern en las muestras de espinaca descelularizada en la siguiente imagen (fig. 12):



*Figura 12: Resultado de la aplicación de patrón aleatorio de motas sobre muestra de espina descelularizada para ensayo de aplicación biológica*

Con lo descrito en este capítulo se ha definido de manera exhaustiva la base metodológica que da sustento al desarrollo de este trabajo. Aplicando estos métodos de ensayo para preparación de muestras, obtención de datos y curación de los mismos es que se realizaron los ensayos de validación y de aplicación biológica, permitiendo avanzar en los fenómenos de interés de estudio con una estructura clara y definida.

## 5. Ensayos y validación

En esta sección se detalla como fueron las etapas realizadas para definir correctamente el método de ensayo buscado. Para comenzar, con el primer y segundo ensayo se busco definir la correcta configuración del software  $\mu$ DIC y el proceso de pretratamiento de la muestra, buscando armar un proceso robusto. Posteriormente, se realizaron dos series de ensayos de validación, el primero principalmente orientado a corregir, definir y probar modificaciones y el segundo ya para establecer la aptitud de esta metodología, mientras a su vez se retroalimentó de pequeñas correcciones el método de ensayo y software para así obtener los resultados buscados.

### 5.1. Primer ensayo

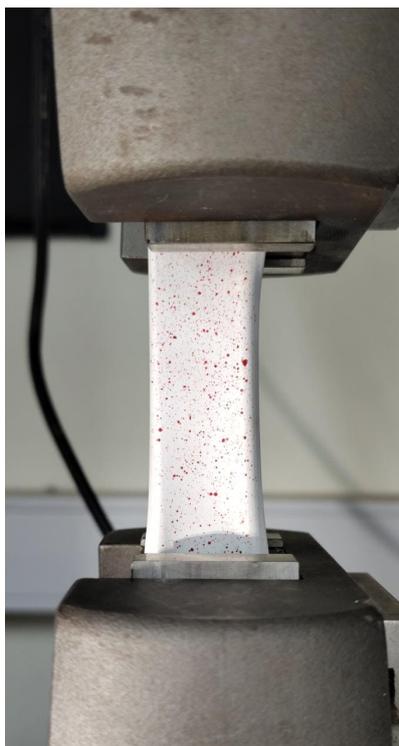
El primer paso a realizar para comenzar a implementar el software de DIC fue realizar una prueba piloto con fines de poder realizar un primer procesado de imágenes obtenidas por nosotros. Esto se realizo con el objetivo de ajustar las configuraciones de captura de video y posicionamiento de la cámara. Además, permitió experimentar diversos parámetros de la configuración de la máquina de ensayos de tracción.

Otro punto importante de este ensayo, fue un primer acercamiento al desarrollo de patrón o entramado en la superficie de la muestra, lo cual es un punto crucial para un correcto funcionamiento del procesado por software.

Para ejecutar este primer ensayo, se utilizó como muestra una pieza de PVC blanco moteado con tinta indeleble roja, utilizando un cepillo fino, a fines de probar principalmente que la cámara sea capaz de detectarlo correctamente y la relación de este entramado con la convergencia en el procesado de los fotogramas (fig. 13).

Otro fin de este ensayo, fue determinar el procedimiento para extraer los datos que la máquina de ensayos de tracción del laboratorio de materiales entrega al final del ensayo, los cuales a futuro se busca hacer corresponder con los obtenidos por medio del DIC. Para esto, se encontró que la máquina al estar conectada por medio de una interfaz a una PC, permite exportar valores en forma de archivo ".csv". Esto da lugar a que extrayéndolo por medio de una memoria se puede luego procesar tanto agregando una sección nueva de código en Python como por medio de una hoja de cálculos de Excel o Google Sheets.

Es necesario destacar, que al extraer los valores numéricos de los transductores de la máquina de ensayos, estos necesitan pasar primero por un proceso de curado de datos o preprocesado antes de poder analizarlos (ver sección 4.2) .



*Figura 13: Primer ensayo preliminar realizado con PVC*

Tras realizar este primer ensayo, se encontró que la manera en que se fijaba la muestra a la máquina de ensayos debía mejorarse, ya que al ejercer tracción por parte de la máquina la muestra deslizaba en el agarre introduciendo errores e invalidando el ensayo.

Por otro lado, se encontró positivo el funcionamiento del preprocesado incorporado al software, dado que realizaba satisfactoriamente la lectura del video del ensayo, la descomposición de este en fotogramas (sección 4.3) y su almacenamiento.

Además, se probó que el método para realizar el patrón aleatorio sobre la muestra era suficiente, ya que permitía ser detectado por el software y que este llegue a la convergencia de los valores de correlación en un número de iteraciones óptimo.

## **5.2. Segundo ensayo**

En el segundo ensayo, el objetivo era realizar un ensayo de tracción del que se puedan extraer numéricamente los valores de deformación medidos por el software de mu DIC y correlacionarlos con la deformación que conocíamos que se le aplicó por medio de la máquina de ensayos y los parámetros configurados.

Para ejecutar lo mencionado, se realizó un patrón con tinta indeleble color azul sobre una lámina de látex blanco plegado y se lo sometió a tracción a una velocidad de 120 mm/min hasta detenerse en una deformación de aproximadamente 7 mm (fig. 14). Esto se realizó con el propósito de evaluar la tasa de cambio de la longitud de la muestra

respecto al tiempo, con el objetivo de conocer la exactitud y precisión en cada uno de los datos entregados por el software.



*Figura 14: Segundo ensayo preliminar realizado con muestra de látex.*

Se procesó el video obtenido en la realización del ensayo logrando exportar en un archivo de hoja de cálculo de tipo .xlsx los valores numéricos de deformación obtenidos como resultado del DIC.

Luego, se contrastaron estos valores medidos con el software de DIC con los valores de deformación entregados por la máquina, observándose una definida correlación entre ambos (fig. 15).

## Ensayo de deformación de látex

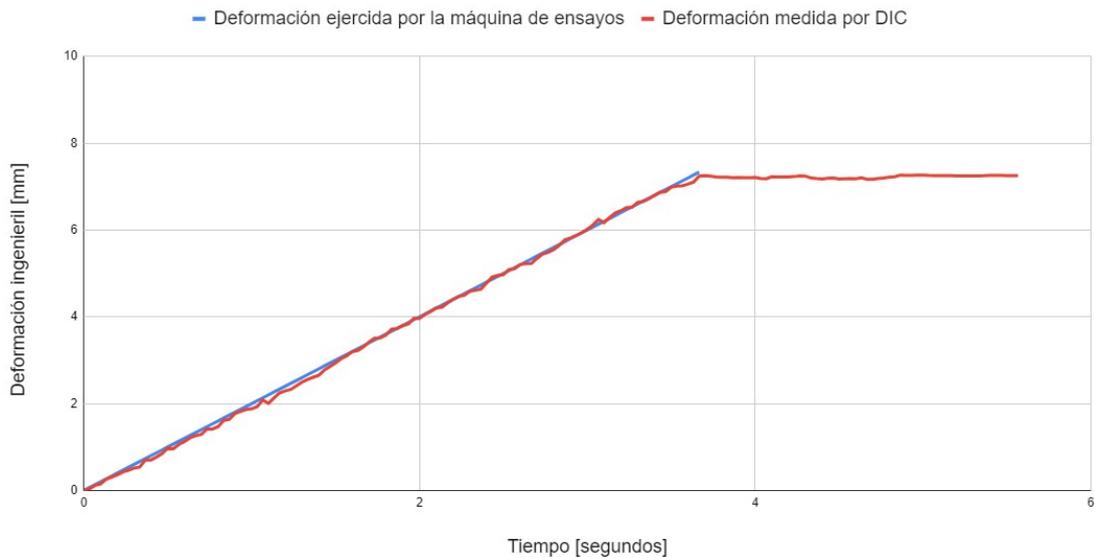


Figura 15: Gráfico de deformación del ensayo de una muestra de látex

### 5.3. Validación 1: HIPS y aluminio

Para comenzar con las validaciones de nuestro método de medición, se partió de la correspondencia establecida en el ensayo 2 entre los datos obtenidos mediante DIC y las deformaciones que nos entregó la máquina de ensayos. En este caso se comparan los conjuntos de datos obtenidos mediante los diferentes métodos, con la finalidad de validar el método DIC. De no haber una diferencia significativa entre las mediciones realizadas por los distintos métodos, podríamos concluir en ello.

Se eligieron dos materiales con comportamientos distintos, con módulos de Young de distintos órdenes de magnitud, para poder probar y evaluar el método en condiciones diferentes. El módulo de Young del High Impact Polystyrene (HIPS) es de 2200 MPa [6], mientras que el del aluminio se encuentra en torno a los 70000 MPa [25], dependiendo la serie y tipo de aleación.

Se sometieron a ensayo 13 muestras de HIPS y 19 de aluminio. Las mismas fueron recortadas con troquel como se detalla en la sección 4.5 de materiales y métodos.

Todas fueron sometidas a ensayo de tracción a una velocidad de 10 mm/min. Se obtuvieron los resultados y los datos debieron ser curados. Con ellos se realizó la gráfica que se muestra a continuación para comparar los resultados de la máquina de tracción con los del DIC (fig. 16):

Deformación de HIPS medida por DIC y por Máquina de ensayos

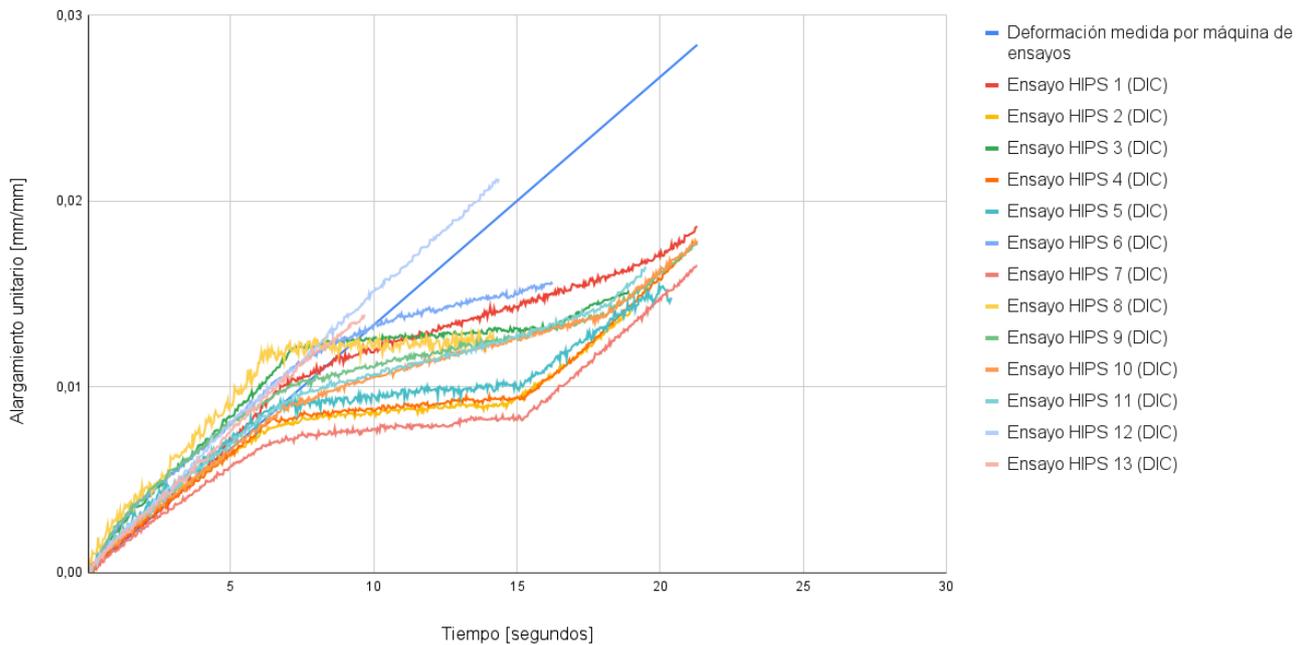


Figura 16: Gráfico Validación 1 HIPS

En este gráfico observamos los valores obtenidos mediante DIC y la deformación que entregó la máquina de ensayos de tracción durante los ensayos con HIPS. La gráfica nos indica que la mayoría de las muestras mostraron un comportamiento muy similar al de la deformación medida por la máquina en un primer tramo.

Sin embargo, después de aproximadamente los 5 segundos del ensayo se puede observar un período en el que la muestra no refleja una deformación a vistas del método de medición DIC. Esta disparidad se refleja en la diferencia de pendiente que existe entre las curvas calculadas mediante el método DIC y la deformación medida por la máquina de ensayo. Esta información nos permite comprender algunos aspectos del método de medición que son de vital importancia, que se analizarán más adelante, pero en un principio nos da a entender que el avance de carro de la máquina de ensayos no está viéndose reflejado en la deformación de la muestra, por lo tanto el punto de sujeción de la muestra al agarre de la máquina no está siendo lo suficientemente firme y está deslizando sobre la misma hasta cierto punto.

Por último, después de esta zona donde la deformación parece ser constante o no aumentar, se observa una zona donde la deformación vuelve a tener una pendiente. En esta zona, se puede observar que las curvas presentan una deformación muy similar a la deformación de la máquina por lo que posteriormente se hará un análisis de este comportamiento en particular.

Para el caso de las 19 muestras de aluminio, se obtuvo el siguiente gráfico (fig. 17):

Deformación de Aluminio medida por DIC y por Máquina de ensayo en Validación 1

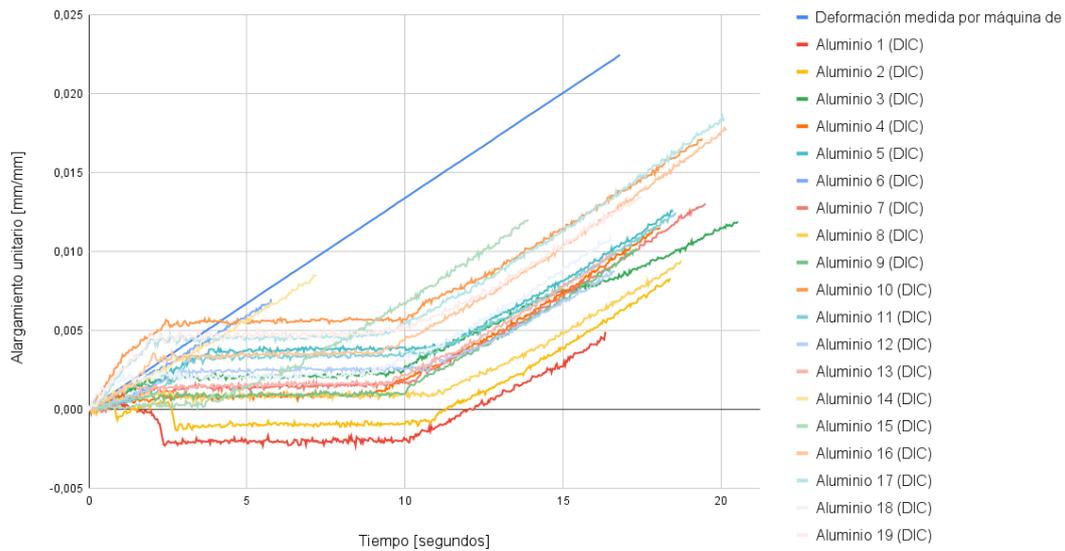


Figura 17: Gráfico de deformación en el tiempo del aluminio de la validación 1

Como podemos observar existe, al igual que en las gráficas de HIPS, una zona donde se mantienen constantes los valores de deformación por lo que se entiende que el DIC no detecta deformaciones. En este gráfico no se observa una zona inicial paralela a la deformación entregada por la máquina de tracción. La zona que muestra una longitud constante sin deformación se detecta desde los segundos iniciales hasta, aproximadamente, el segundo 10 del ensayo. El análisis de este suceso y la razón implicada se discute en la siguiente subsección.

