



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO DE TÉCNICAS ÓPTICAS DE MEDIDA DE DEFORMACIONES MECÁNICAS CON CÁMARAS TÉRMICAS

Alumno: Antonio Jesús Conde Calabrús

Tutor: Luis A. Felipe Sesé

Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Junio, 2022



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica de Linares
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don Luis Antonio, Felipe Sesé como tutor del Trabajo Fin de Grado titulado: Estudio de técnicas ópticas de medida de deformaciones mecánicas con cámaras térmicas, autoriza su presentación para la defensa y evaluación en el Campus Científico– Tecnológico de Linares.

Linares, Junio de 2022

Firmado por

Antonio Jesús Conde Calabrús



Firma del autor



Firma del Tutor

Índice

1. Resumen.....	10
2. Abstract.....	11
3. Introducción	12
4. Objetivos	15
5. Fundamentos teóricos.....	16
5.1. Mecánica experimental	16
5.1.1. Introducción.....	16
5.1.2. Técnicas ópticas	17
5.1.3. Correlación digital de imágenes	17
5.1.3.1. Correlación de imágenes digital 2D.....	18
5.1.3.2. Correlación de imágenes digital 3D.....	20
5.1.3.3. Tipos de cámaras.....	23
5.1.3.3.1. Cámaras luz visible	23
5.1.3.3.2. Cámaras térmicas	24
5.1.3.4. Marcado térmico	25
5.1.3.4.1. Conducción	25
5.1.3.4.2. Convección.....	26
5.1.3.4.3. Radiación	27
5.1.4. Extensimetría	27
5.1.4.1. Extensometría de contacto	28
5.1.4.1.1. Extensómetros	28
5.1.4.1.2. Galgas extensiométricas eléctricas	28
5.1.4.1.3. Galgas extensiométricas ópticas	30
5.1.4.1.4. Cuerda vibrante	31
5.1.4.2. Extensometría sin contacto	31
5.1.4.2.1. Extensómetros laser	31
5.1.5. Tipos de ensayos	32
5.1.5.1. Ensayo de tracción	32
5.1.5.2. Ensayo de pandeo.....	34
5.2. Biomecánica	35

5.2.1.	Introducción	35
5.2.2.	Tipos de speckle para ensayos biomecánicos	38
6.	Metodología experimental.....	39
6.1.	Probetas y elementos analizados.....	40
6.1.1.	Justificación.....	40
6.1.2.	Probetas a tracción	40
6.1.3.	Probetas a pandeo.....	41
6.2.	Aplicación del patrón de moteado Speckle	42
6.2.1.	Speckle luz visible	42
6.2.2.	Speckle térmico	42
6.2.2.1.	Primer útil para marcado térmico	43
6.2.2.2.	Segundo útil para marcado térmico	44
6.2.3.	Estimación del tiempo de ensayo.....	46
6.2.3.1.	Primer ensayo:.....	46
6.2.3.2.	Segundo ensayo:	47
6.2.3.3.	Tercer ensayo:	47
6.2.3.4.	Cuarto ensayo:.....	48
6.2.4.	Útil para atemperar.....	49
6.3.	Montaje óptico	50
6.3.1.	Cámaras de espectro visible	50
6.3.1.1.	Características y configuración	50
6.3.2.	Cámaras de espectro infrarrojo	51
6.3.2.1.	Características y configuración	51
6.3.3.	Calibración del sistema de Correlación digital de imágenes	53
6.3.3.1.	Calibración del sistema espectro visible.....	53
6.3.3.2.	Calibración del sistema infrarrojo	54
6.3.4.	Procesado de imágenes mediante Correlación digital de imágenes .	54
6.4.	Metodología y equipos de ensayo	56
6.4.1.	Ensayos de tracción	58
6.4.1.1.	Montaje experimental y programación del ensayo	60
6.4.2.	Ensayo de pandeo	64
6.4.2.1.	Montaje experimental y programación del ensayo	65

6.4.3. Ensayo de análisis Biomecánico	68
6.5. Metodología de procesado de imágenes	69
6.6. Resolución de las cámaras	71
7. Resultados.....	72
7.1. Ensayo de tracción	72
7.2. Ensayo de pandeo	84
8. Ensayos biomecánicos.....	100
8.1. Ensayo contorno del ojo.....	100
8.2. Ensayo frente	102
8.3. Ensayo antebrazo	105
8.4. Ensayo muñeca	107
9. Conclusiones	109
10. Trabajos futuros	111
11. Bibliografía	112
12. Anexos	116
12.1. Función Matlab para aleatoriedad.....	116
12.2. Configuración cámaras térmicas.....	117
12.3. Planos	118

Índice de figuras

Figura 1. Imagen 3D de superficie escapular con cámaras termográficas [1]	13
Figura 2. Vector desplazamiento en un campo 2D [2]	13
Figura 3. Esquema de sistema en 3D [2]	14
Figura 4. Translación en un campo 3D [4]	21
Figura 5. Esquema CCD y CMOS [6]	23
Figura 6. Espectro electromagnético [7]	24
Figura 7. Espectro electromagnético referido a sensores [10]	25
Figura 8. Extensómetro [15]	28
Figura 9. Circuito de puente de Wheatstone [27]	30
Figura 10. Galga extensiométrica óptica [15]	30
Figura 11. Cuerda vibrante [15]	31
Figura 12. Extensómetro laser [15]	31
Figura 13. Diagrama tensión-elongación [18]	32
Figura 14. Diagrama tensión-deformación [18]	33
Figura 15. Coeficientes de pandeo [28]	34
Figura 16. Diagrama fuerza-deformación [13]	36
Figura 17. Fases de una zancada en carrera [26]	37
Figura 18. Normativa medidas probetas	40
Figura 19. Tabla medidas normalizadas	41
Figura 20. Probeta para tracción	41
Figura 21. Probeta para pandeo	41
Figura 22. Clavos UNICAIR y útil de marcado desde vista de planta	43
Figura 23. Útil para speckle térmico	44
Figura 24. Máquina CNC	44
Figura 25. Útil para speckle térmico y moladora	45
Figura 26. Alzado del útil para speckle térmico	45
Figura 27. Desarrollo de speckle térmico en probetas	46
Figura 28. Desarrollo de speckle térmico en probetas	47
Figura 29. Desarrollo de speckle térmico en probetas	47
Figura 30. Desarrollo de speckle térmico en probetas	48
Figura 31. Desarrollo de speckle térmico en probetas	48

Figura 32. Vista escala DDE de la probeta marcada térmicamente.....	49
Figura 33. Placa caliente	49
Figura 34. Cámara de espectro visible [29]	50
Figura 35. Configuración cámaras de espectro visible	51
Figura 36. Cámara termográfica o térmica	51
Figura 37. Configuración cámaras térmicas	52
Figura 38. Configuración cámaras térmicas	52
Figura 39. Placa de calibración [30]	53
Figura 40. Placa calibración y Botón pulso eléctrico.....	54
Figura 41. Configuración del calibrado y Zona de interes.....	55
Figura 42. Configuración y Resultados en 2D.....	56
Figura 43. Máquina de ensayo universal [31] y BlueHill Interfaz.....	57
Figura 44. Mordazas para máquina de ensayo universal [32].....	57
Figura 45. Bases cámaras.....	58
Figura 46. Material colocación de galga.....	59
Figura 47. Caja de galgas y Conexión caja de galgas.....	60
Figura 48. Esquema de flujo montaje ensayo tracción	61
Figura 49. Esquema montaje ensayo tracción.....	61
Figura 50. Caja 5V y H.U.B	62
Figura 51. Esquema de flujo de las galgas extensiométricas.....	62
Figura 52. Configuración BlueHill	63
Figura 53. Configuración BlueHill	64
Figura 54. Diferentes perspectivas apoyo para probeta en pandeo.....	65
Figura 55. Esquema de flujo montaje ensayo pandeo.....	66
Figura 56. Esquema montaje ensayo pandeo	66
Figura 57. Configuración BlueHill	67
Figura 58. Configuración BlueHill	67
Figura 59. Esquema de flujo montaje ensayo biomecánico.....	69
Figura 60. Restricción movimiento solido rígido	70
Figura 61. Ajuste de escala y Cambio de ejes coordenadas.....	71
Figura 62. Mapa de deformaciones en “x” del primer ensayo.....	73
Figura 63. Mapa de deformaciones en “y” del primer ensayo.....	74
Figura 64. Mapa de deformaciones en “x” del segundo ensayo	74
Figura 65. Mapa de deformaciones en “y” del segundo ensayo	75

Figura 66. Mapa de deformaciones en “x” del tercer ensayo	76
Figura 67. Mapa de deformaciones en “y” del tercer ensayo	76
Figura 68. Mapa de deformaciones en “x” del cuarto ensayo	77
Figura 69. Mapa de deformaciones en “y” del cuarto ensayo	77
Figura 70. Mapa de desplazamiento fuera del plano con escala de colores.....	86
Figura 71. Mapa de desplazamiento fuera del plano con escala de colores.....	87
Figura 72. Mapa de desplazamiento fuera del plano con escala de colores.....	88
Figura 73. Mapa de desplazamiento fuera del plano con escala de colores.....	90
Figura 74. Mapa desplazamientos 2D y 3D ensayo biomecánico	101
Figura 75. Mapa desplazamientos 2D y 3D ensayo biomecánico	104
Figura 76. Mapa desplazamientos 2D y 3D ensayo biomecánico	105
Figura 77. Mapa desplazamientos 2D y 3D ensayo biomecánico	106
Figura 78. Mapa desplazamientos 2D y 3D ensayo biomecánico	108
Figura 79. Configuración PINS cámaras térmicas.....	117

Índice de tablas

Tabla 1. Constante de las galgas	60
Tabla 2. Relación X/x para análisis de resolución	71
Tabla 3. Deformación media tomados por diferentes métodos.....	78
Tabla 4. Desviación típica y diferencia entre DIC	79
Tabla 5. Desplazamiento medio desarrollado fuera del plano	91
Tabla 6. Desviación típica estándar.....	92
Tabla 7. Diferencia entre DIC térmico y DIC de espectro visible	92
Tabla 8. Configuración PINS cámaras térmicas	117

Índice de gráficas

Gráfica 1. Deformación en “x” mediante diferentes técnicas	80
Gráfica 2. Deformación en “y” mediante diferentes técnicas	81
Gráfica 3. Deformación en “x” mediante diferentes técnicas	81
Gráfica 4. Deformación en “y” mediante diferentes técnicas	82
Gráfica 5. Deformación en “x” mediante diferentes técnicas	82
Gráfica 6. Deformación en “y” mediante diferentes técnicas	83
Gráfica 7. Deformación en “x” mediante diferentes técnicas	83

Gráfica 8. Deformación en “y” mediante diferentes técnicas	84
Gráfica 9. Desplazamiento fuera del plano en el ancho de la probeta	93
Gráfica 10. Desarrollo del desplazamiento fuera del plano	94
Gráfica 11. Desplazamiento fuera del plano en el ancho de la probeta	95
Gráfica 12. Desarrollo del desplazamiento fuera del plano	95
Gráfica 13. Desplazamiento fuera del plano en el ancho de la probeta	96
Gráfica 14. Desarrollo del desplazamiento fuera del plano	97
Gráfica 15. Desplazamiento fuera del plano en el ancho de la probeta	98
Gráfica 16. Desarrollo del desplazamiento fuera del plano	98
Gráfica 17. Deformación en “x” e “y” durante el ensayo biomecánico	102
Gráfica 18. Deformación en “x” e “y” durante el ensayo biomecánico	103
Gráfica 19. Deformación en “x” durante el ensayo biomecánico	107

1. Resumen

En este trabajo fin de grado se pretende realizar el desarrollo de una nueva técnica basada en el análisis mecánico y biomecánico a partir del uso de cámaras térmicas, con ella se busca el análisis tanto de desplazamiento como de deformación en probetas como en la forma en la que se involucran algunos músculos y tejidos en algunos movimientos cotidianos.

Esta técnica será comparada a la misma vez con otras metodologías como son la extensometría y DIC (Digital Image Correlation) de espectro visible, con esta comparación se podrá validar el método y poder estar seguros de los resultados obtenidos

La técnica necesita de la aplicación de un patrón térmico llamado speckle térmico, este patrón estará diseñado de forma aleatoria y con el que se podrá analizar las imágenes tomadas por las cámaras térmicas.

Será importante tener en cuenta que en este trabajo fin de grado se desarrolla una metodología para análisis en 3D, es por ello que se verán involucradas más de una cámara, para poder situar la tercera dimensión, con este campo de análisis, se pueden recrear ensayos biomecánicos, donde se podrá ver y analizar las diferentes zonas de compresión y tracción en los movimientos.

Los resultados obtenidos nos asientan unas bases para futuras líneas de investigación ya que a pesar de la diferencia de resolución entre las cámaras de espectro visible y las cámaras térmicas, se ha podido apreciar de una gran similitud entre las técnicas comparadas siguiendo incluso la misma tendencia en las gráficas que se muestran.

En conclusión, esta técnica puede ser a su vez implementada en otros aspectos más profesional del deporte y de la medicina, ya que gracias a ella, se podrá evaluar los daños de un tejido sin necesidad de ecografías ni Rayos X, o la técnica desarrollada en un movimiento específico, donde no solo con el ojo humano se puede apreciar todos los músculos activados en dicho movimiento, por lo que también podría prevenir lesiones futuras por movimientos repetitivos mal ejecutados.

2. Abstract

In this final degree work we intend to develop a new technique based on the mechanical and biomechanical analysis from the use of thermal cameras, with it we seek the analysis of both displacement and deformation in specimens as in the way in which some muscles and tissues are involved in some everyday movements.

This technique will be compared at the same time with other methodologies such as extensometry and DIC (Digital Image Correlation) of visible spectrum, with this comparison we can validate the method and be sure of the results obtained.

The technique requires the application of a thermal pattern called thermal speckle, this pattern will be designed randomly and with which we can analyze the images taken by the thermal cameras.

It will be important to take into account that in this final degree work a methodology for 3D analysis is developed, that is why more than one camera will be involved, to be able to locate the third dimension, with this field of analysis, biomechanical tests can be recreated, where you can see and analyze the different areas of compression and traction in the movements.

The results obtained lay the foundations for future lines of research since, in spite of the difference in resolution between the visible spectrum cameras and the thermal cameras, it has been possible to appreciate a great similarity between the techniques compared, even following the same trend in the graphs shown.

This technique can be implemented in turn in other more professional aspects of sport and medicine, because thanks to it, we can assess the damage of a tissue without the need for ultrasound or X-rays, or the technique developed in a specific movement, where not only with the human eye you can see all the muscles activated in that movement, so it could also prevent future injuries by repetitive movements poorly executed.

3. Introducción

La mecánica experimental es el producto de la demanda global por unas técnicas capaces de valorar la calidad de algunos productos, más específicamente trata de investigar el comportamiento mecánico de estos productos ante cargas o excitaciones. [1]

Con el desarrollo de la mecánica experimental se podrán encontrar diferentes aplicaciones en el ámbito de la investigación, desde la mecánica usual, hasta la bioingeniería.

La mecánica experimental se utiliza principalmente para resolver problemas que numéricamente son complejos, verificar de forma práctica modelos numéricos, determinar que esfuerzos están sometidos sobre una estructura realmente, y observa el comportamiento ante estos esfuerzos, ya sean cargas o vibraciones. [1]

Dentro de la mecánica experimental se pueden encontrar diferentes tipos de técnicas, estas están clasificadas en diferentes grupos, destacan las técnicas ópticas y las técnicas de contacto., a su vez las técnicas ópticas se dividen en dos subgrupos, técnicas destructivas como la microscopía, la fractografía, la metalografía y la técnica de delaminación y las técnicas no destructivas en las que se incluyen los Rayos X, los ultrasonidos, la espectroscopia y la termografía. [1]

Dentro de estas técnicas puede destacar la aplicación de la termografía en la bioingeniería, esta técnica determina la temperatura a distancia, sin necesidad de contacto, de la misma forma los Rayos X, los ultrasonidos y la espectroscopía, al ser técnicas no destructivas no son invasivas y no requieren de contacto. [1]

Sin embargo, dentro de la rama de las técnicas ópticas y siguiendo una metodología parecida a la termografía, destacan nuevas técnicas, que se ajustan a un espectro electromagnético acorde a nuestra visión, por lo que las cámaras usadas serán de espectro visible, entre estas técnicas destacan la proyección de franjas, y la Correlación Digital de Imágenes. [2]



Figura 1. Imagen 3D de superficie escapular con cámaras termográficas [1]

Por otro lado dentro de las técnicas de contacto, destaca la técnica más usada a nivel mundial, la extensometría, esta técnica de campo completo, estudia tanto el desplazamiento y deformación de una superficie, para ello se utilizan galgas extensiométricas, extensómetros o cuerdas vibrantes. [15]

Como se mencionó, la termografía tiene un papel fundamental, por lo que desarrollarla y juntar esta técnica con otra, como puede ser la correlación digital, puede darnos un producto con mucho potencial, tanto para poder hacer mediciones de deformaciones mecánicas por diferencias de temperaturas, hasta para poder ver anomalías en la estructura muscular y ósea del cuerpo humano. [1]

La Correlación Digital de Imágenes (DIC), es como se mencionó es una técnica para realizar un análisis de desplazamientos en una superficie, esta técnica suele usar un patrón aleatorio de manchas llamado speckle sobre el objeto a estudio, cuando esta superficie sobresale del plano, se estará hablando de un estudio en tres dimensiones. [2]

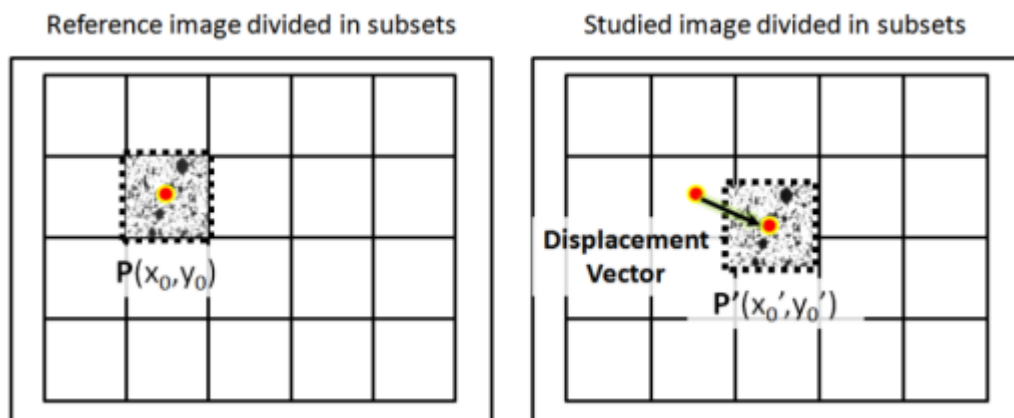


Figura 2. Vector desplazamiento en un campo 2D [2]

Mediante estas dos técnicas juntas, se podrá abaratar y simplificar el procedimiento a seguir, este procedimiento básicamente tratara de una o varias cámaras termográficas, y un útil para poder obtener un marcado térmico, con esto se podrá montar un set-up, con el que se podrá realizar el estudio.

Es importante darse cuenta que aunque la técnica implique un mínimo contacto con el objeto de estudio, sigue siendo no destructiva y por lo tanto no invasiva.

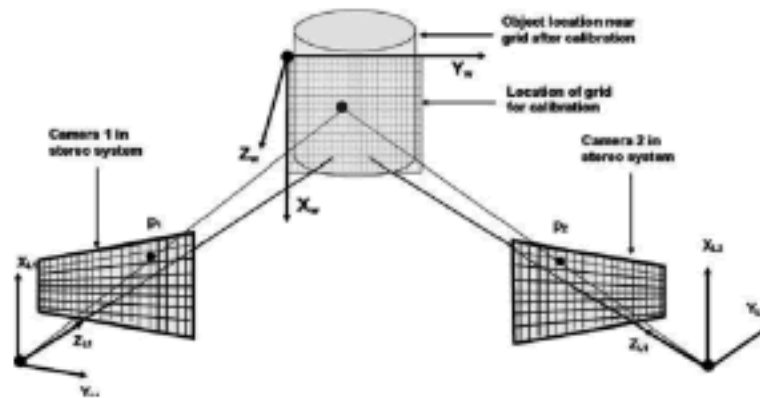


Figura 3. Esquema de sistema en 3D [2]

En este presente trabajo fin de grado se pretende desarrollar el uso de esta técnica ópticas en el ámbito de la biomecánica para poder analizar de una forma diferente las diferentes afecciones o simplemente para la mejoría de la técnica deportiva en cuanto a músculos involucrados, es por ello que se atenderá a obtener una gran precisión, y para ello también se involucrara otra técnica en cuanto a comparación y la cual se mencionó antes, la extensometría.

4. Objetivos

La motivación de este Trabajo Final de Grado se basa a los puntos comentados en la introducción, en los que se destaca la importancia de la mecánica experimental y su gran potencial en la biomecánica para la caracterización de comportamiento mecánico del cuerpo. Así, el objetivo principal de este trabajo fin de grado es el de presentar una herramienta de alto potencial para la medida de deformaciones poco invasivo para su aplicación en bioingeniería o medicina, teniendo este mismo los siguientes objetivos secundarios:

- Realización de una labor de revisión bibliográfica sobre las técnicas ópticas de medida de deformación que presenten alto potencial en la biomecánica y en especial en la Correlación digital de imágenes, así como sus limitaciones en ese campo.
- Establecer una metodología que permita llevar a cabo la técnica de Correlación digital de imágenes en bioingeniería, con especial atención en la medida de formas y deformaciones en el cuerpo humano.
- Llevar a cabo una labor de validación de la metodología propuesta, así como una serie de aplicaciones que muestren su potencial en la bioingeniería o medicina.
- Realizar una discusión y conclusión para poder valorar las capacidades y los puntos de mejora de la técnica.

Como se mencionó antes, para poder desarrollar y avanzar en esta técnica será necesario un patrón aleatorio y un útil de marcado para obtener el speckle deseado, es por ello que aunque no se mencione como objetivo, la obtención de un moteado óptimo será fundamental para la precisión.

5. Fundamentos teóricos

Los fundamentos teóricos darán la base de los fundamentos que se requerirán a lo largo del trabajo fin de grado, con ello no se busca más que envolver al lector con los conocimientos básicos para poder entender los apartados que le seguirán a este, al estar referidos al desarrollo de una nueva tecnología se tendrá que explicar el camino que se ha hecho la mecánica experimental en el día a día, y como afecta esto de una forma u otra a nuestro campo de estudio. [1]

5.1. Mecánica experimental

5.1.1. Introducción

La mecánica experimental en la ingeniería es la encargada de resolver “problemas”, desarrollando técnicas tradicionales o algoritmos más modernos de forma experimental o mediante formulaciones.

Estas técnicas suelen tener como objetivo el de realizar medidas de magnitudes mecánicas, aunque también comprende otros, como puede ser, el diseño de nuevo experimentos, crear modelos de control, desarrollar metodologías procesar datos e incluso formulación matemática. [1]

Dentro de la mecánica experimental, se pueden encontrar diferentes metodologías y técnicas, de las cuales destacan las técnicas ópticas, estas son técnicas que se basan en el estudio de un objeto a través de la luz visible, dentro de este grupo se pueden dividir dos grupos, las técnicas interferométricas, y las no interferométricas, a su vez a parte de las técnicas ópticas existen técnicas de contacto, entre las que se encuentran la extensometría, estas técnicas pueden llegar a no ser destructivas pero aun así requerir de mantener el contacto con la superficie sometida a estudio. [1]

5.1.2. Técnicas ópticas

Como se mencionó en el apartado anterior, dentro de las técnicas ópticas se encuentran las técnicas interferométricas y las no interferométricas. Las técnicas interferométricas, son las que mediante la combinación de luz u otras ondas como son las electromagnéticas provenientes de varios receptores obtienen una mayor resolución de imagen, en este grupo se encuentran la holografía interferométrica, el speckle interferométrico y la interferometría de Moire. [1]

La interferometría holográfica se define como la comparación interferométrica de varias ondas las cuales han sido reconstruidas holográficamente. El speckle interferométrico o inteferometría de moteado trata de una técnica de análisis de patrones de intensidad que son producidos por la inteferencia entre las fases de las ondas y por último, la interferometría de Moire, esta técnica permite obtener información del campo de desplazamientos y deformaciones a partir de una secuencia de imágenes. [1]

En el otro grupo, se encuentras las técnicas no inteferométricas, en estas se encuentran el método de la rejilla y la Correlación Digital de Imágenes., el método de la rejilla consiste en dividir los haces de luz en varias direcciones, sus usos suelen estar presentes por ejemplo en algunos rayos laser y finalmente la Correlación Digital de Imágenes (DIC), esta técnica conseguirá obtener la medida de desplazamientos y deformaciones del objeto de estudio mediante la sucesión de imágenes. [2]

5.1.3. Correlación digital de imágenes

Hoy día, el procesado de imágenes analógicas presenta grandes dificultades, es por ello que en estos últimos años se esté avanzado en el análisis de imágenes digitales, es aquí donde entra en juego la correlación digital de imágenes, esta es una técnica óptica utilizada para medir desplazamiento en superficies tanto 2D como 3D. [2]

La correlación digital de imágenes se trata de almacenar las imágenes de forma digital para poder realizarles un análisis posterior, previamente se obtienen los datos como puede ser de deformación, se deberán de obtener unas imágenes de calibración. [2]

Para el análisis de deformaciones utilizando este método, es necesario utilizar patrones aleatorios, por lo tanto, se puede resumir que la correlación digital de imágenes se encarga de conseguir una serie de campos tanto de desplazamiento como de deformaciones en una región marcada con un patrón aleatorio. [2]

Hoy día la correlación está avanzando a gran escala ya que se están empezando a utilizar algoritmos que permiten la aproximación para obtener un error mínimo si se compara con otros análisis. [2]

La programación de los programas de correlación es bastante básica, se numeran las posiciones de cada punto y guarda su ubicación (x_i), de esta forma se tendrá la posición inicial, ahora simplemente comparara las imágenes posteriores en las que se le está realizando algún tipo de ensayo y donde esas posiciones serán diferentes (x_f), obteniendo así una variación del desplazamiento. [2]

En el caso de 2D:

$$\Delta x = x_f - x_i \text{ o } \Delta y = y_f - y_i \quad \text{Ec 1 [2]}$$

5.1.3.1. Correlación de imágenes digital 2D

Siguiendo los criterios que deben emplearse en la correlación digital 2D, se puede clasificar principalmente en dos grupos, uno de ellos se basa en la correlación cruzada (CC) y el otro grupo en las diferencias de sumas cuadradas (SSD). Se ve también que dentro del primer grupo hay varias variantes, como es la correlación cruzada simple (CC), la normalizada (NCC), y la normalizada cero (ZNCC). [2]

También dentro del segundo grupo se tendrá la normalizada (ZSSD), y la normalizada cero (ZNSSD). [2]

Los algoritmos que se utilizan se basan en lo explicado anteriormente, durante la realización del ensayo se toman imágenes sucesivas las cuales tendrán unos puntos con sus ubicaciones, el desplazamiento que sufre se realiza mediante una transformación lineal de primer orden: [9]

$$\tilde{x}_{cur_i} = x_{ref_i} + u_{rc} + \frac{\partial u}{\partial x_{rc}}(x_{ref_i} - x_{ref_c}) + \frac{\partial u}{\partial y_{rc}}(y_{ref_j} - y_{ref_c}) \quad \text{Ec 2 [3]}$$

$$(i, j) \in S$$

$$\tilde{y}_{cur_j} = y_{ref_j} + v_{rc} + \frac{\partial v}{\partial x_{rc}}(x_{ref_i} - x_{ref_c}) + \frac{\partial v}{\partial y_{rc}}(y_{ref_j} - y_{ref_c}) \quad \text{Ec 3 [3]}$$

$$p = \left\{ u \ v \ \frac{\partial u}{\partial x} \ \frac{\partial u}{\partial y} \ \frac{\partial v}{\partial x} \ \frac{\partial v}{\partial y} \right\}^T \quad \text{Ec 4 [3]}$$

x_{ref_i} e y_{ref_j} : Son las coordenadas “x” e “y” en el que está ubicado un punto dentro de la imagen de referencia. [3]

x_{ref_c} e y_{ref_c} : Sitúan las coordenadas “x” e “y” del centro de la imagen de referencia. [3]

$\tilde{x}_{cur_i}$ e $\tilde{y}_{cur_j}$: Son las coordenadas “x” e “y” en el que está ubicado un punto dentro de la imagen realizada en ese instante. [3]

i, j : Se utilizan para señalar en que ubicación se sitúan los puntos del centro de la misma. [9]

S : Engloba la pertenencia de todos los puntos de un subconjunto. [3]

Subíndice rc : Define que la metodología realizada es una transformación del sistema de referencia al de la imagen actual. [3]

p : Es el vector de desplazamiento o deformación en este caso es de deformación. [3]

Dado que se puede dar la ocasión de que el sistema de referencia pueda tener algún tipo de deformación, se tendrá en cuenta haciendo una pequeña modificación: [9]

$$\tilde{x}_{cur_i} = x_{ref_i} + u_{rc} + \frac{\partial u}{\partial x_{rr}}(x_{ref_i} - x_{ref_c}) + \frac{\partial u}{\partial y_{rc}}(y_{ref_j} - y_{ref_c}) \quad \text{Ec 5 [3]}$$

$$(i, j) \in S$$

$$\tilde{y}_{cur_j} = y_{ref_j} + v_{rc} + \frac{\partial v}{\partial x_{rr}}(x_{ref_i} - x_{ref_c}) + \frac{\partial v}{\partial y_{rc}}(y_{ref_j} - y_{ref_c}) \quad \text{Ec 6 [3]}$$

Siendo rr la deformación (posición final menos posición inicial del sistema de referencia) que sufre la imagen de referencia. [9]

Al final lo que se busca es encontrar el valor del vector de deformaciones en el sistema actual considerando que el de referencia tiene un valor igual a cero, por lo tanto x_{ref_i} e y_{ref_j} serán muy parecidos a $\tilde{x}_{cur_i}$ e $\tilde{y}_{cur_j}$. [9]

Será necesario conseguir la similitud entre el subconjunto tanto actual como de referencia, para ello se comparan los valores de la escala de grises en todos los puntos actuales y de referencia, es por ello que para el criterio de correlación cruzada normalizada se buscara la obtención de un valor próximo a 1, mientras que si se sigue un criterio de mínimos cuadrados, se buscara un valor próximo a 0 para poder asegurar una buena coincidencia. [9]

5.1.3.2. Correlación de imágenes digital 3D

Ya que la correlación en 2D se limita tan solo a elementos planos y que el desplazamiento o deformación que se obtiene en la perpendicular a ese plano será básicamente cero.

Es por ello que se utiliza la correlación digital en 3D, lo que se puede observar como principal diferencia, es que se necesitan 2 cámaras en vez de una, al tratarse de dos

cámaras se necesita una calibración mediante la toma de imágenes a unas tarjetas de calibración.

Estas tarjetas se colocarán en diferentes posiciones y se realizará una toma de imágenes donde mediante VIC 3D valorará si son válidas o no, el criterio que tiene en cuenta el programa será la visualización de los tres puntos negros/grises, dependiendo de su percepción se obtendrá así una calibración con mejor ratio o ni siquiera válida.

La medición de la deformación se basará de la misma manera que en 2D el seguimiento de la ubicación de los puntos en una secuencia de imágenes, el algoritmo utilizado será el de mínimos cuadrados puntuales, con el cual se calcularán los campos de deformación.

Como se puede ver en la imagen, se tendrá un punto dado (P_w) que se trasladará hacia (P'_w). [4]

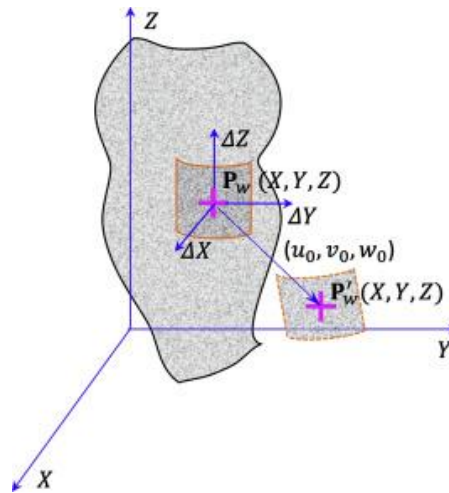


Figura 4. Translación en un campo 3D [4]

Por lo tanto, se puede escribir la siguiente relación considerando que las deformaciones son homogéneas:

$$u(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) = u_0 + \frac{\partial u}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial u}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial u}{\partial Z} \Delta Z \quad \text{Ec 7 [4]}$$

$$u(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) = u_0 + \frac{\partial u}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial u}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial u}{\partial Z} \Delta Z \quad \text{Ec 8 [4]}$$

$$u(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z) = u_0 + \frac{\partial w}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial w}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial w}{\partial Z} \Delta Z \quad \text{Ec 9 [4]}$$

Siendo $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ las coordenadas de los puntos de la imagen de referencia y (u, v, w) son las coordenadas de los puntos de la imagen actual, es decir de los puntos deformados. [4]

Una vez conocido esto, se pueden estimar los desplazamientos y el gradiente de desplazamiento, a partir de ello se pueden conocer las deformaciones principales.

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_x & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{xy} & \epsilon_y & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{xz} & \epsilon_{yz} & \epsilon_z \end{pmatrix} \quad \text{Ec 10 [5]}$$

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial w} \quad \text{Ec 11 [5]}$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad \epsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad \epsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad \text{Ec 12 [5]}$$

Siendo ϵ la deformación y los subíndices hacen referencia al plano en el que se obtiene esa deformación. [5]

Para esta correlación en 3D se utilizara el programa VIC-3D 2010, este programa basa su teoría en todo lo se mencionó anteriormente, principalmente hace referencia al libro *Imagen Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements* de Michael A. Sutton, Jean-José Orteu y Hubert W. Schreier. [5]

5.1.3.3. Tipos de cámaras

5.1.3.3.1. Cámaras luz visible

Las cámaras más utilizadas para esta tipología de ensayos son cámaras del catálogo de Allied Vision, existen dos tipos de sensores que pueden usar las cámaras, CMOS (Semiconductor Complementario de Óxido Metálico) o CCD (Dispositivo de Carga Acoplada), los dos sensores tienen el mismo fundamento, el efecto fotoeléctrico, es decir que acumulan carga eléctrica para cada pixel mediante fotositos, estos producirán una corriente eléctrica que dependerá de que intensidad de luz se perciba. [6]

Los sensores CCD son más sensibles a la luz y trabaja con los colores primarios (RGB), a su vez es más sensible que los sensores CMOS y registra mayores sombreados en las imágenes. Estos sensores al ser tan sensibles necesitan un tiempo de calentamiento mientras que los sensores CMOS no lo requieren. [6]

Los sensores CMOS rinden mucho mejor tanto en velocidad como en consumo sin embargo es menos sensible a la luz. [6]

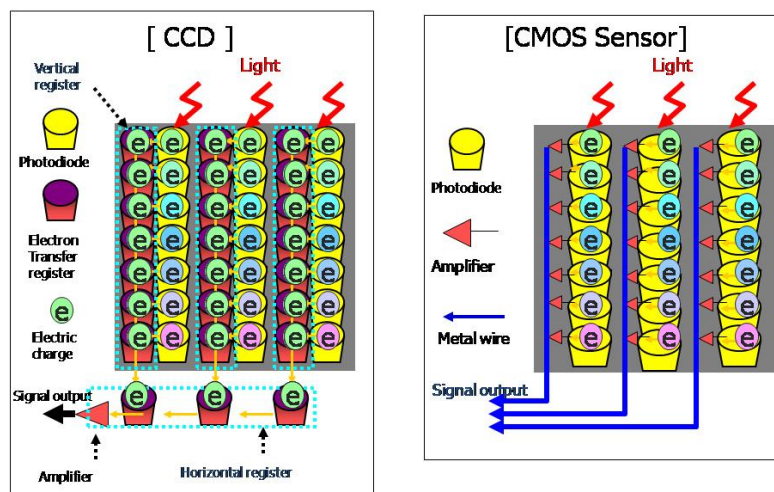


Figura 5. Esquema CCD y CMOS [6]

Por lo tanto, los sensores CCD crean imágenes de mejor calidad y con poco ruido y los sensores CMOS son más rápidos tomando imágenes, por lo que las cámaras que necesitan que tomen unas secuencias de imágenes de forma rápida, están dispuestas con los sensores CMOS. [8]

Estos sensores son capaces de captar longitudes de ondas del espectro de luz visible, es decir:

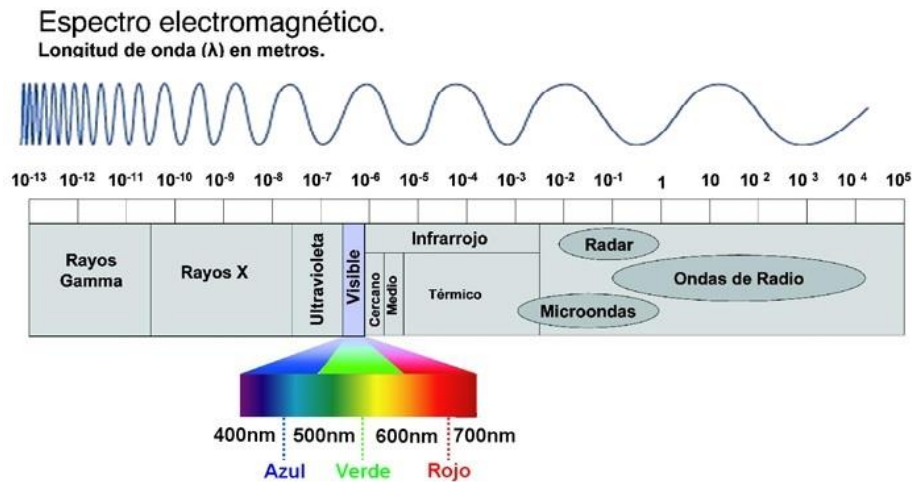


Figura 6. Espectro electromagnético [7]

Una vez la longitud de onda sobrepasa el espectro visible se mete en el infrarrojo y es donde entran las cámaras térmicas. [8]

5.1.3.3.2. Cámaras térmicas

Las cámaras térmicas son un tipo de dispositivo que sirve para detectar la energía infrarroja, esta energía es captada y mostrada por pantalla a una determinada escala de colores. Dentro de las cámaras térmicas se pueden diferenciar dos tipos, las que tienen los sensores térmicos y cuánticos. [9]

Los sensores térmicos son aquellos que perciben la energía radiante que va calentando los píxeles por lo que se obtiene un cambio de temperatura en la resistencia, estos sensores no tienen refrigeración y son los que se utilizan en las cámaras FLIR. [9]

Los sensores cuánticos se tratan de sensores fotovoltaicos estos se encargan de transformar los píxeles en electrones por medio de chocar fotones, estos sensores son mucho más rápidos y están refrigerados. [9]

Ahora bien, como se muestra en la Figura 7, los sensores térmicos que se utilizan en las cámaras FLIR son los microbolómetros no refrigerados y están diseñados para longitudes de onda mucho mayores que los CCD o CMOS. [10]

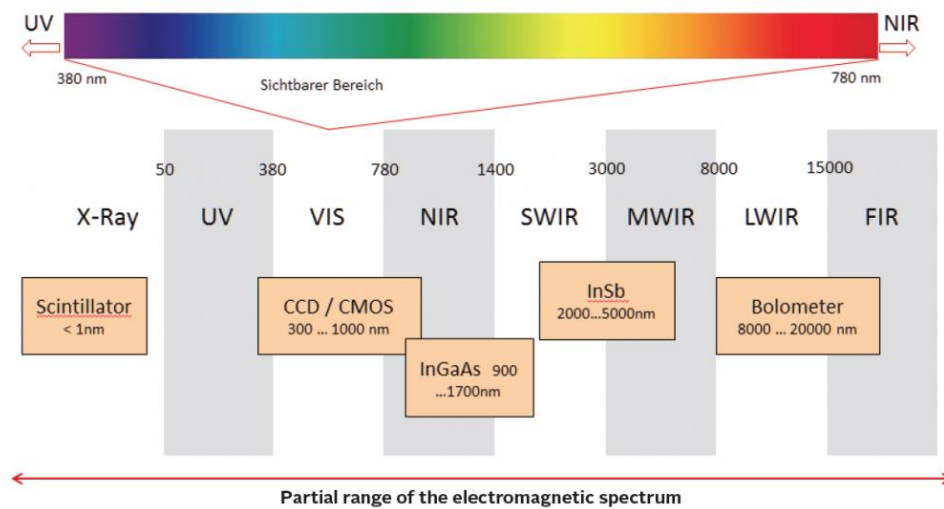


Figura 7. Espectro electromagnético referido a sensores [10]

5.1.3.4. Marcado térmico

El marcado térmico se trata de la técnica por la que mediante un útil con una geometría predeterminada se coloca sobre una superficie plana o en 3D y se obtiene un patrón de puntos calientes, estos puntos sufrirán el procesamiento que se mencionó anteriormente y con los cuales se podrá obtener el desplazamiento o deformación de la superficie estudiada.

