



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO PUESTA A PUNTO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACIONES SIN CONTACTO BASADO EN IMAGEN

Autor: Federico Vasserot Tolmos

Director: Francisco José López Valdés

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**Puesta a punto de un sistema de medición de deformaciones sin contacto basado en
imagen**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2023/24 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Federico Vasserot Tolmos

Fecha: 22 / 07 / 2024

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Francisco José López Valdés

Fecha://



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO PUESTA A PUNTO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DEFORMACIONES SIN CONTACTO BASADO EN IMAGEN

Autor: Federico Vasserot Tolmos

Director: Francisco José López Valdés

Madrid

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mi tutor Francisco López Valdés por darme la posibilidad de realizar este proyecto y a Ema Jokūbaitytė por toda la ayuda que me ha brindado estos meses.

En segundo lugar, quiero dar las gracias a mis padres, Inmaculada e Ignacio, por ser un apoyo constante en el día a día, no solo durante este proyecto sino durante toda mi vida. Ellos son en gran medida los responsables de que sea como soy hoy y por ello les estaré eternamente agradecido.

En tercer lugar, quiero dar las gracias a mis hermanos, Ignacio y Rodrigo, por estar siempre dispuestos a ayudarme. Ambos han sido mis ejemplos a seguir durante toda mi carrera estudiantil y estoy seguro de que lo serán siempre.

También quiero acordarme de mis compañeros que me han acompañado en este camino y de los que he aprendido tanto. En especial a Beatriz Ordóñez Becker por ser un apoyo constante tanto dentro como fuera de ICAI y animarme siempre a sacar la mejor versión de mí.

Y, por último, pero no menos importante, quiero dar las gracias a Dios por guiarme siempre.

PUESTA A PUNTO DE UN SISTEMA ÓPTICO DE MEDICIÓN DE DEFORMACIONES

Autor: Vasserot Tolmos, Federico.

Director: López Valdés, Francisco José.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto se centra en la implementación de la correlación digital de imágenes como método alternativo al uso de extensómetros o galgas extensométricas en la medición de deformaciones durante un ensayo mecánico a tracción. Para ello, se han llevado a cabo pruebas sobre nueve probetas de aleación de aluminio y nueve probetas de acero al carbono usando ambos métodos con el objetivo de compararlos y verificar la hipótesis inicial sobre la viabilidad de la correlación digital de imágenes para medir deformaciones. Los ensayos han sido grabados con una cámara de alta velocidad. Las simulaciones se han llevado a cabo en el software Aramis, usando el programa GOM Correlate en el que, importando el vídeo del ensayo, se puede elaborar una historia temporal visual de las probetas ensayadas con un mapa de colores según el grado de deformación. Además, se ha analizado la influencia de dos parámetros (tamaño de puntos seleccionados por el programa y la distancia entre estos) en la precisión de los resultados obtenidos.

Palabras clave: Correlación digital de imágenes, GOM Correlate, deformación, ensayos a tracción.

1. Introducción

Desde hace mucho tiempo, la innovación en la tecnología se ha centrado en mejorar la calidad de vida y especialmente en la seguridad, desarrollando técnicas que aumenten la fiabilidad de los productos reduciendo la incertidumbre del fallo. En el campo de la ciencia de materiales, esta búsqueda ha sido crucial, enfocándose en desarrollar componentes que potencien sus propiedades y a su vez mejorar las técnicas de ensayo para analizarlas.

Uno de los avances que ha surgido y que puede ser muy útil en este ámbito es la correlación digital de imágenes. Esta técnica permite analizar el campo de trabajo de forma más completa que los extensómetros tradicionales. Para poder utilizar esta metodología, se debe llevar a cabo una preparación de las probetas que consiste en pintarlas de blanco y negro de tal forma que la muestra que con motas pequeñas de estos colores buscando generar un gran contraste.[1]

Este Proyecto de Fin de Grado se centra en la implementación de sistemas ópticos de medición en ensayos de tracción. Tras la puesta a punto de una cámara óptica y la optimización de parámetros para la obtención de datos, se compararán los resultados de los ensayos con los obtenidos mediante extensómetros tradicionales, utilizando la DIC.

El estudio se realizará con el software GOM Correlate, que analiza vídeos de los ensayos para medir la deformación de las probetas en función del tiempo seleccionando puntos o facetas sobre la superficie de control siguiendo unos parámetros de tamaño de faceta y distancia entre puntos. La tecnología DIC se optimizará para obtener resultados precisos, ajustando parámetros como posición, resolución y distancia focal. Esta técnica permite una representación clara y continua de la deformación, destacando las diferentes zonas con un código de colores. Además, proporciona una visión completa del comportamiento del material al medir múltiples puntos, y permite un análisis detallado de áreas críticas sin contacto directo con la probeta, evitando perturbaciones en su comportamiento.

2. Definición del proyecto

Este trabajo se enfoca en la implementación y evaluación de un sistema óptico de medición de deformaciones basado en la correlación digital de imágenes (DIC) en ensayos mecánicos de tracción. El objetivo principal es verificar la validez de la hipótesis formulada sobre la posibilidad de aplicar esta técnica para el cálculo de deformaciones como una alternativa precisa y no invasiva a los métodos tradicionales como los extensómetros y las galgas extensométricas, que presentan diversas limitaciones.[2] Utilizando una cámara de alta velocidad y el software GOM Correlate, se han realizado pruebas para obtener los valores con los que comparar con los resultados obtenidos del extensómetro. Se han estudiado tres combinaciones diferentes de parámetros del programa para demostrar cuales son los que nos aportan unos resultados más precisos. Además, se ha analizado la influencia del tamaño de patrón de preparación de las probetas. Los resultados demostraron la eficacia del sistema DIC en la obtención de mediciones detalladas y precisas de las deformaciones, validando su uso en aplicaciones industriales y de investigación.

3. Metodología

- Montaje de cámara y luces.
- Preparación de la probeta.
- Calibración de la cámara.
- Inicio del ensayo y grabación.
- Finalización del ensayo.
- Exportación del vídeo.
- Importación del vídeo a GOM Correlate.
- Elaboración de la simulación:



Figura 1. Pasos para realizar una simulación

4. Resultados

Para encontrar unos parámetros de GOM Correlate que aporten resultados precisos se han usado los ensayos realizados sobre probetas de aleación de aluminio. El primer índice de la probeta indica la distancia entre las mordazas de la máquina (1-70 mm, 2-100 mm y 3-150 mm) y el segundo hace referencia al tamaño del patrón de puntos (1 fino, 2 intermedio y 3 grueso).

Exp. No	ey (calculado en GOM), %						$\Delta e_{y_{max}}$ %		
	Min			Max					
	<i>fs10_pd10</i>	<i>fs15_pd15</i>	<i>fs20_pd20</i>	<i>fs10_pd10</i>	<i>fs15_pd15</i>	<i>fs20_pd20</i>	<i>fs10_pd10</i>	<i>fs15_pd15</i>	<i>fs20_pd20</i>
1,1	0	-0,001	0	3,644	3,591	3,644	114,036	51,867	3,598
1,2	0	0	0	4,585	4,582	4,594	22,443	8,423	2,582
1,3	-0,002	0	-0,003	3,841	3,803	3,777	28,872	7,842	3,506
2,1	0	-0,004	-0,004	3,130	3,131	3,146	5,359	2,965	1,566
2,2	0	0	0	3,621	3,623	3,600	5,178	6,270	3,812
2,3	0	0	0	3,577	3,538	3,541	11,005	2,948	2,542
3,1	-0,001	0	0	3,164	3,155	3,135	16,675	2,666	1,603
3,2	0	0	0	2,847	2,829	2,817	5,646	2,549	1,384
3,3	0	0	0	2,357	2,350	2,335	3,633	1,516	1,416

Tabla 1. Resultados de deformación probetas aleación de aluminio

Se puede ver como analizando el valor inicial y final no podemos diferenciar que combinación de parámetros es más precisa, pero si completamos la información aportada por el valor máximo del rango entre el máximo y el mínimo valor de deformación en la probeta en cada instante de tiempo, se puede ver que se obtiene una medida más exacta, con menor rango, si se usa tanto para el tamaño de puntos como para la distancia entre estos un valor de 20 píxeles. Esto tiene sentido ya que, al coger menos puntos, se reduce mucho el ruido.

Para verificar la hipótesis inicial sobre la validez del uso de la correlación digital de imágenes como alternativa a los extensómetros tradicionales se han utilizado los resultados obtenidos de los ensayos realizados sobre probetas de acero al carbono.

Exp. No	d, mm		Δd , mm	Error, %
	Extensómetro	GOM		
1,1	0,605	0,664	0,059	9,76
1,2	0,752	0,713	-0,039	-5,12
1,3	0,657	0,662	0,005	0,72
2,1	0,670	0,696	0,026	3,83
2,2	0,672	0,688	0,016	2,35
2,3	0,646	0,695	0,049	7,64
3,1	0,780	0,660	-0,120	-15,35
3,2	0,609	0,714	0,105	17,32
3,3	0,620	0,542	-0,079	-12,70

Tabla 2. Resultados de desplazamiento probetas de acero al carbono

Se puede ver como los valores obtenidos por los dos métodos tienen un error pequeño para los seis primeros casos. Los tres últimos casos el error es un poco mayor que se debe a que para poder capturar la probeta en su totalidad en el plano de la cámara sin desplazarla se debe abrir el plano de visión lo que provoca una ligera distorsión de la imagen aumentando el ruido y la inestabilidad. Aun así, todos los errores están dentro del posible rango de error de 0,5% sobre la longitud base del extensómetro usado. Eso se corresponde con un error de 0,25 mm.

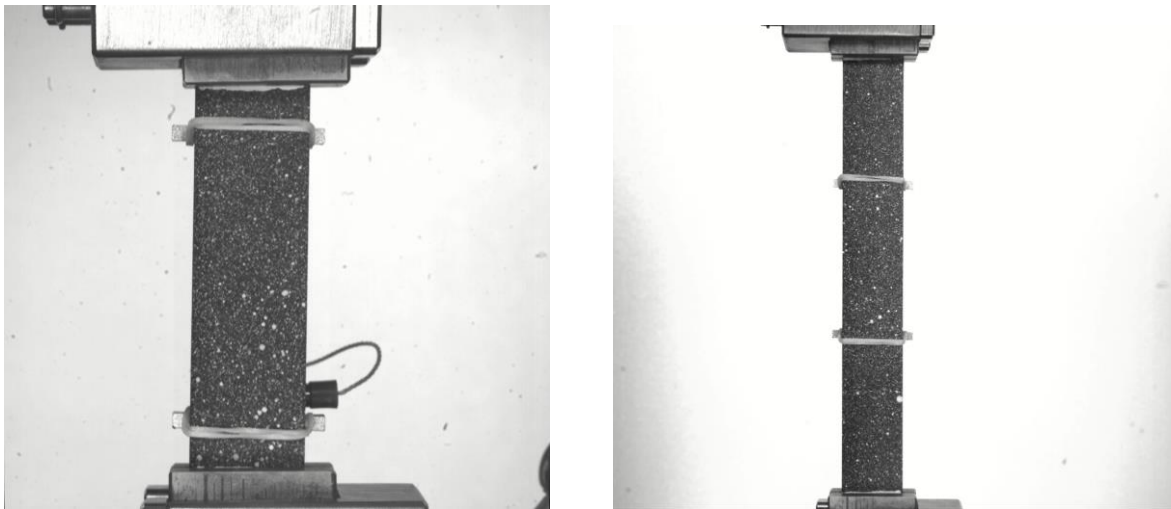


Figura 2. Diferencia entre la apertura del plano de visión entre los casos 1 y los casos 3

5. Conclusiones

Objetivo 1: Validez de la utilización de la correlación digital de imágenes como alternativa a extensómetros para medición de deformaciones.

Cumplido, se ha comprobado que ambas técnicas dan resultados muy similares de deformación.

Objetivo 2: Búsqueda de una combinación de parámetros en GOM Correlate con la que se obtengan resultados precisos

Cumplido, se han analizado medidas con tres pares distintos de parámetros y se ha elegido la configuración con la que se obtienen resultados más precisos.

Objetivo 3: Influencia de la variación del tamaño del patrón de puntos

Cumplido, se ha comprobado que el tamaño del patrón no influye de una forma clara en el resultado siempre y cuando no haya zonas de la probeta en las que predomine uno de los dos colores.

6. Referencias

- [1] S. Szalai, S. K. Szürke, D. Harangozó, and S. Fischer, “Investigation of deformations of a lithium polymer cell using the Digital Image Correlation Method (DICM),” *Reports in Mechanical Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 116–134, 2022, doi: 10.31181/rme20008022022s.
- [2] E. López-Alba,) R López-García, R. Dorado, and F. A. Díaz, “Aplicación de correlación digital de imágenes para el análisis de problemas de contacto”.

DEVELOPMENT OF AN OPTICAL DEFORMATION MEASUREMENT SYSTEM

Author: Vasserot Tolmos, Federico.

Supervisor: López Valdés, Francisco José.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

ABSTRACT

This project focuses on implementing digital image correlation as an alternative method to using strain gauges or extensometers in measuring deformations during tensile mechanical testing. To achieve this, tests were conducted on nine aluminium alloy specimens and nine carbon steel specimens using both methods to compare and verify the initial hypothesis regarding the feasibility of digital image correlation for deformation measurement. The tests were recorded using a high-speed camera. Simulations were performed using Aramis software, specifically the GOM Correlate program, which imports the test video to create a visual temporal history of the tested specimens with a colour map indicating the degree of deformation. Additionally, a pair of parameters (size of points selected by the program and the distance between them) has been determined to achieve the most accurate results.

Keywords: Digital image correlation, GOM Correlate, deformation, tensile mechanical test.

1. Introduction

Since long time ago, technological innovation has focused on improving quality of life, particularly in enhancing safety by developing techniques that increase product reliability and reduce failure uncertainty. In the field of materials science, this pursuit has been crucial, emphasizing the development of components that enhance their properties and improve testing techniques for their analysis.

One significant advancement that has emerged and can be highly beneficial in this field is digital image correlation (DIC). This technique allows for a more comprehensive analysis of the work field compared to traditional extensometers. To utilize this methodology, specimens must undergo preparation where they are painted in black and white with small specks of these colours to generate high contrast.[1]

This bachelor's thesis project focuses on implementing optical measurement systems in tensile testing. Following the calibration of an optical camera and optimization of parameters for data acquisition, the results of tests will be compared with those obtained using traditional extensometers, employing DIC. The study will be conducted using GOM Correlate software, which analyses test videos to measure specimen deformation over time by selecting points or facets on the control surface based on facet size and distance between points parameters. DIC technology will be fine-tuned to achieve precise results, adjusting parameters such as position, resolution, and focal distance. This technique provides a clear, continuous representation of deformation, highlighting different areas with a color-coded system. Furthermore, it offers a comprehensive view

of material behaviour by measuring multiple points and allows detailed analysis of critical areas without direct contact with the specimen, thus avoiding disturbances in its behaviour.

2. Definition of the project

This project focuses on the implementation and evaluation of an optical deformation measurement system based on digital image correlation (DIC) in tensile mechanical tests. The main objective is to verify the validity of the hypothesis regarding the potential of applying this technique for calculating deformations as a precise and non-invasive alternative to traditional methods such as extensometers and strain gauges, which present various limitations[2]. Using a high-speed camera and GOM Correlate software, tests were conducted to obtain values for comparison with those obtained from the extensometer. Three different combinations of program parameters were studied to determine which ones provide the most accurate results. Additionally, the influence of the preparation pattern size of the specimens was analysed. The results demonstrated the effectiveness of the DIC system in obtaining detailed and precise deformation measurements, validating its use in industrial and research applications.

3. Methodology

- Camera and light set up.
- Specimen preparation.
- Camera calibration.
- Test and recording initiation.
- Test completion.
- Video export.
- Video import to GOM Correlate.
- Simulation preparation:



Figure 1. Steps to run a simulation

4. Results

To find GOM Correlate parameters that provide precise results, tests were conducted on aluminum alloy specimens. The first index of the specimen indicates the distance between the machine's jaws (1-70 mm, 2-100 mm, and 3-150 mm), and the second refers to the size of the dot pattern (1 fine, 2 intermediate, and 3 coarse).