### 5.3.1. Análisis de los datos

Resulta evidente que, al menos en un primer vistazo, los datos de los ensayos tanto de HIPS como de aluminio tienen un error implícito que debe ser sometido a análisis para lograr encontrar la fuente y, de ser posible, erradicarlo.

Primero, ¿por qué el software de DIC no detecta un aumento en la deformación o por qué detecta una menor deformación de la que debería? Se entiende que el método sólo mide deformaciones dentro de un mesh determinado. Es decir, mide deformaciones dentro de un área específica indicada por el usuario. Por lo tanto, si la deformación está ocurriendo fuera de los límites de la misma, no sería "observada" por el método y no podría ser medida.

Segundo, resulta importante recalcar que la mayoría de los ensayos, en esta ocasión, terminaron con la probeta presentando una fractura en las zonas más cercanas a los agarres. Puede deberse a que el troquel no estaba en buen estado o a una mala confección de las probetas en sí, generando que la zona de estricción de la muestra sea más difícil de capturar por la cámara y por ende, más difícil de medirse con el método, es por esto que un punto que se tuvo en cuenta a partir de esto para la próxima validación fue una

especial atención y cuidado a la hora de fabricar las probetas para evitar este suceso.

Tercero, se debe mencionar que por el sistema de agarre de la máquina de tipo prensa de ajuste manual para los espesores de muestra utilizados no haya sido ajustado lo suficientemente firme, por lo que es posible que el agarre haya sido deficiente ya sea por un resbalamiento o porque los mismos hayan producido un arrastre de las capas superficiales de la muestra hasta que la acumulación de este arrastre haya generado una fuerza de rozamiento suficiente para que el agarre sea capaz de deformar pertinentemente la muestra.

Además, existe un punto que puede introducir error externo al método de medición de deformaciones por DIC. Se está utilizando una máquina de ensayos de tracción diseñada para fuerzas de hasta 1.000 Kgf, siendo que nuestros ensayos no superan los 15 Kgf, nos encontramos en los límites inferiores de la capacidad de medición del instrumento. También abre la posibilidad de que al no poder asignarle a nuestras muestras una precarga significativa para el instrumento, puede haber implicado que la estructura general de éste haya sufrido un reajuste de cada uno de sus componentes durante el ensayo y esto se haya trasladado a lo que se puede observar como esta zona constante en las gráficas presentadas (fig. 16) (fig. 17).

Teniendo todo esto en cuenta junto a la información que se obtuvo se tomaron los datos obtenidos en los ensayos del aluminio y se realizó un análisis considerando el tiempo inicial de 12 segundos en la duración original del ensayo, recortando así aproximadamente los dos primeros tercios del mismo, donde se estaba observando que la probeta no se deformaba mientras que el avance de carro de la máquina si ocurría. Se exceptuarán de este recorte las muestras número 6 y 14, dado que la duración del ensayo no lo permite.

Esto se realiza con el fin de poder interpretar la información obtenida en el tramo de ensayo que fue correspondida la deformación medida por la máquina y por el software de DIC, extrayendo así más información con el fin de resolver estos errores al realizar posteriormente la validación 2.

### **5.3.2. Ensayo en aluminio considerando el tiempo inicial a los 12 segundos**

Como se comentó anteriormente en el análisis de los datos de la validación 1, lo que se hará será utilizar la misma información que ya se obtuvo, pero se recortarán los fotogramas del 0 al 359, es decir que al ser estos fotogramas capturados a una tasa de 30 fotogramas por segundo los primeros 12 segundos son recortados, siendo esta la parte del ensayo donde se produce un avance de carro en la máquina de ensayos de tracción intentando deformar la probeta, pero a su vez dicha deformación no se ve reflejada en la misma con el fin de llegar a una conclusión que nos permita conocer el origen de esta disparidad.

Para obtener la nueva gráfica, lo que se hizo fue trasladar la tabla a una nueva hoja, recortar los fotogramas iniciales y desplazar la ordenada del origen para que se coincida con el corte de los ejes. De esta forma, se obtuvo la siguiente gráfica (fig. 18):

Deformación de Aluminio medida por DIC y por Máquina de ensayo en Validación 1 considerando el tiempo inicial a los 12 segundos

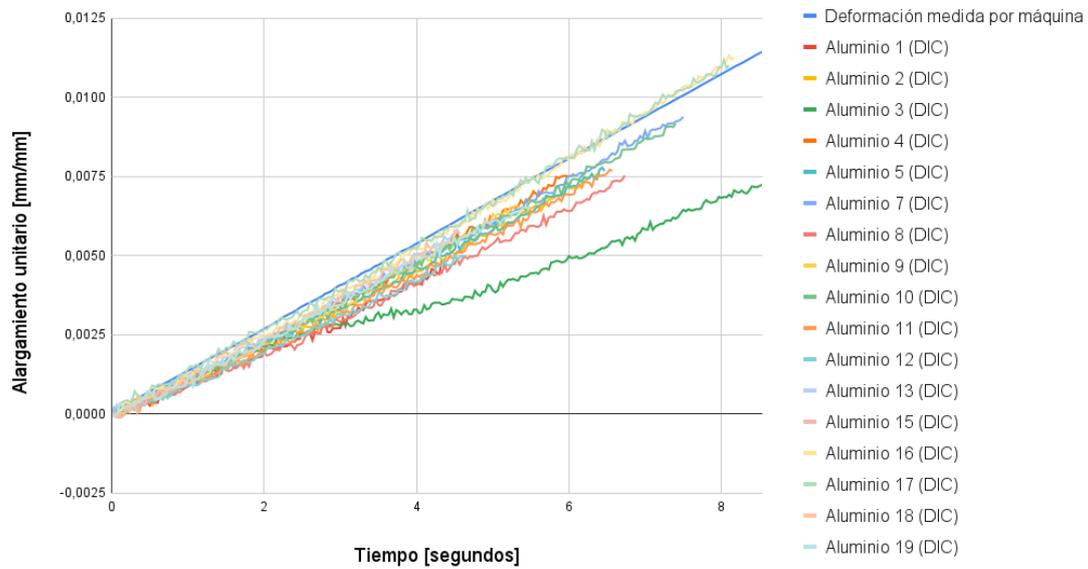


Figura 18: Gráfico de deformación en el tiempo del aluminio de la validación 1 con el tiempo inicial de ensayo considerado a los 12 segundos.

De esta forma podemos ver que los datos tienen una mayor similitud con respecto al conjunto de valores entregado por la máquina de ensayos utilizada. Esto nos indica que si bien se introdujeron distorsiones en la medición por una incorrecta ejecución del ensayo a la hora de montar la probeta en la máquina, el software de DIC pudo medir de la manera esperada el tramo de ensayo en el que la probeta si fue deformada por la máquina. Todo parece indicar que el error está asociado a probetas deficientes, a un incorrecto agarre o a ambas.

Esto da lugar a que si se corrige y eliminan estos errores en el método de montaje en una siguiente serie de ensayos podría ser validado el método de medición como se describe a continuación.

## 5.4. Validación 2: Poliestireno y aluminio

Para el segundo proceso de validación, se procedió a realizar una serie de ensayos muy similares a los anteriores, con el fin de ajustar detalles que se podían mejorar en el procedimiento y procesado, sumado a toda la información recabada en las etapas previas.

Esta validación se divide en dos partes. Primero se buscó probar que las correcciones planteadas en cuanto al método de ensayo y procesado efectivamente logren que los valores obtenidos de la medición se acerquen más a lo esperado en los ensayos con poliestireno. Una vez logrado esto, se procedió a realizar un ensayo similar, ahora con probetas de aluminio, con el fin de poder utilizar estos ensayos para correlacionarlos con valores de una celda de carga y para calcular estadísticas de la precisión y repetibilidad

de las mediciones por DIC.

Como se mencionó antes, se ensayaron nuevamente dos materiales de módulo elástico muy distinto como para poder obtener resultados en órdenes de magnitud diferentes, con el propósito de ensayar condiciones distintas.

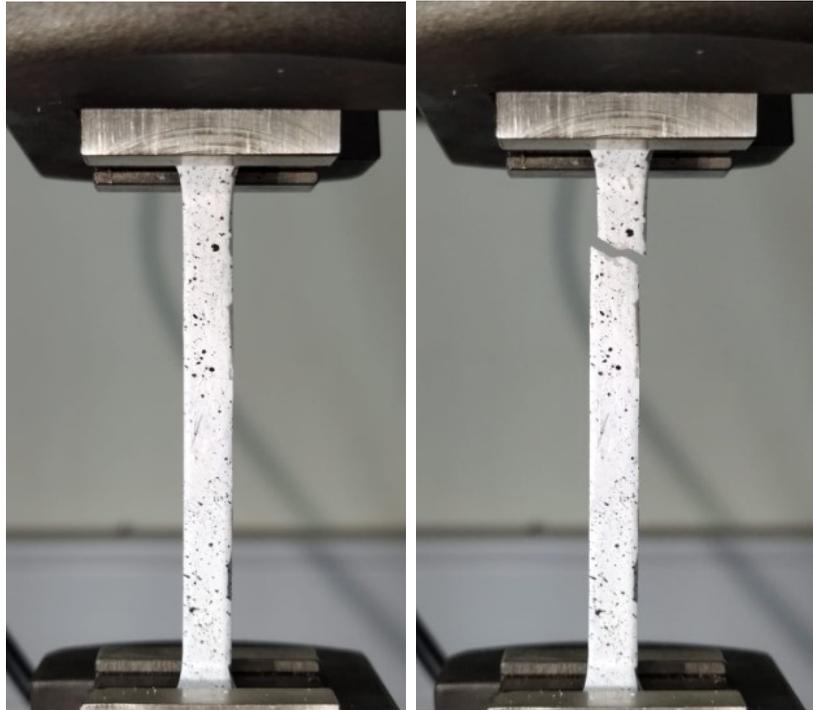
Los materiales elegidos fueron una aleación de aluminio-manganeso de la serie 3000 y poliestireno. La aleación de aluminio, fue extraída de latas y se construyeron probetas por medio de un troquel con una longitud calibrada definida. En el caso del poliestireno, se lo extrajo de envases contruidos de este material y se construyeron probetas con el mismo troquel utilizado para el aluminio. El troquel utilizado fue el mismo que en la validación 1, ya que como se menciona en la sección anterior se adjudicaron las inconsistencias en los resultados a un error de montaje de las muestras en la máquina y no a su fabricación, aunque se tuvo un especial cuidado y atención a la hora de recortar las láminas con troquel para esta serie de ensayos de la validación 2.

Para cada material se construyeron cinco probetas. Para la aleación de aluminio, por su color metalizado propio, requirió primero el realizado de una fina capa de pintura blanca que permita dar contraste para posteriormente generar un patrón aleatorio negro por medio de una pintura acrílica negra y un cepillo fino (fig. 19). En cambio, para el poliestireno al tener propiamente color blanco en su totalidad, únicamente fue necesario generar el patrón o moteado con pintura negra (fig. 20).

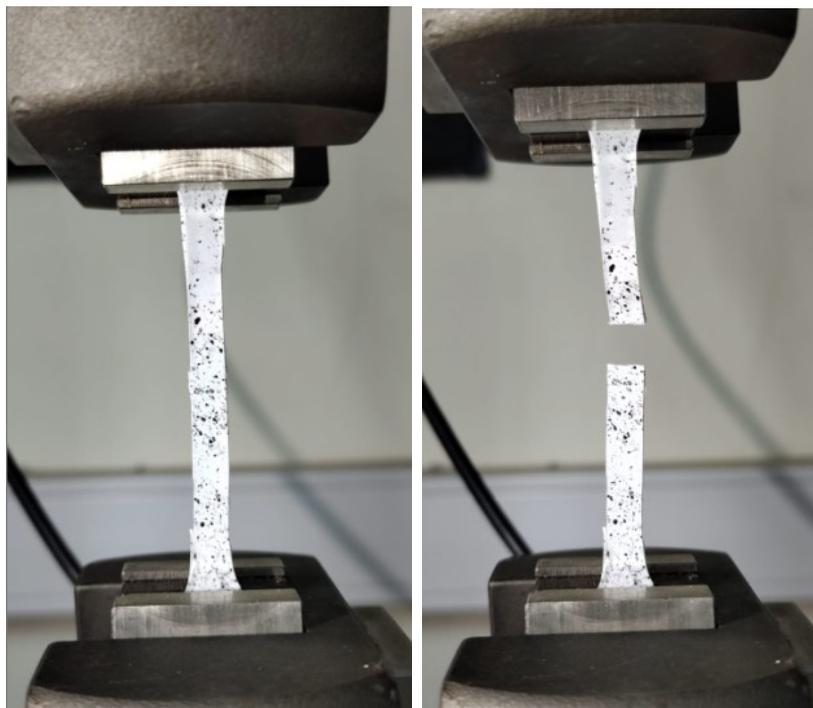
La máquina de ensayos fue configurada en una velocidad de 55 mm/min, continuando la tracción hasta llegar a la ruptura de las muestras, con el fin de probar que el software sea capaz de reconocer la acumulación de deformación en la zona de ruptura instantes antes de que esta ocurra y de poder relacionar esa deformación acumulada con el alargamiento a ruptura del material.

Además, se incorporó una fuente de luz extra a la propia del trípode utilizado para resaltar el contraste del patrón y el fondo, buscando así mitigar errores en la grabación por sombras y/o reflejos.

Nuevamente, los datos obtenidos por la máquina de ensayos fueron exportados y copiados a una memoria para analizar la correspondencia de la deformación generada y conocida por la máquina con la experimental a validar obtenida por medio de la medición con DIC.



*Figura 19: Tercer ensayo: probeta de aluminio tensionada y fracturada*



*Figura 20: Tercer ensayo: probeta de poliestireno tensionada y fracturada*

Como se mencionó, esta segunda validación constó de dos partes, primero cinco ensayos con poliestireno a modo de prueba de correcciones hechas en la aplicación del método, para luego realizar los cinco ensayos con aluminio que serían efectivamente utilizados para correlacionar con una celda de carga y para calcular estadísticas acerca de la precisión y repetibilidad de las mediciones.