Para el marcado térmico hay que remarcar la importancia de la conducción, radiación y convección, ya que definirá cuanta energía es capaz de captar el material y por cuanto tiempo.

5.1.3.4.1. Conducción

Trata la transferencia de calor de un sólido o a otro siempre que exista un gradiente de temperatura es decir algún tipo de diferencia de temperatura entre los dos materiales. [11]

Básicamente la conducción se basa en el equilibrio de la energía entre las partículas, siempre se produce la transferencia de las partículas con más energía hacia las que menos tienen y con ello producir el equilibrio. [11]

La conducción se rige mediante la ley de Fourier, esta ley trata al calor que se transfiere en un medio isótropo es de sentido contrario y proporcional al gradiente de temperatura. [11]

La ecuación sería:

$$\frac{dQ_s}{dt} = \int_s q dS = -k \int_s \nabla T dS \quad \text{Ec 13 [11]}$$

$$q = -k \nabla T \quad \text{Ec 14 [11]}$$

Siendo "q" el vector del flujo de calor. [Wm^{-2}]

k: La conductividad térmica. [$Wm^{-1}K^{-1}$]

∇T : El gradiente de temperatura. [$m^{-1}K$]

5.1.3.4.2. Convección

Es la transferencia que se genera entre sólidos y algún fluido en movimiento (como el aire), la convección se rige por la ley de enfriamiento de Newton: [11]

$$q'' = h(T_s - T_F) \quad \text{Ec 15 [11]}$$

Siendo q'' el calor por la convección. [$\frac{W}{m^2}$]

h: El coeficiente de convección [$\frac{W}{m^2K}$]

T_s : La temperatura del sólido.

T_F : La temperatura del aire (fluido)

5.1.3.4.3. Radiación

Trata de la energía emitida por cualquier cuerpo debido a su temperatura, esta energía se emite como ondas electromagnéticas. Para que se emita este tipo de energía no es necesario ningún medio, es más podría propagarse incluso en el vacío. [11]

Hay que tener en cuenta que algunos materiales pueden actuar como cuerpo negro, es decir que absorben radiación pero no es capaz ni de transmitir ni de reflejar, es por ello que a partir de esto se conoce el coeficiente de emisividad (ε), es decir, la relación que tiene un cuerpo o materia de emitir radiación en comparación si fuera un cuerpo negro ($\varepsilon = 1$). [11]

Se rige por la ley de Stefan-Boltzmann, esta ley define la potencia emisiva (E):

$$E = \sigma T_s^4 \quad \text{Ec 16 [11]}$$

Siendo σ la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$) [11]

Un ejemplo de aplicación de la conductividad térmica, que es la capacidad para conducir calor, de la piel humana para un adulto promedio es de $18,1 [Wm^{-1}K^{-1}]$ mientras que la del policarbonato es de alrededor de $0,22 [Wm^{-1}K^{-1}]$, esto a la hora realizar un ensayo provocará que las marcas se difuminen de manera más rápida que si fuera piel humana. [12]

5.1.4. Extensiometría

La extensiometría se trata de una técnica experimental, con ella se consigue medir la deformación de superficies que están sometidas a esfuerzos, por ejemplo a tracción o compresión, estos esfuerzos suelen darse con una máquina de ensayo universal, esta máquina básicamente tiene una célula de carga la cual es capaz de proporcionar una carga totalmente vertical, esta carga puede ser como se mencionó antes, de tracción o compresión. [15]

Existen dos tipos de extensometría, las que obtienen la medida con contactos y las que no necesitan ese contacto. [15]

5.1.4.1. Extensometría de contacto

Como su nombre dice, son un tipo de extensómetro que requieren de estar en contacto con la superficie a medir, este grupo también se puede dividir en dos subgrupos, el primero de ellos, los extensómetros mecánicos y el segundo las galgas extensométricas. [15]

5.1.4.1.1. Extensómetros

Los extensómetros se utilizan principalmente cuando se busca una alta precisión y facilidad para su uso, estos extensómetros se tratan de unas pinzas básicamente, con ellas se pueden medir desde desplazamientos menores a 1mm hasta superiores de 100mm. [15]

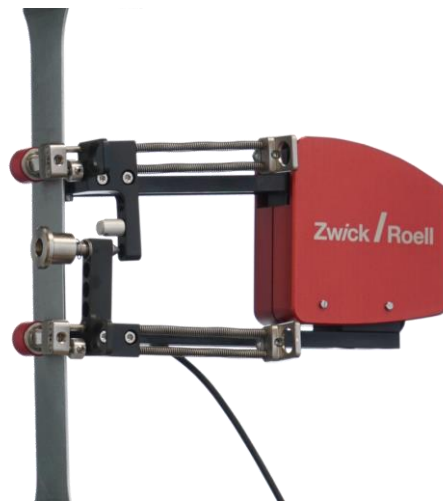


Figura 8. Extensómetro [15]

5.1.4.1.2. Galgas extensiométricas eléctricas

Las galgas extensiométricas se basan en la relación generada entre materiales conductores o semiconductores y una resistencia eléctrica, siguen la siguiente ecuación: [16]

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad \text{Ec 17 [16]}$$

Siendo R la resistencia eléctrica.

ρ : La conductividad.

L: La longitud de la galga.

A: El área de la sección.

Si el esfuerzo se somete de forma longitudinal, la ecuación se deberá dejar sin aplicarle ninguna simplificación quedando: [16]

$$dR = \frac{A(\rho dL + L d\rho) - \rho L dA}{A^2} \quad \text{Ec 18 [16]}$$

De forma que el cambio de longitud que experimentará será siguiendo la ley de Hooke: [16]

$$\sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon = E \frac{dL}{L} \quad \text{Ec 19 [16]}$$

En la realización del ensayo al comprimir o traccionar se producirá un cambio de dimensiones ya que la masa no cambia, esa propiedad es la razón o coeficiente de Poisson y está definida como: [16]

$$\nu = - \frac{\epsilon_{Transversal}}{\epsilon_{Longitudinal}} \quad \text{Ec 20 [16]}$$

Las galgas sufren un cambio de resistencia llamado factor de galga, y suele venir dado por el fabricante: [16]

$$GF = \frac{\delta R/R}{\epsilon} \quad \text{Ec 21 [16]}$$

Siendo GF el factor de galga.

El funcionamiento eléctrico para obtener la medida de la deformación de la superficie a estudiar se lleva a medio de un puente de Wheatstone. [16]

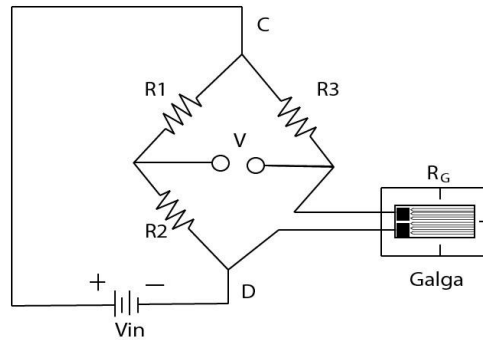


Figura 9. Circuito de puente de Wheatstone [27]

Para la toma de datos será necesario que el galvanómetro marque cero, para ello debe cumplirse que: [15]

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \quad \text{Ec 22 [15]}$$

Por lo tanto como la figura refleja, R_4 será la galga que actuara como resistencia variable pudiendo así calibrar el sistema para que marque cero. [15]

5.1.4.1.3. Galgas extensiométricas ópticas

Los dos útiles que se mencionaron son los más utilizados, sin embargo, existen otros útiles que son modificaciones de estos, como son las galgas extensiométricas ópticas, estas utilizan la propagación de la luz por el interior de la fibra óptica para medir las deformaciones. [15]

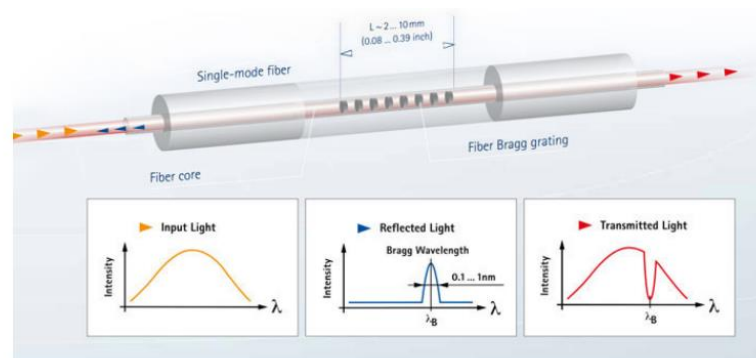


Figura 10. Galga extensiométrica óptica [15]

5.1.4.1.4. Cuerda vibrante

Otra variante, pero del subgrupo primero son los extensómetros de cuerda vibrante, que básicamente trata de la medición por una cuerda de acero la cual se deforma y mandara el impulso con el dato, este sirve para estructuras ya mide deformaciones más grandes y tiene una resolución de 0,5 micrómetros. [15]



Figura 11. Cuerda vibrante [15]

5.1.4.2. Extensometría sin contacto

Y para terminar, mencionar el otro grupo, que no requieren contacto, los extensómetros láser. [15]

5.1.4.2.1. Extensómetros laser

Que básicamente tienen la misma función, pero con una medida a través laser que mide en base al reflejo de la superficie la deformación. [15]

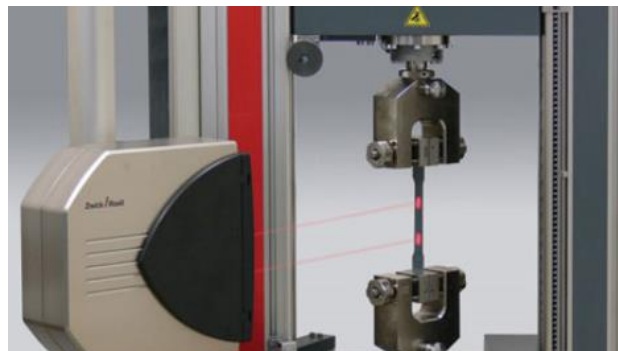


Figura 12. Extensómetro laser [15]

5.1.5. Tipos de ensayos

En el campo de la mecánica experimental existen mucha tipología de ensayos, pudiéndose dividir en ensayos dinámicos y ensayos cuasiestáticos, los ensayos dinámicos como su propia nombre lo indica, involucra la energía cinética para obtener algún tipo de deformación, dentro de este grupo destacan los ensayos de impacto, vibración y fatiga, siendo el ensayo de impacto o de ZwickRoell para el estudio de la tenacidad, el ensayo de vibración para analizar la reacción de una superficie ante vibraciones, y el ensayo de fatiga con el que se pretende analizar la resistencia que ofrece una pieza ante cargas cíclicas. [22]

Por otro lado, en el grupo de los ensayos cuasiestáticos, se encuentran los ensayos de tracción, compresión y flexión, aparte de los ensayos que se mencionan, hay muchos más ensayos y más específicos donde se busca el análisis de algo más particular.

5.1.5.1. Ensayo de tracción

El ensayo de tracción trata de la realización de un estiramiento mediante una máquina de ensayo universal, se puede realizar a diferentes tipos de superficies, como probetas o cilindros, con este ensayo se intenta la obtención de diferentes propiedades. [18]

Diagrama fuerza-elongación:

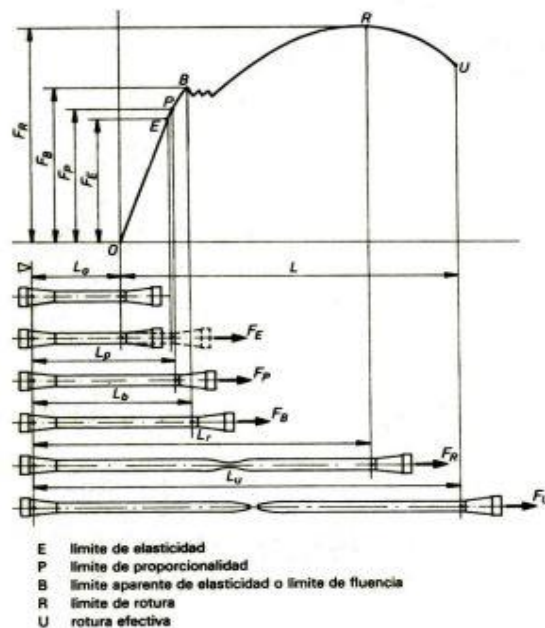


Figura 13. Diagrama tensión-elongación [18]

En la Figura 13 se puede observar como mediante va avanzando el ensayo, la probeta se estira, pasando por diferentes fases, y produciéndose al final la rotura en la zona más crítica que es la zona central. [18]

Para el análisis de datos obtenidos mediante el ensayo de tracción se hará énfasis en la región elástica: [18]

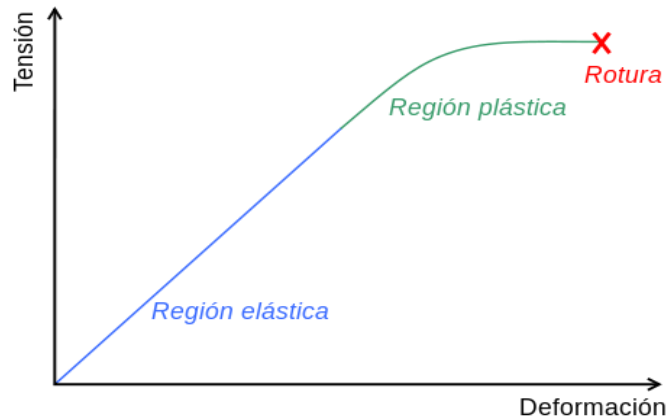


Figura 14. Diagrama tensión-deformación [18]

La forma de calcular la tensión y la deformación teórica será la siguiente:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad \text{Ec 23 [18]}$$

Siendo σ la tensión en MPa, F la fuerza aplicada en Newton y S el área en milímetros.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Ec 24 [18]}$$

Siendo ε la deformación unitaria que sería adimensional, L la longitud de la probeta y ΔL el incremento de la longitud.

Y otra propiedad que se puede obtener, es el módulo de Young, que será constante en todo el ensayo e indica la resistencia a la deformación del material.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Ec 25 [18]}$$

Siendo E el módulo de Young en MPa

En la gráfica se observa las zonas por las que pasara nuestra probeta en la realización del ensayo, una región elástica donde la probeta debe recuperar su estado inicial al dejar de aplicar carga, y una región plástica donde se quedara una deformación permanente, aunque recuperara parte de la elongación aportada finalmente si se sigue aplicando carga se llegará a la zona de rotura, es la región en la que se llega a la carga máxima soportada por la probeta. [18]

5.1.5.2. Ensayo de pandeo

Este ensayo tiene como finalidad la de analizar la estabilidad de estructuras, pero también, se utiliza para determinar la deformación en el plano que sobresale de la superficie plana, la metodología es idéntica al ensayo a tracción, sin embargo las propiedades a determinar son diferentes. [20]

Para este ensayo se aplica un esfuerzo axial, de manera que se tendrá que tener en cuenta no solo la cara aplicada si no la forma de los apoyos: [20]

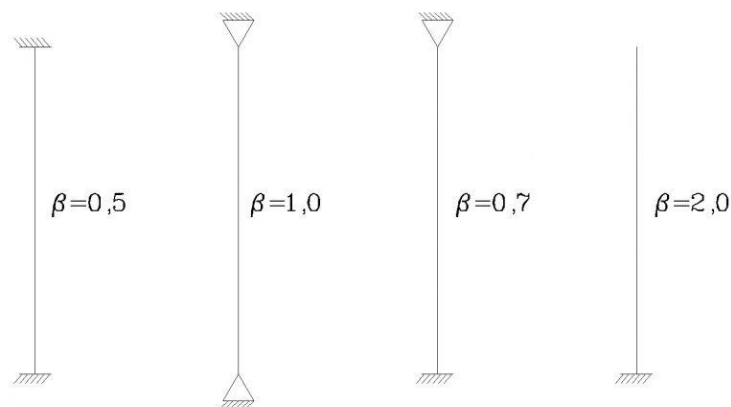


Figura 15. Coeficientes de pandeo [28]

Estos coeficientes dependerán de los grados de libertad que se puedan encontrar en los extremos, para ensayos con estas características donde se pretende analizar el desarrollo del desplazamiento fuera del plano, se instará a la utilización de apoyo articulados, es decir con un grado de libertad y por ende con un coeficiente de 1.

$$L_K = L \cdot \beta \quad \text{Ec 26 [21]}$$

Siendo L_K la longitud de pandeo, L la longitud descrita en las imágenes anteriores, y β la constante. [21]

Como se mencionó, con este ensayo lo que se pretenderá será la obtención del desplazamiento en el eje “z”, pero a su vez sería interesante si así fuera necesario el cálculo de la carga crítica. [22]

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_K^2} \quad \text{Ec 27 [22]}$$

Siendo P_{cr} la carga crítica de Euler, E el módulo de Young para policarbonato que es de 2,4 GPa, e I que se trata de la inercia, como la probeta es rectangular $I = \frac{bh^3}{12}$.

Y la tensión crítica de Euler será la tensión máxima que soportara sin pandear.

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{A L_K^2} \quad \text{Ec 28 [22]}$$

5.2. Biomecánica

5.2.1. Introducción

La biomecánica es la ciencia que se encarga del estudio de la mecánica de los sistemas vivos, desde las fuerzas mecánicas, el soporte anatómico y una iniciación neuronal entre otras cosas. [13]

Las áreas principales de esta ciencia son:

- La medicina y fisioterapia
- La ergonomía
- La actividad física

Será interesante ver el comportamiento que tendrán tanto los tejidos como la musculatura a diferentes tipos de esfuerzos, para ello en la Figura 16 se refleja el comportamiento viscoelástico en un tendón. [13]

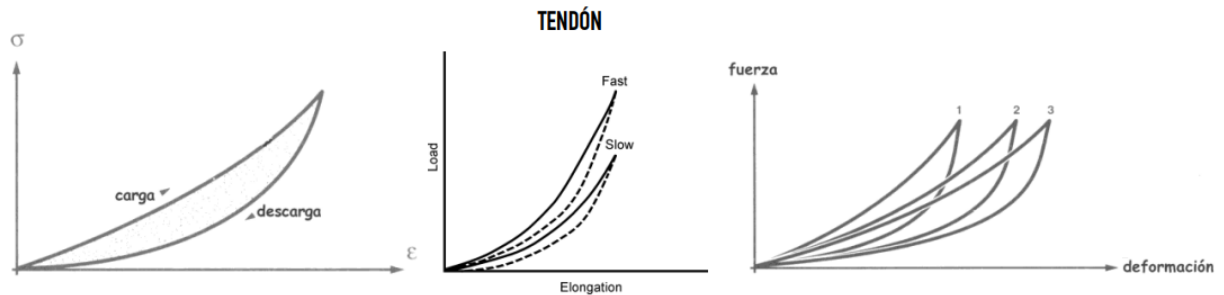


Figura 16. Diagrama fuerza-deformación [13]

En resumen se puede concluir de estos tipos de tejidos viscoelásticos, a esfuerzos puntuales y seguidos en un tiempo, sufrirá un descenso del módulo de Young. [13]

Otro punto a tener en cuenta es el Stiffness, que se refiere a la resistencia a la deformación que tiene un objeto en la musculatura a determinadas fuerzas, cuanto mayor stiffness mayor energía elástica se es capaz de almacenar por lo que se podrá generar más fuerza concéntrica. [14]

Centrando la atención en la deformación que se puede generar tanto en la piel como musculatura, se hace especial mención a las características de estos mismos:

Los músculos son capaces de sufrir grandes deformaciones y atienden a la ley de Hooke, estas deformaciones puede surgir por fuerzas externas como cargar pesas, o de forma involuntaria. Cuando los músculos se deforman sin estar sometidos a fuerzas, ya no es puramente elástico por lo que sería más un comportamiento contráctil. [26]

Si se observan los esfuerzos que sufre el musculo, suelen verse afectados en varias direcciones, por lo que más de un musculo suele actuar a la vez, por lo que mientras uno está en una fase activa el otro se estira y se deforma pero sin ejercer fuerza. [26]

Si nos referimos a tejidos como los ligamentos y los tendones, estas se encargan de transmitir la fuerza de los músculos, estos tienen unas gráficas de tensión-deformación bastante más pobre, para evitar así, llevar al límite tanto nuestros huesos como nuestros músculos, pudiendo evitar lesiones fatales. [26]

Es por ello que cuando se habla de medida de deformación en la biomecánica, se refiere a este tipo de cosas, donde se podrá saber en qué zona de la gráfica se está situando con los diferentes ejercicios que se realicen y lo lejos que se está de la posible rotura muscular, es por ello que con DIC, se podría evitar tanto esas lesiones, como programar exactamente qué tipo de estímulos sufre el músculo o si hay algún músculo que ejerce fuerza en algún movimiento donde no debería.

Un ejemplo de estudio biomecánico real que se realizan a nivel profesional puede ser el estudio de la pisada para corredores, donde mediante el uso de acelerómetros que básicamente proporcionan un análisis de la aceleración lineal y angular a la hora de pisar, se puede ver el cambio de pisada que se produce esto viene dado por la fatiga generada en el transcurso de la marcha. [26]

Es decir, las fases de apoyo, de balanceo y doble apoyo se verán técnicamente afectadas, por lo que realizar fases irregulares puede producir una “explotación” de una zona determinada del pie, y es aquí donde se puede analizar la pronación o supinación del pie. [26]

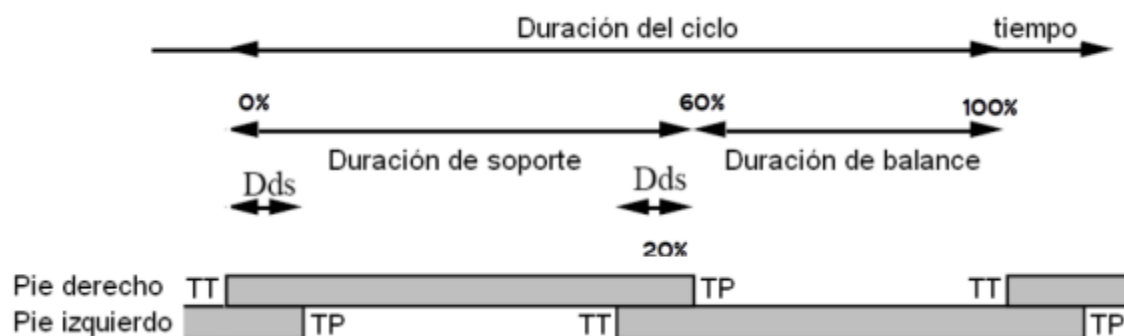


Figura 17. Fases de una zancada en carrera [26]

Este campo de estudio podría realizarse perfectamente con la Correlación Digital de Imágenes, a través de la captura de imágenes se podría evaluar la zona más afectada en la pisada, llegando a los mismos resultados que se obtienen por la técnica que se mencionó.

5.2.2. Tipos de speckle para ensayos biomecánicos

Para un uso adecuado de DIC, las zonas de interés y más si se hace referencia a un ensayo biomecánico, debe tener un patrón aleatorio, este patrón llamado speckle, se deformara con la superficie, en caso de que el patrón presentado por la propia muestra, fuese aleatorio por naturaleza, también sería válido para el estudio.

En todo caso el moteado para generar el speckle térmico sobre la piel debe seguir algunos requisitos.

- Distribución aleatoria para que cada celda analizada sea diferente a las demás.
- Gran contraste, para beneficiar el buen funcionamiento del programa que realice el análisis.
- Debe de ser una superficie lisa preferiblemente, para evitar así alteraciones geométricas de la superficie.
- El tamaño de los puntos de speckle sean acordes con el tamaño de la muestra o superficie sujeta a estudio.

En un análisis con DIC de espectro visible, se han desarrollado muchas metodologías para la aplicación del moteado entre ellas, pintura de gran contraste rociadas por una pistola de aire, dispersión de polvo al azar, patrón de moteado de negro sobre blanco siendo el blanco el predominante, y en caso especiales, usar fondo negro con moteado blanco.

6. Metodología experimental

En la metodología experimental se intentara cumplir con los objetivos marcados anteriormente, y es por ello que se establecerán unos pasos a seguir, siendo estos los siguientes:

- Revisar contenidos bibliográficos de libros y artículos para establecer una base de conocimiento en lo relacionado con la mecánica experimental, captura de imágenes, termografía y posibles campos de aplicación en la bioingeniería.
- Diseñar un procedimiento para la realización de ensayos mediante la generación de un patrón de manchas (speckle) térmico y poder procesarlo empleando cámaras térmicas.
- Establecer las condiciones de contorno del estudio y haciendo una previsión de posibles materiales empleados así como las herramientas físicas o de programación precisas.
- Desarrollar un plan de validación y comparativa de resultados con técnicas tradicionales. En este apartado evaluará la capacidad de medida 2D y 3D.
- Llevar a cabo la experimentación asociada con la validación de la metodología propuesta.
- Evaluar los resultados y realizar una labor iterativa si fuera necesario o diseñar una batería de ensayos de aplicación de la metodología propuesta.
- Llevar a cabo la experimentación de aplicación junto con la valoración de resultados.

6.1. Probetas y elementos analizados

6.1.1. Justificación

La selección del material para las probetas a estudiar, será clave, ya que se precisa de un material que tenga propiedades térmicas parecidas a las de la piel humana, es por ello que para seleccionar entre todas las posibilidades, se evaluará la emisividad de los materiales.

La emisividad es la capacidad de emitir radiación térmica, la piel humana tiene una emisividad de 0,98 aproximadamente, y es por ello que en la elección del material se busca uno que sea próximo. El policarbonato será la opción más apropiada ya que con una emisividad cercana a 0,8 y su rigidez, permitirá aplicar las cargas o excitaciones oportunas.

Una vez seleccionado el material, que será el policarbonato, se realizará el diseño de la probeta tanto para el ensayo de tracción como para el ensayo de pandeo, estas probetas deben ser planas y con cabeza por los dos lados de la misma, esto nos facilitará el agarre en los ensayos de tracción.

6.1.2. Probetas a tracción

Para tracción la norma ISO 3167 aconseja unos valores dependiendo del tipo de probeta y que estudio se realizará con ella, atendiendo por lo tanto a esos valores, se diseñará con Autodesk Inventor 2022 el modelo, con esto se realiza la fabricación mediante inyección por agua dejándose tal y como se muestra en la Figura 19.

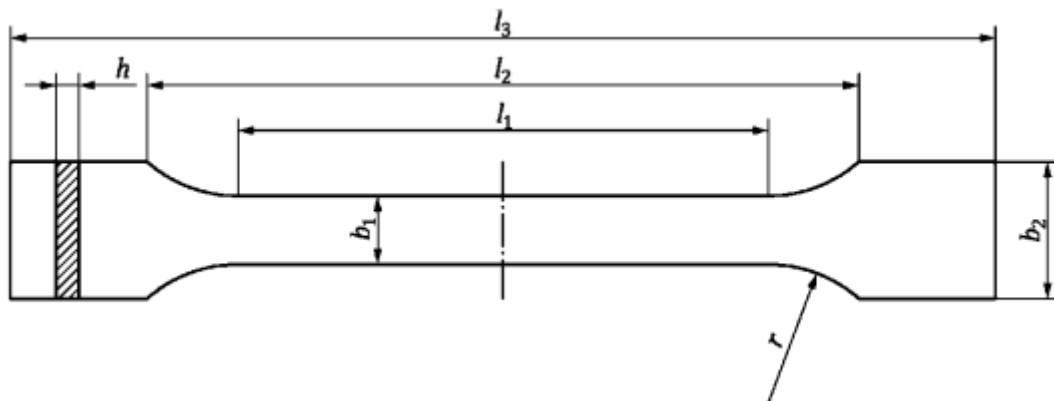


Figura 18. Normativa medidas probetas

	Tipo de probeta	A	B
l_3	Longitud total ^a	≥ 150 Valor recomendado ^b 170	≥ 150
l_1	Longitud de la parte estrecha central	80 ± 2	$60,0 \pm 0,5$
r	Radio	20 a 25 Valor recomendado ^b 24 ± 1	$\geq 60^c$ Valor recomendado ^b $60,0 \pm 0,5$
l_2	Distancia inicial entre las partes paralelas anchas ^d	104 a 113	106 a 120 Valor recomendado ^b 106 a 110
b_2	Anchura en los extremos	$20,0 \pm 0,2$	
b_1	Anchura de la parte estrecha	$10 \pm 0,2$	
h	Espesor	$4,0 \pm 0,2$	

Figura 19. Tabla medidas normalizadas



Figura 20. Probeta para tracción

6.1.3. Probetas a pandeo

Para el ensayo de pandeo la probeta que se prepara, será acorde a la máquina de ensayo universal con una anchura de 25mm, un largo de 400mm y espesor de 5mm.

Su fabricación en cambio, se realizó mediante corte manual para obtener la forma y mediante CNC los chaflanes en los extremos, esos chaflanes serán lijados para dejarlos con una forma redondeada y tener así el grado de libertad deseado.



Figura 21. Probeta para pandeo

6.2. Aplicación del patrón de moteado Speckle

El moteado sobre las probetas, será fundamental para poder obtener unos resultados precisos, este moteado será diferente para los dos tipos de cámaras, y al ser la misma probeta se tendrán que aplicar los dos speckle en la misma probeta pero cada uno por un lado.

6.2.1. Speckle luz visible

Para poder apreciar la deformación con las cámaras de luz visible, será necesario obtener un moteado en la probeta de forma que sea aleatorio y con el grosor adecuado para la resolución de las cámaras, es por ello que se aplicará primero varias capas de pintura blanca, para luego esparcir un moteado de puntos negros sobre ella.

Se realizará en las dos probetas que se tienen, tanto a la que se le realiza el ensayo de tracción como el de pandeo.

6.2.2. Speckle térmico

El speckle térmico consistirá en la aplicación de un moteado con puntas calientes, estas puntas calientes estarán fijadas en un útil el cual se mencionara más adelante, y con el que se podrá obtener tanto el patrón aleatorio requerido, como el grosor necesario para asegurar la precisión.

Para la realización de este speckle se plantea un útil de marcado, que se basara en los los juegos de moldes de clavos para hacer formas, es por ello que, siguiendo la misma dinámica, se crean dos útiles de clavos, uno con diámetro de 0,62 mm y una cabeza de 0,84mm y otro con clavos de 1,8mm de diámetro y 2,1mm de cabeza. Se marcara con las cabezas en el primer caso y con el cuerpo del clavo en el segundo caso, y esto es porque en el primer caso las cabezas son planas y en el segundo el cuerpo no acaba plano pero mediante el uso de una moladora se le dará la forma necesaria.

Se realizan dos por si la resolución de las cámaras, no son capaces de captar el diámetro de los clavos de 0,84mm.

6.2.2.1. Primer útil para marcado térmico

El primer útil diseñado y mecanizado tiene como objetivo el marcado, pero también el de probar la resolución de las cámaras a la hora de obtener el speckle.

Se utilizarán las cabezas porque son planas, por lo que se tendrán marcas de diámetro de 0,84mm, los planos del útil se encuentran de la página 4 a la 8 de los planos.

Para su montaje fueron necesarios:

- 4 Pernos de cabeza hexagonal de métrica 5.
- 12 Arandelas de plástico planas.
- Las tres placas de policarbonato.
- 4 Pernos de cabeza hexagonal de métrica 3.
- 1274 Clavos clavadora neumática.
- 2 Asas realizadas con impresión 3D.

Por naturaleza, al ser clavos de tan poco diámetro, vienen pegados con resina, es por ello que se le dará un baño de acetona para poder separarlos y posteriormente doblarlos mediante un torno para que no se salgan de los agujeros del útil.



Figura 22. Clavos UNICAIR y útil de marcado desde vista de planta

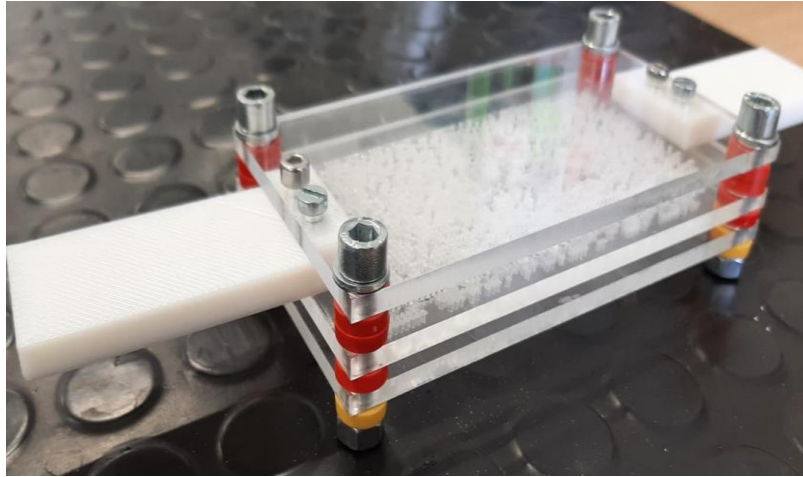


Figura 23. Útil para speckle térmico

También mencionar el mecanizado realizado sobre las placas, ya que los agujeros para los tornillos se realizan de forma sencilla, sin embargo para los 1274 agujeros donde van acoplados los clavos, fue necesario el programa Autodesk Fusion 360 con el que en base al archivo en formato dwg de Autodesk Inventor 2022, se podrá trazar el programa de CNC necesario para que se realice de forma automática. Y posteriormente meter a mano y uno a uno todos los clavos en los respectivos agujeros.



Figura 24. Máquina CNC

6.2.2.2. Segundo útil para marcado térmico

Este segundo útil se fabricó por la posible falta de resolución de las cámaras, es por ello que se fabricó un útil con clavos con más grosor, pero menos que el útil ya fabricado en otros trabajos fin de grado.

Este segundo útil fue una modificación, por lo tanto el patrón aleatorio, en vez de realizarse en el taladro de los agujeros, directamente se realizó en la colocación de los clavos.

Para modificar este útil se necesitaron:

- 4 Pernos de cabeza hexagonal de métrica 6 con una longitud de 23mm.
- 8 Arandelas de plástico planas con un espesor de 3mm.
- Las tres placas de policarbonato.
- 4 Arandelas de plástico con un espesor de 8mm.
- 490 Clavos de 1,8mm de diámetro x 35mm de largo.

Los clavos necesitaron ser mecanizados para dejarles la punta plana, es por ello que mediante una moladora, uno a uno se procedió a aplanarlos, y posteriormente de la misma forma que en el primer útil, a su colocación.

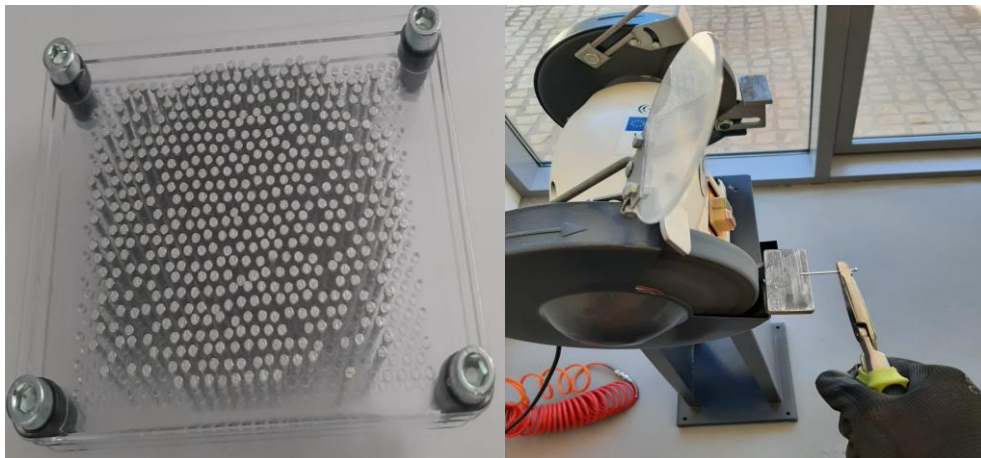


Figura 25. Útil para speckle térmico y moladora



Figura 26. Alzado del útil para speckle térmico

6.2.3. Estimación del tiempo de ensayo

La estimación del tiempo del ensayo será importante para ver el tiempo de reacción a la hora de realizar los ensayos, también no orientara para poner de la mejor manera posible el útil con el speckle oportuno. Esta estimación esta realizara para el segundo útil, ya que como se mencionó, para el primero no se tenía suficiente resolución en las cámaras, por lo que se decidió utilizar el segundo.

Se ha de tener en cuenta también si la probeta esta fría o caliente es por ello que con esta toma de datos también se especificara cuál de las dos opciones es más óptima, para ello se realizan cuatro ensayos para cada opción.

La toma de imágenes se realiza a través del programa Flir Gev Demo, con él se tomarán ráfagas de imágenes a una velocidad de 36,2FPS es decir alrededor de 36 imágenes por segundo.