Exp. No	ey (calculated en GOM), %						$\Delta e_{\max}$, %		
	Min			Max					
	fs10_pd10	fs15_pd15	fs20_pd20	fs10_pd10	fs15_pd15	fs20_pd20	fs10_pd10	fs15_pd15	fs20_pd20
1,1	0	-0,001	0	3,644	3,591	3,644	114,036	51,867	3,598
1,2	0	0	0	4,585	4,582	4,594	22,443	8,423	2,582
1,3	-0,002	0	-0,003	3,841	3,803	3,777	28,872	7,842	3,506
2,1	0	-0,004	-0,004	3,130	3,131	3,146	5,359	2,965	1,566
2,2	0	0	0	3,621	3,623	3,600	5,178	6,270	3,812
2,3	0	0	0	3,577	3,538	3,541	11,005	2,948	2,542
3,1	-0,001	0	0	3,164	3,155	3,135	16,675	2,666	1,603
3,2	0	0	0	2,847	2,829	2,817	5,646	2,549	1,384
3,3	0	0	0	2,357	2,350	2,335	3,633	1,516	1,416

Table 1. Deformation results of aluminum alloy specimens

Analyzing the initial and final values alone does not allow us to differentiate which combination of parameters is more precise. However, if we supplement the information with the maximum range value between the maximum and minimum deformation values of the specimen at each time instant, we can see that a more accurate measurement with a smaller range is obtained when using a point size and spacing of 20 pixels. This makes sense since using fewer points significantly reduces noise.

To verify the initial hypothesis about the validity of using digital image correlation as an alternative to traditional extensometers, results from tests conducted on carbon steel specimens were used.

Exp. No	d, mm		Δd , mm	Error, %
	Extensometer	GOM		
1,1	0,605	0,664	0,059	9,76
1,2	0,752	0,713	-0,039	-5,12
1,3	0,657	0,662	0,005	0,72
2,1	0,670	0,696	0,026	3,83
2,2	0,672	0,688	0,016	2,35
2,3	0,646	0,695	0,049	7,64
3,1	0,780	0,660	-0,120	-15,35
3,2	0,609	0,714	0,105	17,32
3,3	0,620	0,542	-0,079	-12,70

Table 2. Carbon steel specimen displacement results

It can be seen that the values obtained by both methods have a small error for the first six cases. The error is slightly higher in the last three cases, which is due to the need to widen the field of view to capture the entire specimen in the camera's plane without moving it, causing slight image distortion and increasing noise and instability. Even so, all errors are within the possible error range of 0.5% on the base length of the extensometer used. This corresponds to an error of 0.25 mm.

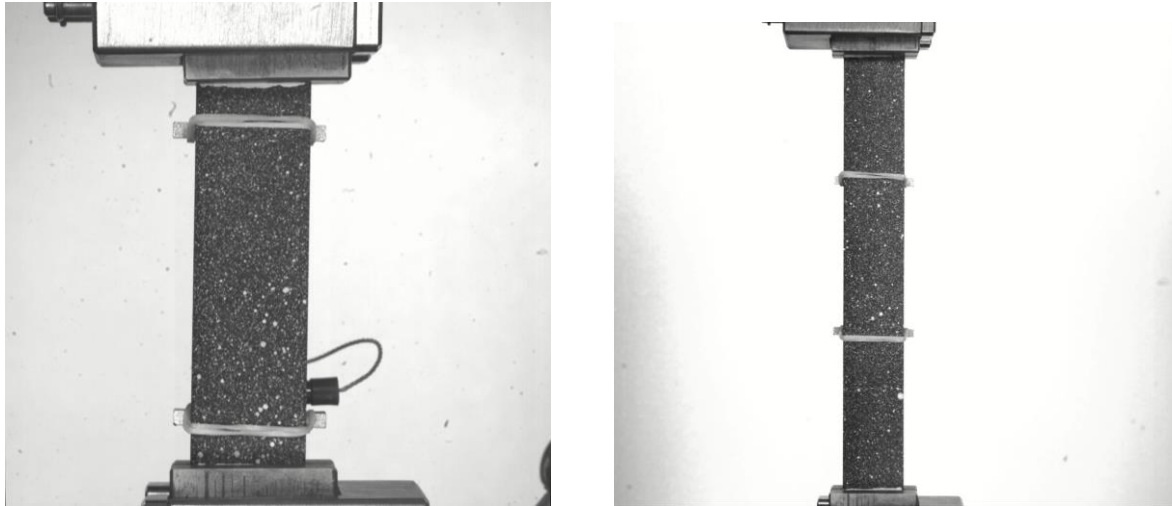


Figure 2. Difference between the opening of the plane of vision of cases 1 and 3

5. Conclusions

Objective 1: *Validate the use of digital image correlation (DIC) as an alternative to extensometers for deformation measurement*

Achieved: It has been verified that both techniques provide very similar deformation results.

Objective 2: *Finding a combination of parameters in GOM Correlate that yields precise results*

Achieved: Measurements with three different pairs of parameters were analysed, and the configuration that produced the most accurate results was selected.

Objective 3: *Influence of variation in the size of the point pattern*

Achieved: It has been confirmed that the pattern size does not significantly influence the results if there are no areas of the specimen dominated by one of the two colours.

6. Referencias

- [1] S. Szalai, S. K. Szürke, D. Harangozó, and S. Fischer, "Investigation of deformations of a lithium polymer cell using the Digital Image Correlation Method (DICM)," *Reports in Mechanical Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 116–134, 2022, doi: 10.31181/rme20008022022s.
- [2] E. López-Alba,) R López-García, R. Dorado, and F. A. Díaz, "Aplicación de correlación digital de imágenes para el análisis de problemas de contacto".

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	8
1.1 Motivación del proyecto.....	9
1.2 Ámbito del proyecto.....	11
Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....	12
2.1 Bancada de ensayo de tracción.....	12
2.2 Cámara de alta velocidad	14
2.3 Software GOM Correlate	15
2.4 Extensómetro.....	17
Capítulo 3. Estado de la Cuestión	19
Capítulo 4. Definición del Trabajo	25
4.1 Justificación.....	25
4.2 Objetivos	27
4.3 Datos.....	28
4.3.1 Probetas de acero al carbono	30
4.3.2 Probetas de aleación de aluminio	31
Capítulo 5. Metodología	33
5.1 Desarrollo de los ensayos	33
5.1.1 Posición de la cámara	34
5.1.2 Preparación de las probetas.....	37
5.1.3 Montaje y ensayo.....	38
5.2 Desarrollo de las simulaciones	40
Capítulo 6. Análisis de Resultados.....	45
6.1 Evaluación de la influencia de los parámetros en los resultados obtenidos con las probetas de aleación de aluminio	45
6.1.1 Probeta 1.1	46
6.1.2 Probeta 1.2	49
6.1.3 Probeta 1.3	52
6.1.4 Probeta 2.1	55

6.1.5 Probeta 2.2	58
6.1.6 Probeta 2.3	61
6.1.7 Probeta 3.1	64
6.1.8 Probeta 3.2	67
6.1.9 Probeta 3.3	70
6.1.10 Medidas de desplazamiento y deformación de cada caso	73
6.2 Comparación de los resultados obtenidos con GOM Correlate y con el extensómetro de las probetas de acero.....	75
6.2.1 Probeta 1.1	77
6.2.2 Probeta 1.2	78
6.2.3 Probeta 1.3	79
6.2.4 Probeta 2.1	80
6.2.5 Probeta 2.2	81
6.2.6 Probeta 2.3	82
6.2.7 Probeta 3.1	83
6.2.8 Probeta 3.2	84
6.2.9 Probeta 3.3	85
6.2.10 Resultados de las gráficas sincronizadas.....	86
Capítulo 7. Conclusiones y Líneas Futuras	91
7.1 Posibilidad de usar la DIC como método alternativo para medición de deformaciones.	91
7.2 Combinación de parámetros de simulación en GOM Correlate.....	95
7.3 Influencia de la variación del tamaño del patrón de puntos	97
7.4 Líneas Futuras	98
Capítulo 8. Bibliografía.....	100
ANEXO I- Objetivos de desarrollo sostenible.....	103
ANEXO II- Probetas post-ensayo	105
ANEXO III – Checklist	108

Índice de figuras

Figura 1 Ejemplo de cámara 3D ARAMIS [3].....	10
Figura 2. Ejemplo de extensómetro [4]	10
Figura 3. Cabezal a usar en los ensayos	12
Figura 4. Ejemplo de máquina Ibertest Testcom.....	13
Figura 5. Cámara Photron Fastcam SA3	14
Figura 6. Objetivo de la cámara.....	15
Figura 7. Elección estocástica de facetas.....	17
Figura 8. Extensómetro Ibertest IB-EBC-50-10.....	18
Figura 9. Primera máquina de ensayos de tracción con medición de fuerza electrónica (Z600)[11]	20
Figura 10. Ejemplo de preparación aleatoria de la probeta [12]	21
Figura 11. Faceta pequeña.....	22
Figura 12. Faceta grande	22
Figura 13. Diferencia entre el uso de uno cámara o dos cámaras	23
Figura 14. Probetas acero 1	30
Figura 15. Probetas acero 2	30
Figura 16. Probetas acero 3	31
Figura 17. Probetas aluminio 1.....	31
Figura 18. Probetas aluminio 2.....	32
Figura 19. Probetas aluminio 3.....	32
Figura 20. Alineamiento del carro de luces.....	35
Figura 21. Alineamiento de la cámara.....	35
Figura 22. Nivelado de la cámara.....	36
Figura 23. Comprobación de perpendicularidad	36
Figura 24. Cabezales de la máquina	38
Figura 25. Pantalla principal GOM Correlate	40
Figura 26. Asignación de escala	41
Figura 27. Definición de la superficie de control	42

Figura 28. Representación de la deformación porcentual en el eje Y	43
Figura 29. Representación exclusivamente de la superficie de control.....	43
Figura 30. Diagrama deformación porcentual/tiempo.....	44
Figura 31. Probeta aluminio 1.1 f_10 d_10	46
Figura 32. Probeta aluminio 1.1 f_15 d_15	47
Figura 33. Probeta aluminio 1.1 f_20 d_20	48
Figura 34. Probeta aluminio 1.2 f_10 d_10	49
Figura 35. Probeta aluminio 1.2 f_15 d_15	50
Figura 36. Probeta aluminio 1.2 f_20 d_20	51
Figura 37. Probeta aluminio 1.3 f_10 d_10	52
Figura 38. Probeta aluminio 1.3 f_15 d_15	53
Figura 39. Probeta aluminio 1.3 f_20 d_20	54
Figura 40. Probeta aluminio 2.1 f_10 d_10	55
Figura 41. Probeta aluminio 2.1 f_15 d_15	56
Figura 42. Probeta aluminio 2.1 f_20 d_20	57
Figura 43. Probeta aluminio 2.2 f_10 d_10	58
Figura 44. Probeta aluminio 2.2 f_15 d_15	59
Figura 45. Probeta aluminio 2.2 f_20 d_20	60
Figura 46. Probeta aluminio 2.3 f_10 d_10	61
Figura 47. Probeta aluminio 2.3 f_15 d_15	62
Figura 48. Probeta aluminio 2.3 f_20 d_20	63
Figura 49. Probeta aluminio 3.1 f_10 d_10	64
Figura 50. Probeta aluminio 3.1 f_15 d_15	65
Figura 51. Probeta aluminio 3.1 f_20 d_20	66
Figura 52. Probeta aluminio 3.2 f_10 d_10	67
Figura 53. Probeta aluminio 3.2 f_15 d_15	68
Figura 54. Probeta aluminio 3.2 f_20 d_20	69
Figura 55. Probeta aluminio 3.3 f_10 d_10	70
Figura 56. Probeta aluminio 3.3 f_15 d_15	71
Figura 57. Probeta aluminio 3.3 f_20 d_20	72

Figura 58. Probeta 1.1 original	77
Figura 59. Probeta 1.1 gráficas sincronizadas	77
Figura 60. Probeta 1.2 original	78
Figura 61. Probeta 1.2 gráficas sincronizadas	78
Figura 62. Probeta 1.3 original	79
Figura 63. Probeta 1.3 gráficas sincronizadas	79
Figura 64. Probeta 2.1 original	80
Figura 65. Probeta 2.1 gráficas sincronizadas	80
Figura 66. Probeta 2.2 original	81
Figura 67. Probeta 2.2 gráficas sincronizadas	81
Figura 68. Probeta 2.3 original	82
Figura 69. Probeta 2.3 gráficas sincronizadas	82
Figura 70. Probeta 3.1 original	83
Figura 71. Probeta 3.1 gráficas sincronizadas	83
Figura 72. Probeta 3.2 original	84
Figura 73. Probeta 3.2 gráficas sincronizadas	84
Figura 74. Probeta 3.3 original	85
Figura 75. Probeta 3.3 gráficas sincronizadas	85
Figura 76. Diferencia entre vídeo 1.1 y vídeo 3.1	88
Figura 77. Comparativa del desplazamiento del extensómetro y desplazamiento de la máquina 1.1	89
Figura 78. Ejemplo de gráficas de GOM originales y sincronizadas	92
Figura 79. Distinción zonas de las gráficas sincronizadas	92
Figura 80. Comparativa entre principio y final de la zona 1	93
Figura 81. Ejemplo de malla defectuosa con tamaño de puntos 10 y distancia entre puntos 10	96
Figura 82. Ejemplo de malla de alta calidad con tamaño de puntos 20 y distancia entre puntos 20	96
Figura 83. Patrones probetas de aluminio	97
Figura 84. Patrones probetas de acero	98

Figura 85. Objetivos de Desarrollo Sostenible	103
Figura 86. Probetas 1 aluminio post-ensayo.....	105
Figura 87. Probetas 2 aluminio post-ensayo.....	105
Figura 88. Probetas 3 aluminio post-ensayo.....	106
Figura 89. Probetas 1 acero post-ensayo	106
Figura 90. Probetas 2 acero post-ensayo	107
Figura 91. Probetas 3 acero post-ensayo	107

Índice de tablas

Tabla 1. Datos probetas	29
Tabla 2. Medida desplazamientos y deformación probetas aluminio	73
Tabla 3. Comparativa valores min/max deformación en GOM	74
Tabla 4. Rango máximo de la medida de deformación en cada caso	75
Tabla 5. Errores y medidas de desplazamiento final	86
Tabla 6. Deformación porcentual GOM para cada probeta de acero	89
Tabla 7. Error entre la deformación porcentual de GOM y del extensómetro	90

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Desde hace mucho tiempo, la tecnología ha sido aplicada para la evolución de técnicas usadas en el día a día. Siempre se busca mediante la investigación y la innovación mejorar la calidad de vida de las personas. En especial, uno de los ámbitos en los que más se centra la innovación es el de la seguridad. Esta se focaliza en encontrar nuevas técnicas y tecnologías que nos permitan aumentar la fiabilidad para disminuir la incertidumbre del fallo y así dar tranquilidad a la sociedad.

En concreto, en el campo de los materiales esto ha sido la cuestión central de investigación desde hace años. La búsqueda de nuevos materiales se centra en el desarrollo de componentes que potencien las propiedades de estos rigiéndose por unas exigencias y objetivos determinados. En relación con esto, las técnicas de ensayos para analizar las características de los materiales también han ido evolucionando de la mano con el objetivo final de modelar las propiedades de estos. Aunque, no solo se ha focalizado el estudio en esto sino que también se ha puesto énfasis en el estudio de los materiales ya conocidos para ver cómo se comportan ante diferentes escenarios.

La cuestión sobre la que este Proyecto de Fin de Grado busca aportar conocimiento es la implementación de sistemas ópticos de medición en los ensayos a tracción. La intención es que, tras la puesta a punto de la cámara óptica y optimización de los parámetros utilizados en la obtención de datos, se puedan comparar los resultados de los ensayos realizados en una bancada usando esta técnica con los valores obtenidos con la utilización de extensómetros tradicionales. Para ello, se utilizará la correlación digital de imágenes. La investigación se llevará a cabo para comprobar si los resultados y conclusiones son similares entre los dos métodos a utilizar para la medida de las deformaciones.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

El ámbito de la ciencia de materiales ha sido vital desde siempre y su estudio se ha ido desarrollando de forma continua con la aparición de máquinas y metodologías que han facilitado el estudio en este campo. Siempre se ha buscado conocer las propiedades de los materiales y su reacción frente a diferentes sucesos externos que perturban su estado.

El motivo de este proyecto es la puesta a punto de los parámetros de un sistema óptico de alta velocidad para posteriormente realizar ensayos de tracción con probetas planas para poder realizar un estudio de la deformación de estas. Este estudio se llevará a cabo con el programa GOM CORRELATE que nos permite analizar el vídeo grabado durante el ensayo y realizar mediciones de la deformación de la pieza en función del tiempo.

La puesta a punto de la tecnología de Correlación Digital de Imágenes (DIC) se realizará buscando optimizar la exactitud de los resultados teniendo en cuenta parámetros a modificar de la misma como pueden ser la posición, resolución, distancia focal, etc. Con este aparato de medida optimizado, realizando buenos ensayos se podrá obtener una representación más clara de los resultados ya que se podrá ver con el análisis de fotos la evolución de la deformación hasta rotura de forma continua con un código de colores que indique las zonas más frágiles. De esta forma se conocerá con mayor exactitud el proceso de deformación de los materiales, así como sus propiedades.