Si bien se utilizaron las cinco probetas de poliestireno para realizar ensayos, hubo tres de estos ensayos en los que no se pudieron extraer datos ya que se consideraron ensayos deficientes, dado que por experimentar con la firmeza de la sujeción de la muestra a la máquina fueron dañadas o al realizar la tracción con la máquina estas fueron fracturadas fuera de la longitud calibrada invalidando esos ensayos. Esto se debió a que se utilizaron para descartar posibles errores que se habían cometido en ensayos anteriores y así poder corregirlos. Tras estas correcciones a prueba y error, se realizaron dos ensayos de los cuales se obtuvieron resultados que fueron considerados lo suficientemente aceptables considerando que se fracturaron dentro de la longitud calibrada y que no tuvieron deslizamientos en los agarres como para dar lugar a la validación final con aluminio. Los resultados de dichos ensayos de poliestireno fueron graficados correspondiéndolos en comparación con la deformación medida por la máquina de método convencional, la cual se usó de parámetro, resultando en el siguiente gráfico (fig. 21):

### Ensayo de deformación Poliestireno - Validación 2

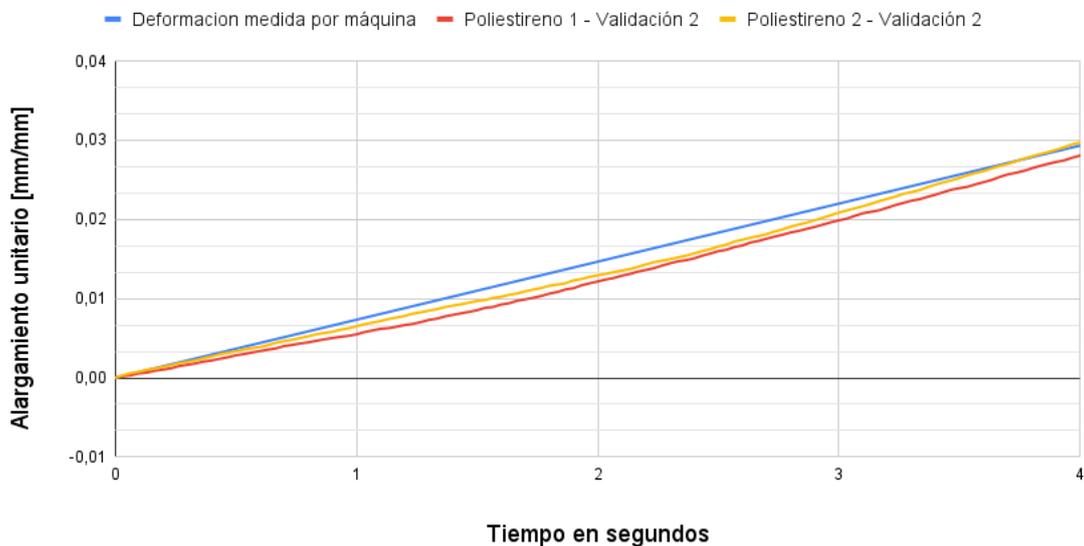


Figura 21: Gráfico de deformación en el tiempo del poliestireno en la validación 2

Luego, ya conformes con las modificaciones realizadas al método de ensayo, se procedió a ensayar las cinco probetas de aluminio. Los resultados obtenidos se graficaron en función del tiempo, correlacionando ambos métodos de medición y resultando en el siguiente gráfico (fig. 22):

## Ensayo de deformación Aluminio - Validación 2

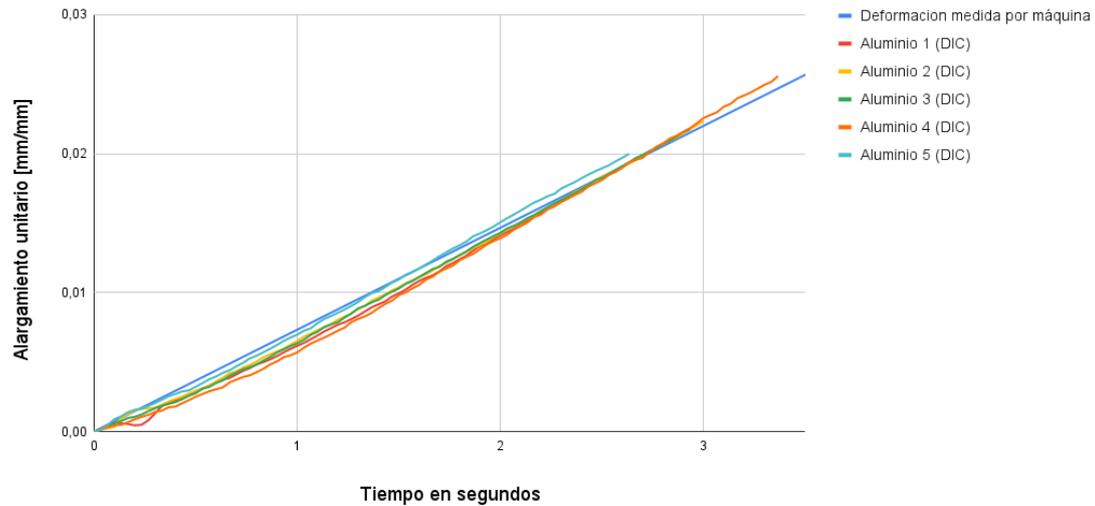
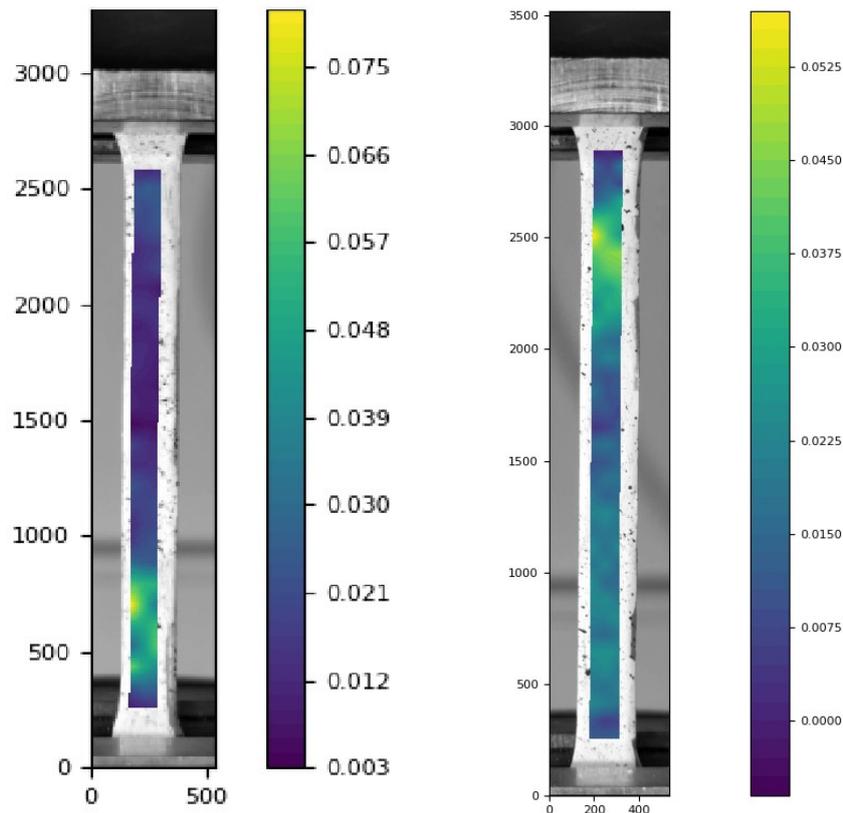


Figura 22: Gráfico de deformación en el tiempo del aluminio en la validación 2

De este gráfico lo primero que podemos resaltar es la correspondencia en la tasa de cambio de la dimensión longitudinal de la probeta tanto desde la medida por la máquina de ensayos como la obtenida por la medición óptica por el software de DIC. Este gráfico representa como la sensibilidad en la medición de la deformación se condice con la deformación aplicada de manera mecánica. Si bien en valores absolutos no todas las gráficas dan el mismo valor absoluto de deformación final previo a la ruptura, la pendiente de las rectas se ajusta a la que conocemos que estamos aplicando.

Además, podemos relacionar el mapa de densidad de deformación con la caracterización del material. Esto se debe a que analizando el último fotograma anterior a la fractura es posible observar el alargamiento producido, es decir, el alargamiento de ruptura. El mismo es esperado que se encuentre en torno al 6% [26] de deformación para el tipo de aluminio utilizado, lo que se puede observar en las gráficas a continuación (fig. 23), aprovechando así todo el potencial de la aplicación del DIC. Estas gráficas mencionadas son generadas por la librería utilizada  $\mu$ DIC y muestran como mapa de calor la distribución de deformación específica en el área de interés seleccionada con la malla. Esto permite por una escala de colores identificar las regiones de mayor concentración de deformaciones y en el caso de una muestra homogénea es posible en base a esto y de identificar la deformación específica acumulada en el último fotograma cual fue el alargamiento que tuvo previo a la ruptura de la probeta.



*Figura 23: Gráfico de densidad de deformación en el fotograma final previo a la ruptura en dos ensayos en aluminio en la validación 2*

También es importante mencionar que la resolución de medición del método se encuentra, aproximadamente, en 0,0000134 mm/mm. Se dice aproximadamente porque este valor depende siempre de la resolución de la cámara y la distancia de ésta a la probeta, por lo que esa conclusión solo atañe a este trabajo y debería ser reevaluada en trabajos futuros.

## 5.5. Análisis estadístico de la validación 2

Con el fin de poder validar el método y la replicación de los resultados obtenidos por medio de los ensayos destinados a la validación del DIC descritos en esta sección previo a su aplicación para tejidos biológicos, se realizó un análisis estadístico de los resultados obtenidos con el fin de asegurar la confiabilidad de los ensayos realizados y de su consistencia, además de determinar la significancia de los resultados.

Para realizar este análisis estadístico, apoyándonos en que el parámetro utilizado de referencia para cuantificar la deformación de la probeta es la máquina de ensayos presente en el laboratorio que realiza deformaciones de manera lineal a velocidad constante, el estudio se basa en el análisis de las pendientes de las rectas de deformación obtenidas por medio del método de DIC (ver fig. 22), similar a lo realizado por Rizzuto et al., 2014

[20].

Esto se realizó por medio del cálculo de regresiones lineales que ajusten a cada una de las curvas de deformación obtenidas para cada ensayo, valiéndonos de la herramienta de regresión lineal que brindan los software de hojas de cálculo como Google Sheets. Todas las regresiones lineales fueron realizadas forzando la ordenada al origen al cero, para que se condigan con la correspondiente entregada por la máquina de ensayos. Cada uno de los resultados de las regresiones fue tabulado.

Posteriormente, se calculó la media, desvío estándar y desvío estándar relativo del conjunto de las cinco pendientes obtenidas de esta validación.

Los resultados obtenidos de cada uno de los cálculos estadísticos son los siguientes (fig. 24) (fig. 25):

REGRESIONES LINEALES	ALUMINIO 1	ALUMINIO 2	ALUMINIO 3	ALUMINIO 4	ALUMINIO 5	MAQUINA DE TRACCION
PENDIENTE	0,0069	0,0072	0,0072	0,0072	0,0075	0,0073
ORDENADA AL ORIGEN	0	0	0	0	0	0
ERROR ESTANDAR DE LA PENDIENTE	0,000048	0,000028	0,000033	0,000048	0,000024	
COEFICIENTE DE DETERMINACION (R2)	0,996	0,999	0,998	0,996	0,999	
ERROR ESTIMADO PARA LA ESTIMACION EN Y	0,00058	0,00047	0,00053	0,00094	0,00033	
ESTADISTICA F	20413	63713	46370	22637	97331	
GRADOS DE LIBERTAD	73	90	88	101	79	
SUMA DE CUADRADOS DE LA REGRESION	0,007	0,014	0,013	0,020	0,010	
SUMA DE RESIDUOS CUADRATICOS	0,000025	0,000020	0,000025	0,000089	0,000084	

Figura 24: Resultados de las regresiones lineales realizadas en los cálculos estadísticos de la validación 2

ESTADISTICA DE LAS PENDIENTES	ALUMINIO 1	ALUMINIO 2	ALUMINIO 3	ALUMINIO 4	ALUMINIO 5	MAQUINA DE TRACCION
PENDIENTE	0,0069	0,0072	0,0072	0,0072	0,0075	0,0073
PENDIENTE MEDIA	0,0072					
DESVIÓ ESTANDAR ( $\sigma$ )	0,00020					
DER%	2,85					

Figura 25: Cálculos de media y desvío estándar para las pendientes obtenidas de las regresiones lineales de la validación 2

Como resultado de este análisis, los principales puntos a destacar son:

- todas las series de datos de deformación obtenidos ajustan correctamente a una recta como era esperado, obteniéndose valores del coeficiente de determinación prácticamente iguales a 1
- si comparamos las pendientes calculadas por los resultados de DIC con la de la deformación conocida realizada por la máquina, todas se encuentran en valores

absolutos cercanos, con una diferencia relativa máxima de aproximadamente el 6 %

- los resultados de los ensayos medidos por DIC son consistentes entre sí, resultando un DER % entre las pendientes obtenidas de las regresiones del 2,85 % lo cual se considera, a criterio de quien escribe, aceptable para los fines de este estudio

## 5.6. Gráficas de tensión-deformación y cálculo del módulo de Young

En esta sección se obtiene el módulo de Young de las probetas de aluminio de la validación 2 que resulta fundamental a la hora de realizar una caracterización mecánica y, además, para poder contrastar el valor obtenido con la información extraída de la máquina de ensayos de tracción uniaxial y aquellos obtenidos con nuestro método.

Para esto, se tomaran los valores de Fuerza que entrega la máquina de ensayos, se calculará a partir de estos la tensión sobre la probeta y se harán dos gráficas: una con los valores de deformación obtenidos de la máquina y otro con los valores de deformación obtenidos mediante la técnica DIC. De esta forma obtendremos dos gráficas de tensión-deformación de donde se podrá calcular el módulo de Young o límite elástico. Todos los procedimientos fueron realizados en hojas de cálculo de Google Sheets.

Lo primero que se realizó fue el cálculo de la tensión ejercida sobre la probeta. Para esto, se tomaron las tablas de datos y se dividieron los valores de Fuerza sobre la superficie calibrada de la probeta. La misma tenía 6 mm de ancho y 0.1 mm de espesor según se pudo medir con un calibre. Esto se aplicó a cada uno de los datos del conjunto de datos que se obtuvo durante los ensayos, obteniendo así la tensión para cada muestreo.