6.2.3.1. Primer ensayo:

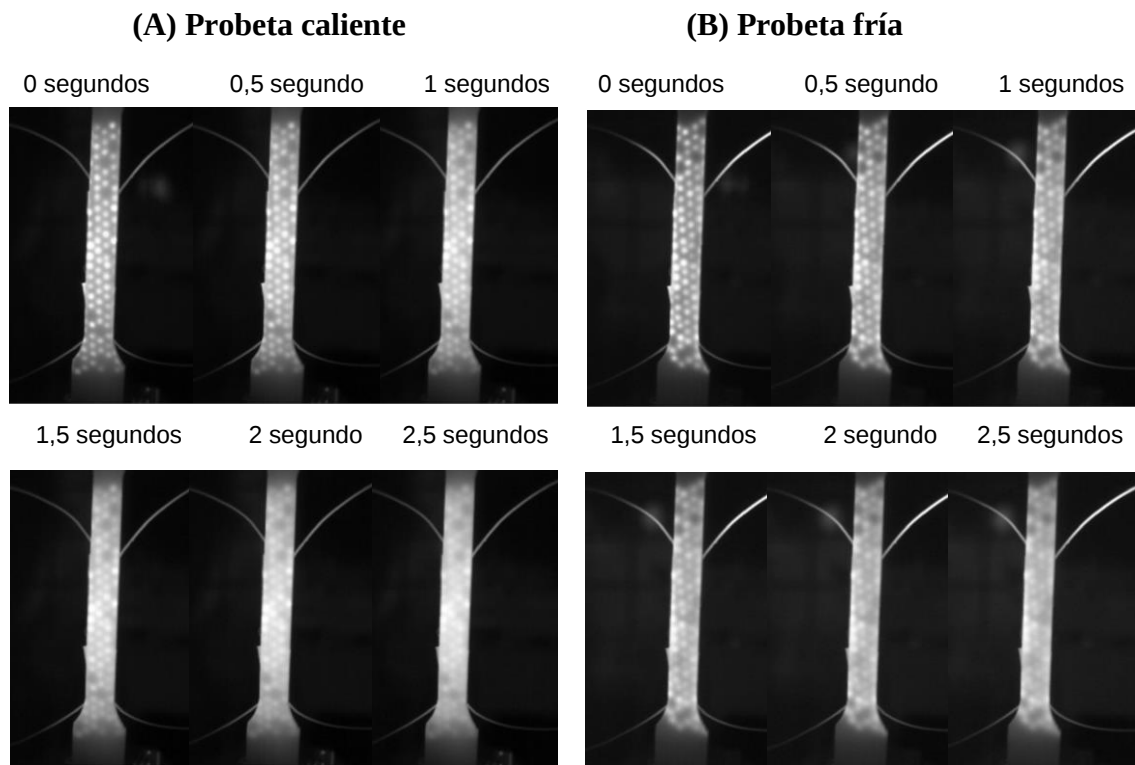


Figura 27. Desarrollo de speckle térmico en probetas

6.2.3.2. Segundo ensayo:

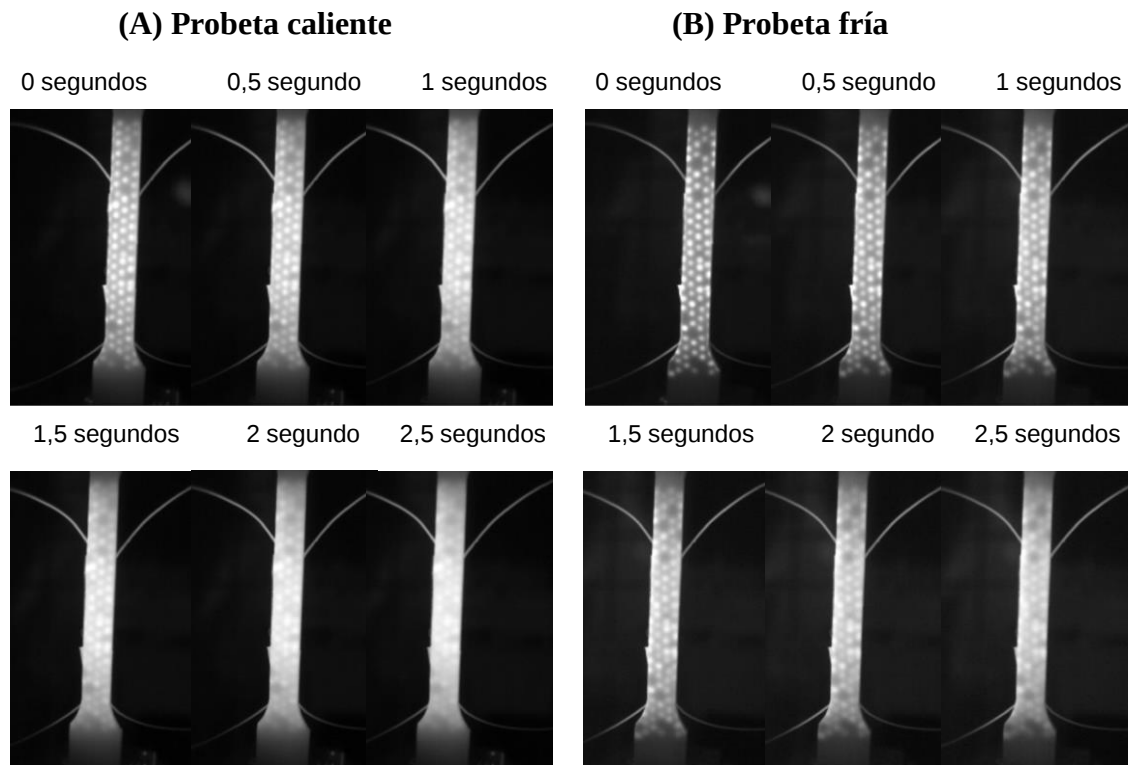


Figura 28. Desarrollo de speckle térmico en probetas

6.2.3.3. Tercer ensayo:

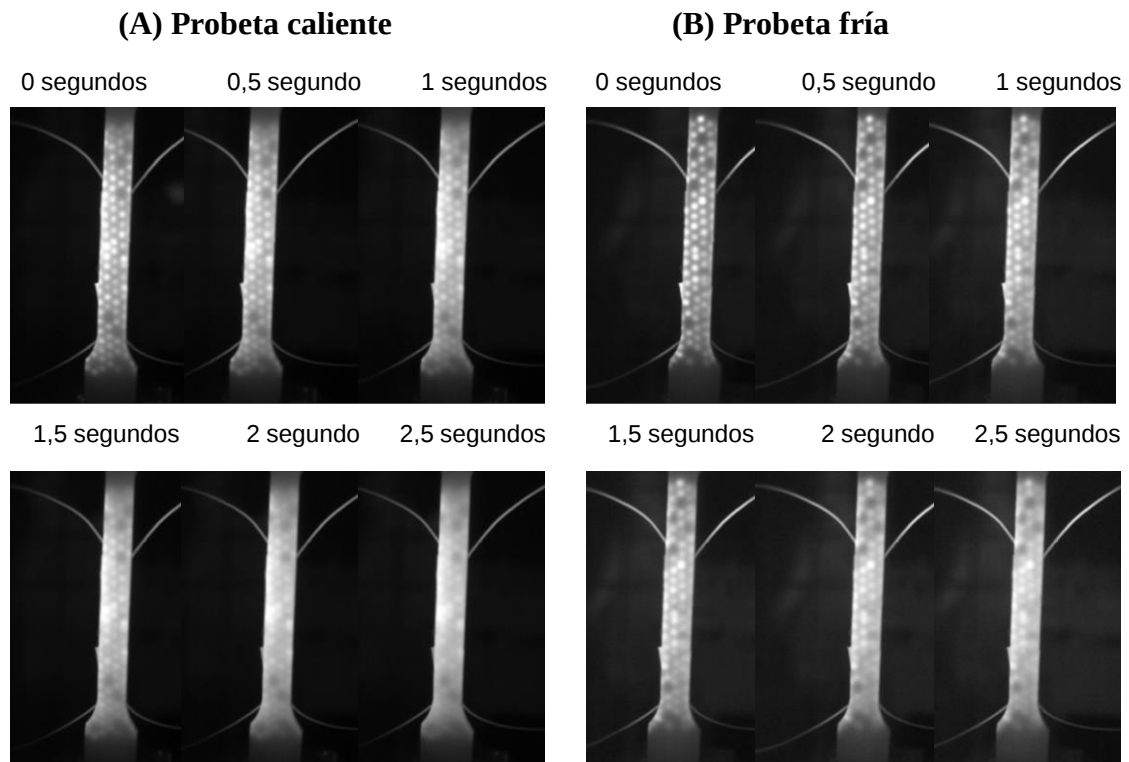


Figura 29. Desarrollo de speckle térmico en probetas

6.2.3.4. Cuarto ensayo:

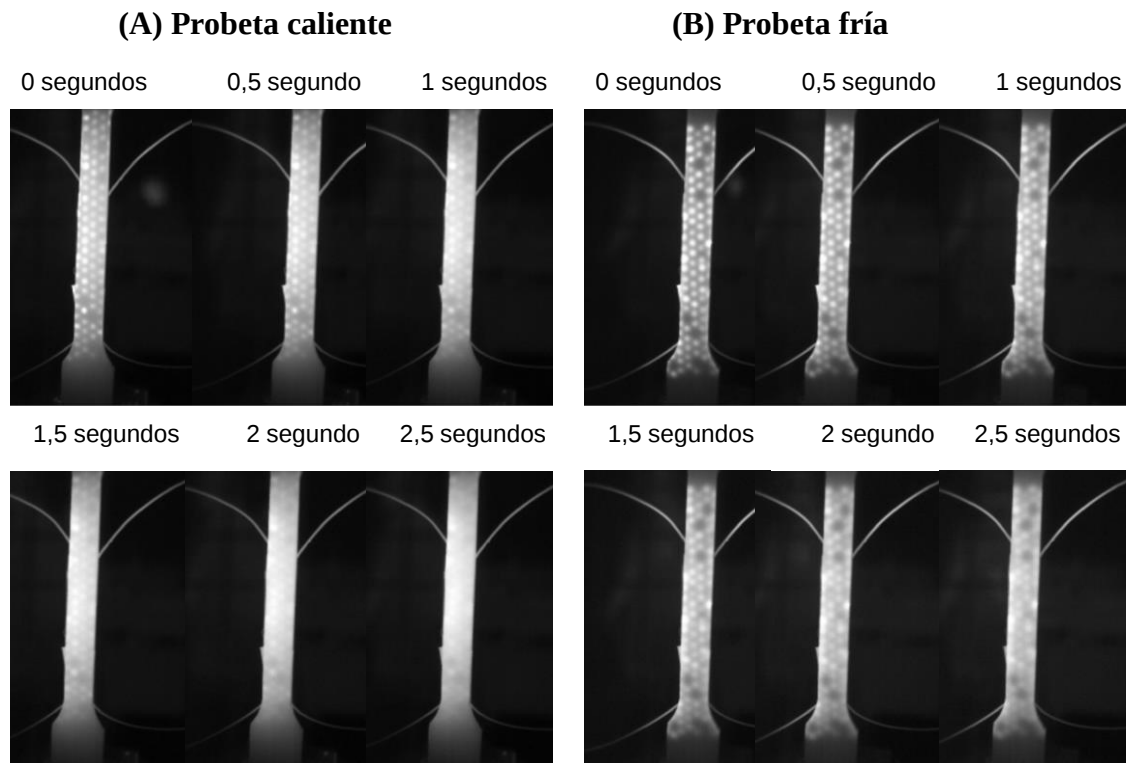


Figura 30. Desarrollo de speckle térmico en probetas

Como se ha podido observar en cada uno de los ensayos, la variación de temperatura con la probeta fría, es mayor por lo que la cámara lo capta durante más tiempo. También fijarnos en el tiempo en que se deja de visualizar el speckle térmico ronda los 2-2,5 segundos ya que a partir de entonces se difumina por completo y no se distinguirá.

Una imagen de una probeta fría del 4 ensayo en el segundo 3-4 segundos.

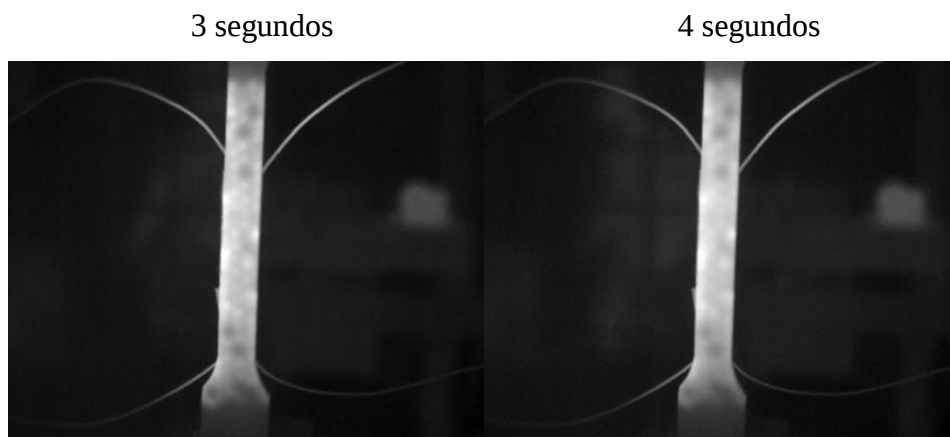


Figura 31. Desarrollo de speckle térmico en probetas

Es difícil de apreciar a simple vista, por lo que Vic-3D no lo reconocerá ni cambiándole la escala a las imágenes. Las imágenes se visualizan en una escala logarítmica que es la que mejor reconocerá Vic-3D, con otras escalas como puede ser DDE, a simple vista puede aparentar que se ve más contraste, sin embargo, con esta escala aparecen muchos reflejos y no tiene un buen contraste de zonas.

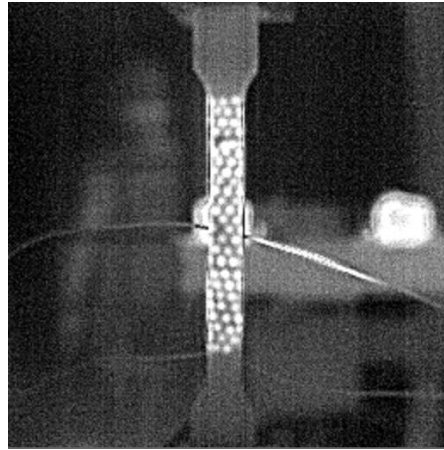


Figura 32. Vista escala DDE de la probeta marcada térmicamente

6.2.4. Útil para atemperar

Para el calentamiento de los útiles se utiliza una membrada de silicona calefactora usada normalmente para fabricación aditiva, que mediante una sonda receptora de temperatura se podrá ajustar a la temperatura que se requiera el útil.

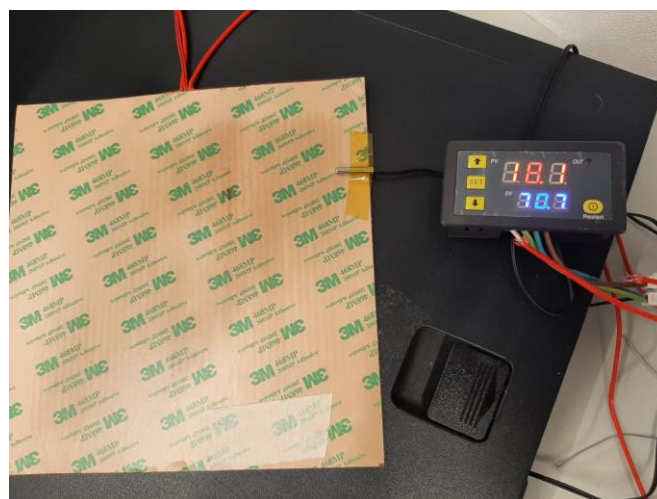


Figura 33. Placa caliente

6.3. Montaje óptico

El montaje óptico necesario para los ensayos se podrá dividir en dos diferentes grupos, como se mencionó anteriormente, se requiere de cámaras de espectro visible y de espectro infrarrojo, y al ser ensayos en un campo 3D, se requieren de dos cámaras de cada grupo.

6.3.1. Cámaras de espectro visible

Las cámaras de luz visible o de espectro visible serán utilizadas para poder tomar imágenes durante el ensayo por una de las caras de la probeta donde esté situado el speckle que le corresponde.

6.3.1.1. Características y configuración

Las cámaras de luz visible utilizadas fueron el modelo Mako U U130B de Allied Vision las cuales incorporan el sensor CMOS ON semi PYTHON 1300 que se comentó anteriormente, estas cámaras presentan una resolución 1280 x 1024 y una velocidad máxima de 160 FPS, las lentes utilizadas para el ensayo son lentes de 25mm.



Figura 34. Cámara de espectro visible [29]

El programa utilizado para el uso de las cámaras de luz visible es AVT Smartview, el cual se configurará de la misma manera para las dos cámaras como se ve en la Figura 35, se ajustará tanto el formato en el que se quieren las imágenes, la gama de colores, la entrada que se quiera, es decir si se quiere ver en vivo, o que queden a la espera de un trigger, y lo más importante los ajustes del contraste y ganancia entre otras, esto se ajusta dependiendo de la luz de la habitación para que las dos cámaras tomen las imágenes lo más semejantes cuanto a tonalidades.

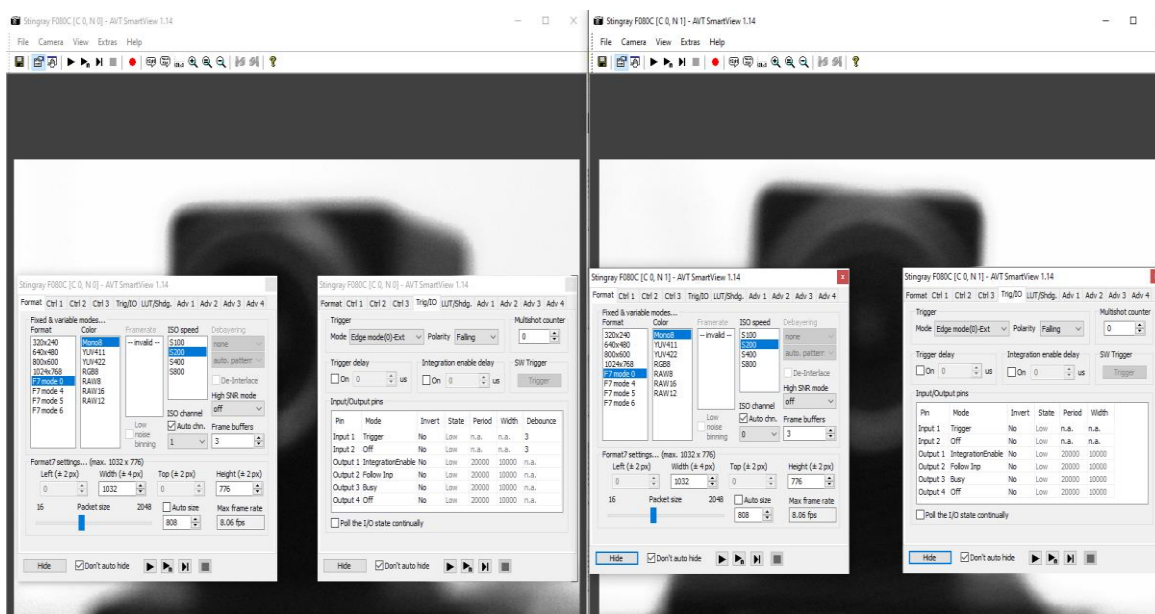


Figura 35. Configuración cámaras de espectro visible

6.3.2. Cámaras de espectro infrarrojo

Las cámaras de espectro infrarrojo o térmicas se utilizarán principalmente para la captura de imágenes en el lado adverso al que estén capturando las cámaras de luz visible, es decir donde estará el speckle térmico aplicado.

6.3.2.1. Características y configuración

Las cámaras térmicas empleadas para los ensayos y en todo el trabajo fin de grado son las FLIR A35, que cuentan con una resolución de 336 x 256 píxeles, una frecuencia de 60 Hz y un rango de temperaturas desde los -40°C hasta los 550°C. Se utilizan lentes de 9mm con una resolución 3D de 2,78mrad.



Figura 36. Cámara termográfica o térmica

La configuración de estas cámaras será más compleja, ya que para poder conectar las dos a la misma vez se deberá cambiar la “Subnet Mask” como se muestra en la Figura 37, y una vez estén conectadas se deberá de tener cuidado en los ajustes de estas, se tendrá que poner una adquisición de datos continua, la configuración del trigger “True”, Q14 la variable 0 en PLC_I0, NucMode en “Manual”, el formato del pixel en “Mono 14” todo esto mostrado en la Figura 38, y finalmente los demás valores dejarlos por defecto.

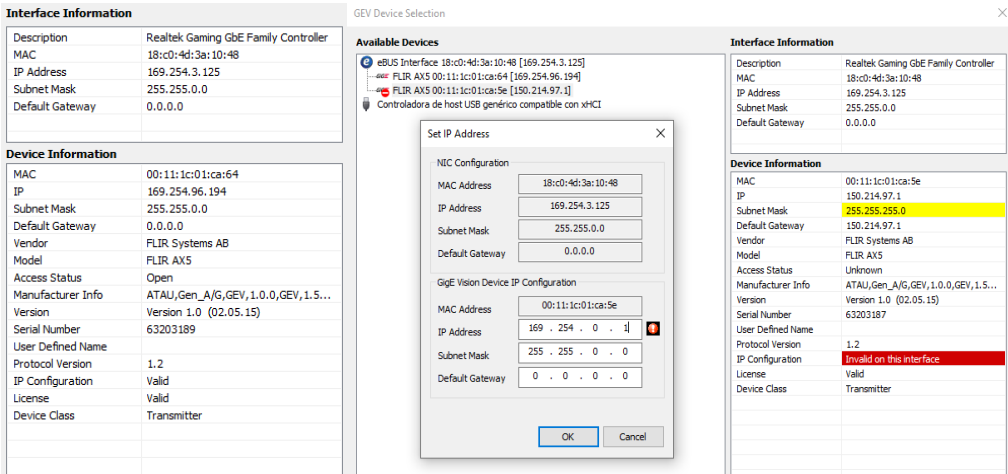


Figura 37. Configuración cámaras térmicas

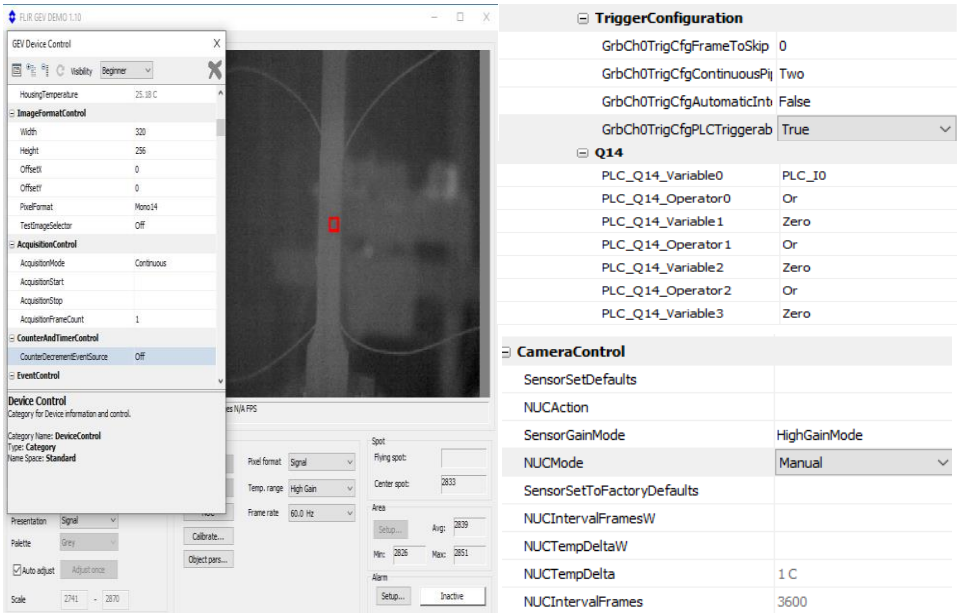


Figura 38. Configuración cámaras térmicas

6.3.3. Calibración del sistema de Correlación digital de imágenes

La calibración del sistema es una de las partes fundamentales, ya que una mala calibración puede arruinar todo el ensayo, es por ello que se realizaron gran cantidad de calibraciones hasta dar con la más acertada.

6.3.3.1. Calibración del sistema espectro visible

Para las cámaras de luz visible se utilizará Avt Smartview para la toma de imágenes, y para su procesado VIC 3D, en VIC se obtendrá la calibración.

El programa solicita unas imágenes de calibración, estas se obtendrán mediante la captura de imágenes con pulsos eléctricos. Las imágenes se realizarán colocando la placa de calibración en diferentes posiciones para que pueda obtener las tres dimensiones del espacio.

Dentro del programa se encuentra la posibilidad de ajustar todos los valores mostrados en la Figura 39, más adelante se comentará como configurar el programa a la hora del procesado, donde se verá la utilidad de la calibración previa.

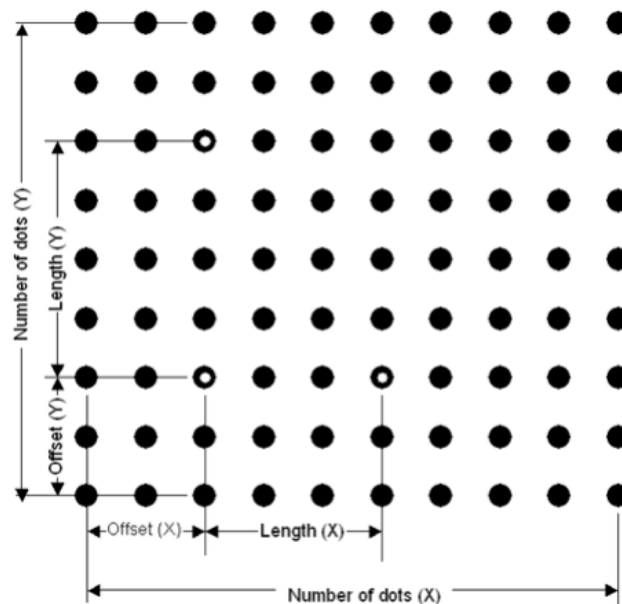


Figura 39. Placa de calibración [30]

6.3.3.2. Calibración del sistema infrarrojo

Para las cámaras de visión térmica se realizará la misma metodología de calibración pero se utilizarán placas donde los agujeros están rellenos de yeso, también se utilizara el programa de VIC 3D.

Para las dos calibraciones se tendrá que mandar un pulso externo (trigger) este pulso se mandará mediante un botón, este botón aporta un voltaje de 5V, este voltaje es recibido por las cámaras y realizaran la toma de una imagen cada vez que se despulse el botón (es decir es un trigger tipo falling).

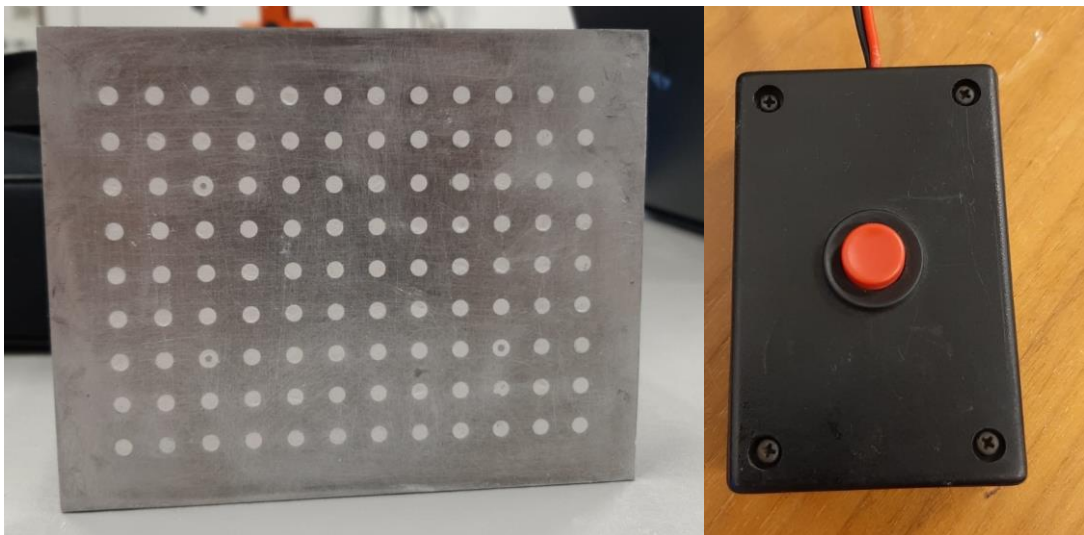


Figura 40. Placa calibración y Botón pulso eléctrico

6.3.4. Procesado de imágenes mediante Correlación digital de imágenes

Como se mencionó anteriormente las imágenes obtenidas en los ensayos deben sufrir un procesado para poder obtener la información que nos interesa, es por ellos que se utilizará VIC-3D 2010, con este programa se podrá obtener desde el ruido de la imagen hasta las deformaciones en las tres coordenadas.

Para las cámaras térmicas, antes de poder introducir las imágenes en VIC-3D, se tendrá que utilizar Research, con este programa se podrá exportar las imágenes de forma individual, ya que las cámaras térmicas toman una secuencia de imágenes.

Una vez se tienen las imágenes de los ensayos preparadas hay que tener en cuenta que VIC-3D trabaja en base a una calibración realizada previamente al ensayo, por lo que primero se deberán cargar las imágenes de calibración o el proyecto posteriormente se elegirá la zona de interés y el tamaño de las celdas, este tamaño será acorde al nivel de precisión que se quiera, todo esto lo muestra la Figura 41.

Para que el programa tenga mejor precisión es recomendable utilizar una opción con la que colocas la ubicación de un punto como se muestra en la Figura 42, y su seguimiento en las siguientes imágenes, con esto puedes asegurar que el programa sigue de forma correcta los puntos.

Una vez realizado esto se podrá tocar las escalas de las imágenes y el contraste de las mismas, terminado el proceso de preparación de imágenes, ya solo quedaría pulsar el botón de “run”, obteniendo resultados se muestra en la zona derecha de la Figura 42.

Una vez procesadas con VIC-3D, se pasarán a formato Matlab para poder comparar los ensayos.

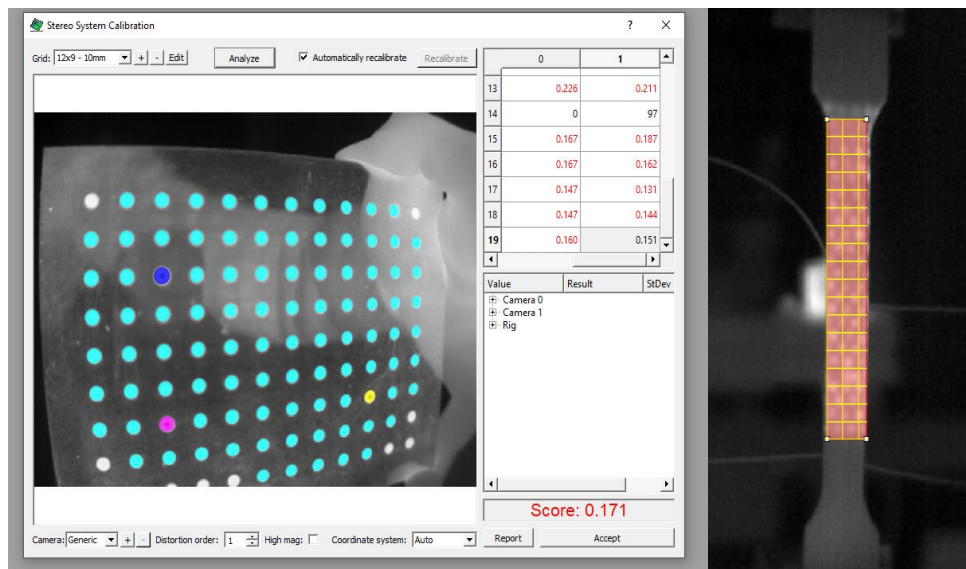


Figura 41. Configuración del calibrado y Zona de interes

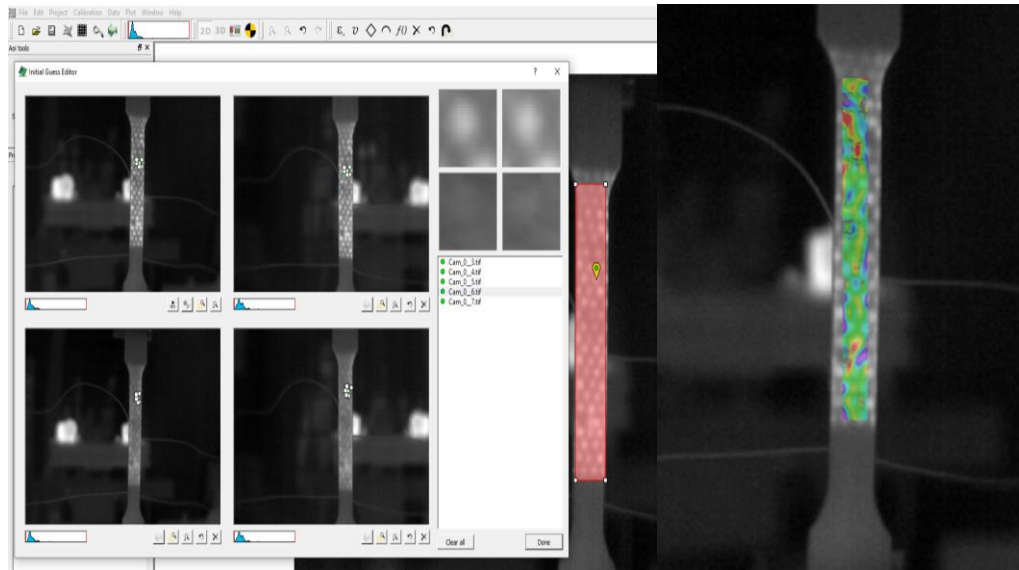


Figura 42. Configuración y Resultados en 2D

6.4. Metodología y equipos de ensayo

Para poder cumplir con los objetivos se sigue la metodología que se mencionara a continuación, esta necesitará algunos equipos en común para los ensayos, a su vez también será necesario fabricar algunos componentes de los montajes para poder ajustarnos mejor a lo que se desea.

Entre los equipos necesarios, se encuentra:

Las máquinas de ensayo universal son también conocidas como máquinas de tracción, aunque en ellas se realiza cualquier tipo de ensayo, ya sea flexión, compresión, pandeo, desgarró, fricción o incluso cizallamiento y todo cumpliendo la normativa vigente.

Las características más destacas de la máquina son:

- Adquisición de datos máxima de 2,5 kHz.
- Capacidad de carga: 30 kN.
- Compatibilidad con el software Bluehill 3.

Esta máquina es compatible con el programa BlueHill que será el que se utilizará para el manejo de la máquina.

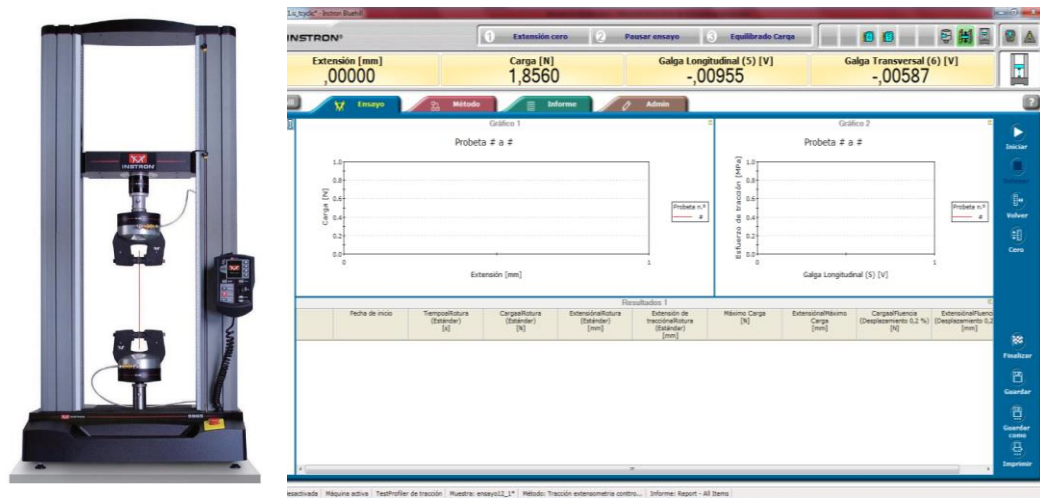


Figura 43. Máquina de ensayo universal [31] y BlueHill Interfaz

Para la realización del ensayo son necesarias dos mordazas modelo 2716, estas mordazas están diseñadas de forma que conforme se aplica carga se incrementa el agarre de ella misma, teniendo las mordazas unas medidas de 25mm de ancho y 8mm de espesor máximo.

Estas mordazas se utilizarán para los dos ensayos de validación, el de tracción y pandeo, mientras que para los ensayos biomecánicos no serán necesarios.



Figura 44. Mordazas para máquina de ensayo universal [32]

Es necesario el diseño y fabricado de unas nuevas bases para las cámaras por lo que en el anexo se podrán encontrar las especificaciones, estas servirán para poder agarrar las cámaras al montaje de la máquina de ensayo universal.



Figura 45. Bases cámaras

6.4.1. Ensayos de tracción

Detallando la metodología específica para cada ensayo, se puede detallar los pasos a seguir en el ensayo de tracción como los siguientes:

- Preparación del montaje experimental que se explicará más a fondo en el siguiente apartado.
- Calibración del montaje óptico, como se explicó anteriormente, hace falta calibrar las cámaras antes de empezar cualquier ensayo.
- Preparación de las probetas, será necesario aplicar el speckle para las cámaras de luz visible, y el speckle térmico, para las cámaras térmicas, el térmico se aplicara justo antes de comenzar el ensayo, también se colocarán unas galgas extensiométricas, con estas se medirá la deformación y desplazamiento al igual que con DIC, pero siendo estas teóricamente más precisas.
- Realizar un programa para el desarrollo del ensayo mediante BlueHill.

- Y finalmente comenzar el ensayo teniendo en cuenta que se tendrá una imagen extra en una de las secuencias para sincronizar las cuatro cámaras y se tomen los imágenes a la vez.

Para complementar la validación de las cámaras, tanto de luz visible como térmicas, se procederá a la colocación de galgas extensiométricas, las cuales darán unos valores de deformación de la probeta en el momento del ensayo.

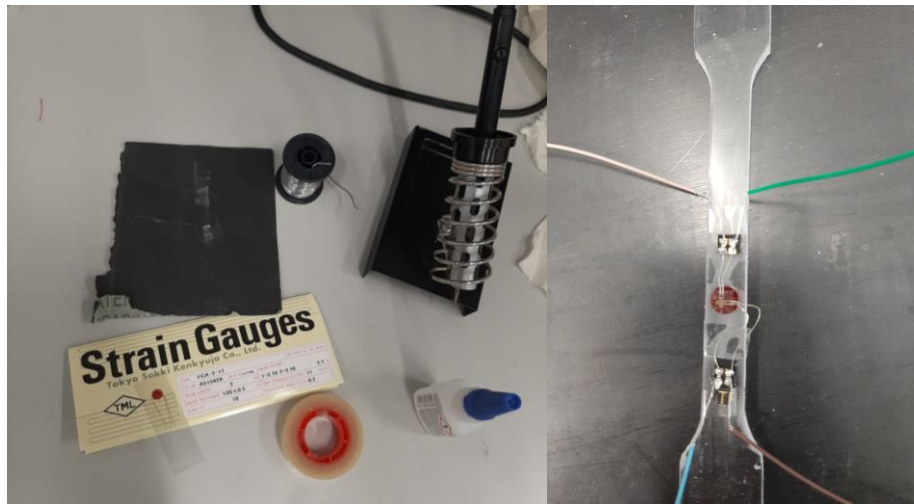


Figura 46. Material colocación de galga

Para la colocación de las galgas se deben seguir las siguientes instrucciones:

- Limpiar con disolvente.
- Lijar la zona donde se colocaran mediante papel lija.
- Aplicar super glue en la zona e instantáneamente colocar la galga.
- De la misma manera pegar los conectores y soldar los cables.

Las galgas pueden estar las dos juntas, es decir la transversal y longitudinal vienen en la misma ya que por separado el grosor de la galga era igual al de la probeta.

Las galgas vendrán conectadas a una caja de galgas que estará mediante una conexión analógica conectadas al programa con el que se realizará el ensayo.

Para la puesta en marcha de estas cajas de galgas, habrá que conectar el positivo y negativo a esta y mediante el menú de la caja, determinarle que se realizará un puente, y que tendrá una entrada analógica en el canal en que se conectan las galgas.

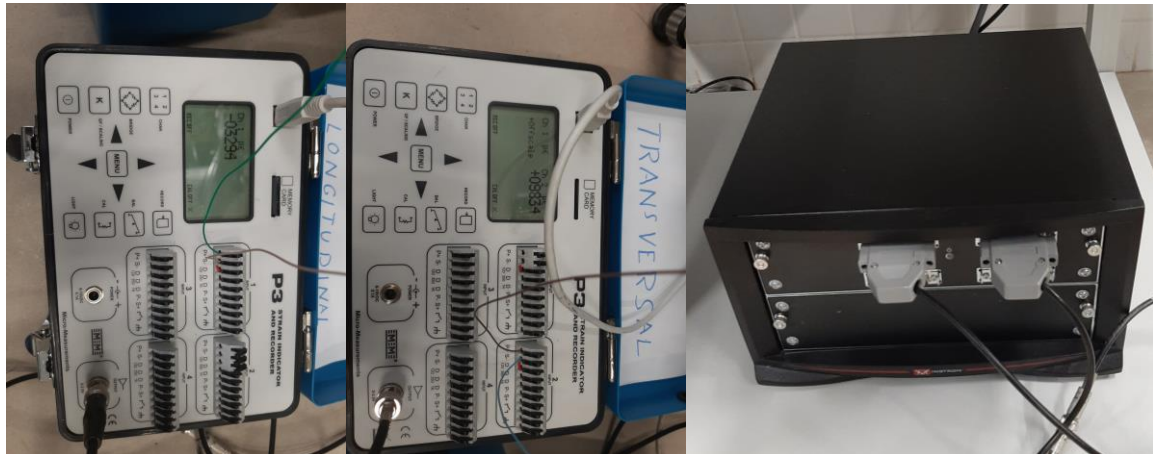


Figura 47. Caja de galgas y Conexión caja de galgas

Una vez se obtienen los datos de las galgas, será importante saber el factor de escala, que se habrá configurado previamente al ensayo, se pueden usar tres modos, low, médium, high, esto cambiara dependiendo de la precisión, para este caso se usará la configuración normal “medium”.