La precisión de la medición es uno de los motivos principales para el uso de la tecnología DIC en lugar del extensómetro ya que con ella tenemos la capacidad de medir más puntos por lo que se proporciona una visión más completa del comportamiento del material. Así mismo, se puede focalizar el estudio en zonas más pequeñas dentro de la pieza para analizar de forma locales aquellos lugares donde la deformación sea más crítica. Por otro lado, al usar la tecnología DIC se elimina el contacto directo con la probeta a ensayar reduciendo las posibles perturbaciones en el comportamiento del material.



Figura 1 Ejemplo de cámara 3D ARAMIS [3]

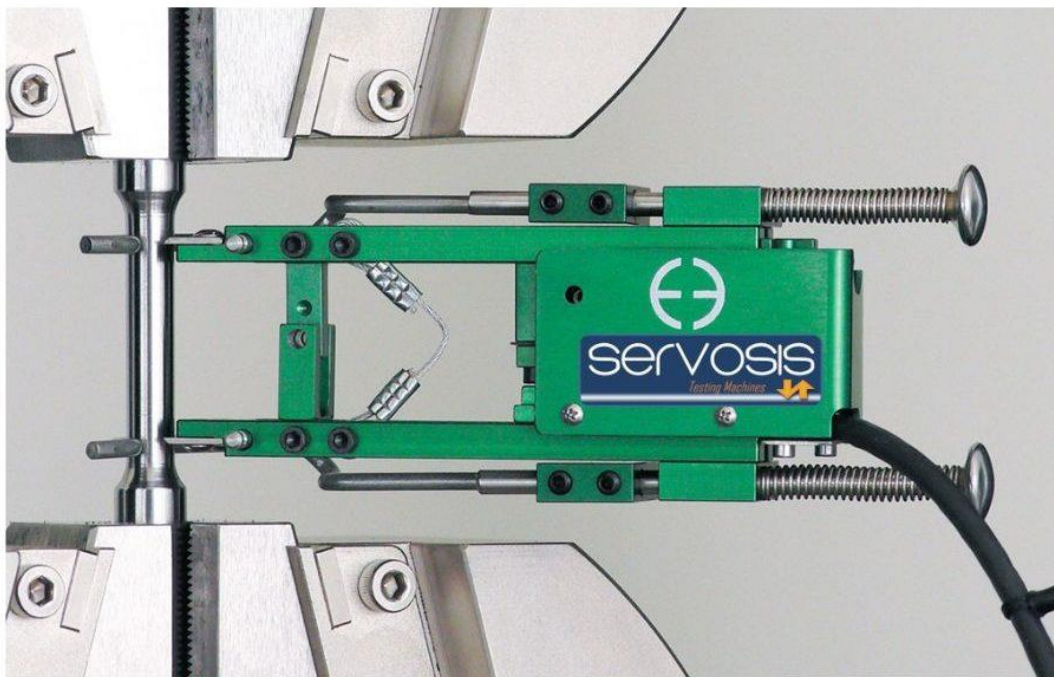


Figura 2. Ejemplo de extensómetro [4]

1.2 ÁMBITO DEL PROYECTO

El ámbito de este proyecto es la puesta a punto de un sistema óptico que facilite la medición de las deformaciones sin contacto en los ensayos de tracción.

Para lograrlo, se va a proceder al uso del software ARAMIS. Unas probetas planas serán ensayadas a tracción en una bancada haciendo uso de extensómetros tradicionales y una cámara óptica de alta velocidad que, trazando una nube de puntos elegidos sobre la pieza a ensayar y con la ayuda del programa GOM CORRELATE, se analizarán las grabaciones de los ensayos y se estudiarán las variaciones sufridas en esos puntos. Además, se proporcionarán los datos relevantes sobre la resistencia del material o información sobre las deformaciones en la probeta provocadas por la acción de la fuerza aplicada en los ensayos.

Los resultados obtenidos debido a ambas metodologías serán comparados para verificar si la puesta a punto del sistema óptico es correcta y si se asemejan los valores obtenidos por los dos métodos. Este es el objetivo general del trabajo; comprobar la posibilidad de usar la correlación digital de imágenes como método alternativo para medición de deformaciones.

Para ello primero se debe comprender el funcionamiento del software GOM Correlate con el que se analizarán los vídeos de los ensayos grabados en el laboratorio con la cámara de alta velocidad.

Además, se han planteado otros objetivos específicos como son:

- Estudio de la influencia del cambio de parámetros de simulación del programa en la calidad de los resultados y la posible fluctuación de los mismos dependiendo de la configuración.
- Comparación entre los resultados obtenidos usando diferentes tipos de preparación de muestras.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

2.1 BANCADA DE ENSAYO DE TRACCIÓN

Para la realización de los ensayos se utilizará una máquina de ensayo electromecánica de la marca Ibertest. El modelo de la máquina es Testcom-10 del año 2022. Viene acompañada de una gran variedad de accesorios que permite realizar diferentes tipos de ensayos, ya sean de tracción, compresión o flexión. Estos accesorios son intercambiables y se acoplan a la máquina mediante el uso de pasadores. En este caso, se utilizarán las mordazas que permiten ajustar probetas planas de forma que se pueda el plano de la cara más ancha sea normal al objetivo de la cámara con la que se grabará la secuencia.



Figura 3. Cabezal a usar en los ensayos

Esta máquina es capaz de analizar probetas de diversas dimensiones, tamaños y formas de preparación: probetas normalizadas, con cabeza roscada o mecanizada, planas, soldadas, uniones metálicas mecánicas, uniones adhesivas, etc. Además, se puede ensayar todo material que por sus dimensiones de la probeta encaje en la capacidad máxima de la

máquina: acero, elastómeros, madera, goma, aluminio, materiales compuestos, titanio, plásticos, biomateriales, etc.

Los ensayos se controlan desde un ordenador conectado a la bancada desde donde se controlan los parámetros del experimento como puede ser la separación de las mordazas y la velocidad de deformación deseada. El programa utilizado proporciona gráficas secuenciales de desplazamiento en mm y deformación porcentual en función del tiempo que se va actualizando a lo largo del ensayo desde el inicio hasta la rotura de la pieza analizada. Además, permite extraer esos datos en forma de documento Excel para que, posterior al ensayo, se puedan analizar las propiedades de los materiales. La fuerza máxima que soporta la máquina son 10 kN. [5]



Figura 4. Ejemplo de máquina Ibertest Testcom

2.2 CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD

Para la grabación del ensayo se hará uso de una cámara de alta velocidad para posteriormente poder hacer el análisis de la probeta a través del vídeo. El dispositivo a utilizar será una cámara Photron Fastcam SA3[6]. Está diseñada para capturar imágenes en situaciones donde se requiere una alta velocidad de fotogramas (2000 fps). La resolución se puede variar según los resultados que se quieran obtener partiendo de una resolución de 1024 x 1024 píxeles. Entre las mayores ventajas que tiene el uso de esta cámara, además de la ya mencionada variabilidad de resolución, se debe destacar la capacidad de variabilidad de entrada de luz al objetivo lo que permite que se puede trabajar en entornos oscuro o muy luminosos. A este tipo de cámaras se les puede incorporar objetivos para aumentar la calidad del vídeo, ya que a veces se debe buscar un punto de equilibrio entre la distancia del dispositivo a la probeta, el zoom, el enfoque, etc. Aquí es donde se va a permitir capturar vídeos diferentes para buscar la configuración óptima.[7]



Figura 5. Cámara Photron Fastcam SA3



Figura 6. Objetivo de la cámara

También hay que señalar que una vez grabado el vídeo se pueden modificar algunos parámetros en la exportación del mismo; desde la resolución, la calidad, la velocidad, etc.

2.3 SOFTWARE GOM CORRELATE

Para el análisis de los ensayos de tracción se utilizará el programa GOM Correlate que se basa en la correlación digital de imágenes para ver el comportamiento de las probetas ensayadas. Se estudiará la evolución de la deformación que sufren las piezas durante el tiempo que se ejerce una fuerza sobre ellas, desde el inicio del experimento hasta alcanzar el punto de rotura. Además, se obtendrán datos como la velocidad de deformación entre otros que influyen en las propiedades del material.

Los sistemas Aramis son sistemas de medición sin contacto que, independientemente del material, se basan en la correlación de imágenes para obtener sus resultados. Las soluciones que son extraídas mediante el análisis de la variación en la deformación de puntos o secciones específicas de la pieza ensayada. Gracias a esto, permiten medir desde probetas de escasos milímetros hasta objetos de varios metros.

El software permite evaluar cuerpos tanto en 2D como en 3D. La gran diferencia entre ambos casos es que, si se desea un análisis en 3D, se requerirá el uso de dos cámaras de alta velocidad para abarcar así la dimensión de la profundidad de la probeta. [1]

Para este trabajo se ha utilizado la versión profesional de este programa, aunque existe una versión educacional del mismo que nos permitiría llevar a cabo la realización de una simulación completa, algunas características necesarias para el estudio solo están disponibles en la versión profesional.

Entre los requisitos necesarios que debe incluir el sistema informático para poder instalar el programa son:

- Procesador Intel Core i3
- 4 GB de memoria RAM
- Tarjeta gráfica compatible con OpenGL
- Windows 10 (64 Bit 21H2) con actualizaciones de seguridad actuales

Cabe resaltar que la empresa recomienda el uso de un procesador Intel Core i9/Xeon (16 núcleos) además de por lo menos 64 GB de memoria RAM.

El funcionamiento del programa consta de la importación de una secuencia de imágenes en formato jpg, png o tiff, estos dos últimos recomendados por la empresa, o un vídeo en formato mp4 y avi.[8]

El software analiza las imágenes basando las medias en la selección estocástica de los puntos que considera que son importantes para la medición. Estos puntos se denominan facetas y su disposición es vital para realizar una buena simulación. La elección de las facetas se basa en el contraste de color que detecta el programa ya que las probetas ensayadas serán previamente pintadas de negro y blanco. El programa también determina otro parámetro importante que es la distancia entre facetas. Tanto el tamaño de las facetas como la distancia entre ellas se puede modificar. El programa busca que la elección de estos puntos sea de la forma más aleatoria posible.

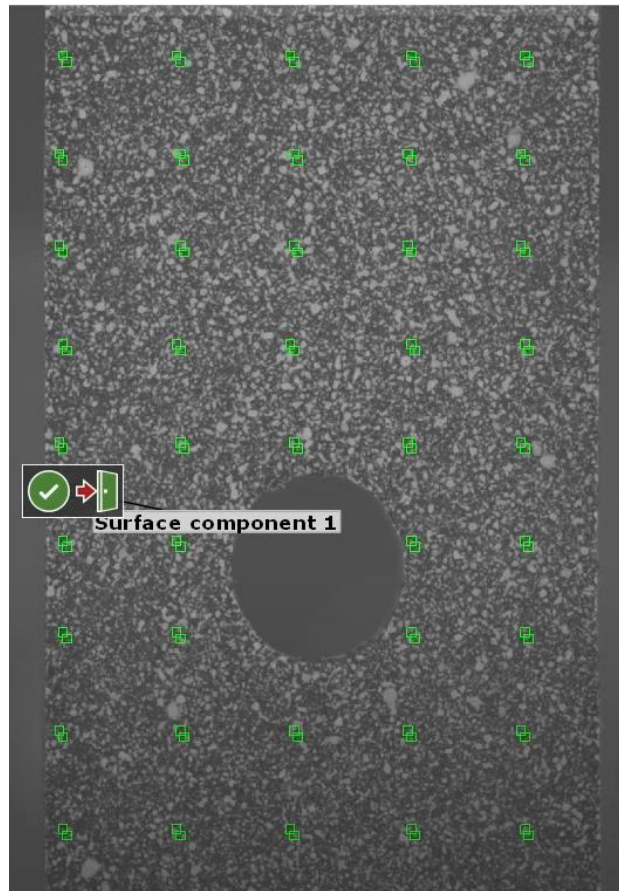


Figura 7. Elección estocástica de facetas

2.4 EXTENSÓMETRO.

Para el análisis de las deformaciones de los ensayos se va a utilizar un extensómetro IBERTEST modelo IB-EBC-50-10 con un campo de medida 50/10 mm. La deformación obtenida con el extensómetro se usará como referencia en la comparación con los valores obtenidos mediante el uso de GOM Correlate.

La incorporación de este aparato es imprescindible en todos aquellos ensayos que se requiera un control en la medida de la deformación de forma precisa[9].

El extensómetro queda determinado por varios parámetros dependiendo del uso que se le vaya a dar. Entre estas características se encuentran[10]:

- Base de medida L_0 : es la distancia en reposo que separa a las patillas. En este caso son 50 mm.
- Capacidad o rango de medición: variación máxima de distancia que puede llegar a obtenerse. En este caso es 10 mm.
- Rango de error: 0,5% sobre la medida base del extensómetro.
- Tipo de sujeción: forma en la que se sujeta el aparato a la pieza. En este caso, se realiza con una función pinzante.
- Tipo de transductor: para transformar las fuerzas se utilizan galgas extensométricas.
- Dirección de deformación: puede ser axial o transversal.
- Condiciones ambientales de trabajo.

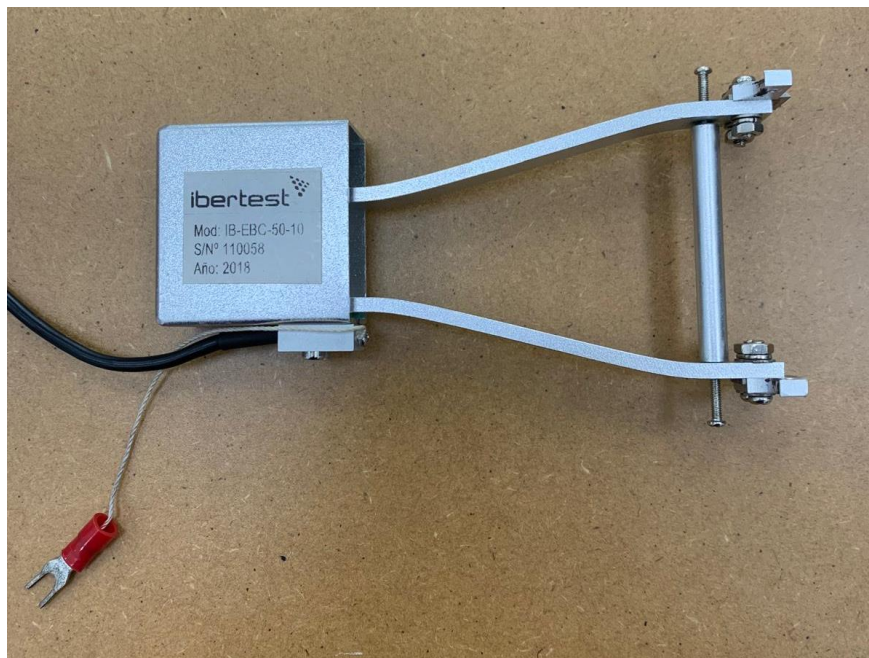


Figura 8. Extensómetro Ibertest IB-EBC-50-10

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

A lo largo de los años, el análisis de las propiedades de los materiales mediante ensayos ha sido una pieza fundamental en el desarrollo de la sociedad actual. La innovación de estas materias utilizadas, especialmente en el campo de la industria, ha desarrollado un papel fundamental en la mejora de las condiciones de vida.

El ámbito de la ciencia de materiales ha sido vital desde siempre y su estudio se ha ido desarrollando de forma continua con la aparición de máquinas y metodologías que han facilitado el estudio en este campo. Siempre se ha buscado conocer las propiedades de los materiales y su reacción frente a diferentes sucesos externos que perturban su estado.

Dentro de los ensayos destructivos, uno de los más utilizados para analizar la resistencia y la reacción ante una fuerza es el ensayo de tracción. Este ensayo nos permite conocer la evolución de la deformación de probetas del material a analizar mediante la acción de una fuerza de tracción controlada.