Una vez obtenida la tensión, se realizaron las dos gráficas para poder calcular la pendiente del tramo lineal de la curva tensión-deformación, buscando así obtener el módulo de Young por medio del método del cálculo de la tangente. Se obtuvieron las siguientes gráficas (fig. 26) (fig. 27):

### Engineering Strain - Aluminio 5 Validación 2 - Gráfico con deformación medida por la máquina de ensayos

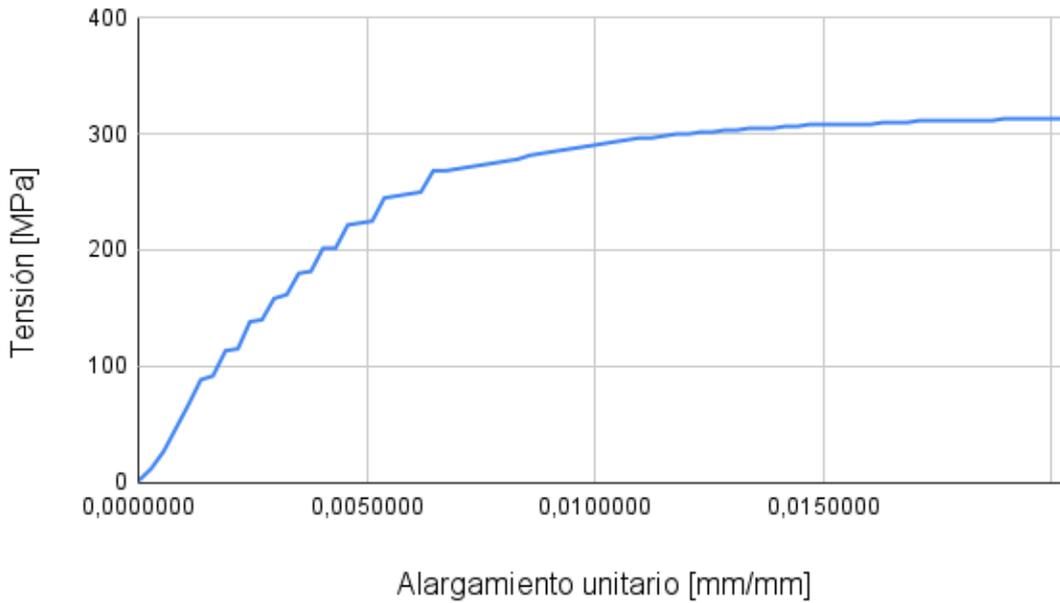


Figura 26: Gráfica de tensión-deformación obtenida por medio de la deformación medida por la máquina de ensayos

### Engineering Strain - Aluminio 5 Validación 2 - Gráfico con deformación medida por DIC

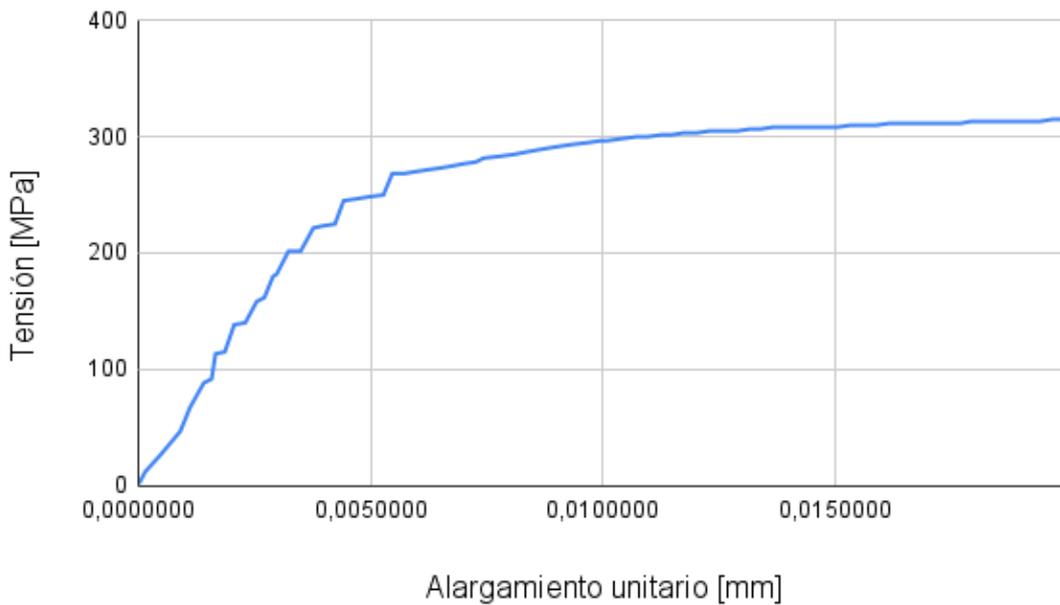


Figura 27: Gráfica de tensión-deformación obtenida por medio de la deformación medida por DIC

En base a estas gráficas se calcula la pendiente de la región elástica de la gráfica de tensión-deformación para obtener así el módulo de Young. Se obtuvo un valor de 50396,37 MPa para el módulo calculado a partir de los valores de deformación de la máquina de ensayos y un valor de 55232,17 MPa para el calculado con DIC. Existe una diferencia de 9,59 % entre el obtenido a partir de la máquina de ensayos y el obtenido mediante DIC.

Esta diferencia entre un valor y otro se deben a causas que ya se analizaron previamente. Una de ellas es que el DIC mide la deformación porcentual en una superficie llamada mesh de la muestra y no en toda la longitud de la muestra. Por lo tanto es lógico que exista una diferencia como la que se evidencia aquí.

Haciendo un análisis de los valores obtenidos y contrastando con la bibliografía, podemos ver que los valores obtenidos en nuestros cálculos difieren de aquellos obtenidos por los valores de referencia, que rondan los 69 GPa [25] con pequeñas variaciones dependiendo la fuente. Si bien es una diferencia considerable, debe tenerse en cuenta que el sensor utilizado para este tipo de probetas no era el ideal. Era una celda de carga para tracción con un rango de medida que llegaba a los 1000 Kgf y tenía una resolución de alrededor de 0.1 Kgf. Si se tiene en cuenta que nuestros ensayos no superaban en ningún caso los 19 Kgf, se puede decir que hay un error asociado a un sensor inadecuado.

## **5.7. Estudio de la distribución de la deformación a lo largo del material**

En esta etapa del estudio se realizó un análisis de los mapas de calor de deformaciones generados por medio del DIC contrastado con los valores exportados en formato de matriz con el fin de poder realizar gráficas que permitan estudiar cuantitativamente la acumulación de deformación en el material a lo largo de su eje longitudinal.

Para exportar los valores de cada mapa de calor de interés, se incorporó un nuevo bloque de código el cual se encargaba de extraer dicha matriz en formato .xlsx para su posterior tratamiento.

Realizar un estudio de esta distribución de deformaciones aporta información valiosa a la hora de describir el comportamiento del material, entre estos aportes se destacan los siguientes aspectos:

- **Distribución de la deformación:** analizar como se distribuye a lo largo de la longitud de la probeta permite analizar como se deforma el material bajo carga indicando regiones de alta deformación y potenciales áreas de deformación excesiva o ruptura.
- **Análisis de la deformación:** estudiar diferentes etapas de la deformación permite comprender el comportamiento de la deformación del material, buscando predecir cambios de forma y desplazamientos en diferentes condiciones de carga.
- **Predicción de fallos y ruptura:** al estar analizando el material previo a la ruptura, este análisis ayuda a identificar la posible ubicación del fallo en instantes previos a que este suceda.

- Caracterización del material: observando el máximo de deformación acumulada de una probeta, es posible relacionar este valor con la deformación de ruptura del material analizado.

Para realizar este análisis, se consideraron los fotogramas del ensayo ubicados al 25 %, 50 %, 75 % y 100 % del tiempo de ensayo, buscando así obtener dicha información para instantes igualmente espaciados a lo largo del ensayo. Se realizó el mismo análisis para una probeta de cada material utilizado en las validaciones, es decir, para los dos tipos de aluminio utilizados, para poliestireno y para HIPS.

Se realizan gráficos que relacionan la deformación acumulada en la probeta y la altura de la probeta. De esta forma, se visualizan mejor los mapas de calor y cómo se distribuye la deformación a lo largo de la probeta. Además nos permite comparar más de un mapa a la vez por gráfico, lo que muestra la evolución de la distribución de la deformación a lo largo del ensayo.

Los gráficos resultantes son los siguientes (ver fig. 28, 29, 30 y 31):

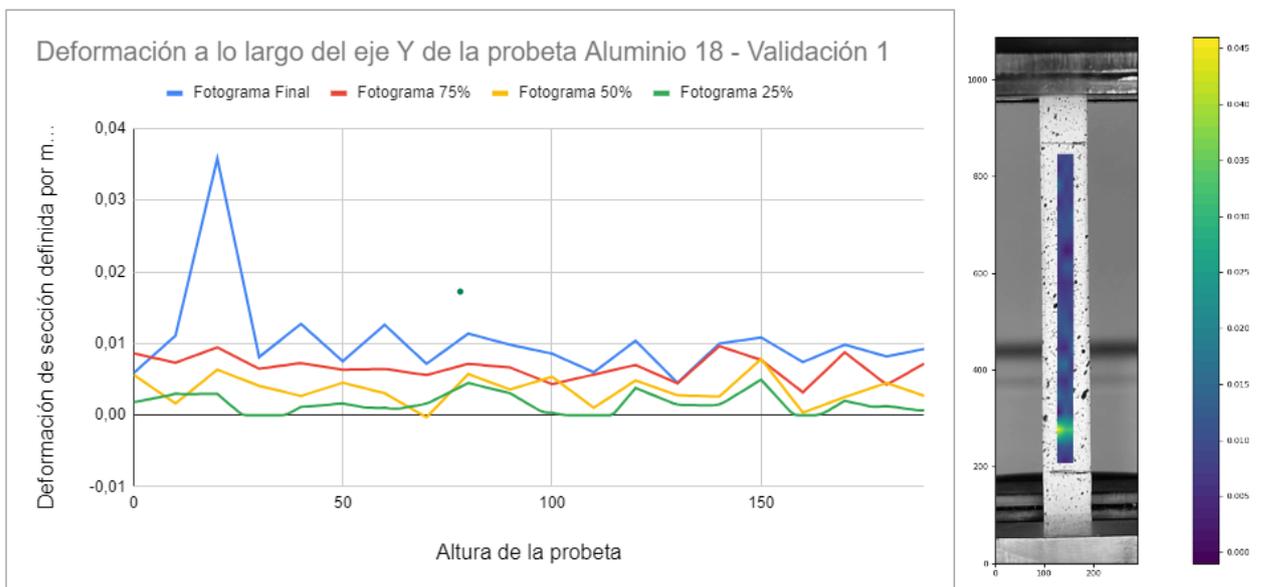


Figura 28: Gráfica de distribución de las deformaciones a lo largo del eje Y en una probeta de aluminio en la validación 1

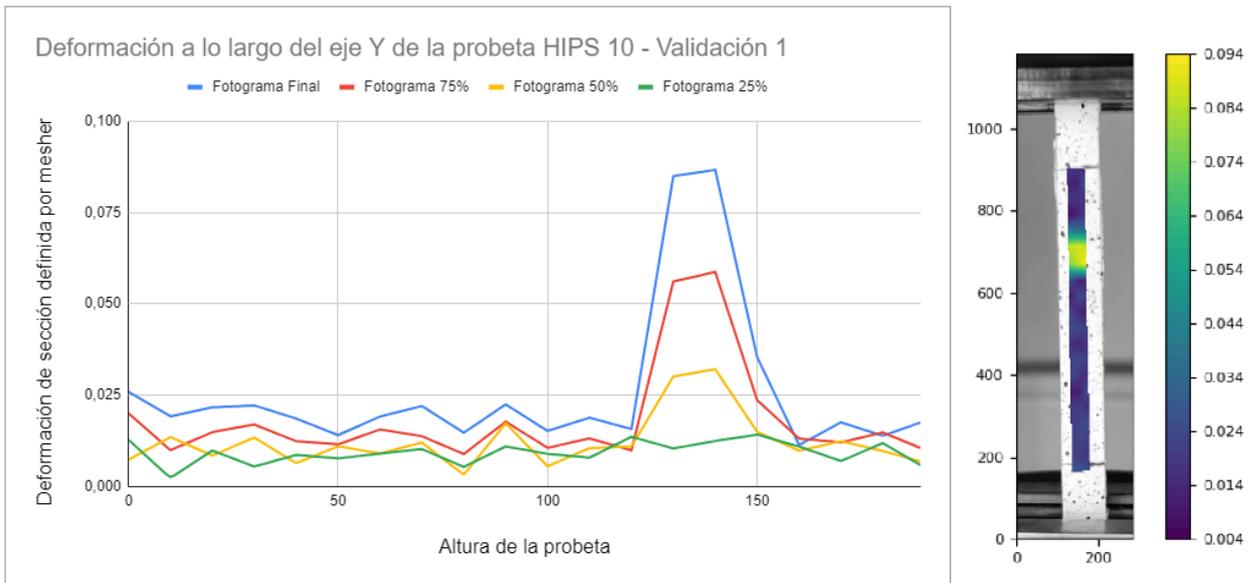


Figura 29: Gráfica de distribución de las deformaciones a lo largo del eje Y en una probeta de HIPS en la validación 1

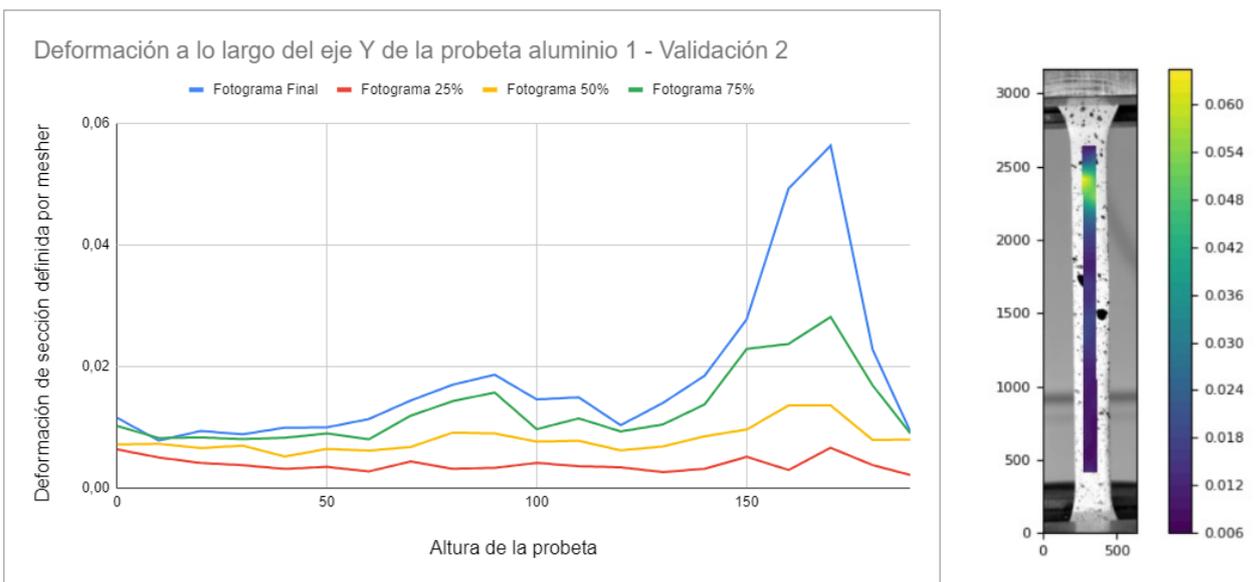


Figura 30: Gráfica de distribución de las deformaciones a lo largo del eje Y en una probeta de aluminio en la validación 2

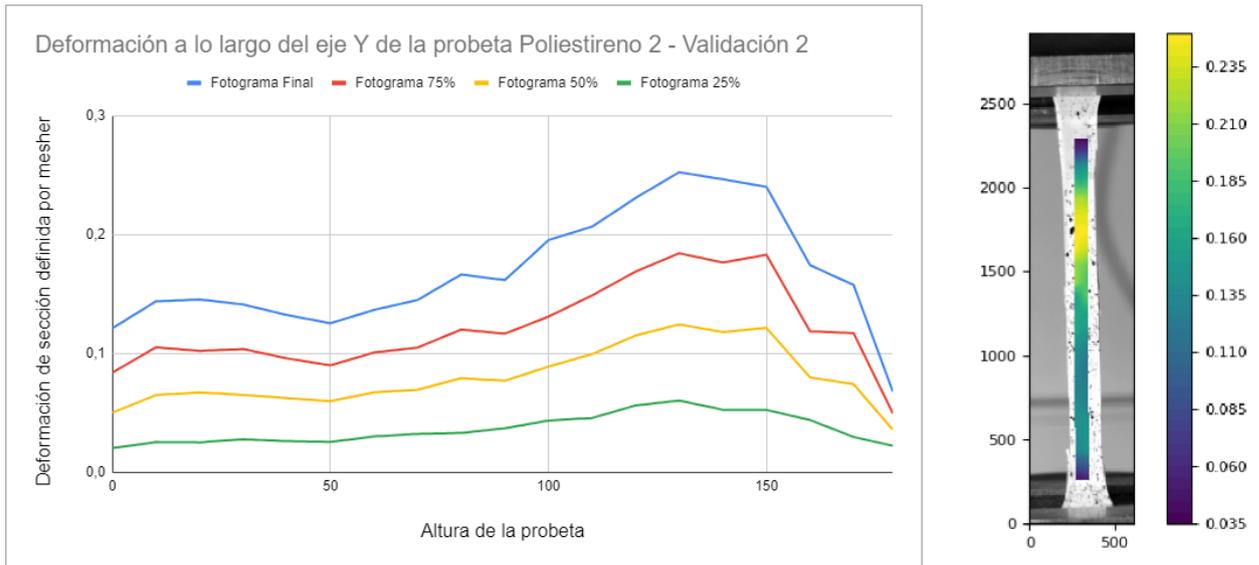


Figura 31: Gráfica de distribución de las deformaciones a lo largo del eje Y en una probeta de poliestireno en la validación 2

De este análisis se pueden tomar diversas conclusiones de los resultados. Por un lado, es posible distinguir similitudes en la deformación de los dos tipos de aluminio, donde ambos se deforman con cierta uniformidad la primera mitad del ensayo, para luego dar lugar a una marcada zona de estricción la cual acumula deformación para finalmente dar lugar a la ruptura de la probeta.