Modo	Factor de escala ($\mu\epsilon/V$)
Low	260
Medium	2600
High	26000

Tabla 1. Constante de las galgas

6.4.1.1. Montaje experimental y programación del ensayo

El montaje de las cámaras será el mismo para los dos ensayos, lo único que cambiara será la mordaza, la probeta y las galgas.

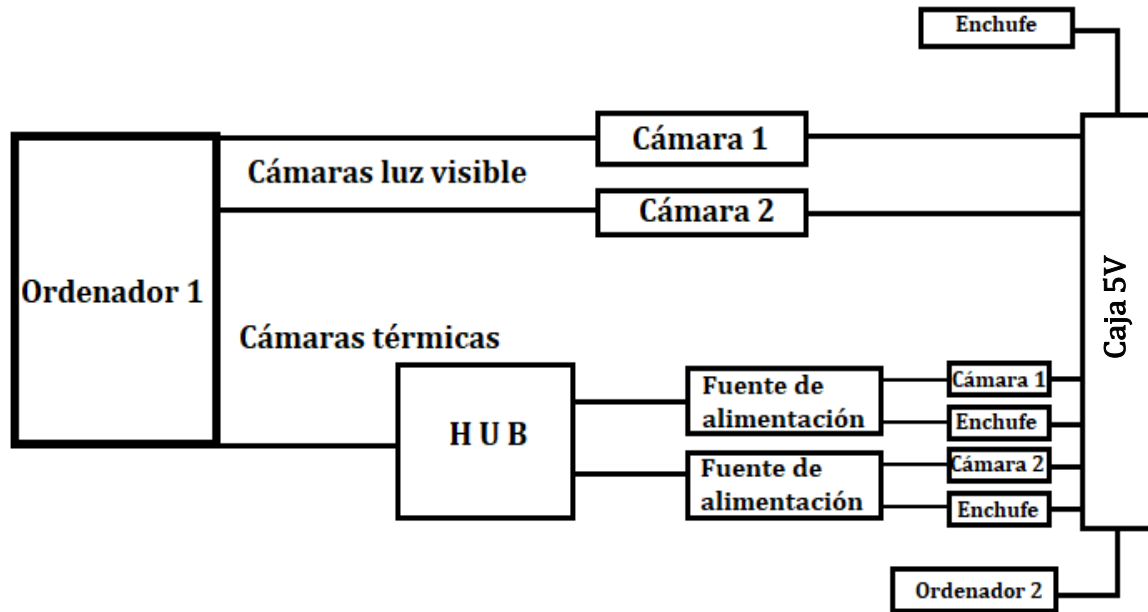


Figura 48. Esquema de flujo montaje ensayo tracción



Figura 49. Esquema montaje ensayo tracción

Para la conexión del ordenador con el HUB se utilizara un cable Ethernet, y del HUB saldrán dos Ethernet más hacia la fuente de alimentación de las cámaras, estas irán conectados en la entrada “in” de las fuentes, y a su vez por la salida “out”, irán cables Ethernet hasta las cámaras.

Desde las cámaras además de la entrada Ethernet también ira un cable M12 para la sincronización y la recepción del pulso eléctrico, este ira hasta una caja de 5V donde se juntaran todas las cámaras para que estén sincronizadas las cuatro, esta caja será la

encargada de mandar el pulso para la toma de imágenes, la caja recibirá el pulso del programa BlueHill que está conectado con la máquina de ensayo universal, además la alimentación de las cámaras de luz visible se hará mediante USB 3.0 directamente con el ordenador.

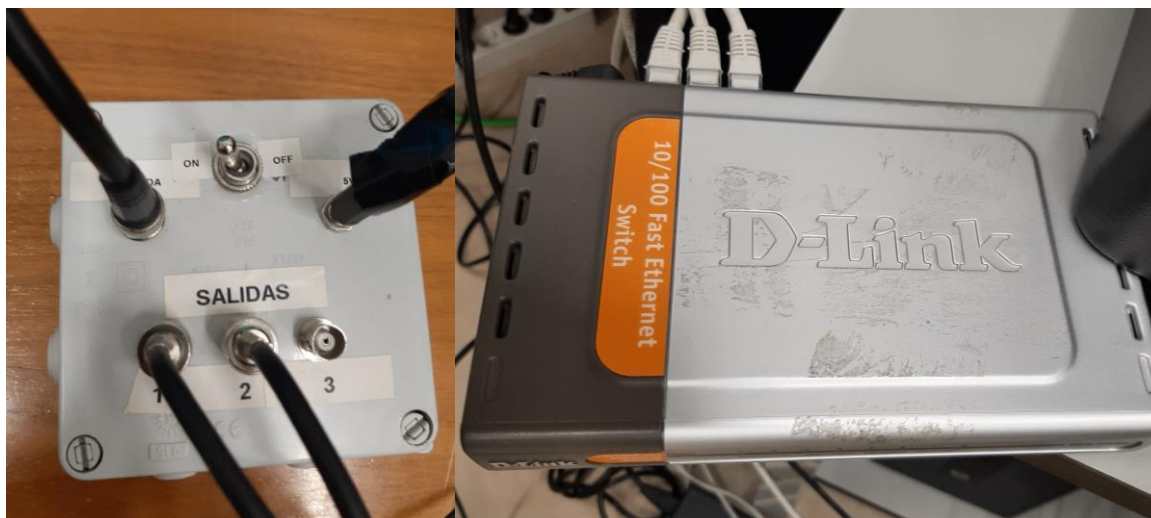


Figura 50. Caja 5V y H.U.B

El esquema de flujo anterior mostrado en la Figura 48, será útil para el ensayo de tracción y de pandeo, sin embargo para el ensayo de tracción también se tendrán en cuenta las galgas extensiométricas, es por ello, que estas deben ir conectadas adecuadamente a la caja de galgas y a su vez a la máquina de ensayo universal.

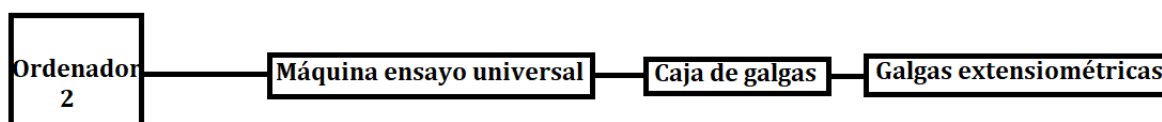


Figura 51. Esquema de flujo de las galgas extensiométricas

Una vez montado, calibrado y calentado el útil, ya se puede comenzar la realización del ensayo, no antes sin realizar el programa dentro de BlueHill aquí se introducirá cuantos milímetros se requieren traccionar, que velocidad tendrá y cuantos pulsos debe mandar.

Una vez preparado se procede con la configuración del programa en BlueHill:

- Se procede a dar un primer pulso como muestra la parte izquierda de la Figura 52, con esto se busca la sincronización de las cuatro cámaras, suele

pasar que una de las cámaras térmicas deja de grabar la secuencia por lo que con este pulso se podrá sincronizar las cámaras.

- Posteriormente habrá que borrar esa primera imagen.
- Ahora se dará una parada de 20 segundos para coger el útil caliente, y prepararse para colocarlo sobre la probeta como muestra la zona derecha de la Figura 52.
- Se dejará un balance como se puede observar en la zona izquierda de la Figura 52 para dejar preparadas las galgas y en ese momento es cuando se marcará la probeta.
- Y ya se realizará una subida constante de 0,6mm/s e imágenes cada 0,25mm como muestra la Figura 53 en su parte derecha, se pondrán tantas rampas como se quiera, se colocarán diez rampas, es decir 2,5mm de desplazamiento, eso si hay que tener en cuenta que el marcado no durara todo el ensayo pero si gran parte de él, es por ello que el procesado que se le dará a las imágenes, será de imagen a imagen, para poder valorar mejor esa deformación obtenida.

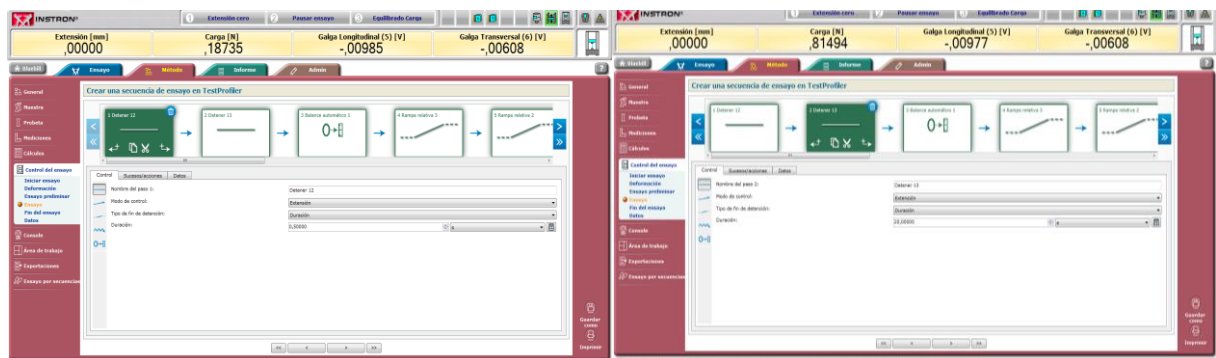


Figura 52. Configuración BlueHill

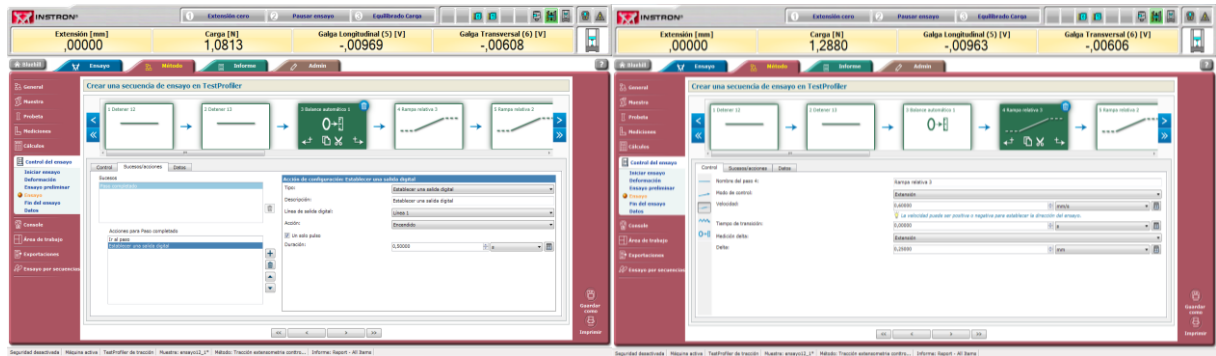


Figura 53. Configuración BlueHill

6.4.2. Ensayo de pandeo

En este ensayo el procedimiento para su realización es muy parecido en cuanto a material, pero totalmente contrario en cuanto a tipología de ensayo.

Este ensayo comprende de los siguientes pasos:

- Preparación del montaje experimental que se explicará más a fondo en el siguiente apartado.
- Calibración del montaje óptico, como se explicó anteriormente, hace falta calibrar las cámaras antes de empezar cualquier ensayo.
- Preparación de las probetas, será necesario aplicar el speckle para las cámaras de luz visible, y el speckle térmico para las cámaras térmicas.
- Realizar un programa para el desarrollo del ensayo mediante BlueHill.
- Y finalmente comenzar el ensayo teniendo en cuenta que se tendrá una imagen extra en una de las secuencias para sincronizar las cuatro cámaras y se tomen las imágenes a la vez.

Básicamente, el procedimiento es el mismo, solo que no se colocaran galgas extensiométricas, y aunque el procedimiento sea el mismo, no significa que se requiera de

la misma instrumentación, ya que a diferencia de tracción, el pandeo requiere de un complemento a colocar en las mordazas.

Una vez terminado el ensayo de tracción se preparará todo para el ensayo de pandeo, para ello se necesitará complementar a la mordaza usada para tracción, este complemento será un apoyo y liberará un grado de libertad para que resulte un apoyo articulado y como se mencionó anteriormente se tenga una $\beta=1$, el diseño se puede encontrar en los anexos.

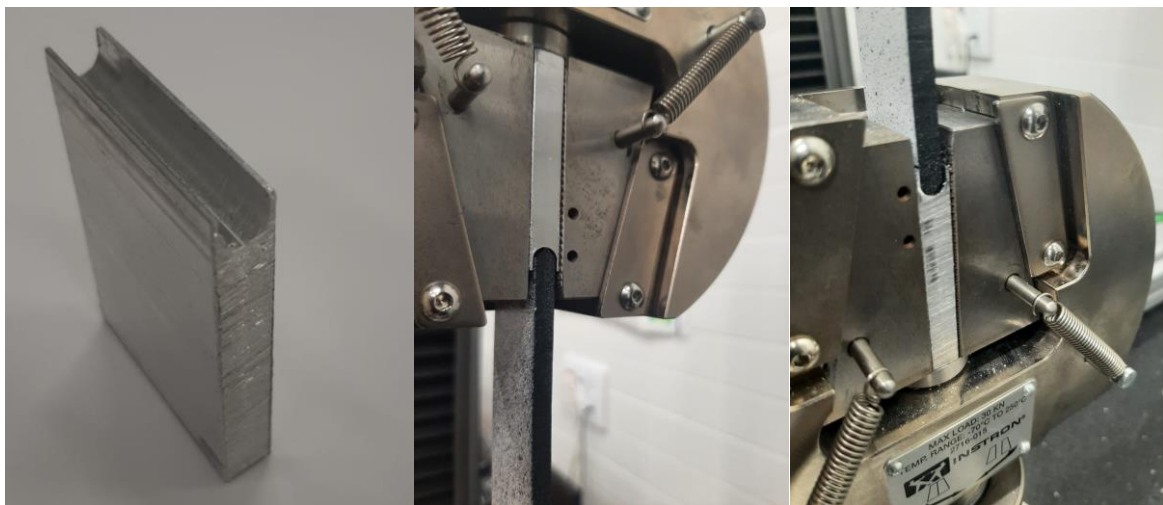


Figura 54. Diferentes perspectivas apoyo para probeta en pandeo

6.4.2.1. Montaje experimental y programación del ensayo

Para el ensayo de pandeo se utilizará el mismo esquema pero sin las galgas extensiométricas, se tendrá cuidado a la hora de la realización del ensayo, ya que la probeta pandeara en negativo en uno de los planos, por lo que para unas cámaras esa deformación será contraria respecto a las otras cámaras.

Es por ello que es muy importante marcar la zona de interés antes de comenzar con el ensayo, y con ello se verá a través del procesado en que región analizar los resultados.

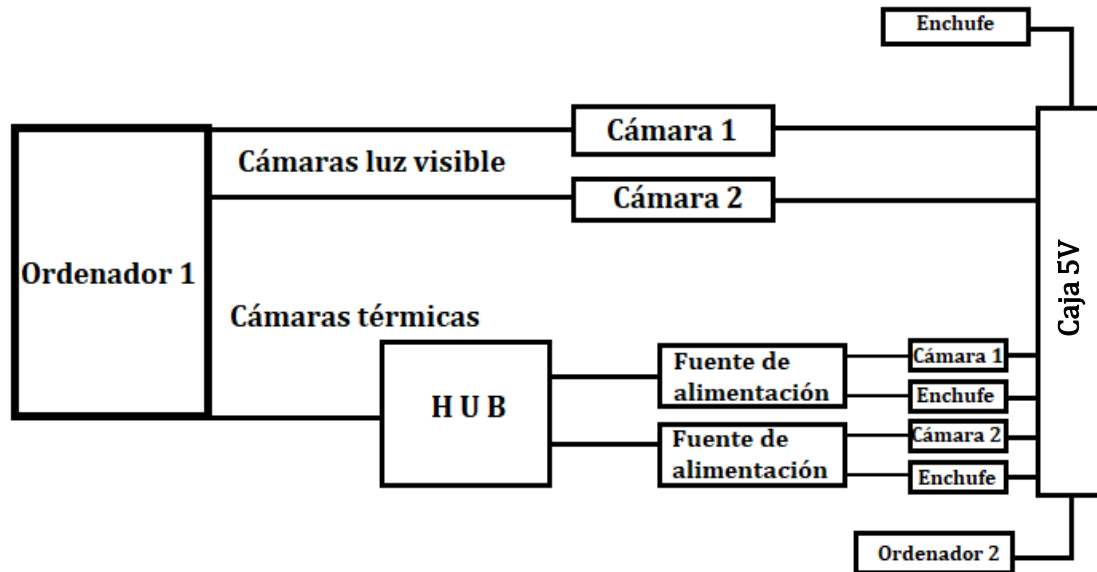


Figura 55. Esquema de flujo montaje ensayo pandeo



Figura 56. Esquema montaje ensayo pandeo

El programa dentro de BlueHill será el siguiente:

1. Lo primero y de la misma forma que se hizo en el ensayo de tracción se dará un pulso para dejar preparadas las cuatro cámaras como figura en la zona izquierda de la Figura 57.

2. Después ser preparadas, se dan veinte segundos para coger el útil de marcado y cuando la carga se ponga en 0, marcar, como se muestra en la zona derecha de la Figura 57.
3. A continuación se hace el balance, como en este ensayo no se tienen galgas, no se tendrá que tocar su configuración, se puede observar en la zona izquierda de la Figura 58.
4. Y solo quedaría aplicar una rampa constante a una velocidad de 0,6 mm/s y obteniendo una imagen cada 0,25mm, pudiéndose observar en la zona derecha de la Figura 58.

El número de imágenes tomadas son ocho, pero no todas ellas son válidas, esto ocurre porque se pierde la resolución de las cámaras al alejarse la probeta de las cámaras térmicas (pandea la probeta).

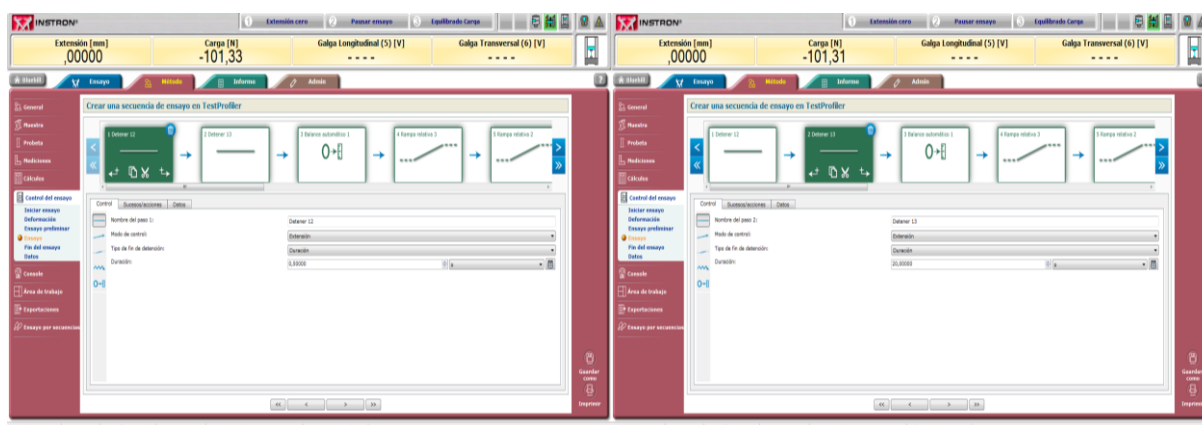


Figura 57. Configuración BlueHill

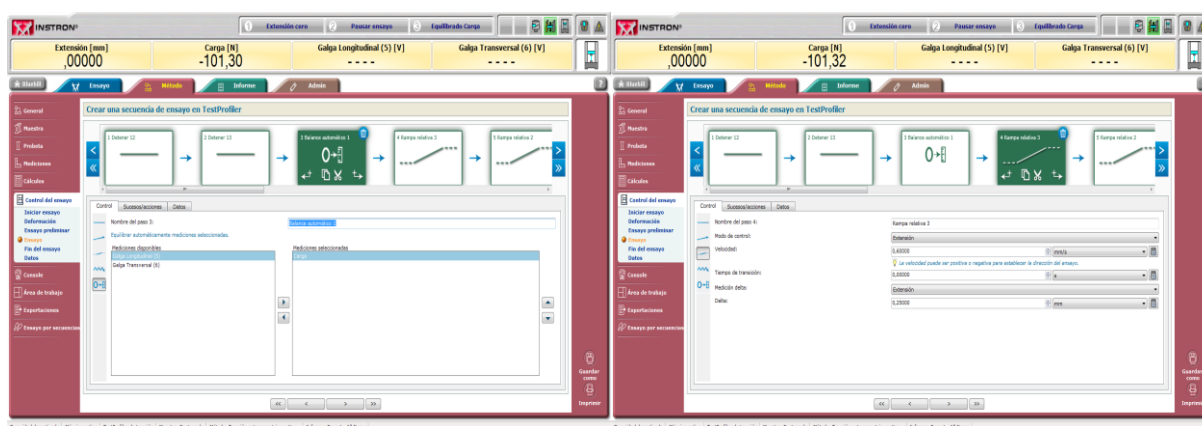


Figura 58. Configuración BlueHill

6.4.3. Ensayo de análisis Biomecánico

En la realización de los ensayos biomecánicos, el procedimiento a seguir es bastante parecido a los dos anteriores, simplemente que los dos anteriores servirán para validar el método, y en este ensayo se pone a prueba el método en un análisis realista como es en la piel humana, es por ello que ya no se tendrán ni galgas ni cámaras de luz visible, simplemente se usaran las cámaras térmicas, con las que se verá la deformación tanto de la piel, como de la musculatura.

El procedimiento para este ensayo es el siguiente:

- Colocar el montaje óptico de las cámaras térmicas, enfrente de un lugar accesible para colocar el cuerpo, es importante no mover de ángulo las cámaras, ya que perdería la calibración previa.
- Calentar el útil mientras se deján en espera las dos cámaras, como ahora no se tiene ningún programa que mande el pulso como en los ensayos anteriores, se deberá de sincronizar de forma manual con un generador de señal, esto es básicamente tomar una imagen con muy pocos Hz, para que la diferencia entre tomas de imágenes sea de muchos segundos, dándonos tiempo a poder tomar las imágenes con las dos cámaras a la misma vez.
- Estando ya sincronizadas se tomarán secuencias largas de imágenes, en las que se realizaran los movimientos oportunos del ensayo, teniendo que posteriormente, mediante Research de la misma forma que se hizo para las imágenes de calibración, individualizar las imágenes.

Una vez se tengan las imágenes por separado, se puede realizar el procesado mediante VIC 3D.

Al no necesitarse de un trigger para este ensayo, en la configuración de las cámaras solo se cambiará la configuración del trigger, que se pondrá en “False”, y las cámaras irán conectadas directamente al generador.

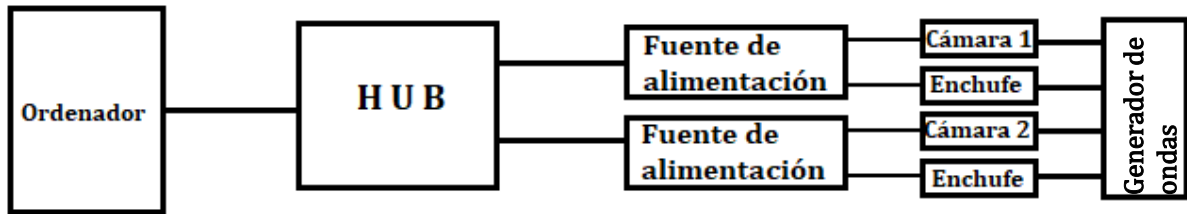


Figura 59. Esquema de flujo montaje ensayo biomecánico

6.5. Metodología de procesamiento de imágenes

Para el procesamiento de las imágenes tanto de los ensayos de tracción y pandeo se seguirán los siguientes pasos

1. Introducir las imágenes de calibración, o bien el archivo.
2. Introducir las imágenes por orden según la secuencia del ensayo, se tendrá que introducir con el mismo nombre pero cambiando a que cámara pertenecen dichas imágenes.
3. Colocar la zona de interés marcando el tamaño de celda.
4. Colocar puntos que el programa intentara seguir, con esto se ayudará a obtener un procesamiento más preciso.

Antes de procesar las imágenes se tendrán varias opciones que dependiendo que tipo de estudio se busque serán de utilidad, entre ellas destacan el procesamiento imagen a imagen, es decir que utiliza como imagen de referencia la anterior, y no la primera imagen de todas, con esto se puede ver el progreso de mejor manera.

Cuando se tienen preparadas, se procesan y se observan los resultados, para poder analizar mejor los resultados, se exportarán a formato Matlab, aquí se podrán obtener las gráficas comparativas de las variables deseadas, y a su vez obtener los mapas de calor, estos mapas y gráficas también se pueden obtener directamente mediante VIC 3D, pero se limita la configuración de ellas.

Una vez se ha comprobado la eficacia del método, se podrá poner a prueba en ensayos reales y en musculatura real, para ello se procederá con la misma metodología que los ensayos previos.

Algunos aspectos que hay que tener en cuenta una vez realizado los ensayos y querer procesar las imágenes obtenidas pueden ser los siguientes:

El movimiento del solido rígido:

En la toma de las imágenes lo realmente interesante de estudio, es la deformación o desplazamiento del objeto de estudio, por lo que eliminar el desplazamiento que no genera deformación facilitara el análisis.

Cambiar los ejes de coordenadas:

En alguno de los ejemplos, será necesario proceder con un cambio de los ejes de coordenadas, ya que esto facilitara la lectura de los resultados.

Ajustar la escala de las imágenes:

Por defecto. VIC autoajustara los valores que ira calculando, es por ello, que para poder ver el avance de la deformación o de W , será necesario ajustar manualmente estos valores.

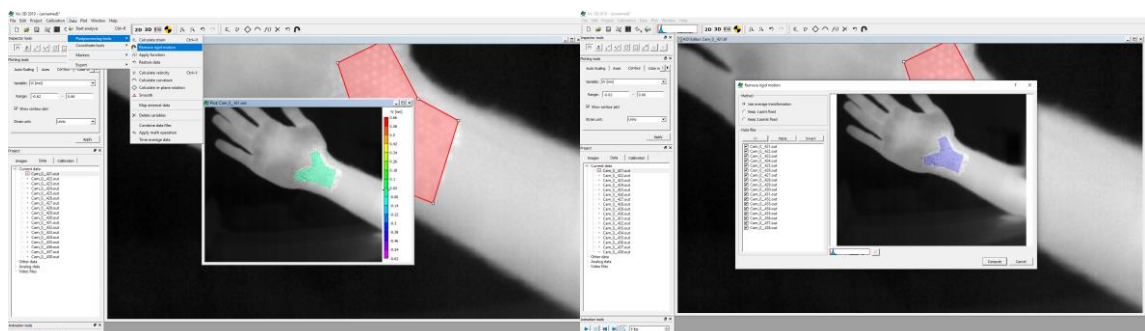


Figura 60. Restricción movimiento solido rígido

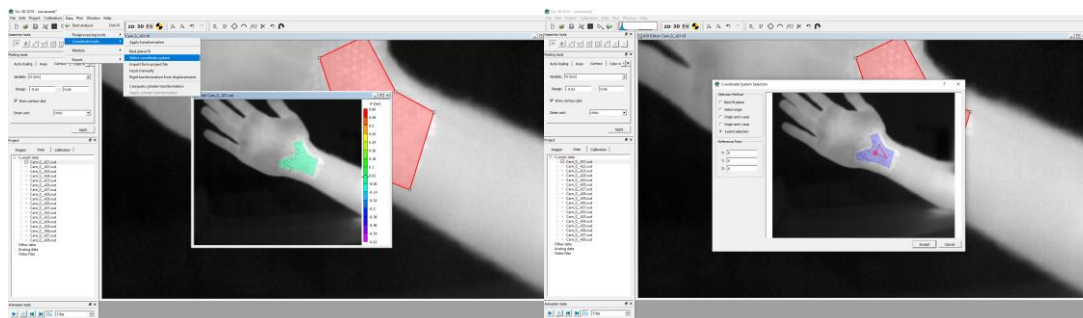


Figura 61. Ajuste de escala y Cambio de ejes coordenadas

6.6. Resolución de las cámaras

Para poder valorar los resultados que se obtienen en los ensayos, comprobar los milímetro/píxel de las imágenes obtenidas nos dará una relación entre las cámaras térmicas y de luz visible.

Por lo que desde las imágenes obtenidas, y procesadas con VIC 3D y Matlab, se obtendrán las variables x y X que son los píxeles y los milímetros reales respectivamente, con este dato se valorará si el montaje y la relación entre las cámaras son aceptables.

	$x(\text{píxeles})$	$X(\text{mm})$	$X/x(\text{mm/píxel})$
Ensayo tracción Cámaras térmica	45	10	0,222
Ensayo tracción Cámaras luz visible	192	10	0,0520
Ensayo pandeo Cámaras térmica	110	25	0,227
Ensayo pandeo Cámaras luz visible	479	25	0,0521

Tabla 2. Relación X/x para análisis de resolución

Por lo tanto las cámaras térmicas tienen una resolución 4 veces peor que las de luz visible, y esto se debe tener en cuenta a la hora de analizar los resultados de los siguientes ensayos.

7. Resultados

Una vez adoptada una metodología, mencionada en el punto anterior, se expondrán los resultados obtenidos en los ensayos realizados, para ello se estructuraran de diferente manera tanto los de tracción, pandeo y biomecánicos, ya que en cada uno es más representativo un tipo de estudio.

Se analizarán cuatro ensayos diferentes para tracción y pandeo, se analizan está cantidad para poder valorar de forma correcta los resultados, dentro de estos resultados no se reflejan la totalidad de los ensayos, ya sea por no tener las condiciones de contorno óptimas o por propio fallo humano.

En tracción y pandeo será interesante el estudio de la diferencia entre las técnicas utilizadas, y entre otras cosas la desviación típica, ya que podrá aportar si la media aritmética de los datos puede ser concluyente o no, por poner un ejemplo, en pandeo, al tener diferentes desplazamientos fuera del plano en diferentes alturas de la probeta, la desviación típica estaría disparada y nos daría una media absurda.

Sin embargo, para los ensayos biomecánicos, al ya tener validado el método, se hará de forma menos comparativa y más ilustrativa conforme a los resultados obtenidos.

7.1. Ensayo de tracción

Para la obtención de los resultados de tracción el estudio se realiza de forma diferente a la de pandeo como dije anteriormente, esto es porque la tracción de la probeta debe ser homogénea en toda su sección, siendo la sección de estudio simétrica, sin anomalías y siempre realizando el estudio en la zona elástica.

Es por ello que los resultados obtenidos provienen del análisis mediante DIC de espectro visible, DIC térmico, y galgas extensiométricas, de modo que se podrá comparar entre ellas.

De los resultados tanto de las cámaras de luz visible y térmicas se han podido obtener los mapas de deformaciones tanto en “x” como en “y”, con ello se compararan los DIC,

como se mencionó, al ser homogénea, la media de la zona de estudio puede resultar interesante de analizar, es por ello que mediante unas gráficas se puede apreciar de mejor manera el desarrollo de las deformaciones, y como teóricamente deben parecerse a las de la zona elástica.

Mapa de deformaciones

Por lo tanto, lo primero que se mostrará serán los mapas de deformación, donde se ve de forma más visual todo lo que vendrá después, en estas figuras se puede ver como algunas de ellas siguen mismos patrones y otras sin embargo pueden estar más distorsionadas.

Primer ensayo

En este primer ensayo, los patrones en el desarrollo de las imágenes, son bastante parecidos, eso sí, se tendrá que tener en cuenta la resolución de cada una, es por ello que las zonas están más detalladas en las de luz visible que las térmicas.

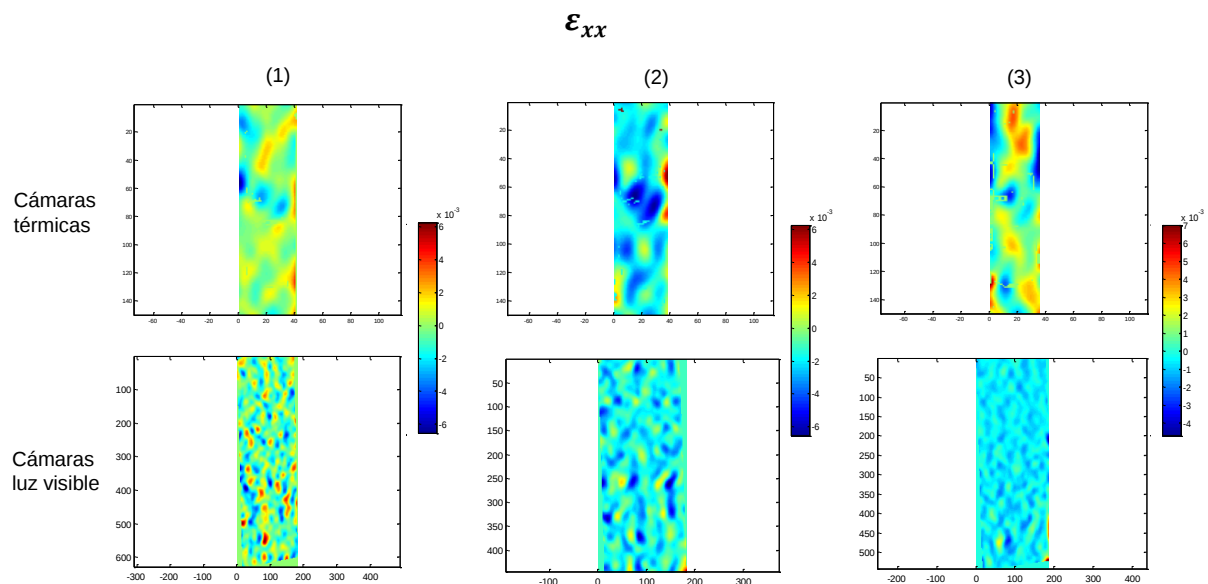


Figura 62. Mapa de deformaciones en “x” del primer ensayo

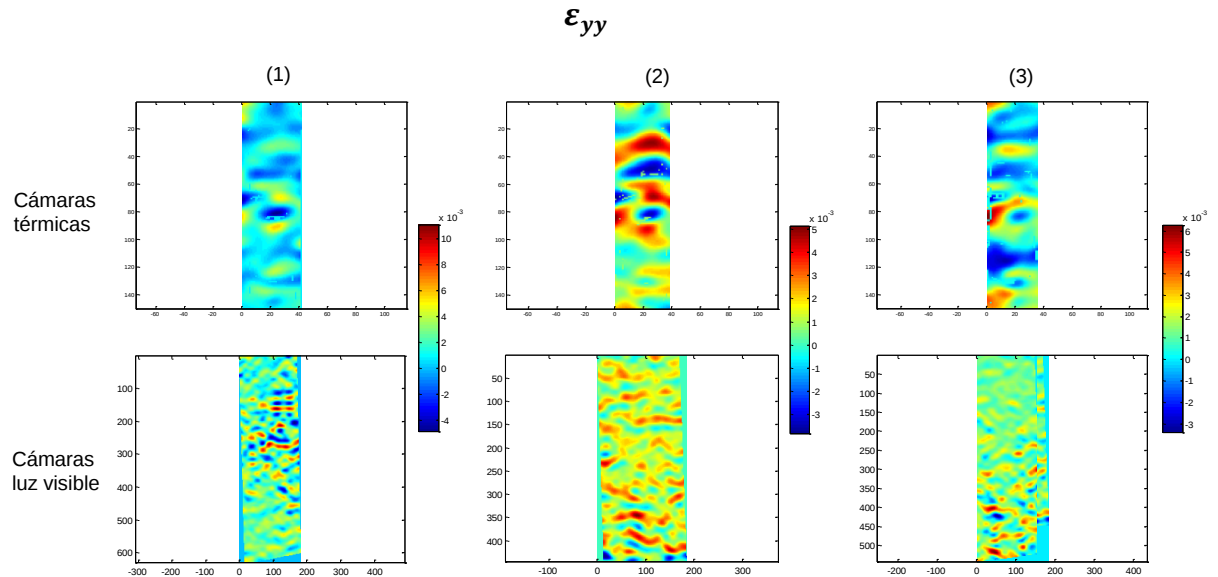


Figura 63. Mapa de deformaciones en “y” del primer ensayo

Segundo ensayo

Para este segundo ensayo es fácil darse cuenta de que aunque en la primera imagen se siguen patrones parecidos, con el transcurso del ensayo se pierden.

Se puede observar de la misma manera como en la tercera imagen de las cámaras térmicas hay una pequeña franja vertical, esto puede darse por la mala aplicación del speckle térmico, o simplemente por la distorsión de este speckle con el transcurso del ensayo.

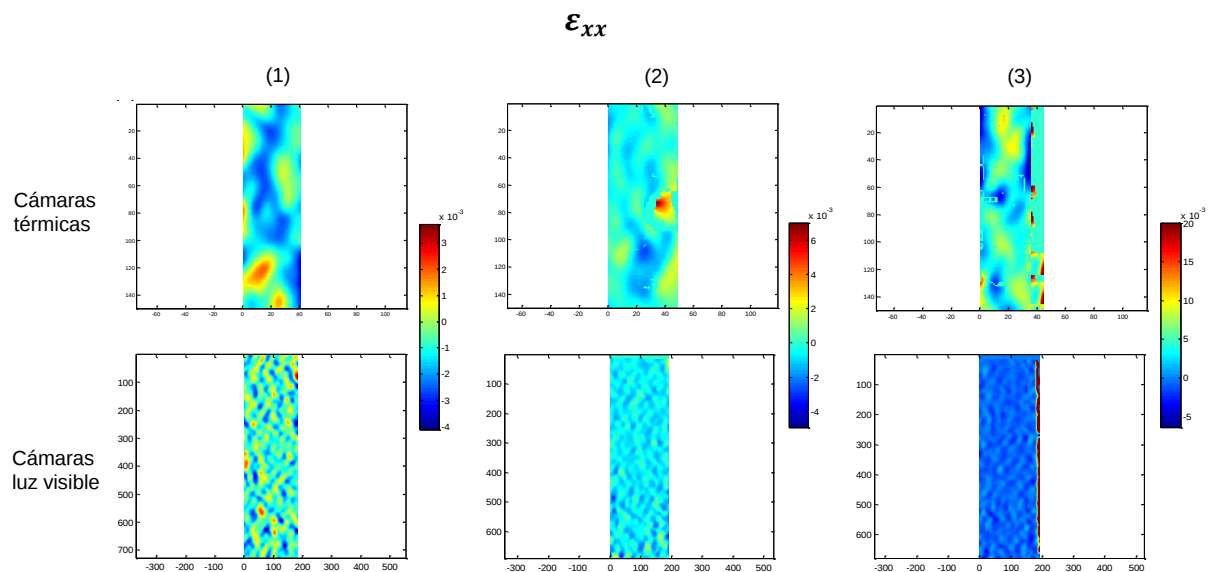


Figura 64. Mapa de deformaciones en “x” del segundo ensayo

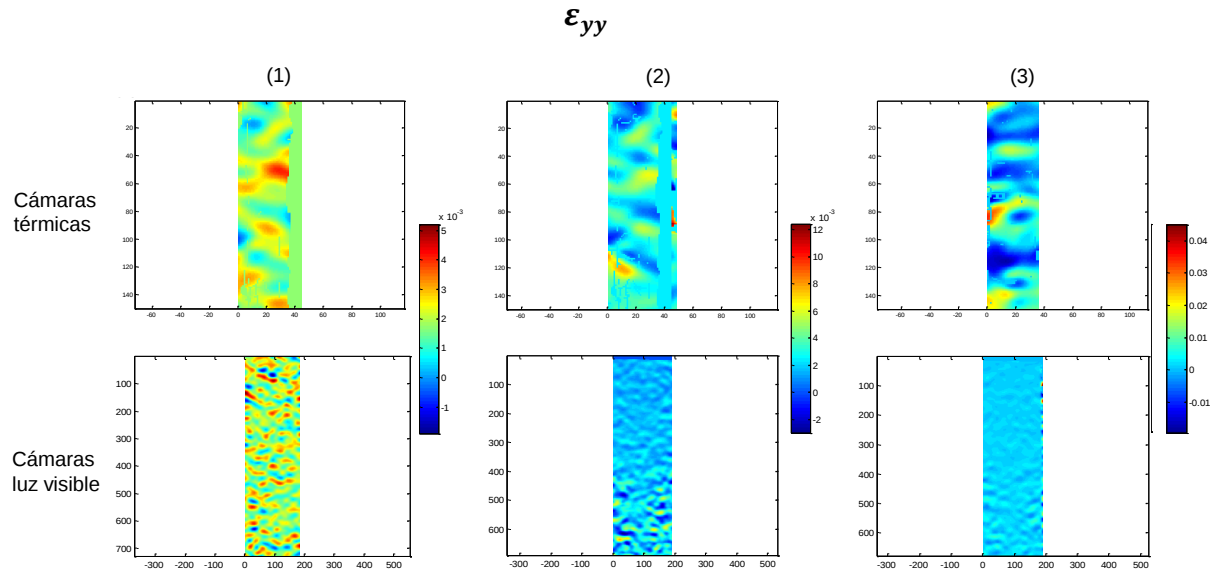


Figura 65. Mapa de deformaciones en “y” del segundo ensayo

Siendo comparados con el primer ensayo, los mapas analizados con DIC de espectro visible, tienen mucha similitud y aunque de forma menos obvia, los analizados con DIC térmico, también se pueden destacar parecidos razonables.