Estas pruebas se empezaron a realizar en torno al año 1870 con el desarrollo de las primeras máquinas aptas para ensayos por parte de la compañía Mannheimer Maschinenfabrik (MFL), empresa de la que nace la actual ZwickRoell, líder mundial en el ámbito de los ensayos estáticos. A partir de esta primera bancada, surgieron en los siguientes años variaciones de esta destinadas a realizar otro tipo de ensayos como por ejemplo de torsión o impactos pendulares. Hasta que en torno al 1920 la fabricación y comercialización de estas máquinas se extendió por toda Europa. Las primeras máquinas de ensayos con sistema electrónico de fuerza surgieron en el año 1956 y son evoluciones de estas las que se usan hoy en día en los laboratorios. [11]

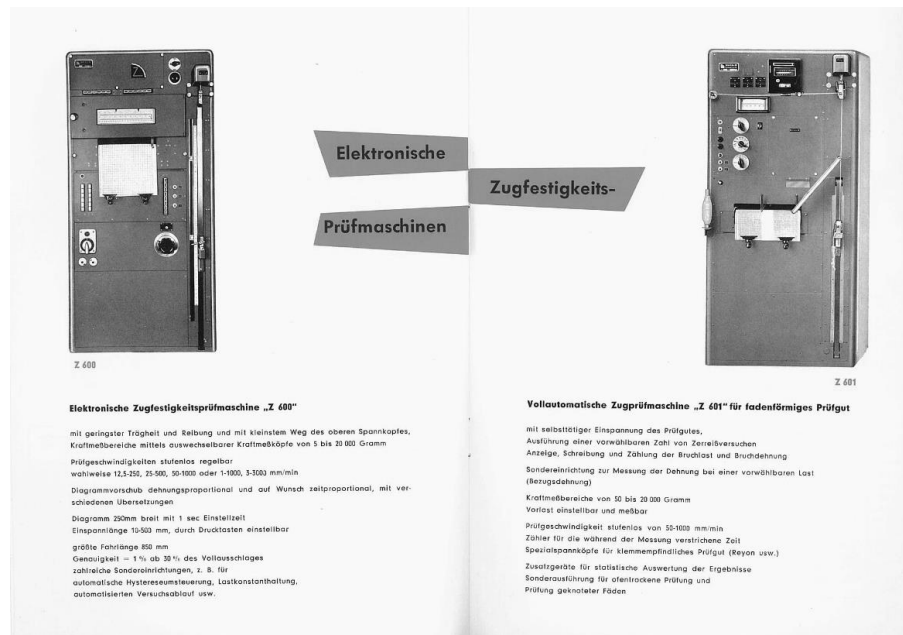


Figura 9. Primera máquina de ensayos de tracción con medición de fuerza electrónica (Z600)[11]

Estas máquinas han usado desde su aparición unos útiles especiales para medir las deformaciones llamados extensómetros. Estos aparatos hacen de pinza en la probeta a analizar y obtienen los datos del alargamiento, entre otros, de la probeta a medida que se va aumentando la acción de la carga a la que se ensaya la pieza. Este proceso nos permite saber cuánto ha variado la longitud de la probeta con respecto a la fuerza aplicada.

Por otro lado, en las últimas décadas ha aumentado la implementación de dispositivos que permitan realizar estos estudios mediante el uso de técnicas ópticas. Con esta metodología se busca analizar la deformación de los materiales de forma continua a través del análisis de un vídeo del ensayo. Esta técnica es conocida como Correlación Digital de Imágenes, también conocido como DIC (Digital Image Correlation) y es una metodología que se aplica a su vez en diversas áreas de la industria como puede ser en ingeniería civil (análisis de puentes o edificios), automotriz (carrocerías o chasis), médica (deformación de tejidos); aunque el objetivo común de todas ellas es estudiar deformaciones y cómo se comportan los

materiales ante variaciones de su estado ya sea mediante una fuerza puntual o repetitiva como puede ser la fatiga.[2]

En los ensayos de tracción, esta metodología consiste en capturar imágenes en los diferentes estados, desde el inicio del ensayo hasta la ruptura de la probeta. La clave de la calidad de los resultados es la buena elección de parámetros. Se procede a pintar las probetas antes de elaborar una nube de puntos, llamados facetas, con las que mediremos las deformaciones. Posteriormente se comparan las fotos para calcular las distancias que se han desplazado esos puntos de la nube y ver así de forma continua todo el proceso de elongación. La elección de los puntos a analizar es aleatoria por parte del programa, pero se rige por dos parámetros como son el tamaño de faceta y la distancia entre facetas. Las facetas son seleccionadas basándose en una escala de grises ya que una de las partes más críticas de esta metodología es la calidad del patrón al pintar la probeta.

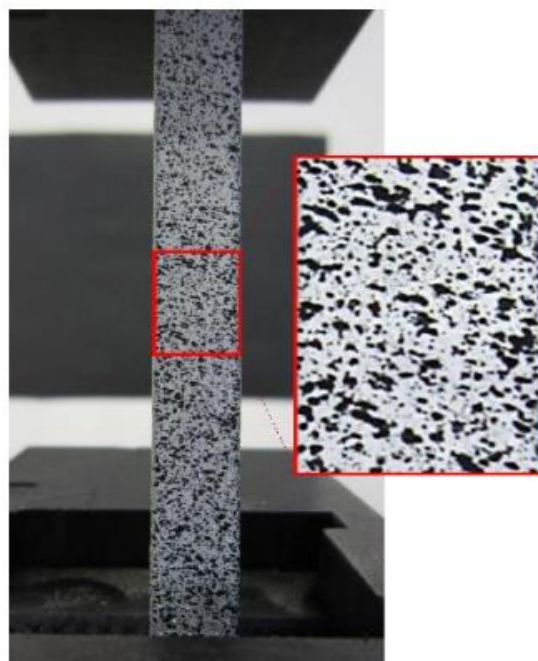


Figura 10. Ejemplo de preparación aleatoria de la probeta [12]

Hay diversas formas de preparar la probeta cambiando la manera en la que se pintan. La mayoría de los ensayos se realizan primero aplicando una capa de pintura blanca sobre la pieza y posteriormente se pinta con pintura negra por encima dejando un buen contraste de color en toda la pieza. La pintura negra se puede aplicar con metodologías muy variadas, pero si se quiere obtener un buen resultado se recomienda pintar la probeta haciendo unas pocas pasadas con un aerosol. Si se desea un tamaño de faceta mejor, se puede usar polvo de tóner o sustancias como por ejemplo grafito que generen el mismo efecto de contraste de color.[13]

El programa elige las facetas buscando que tengan la misma cantidad de partes negras que partes blancas y donde entra en el juego la decisión es en el tamaño de estas secciones ya que se puede optar por unas secciones más grandes o pequeñas según convenga. Esto se debe a que si las facetas son muy pequeñas se necesita una resolución de cámara muy alta para grabar el vídeo del ensayo y que este se pueda analizar posteriormente con calidad.

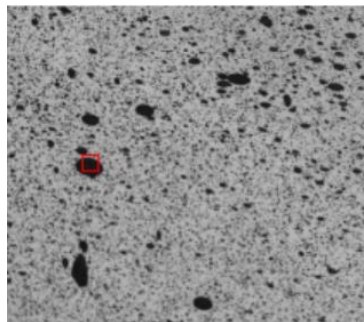


Figura 11. Faceta pequeña

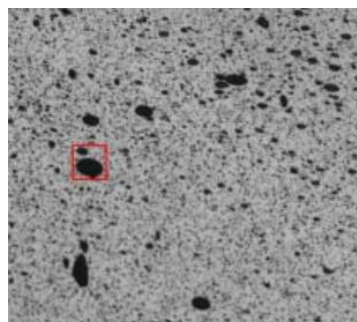


Figura 12. Faceta grande

Cada patrón con el que se pintan las probetas es distinto y es complicado replicar la pintura de las probetas entre ensayos ya que se hace mediante pasadas aleatorias por encima de la pieza.

Otro factor a tener en cuenta son los parámetros de la cámara de alta velocidad ya que no se obtendrán los mismos resultados si se cambia por ejemplo la distancia focal, el enfoque o el zoom. Una de las variables más relevantes es la luminosidad de la sala en la que se va a realizar el ensayo ya que para que el vídeo tenga buena calidad se necesita unos focos potentes y colocados de forma específica porque no se pueden generar sombras en la pieza ya que esto afectaría en la selección de las facetas.

El número de cámaras a utilizar depende de las dimensiones que se quieran incluir en el análisis ya que, si se quiere hacer un análisis tridimensional, se necesitarán dos cámaras.[14] Para conocer los parámetros de las cámaras y su posición se debe realizar un calibrado completo. Este calibrado está relacionado con la nube de puntos previamente mencionada.

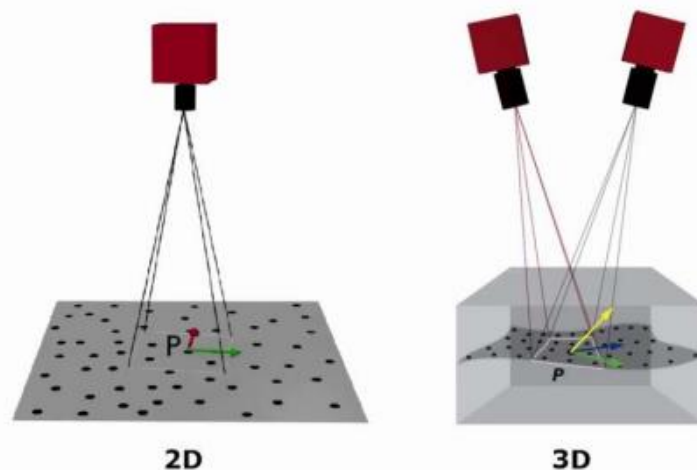


Figura 13. Diferencia entre el uso de una cámara o dos cámaras

Como fin, se busca que el punto de partida de la medición con estos aparatos sea obtener resultados semejantes a los que se obtienen con el uso de extensómetros tradicionales y una vez observados los datos, analizar las imágenes para estudiar la respuesta de la probeta a la

carga aplicada en el ensayo e identificar las variaciones tanto en su apariencia como en sus propiedades.

El avance en estas técnicas de análisis de deformaciones sería muy positivo ya que es un ámbito en el que todavía está en crecimiento. Algunas de las mayores ventajas son: [10]

- Técnica sin contacto.
- Posibilidad de medición simultánea de muchos puntos a la vez.
- Obtención de datos cuantitativos.
- El software amplía el campo de aplicación.
- Identificación de zonas críticas de concentración de tensiones.

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 JUSTIFICACIÓN

Los métodos tradicionales para la medida de deformaciones como el uso de galgas extensométricas o extensómetros se conocen que son fiables, pero tienen algunas carencias sobre las que se podría actuar. Las mayores limitaciones que presentan son las siguientes:

- Técnica invasiva: el contacto físico con la probeta puede producir daños en la misma que pueden alterar sus propiedades lo que afectaría a su comportamiento durante el ensayo.
- Limitación en la zona de medición: con estas técnicas solo se puede medir la deformación en puntos o áreas específicas y limitadas en la probeta. Esto puede provocar un análisis incompleto o incorrecto del comportamiento del material al tener un compa de estudio pequeño.
- Complejidad en la calibración e instalación: la instalación y calibración de elementos como los extensómetros y las galgas extensométricas pueden ser procesos laboriosos y técnicamente dificultosos. Además, si el montaje es incorrecto puede dar lugar a la obtención de datos erróneos. La calibración requiere de procedimientos rigurosos para asegurar la precisión de las medidas.
- Limitada capacidad de medición de deformaciones dinámicas: existen algunos extensómetros y galgas pueden medir deformaciones dinámicas pero su capacidad es limitada en comparación con otros métodos como la correlación digital de imágenes, que, al analizar las imágenes capturadas a alta velocidad, permite estudiar cambios rápidos y dinámicos en el comportamiento del material.

Debido a todas estas limitaciones, si se quiere realizar un estudio más completo y preciso se deberían complementar los ensayos con otras técnicas como la DIC. La utilización de esta técnica resulta un gran avance en el ámbito de los ensayos mecánicos. En el caso a estudiar en este trabajo, supone una mejora en varios aspectos en la medida de las deformaciones.

Existen diversas justificaciones para el uso de esta técnica como pueden ser las siguientes[15]:

- Técnica no invasiva: esta técnica se basa en el no contacto. Esto evita la interferencia con el material evitando así que se altere el comportamiento de este durante el ensayo. Otras técnicas ya existentes como el uso de los extensómetros o galgas extensométricas que requieren contacto físico pueden introducir errores o incluso afectar la probeta. Con DIC se elimina esta posible influencia externa.
- Versatilidad y aplicabilidad a diferentes materiales: es aplicable a una amplia variedad de materiales desde metales y polímeros hasta materiales compuestos y biomateriales por lo que tiene un campo de uso muy grande.
- Medición completa del campo de deformación: a diferencia de otras metodologías que solo permiten examinar secciones limitadas o datos puntuales, la DIC permite analizar toda la superficie de la probeta. Esto permite conocer de una forma más completa el comportamiento bajo carga de la pieza analizada pudiendo focalizarse si se desea en zonas específicas del cuerpo ensayado o en zonas en las que la deformación no ha sido homogénea. Además, se pueden analizar simultáneamente los desplazamientos en varias direcciones.
- Análisis de los datos obtenidos y visualización de estos: con DIC el procesamiento de los resultados obtenidos es más intuitivo ya que se elabora un mapa de deformación, ya sea en 2D o en 3D; en el que se pueden identificar las zonas más críticas de la probeta en las que se produce una concentración de tensiones, así como heterogeneidades en cuanto a la deformación. Esto facilita la interpretación de los resultados y la extracción de conclusiones del ensayo.
- Precisión y exactitud: las técnicas de correlación digital de imágenes nos permiten conocer con precisión las pequeñas deformaciones que se producen en la superficie de las probetas. Esto es crucial en los ensayos de tracción, donde es esencial captar las más mínimas deformaciones para evaluar correctamente las propiedades mecánicas del material.

Todas estas son justificaciones más que válidas para demostrar que el uso de la correlación digital de imágenes es un método mucho más completo que los tradicionales y por ello se debe dar importancia a su implementación ya sea de por sí sola o de lo forma complementaria con el uso de aparatos tradicionales, que es por lo que se ha optado en este proyecto.

4.2 OBJETIVOS

El objetivo general de este proyecto es:

- Comprobar la validez de la hipótesis inicial sobre la posibilidad de usar la DIC como método alternativo o complementario al uso de extensómetros. Este es el objetivo principal en el que se va a basar el proyecto. Consiste en verificar que los valores obtenidos mediante el método tradicional son similares a los obtenidos mediante el análisis de las imágenes tomadas con la cámara de alta velocidad. Esto será correcto si el valor de desplazamiento está dentro del rango de error del extensómetro que se corresponde al 0,5% sobre la medida base del mismo. Para analizar las imágenes se usará la versión profesional de GOM Correlate.

Los objetivos específicos de este proyecto son:

- Obtener una combinación de parámetros de simulación en GOM Correlate con los que nos aseguremos de que los datos obtenidos sean de buena calidad reduciendo el ruido. Para satisfacer este objetivo se buscarán unos valores válidos para el tamaño de la faceta y para la distancia entre puntos. Para ello se utilizarán tres configuraciones:
 - Tamaño de la faceta y distancia entre puntos: 10 píxeles
 - Tamaño de la faceta y distancia entre puntos: 15 píxeles
 - Tamaño de la faceta y distancia entre puntos: 20 píxeles

- Analizar de influencia de la variación del tipo de preparación de la probeta para el ensayo. Se estudiará si los parámetros de simulación de GOM Correlate previamente mencionados dependen del tamaño de las motas que aparezcan según la forma en la que se pinte la probeta al prepararla para el ensayo.

4.3 DATOS

Para la realización de los ensayos, se han utilizado dos grupos de nueve probetas.

El primer grupo de probetas corresponden a los ensayos que estudian la verificación de la hipótesis sobre la similitud numérica entre el uso técnicas tradicionales como el extensómetro y la correlación digital de imágenes con GOM Correlate. Estas muestras son de acero al carbono ya que se disponía de un gran número de ellas de este material. En lo relativo al material, el único requisito que se estableció para su elección fue que sus propiedades de deformación estuviesen dentro del rango de trabajo del extensómetro utilizado. Al no estudiar las propiedades específicas del material, se ha elegido uno del que se dispusiese de un amplio número de probetas por si se requería repetición de los ensayos.

El segundo grupo de probetas se ha usado para estudiar el segundo objetivo propuesto para este trabajo que se centra en encontrar la combinación de parámetros de GOM Correlate que nos permite obtener unos valores más exactos. Estas probetas están fabricadas a partir de una aleación de aluminio.

Las dimensiones de todas las probetas son las mismas; 200 mm de longitud, 20 mm de anchura y 1.5 mm de grosor.

El primer número del índice indica la longitud focal. El primero 70 mm, el segundo 50 mm y el tercero 35 mm. El segundo número del índice se usa como forma de clasificar las probetas según su preparación y tamaño de los puntos de color pintados. El primero es fino, el segundo es intermedio y el tercero es grueso.