Además, se puede observar claramente como el aluminio de la validación 2, correspondiente a la aleación de aluminio 3003 H14, produce su ruptura aproximadamente al 5,80 % de la deformación unitaria y otros ensayos[25] sugieren que el valor de deformación a ruptura de este aluminio debe ser del 6 % por lo que el error asociado es de aproximadamente 3,33 % que puede estar asociado a una muestra poblacional demasiado pequeña. Por otro lado, en el aluminio utilizado para la validación 1, se produjo la ruptura en un 4 % de la deformación unitaria de la porción donde se produjo la estricción. Esto se considera una notable mejoría en los resultados obtenidos.

En el caso de los polímeros, se distingue rápidamente que la deformación tiende a ser más uniforme a comparación de la observada en los metales ensayados, lográndose zonas de deformación más amplias.

Sin embargo, es notorio que en el poliestireno convencional es donde esta distribución se produce de manera más homogénea que en su variante de poliestireno de alto impacto. En este último se observan zonas de estricción en etapas más tempranas del ensayo, lo que se corresponde con su dureza.

En correlación con esto, también es destacable como el alargamiento tolerado previo a la ruptura por los polímeros fue mayor que en los metales, principalmente en el poliestireno convencional donde la deformación de ruptura estuvo en torno al 23,50 %, mientras que en el poliestireno de alto impacto esta fue de  $\sim 10\%$ .

Tras haber podido corregir el método hasta lograr validar la precisión y exactitud

de los resultados aportados sobre  $\mu$ DIC a la hora de medir deformaciones en ensayos de tracción tal como fue mostrado a lo largo de esta sección y concluido con el análisis estadístico de la validación 2, podemos considerar que es un método válido para su aplicación. En base a esto, es que se considera apto el método para los ensayos de aplicación biológica del mismo para la caracterización de hojas de espinaca descelularizada, el objetivo final de este trabajo.

## 6. Aplicación a muestras biológicas del método

Una vez validado el método de medición de deformaciones por correlación de imágenes digitales, se procedió a aplicar el método en la caracterización mecánica de andamios de hoja de espinaca descelularizada y en la medición de deformación de ruptura de hojas de espinaca. Para esto, se realizaron ensayos a tracción de los andamios en una máquina de ensayos pero midiendo la deformación por DIC. Los datos obtenidos fueron correspondidos con los valores de tensión entregados por la máquina y se constituyeron diversos tipos de gráficos además de calcularse los valores de alargamiento a ruptura y módulo de Young de las muestras analizadas.

Para poder obtener un resultado final en este proyecto, se realizaron ensayos de tracción en el Área de Biología Odontológica (ABO) de la Facultad de Odontología de la UNC, utilizándose una máquina de ensayos universal Digimes RS-8000-5 incorporando una celda de carga de tracción Transcell Technology Inc. modelo BSS-500kg. No se utilizó la máquina de ensayos que se venía utilizando debido a un impedimento técnico: El sensor de la máquina de ensayos del laboratorio de materiales de la FCEFYN tiene una resolución de aproximadamente 1 N y en los ensayos realizados sobre espinaca descelularizadas se presentan fuerzas máximas de aproximadamente 0,2 N. Por otro lado, la máquina de ensayos utilizada en el ABO tiene una resolución de 0.001 N, por lo que su uso en este caso resulta fundamental para poder lograr una correcta medición de la fuerza ejercida durante el ensayo.

### 6.1. Metodología del ensayo en hojas de espinaca sin descelularizar

Para realizar los ensayos sobre hojas de espinaca sin ningún tratamiento aplicado de descelularización, se utilizó la máquina de ensayos del Laboratorio de MAteriales de la FCEFYN. Por las justificaciones mencionadas, no se puede medir la fuerza ejercida para deformar las probetas pero sí entrega un valor de deformación final correspondido al momento de ruptura, por lo que se decidió sólo caracterizar el alargamiento a ruptura. Para esto se sometieron a ensayo 5 probetas rectangulares de 50 mm por 30mm y se midió, mediante la técnica DIC, la deformación de la muestra. Se obtuvieron los resultados que podemos ver en la siguiente gráfica (fig. 32):

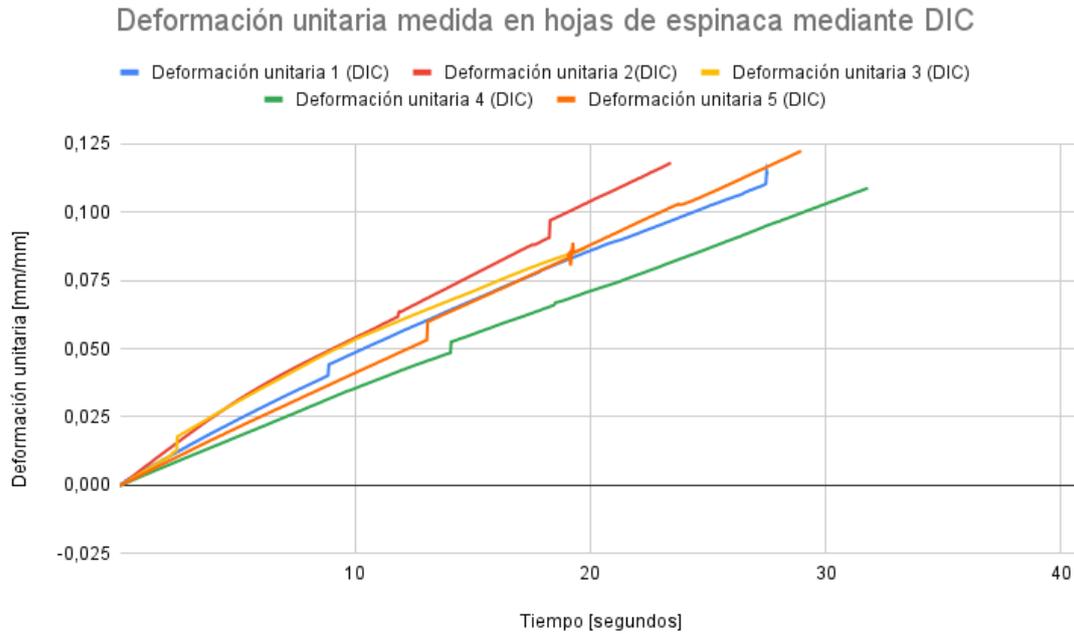


Figura 32: Deformación en función del tiempo para las muestras de espinaca sin tratamiento

De esta forma se obtuvieron algunos valores que se ven reflejados en la siguiente tabla (fig. 33):

	Deformación unitaria a ruptura (DIC)	Deformación unitaria a ruptura DIC [%]	Deformación a ruptura DIC [mm]	Deformación a ruptura medida [mm]	Error [%]
Probeta 1	0,11	11,38	5,69	5,88	3,25
Probeta 2	0,12	11,80	5,90	6,07	2,83
Probeta 3	0,09	8,67	4,34	4,39	1,21
Probeta 4	0,11	10,88	5,44	5,58	2,54
Probeta 5	0,12	12,23	6,12	6,23	1,81
Media		10,99	5,50	5,63	2,33

Figura 33: Deformación unitaria a ruptura medida mediante DIC, deformación unitaria a ruptura medida por la máquina de ensayos y error asociado

De esta manera se pueden comparar los valores obtenidos mediante DIC y mediante la máquina de ensayos a ruptura. El error asociado a estas mediciones tiene una media de 2.33 %, lo cual se corresponde con los valores ya obtenidos a lo largo de la validación.

## 6.2. Metodología del ensayo en hojas de espinaca descelularizada

Para estos ensayos, se configuró la velocidad de avance de carro en 1 mm/min. A partir de los valores de fuerza registrados el operador del área realizó el cálculo de los valores de esfuerzo, los cuales entregó tabulados en conjunto con los valores de deformación registrados por la máquina.

Este ensayo se realizó en el Área de Biología Odontológica debido a que es el lugar donde usualmente se derivan este tipo de ensayos de tejidos biológicos por parte del Laboratorio de Química Orgánica y Biológica de la FCEFyN, buscando repetir las condiciones con las que ensayan los biomateriales.

El tejido ensayado fue espinaca descelularizada aportada para el estudio por el Laboratorio de Química Orgánica y Biológica de la FCEFyN. El mismo fue cortado en forma de “hueso de perro” y preparado para incorporar el análisis por el método de correlación digital de imágenes aplicando sobre este un patrón de moteado aleatorio con un marcador de fibra fina dado la humedad e hidratación del mismo como se detalla en la sección correspondiente (sección 4.5.2). Se tomó la medida inicial del mismo al instante antes de comenzar la deformación para los posteriores cálculos.

También, se montó el sistema de adquisición de imágenes como se describe en la sección correspondiente de montaje del método de grabación (sección 4.4).

### **6.3. Resultados y discusión**

Se obtuvieron los valores de deformación por dos métodos diferentes, uno mediante el DIC y otro mediante la máquina de ensayos de tracción, además de los valores de fuerza de tracción de la celda de carga para cada instante de deformación medida por la máquina. Para poder realizar una comparativa entre ambos, se tuvo que undersamplear el conjunto de datos obtenido mediante el DIC ya que tenía un muestreo de 30Hz, mientras que la máquina de ensayos de tracción tenía un muestreo de 5Hz. Una vez hecho el undersampling de 6 a 1, se pudo realizar la comparación entre ambos conjuntos de datos. Debido a que se ensayaron dos muestras, se obtuvieron las siguientes gráficas (fig. 34) (fig. 35):

Deformación unitaria medida por máquina de ensayos vs medida por DIC - Espinaca descelularizada 1

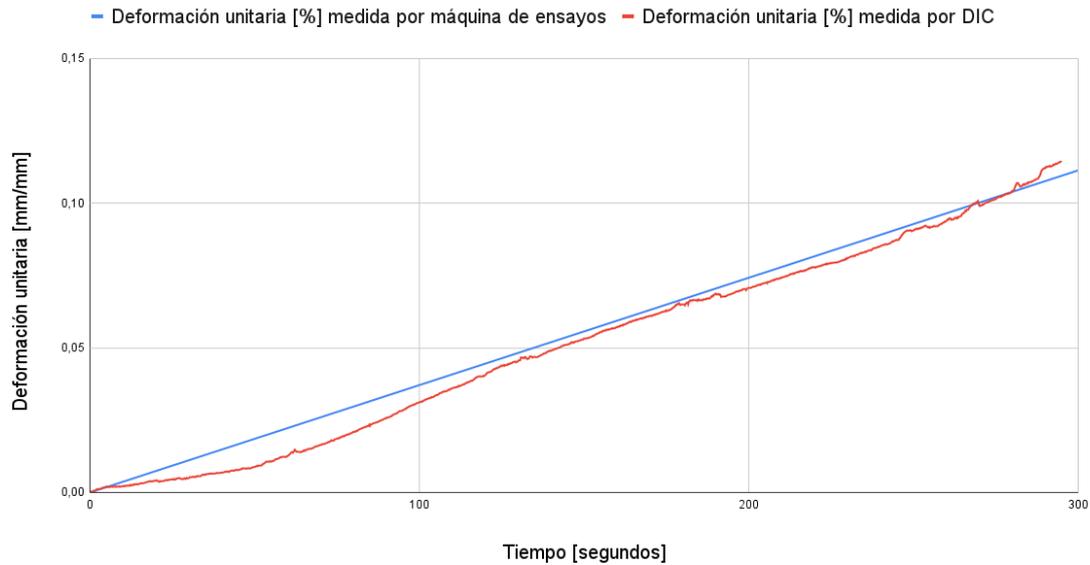


Figura 34: Deformación en función del tiempo para la muestra N°1

Deformación unitaria medida por máquina de ensayos vs medida por DIC - Espinaca descelularizada 2

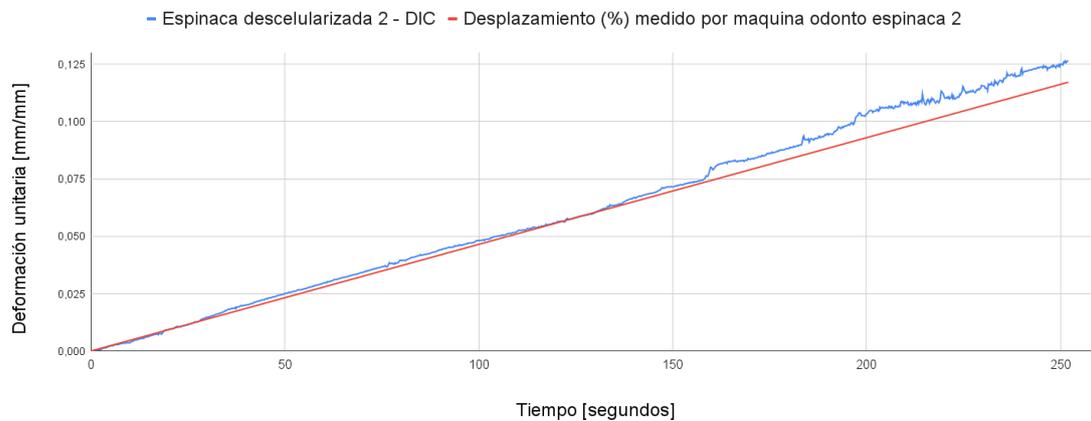


Figura 35: Deformación en función del tiempo para la muestra N°2

Podemos ver cómo ambas curvas de la deformación medida mediante DIC se coinciden con la curva lineal que entrega la máquina de ensayos. Las diferencias que existen entre una curva y la otra se deben a algunas características de medición del DIC que ya se mencionaron previamente como es la medición de la deformación en una superficie de la muestra y no en su totalidad, además de medir la deformación directamente sobre la muestra, mientras que lo que la máquina mide como deformación es en realidad el avance de carro donde esta sujeta la muestra.