Tercer ensayo

Mientras que en los dos ensayos anteriores se han visto solo una pequeña franja, en este ensayo, esa franja esta repetida a lo largo de todo el ensayo, esto quiere decir y puede darnos la información sobre una zona la cual o coincidió que no tuviese clavo para marcarla o un mal procesado de las imágenes, aún con estas franjas, que como es obvio no se tienen en cuenta a la hora de realizar la media, se pueden apreciar parecidos con los anteriores ensayos.

Mencionar que las franjas son eliminadas mediante Matlab, ya que todos los mapas fueron obtenidos como se mencionó en el procesado, mediante Matlab, es por ello que no se le debe de dar más importancia en cuanto a la media que se verá más adelante.

También es motivo de discusión como con el avance del ensayo pueda parecer que los resultados entre ensayos se diferencian más, y en esto pueden entrar a juego muchos factores, y muchos de ellos externos, como la propia temperatura del laboratorio, o la luz del propio laboratorio.

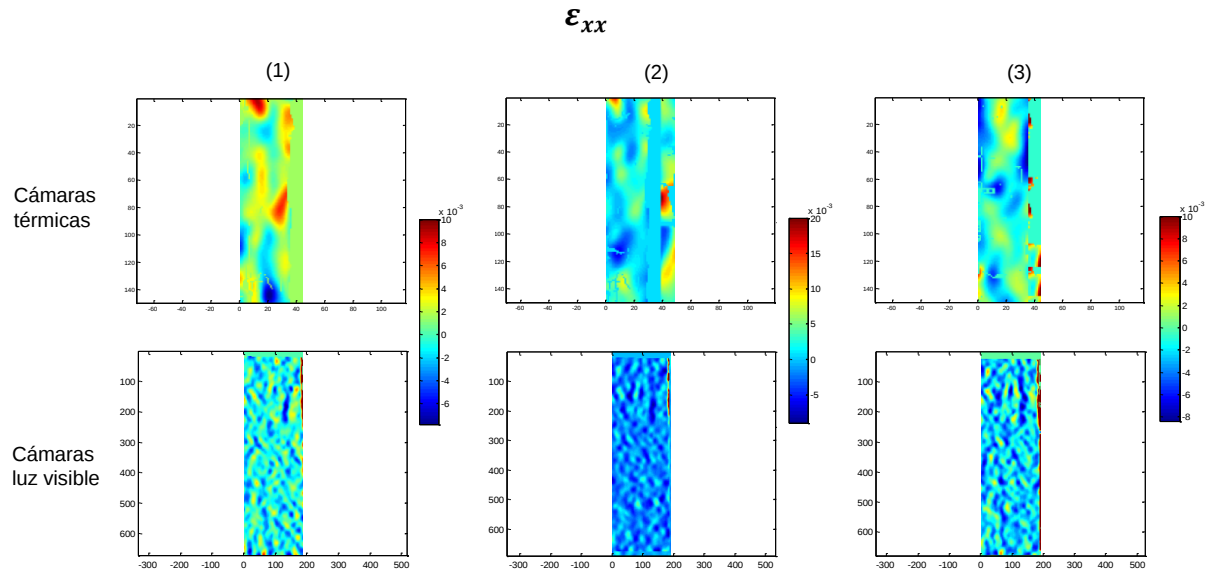


Figura 66. Mapa de deformaciones en “x” del tercer ensayo

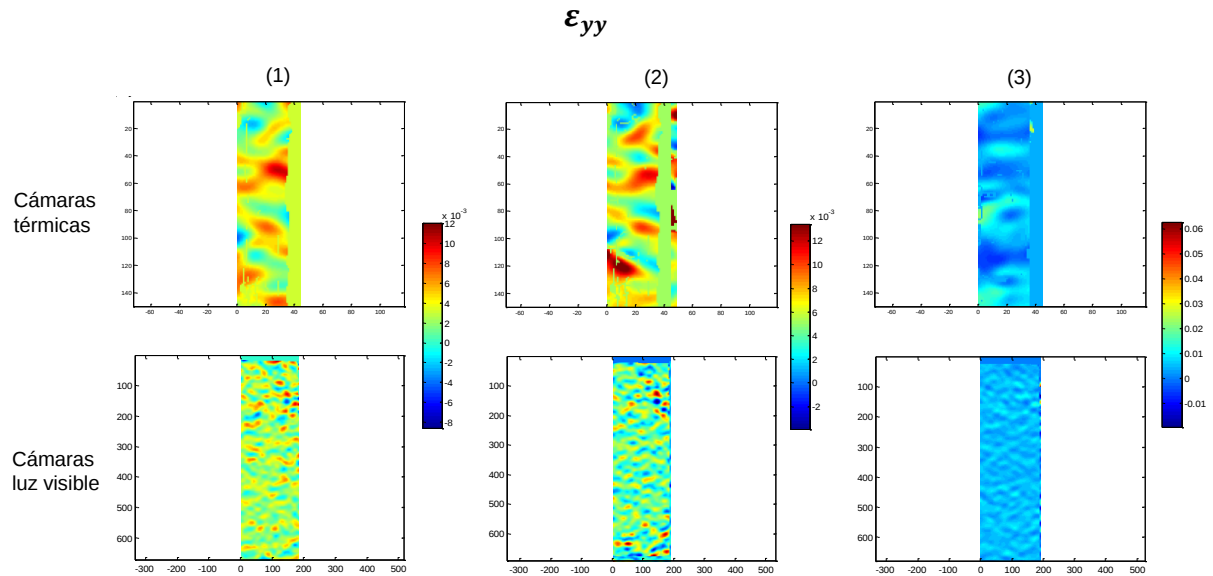


Figura 67. Mapa de deformaciones en “y” del tercer ensayo

Cuarto ensayo

Este ensayo como se puede ver, es el más diferente si se compara con los demás, pero nos sirve para discutir algunos factores, por ejemplo, es fácil apreciar manchas homogéneas como las franjas antes mencionadas, estas manchas pueden surgir por la falta de contacto de algún clavo sobre la probeta y es por ello que esa zona se encuentre sin datos.

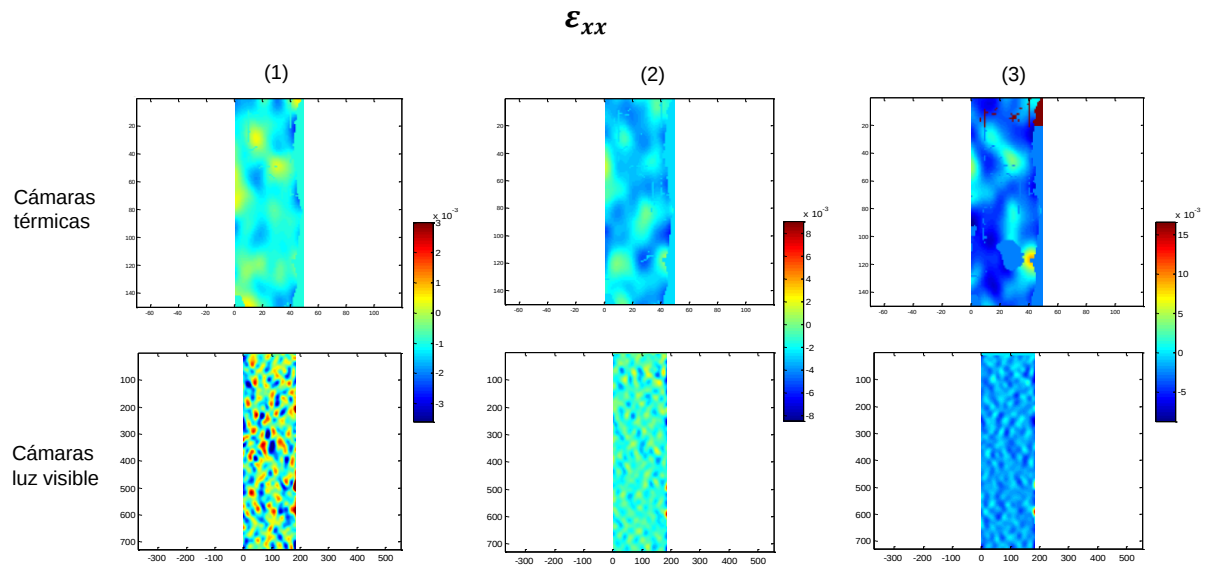


Figura 68. Mapa de deformaciones en “x” del cuarto ensayo

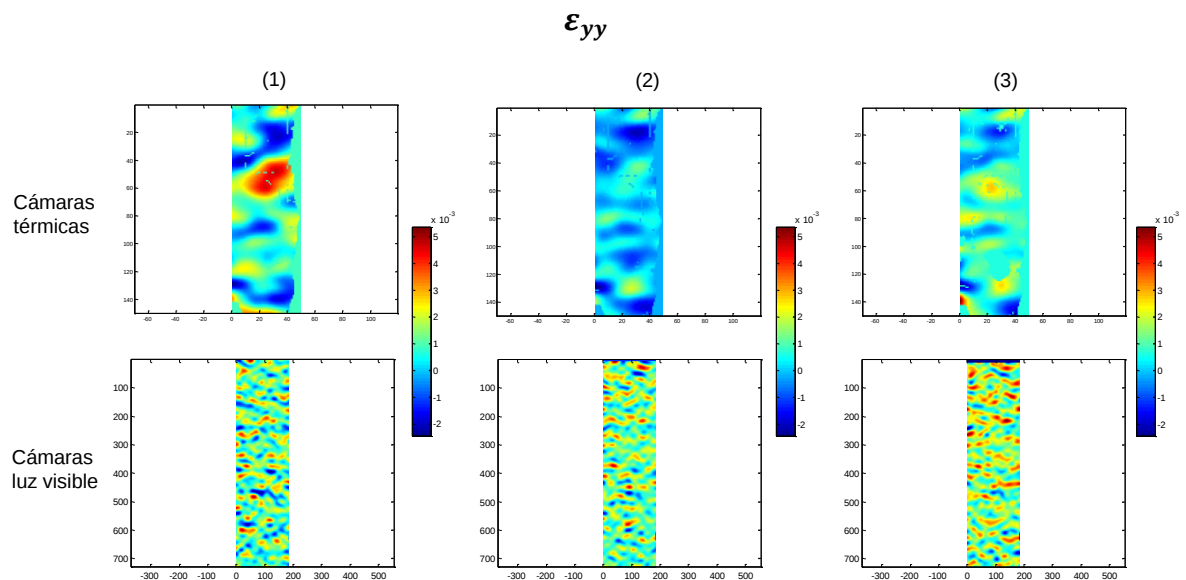


Figura 69. Mapa de deformaciones en “y” del cuarto ensayo

Sin embargo si se observan todos los ensayos, los resultados obtenidos con DIC de espectro visible son bastante homogéneos y parecidos, y en cuanto a los de DIC térmico, los tres primeros ensayos nos muestran gran parecido, en este último como se verá más detalladamente, los valores están más disparados.

Resultados medios de deformación en el conjunto de la probeta

Una vez vistos los mapas de deformaciones de forma más visual, ahora se analizarán de forma más numérica, para ello mediante Matlab se realizó un código para obtener tanto los valores medios de la zona de interés como la desviación típica y la diferencia en porcentaje entre DIC de espectro visible y DIC térmico.

Nº Ensayo	Imagen	ϵ_{xx}			ϵ_{yy}		
		Luz visible	Térmicas	Galga transversal	Luz visible	Térmicas	Galga longitudinal
Ensayo 1	1	-0,00140	-0,00142	-0,00124	0,00250	0,00270	0,00179
	2	-0,00120	-0,00158	-0,00133	0,00130	0,00250	0,00178
	3	-0,00326	-0,00315	-0,00290	0,00520	0,00870	0,00490
Ensayo 2	1	-0,00063	-0,00059	-0,00063	0,00222	0,00302	0,00235
	2	-0,00191	-0,00275	-0,00193	0,00513	0,00696	0,00556
	3	-0,00279	-0,00356	-0,00353	0,00673	0,00816	0,00719
Ensayo 3	1	-0,00180	-0,00141	-0,00124	0,00230	0,00170	0,00184
	2	-0,00230	-0,00214	-0,00256	0,00410	0,00377	0,00358
	3	-0,00280	-0,00271	-0,00290	0,00540	0,00457	0,00490
Ensayo 4	1	-0,00160	-0,00154	-0,00124	0,00210	0,00200	0,00215
	2	-0,00380	-0,00360	-0,00256	0,00820	0,00870	0,00851
	3	-0,00670	-0,00647	-0,00546	0,01660	0,01700	0,01710

Tabla 3. Deformación media tomados por diferentes métodos

Como ya se había visto en el mapa de deformaciones, el ensayo cuatro es el que destaca más en cuanto a diferencias, pero si se observan, los tres primeros ensayos tienen unos valores muy próximos, mencionar que se está hablando de micras, por lo que la precisión de estos ensayos es clave.

Mencionar que aunque el ensayo cuatro acabe con unos valores tan disparados, se puede ver como en las dos primeras tomas, estas diferencias, son más bien mínimas.

La Tabla 4 facilitará la diferencia entre los dos DIC, que al ser números tan pequeños las diferencias en porcentaje son más abrumadoras, pero aún con esto se puede ver que muchas de ellas siguen una diferencia menor del 10%, otras sin embargo se puede apreciar

como entre los dos hay mayores diferencias pero que menos en el primer ensayo, estas diferencias con el paso de las tomas, tienden a normalizarse y que la diferencia sea menor.

Nº Ensayo	Imagen	Desviación típica		% Diferencia DIC térmico	Desviación típica		% Diferencia DIC térmico
		Cámaras térmicas	Cámaras luz visible		Cámaras térmicas	Cámaras luz visible	
		ϵ_{xx}			ϵ_{yy}		
Ensayo 1	1	0,00011	0,00098	1,4285	0,00189	0,0022	-8
	2	0,00017	0,00071	31,6666	0,00152	0,0034	-92,3076
	3	0,00092	0,00112	-77,6289	0,00182	0,0027	-21,4285
Ensayo 2	1	0,00110	0,00045	-7,0121	0,00422	0,0025	-126,5485
	2	0,00036	0,00014	68,5386	0,00123	0,0070	-106,149
	3	0,00097	0,00054	-7,3942	0,00348	0,0018	25
Ensayo 3	1	0,00011	0,00012	-21,6666	0,00201	0,0018	26,0569
	2	0,00019	0,00015	-6,9565	0,00390	0,0019	8,0487
	3	0,00018	0,00015	-3,2142	0,00742	0,0023	15,3703
Ensayo 4	1	0,00011	0,00045	-3,75	0,00300	0,0026	4,7619
	2	0,00083	0,00014	-6,3636	0,00160	0,0070	-9,836
	3	0,00012	0,00053	-1,0344	0,00422	0,0018	1,1904

Tabla 4. Desviación típica y diferencia entre DIC

Gráficas del desarrollo medio de la deformación:

Ya se vio de forma visual y de forma numérica, pero otra forma de analizar estos resultado, es juntando las dos formas, analizarlo de forma visual y teniendo en cuenta la diferencia numérica entre los ensayos, para ello ahora se ven en gráficas.

Aunque ya se vio antes el signo negativo en la deformación en “x”, es más visual en las gráficas que se muestran a continuación, este signo menos significa que al traccionar como es obvio la probeta intentara producir una elongación, es por ello que la lo poco que se alargue la probeta tendrá que requerir de material, este material lo gana longitudinalmente pero lo perderá transversalmente.

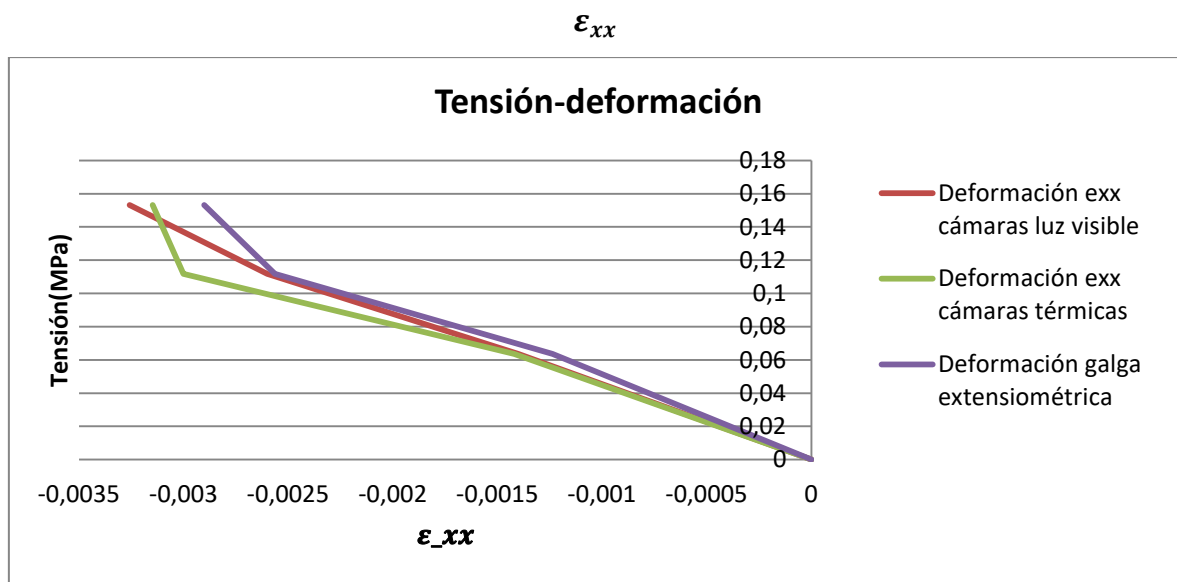
La tensión a la que están sometidas vendrá marcada por la propia máquina de ensayo universal, por lo que se puede considerar constante y por ello nos servirá para comparar los ensayos entre sí.

Primer ensayo

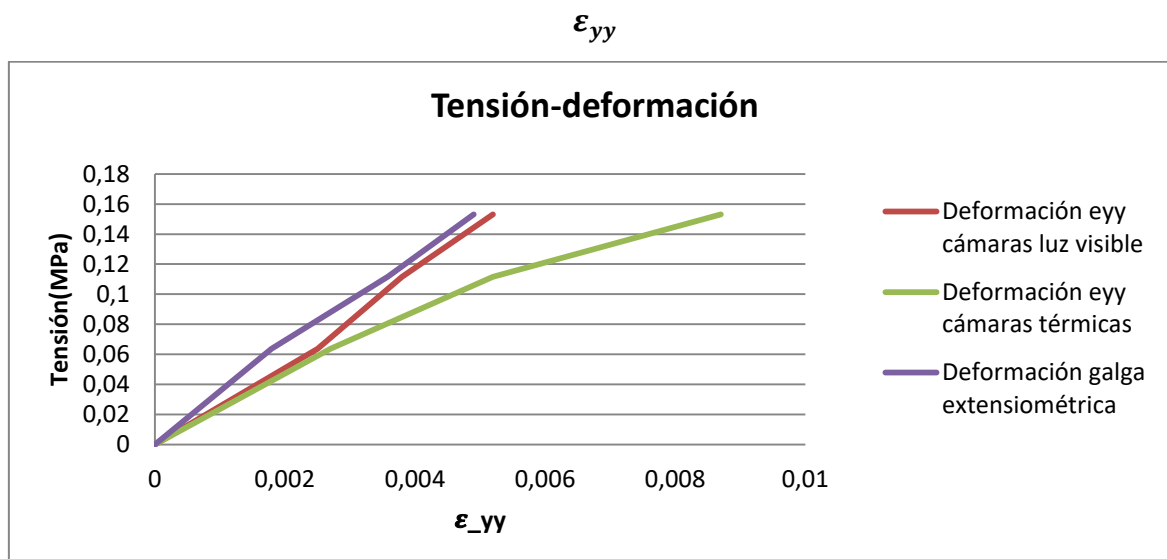
Con esta metodología, las diferencias observadas tanto en los mapas de deformaciones como con la media exacta, se ven de una forma más clara, ya que se aprecia la tendencia de estas, se puede ver durante las dos primeras imágenes la deformación obtenida tiene menos pendiente y todas siguen casi la misma función

Sin embargo en la última de las imágenes, los resultados son más dispares entre las metodologías, principalmente ocurre en la deformación en “x”, ya que al ser deformaciones más pequeñas, son más perceptibles a cualquier cambio de tendencia.

También discutir como la deformación en “y” apreciada por las cámaras térmicas sigue una tendencia diferentes, y a pesar de la diferencia con las demás, la sigue una función que aparenta no salirse mucho de algo lineal, por lo que puede estar ocurriendo otro tipo de fallas, como puede ser una tardía captura de la imagen lo que hizo que se capturase una imagen con una deformación más avanzada.



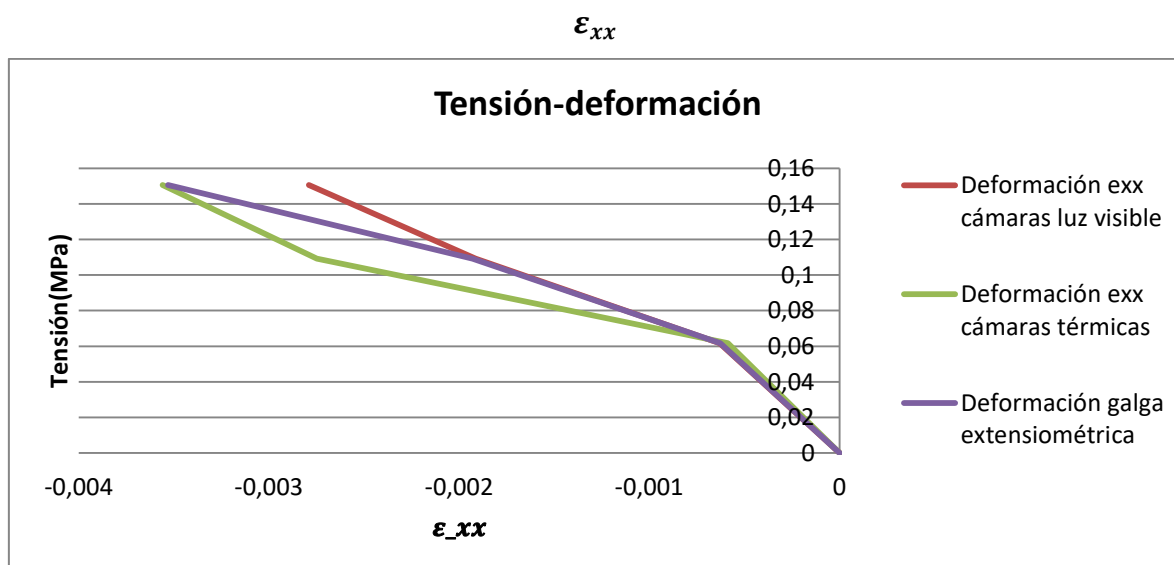
Gráfica 1. Deformación en “x” mediante diferentes técnicas



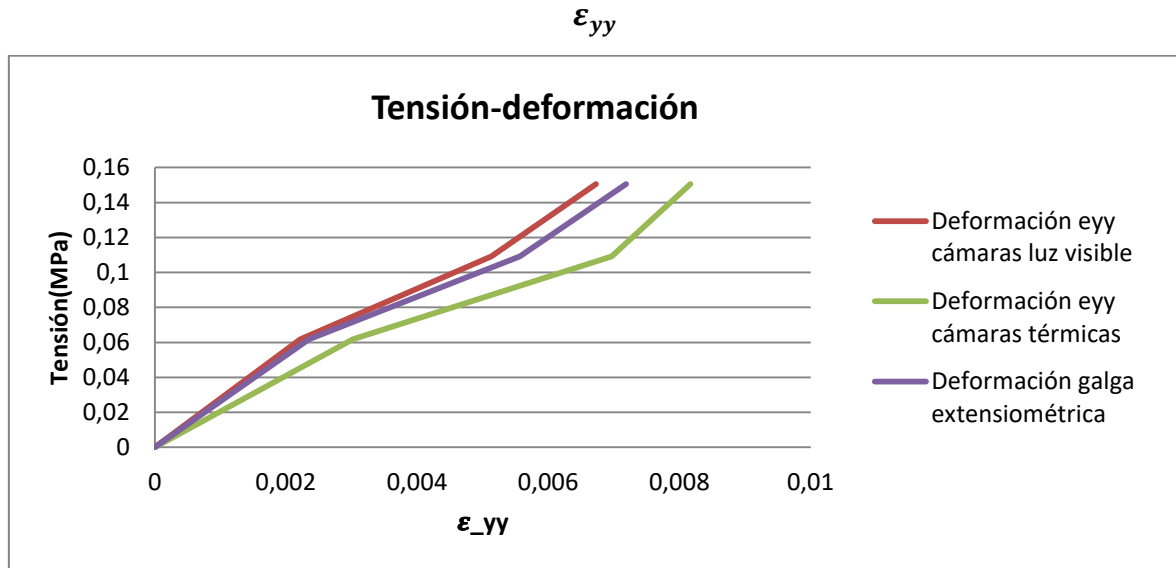
Gráfica 2. Deformación en “y” mediante diferentes técnicas

Segundo ensayo

De la misma forma que en el primer ensayo, la tendencia en la deformación en “x” presenta mayores distorsiones, y como bien se mencionó antes, puede darse por la precisión de estas, que al no tener la resolución adecuada para deformaciones tan pequeñas menos preciso, hay que fijarse que al contrario que el eje “x”, la deformación en “y” todas las técnicas siguen la misma tendencia, es decir incluso en el cambio de imagen siguen el mismo cambio de pendiente, esto nos avisa de una buena realización del ensayo, es también notable, que la deformación en “y” captada por las cámaras térmicas vuelve a ser mayor, al igual que el ensayo primero.



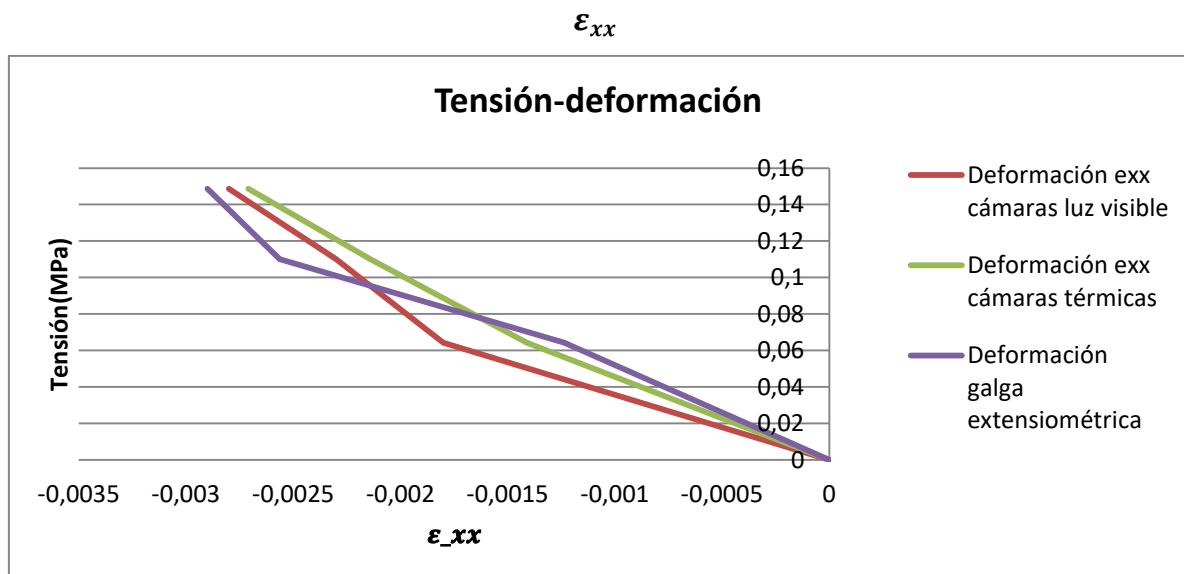
Gráfica 3. Deformación en “x” mediante diferentes técnicas



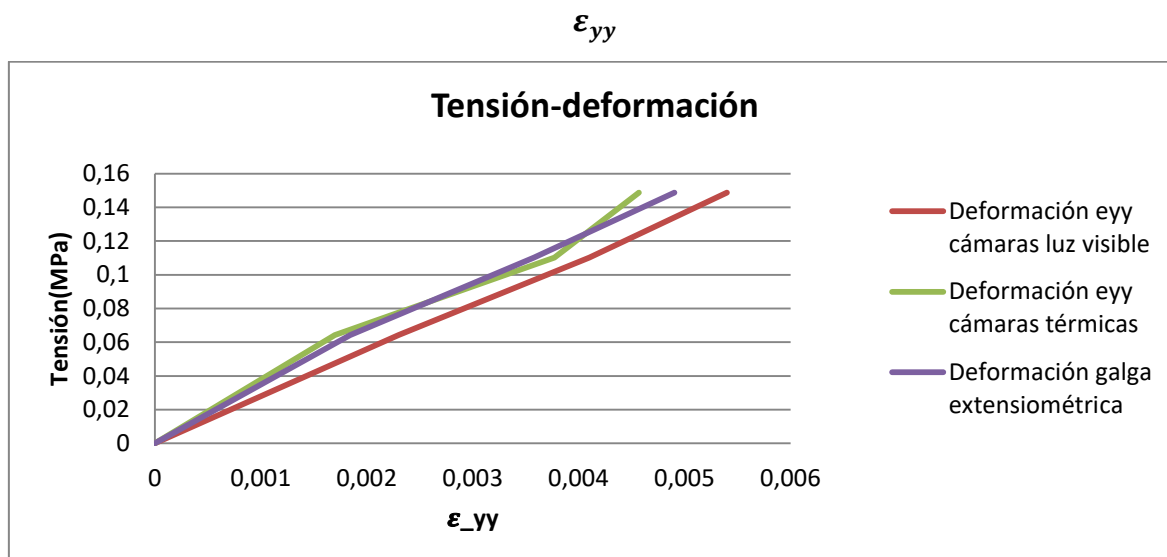
Gráfica 4. Deformación en “y” mediante diferentes técnicas

Tercer ensayo

En este ensayo, se puede denotar como la deformación en “x”, sigue con la misma dinámica, de tener los cambios de pendiente más bruscos, sin embargo la deformación en “y”, sigue prácticamente una función lineal, esto es un indicativo muy bueno ya que nos asegura una buena realización del ensayo, eso sí, hay que discutir que las cámaras térmicas captaron de forma diferente, ya que como se aprecia, aunque este algo escondida, de la imagen de referencia a la primera y de la segunda a la tercera la pendiente que sigue es muy semejante, mientras que entre la primera y la segunda está pendiente es menor.



Gráfica 5. Deformación en “x” mediante diferentes técnicas

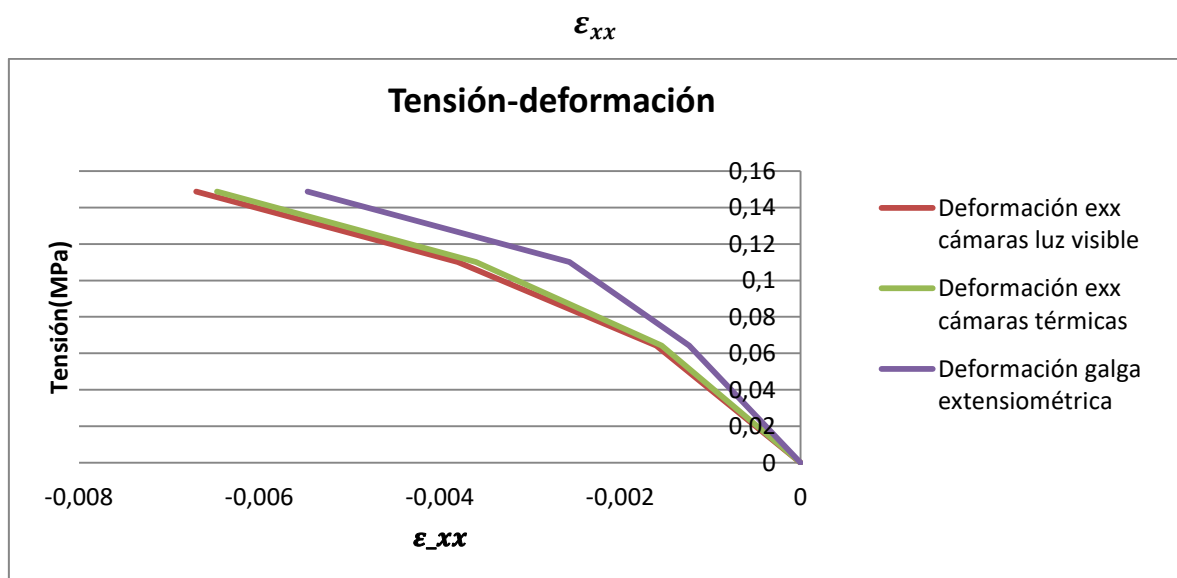


Gráfica 6. Deformación en “y” mediante diferentes técnicas

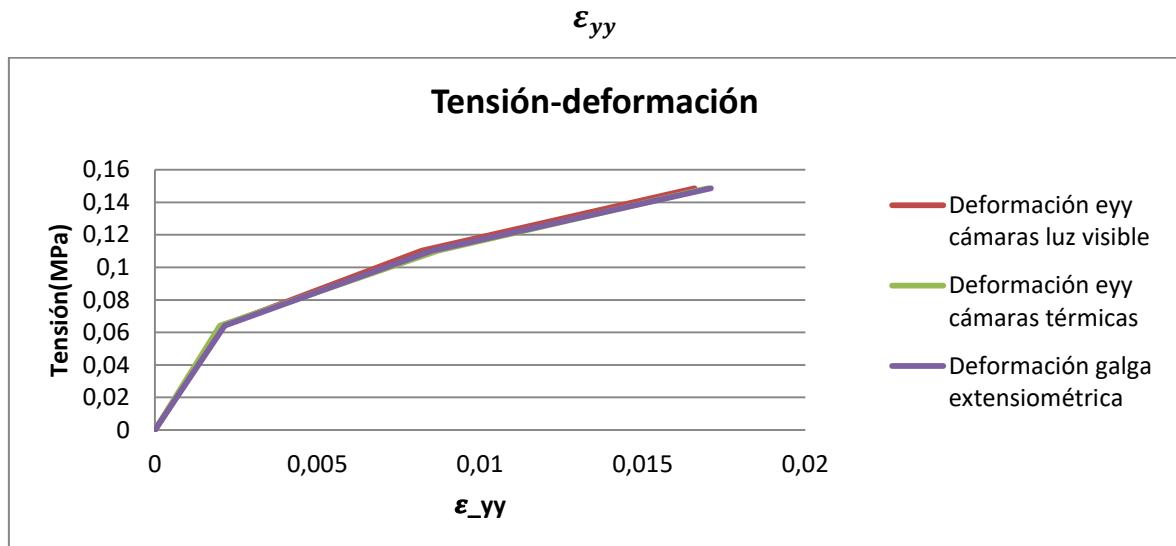
Cuarto ensayo

En el cuarto ensayo como ya vimos, se tenían un aumento considerable de la deformación, pero que a pesar de este salto, las líneas de tendencia son prácticamente las mismas, incluso los cambios de pendiente son los mismos, y esto nos transmite seguridad de las técnicas.

Es interesante fijarnos en que la deformación obtenida por la galga extensiométrica, es algo diferente a las obtenidas mediante DIC, es por ello que puede ser que la galga transversal estuviese algo afectada durante la realización del ensayo.



Gráfica 7. Deformación en “x” mediante diferentes técnicas



Gráfica 8. Deformación en “y” mediante diferentes técnicas

Los resultados obtenidos, son en gran parte los esperados, ya que a pesar de la diferencia de resolución, la precisión de los métodos elegidos, han sido bastantes correctos, es por ello que se puede llegar a deducir que la metodología seguida fue la idónea.

7.2. Ensayo de pandeo

El estudio del ensayo de pandeo se realizara de forma semejante al de tracción, en el tracción como ya se dijo, se hace una media de la sección estudiada de la probeta, sin embargo, en pandeo esto no tendría mucho sentido, ya que en cada altura de la probeta tendrá un desplazamiento en el eje “z” diferente por el efecto del propio pandeo, es por ello que lo que se analizará serán tres diferentes franjas, llamándolas línea superior, línea media y línea inferior, estas líneas se pueden ver en los mapas de desplazamiento que se mostraran a continuación.

Cabe destacar que ya no se tienen incorporadas galgas extensiométricas, ya que habría que colocarlas en el grosor de la probeta para poder medir el pandeo generado, y es físicamente imposible al menos en este tipo de probetas por su escaso grosor.

El grosor de la probeta es acorde a la máquina de ensayo universal es por esto que no se pueden diseñar probetas muy gruesas y aplicarles pandeo, además de que cuanto más gruesa la probeta menos facilidad de pandeo y sería más bien un ensayo de compresión.

Una vez vistos los mapas de desplazamientos en el eje “z”, se mostrara al igual que en tracción de forma numérica tanto la media de las correspondientes líneas como la diferencia entre DIC y los valores de desviación típica asociados, la media se utiliza conforme a la línea estudiada, ya que comente que la media global no era útil, sin embargo en una línea horizontal, es decir la misma altura de la probeta, el pandeo es el mismo.

Mapa de desplazamientos en “z”

Los mapas de color de los desplazamientos en “z”, será la mejor forma visual de ver la comparativa entre métodos y entre ensayos, para estos mapas se utilizó Matlab y para poder comparar de mejor forma, se ajustaron para que las escalas de colores fueran las mismas, de este modo se van a poder observar zonas muy oscuras o claras, y esto ocurre porque son zonas que tienen unos valores disparados en comparación con los demás, y esto puede producirnos un error de lectura de estos mapas, es por ello que a continuación discutiré todas las posibilidades detrás de estas manchas.

Las líneas con trazado discontinuo marcan las líneas de estudio, tanto la superior, media e inferior, y como se mencionó con anterioridad, están colocadas horizontalmente para poder encontrar una media útil, ya que el pandeo variara según la altura de la probeta en la que se realice el estudio

Primer ensayo

Se puede observar como de la misma forma que en tracción los mapas observados por las cámaras de espectro visible son más homogéneos que las vistas desde las cámaras térmicas, esto surge por el mismo motivo que anteriormente, tanto la diferencia de resolución de las cámaras como otro factor dentro de estos ensayos es la perdida de imágenes nítidas en el transcurso del ensayo.