Cada grupo de probetas se dividirá de la siguiente forma (Tabla 1):

Índice de probeta	Tamaño del patrón	Distancia entre mordazas (mm)	Parámetros de la cámara			Lo inicial extensómetro (mm)
			Longitud focal (mm)	FPS	Frecuencia de obturación, s	
1.1	Fino	70	70	50	1/125	50
1.2	Intermedio					
1.3	Grueso					
2.1	Fino	100	50			
2.2	Intermedio					
2.3	Grueso					
3.1	Fino	150	35			
3.2	Intermedio					
3.3	Grueso					

Tabla 1. Datos probetas

4.3.1 PROBETAS DE ACERO AL CARBONO

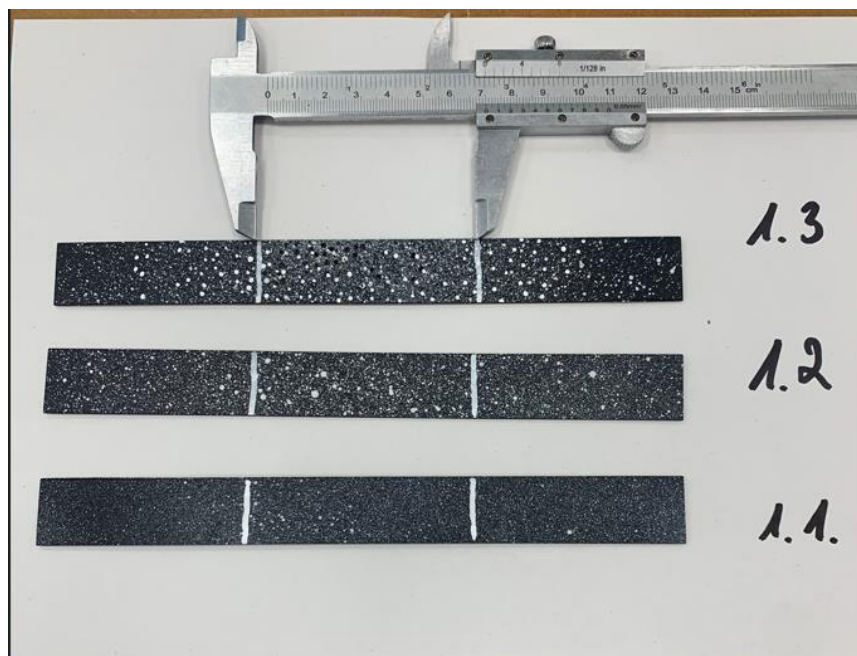


Figura 14. Probetas acero 1

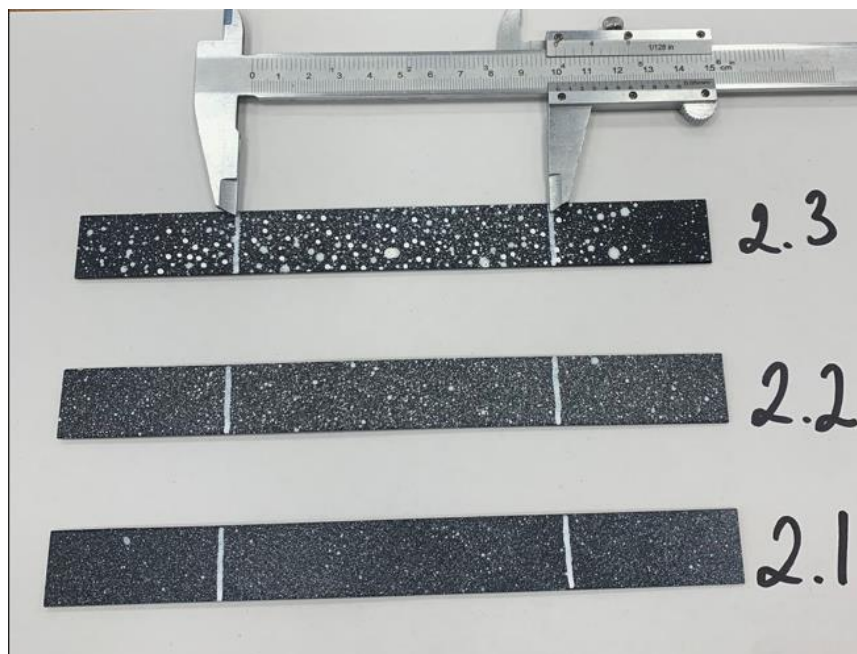


Figura 15. Probetas acero 2



Figura 16. Probetas acero 3

4.3.2 PROBETAS DE ALEACIÓN DE ALUMINIO

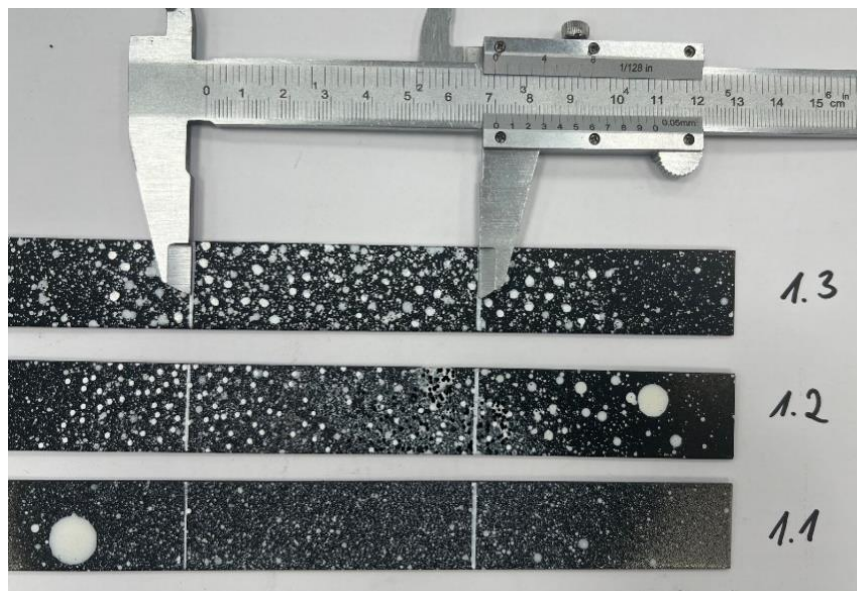


Figura 17. Probetas aluminio 1

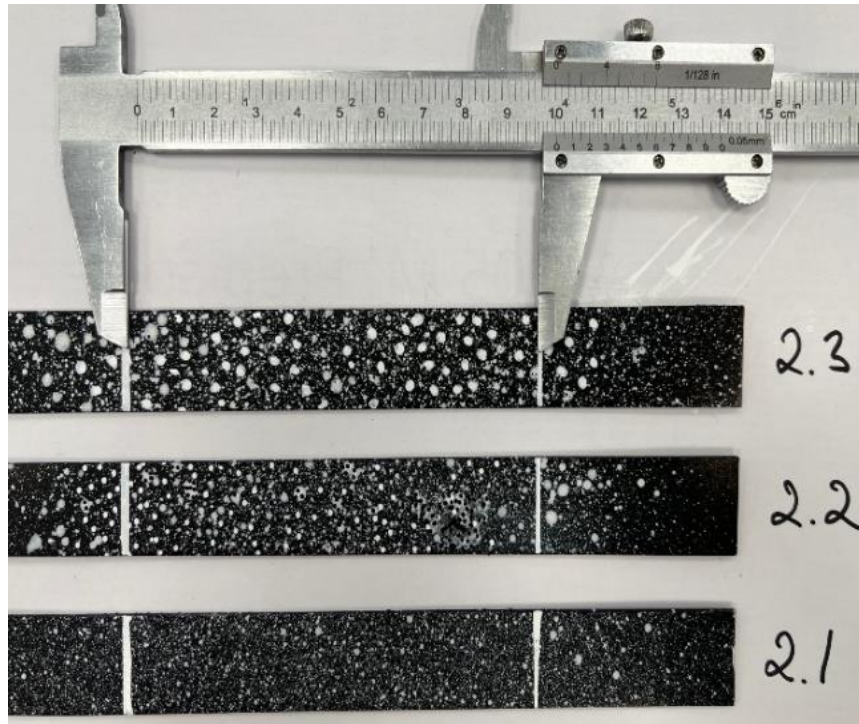


Figura 18. Probetas aluminio 2

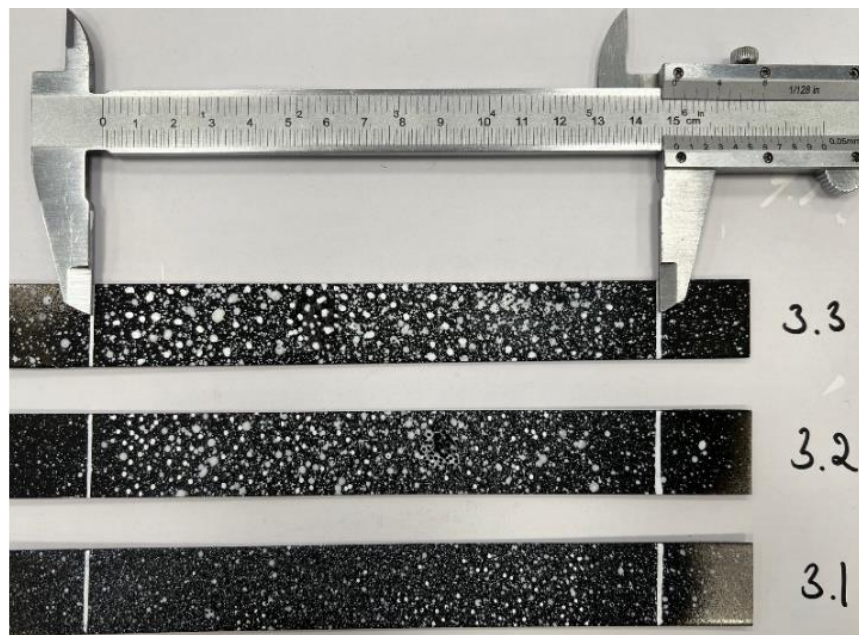


Figura 19. Probetas aluminio 3

Capítulo 5. METODOLOGÍA

Para explicar la metodología de los experimentos se dividirá este capítulo en dos subcapítulos. El primero se centrará la parte física del ensayo como puede ser el posicionamiento de la cámara, la preparación de las probetas o el montaje del ensayo. El segundo capítulo tendrá como fin explicar la parte de simulación en GOM Correlate abarcando desde la importación del vídeo hasta la obtención de los resultados.

5.1 DESARROLLO DE LOS ENSAYOS

En este proyecto se ha trabajado con probetas planas de acero al carbono todas ellas con las mismas dimensiones. La razón por la que se han utilizado probetas planas es debido a que, al disponer solo de una cámara con la grabar los experimentos, solo se puede medir la deformación en 2D. Además, esto facilita el posicionamiento de los datos y las posteriores simulaciones. Los primeros experimentos que se realizaron para familiarizarse con el funcionamiento se hicieron con distintos plásticos. Finalmente, se eligió el acero al carbono ya que su deformación longitudinal hasta rotura se encontraba dentro del rango admisible del extensómetro que se disponía ya que el fin era implementar el extensómetro con el que se comprobara si se verifica el objetivo principal de este trabajo que es si se puede usar la DIC como técnica alternativa a los sistemas tradicionales.

Debido a la repetitividad de los ensayos se elaboró una lista de tareas detallada para que fuese más fácil que los pasos de los ensayos fuesen los mismos y así asegurarnos de que los datos de cada experimento fuesen comparables entre ellos.

5.1.1 POSICIÓN DE LA CÁMARA

La configuración de la cámara es uno de los puntos clave de este estudio ya que, si el vídeo no se ajusta a las especificaciones necesarias, la calidad de la simulación será insuficiente para obtener así unos resultados similares a los del extensómetro.

Los parámetros que se han elegido para la cámara son:

- Longitud focal: 70 mm, 50 mm, 35 mm dependiendo de la distancia que se quiera analizar de la superficie de la pieza. Cada una se usará cuando la distancia entre las mordazas sea 70, 100 y 150 respectivamente.
- FPS (fotogramas por segundo): 50 fps.
- Frecuencia de obturación: 1/125 s.
- Zoom regulable para obtener buena resolución.
- La altura de la cámara se adapta para que el objetivo de esta esté apuntando perpendicularmente al espécimen. En el programa de la cámara se puede ver la zona que está enfocando el objetivo para facilitar la colocación del trípode.

La elección de estos valores se debe a que al ser un ensayo en el que se quiere analizar la evolución de la deformación con respecto al tiempo se requiere un valor de fps mayor de lo habitual. El valor de la frecuencia de obturación se corresponde con el tiempo que el obturador de la cámara permanece abierto. Este parámetro se encarga de la nitidez de la imagen. En nuestro caso cada fotograma necesitamos que sea lo más nítido posible.[16], [17]

Para el proceso de posicionamiento de la cámara, se ha utilizado un trípode con altura regulable. El trípode se ha colocado encima de un carro de luces con el fin de posicionar la cámara entre los focos de luz para conseguir así una buena iluminación. Para alcanzar la posición deseada de la cámara se han seguido los siguientes pasos:

1. Se pega el carro lo máximo posible a la máquina.
2. Se posiciona el láser en el borde del carro mirando hacia dentro buscando que el láser se alinee con el perfil que sujeta las luces.

3. Se posiciona el láser en la base del perfil buscando alinear el láser con el cuerpo de la cámara.
4. Se nivela la cámara para que no esté inclinada hacia ninguno de los ejes.
5. Se comprueba con el láser que la probeta está posicionada perpendicularmente con la cámara.

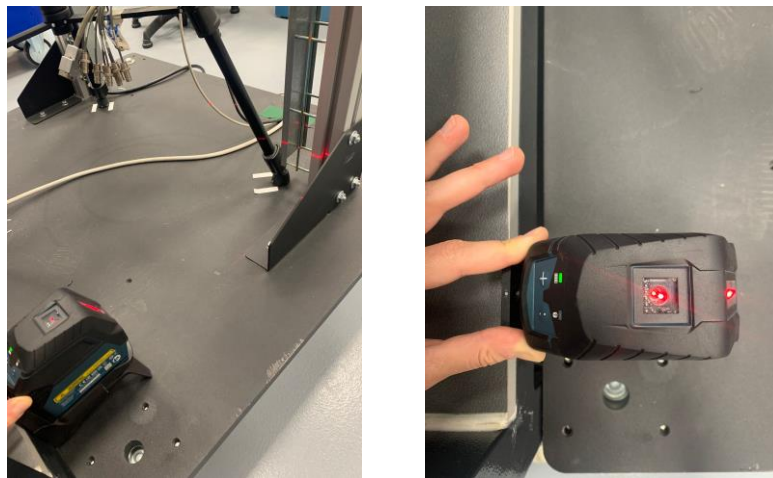


Figura 20. Alineamiento del carro de luces

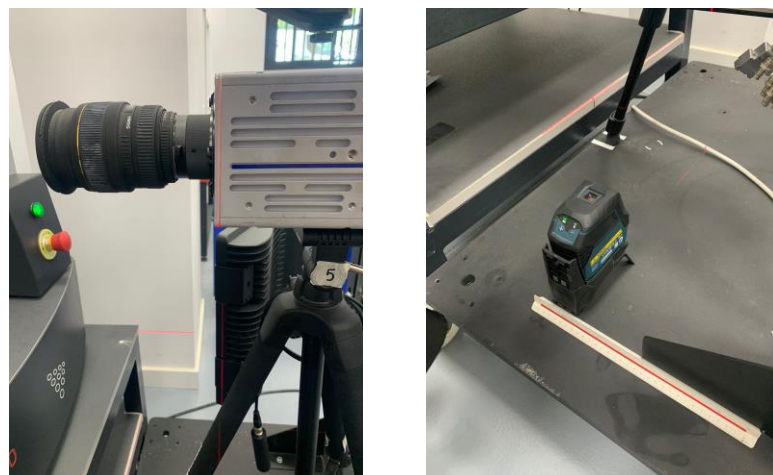


Figura 21. Alineamiento de la cámara



Figura 22. Nivelado de la cámara



Figura 23. Comprobación de perpendicularidad

Se debe tener en cuenta que con cada mínimo movimiento se debe verificar que se cumplen los pasos anteriores.

5.1.2 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Uno de los puntos más críticos a tener en cuenta a la hora de realizar cada ensayo es la preparación de las probetas. Para la preparación de las probetas se necesitará pintura blanca y negra. La razón por la que se han de pintar las probetas es que el programa GOM Correlate basa su selección de puntos de forma aleatoria, pero buscando que las facetas seleccionadas deben tener la misma cantidad de superficie blanca que negra. La distribución de ambos colores en la superficie de cada muestra no debe ser uniforme.[18]

Para pintar las probetas existen muchas técnicas, pero la más efectiva consiste en el uso de spray blanco y negro. Para conseguir un buen contraste, se debe escoger un color con el que pintar la probeta en su totalidad y es importante asegurarse de que se ha cubierto la muestra en toda su superficie pero que no se han aplicado más capas ya que un exceso de pintura podría afectar a las propiedades mecánicas del material. Una vez que esta capa ya está seca, se procede a pintar por el encima con el otro color. Hay que llevar especial cuidado al realizar esta acción. Al usar spray, la salida de pintura por la boquilla del bote no es siempre uniforme ya que depende de muchos factores y por ello se ha de practicar muchas veces antes de aplicar la pintura sobre la superficie.

Como se pudo ver en los primeros días dedicados a la preparación de probetas, existía la probabilidad de que se diese la salida de borbotones de pintura debido a la gran dificultad que tenía ejercer la presión justo sobre el tapón del bote. Esto provocaba que, una vez grabado el ensayo, al insertar el vídeo en el programa, la calidad de la nube de puntos empeoraba al haber zonas en las que el software se encontraba con dificultad para seleccionar facetas que cumpliesen con los requisitos de las cantidades de color.