Una vez obtenida esta comparativa, se procedió a realizar las curvas de tensión deformación con los valores medidos por el DIC. Las gráficas obtenidas son las siguientes

(fig. 36) (fig. 37):

Gráfico de tensión-deformación de espinaca descelularizada 1 - deformación medida por DIC

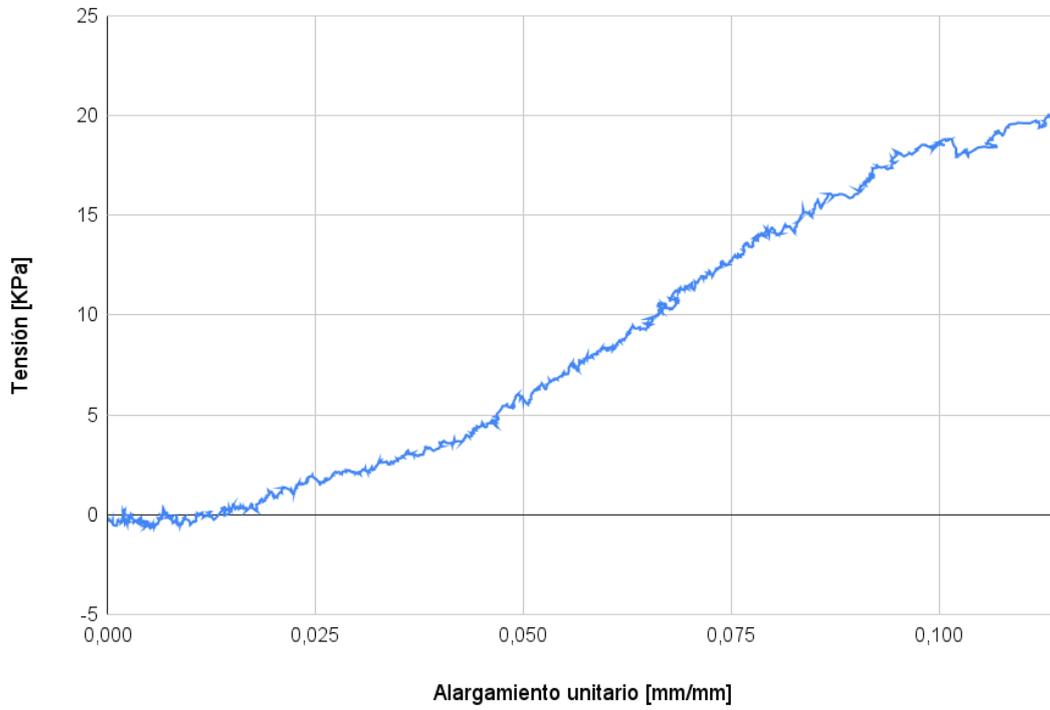


Figura 36: Gráfico Tensión-Deformación de la muestra N°1

Gráfico de tensión-deformación de espinaca descelularizada 2 - deformación medida por DIC

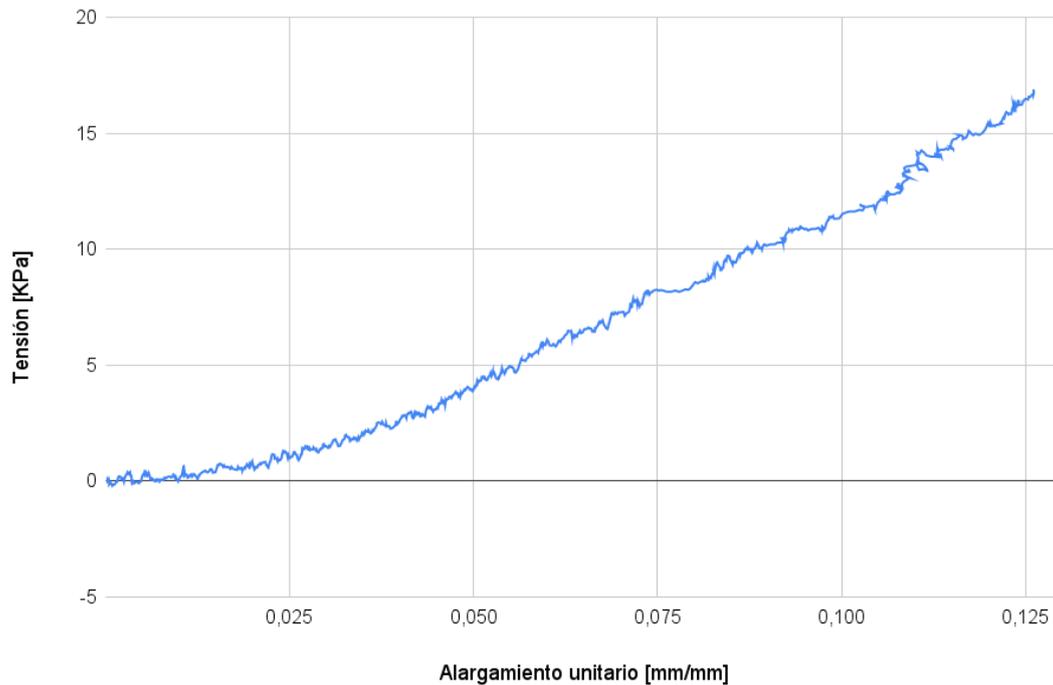


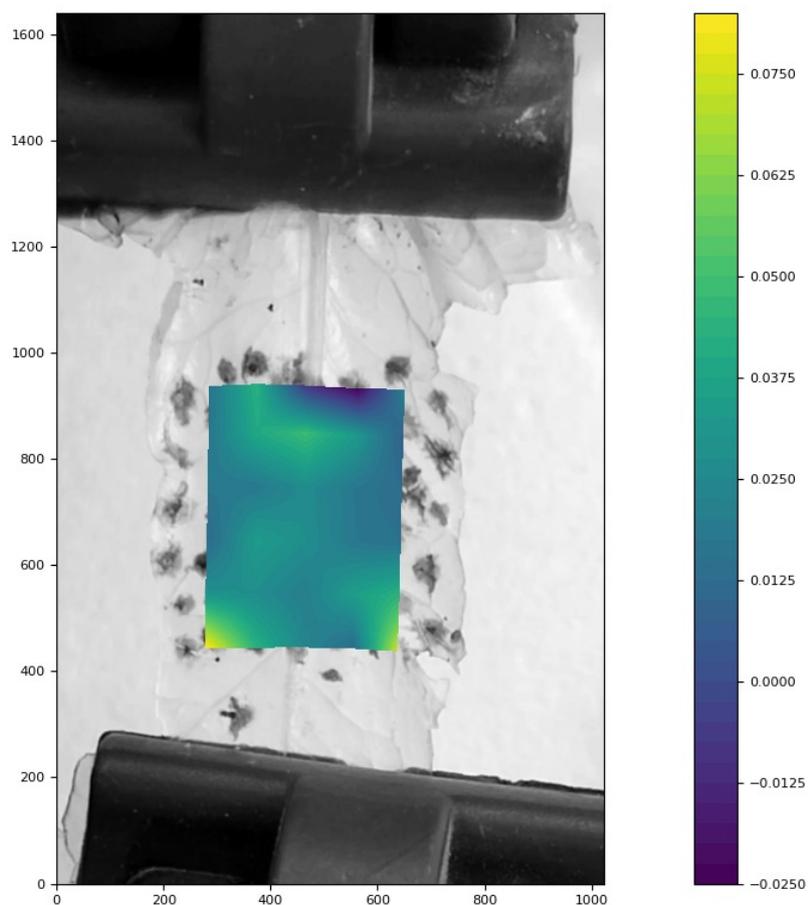
Figura 37: Gráfico Tensión-Deformación de la muestra N°2

Como fue mencionado previamente, la medición por correlación de imágenes digitales depende de cierta continuidad en el flujo óptico del moteado, es por esto que al alcanzar la ruptura de la muestra se corta el video a analizar y los gráficos de tensión-deformación permiten ver el comportamiento hasta el momento de la ruptura.

Dicho esto, el valor de deformación final se corresponde con el alargamiento a ruptura y con esto los valores finales de estas gráficas se corresponden con la ruptura de las muestras. Por lo tanto, se puede decir que la muestra 1 tiene un alargamiento unitario de ruptura del 11,4 % (fig. 36) y la muestra 2 del 12,6 % (fig. 37).

Además, a partir de las gráficas de tensión deformación, se realizó el cálculo del módulo de Young para ambas muestras por medio del cálculo de la pendiente de la región elástica de la gráfica. Efectuado esto se obtuvo como resultado un módulo de Young de 248,70 KPa para la muestra N°1 y 184,54 KPa para la muestra N°2.

También se obtuvieron mapas de calor que muestran la distribución de la deformación en la hoja descelularizada durante el ensayo como podemos ver en las siguientes imágenes:



*Figura 38: Distribución de la deformación en la superficie de la probeta N°1*

En la imagen podemos ver la distribución de la deformación sobre la superficie de la hoja de espinaca descelularizada en el último fotograma analizado previo a la ruptura (ver fig. 38). Como podemos observar, la distribución de la deformación no es homogénea sobre la superficie, y está principalmente concentrada sobre los extremos inferiores, zonas donde se producen instantes después los desgarramientos del tejido, como se ve en la imagen (ver fig. 39):

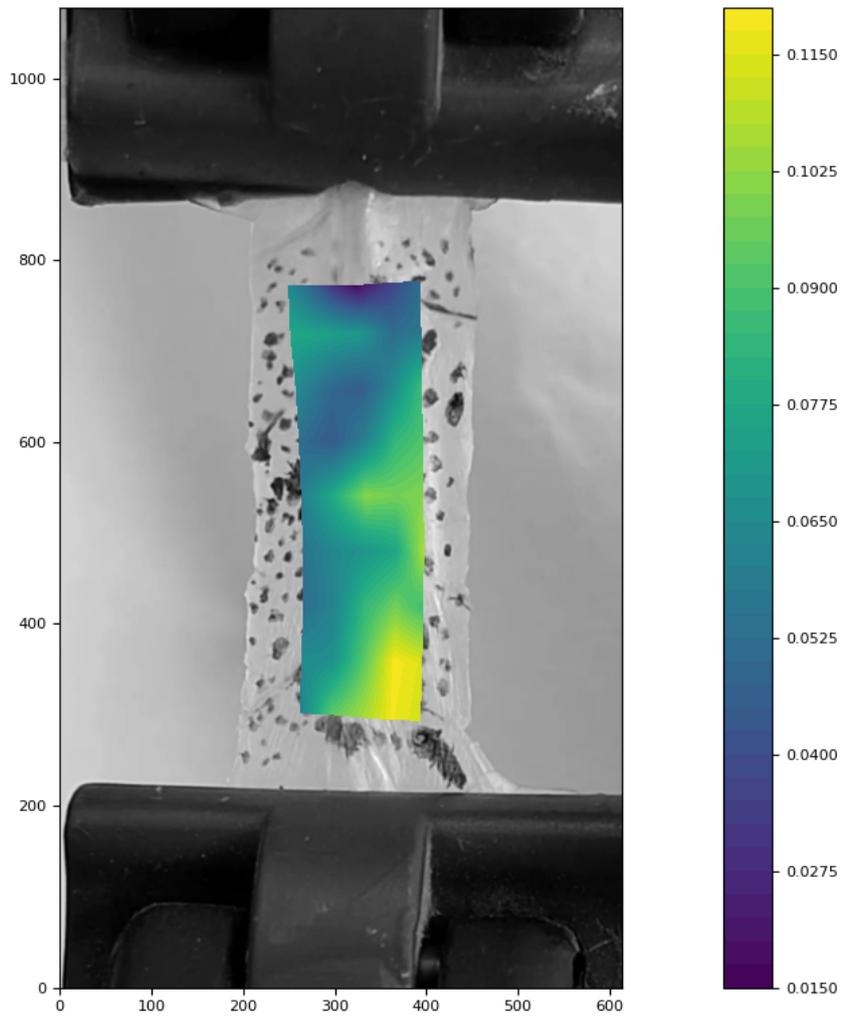


*Figura 39: Muestra N°1 con desgarramientos*

También es posible observar que la deformación acumulada en las zonas de ruptura se encuentra en torno al 7,5%, mientras que si a ese dato lo comparamos con los mostrados anteriormente sobre el alargamiento a ruptura de la muestra completa, el cual es de 11,4%, lo que encontramos es una manera de cuantificar las diferencias entre partes de mayor y menor resistencia de la muestra.

Por otro lado, también se puede observar como en un momento intermedio del ensayo estando lejos del momento de ruptura, es posible observar múltiples zonas que acumulan mayor porcentaje de deformación. Esto se debe a la anisotropía de la distribución de cargas del material.

En la imagen a continuación (fig. 40), es posible ver como en un estadio intermedio del ensayo en la segunda muestra de espinaca descelularizada, aproximadamente al minuto 3 de ensayo, es posible distinguir claramente esta zona y como más adelante al final del ensayo se corresponde con el punto de ruptura (fig. 41).



*Figura 40: Mapa de calor de distribución de deformaciones de la muestra de espinaca N°2. Es posible distinguir la zona de mayor acumulación de deformación del material.*



*Figura 41: Muestra de espina N°2 después de alcanzar la ruptura del material en el ensayo.*

Comparando los resultados obtenidos con los aportados por estudios anteriores realizados de manera convencional por Gershlak et al. (2017) [19], se observa que los valores se corresponden, lo cual se detalla en la siguiente tabla que recopila los valores obtenidos en este trabajo con los obtenidos por el estudio mencionado (fig. 42):

<b>Característica mecánica</b>	<b>Muestra 1 - espina decelularizada</b>	<b>Muestra 2 - espina decelularizada</b>	<b>Estudios anteriores en espina decelularizada</b>
Alargamiento a ruptura	11,40%	12,60%	11,50%
Módulo de elasticidad	248,7 KPa	184,54 KPa	300 KPa

*Figura 42: Tabla de comparación de valores de caracterización mecánica de espina decelularizada con los resultados de estudios previos realizados por Gershlak et al. (2017) [19].*

Con los resultados obtenidos y su análisis, consideramos exitosa la aplicación de la correlación de imágenes digitales para la caracterización mecánica de andamios de espina decelularizada. El método desarrollado fue suficiente para medir la deformación

de las muestras sometidas a tracción y permitiendo corresponder los datos obtenidos con los de la celda de carga de la máquina de ensayos para obtener valores de módulo de Young y de deformación unitaria, los cuales se condicen con los aportados por la bibliografía investigada.

Además, el análisis de los mapas de calor entregados por el software permitió un análisis de la distribución de deformaciones en estos andamios y su comportamiento en la tracción, algo que no era posible analizar con la máquina de ensayos de tracción utilizada normalmente.

## 7. Conclusiones

Como conclusión, se puede decir que se aplicó correctamente una librería de Python para obtener un software robusto que hace un correcto preprocesado y procesado de videos, transformándolos en imágenes para aplicar el método DIC. Además, se validó el método de medición de deformaciones satisfactoriamente con un error asociado del 3,33% y se logró aplicar el mismo en tejidos biológicos.