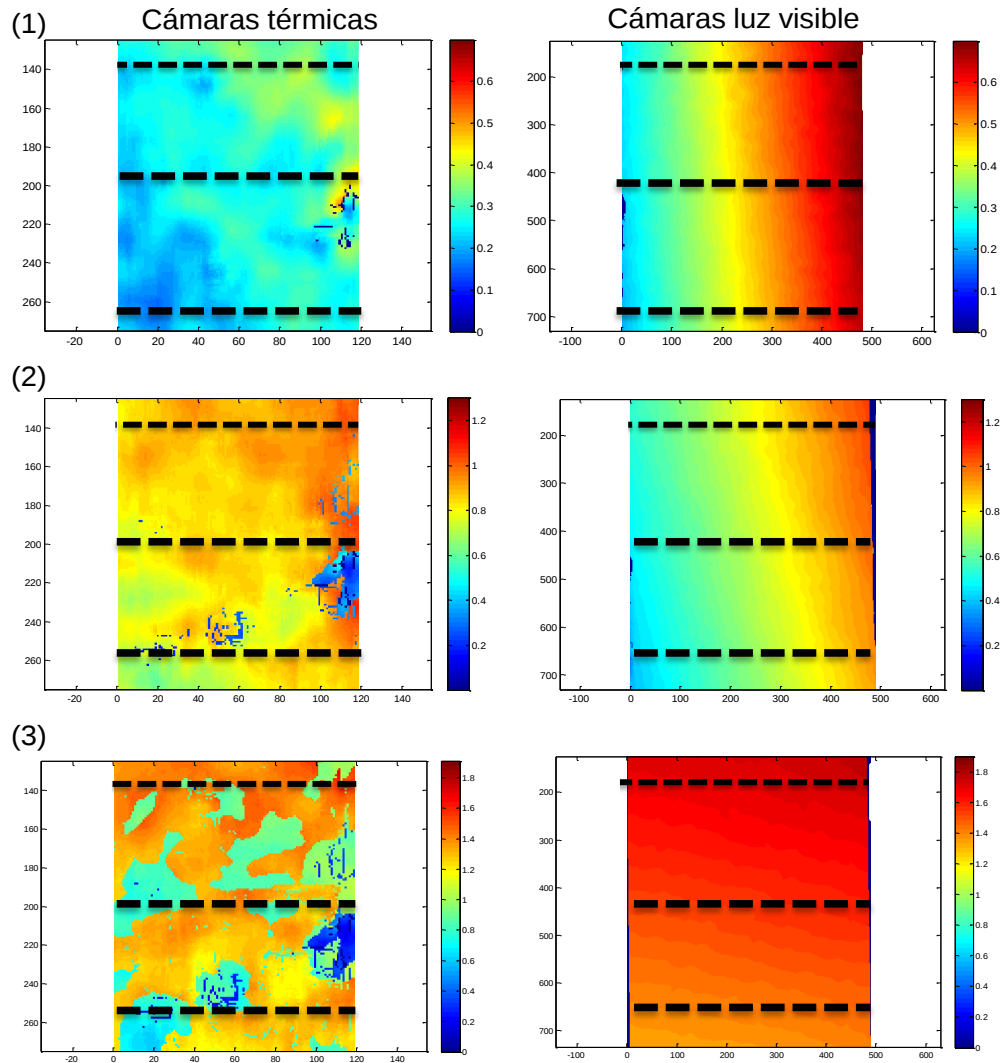


Figura 70. Mapa de desplazamiento fuera del plano con escala de colores

Esa pérdida de calidad de las imágenes es fácil darse cuenta que es porque al pandear, la probeta sale de la zona donde fueron ajustadas las lentes de las cámaras, por lo tanto, la probeta se aleja de las cámaras térmicas y se acerca a las de espectro visible, es por ello que las de espectro visible no dejan ver esas manchas.

Segundo ensayo

En este ensayo a primera vista se pueden ver bastantes semejanzas respecto al primer ensayo pero realizando un análisis más exhaustivo.

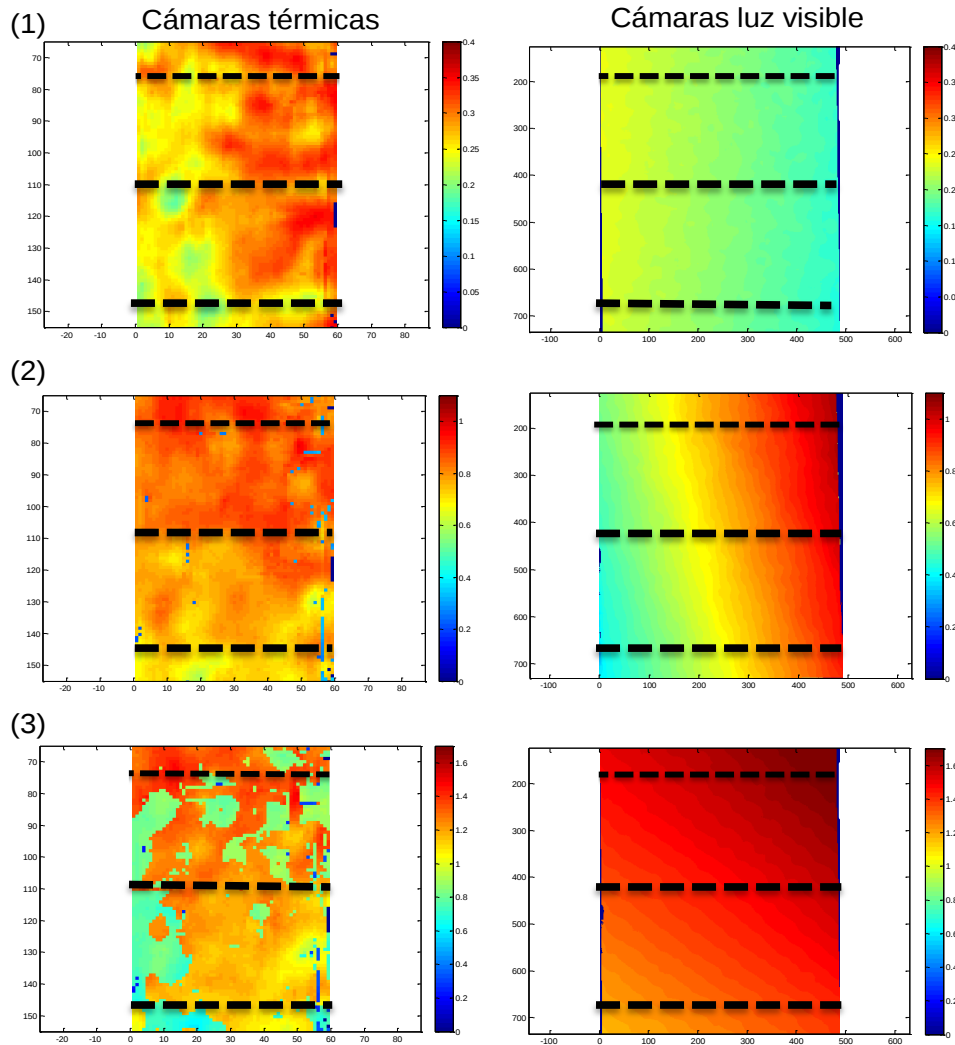


Figura 71. Mapa de desplazamiento fuera del plano con escala de colores

Se puede ver como las cámaras de luz visible en los dos ensayos, y seguramente en los siguientes también siguen un mismo patrón de desplazamiento en cuanto a mapa de color nos referimos.

Sin embargo, las cámaras térmicas con su análisis mediante DIC térmico, obtienen mapas algo más diferentes en la primera imagen, pero conforme transcurre el ensayo estos mapas se van pareciendo más entre ellos, y también pareciéndose con la metodología de análisis de DIC con espectro visible, en la que en la última imagen, siendo la misma escala de color, no se quedan lejos.

Mencionar como se pueden seguir viendo las manchas en la última imagen, ya que el pandeo de la probeta es el máximo de las tres, por lo que como se dijo, puede salirse fuera del plano de calibración.

Tercer ensayo

En este ensayo, la diferencia entre las dos técnicas, puede ser ligeramente menor que los demás ensayos tanto en la primera como la tercera imagen, en la segunda sin embargo tiene solo una zona común.

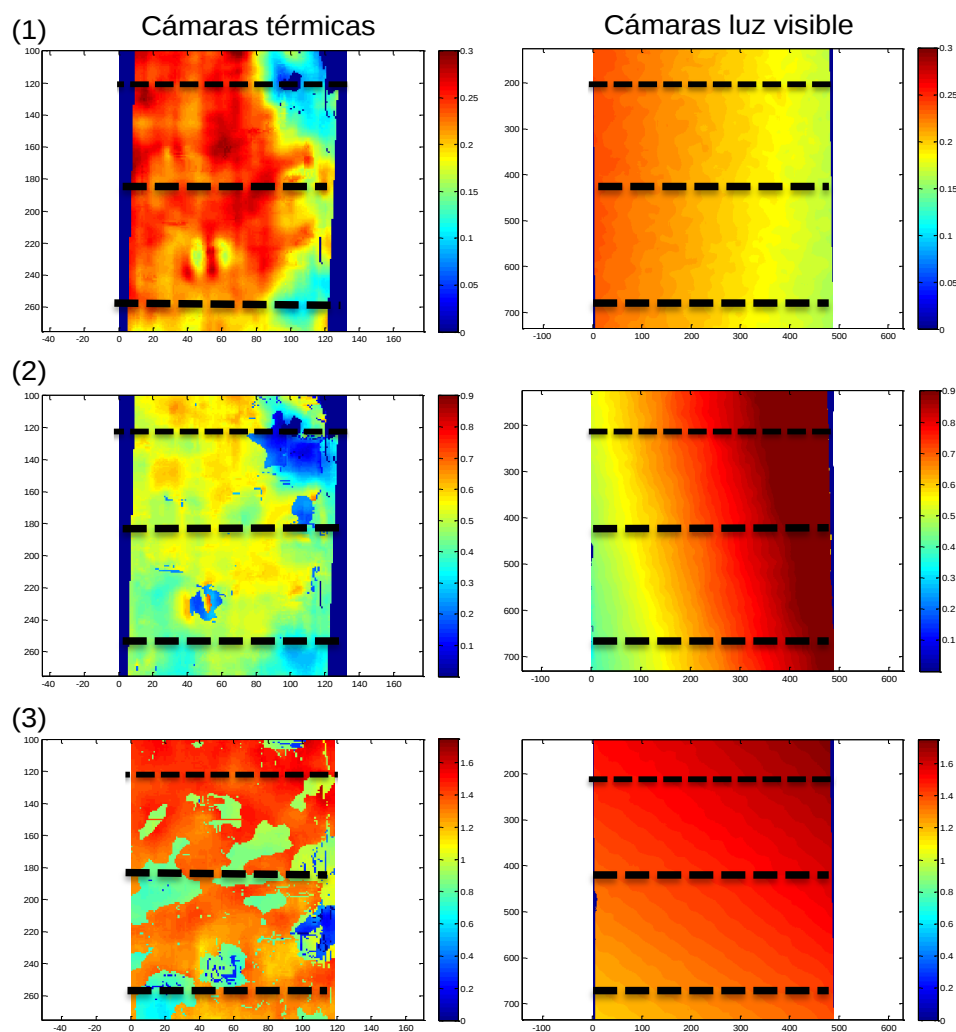


Figura 72. Mapa de desplazamiento fuera del plano con escala de colores

Es objeto de discusión, como aunque se encuentren diferencias en las primeras imágenes, en la última toma de ellas, acaban siguiendo el mismo pandeo, es también importante fijarnos en como las franjas que se desarrollan en todos los ensayos varía de izquierda a derechas y en la última de arriba abajo, esto puede sugerirnos que el pandeo no sea el mismo en la misma altura de pandeo.

Esto más bien, un reflejo, ya que según la cámara de observación, una zona de la probeta estará más lejana que la otra, al alejarnos del plano de calibración esta puede verse afectado, aunque al estar hablando de milímetros no debería ser significativo.

Cuarto ensayo

De la misma forma que los anteriores ensayos, se mantiene el mismo patrón para el DIC de espectro visible, lo que sí se puede ver claramente, como la distancia entre DIC térmico y DIC de espectro visible en este ensayo es mayor en el cómputo general del mismo.

Esta diferencia tanto en la primera como última imagen puede venir dada por muchos factores, entre las posibilidades pueden entrar tanto que no se sincronizasen correctamente las imágenes por algún tipo de impulso eléctrico externo, una mala aplicación del speckle térmico, que aunque se cuidaron todos los detalles, puede ocurrir que la temperatura de la probeta fuera diferente a la de los demás ensayos por ejemplo.

Las manchas siguen estando presentes, por lo que muy posiblemente sea correcta la idea de pensar que por salir de la zona de ajuste de las cámaras, surjan las manchas, aunque no se puede descartar que algún clavo no estuviera en contacto y o aplicase speckle térmico.

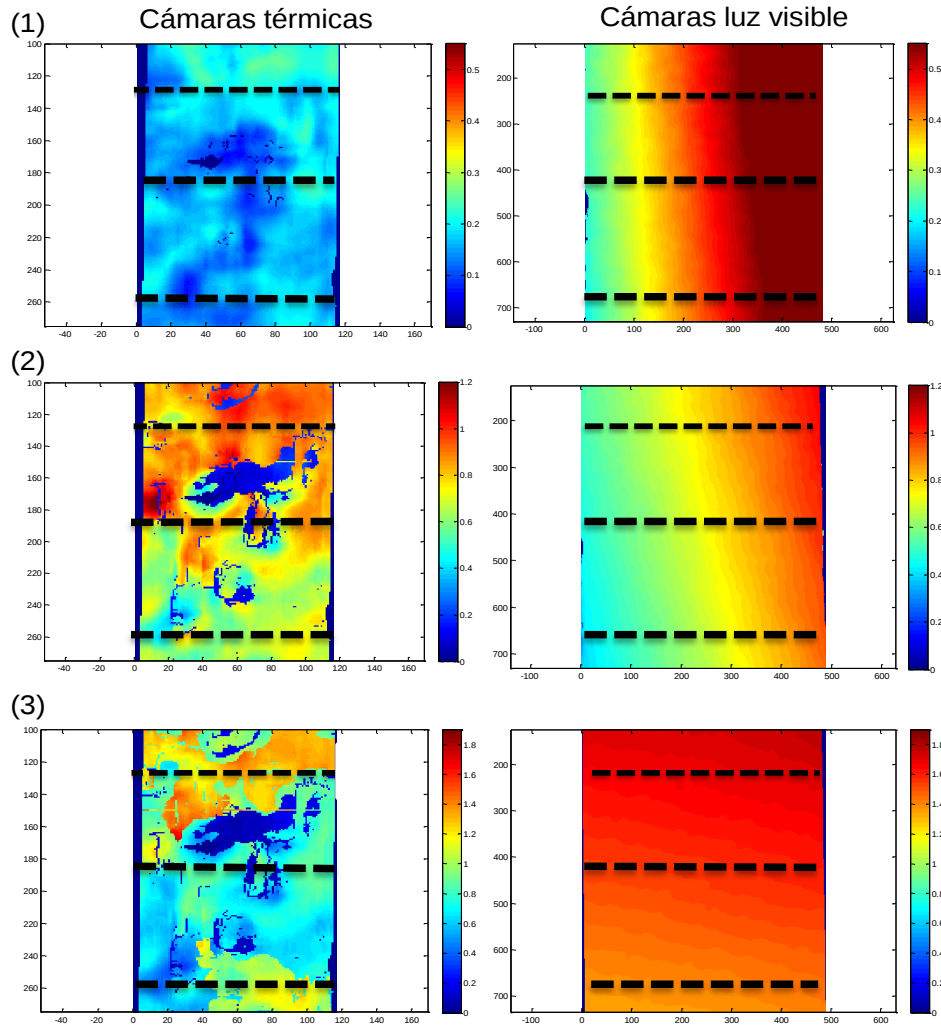


Figura 73. Mapa de desplazamiento fuera del plano con escala de colores

Por lo tanto, como se vio en todos los ensayos de tracción se tendrán muchas semejanzas y alguna que otra cosa fuera de lo común pero siempre respetando los límites, es por ello que con estos ensayos se puede dar por validado el método en dos dimensiones, y con lo que quedara a espera de la realización de los ensayos de pandeo que observara la tercera dimensión a estudiar y con la que se obtendrá la validación completa para analizar así algunos aspectos de la biomecánica.

Resultados medios de desplazamiento en las líneas de la probeta

Una vez vistos los mapas de colores del desplazamiento en “z”, se puede indagar de forma más profunda viendo así de forma numérica, de este modo se podrá comparar las diferencias entre ellos de mejor manera.

Para la obtención de estos resultados, las manchas que se pueden visualizar en los mapas, quedan fuera de las medias, al igual que en tracción las franjas homogéneas, con ello se evitará que estas puedan influir sobre los valores.

Si se observa la diferencia numérica entre las mismas imágenes pero diferentes ensayos, se podrá deducir que el pandeo producido puede tener muchas variables y que los valores pueden estar en un rango determinado, aquí es donde entra en juego el error y la resolución propia de las cámaras.

Desplazamiento medio fuera del plano, eje "z"(mm)									
Nº Ensayo	Línea superior			Línea media			Línea inferior		
	Imagen	Cámaras térmicas	Cámaras de luz visible	Imagen	Cámaras térmicas	Cámaras de luz visible	Imagen	Cámaras térmicas	Cámaras de luz visible
Ensayo 1	1	0,4673	0,3166	1	0,4673	0,3166	1	0,4673	0,3166
	2	0,7828	0,9109	2	0,7828	0,9109	2	0,7828	0,9109
	3	1,7152	1,3644	3	1,7152	1,3644	3	1,7152	1,3644
Ensayo 2	1	0,2944	0,2059	1	0,2716	0,2053	1	0,2515	0,2
	2	0,8587	0,7852	2	0,8094	0,7389	2	0,6672	0,6647
	3	1,3102	1,6093	3	1,2203	1,4949	3	1,0468	1,3115
Ensayo 3	1	0,249	0,2055	1	0,2343	0,2046	1	0,1453	0,1987
	2	0,6058	0,7859	2	0,4951	0,744	2	0,3299	0,6687
	3	1,5436	1,605	3	1,3936	1,4932	3	1,4074	1,308
Ensayo 4	1	0,2507	0,4702	1	0,1738	0,4648	1	0,1635	0,4398
	2	0,9946	0,7863	2	0,851	0,7242	2	0,657	0,6865
	3	1,4015	1,7191	3	1,1514	1,5975	3	1,0358	1,4073

Tabla 5. Desplazamiento medio desarrollado fuera del plano

Sin embargo comparando los dos métodos, se puede creer que en gran medida, los resultados suelen tender a parecerse más en las primeras imágenes, pero esto viene dado por nuestra propia percepción, ya que fijándonos la Tabla 6, la gran parte de los ensayos tienden a tener mayor porcentaje en las primeras imágenes y menos con el transcurso del ensayo, ya que al ser mayor los milímetros de pandeo, el porcentaje será menor.

Desviación típica estándar (mm)									
Nº Ensayo	Línea superior			Línea media			Línea inferior		
	Imagen	Cámaras térmicas	Cámaras de luz visible	Imagen	Cámaras térmicas	Cámaras de luz visible	Imagen	Cámaras térmicas	Cámaras de luz visible
Ensayo 1	1	0,022	0,130	1	0,022	0,130	1	0,022	0,130
	2	0,046	0,148	2	0,046	0,148	2	0,046	0,148
	3	0,081	0,160	3	0,081	0,160	3	0,081	0,160
Ensayo 2	1	0,036	0,020	1	0,025	0,020	1	0,046	0,020
	2	0,090	0,149	2	0,035	0,149	2	0,134	0,146
	3	0,051	0,065	3	0,104	0,066	3	0,203	0,061
Ensayo 3	1	0,054	0,020	1	0,033	0,020	1	0,038	0,020
	2	0,046	0,146	2	0,119	0,151	2	0,093	0,149
	3	0,095	0,065	3	0,054	0,067	3	0,068	0,064
Ensayo 4	1	0,020	0,128	1	0,027	0,130	1	0,023	0,125
	2	0,028	0,136	2	0,139	0,152	2	0,061	0,159
	3	0,052	0,017	3	0,173	0,020	3	0,100	0,018

Tabla 6. Desviación típica estándar

Nº Ensayo	% Diferencia DIC térmico			
	Imagen	Línea superior	Línea media	Línea inferior
Ensayo 1	1	-32,249	-40,931	-44,783
	2	16,364	14,160	14,337
	3	-20,452	-34,707	-20,889
Ensayo 2	1	42,982	32,294	25,750
	2	9,361	9,541	0,376
	3	-18,586	-18,369	-20,183
Ensayo 3	1	21,168	14,516	-26,875
	2	-22,916	-33,454	-50,665
	3	-3,826	-6,670	7,599
Ensayo 4	1	-46,682	-62,608	-40,086
	2	26,491	17,509	-4,297
	3	-18,475	-27,925	-26,398

Tabla 7. Diferencia entre DIC térmico y DIC de espectro visible

Gráficas del desplazamiento fuera del plano en las diferentes líneas

De la misma manera que en los ensayos de tracción se verá la evolución a partir de gráficas, con estas se podrá analizar tanto la variación en el ancho de la probeta, como la variación entre líneas.

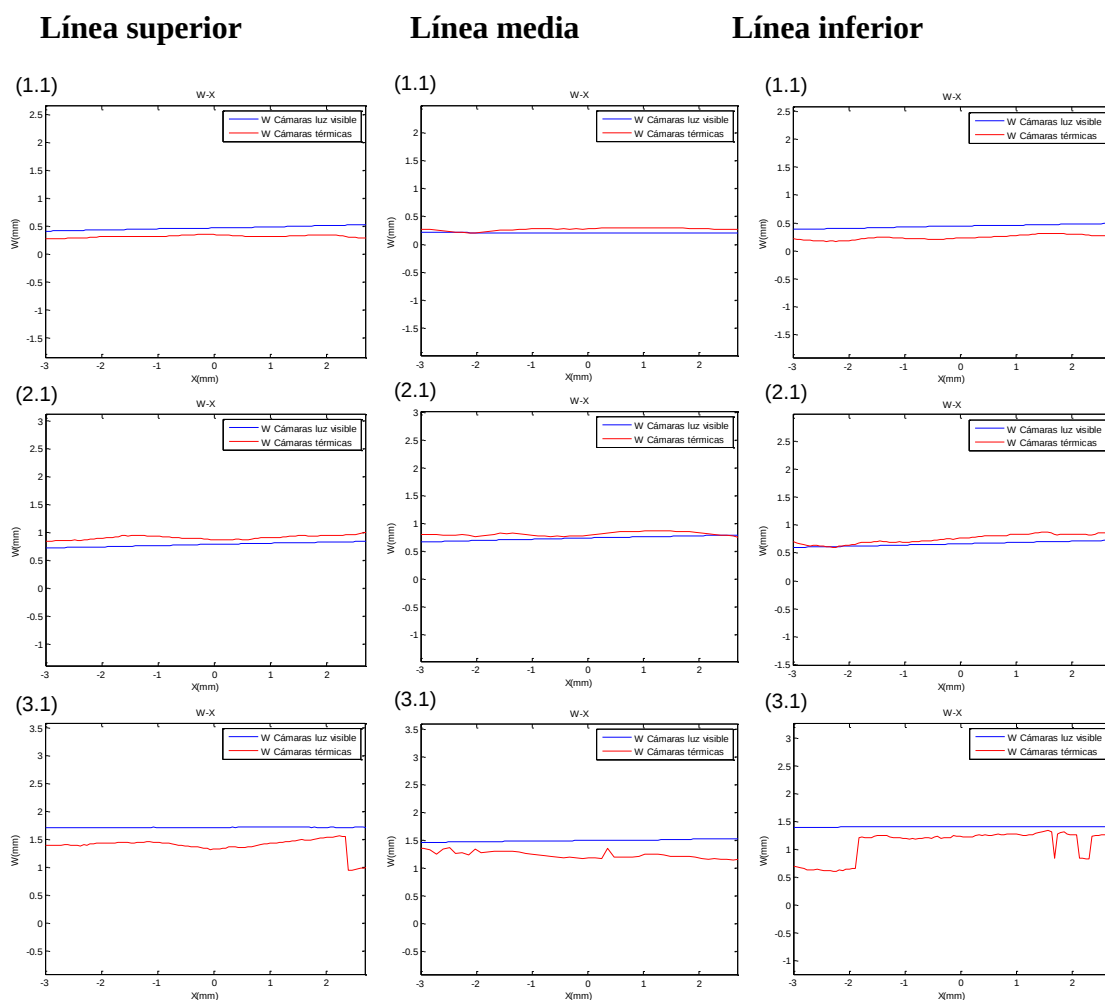
Lo esperado de esto es ver como en el ancho de la probeta como comente antes, debe de ser constante, y en caso contrario ver el motivo, y el análisis de líneas comprobar como depende de la altura, el pando debería ser mayor o menor.

Primer ensayo

Según lo visto en el mapa de desplazamiento fuera del plano, se pueden ver manchas, estas manchas como se pueden observar en las gráficas son fáciles de distinguir, como por ejemplo la más obvia de la línea inferior en la imagen tercera, se ve claro como al comienzo del ancho de la probeta se produce una llanura.

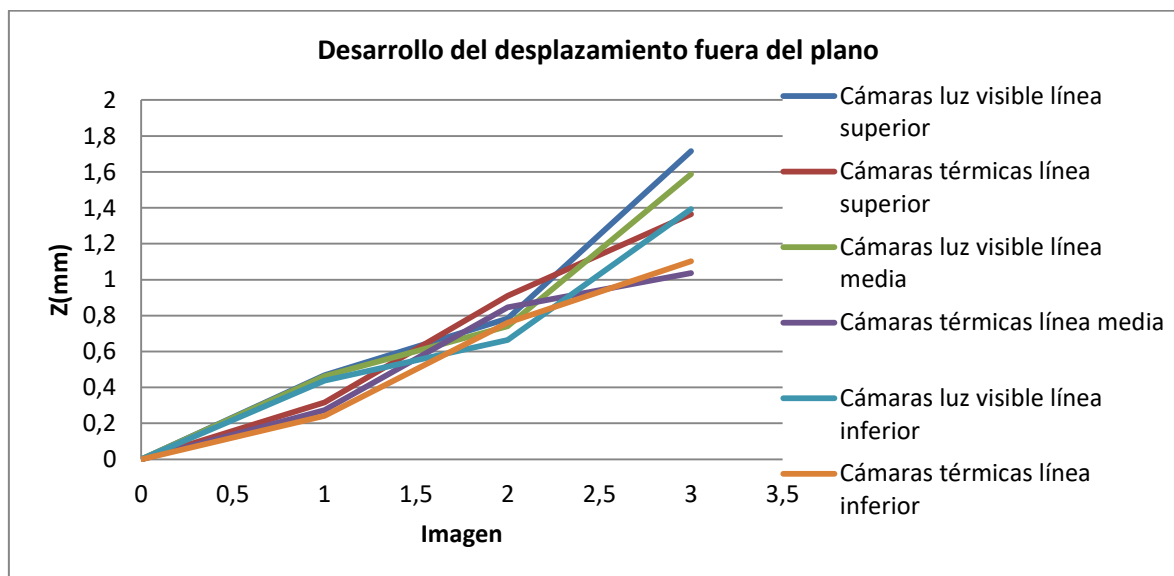
También nos sirven para comprobar lo que se menciona sobre el pandeo constante en el ancho de la probeta, que como se ve quitando las llanuras producidas por las manchas, siguen pendientes casi nulas.

De la misma forma que se realiza el primer ensayo se harán los tres siguientes, consiguiendo así un número considerable de ensayos para la validación de esta metodología.



Gráfica 9. Desplazamiento fuera del plano en el ancho de la probeta

Con las anteriores gráficas se comprueba entre otras cosas como el pandeo era constante, sin embargo, con la Gráfica 10 se muestran, el transcurso del ensayo, y se puede apreciar como era de esperar como la línea que más pendiente tiene y acaba con más pandeo, es la línea superior, y esto es porque es la zona más cercana al centro de la probeta y la pendiente de la línea inferior está por debajo de las demás.



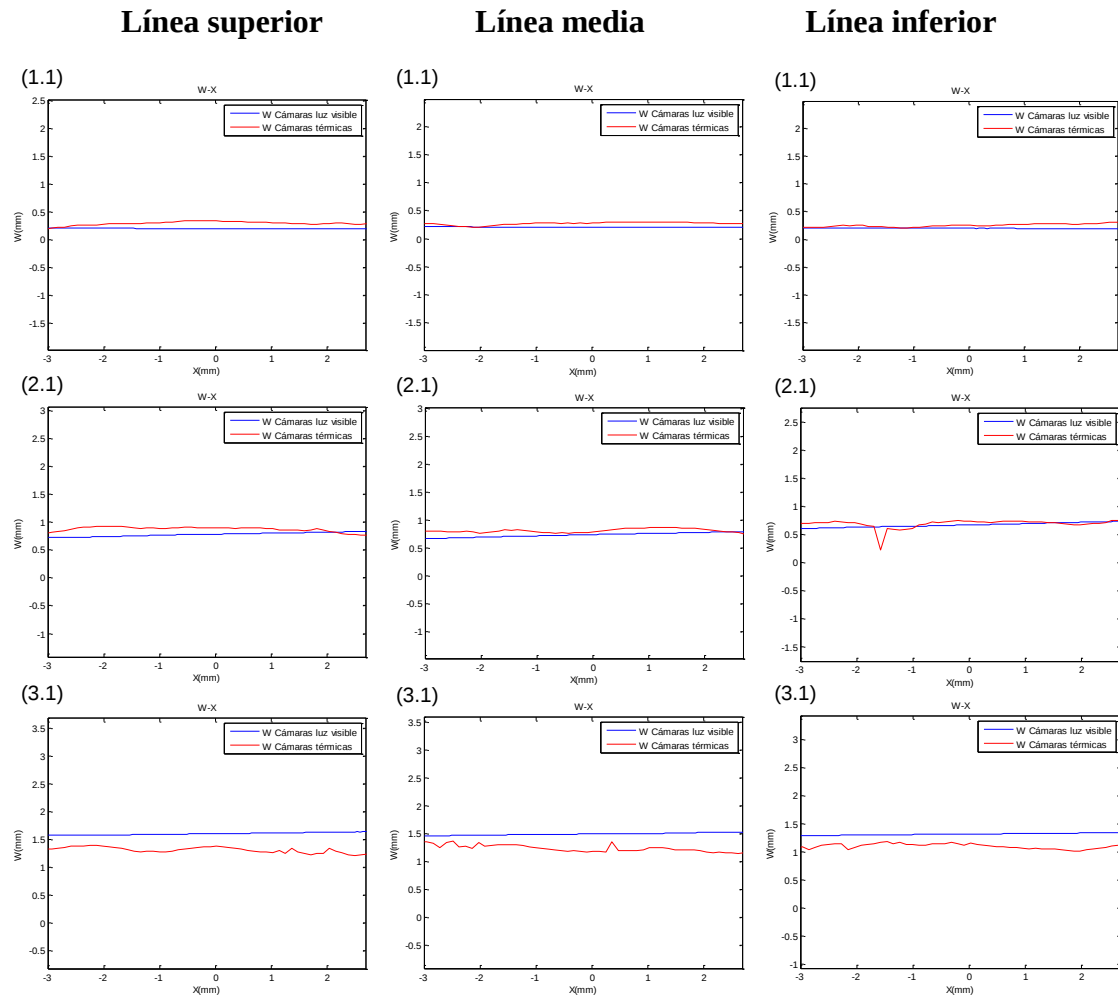
Gráfica 10. Desarrollo del desplazamiento fuera del plano

Segundo ensayo

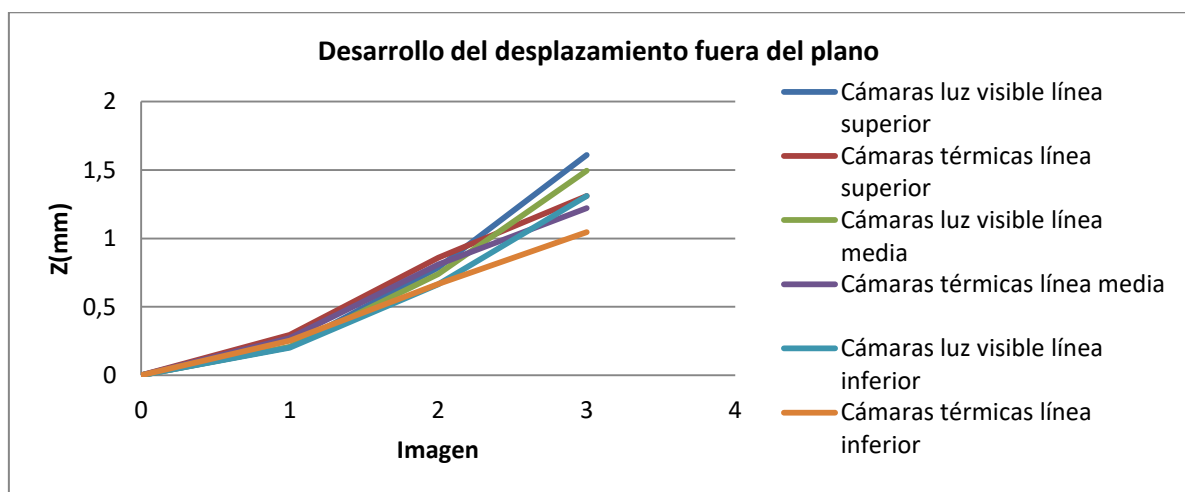
A diferencia del primer ensayo, en estas gráficas se podrá ver que no se han encontrado con ningún salto, por lo tanto han pasado cerca de las manchas del mapa de desplazamiento pero no entraron dentro de ellas, se puede observar como las líneas azules, que hacen referencia a los valores captados por las cámaras de espectro visible, sigue una línea casi recta, y por el contrario con las térmicas se podrán encontrar pequeños máximos y mínimos, que como se puede deducir pueden ser gran parte de culpa por la resolución de las cámaras.

A su vez se observa como en como la gráfica donde están todas las líneas juntas, destaca de nuevo lo mismo que en el primer ensayo, la línea inferior tiene menos pandeo que la superior, con esto va quedando constancia y pruebas de que se estaba en lo cierto.

Cabe destacar que no todas cumplen con lo que se mencionó, ya que si se observa en la línea media analizada con DIC térmico, quedan casi en la misma altura, pero por debajo de la línea superior y de la misma manera ocurre en el DIC de espectro visible.



Gráfica 11. Desplazamiento fuera del plano en el ancho de la probeta

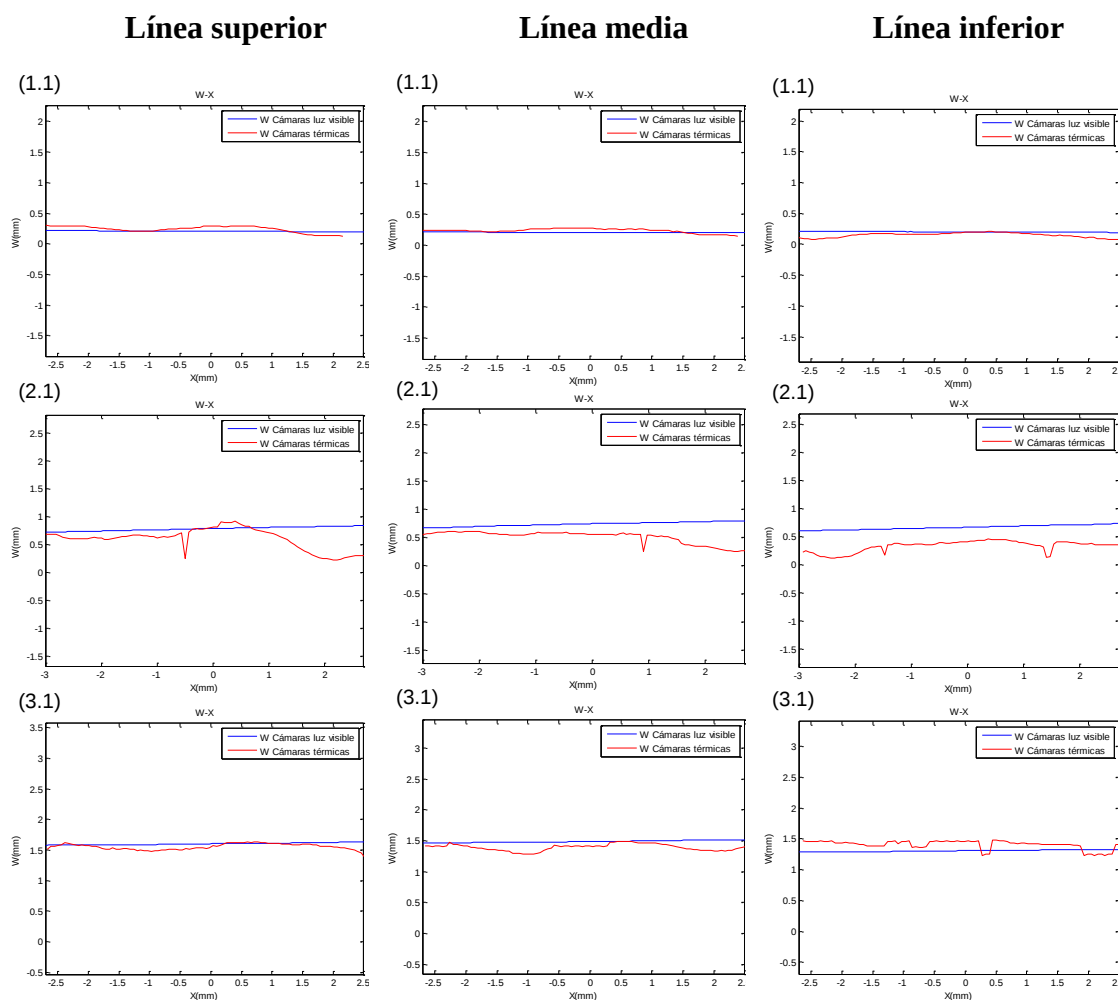


Gráfica 12. Desarrollo del desplazamiento fuera del plano

Tercer ensayo

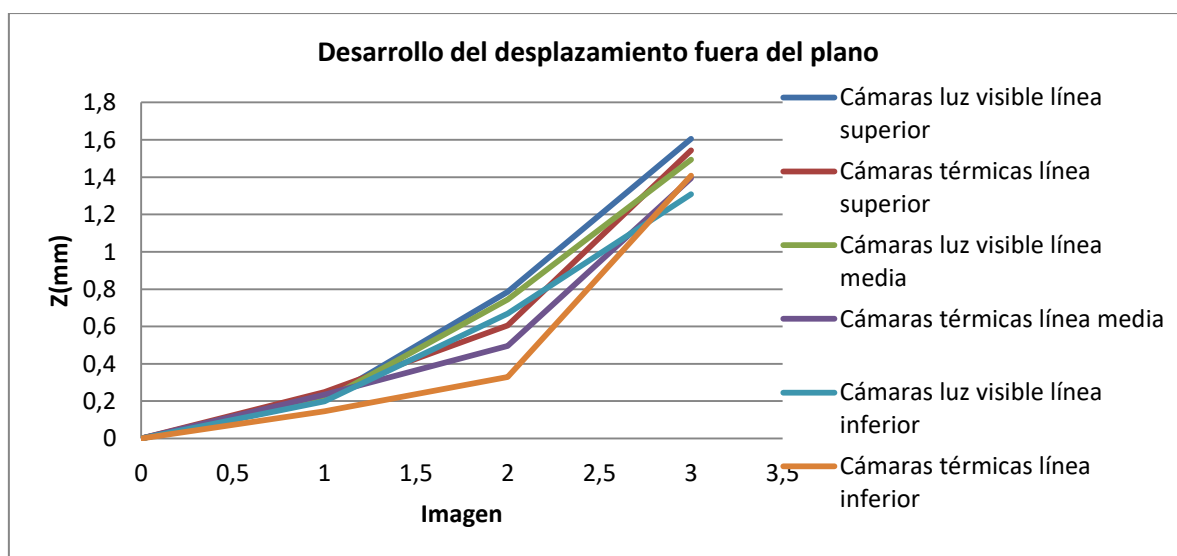
Este ensayo nos sirve para valorar como afectan valores no normales a los resultados, mientras que en los mapas de desplazamiento se podían ver manchas incluso algunos puntos fuera de escala, aquí se podrá ver como eso se refleja en mínimos o máximos, también se puede ver cómo afecta alguna mancha en la propia grafica como muestra la segunda imagen de la línea superior.