Para solucionar ese pequeño contratiempo, se llegó a la conclusión de que con el uso de un rotulador de cada color se podían corregir esos defectos que podían aparecer al preparar las probetas. Usando este remedio se observó que las propiedades del material se mantenían invariantes y la calidad de la malla de puntos seleccionada por el programa mejoraba considerablemente.

En conclusión, la combinación de spray y rotuladores fue lo que se decidió que era la forma más adecuada para preparar las probetas para el ensayo.

5.1.3 MONTAJE Y ENSAYO

Una vez posicionado la cámara en su lugar y preparado la probeta, se podrá proceder a la realización del ensayo. Para ello primero deberán colocarse en la máquina los cabezales que nos permitan corregir la posición de la muestra ya que, para el experimento, la superficie que se va a analizar debe ser perpendicular al objetivo de la cámara. Para colocar la probeta se deberá sujetar primero uno de los dos extremos con el cabezal fijo de la máquina. Posteriormente se bajará el otro cabezal haciendo uso del software WinTest 32 SAE Ibertest que está descargado en el ordenador que controla la máquina. Al colocar el extensómetro, se debe seleccionar en el software el nombre de este que tiene que estar configurado en la máquina. Esto hace que durante el ensayo se recojan los datos del extensómetro y antes de la rotura de la muestra se detendrá la máquina y saldrá una alerta en el ordenador para que se retire para evitar que se rompa al terminarse el ensayo.



Figura 24. Cabezales de la máquina

Una vez colocada la probeta correctamente en la máquina se seleccionarán los parámetros deseados para el ensayo. En nuestro caso son los siguientes:

- Ensayo simple
- Modo de ensayo: tracción
- Modo de control: carrera
- Velocidad: 30 mm/min

La velocidad durante de los ensayos se ha elegido alta ya que se desea que los vídeos de los mismos no sean largos ya que son archivos que ocupan mucho espacio de memoria.

Tras introducir el nombre deseado para la prueba y verificar que la cámara está en la posición deseada además de operativa, se procede a tomar una foto de la probeta la cual se exportará al programa GOM Correlate para comprobar la calidad de la malla de facetas. Si no fuese buena, se tendría que revisar la preparación de la probeta corrigiendo el patrón de colores de la superficie.

Una vez verificado que la calidad de la nube de puntos es suficientemente buena, se procede a pulsar el botón de inicio de la grabación de la cámara y, con un pequeño retardo, el botón de inicio del ensayo. El vídeo se graba hasta que salga la alerta del extensómetro.

Cuando se acaba el ensayo, se procede a guardar los datos proporcionados por la máquina que se extraen en forma de Excel. La grabación se recorta según los fotogramas que se deseen analizar. En nuestro caso, se han seleccionado unos cuantos fotogramas antes de la acción de la máquina como inicio del vídeo para poder asegurarnos de que se captura el ensayo completo.

Tanto la grabación como los archivos Excel, se introducen en un pendrive para que se puedan analizar más tarde ya que ya no se va a volver a utilizar el montaje para ese ensayo. Si se desean hacer varios experimentos a la vez, lo más recomendable es realizar la preparación de todas las probetas previamente y así no hay que volver a iniciar el software de la cámara ni el de la máquina.

5.2 DESARROLLO DE LAS SIMULACIONES

Para comenzar el proceso de la simulación, se ha de hacer es insertar el vídeo del ensayo en formato mp4 o avi simplemente arrastrando el archivo hacia la pantalla principal. Cabe resaltar que para el análisis de las grabaciones se usará la versión profesional del programa.[19]

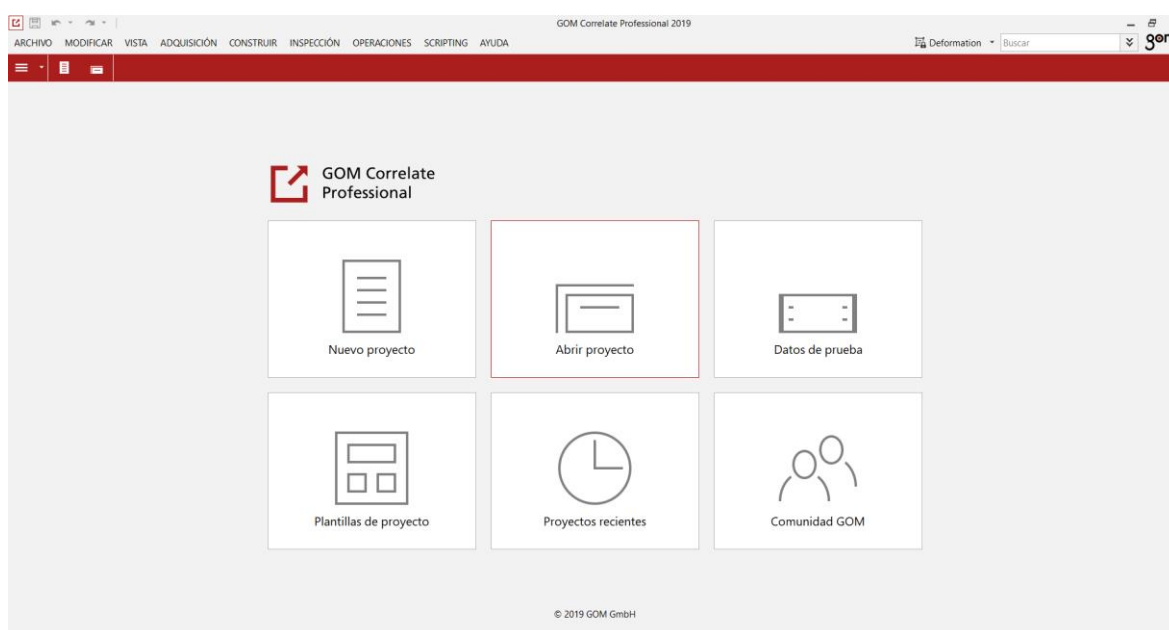


Figura 25. Pantalla principal GOM Correlate

El primer paso consiste en aplicar una escala a partir de la cual se va a trabajar. Para ello se selecciona una medida del primer fotograma como base. Es muy importante que se establezca en la primera foto porque si no se estará cogiendo la referencia de una secuencia en la que la probeta ya se ha podido ver afectada por la acción de la máquina. Esta medida puede ser, por ejemplo, el ancho de la probeta seleccionando dos puntos que tengan el mismo valor para el eje de ordenadas sobre la probeta.

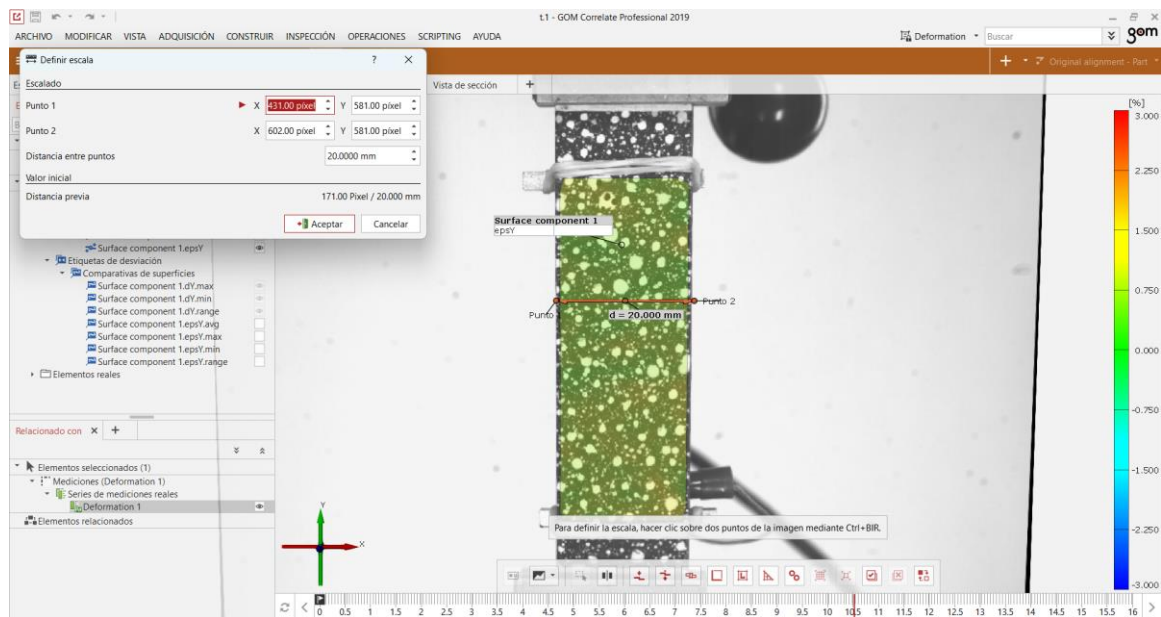


Figura 26. Asignación de escala

Una vez escalada la pieza, se debe definir la superficie de la muestra que se va a analizar. El programa por sí solo creará una superficie de control, pero esta no tiene por qué ser la óptima. La forma más sencilla es delimitar esta zona seleccionando vértices de un polígono irregular cuya forma se elabora encerrando en su interior la zona a examinar. En este paso es donde interviene la posible variación de los parámetros previamente explicados en este trabajo como son el tamaño de faceta y la distancia entre puntos. GOM Correlate elabora una nube de puntos elegidos de forma estocástica, respetando los parámetros, acorde con la superficie dibujada viendo que cada punto tenga la misma cantidad de color blanco y negro. Estos parámetros se pueden modificar según se prefiera, pero buscando que la calidad del mallado sea lo mejor posible. Esto es lo más importante, por ello conviene analizar una foto de la probeta antes de haber realizado el ensayo para asegurar que se obtendrá una buena selección de facetas. En nuestro caso, al ser uno de los objetivos del proyecto encontrar una combinación de parámetros de la que se puedan obtener resultados de deformación similares a los obtenidos con el extensómetro, se analizará para cada probeta tres pares de valores. Para que los resultados sean comparables, se debe usar para las tres variaciones la misma

superficie de control y esto solo se puede realizar si se tiene la versión profesional del software.

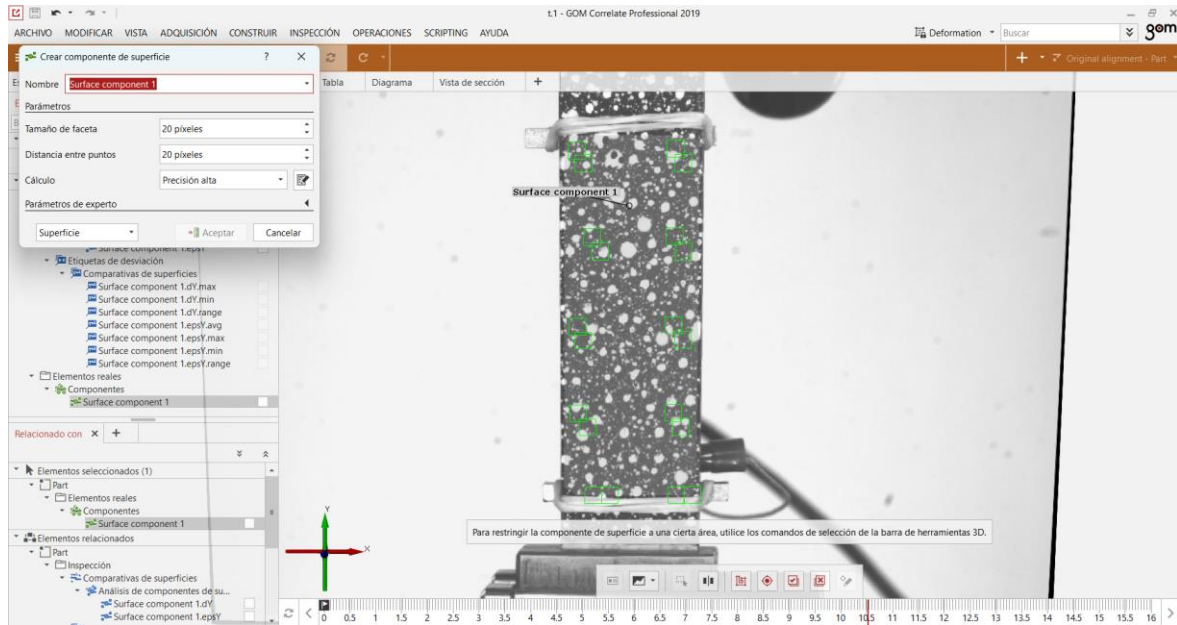


Figura 27. Definición de la superficie de control

Antes de seleccionar la variable que se quiere medir, se debe crear un alineamiento que define el sistema de coordenadas que se usa como referencia. El software propone un sistema de coordenadas. Para nuestro caso, al medir solo deformaciones, esos ejes se adaptan a nuestras necesidades.

Una vez definida la superficie de control y creado un alineamiento, se selecciona la variable que se quiere analizar ya sean tensiones, desplazamientos o deformaciones. En nuestro caso se analiza la deformación en el eje y. En ese momento, aparece en la parte izquierda de la pantalla una escala de colores con porcentajes. Estos porcentajes simbolizan, con el código de colores correspondiente, la variación porcentual de la deformación de cada punto de la probeta a lo largo del tiempo. Para poder analizar bien los resultados se debe fijar una escala común para todos los fotogramas para que se vea más claramente la evolución de la deformación con el tiempo.

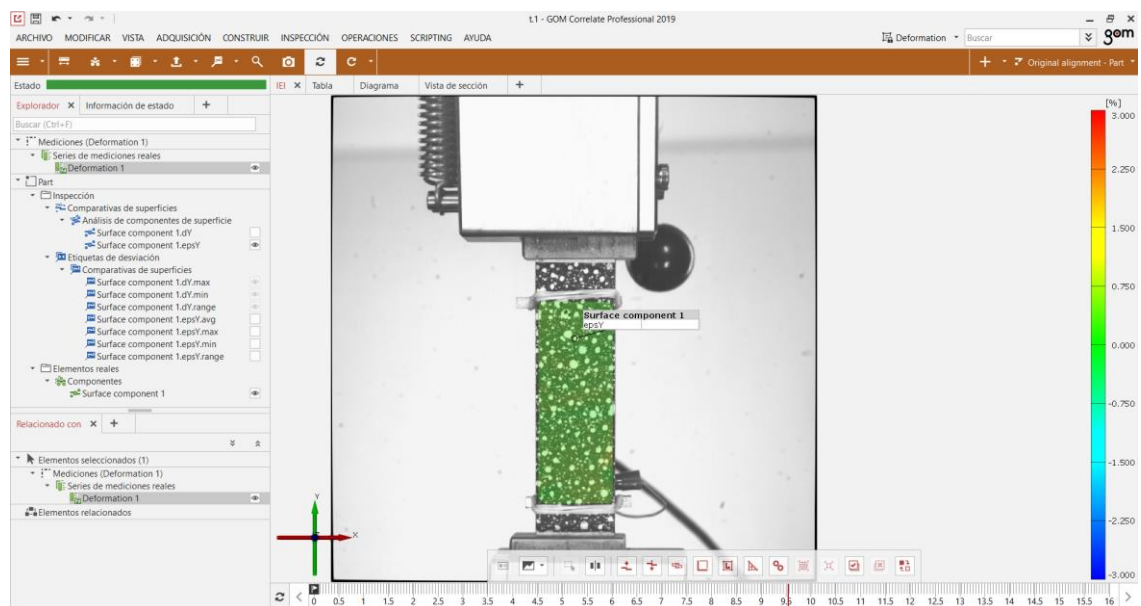


Figura 28. Representación de la deformación porcentual en el eje Y

El programa ofrece la posibilidad de representar exclusivamente la superficie de control para poder ver más claramente el código de colores sobre la pieza. Además, para ver cuál es el grado de deformación de puntos específicos de la muestra, se pueden colocar etiquetas en toda la superficie de control para obtener los valores deseados.