Contrastando con la literatura [24] [23], se puede observar que el error obtenido a lo largo de este proyecto (3,33%) es mayor, siendo que se han logrado errores que van desde  $\sim 0,1\%$  y un 1%. Sin embargo, no se pueden dejar de mencionar una serie de diferencias que generan esta magnificación del error medido:

- En nuestro caso, no disponemos de un método que nos permita realizar una medición punto por punto para contrastar el valor medido por DIC en un determinado punto con el método de medición de referencia.
- Las cámaras utilizadas en la bibliografía proveen al usuario de una mejor calidad de imagen. Esto se traduce en mayor cantidad de píxeles por superficie, lo que genera una gran ventaja.
- El moteado realizado sobre la superficie de la probeta es realizado con elementos que no son de sencilla disposición y cuyos precios son realmente elevados. El tamaño del moteado es de suma relevancia para reducir no sólo el error si no también el ruido[23].

Sin embargo, si se consideran estas grandes diferencias, podemos observar que el error no se incrementó a otros órdenes de magnitud y se mantuvo en valores que se consideran aceptables, lo que nos habla de la precisión del método empleado siendo este desarrollado por un mínimo costo económico.

Por lo tanto, se logró mediante elementos de bajo costo y software de código abierto un método de medición de deformaciones que permite cuantificar la deformación de tejidos blandos, además de aportar información complementaria.

En cuanto a los resultados obtenidos de la caracterización mecánica de la espinaca descelularizada estudiada, podemos determinar que los resultados se corresponden con resultados obtenidos previamente por otros estudios.

Podemos afirmar que el método desarrollado y utilizado tiene un gran potencial no solo para su aplicación en medición de la deformación unitaria en ensayos de tracción en tejidos sino que gracias a la información aportada sobre distribución microscópica de la carga a lo largo de una muestra también es potencialmente útil en múltiples ensayos en todo tipo de material, como ensayos de fatiga y compresión los cuales se proponen para ser evaluados como posibles aplicaciones [27].

El método de bajo costo se demostró suficiente para ensayos de tracción, pero puede ser mejorado para obtener resultados mas precisos y abarcar ensayos más diversos con los posibles trabajos a futuro mencionados en la sección siguiente (sección 8).

El desarrollo de este informe nos ha permitido adquirir experiencia de laboratorio que resulta muy valiosa, dado que no la habíamos tenido durante el cursado de materias como biomateriales. También pudimos aplicar conceptos aprendidos en Procesamiento de señales, materia que fue de gran ayuda a la hora de escribir un código y trabajar con procesado de imágenes.

Esta tesis ha explorado y demostrado la aplicabilidad y relevancia de el método de medición de deformación por correlación de imágenes digitales aplicado en un área de interés clave en la biomedicina como la ingeniería de tejidos. Podemos concluir con los resultados obtenidos de este proyecto que la medición de deformaciones por correlación digital de imágenes es una herramienta válida, accesible y que aporta un gran valor científico al momento de caracterizar mecánicamente materiales y tejidos.

## 8. Trabajos Futuros

En esta sección se proponen algunos avances para profundizar el desarrollo en la medición de deformaciones por correlación de imágenes digitales dentro de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.

### 8.1. Implementar la correlación de imágenes 3D o estéreo-DIC

Este método consiste en modificar el montaje para obtener videos de dos cámaras simultáneamente grabando el ensayo en objetos tridimensionales en sentidos perpendiculares, permitiendo así el análisis de pares de imágenes en estéreo. Esto permite obtener información cuantitativa y cualitativa de la deformación superficial y el cambio de forma en objetos tridimensionales, abriendo aún más el abanico de posibles aplicaciones de la correlación de imágenes digitales.

Para ello, es posible adaptar la biblioteca  $\mu$ DIC, pero también se propone como alternativa la implementación de DICe [28] el cual es un software open-source de correlación de imágenes digitales, con la opción tanto para 2D como 3D, desarrollado en C++ y presentado en forma de ejecutable.

### 8.2. Correlacionar los valores de deformación obtenidos con una celda de carga de mayor resolución y menor fondo de escala

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó el instrumental que se encontraba disponible dentro de la Universidad Nacional de Córdoba, entre estos dos máquinas de ensayos de tracción-compresión en las que se encontraban montadas celdas de carga preparadas para cargas mucho mayores a las que presenta la mayoría de los tejidos biológicos como los que se busca ensayar dentro de las aplicaciones biomédicas del método.

Actualmente, la celda de carga de tracción montada de la máquina de ensayos utilizada del Laboratorio de Materiales de la FCEFyN presenta un fondo de escala de 1000 Kgf, cuando las fuerzas máximas medidas en un ensayo de tracción de un tejido biológico es generalmente varios órdenes de magnitud menor.

Poder aplicar una celda de carga menor, como por ejemplo de un fondo de escala de 30 Kgf permitiría obtener gráficos de tensión-deformación mas precisos, trasladando esta disminución del error al cálculo del módulo de elasticidad de un material a ensayar y permitiendo tener datos de mejor calidad a la hora de realizar la caracterización mecánica de un tejido o material.

### **8.3. Implementar el método DIC en otro tipo de ensayos, como compresión y fatiga**

La correlación de imágenes digitales es un método muy potente de medición de deformaciones con una amplia variedad de posibles aplicaciones. Al enfocarse este proyecto en la aplicación para medición de deformaciones en tracción, se acotó en gran parte el campo de estudio. Sin embargo, es de gran interés y valor científico la posibilidad de aplicar y desarrollar la utilización de este método para ensayos de compresión de materiales y a ensayos de fatiga dentro del Laboratorio de Materiales. Se podría, por ejemplo, en los ensayos de fatiga observar dónde las probetas acumulan las cargas para visualizar puntos débiles de las muestras incluso antes de sus rupturas.

### **8.4. Adquirir una cámara de mejor resolución y lentes ópticos**

Para el desarrollo de este trabajo, al darse en el marco de un proyecto integrador de grado y al buscarse mostrar el potencial y aplicabilidad de la correlación de imágenes digitales sin grandes fondos, se hicieron las tomas con una cámara de smartphone modelo Motorola Edge 30. Sin embargo, la resolución y precisión de las mediciones se puede mejorar considerablemente con el uso de una cámara de mejor calidad.

Dado el caso, la cámara a considerarse, se propone que debería incorporar un sensor tipo CMOS de formato APS-C, que si bien es un tipo de sensor de calidad media-alta, se considera que satisface la necesidad a un costo asequible y que incorporando una serie de lentes según el caso de aplicación y el tamaño de muestra permitiría una calidad de imagen mas que suficiente para tener un ensayo de gran resolución y precisión. [29]

Una mejora en la adquisición de imágenes permitiría reducir el tamaño de mota al aplicar el patrón dando lugar a una mejor resolución en las mediciones, además de permitir ensayar muestras de diversos tamaños. Dado que la correlación de imágenes digitales se basa en el reconocimiento óptico del flujo de patrones aleatorios, por lo que con la aplicación de los lentes adecuados sería posible medir en muestras tanto de tamaño microscópico como macroscópico.

## 9. Bibliografía y Referencias

### Referencias

- [1] S. N. Olufsen, M. E. Andersen, and E. Fagerholt, “ $\mu$ dic: An open-source toolkit for digital image correlation,” *SoftwareX*, vol. 11, p. 100391, 2020.
- [2] T. Federico, “Diseño y caracterización de andamios reabsorbibles para emular tejido óseo y estimular mecanismos de osificación.,” 2020.
- [3] A. F. Harris, J. Lacombe, and F. Zenhausem, “The emerging role of decellularized plant-based scaffolds as a new biomaterial,” *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 22, no. 22, 2021.
- [4] D. Zhang, C. Eggleton, and D. Arola, “Evaluating the mechanical behavior of arterial tissue using digital image correlation,” *Experimental Mechanics*, vol. 42, pp. 409–416, 01 2002.
- [5] “Engineering stress/strain vs true stress/strain.” yasincapar. Accessed: April 27, 2023. [Online]. Available: <https://yasincapar.com/engineering-stress-strain-vs-true-stress-strain/>.
- [6] R. Sastre Sastre and F. Muñoz Salinas, *Propiedades de los materiales y elementos de construcción*. Edicions UPC, 2010.
- [7] “¿qué es la curva tensión-deformación? – diagrama tensión-deformación – definición.” material-properties. Accessed: May 03, 2023. [Online]. Available: <https://material-properties.org/es/que-es-la-curva-tension-deformacion-diagrama-tension-deformacion-definicion/>.
- [8] J. William D. Callister, *Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., 7 ed., 2007.
- [9] X. O. O. y Carlos Agelet de Saracíbar Bosch, *Mecánica de medios continuos para ingenieros*. EDUGRAF S.L., 2000.
- [10] C. Lázaro, *Introducción a la mecánica de sólidos*. Docsity.
- [11] M. Palanca, G. Tozzi, and L. Cristofolini, “The use of digital image correlation in the biomechanical area: a review,” *International biomechanics*, vol. 3, no. 1, pp. 1–21, 2016.
- [12] P. Cheng, M. Sutton, H. Schreier, and S. McNeill, “Full-field speckle pattern image correlation with b-spline deformation function,” *Experimental Mechanics*, vol. 42, pp. 344–352, 01 2002.
- [13] J. Blaber, B. Adair, and A. Antoniou, “Ncorr: Open-source 2d digital image correlation matlab software,” *Experimental Mechanics*, vol. 55, 03 2015.
- [14] V. Belloni, R. Ravanelli, A. Nascetti, M. Di Rita, D. Mattei, and M. Crespi, “py2dic: A new free and open source software for displacement and strain measurements in the field of experimental mechanics,” *Sensors*, vol. 19, no. 18, 2019.

- [15] L. Piegl and W. Tiller, *The NURBS Book*. Monographs in Visual Communication, Springer Berlin Heidelberg, 1996.
- [16] Y. Zhu, Q. Zhang, S. Wang, J. Zhang, S. Fan, and X. Lin, "Current advances in the development of decellularized plant extracellular matrix," *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 9, p. 712262, 2021.
- [17] H. Aubin, A. Kranz, J. Hülsmann, A. Lichtenberg, and P. Akhyari, "Decellularized whole heart for bioartificial heart," *Cellular Cardiomyoplasty: Methods and Protocols*, pp. 163–178, 2013.
- [18] E. S. Place, N. D. Evans, and M. M. Stevens, "Complexity in biomaterials for tissue engineering," *Nature materials*, vol. 8, no. 6, pp. 457–470, 2009.
- [19] J. R. Gershlak, S. Hernandez, G. Fontana, L. R. Perreault, K. J. Hansen, S. A. Larson, B. Y. Binder, D. M. Dolivo, T. Yang, T. Dominko, M. W. Rolle, P. J. Weathers, F. Medina-Bolivar, C. L. Cramer, W. L. Murphy, and G. R. Gaudette, "Crossing kingdoms: Using decellularized plants as perfusable tissue engineering scaffolds," *Biomaterials*, vol. 125, pp. 13–22, 2017.
- [20] E. Rizzuto, S. Carosio, and Z. Del Prete, "Characterization of a digital image correlation system for dynamic strain measurements of small biological tissues," *Experimental Techniques*, vol. 40, 08 2014.
- [21] J. T. Tubon, V. D. Sree, J. Payne, L. Solorio, and A. B. Tepole, "Mechanical damage in porcine dermis: Micro-mechanical model and experimental characterization," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 147, p. 106143, 2023.
- [22] C. Wei, J. Zhang, K. M. Liechti, and C. Wu, "Deep-green inversion to extract traction-separation relations at material interfaces," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 250, p. 111698, 2022.
- [23] M. Arza-García, C. Núñez-Temes, J. Lorenzana, J. Ortiz-Sanz, A. Castro, M. Portela-Barral, M. Gil-Docampo, and G. Bastos, "Evaluation of a low-cost approach to 2-d digital image correlation vs. a commercial stereo-dic system in brazilian testing of soil specimens," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 22, no. 1, p. 4, 2021.
- [24] P. Wankhede, N. G. Narayanaswamy, S. Kurra, and A. Priyadarshini, "A portable device for single point strain analysis in sheet metal forming processes," *HardwareX*, vol. 12, p. e00371, 2022.
- [25] "Propiedades físicas del aluminio 3003.." tigersalu. Accessed: Sep. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.tigersalu.com/es/product/3003-hoja-de-aluminio/>.
- [26] "Propiedades del aluminio.." ingemecánica. Accessed: Sep. 13, 2023. [Online]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn110.html>.
- [27] D. Zhang and D. Arola, "Applications of digital image correlation to biological tissues," *Journal of biomedical optics*, vol. 9, pp. 691–9, 07 2004.

- [28] D. Z. Turner, "Github - dicengine/dice: Digital image correlation engine (dice): a stereo dic application that runs on mac, windows, and linux.." GitHub. Accessed: Sep. 13, 2023. [Online]. Available: <https://github.com/dicengine/dice>.
- [29] K. D. Stefanov, *CMOS Image Sensors*. 2053-2563, IOP Publishing, 2022.