Mencionar, que las gráficas dicen “W” en vez de “z”, esto ocurre porque para el programa “z” es el ruido generado en la imagen, y la “W”, hace referencia al desplazamiento fuera del plano.



Gráfica 13. Desplazamiento fuera del plano en el ancho de la probeta

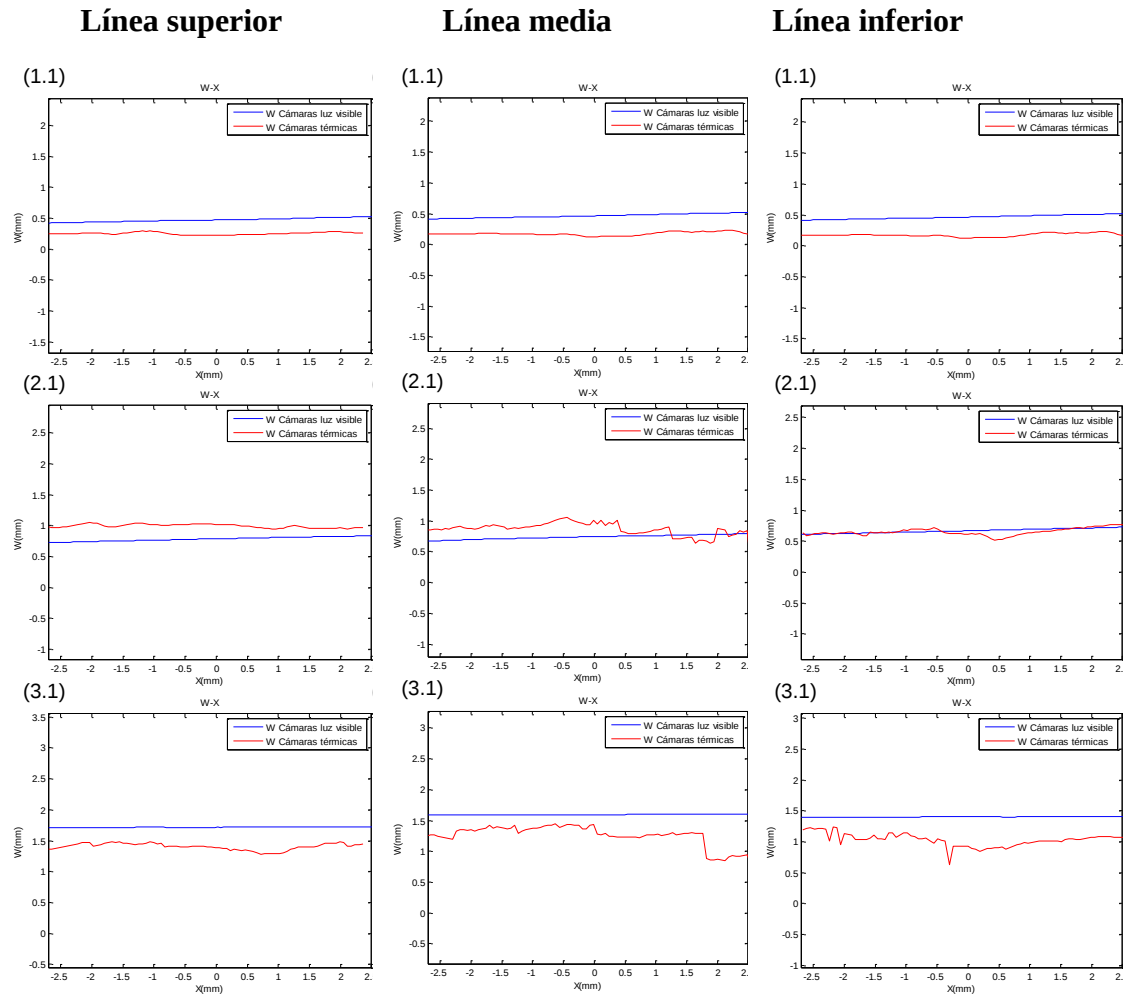
Y como se esperaba, al igual que los otros dos ensayos anteriores, la tendencia de las líneas es semejante y siendo la línea superior la que más pandeo muestre, sí que es destacable el cambio brusco de pendiente de la segunda a la tercera imagen, y esto puede ser normal ya que depende de muchos factores, lo que sí hay que tener en cuenta y tener cuidado, es que no sea ningún error de procesado de las imágenes, que puede quedar totalmente descartado ya que siguió el mismo procesado que los demás ensayos, y en caso de que fuese un fallo de estas características, también destacarían fallos en las gráficas anteriores.



Gráfica 14. Desarrollo del desplazamiento fuera del plano

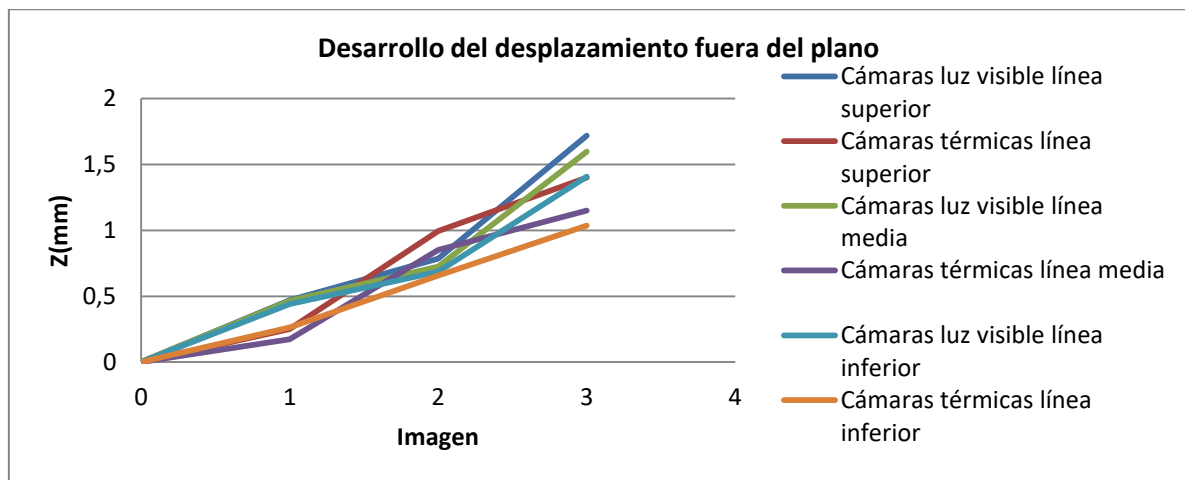
Cuarto ensayo

Y como último ensayo, se encuentran valores algo más atípicos, y como bien se ha podido deducir de los mapas de desplazamiento, estas llanuras son producidas por esas manchas, que ya comente a que se debían, aun así se pueden ver como en gran parte de las líneas, los valores están siguiendo una tendencia recta exceptuando los resaltos.



Gráfica 15. Desplazamiento fuera del plano en el ancho de la probeta

Y como era previsible, la gráfica nos muestra lo esperado, por lo tanto en los cuatro ensayos se cumple con lo que se mencionó sobre la altura de la probeta y más que nada esta obviedad nos puede servir para darle credibilidad al resto de los resultados.



Gráfica 16. Desarrollo del desplazamiento fuera del plano

De los cuatro ensayos realizados con existo y analizados se pueden ver tendencias, especialmente si se observa en que el análisis mediante DIC de espectro visible suele darnos valores superiores a los obtenidos con el análisis por DIC térmico.

Con estos resultados obtenidos se puede concluir con que el método es validó, ya que a pesar de la diferencia de resolución, nos ha proporcionado unos resultados bastante semejantes tanto a nivel visual como a nivel numérico, eso si hay que tener en cuenta y poner en valor que al ser ensayos experimentales, pueden entrar cualquier tipo de factor externo, ya que cualquier minucia nos variaría los resultados.

La propia temperatura ambiente, la luz del exterior, o incluso el calor aportado por la luz artificial, pueden ser factores determinantes, es por ello que todo se cuidó al detalle, y es por ello que los resultados nos muestras una validación del método bastante eficaz.

8. Ensayos biomecánicos

Una vez validado el método con los ensayos anteriores, se podrá realizar ya, ensayos biomecánicos, en estos, se analizarán tanto las compresiones y tracciones que sufren diferentes zona del cuerpo, entre las que se encuentra la frente el lateral del ojo, el antebrazo y la muñeca.

Para estos ensayos será interesante hacer un estudio tanto de la deformaciones de la zona como un seguimiento en 3D de la zona, donde se podrá ver tanto las zonas traccionadas y comprimidas.

El procesado como ya se mencionó se realizó con VIC y Matlab, y el montaje el descrito en los puntos anteriores, el análisis en 3D nos ayudara a entender el propio mapa en 2D, ya que nos resaltara como pequeñas elevaciones donde se encuentre comprimido y como llanuras en caso contrario, esto haría referencia a los máximos y mínimos de las gráficas.

8.1. Ensayo contorno del ojo

El estudio del contorno del ojo, se realiza con la intención de encontrar las zonas traccionadas y comprimidas, y con ello se podrá deducir si se muestran evidencias de “pata de gallo”, a nivel estético, es el pliegue que se encuentra al cerrar el ojo en el lateral.

El procedimiento de este ensayo es básicamente es usando el montaje óptico de las cámaras térmicas, y colocando el contorno del otro con un fondo sin luces para que no se produzcan destellos, con ello se tomaron las secuencias, se estudiarán tanto los desplazamientos fuera del plano con un sistema en 3D, como la deformación que sufre un punto en el proceso de guiñar el ojo.

Lo primero que se analizará será encontrar esas zonas durante el ensayo, que como se puede ver la escala de colores comienza de rojo que nos hace un símil a que está completamente estirada, como bien muestra la imagen en 3D, sin embargo se ve como en la segunda y tercera imagen la piel comienza a estar más comprimida, cuanto más negativo más compresión hay producida, por lo que se puede ver una compresión

homogénea en toda la zona, menos en la zona de la pata de gallo, donde se quedan marcadas como que no están tan comprimidos, ya que es una zona que no sufre deformación, es decir la piel se comprime en el entorno de estos pliegues.

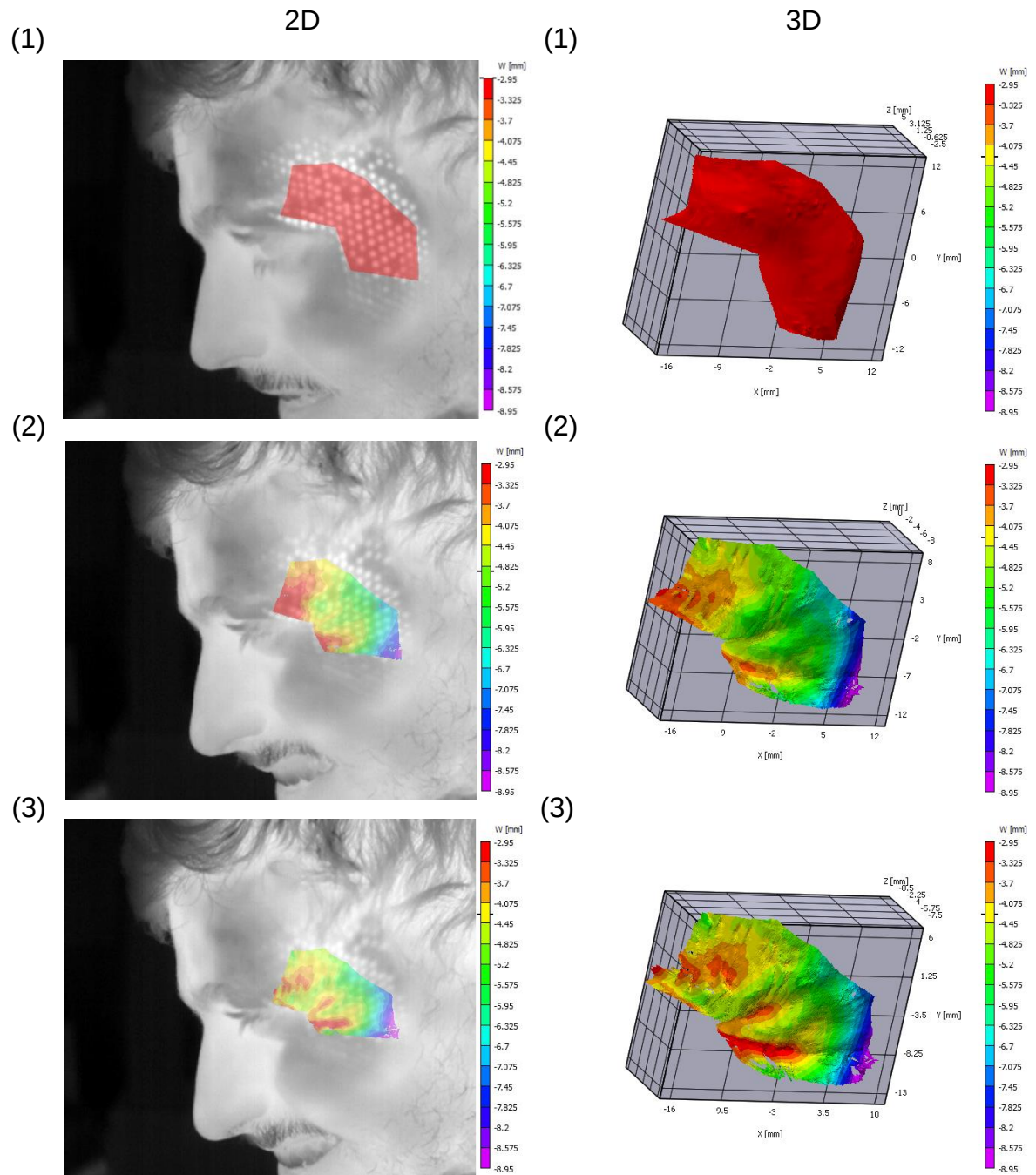
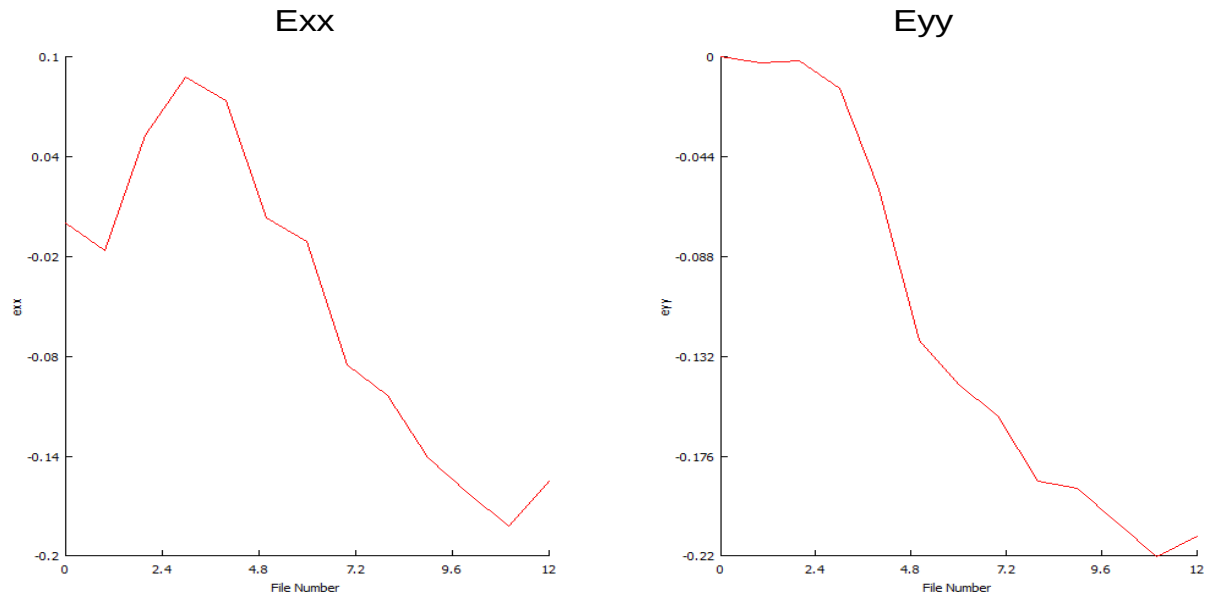


Figura 74. Mapa desplazamientos 2D y 3D ensayo biomecánico



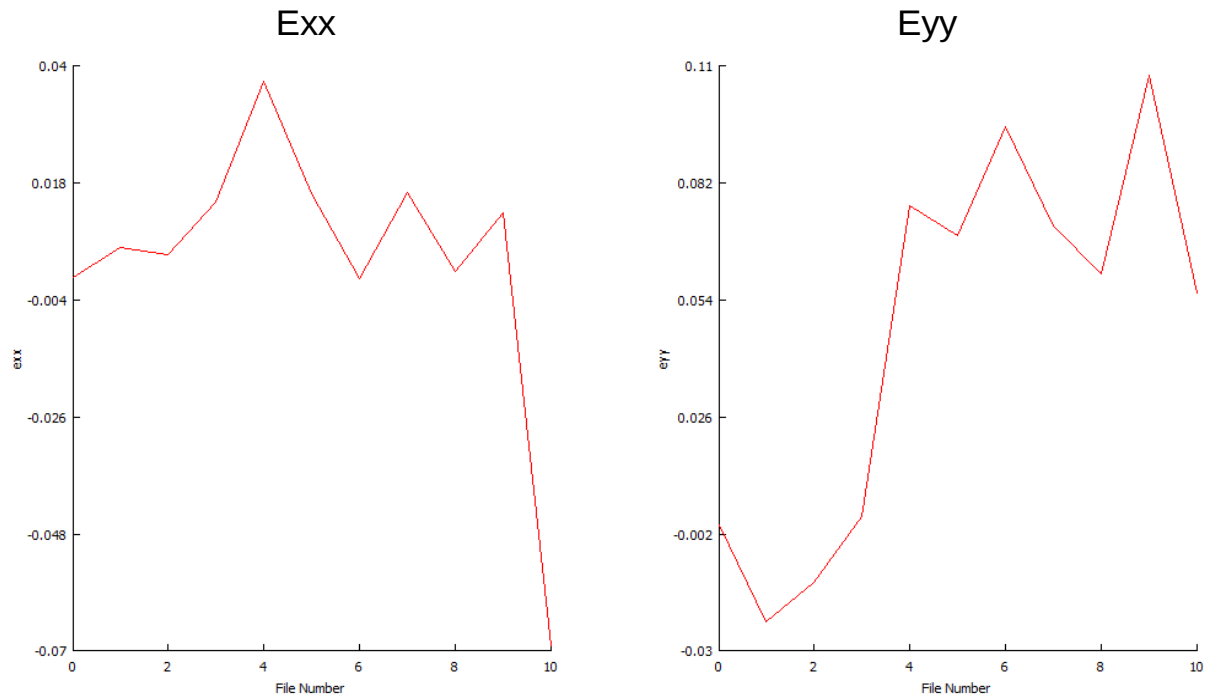
Gráfica 17. Deformación en “x” e “y” durante el ensayo biomecánico

A la misma vez se podrá analizar la deformación que sufre un punto en el contorno de este fenómeno, que se verá en las gráficas, tanto longitudinalmente, como transversalmente se vuelve más negativo, es decir como ya vimos en las probetas, que transversalmente era negativo porque la materia se estiraba y longitudinalmente era positivo, por lo que en este caso, al ser los dos negativos, la piel que se comprime en las dos coordenadas, formando los pliegues de la “pata de gallo”.

8.2. Ensayo frente

Para este ensayo, que se procederá a realizar en la frente, se buscará la implicación de los músculos occipito frontal y orbicular de los ojos, para ello la metodología para ello será prácticamente igual que para el anterior ensayo, dejando las cámaras a la espera y colocar la frente a la misma distancia que la que la probeta estaba de ellas.

Para las gráficas se coloca un punto en el centro de la frente, y se podrá analizar de estas gráficas, de forma que en el comienzo de fruncir el ceño, el centro solo sufre en el eje longitudinal, mientras que queda constante transversalmente, y como es de esperar, llega el punto en el que se produce una compresión máxima en el centro de la frente produciendo incluso pliegues, mientras que para este máximo longitudinalmente se mantiene constante.



Gráfica 18. Deformación en "x" e "y" durante el ensayo biomecánico

Visto esto se puede ver como el occipo frontal se tracciona de una forma bastante brusca para así comprimir al orbicular del ojo.

Más allá de este hecho, se puede ver como la corona superior de la frente empieza a sufrir una compresión ya que el orbicular del ojo como se puede ver en los diagramas en Eyy, al mantenerse constante y tener que cumplir con la ecuación de la conservación de la masa, la compresión empieza en esa parte superior de la frente.

A su vez, el occipo frontal se ve cómo sufre también una compresión mientras que la zona cercana a la nariz se tracciona.

Las flechas naranjas harán referencia al primer musculo nombrado (occipo frontal) y la roja al segundo (orbicular de los ojos).

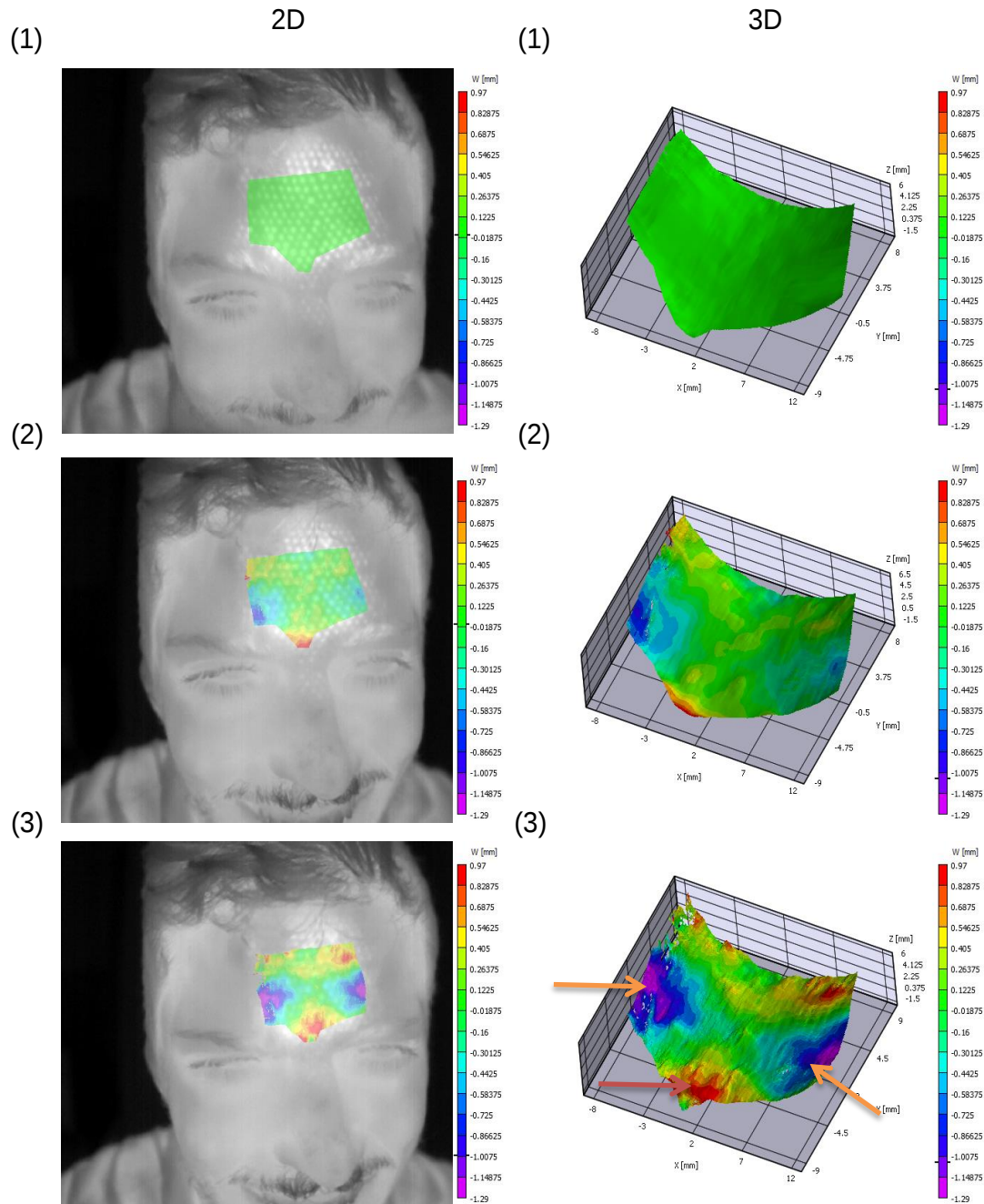


Figura 75. Mapa desplazamientos 2D y 3D ensayo biomecánico

Por lo que siendo estas las zonas de compresión y tracción se podrá deducir la causa de algunos dolores de cabeza producidos por la migraña, esta desata una compresión de la zona media de la frente lo que nos acaba afectando incluso a la visión y es por ello que con este ensayo se verá cómo repercuten unos músculos sobre otros.

8.3. Ensayo antebrazo

En este ensayo, se busca el estudio de los diferentes músculos del antebrazo ante una carga de apriete en la mano, esto puede ser por ejemplo el propio gesto de apretar una barra, en este caso se apretó sin ningún útil para no involucrar la activación por motivo de carga aplicada.

Se verá un ensayo en la musculatura del antebrazo, en este caso se tendrán los siguientes músculos implicados.

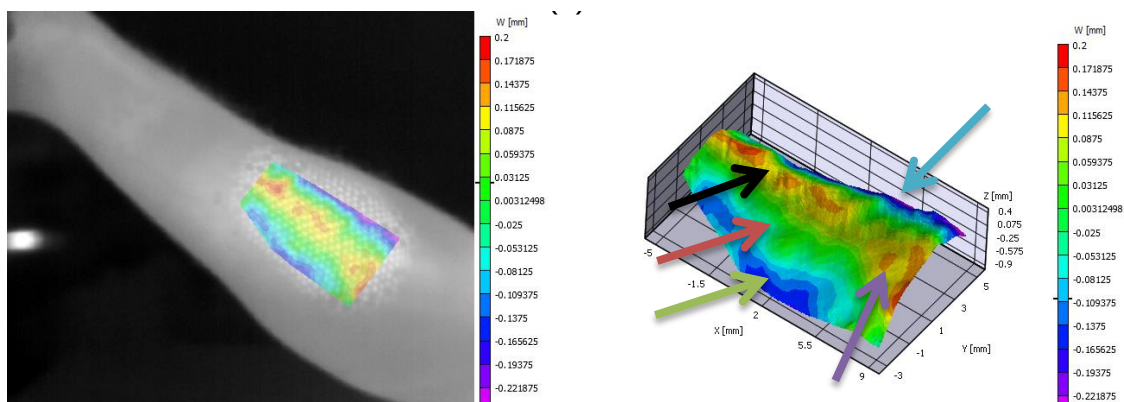


Figura 76. Mapa desplazamientos 2D y 3D ensayo biomecánico

Siendo el marcado con flecha verde, el flexor cubital del carpo, flecha roja, el palmar largo, flecha negra, flexor radial del carpo, flecha azul el braquioradial y la flecha morada el pronador redondo.

En los ensayos anteriores, al ser pocos músculos los implicados, se podría decir, casi que se puede ver a simple vista, sin embargo, en este ensayo en el que se tendrá la implicación de cinco diferentes músculos, es mucho más útil.

Se puede ver como el apriete de la mano lo primero que produce es una tracción en el flexor cubital del carpo y en el braquioradial, a su vez se empieza a producir una compresión tanto del flexor radial del carpo como del pronador redondo.

Por otro lado el palmar largo no tiene ningún tipo de reacción, para activarlo se deberá de sufrir un movimiento que implique un momento flector en la mano, esta

diferencia, para entrenamientos de fuerza es fundamental para no dejar atrás ningún músculo y así evitar futuras lesiones.

Otro punto de vista interesante es el análisis en la propia realización de un ejercicio, con ello se podrá observar si se están activando los músculos que se pretenden entrenar, y con ello perfeccionar las técnicas.

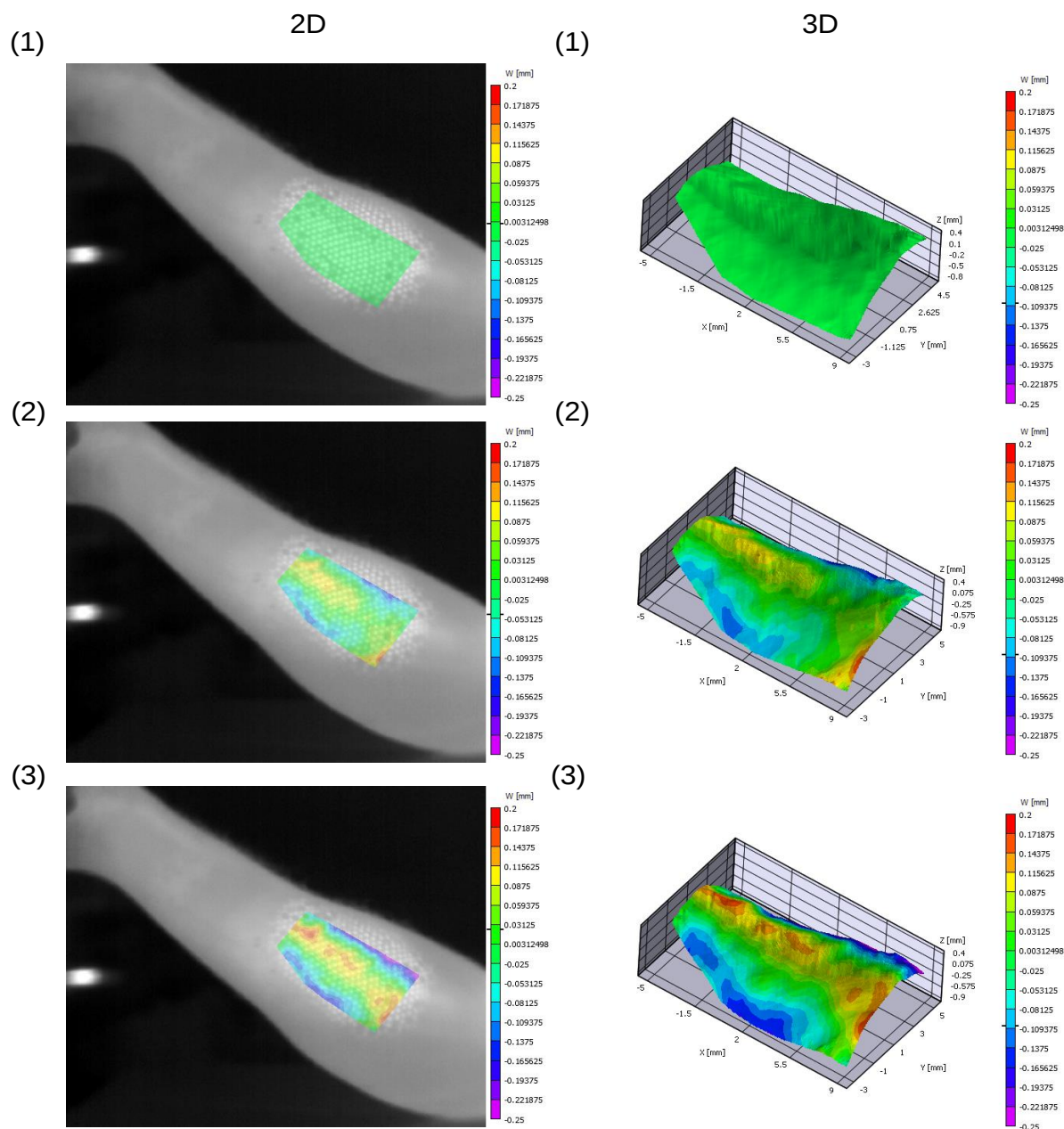


Figura 77. Mapa desplazamientos 2D y 3D ensayo biomecánico

Para este ensayo al tener tantos músculos implicados, no es determinante el análisis mediante gráficas, ya que habría que poner un punto en cada uno para el análisis, cuando

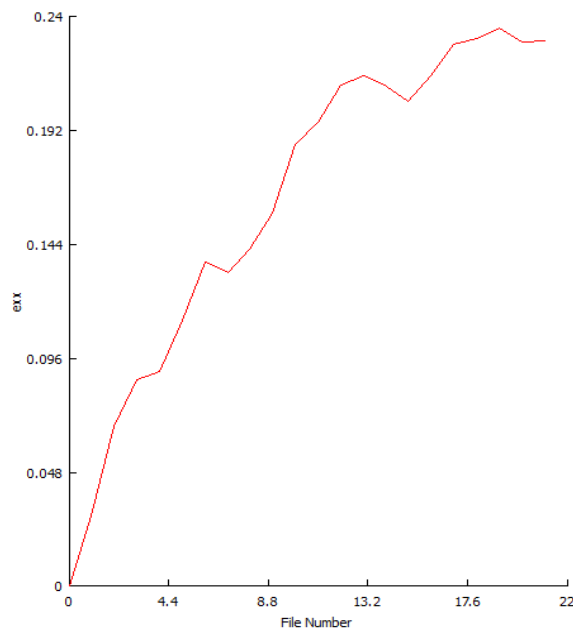
precisamente en los propios mapas en 3D, se podrá ver el proceso de tracción y compresión de los mismos.

8.4. Ensayo muñeca

El procedimiento para este ensaño es el mismo que para el antebrazo donde se apoyará el codo sobre una caja para evitar movimientos, aunque ya en el procesado de las imágenes se eliminará el movimiento del solido rígido.

Ahora se verá cómo la flexión de la muñeca puede afectar a los extensores de la muñeca, de tal forma que se analizará la máxima tracción y máxima compresión.

En este caso será más interesante revisar el diagrama en Exx ya que es el eje que acompaña al movimiento, por lo que colocando un punto en el centro de la muñeca se podrá revisar.



Gráfica 19. Deformación en “x” durante el ensayo biomecánico

Como es de esperar la función de los extensores en la flexión realizada (dirección al codo) que sufriesen una tracción constante durante todo el movimiento. Con esto se puede llegar a comprobar sin necesidad de rayo X o ecografías si hay alguno de los extensores con algún tipo de lesión.

Es a su vez clave, fijarnos como mientras que los extensores se traccionan a niveles máximos, en el inicio de la mano, se concentran en pliegues formando una compresión más progresiva, y aunque la tracción se realicen los extensores, esta acompaña los laterales del antebrazo siendo menor, pero provocando un efecto domino.

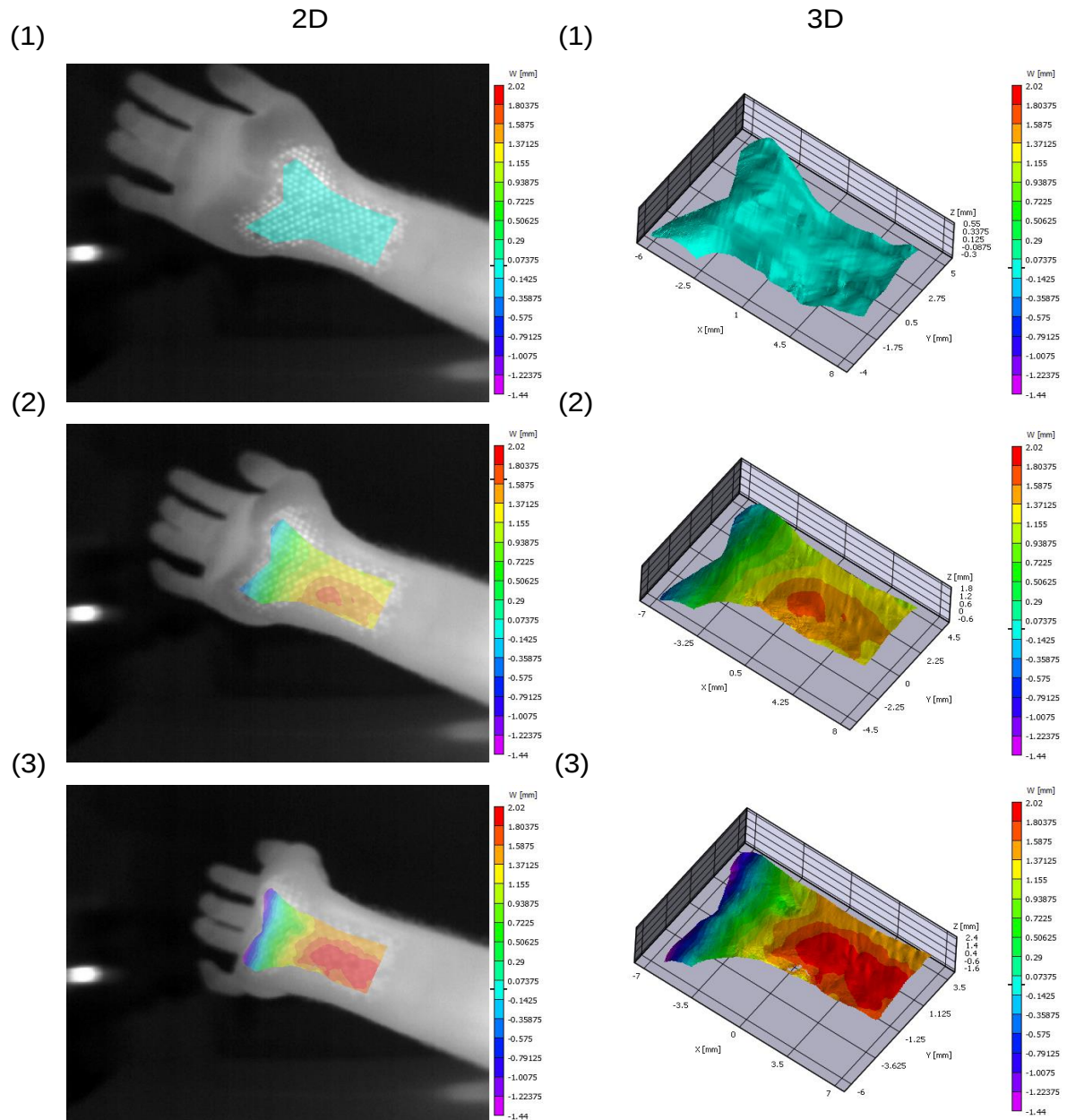


Figura 78. Mapa desplazamientos 2D y 3D ensayo biomecánico

Como ejemplo de utilidad de este ensayo se podría realizar cualquier ejercicio que involucre el agarre de una barra con una posición tumbada, con esto se producirá la tracción de los extensores y una compresión de la zona de la mano y muñeca, nos serviría para analizar en profundidad la técnica.

9. Conclusiones

Se puede concluir que a partir de este trabajo fin de grado se asientan las bases del desarrollo de la técnica y que a pesar de todos los inconvenientes encontrados y las horas dedicadas para la realización de los ensayos, se puede afirmar que es un campo de investigación con gran potencial aun por explotar. No obstante, se ha conseguido completar con los objetivos propuestos.

- Se realizó una labor de revisión bibliográfica sobre las técnicas ópticas de medida de deformación que presenten alto potencial en la biomecánica y en especial en la Correlación digital de imágenes, así como sus limitaciones en ese campo.
- Se estableció una metodología que permita llevar a cabo la técnica de Correlación digital de imágenes en bioingeniería, con especial atención en la medida de formas y deformaciones en el cuerpo humano.
- Se llevó a cabo una labor de validación de la metodología propuesta, así como una serie de aplicaciones que muestren su potencial en la bioingeniería o medicina.
- Se realizó una discusión y conclusión para poder valorar las capacidades y los puntos de mejora de la técnica.

Es cierto que el uso de cámaras térmicas de mayor resolución permitiría el uso de útiles más precisos, y por lo tanto unos resultados más precisos y con menos diferencias aun entre metodologías estudiadas.

Hay que remarcar la complejidad para obtener los resultados analizados, ya que se han encontrado muchos inconvenientes entre ellos caben destacar:

- La baja resolución de las cámaras térmicas hizo que el primer útil fabricado desde cero, sirviera solo de prueba y con ello desperdiciando muchas horas de laboratorio.