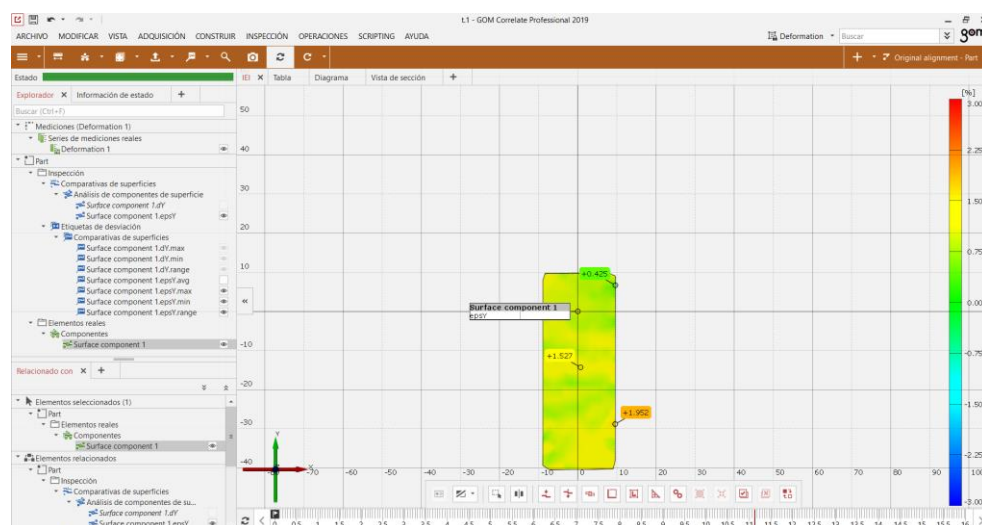


Figura 29. Representación exclusivamente de la superficie de control

GOM Correlate ofrece la opción de crear un diagrama donde se representen los puntos seleccionados con las etiquetas. En nuestro caso se han escogido los valores máximo (deformación puntual máxima en cada instante), mínimo (deformación puntual mínima en cada instante), rango (diferencia entre la deformación puntual máxima y deformación puntual mínima en cada instante) y la deformación media en toda la superficie de la pieza. Además, el programa permite elaborar informes detallados sobre la simulación.

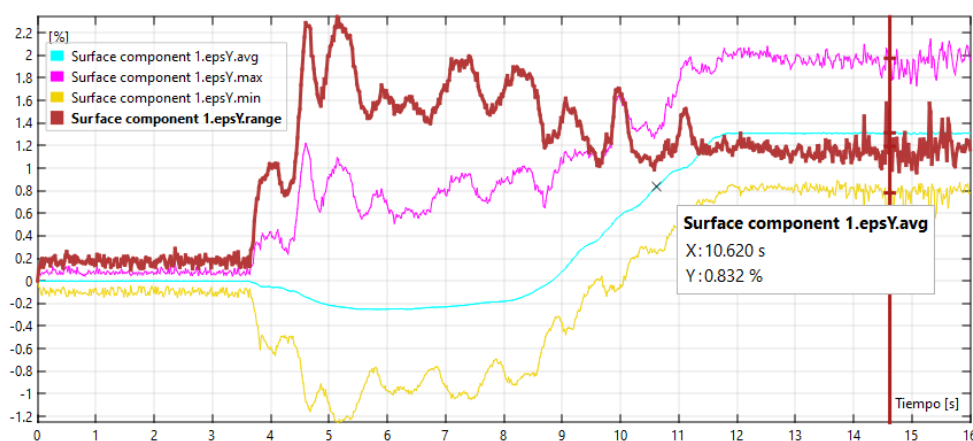


Figura 30. Diagrama deformación porcentual/tiempo

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo se va a dividir en dos subcapítulos. En el primero se evaluará la acción de los parámetros sobre el porcentaje de deformación de la probeta. Para ello se estudiará su influencia en los valores máximos y mínimos de la deformación media de la región analizada y el grado de variación porcentual máximo de deformación. Este valor es el dato más alto de la curva correspondiente al rango. Estos ensayos se realizarán con las probetas de aluminio y juntando las conclusiones extraídas se elegirá el par de parámetros que se crea más preciso.

En el segundo subcapítulo se evaluará la diferencia entre el valor final de desplazamiento medio obtenido de la información aportada por el extensómetro y la calculada en GOM Correlate. En este caso se usarán las probetas de acero y se analizará tanto el error relativo porcentual como la diferencia en la distancia final desplazada en milímetros.

6.1 EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS EN LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LAS PROBETAS DE ALEACIÓN DE ALUMINIO

- El primer número del índice de cada probeta indica distancia entre las mordazas. Los tres primeros 70 mm, los tres siguientes 100 mm y los tres siguientes 150 mm.
- El segundo número del índice se usa como forma de clasificar las probetas según su preparación y tamaño de los puntos de color pintados. El primero es fino, el segundo es intermedio y el tercero es grueso.
- Por cada probeta se han analizado los tres pares de combinaciones de parámetros de GOM Correlate para analizar que pareja de parámetros no genera valores más precisos comparados con los del extensómetro.
- Los gráficos muestran la evolución temporal de distintas características de la deformación porcentual como media (amarillo), máximo puntual (azul), mínimo puntual (marrón) y rango entre los valores puntuales (morado).

6.1.1 PROBETA 1.1

6.1.1.1 Tamaño de faceta 10 y Distancia entre puntos 10



Figura 31. Probeta aluminio 1.1 f_10 d_10

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 3,644%
- Rango máximo: 114,036%

6.1.1.2 Tamaño de faceta 15 y Distancia entre puntos 15

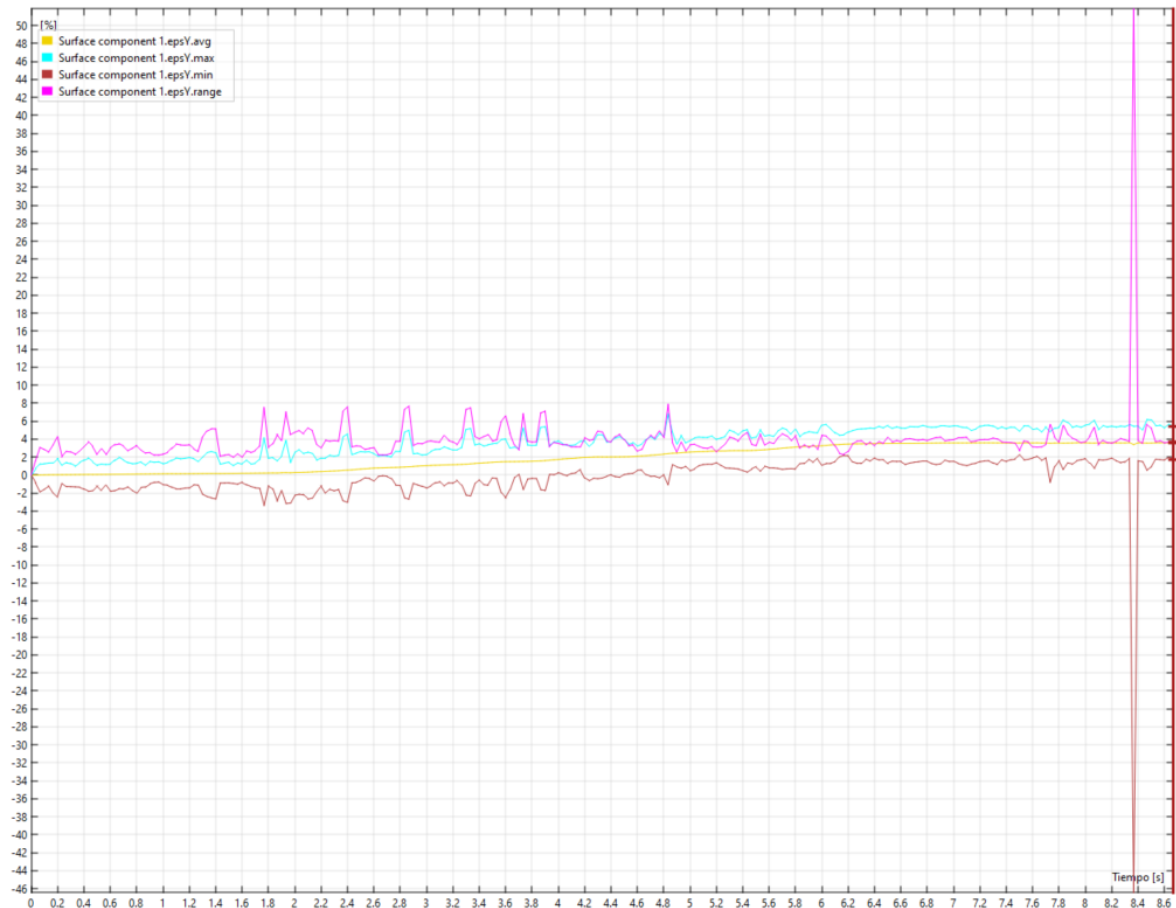


Figura 32. Probeta aluminio 1.1 f_15 d_15

- Deformación mínima: -0,001%
- Deformación máxima: 3,591%
- Rango máximo: 51,867%

6.1.1.3 Tamaño de faceta 20 y Distancia entre puntos 20

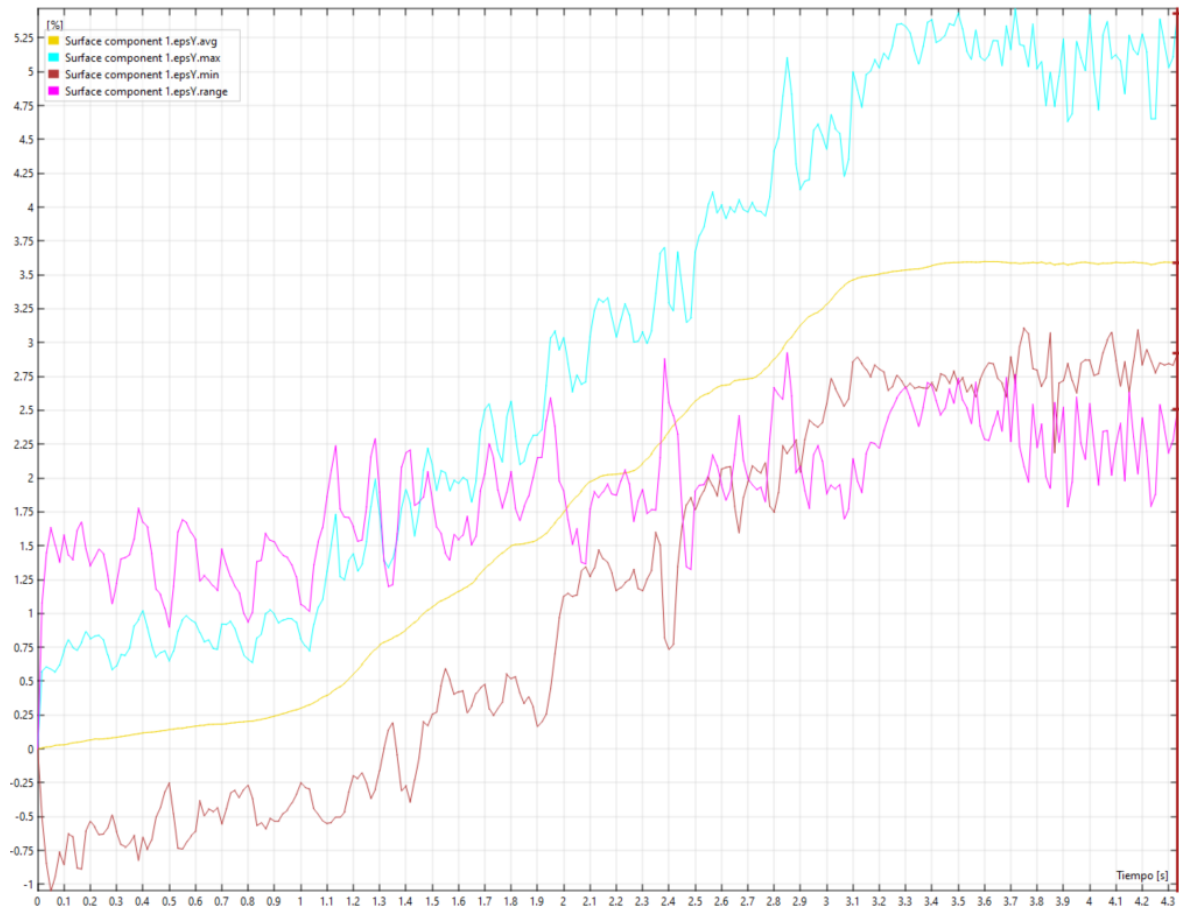


Figura 33. Probeta aluminio 1.1 f_20 d_20

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 3,591%
- Rango máximo: 3,598%

6.1.2 PROBETA 1.2

6.1.2.1 Tamaño de faceta 10 y Distancia entre puntos 10

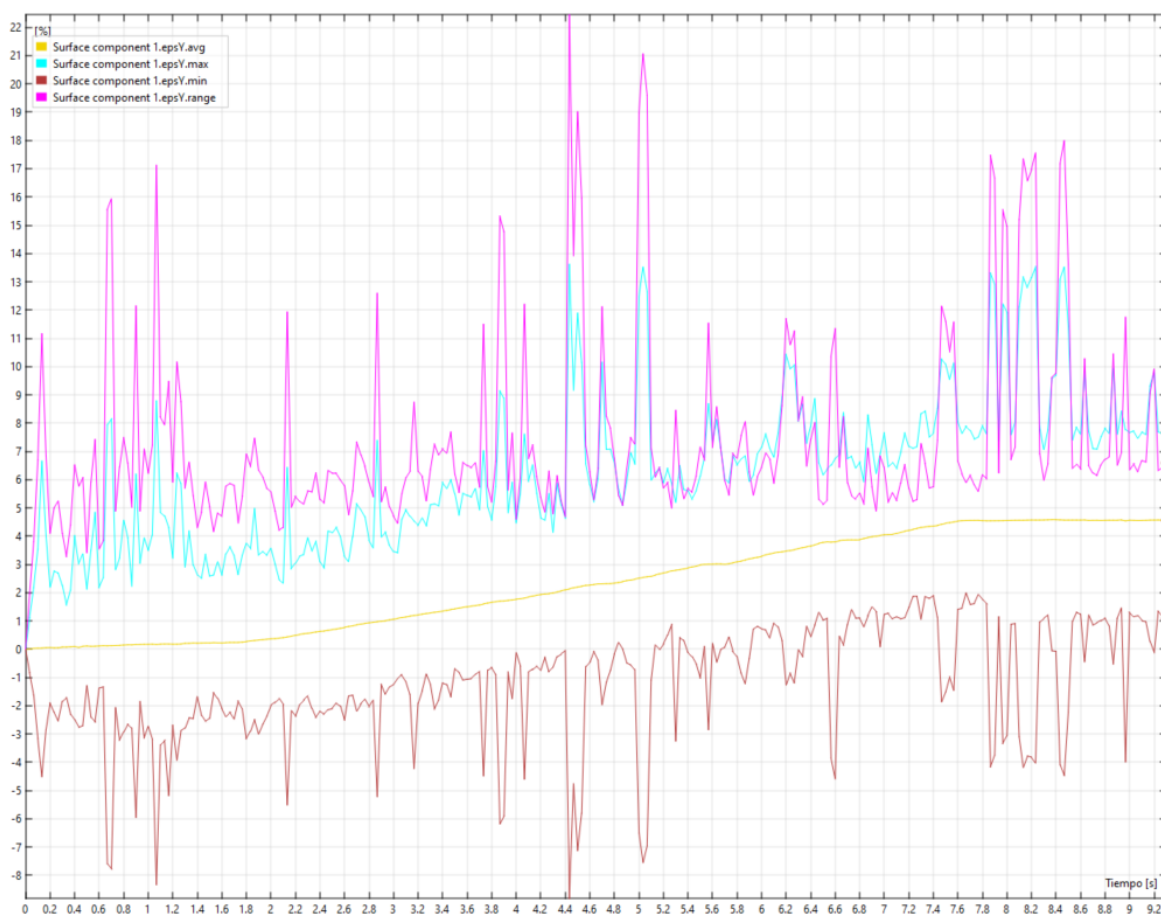


Figura 34. Probeta aluminio 1.2 f_10 d_10

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 4,585%
- Rango máximo: 22,443%