## 10. Anexo A: Código de python para DIC

A continuación, se incorpora como anexo el código desarrollado para implementar la biblioteca  $\mu$ DIC y para realizar los ensayos expuestos a lo largo del proyecto integrador.

```

1 import os
2 import muDIC as dic
3 import logging
4 import cv2
5 import pandas as pd
6 import numpy as np
7 import matplotlib.pyplot as plt
8 from tkinter import filedialog as fd
9 from tkinter import messagebox
10
11 #Funci n definida para descomponer video en fotografamas
12
13 def descomponer_video():
14     frame_count = 0
15     while (capture.isOpened()):
16         ret, frame = capture.read()
17         if (ret == True):
18             cv2.imwrite(path + 'IMG_%04d.png' % frame_count, frame)
19             #guardamos fotografamas en orden y como png para que pueda
20             #procesarlo muDIC
21             frame_count += 1
22             if (frame_count==10000000): #configurar este numero si
23                 se desea poner un limite maximo al numero de fotografamas a
24                 guardar
25                 break
26             else:
27                 break
28         capture.release()
29         cv2.destroyAllWindows()
30     return
31
32 # Establece la cantidad de informacion impresa en el terminal
33 # durante el analisis
34 logging.basicConfig(format='%(name)s:%(levelname)s:%(message)s',
35                     level=logging.INFO)
36
37 # INICIO del bloque de preprocesado del v deo
38
39 descomponer = messagebox.askyesno(message=" Desea descomponer
40 video en fotografamas? Si para hacerlo, no para utilizar
41 directamente fotografamas")
42
43 if(descomponer == True):
44     capture = cv2.VideoCapture(fd.askopenfilename(title="Seleccione
45 el video del ensayo"))
46     path = fd.askdirectory(title="Seleccione carpeta donde guardar
47 fotografamas") + '/'
48     descomponer_video()
49 else:
50     path = fd.askdirectory(title="Seleccione carpeta donde estan
51 guardados los fotografamas") + '/'
52
53 frame_count = 0
54 dir = path
55 for i in os.listdir(dir):
56     if os.path.isfile(os.path.join(dir, i)):
57         frame_count += 1
58

```

```

48 # FIN del bloque de preprocesado del video
49
50 # M dulo IO
51 # Genera una instancia de imagen con todos los fotogramas
    contenidos en la carpeta seleccionada
52 images = dic.IO.image_stack_from_folder(path, file_type='.png')
53 #images.set_filter(dic.filtering.lowpass_gaussian, sigma=1.) #
    descomentar esta linea para aplicar un filtro gaussiano pasa-
    bajo en el procesado de imagenes
54
55 # M dulo Mesher
56 # Defino el mesh a utilizar
57 mesher = dic.Mesher(deg_e=3, deg_n=3,type="q4")
58
59 # Si no se desea utilizar la GUI, configurar GUI=False y setear los
    valores que definen el mesh
60 mesh = mesher.mesh(images,Xc1=316,Xc2=523,Yc1=209,Yc2=1055,n_ely=7,
    n_elx=7, GUI=True)
61
62 # Para configurar parametros del procesado, descomentar la linea
    de interes y reemplazar por el valor deseado
63
64 settings = dic.DICInput(mesh, images)
65 #settings.max_nr_im = 500
66 #settings.ref_update = [15]
67 settings.maxit = 600
68 #settings.tol = 1.e-6
69 #settings.interpolation_order = 4
70
71 # Si desea acceder a los campos residuales despues del analisis,
    debe setearse la siguiente instancia en True.
72 #settings.store_internals = True
73
74 # Este ajuste define el comportamiento cuando no se obtiene la
    convergencia, eliminar el comentario si se desea ignorar
75 #settings.noconvergence = "ignore"
76
77 # Instanciar job object
78 job = dic.DICAnalysis(settings)
79
80 # Correr el DIC analysis
81 dic_results = job.run()
82
83 # Realizar el calculo de los valores de deformacion
84 fields = dic.post.viz.Fields(dic_results,upscale=10)
85
86 # Show a field
87 viz = dic.Visualizer(fields,images=images)
88
89 true_strain = fields.true_strain()
90 eng_strain = fields.eng_strain()
91
92 #Graficos de distribuci n de la deformacion ingenieril tipo
    Heatmap
93 viz.show(field="eng strain", component = (1,1), frame=0) #obtengo
    una imagen del heatmap de deformaci n a inicio del proceso
94 viz.show(field="eng strain", component = (1,1), frame=int(
    frame_count*0.25)) #obtengo una imagen del heatmap a 1/4 del

```

```

    proceso
95 viz.show(field="eng strain", component = (1,1), frame=int(
    frame_count*0.5)) #obtengo una imagen del heatmap a mitad del
    proceso
96 viz.show(field="eng strain", component = (1,1), frame=-1) #obtengo
    una imagen del heatmap al final del proceso
97
98 #Para exportar los archivos tipo .xlsx para el calculo de los
    graficos de distribucion de la deformacion eliminar las comillas
    triples del siguiente bloque
99
100 '''
101 #Guardar los mapas de calor para 0%, 25%, 50%, 75% y 100%
102 eng_st_0_pd = pd.DataFrame(eng_strain[0,1,1,:,:,0])
103 eng_st_0_pd.to_excel('eng_strain_0.xlsx',index=False)
104 eng_st_25_pd = pd.DataFrame(eng_strain[0,1,1,:,:,int(frame_count
    *0.25)])
105 eng_st_25_pd.to_excel('eng_strain_25.xlsx',index=False)
106 eng_st_50_pd = pd.DataFrame(eng_strain[0,1,1,:,:,int(frame_count
    *0.50)])
107 eng_st_50_pd.to_excel('eng_strain_50.xlsx',index=False)
108 eng_st_75_pd = pd.DataFrame(eng_strain[0,1,1,:,:,int(frame_count
    *0.75)])
109 eng_st_75_pd.to_excel('eng_strain_75.xlsx',index=False)
110 eng_st_100_pd = pd.DataFrame(eng_strain[0,1,1,:,:, -1])
111 eng_st_100_pd.to_excel('eng_strain_100.xlsx',index=False)
112 '''
113
114 N = frame_count
115
116 #Exportamos los archivos .xlsx conteniendo los vectores de
    deformacion ingenieril y deformacion verdadera obtenidos
117
118 #engineering strain
119 eng_st = []
120 for i in range(0,N):
121     eng_st_i = np.mean(eng_strain[:,1,1,:,:,i])
122     eng_st.append(eng_st_i)
123
124 eng_st_pd = pd.DataFrame(eng_st)
125 eng_st_pd.to_excel('eng_strain.xlsx',index=False)
126
127 #true strain
128 true_st = []
129 for i in range(0,N):
130     true_st_i = np.mean(true_strain[0,1,1,:,:,i])
131     true_st.append(true_st_i)
132
133 true_st_pd = pd.DataFrame(true_st)
134 true_st_pd.to_excel('true_strain.xlsx',index=False)
135
136 #Genero dos graficos correspondientes a la deformacion ingenieril y
    a la deformacion verdadera obtenidos
137
138 plt.clf()
139
140 plt.figure(1)
141 plt.title("Engineering Strain medido por DIC")

```

```
142 plt.xlabel("Fotogramas"), plt.ylabel("Deformacion %")
143 plt.plot(eng_st)
144 plt.legend(loc="upper left")
145
146 plt.figure(2)
147 plt.title("True Strain medido por DIC")
148 plt.xlabel("Fotogramas"), plt.ylabel("Deformacion %")
149 plt.plot(true_st)
150 plt.legend(loc="upper left")
151
152 plt.show()
```

*Código para DIC 1: Python example*

## 11. Anexo B: Instructivo de ensayo

A continuación se describe en términos generales como realizar un ensayo completo con el método desarrollado en este proyecto integrador:

1. Preparar la probeta del tejido o material a ensayar, realizando el recorte correspondiente y tomando todas las medidas correspondientes. En caso de ser una probeta rectangular, las medidas necesarias serían ancho, largo y espesor.
2. Una vez listo el recorte de la probeta, es necesario realizarle el “speckle pattern” en su superficie. Para esto, en caso de tejidos biológicos es necesario considerar la pintura a utilizar y método de moteado para cada caso en particular según la sustancia de hidratación de la muestra, composición de la misma y características generales de esta. Los métodos recomendados son pintura en spray, salpicado de la muestra con un cepillo fino empapado de pintura o el uso manual de un marcador fino suave. NOTA: Recordar que el contraste del color es necesario para el reconocimiento por el software y que el tamaño de mota debe ser acorde a la resolución utilizada.
3. Montar la probeta en las mordazas o agarres de la máquina de ensayos de tracción, con el cuidado de no dañar la muestra ni el moteado.
4. Medir la longitud  $L_0$  entre mordazas.
5. Configurar los parámetros de la máquina de ensayos, con la velocidad y precarga deseadas.
6. Montar el set up de soporte de cámara e iluminación como especifica la sección correspondiente del informe, asegurando la cámara de manera firme a la misma altura de la muestra. La cámara deberá estar dispuesta de manera paralela a la muestra ensayada y perpendicular al suelo.
7. Ajustar la iluminación del trípode según necesidad.
8. Asegurar que la probeta se encuentre centrada en la cámara y fijar el foco sobre la probeta para evitar desenfoques en la grabación. De ser necesario, puede utilizarse un leve zoom para acentuar el enfoque en la muestra. Iniciar la grabación del video en la cámara.
9. Iniciar la grabación del video en la cámara
10. Instantáneamente después de iniciar la grabación, dar inicio al ensayo de la máquina de tracción.
11. Cuando la probeta llegue al momento de la fractura, detener la grabación
12. Proceder al instructivo de procesamiento de ensayo en software de Digital Image Correlation

## 12. Anexo C: Instructivo de procesamiento de video en software de DIC

A continuación, se describe en términos generales como procesar el video obtenido del ensayo en el software de DIC desarrollado:

1. Es fuertemente recomendable crear una carpeta que contenga el código DIC.py, el video a procesar y una carpeta donde guardar los fotogramas. Por ejemplo, como la siguiente:

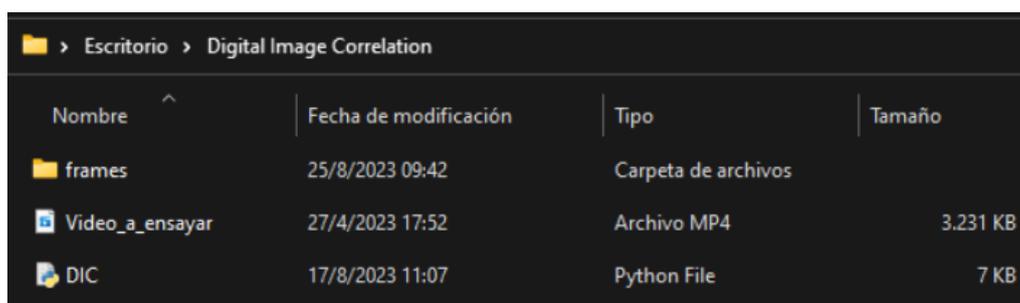


Figura 43: Carpeta contenedora propuesta para el procesamiento

2. Abrir el código DIC.py con una IDE. Nuevamente, es recomendable usar la conocida Visual Studio Code, donde además se podrá editar el código para adaptarlo en caso de ser necesario.
3. Ejecutar el código desde Run - Start Debugging.
4. Al ejecutar, aparecerá la siguiente ventana, la cual permite elegir entre descomponer el video a procesar en fotogramas o, en caso de ya haberlo hecho previamente, seleccionar directamente la carpeta donde se encuentran guardados para ahorrar tiempo de procesamiento. En caso de seleccionar "Sí" pasar al paso siguiente, en caso de seleccionar "No" pasar al paso 6.



Figura 44: Ventana pop-up para seleccionar la opción de separar video del ensayo en fotogramas

5. Seleccionar desde la ventana pop-up el video a analizar.

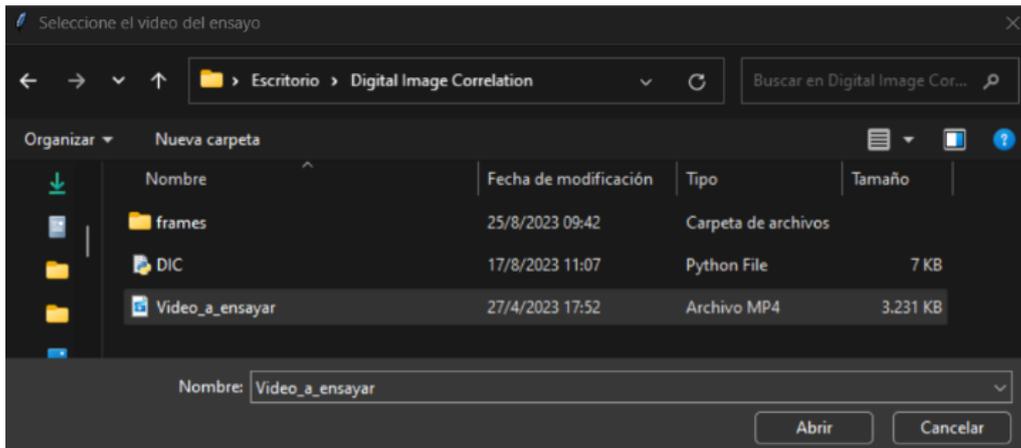


Figura 45: Ventana pop-up para seleccionar el video a analizar.

6. Seleccionar desde la ventana pop-up la carpeta donde guardar los fotogramas (o donde estan guardados si ya fue hecho ese paso previamente)

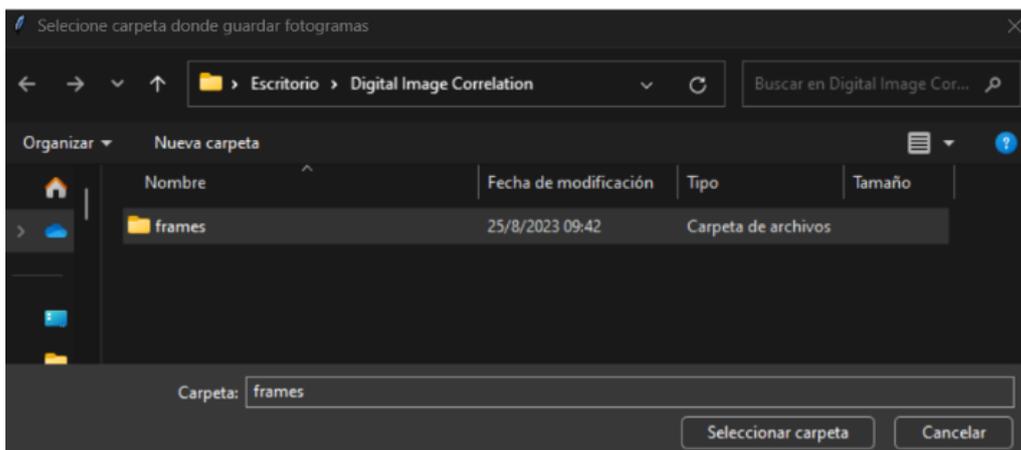
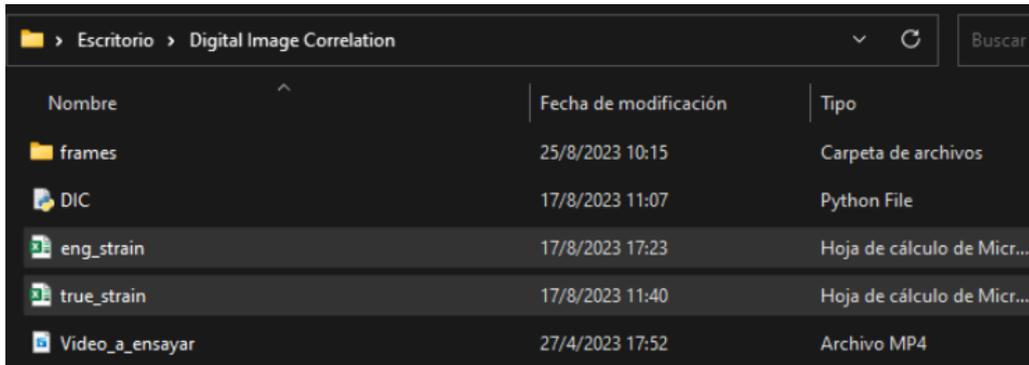


Figura 46: Ventana pop-up para seleccionar la carpeta donde guardar o donde están guardados los fotogramas.

7. Se abrirá la imagen del primer fotograma del video ensayado, se debe seleccionar el área de interés (mesh) con el cursor y con las teclas W-X-A-D definir en cuantas regiones dividir ese área. Una vez definido seleccionar OK para dar inicio al procesado.
8. Una vez terminado el procesado, se abrirán 4 gráficas de tipo mapa de calor de deformación al 0%, 25%, 50% y 100% del ensayo. El instante de cada gráfico es fácilmente modificable desde el código.
9. Después de los mapas de calor de deformación, el software genera dos gráficos de línea correspondientes al Engineering Strain y al True Strain
10. Finalmente se generan dos archivos en la carpeta donde se encuentra guardado el archivo DIC.py llamados eng\_strain.xlsx y true\_strain.xlsx. Cada uno de ellos contienen una matriz de una columna y tantas filas como fotogramas haya procesado,

con los resultados de deformación ingenieril y deformación verdadera resultantes para cada instante.



*Figura 47: Archivos .xlsx exportados con los resultados de la deformación ingenieril y la deformación verdadera.*