- El primer ordenador con el que se pretendía realizar los ensayos, empezó a dar problemas justo cuando estaba todo preparado para la realización de los ensayos, por lo que esto retrasó meses la toma de los datos.
- Tener que diseñar algunos componentes para acoplarlos en los ensayos, como los apoyos o las bases de las cámaras, de la misma forma el diseño y mecanizado del primer útil, esto no es un inconveniente pero sí algo a lo que se le dedicó más tiempo.
- Realización de aproximadamente treinta ensayos para conseguir los ocho ensayos analizados en los resultados, ya que la complejidad de tener tres técnicas en tracción y dos en pandeo, generaba que cualquier mínimo detalle frustrase todo el ensayo

Por lo tanto, con los resultados obtenidos se ha podido llegar a las siguientes conclusiones:

- La metodología ha sido validada para un entorno 3D, ya que, a pesar de la baja resolución de las cámaras, se han obtenido resultados muy semejantes en comparación con las otras técnicas analizadas.
- Se ha podido ver cómo en tracción y pandeo, se ha podido encontrarnos con manchas que surgen por motivo de la aplicación del speckle térmico, ya que este se va dispersando en el transcurso de los ensayos.
- En los ensayos biomecánicos se han obtenido la involucración de músculos muy específicos como el caso del antebrazo, esto nos muestra el potencial que se puede desarrollar, y que aun teniendo poca resolución se han obtenido recreaciones muy semejantes a la realidad, es tanto que las zonas de compresión y tracción están totalmente acordes a la realidad.

Por lo tanto se puede dar por demostrada la validez en campos 3D con esta técnica no invasiva y obteniendo resultados muy cercanos a los reales.

10. Trabajos futuros

Como trabajos futuros se podría detallar una metodología utilizando útiles y materiales en los que la duración del speckle sea mayor y con esto aumentar el rango de posibilidades a la hora de realizar ensayos.

De la misma manera, el uso de cámaras de mayor resolución mejorara considerablemente los resultados obtenidos tanto de validación como los resultados en ensayos biomecánicos.

Por otro lado, siguiendo la línea de investigación de ensayos biomecánicos, se podría continuar ensayos biomecánicos más complejos, donde se involucren otros tipos de esfuerzos.

11. Bibliografía

[1] A. LÓPEZ-ALBA, L. F. SESÉ, J. M. VASCO-OLMO, y F. A. DÍAZ-GARRIDO, «APLICACIONES INDUSTRIALES DE TÉCNICAS ÓPTICAS DE CAMPO COMPLETO PARA LA MEDIDA DE TENSIONES Y DEFORMACIONES EN ELEMENTOS DE MÁQUINAS», DYNA, vol. 80, n.º 181, pp. 98–108, sep. 2013. DOI: 10.15446/dyna

[2] FELIPE SESÉ, Luis Antonio, 2014. Integración de Proyección de Franjas y Correlación digital de imágenes 2D para la medida de deformaciones y desplazamientos. Tesis doctoral. Jaén. Universidad Politécnica de Jaén. [Consulta: Marzo 2022] Disponible en: <https://hdl.handle.net/10953/636>

[3] BLABER, Justin. DIC Algorithms Ncorr v1.2. Disponible en: http://www.ncorr.com/index.php/dic-algorithms#_ENREF_1 [Consulta: Febrero 2022]

[4] CHEN, Bin, 2020. In vivo panoramic human skin shape and deformation measurement using mirror-assisted multi-view digital image correlation. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.103936>

[5] FERNÁNDEZ ACEITUNO, Javier. Diapositivas teóricas, Elasticidad y Resistencia de los Materiales.

[6] MEDINA, Jaime, 2012. ¿Sensor CCD o CMOS? ¿Qué significa todo esto? Disponible en: https://parentesis.com/tutoriales/Sensor_CCD_o_CMOS_Que_significa_todo_esto [Consulta: Marzo 2022]

[7] EL PAÍS, Artículo de ciencia. El universo más allá de lo visible. Disponible en: https://elpais.com/sociedad/2009/01/15/actualidad/1231974010_850215.html [Consulta: Marzo 2022]

[8] RUIZ, Toni, 2017. Sensores y cámaras CMOS. Disponible en: <https://infaimon.com/enciclopedia-de-la-vision/sensores-y-camaras-cmos/> [Consulta: Marzo 2022]

[9] FLIR. Transmisión de imágenes de FLIR Axxx. Disponible en: [Cámaras termográficas FLIR Axxx con configuración de la transmisión de imágenes. | Teledyne FLIR](#) [Consulta: Marzo 2022]

[10] INFAIMON. ¿Es posible que los sensores CMOS sustituyan a los CCD en todos los casos? Disponible en: [CCD o CMOS: ¿Es posible que los sensores CMOS sustituyan a los CCD en todos los casos? - \[R\]evolución artificial \(infaimon.com\)](#) [Consulta: Marzo 2022]

[11] PALOMAR CARNICERO, José Manuel, CRUZ PERAGÓN, Fernando, MONTORO MONTORO, Vicente. 1999. Ingeniería térmica. [Consulta: Marzo 2022]

[12] TESTO. Emisividades de los materiales más importantes. Disponible en: [Conocimientos de medición en termografía de Testo | Tabla de emisividad | Instrumentos Testo S.A.](#) [Consulta: Abril 2022]

[13] ROMERO ARENAS, Salvador. Diapositivas Biomecánica. UCAM. [Consulta: Abril 2022]

[14] ESTRADA BONILLA, Yisel Carolina, 2018 Biomecánica: de la física mecánica al análisis de gestos deportivos, Universidad Santo Tomás. [Consulta: Abril 2022]. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/12464/Obracompleta.2018Estradayisel.pdf>

[15] GUIRAO SALMÁN, Ana Karima. 2020. Análisis experimental de deformaciones mediante video-extensimetría. Trabajo fin de grado. Disponible en: <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/8931/tfg-gui-ana.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[16] PÉREZ PORTO, Elisabet. 2019. Sistema inalámbrico para la medición de esfuerzos de contacto en muletas. Trabajo fin de grado. Disponible en:

https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/24166/PerezPorto_Elisabet_TFG_2019.pdf

[17] NEOATTACK. Trigger. Disponible en: <https://neoattack.com/neowiki/trigger/>
[Consulta: Abril 2022]

[18] SEGURA GUILLÉN, María. 2018. Estudio del comportamiento mecánico de espumas de poliestireno. Trabajo fin de grado. Disponible en:

<https://zaguan.unizar.es/record/78596/files/TAZ-TFG-2018-4620.pdf>

[19] ZAPATA, Fanny. Ensayo de compresión: cómo se realiza, propiedades, ejemplos. Disponible en: <https://www.lifeder.com/ensayo-de-compresion/> [Consulta: Abril 2022]

[20] Camargo Guzmán, Andrea Carolina & Guzman, Tanya & Lorena, Karen & Guerrero, Thiare & Velandia Velandia, Yeraldin & T, Velandia & David, Oscar & Estrada, Ricardo & Montes Palencia, Karen Paola & T, Palencia & Guerra, Ricardo. (2019). ENSAYO DE PANDEO (Buckling Test).

[21] FERNÁNDEZ ACEITUNO, Javier. 2022. Diapositivas teóricas, Construcciones en hormigón y prefabricados. [Consulta: Abril 2022]

[22] BUDYNAS, Richard, NISBETT, Keith, 2008. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. Décima edición. Universidad Iberoamericana. ISBN 10: 1-4562-6090-1.

[23] SUTTON, Michael A, 2009. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. Primera edición. Universidad de Carolina del sur. ISBN: 978-0-387-78746-6.

[24] FERNANDEZ SEMPERE, Julio. La interferometría holográfica como técnica experimental para la determinación de coeficientes de difusión en fase líquida. 1983. Universidad de Alicante. Disponible en:

<file:///C:/Users/anton/Downloads/Fernandez-Sempere-Julio-01.pdf>

[26] TRUJILLO TORRES, Juan Manuel. Biomecánica. Disponible en:
<https://www.ugr.es/~jtorres/t5.pdf> [Consulta: Abril 2022]

[27] CHALA CEDENO, Fabián. Puente de Wheatstone. Disponible en:
<https://www.vistronica.com/blog/post/puente-de-wheatstone-.html> [Consulta: Marzo 2022]

[28] CAMBRONERO BOIXADER, David. Como obtener el coeficiente de pandeo en pilares con apoyo elástico. Disponible en:
<https://estructurando.net/2020/03/26/como-obtener-el-coeficiente-de-pandeo-en-pilares-con-apoyo-elastico/> [Consulta: Mayo 2022]

[29] Catálogo Allied Vision. Disponible en:
<https://www.edmundoptics.com/p/allied-vision-mako-u-130b-usb-30-monochrome-camera/3614/> [Consulta: Mayo 2022]

[30] Manual de uso VIC-3D. Disponible en:
<http://www.correlatedsolutions.com/supportcontent/Vic-3D-v7-Manual.pdf> [Consulta: Mayo 2022]

[31] Catálogo Máquina universal INSTRON. Disponible en:
<https://www.instron.com/es-es/products/testing-systems/universal-testing-systems/low-force-universal-testing-systems/5900-series> [Consulta: Mayo 2022]

[32] Catálogo Mordazas INSTRON. Disponible en:
<https://www.instron.com/es-es/products/testing-accessories/grips/mechanical-wedge-action-grips> [Consulta: Mayo 2022]

12. Anexos

12.1. Función Matlab para aleatoriedad

```

function [Base,Coordenadas] = MatrizAleatoria(TamanoXmm_real,
TamanoYmm_real )
    %Se aumenta la resolución a 0,5mm
    TamanoYmm=TamanoYmm_real.*2;
    TamanoXmm=TamanoXmm_real.*2;
    Base=(rand(TamanoYmm,TamanoXmm));
    Base(Base>0.4)=1;
    Base(Base<0.4)=0;

    for i=1:2:TamanoXmm
        Base(:,i)=0;
    end
    for i=1:2:TamanoYmm
        Base(i,:)=0;
    end
    Base(Base>0.4)=1;
    Base(Base<0.4)=0;
    figure,imagesc(Base), axis equal

    [x y]=find(Base == 1);
    %Ahora las coordenadas están en el doble, por lo que se multiplican por 0,5
    x=(0.75*x);
    y=(0.75*y);
    Coordenadas=[(x),(y)]
end
clear all;
TamanoXmm_real=66;
TamanoYmm_real=33;
[Base,Coordenadas] = MatrizAleatoria(TamanoXmm_real, TamanoYmm_real)

```

12.2. Configuración cámaras térmicas

Con una configuración de los pin de:

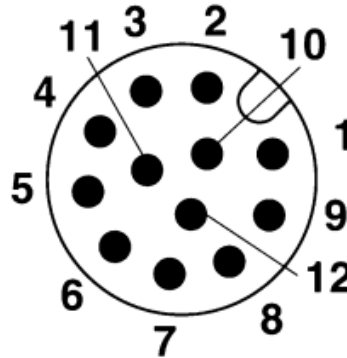
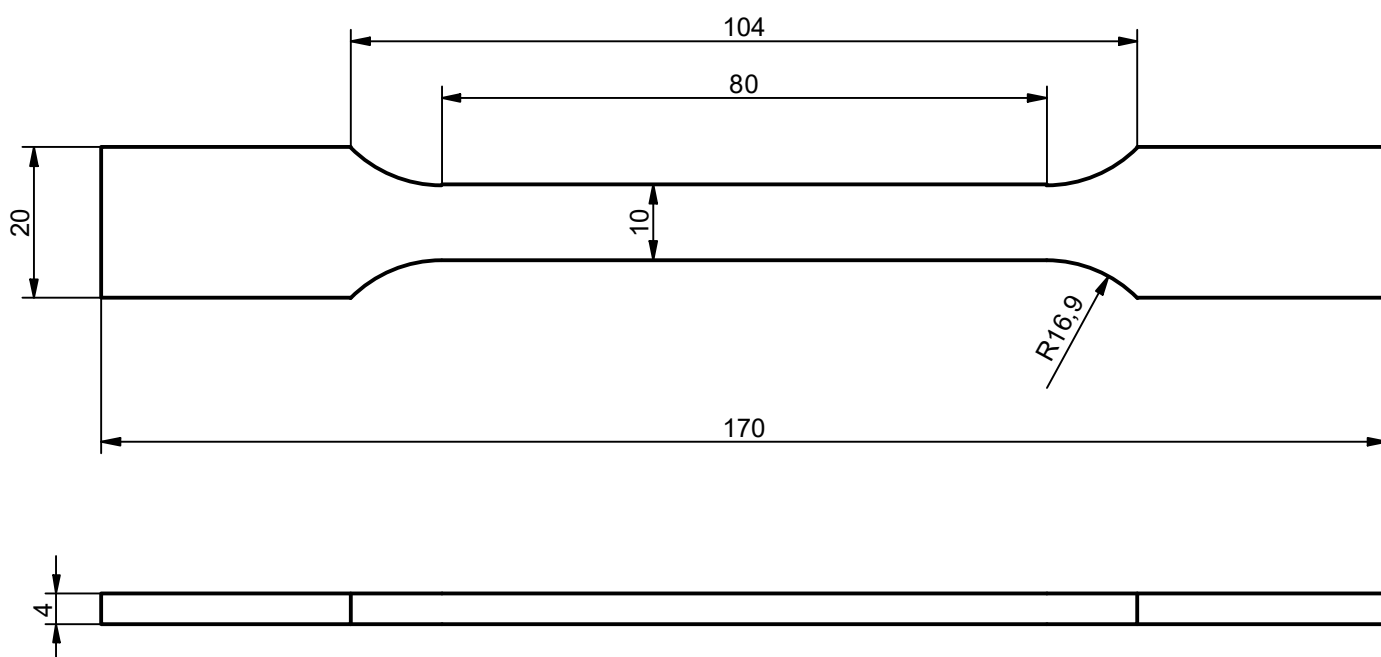
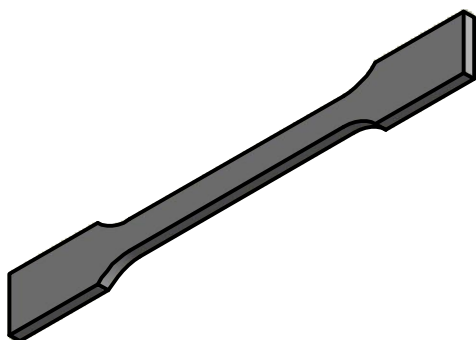


Figura 79. Configuración PINS cámaras térmicas

Pin	Signal	Explanation
1	RET_GB	Camera PWR –
2	PWR_GB	Camera PWR +
3	SYNC_OUT	LVC Buffer @ 3.3 V, "0" = 24 MA max, "1" = –24 mA max
4	SYNC_OUT_GND	= RET_GB = Camera PWR –
5	SYNC_IN	LVC Buffer @ 3.3 V, "0" < 0.8 V, "1" > 2.0 V
6	SYNC_IN_GND	= RET_GB = Camera PWR-
7	GPO+	1 × opto-isolated, 2–40 VDC, max. 185 mA
8	GPO-	= GP Input return
9	GPIO_PWR	GP Output PWR. 2–40 VDC, max. 200 mA
10	GPIO_GND	GP Ouput PWR return
11	GPI+	1 × opto-isolated, "0" < 2, "1" = 2–40 VDC
12	GPI-	GP Input return

Tabla 8. Configuración PINS cámaras térmicas

12.3. Planos



Probeta según ISO 3167



UNIVERSIDAD DE JAÉN

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
LINARES

FECHA
10/09/2021

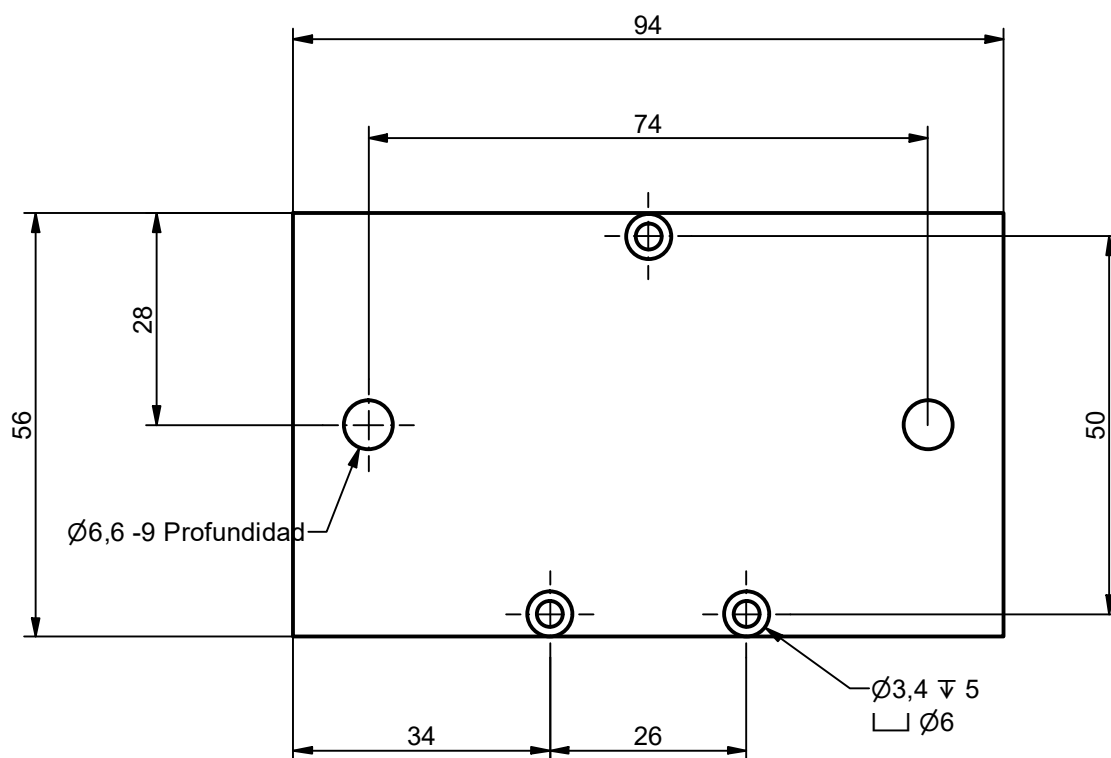
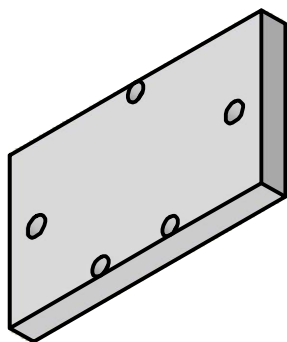
APELLIDOS, NOMBRE:
Conde Calabrús, Antonio Jesús

FIRMA
AJCC

ESCALA
1:1

Estudio de técnicas ópticas de medida de deformaciones
mecánicas con cámaras térmicas

Nº DE PLANO
1 / 8



Base para camaras



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
LINARES

UNIVERSIDAD DE JAÉN

FECHA
10/09/2021

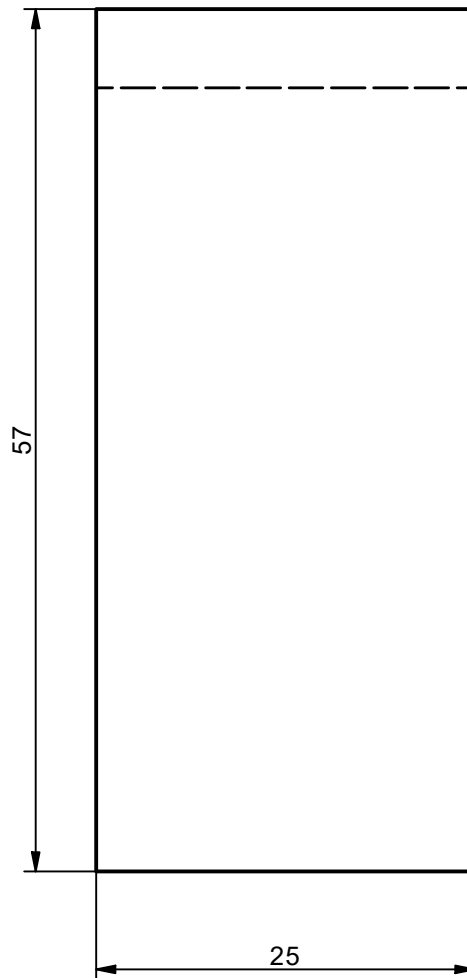
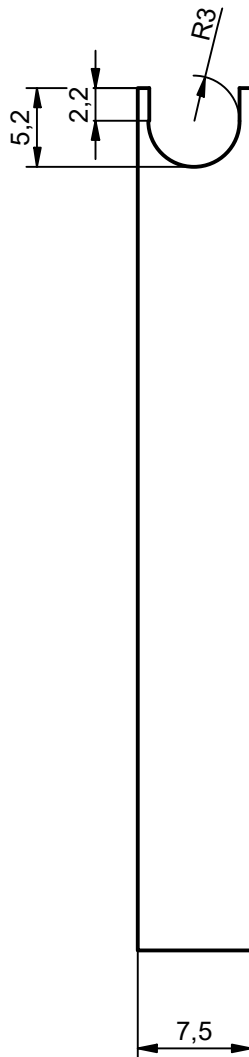
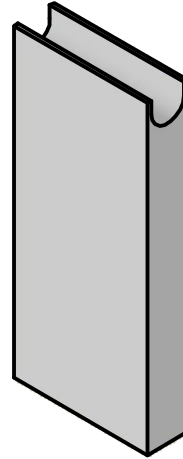
APELLIDOS, NOMBRE:
Conde Calabrús, Antonio Jesús

FIRMA
AJCC

ESCALA
1:1

Estudio de técnicas ópticas de medida de deformaciones
mecánicas con cámaras térmicas

Nº DE PLANO
2 / 8



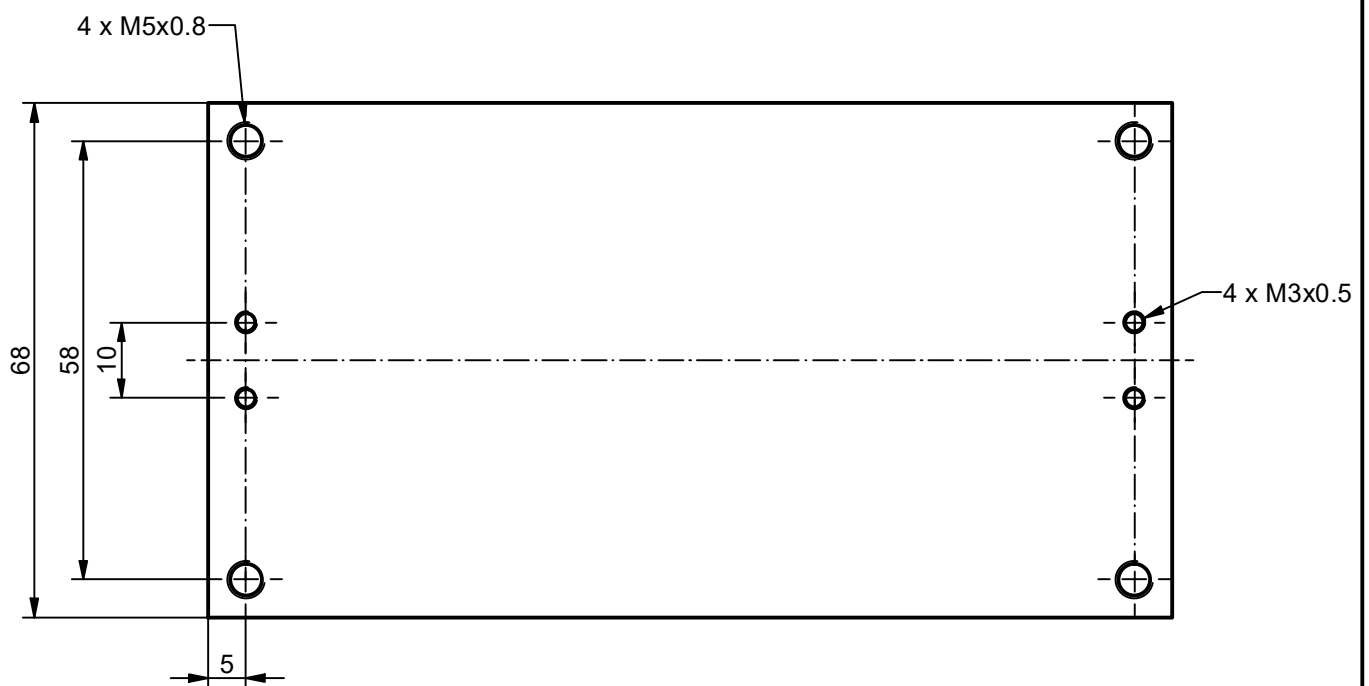
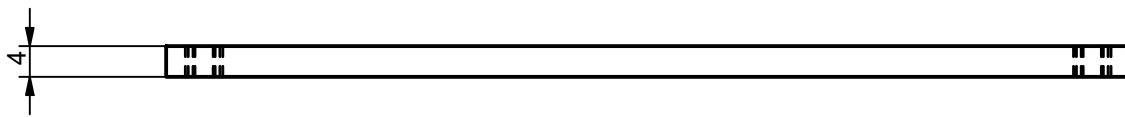
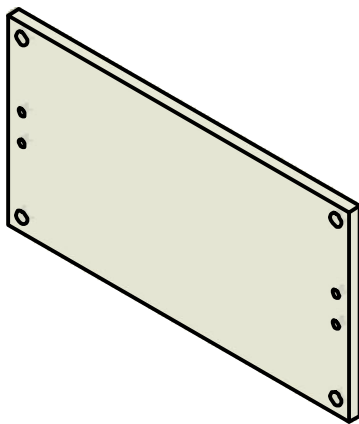
Mordaza para pandeo



UNIVERSIDAD DE JAÉN

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
LINARES

FECHA 10/09/2021	APELLIDOS, NOMBRE: Conde Calabrús, Antonio Jesús	FIRMA AJCC
ESCALA 2:1	Estudio de técnicas ópticas de medida de deformaciones mecánicas con cámaras térmicas	Nº DE PLANO 3 / 8



PLACA SUPERIOR



UNIVERSIDAD DE JAÉN

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
LINARES

FECHA
10/09/2021

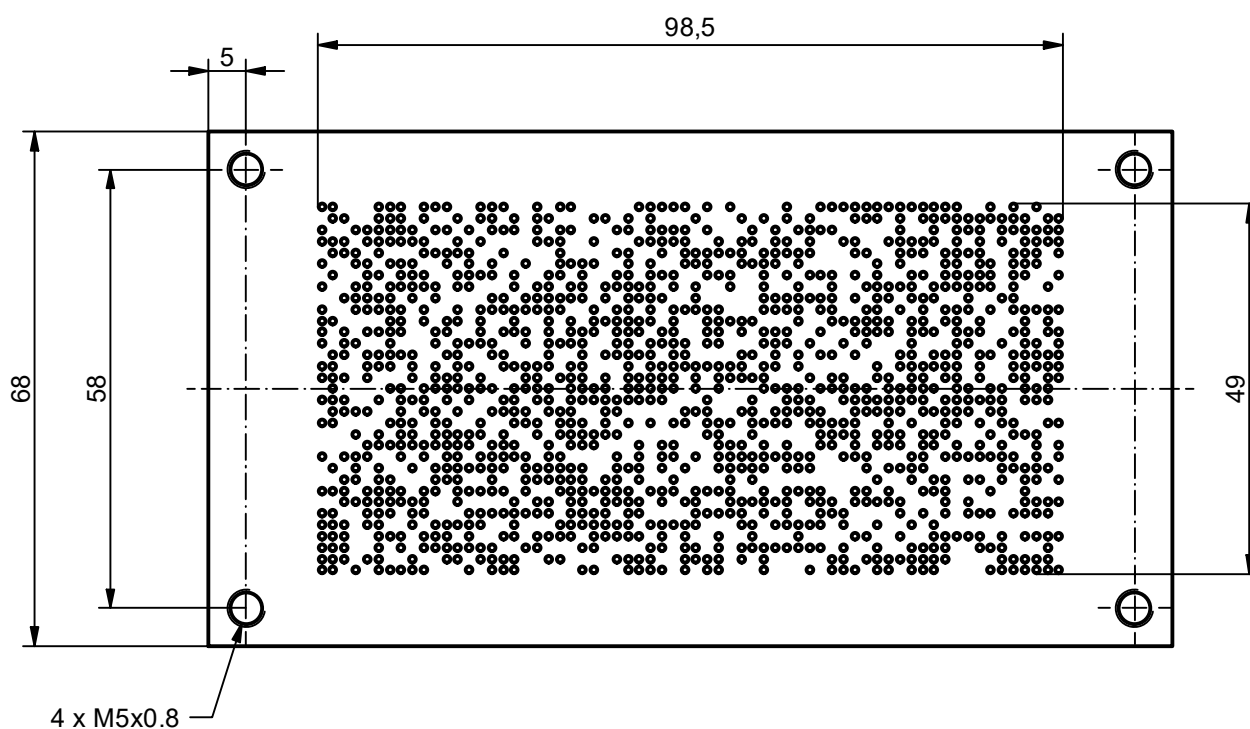
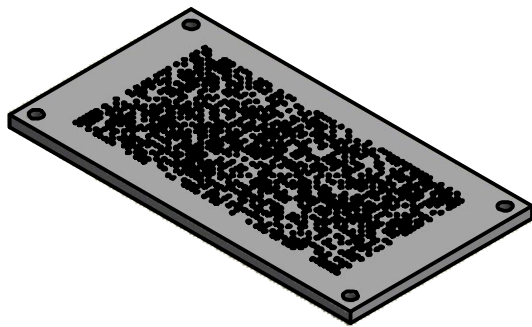
APELLIDOS, NOMBRE:
CONDE CALABRÚS, ANTONIO JESÚS

FIRMA
AJCC

ESCALA
1:1

Estudio de técnicas ópticas de medida de deformaciones
mecánicas con cámaras térmicas

Nº DE PLANO
4 / 8



PLACA MEDIA



UNIVERSIDAD DE JAÉN

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
LINARES

FECHA
10/09/2021

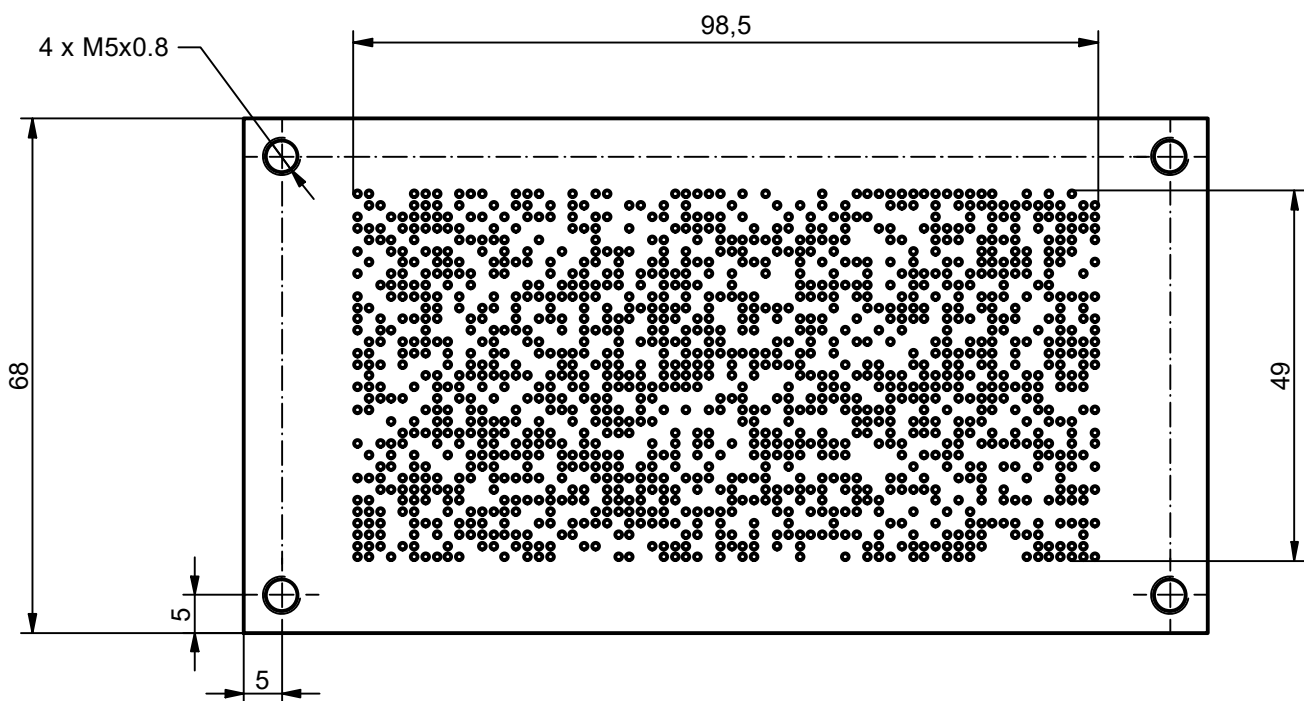
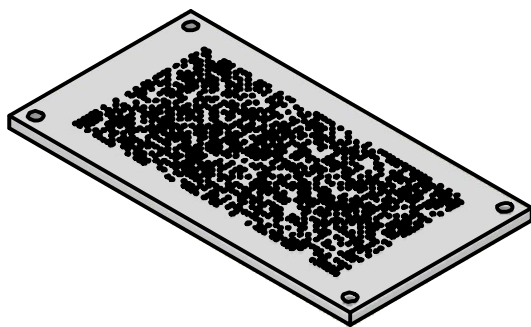
APELLIDOS, NOMBRE:
CONDE CALABRÚS, ANTONIO JESÚS

FIRMA
AJCC

ESCALA
1:1

Estudio de técnicas ópticas de medida de deformaciones
mecánicas con cámaras térmicas

Nº DE PLANO
5 / 8



PLACA INFERIOR



UNIVERSIDAD DE JAÉN

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
LINARES

FECHA
10/09/2021

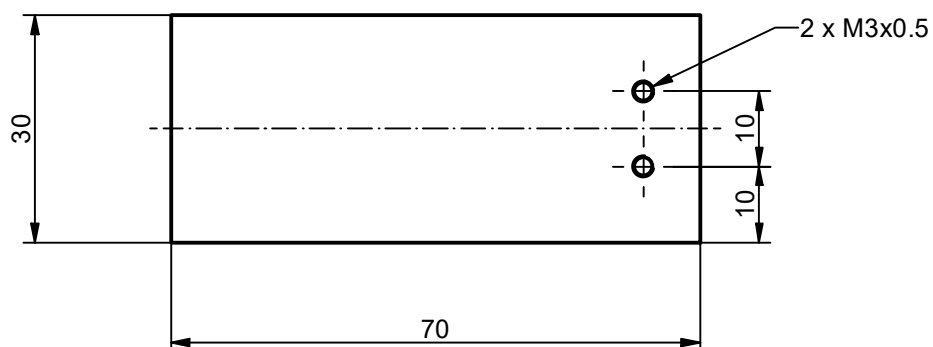
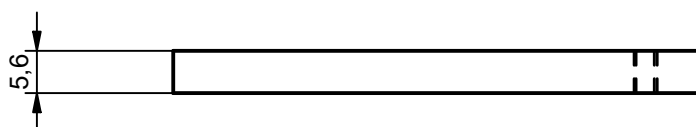
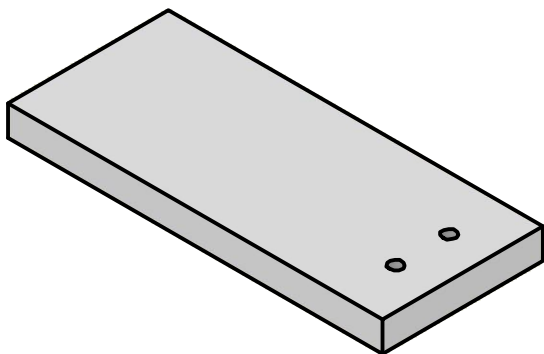
APELLIDOS, NOMBRE:
CONDE CALABRÚS, ANTONIO JESÚS

FIRMA
AJCC

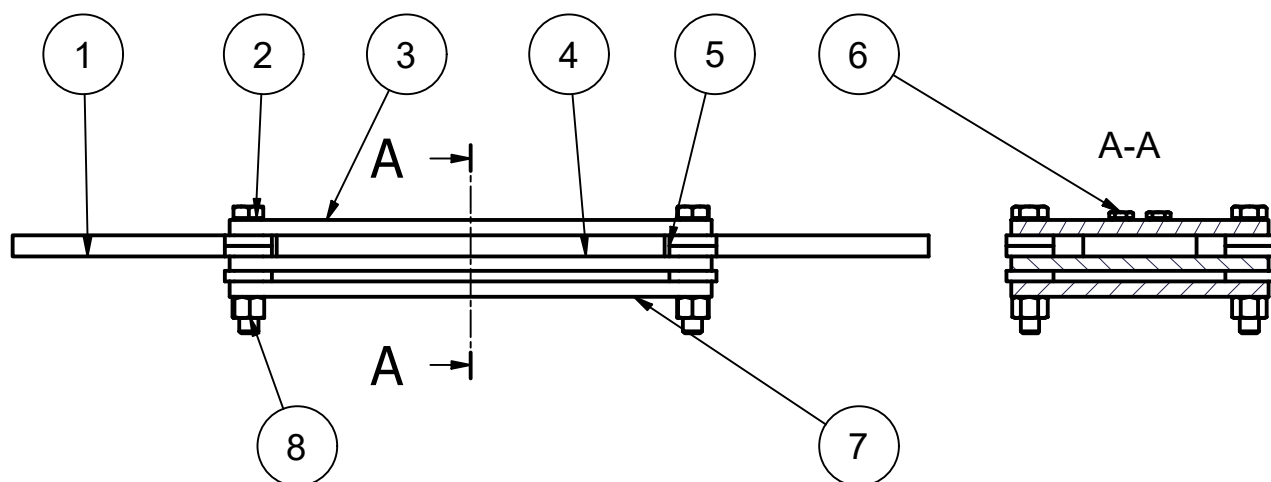
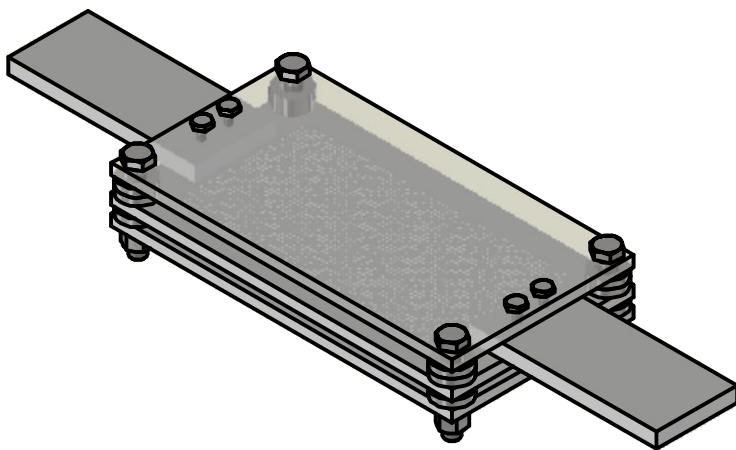
ESCALA
1:1

Estudio de técnicas ópticas de medida de deformaciones
mecánicas con cámaras térmicas

Nº DE PLANO
6 / 8



ASA		 ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES UNIVERSIDAD DE JAÉN
FECHA 10/09/2021	APELLIDOS, NOMBRE: CONDE CALABRÚS, ANTONIO JESÚS	FIRMA AJCC
ESCALA 1:1	Estudio de técnicas ópticas de medida de deformaciones mecánicas con cámaras térmicas	Nº DE PLANO 7 / 8



8	4	IS 1363-3 - M 5	Tuercas hexagonales
7	1	Placa inferior	
6	4	ISO 4017 - M3 x 8	Perno de cabeza-hex
5	12	IS 2016 - A6,6	Especificación para arandelas planas
4	1	Placa media	
3	1	Placa superior	
2	4	ISO 4017 - M5 x 30	Perno de cabeza-hex
1	2	Asa	
Marca	Ctd.	Designación	Descripción

ENSAMBLAJE DEL ÚTIL



UNIVERSIDAD DE JAÉN

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
LINARES

FECHA
10/09/2021

APELLIDOS, NOMBRE:
CONDE CALABRÚS, ANTONIO JESÚS

FIRMA
AJCC

ESCALA
1:2

Estudio de técnicas ópticas de medida de deformaciones
mecánicas con cámaras térmicas

Nº DE PLANO
8 / 8