6.1.2.2 Tamaño de faceta 15 y Distancia entre puntos 15

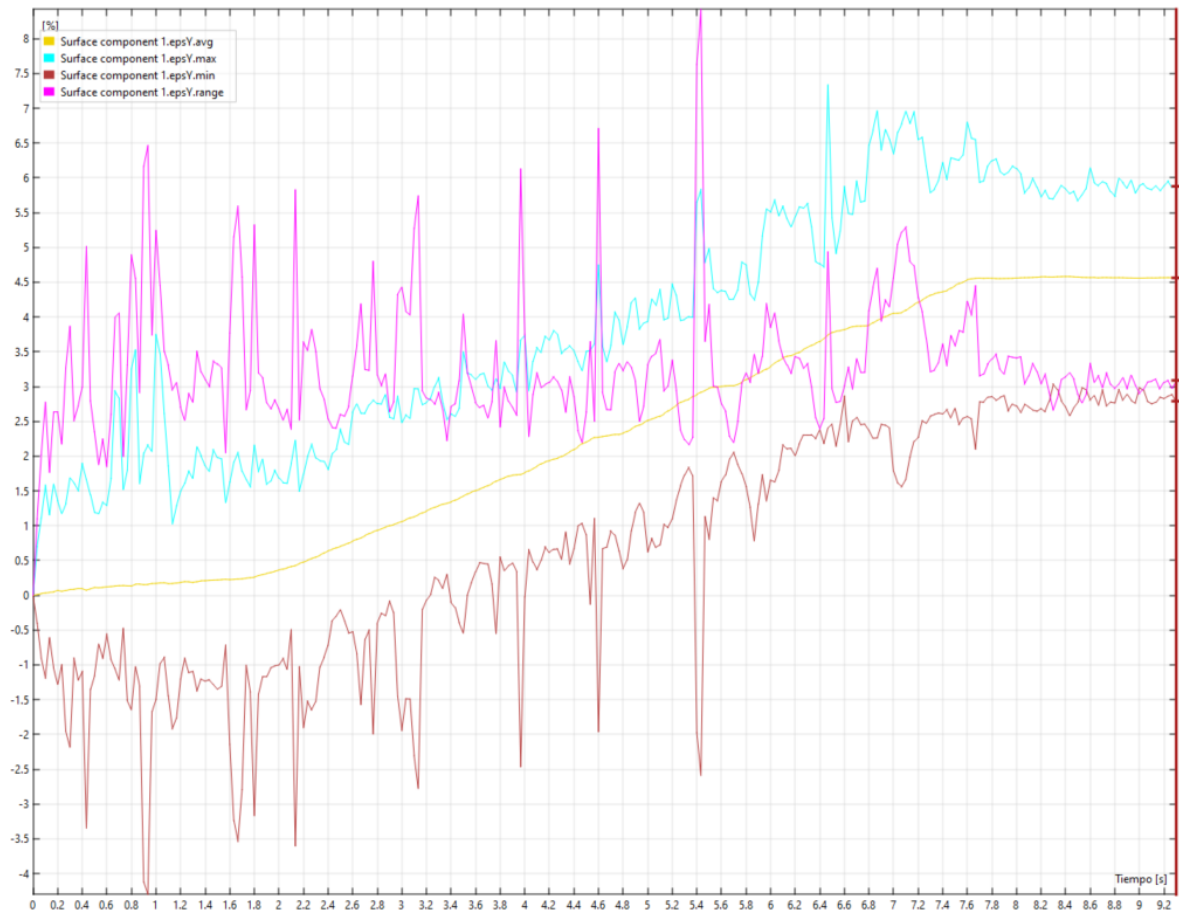


Figura 35. Probeta aluminio 1.2 f_15 d_15

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 4,582%
- Rango máximo: 8,423%

6.1.2.3 Tamaño de faceta 20 y Distancia entre puntos 20

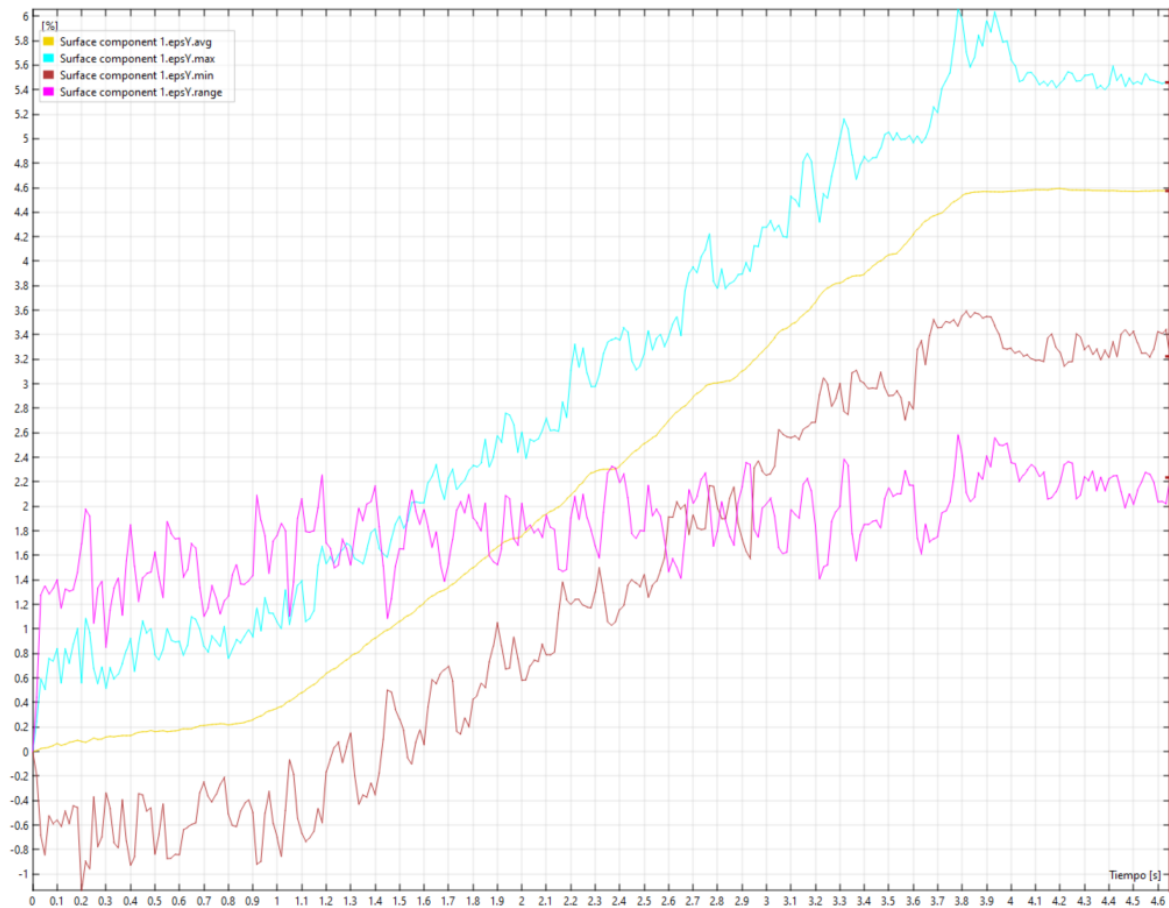


Figura 36. Probeta aluminio 1.2 f_20 d_20

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 4,594%
- Rango máximo: 2,582%

6.1.3 PROBETA 1.3

6.1.3.1 Tamaño de faceta 10 y Distancia entre puntos 10

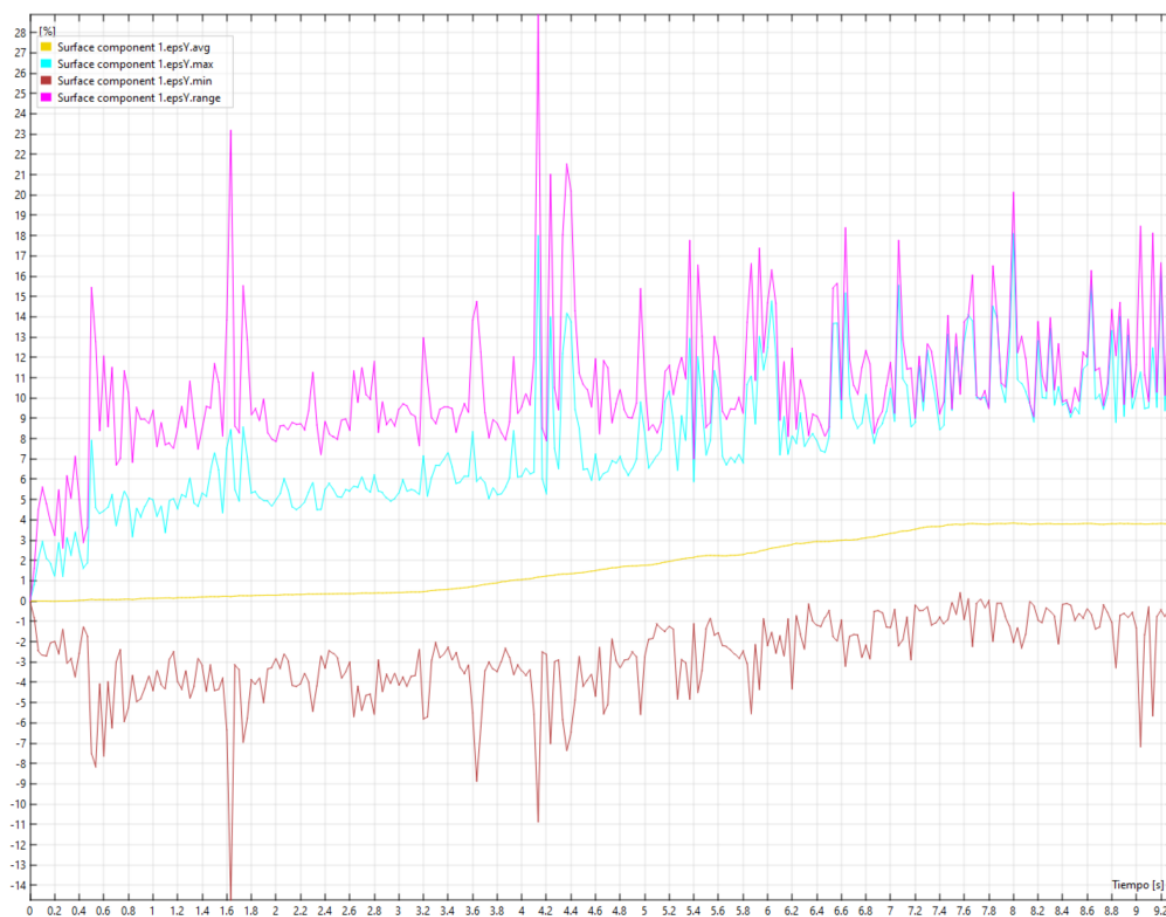


Figura 37. Probeta aluminio 1.3 f_10 d_10

- Deformación mínima: -0,002%
- Deformación máxima: 3,841%
- Rango máximo: 28,872%

6.1.3.2 Tamaño de faceta 15 y Distancia entre puntos 15

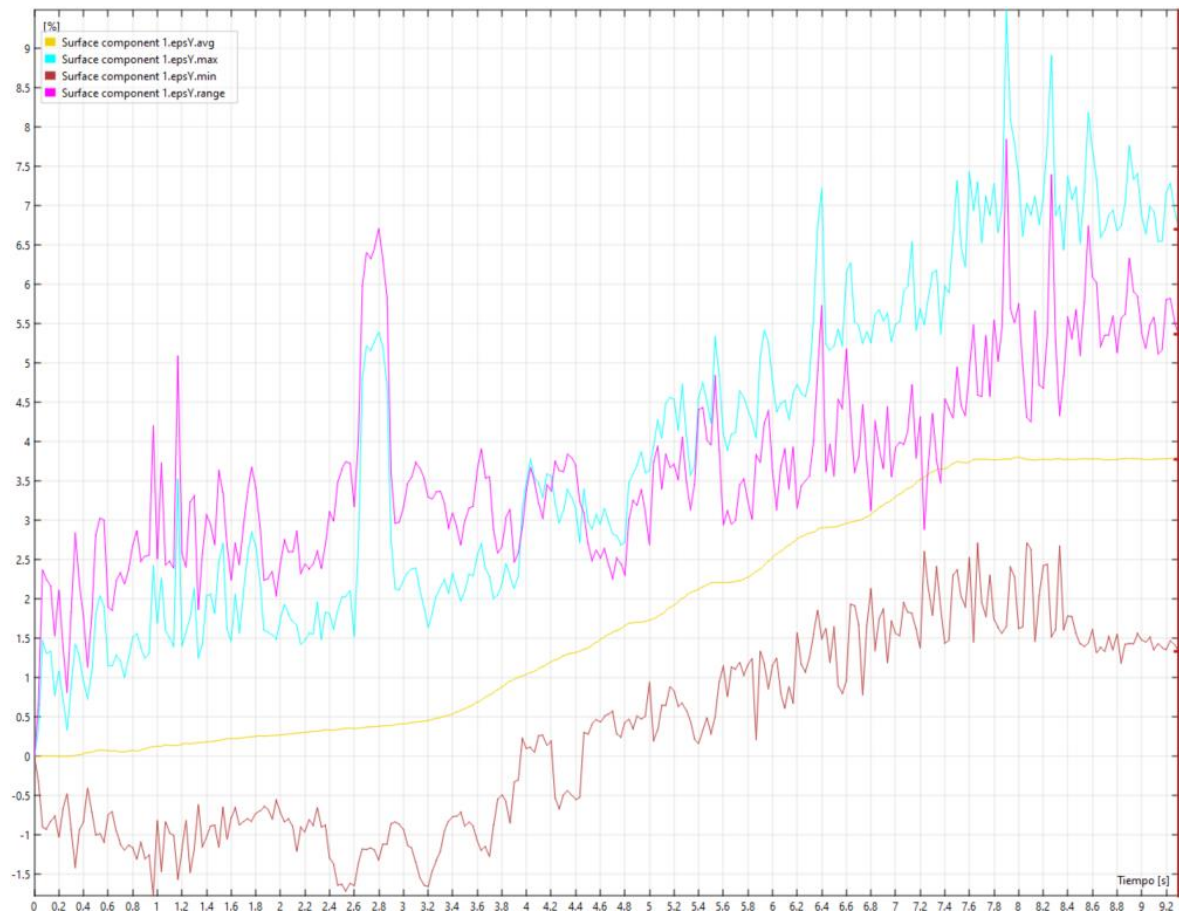


Figura 38. Probeta aluminio 1.3 f_15 d_15

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 3,803%
- Rango máximo: 7,842%

6.1.3.3 Tamaño de faceta 20 y Distancia entre puntos 20

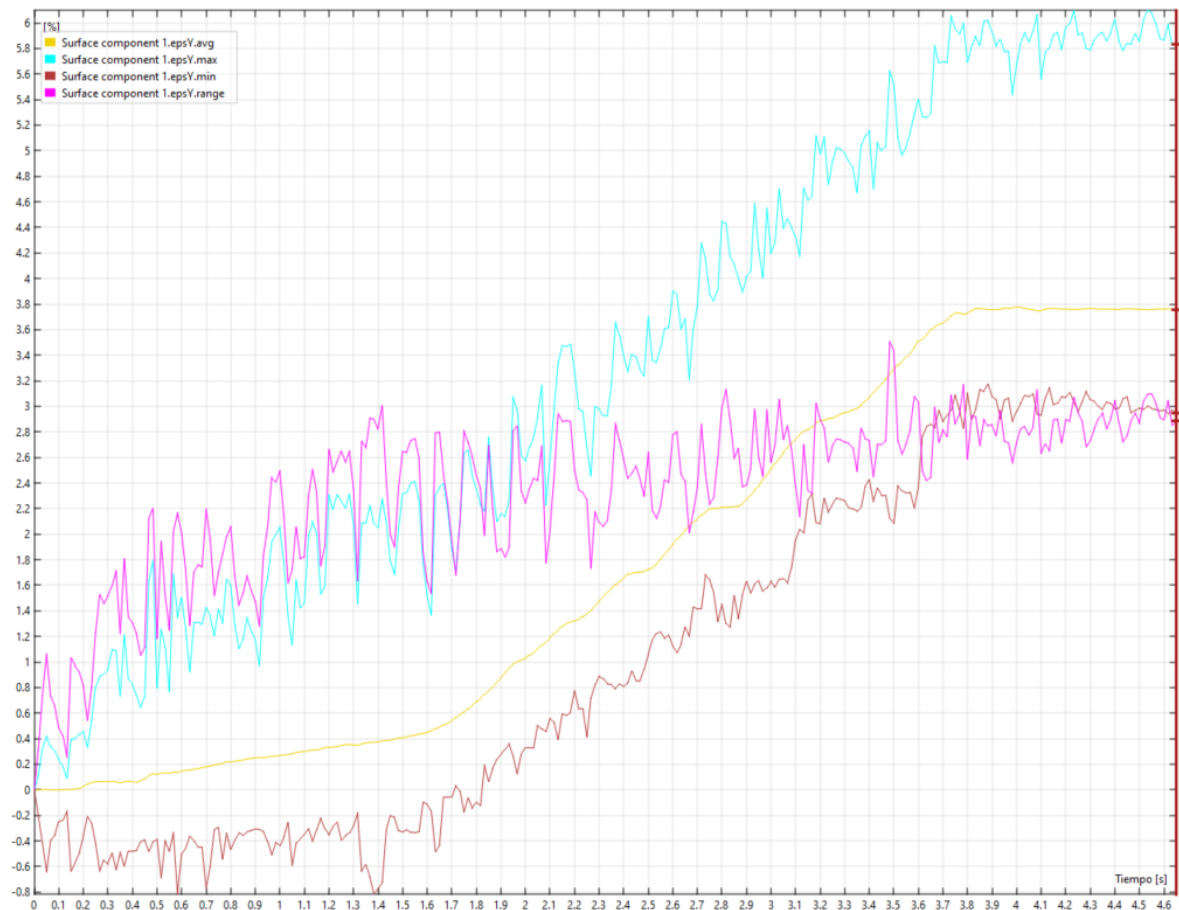


Figura 39. Probeta aluminio 1.3 f_20 d_20

- Deformación mínima: -0,003%
- Deformación máxima: 3,777%
- Rango máximo: 3,506%

6.1.4 PROBETA 2.1

6.1.4.1 Tamaño de faceta 10 y Distancia entre puntos 10

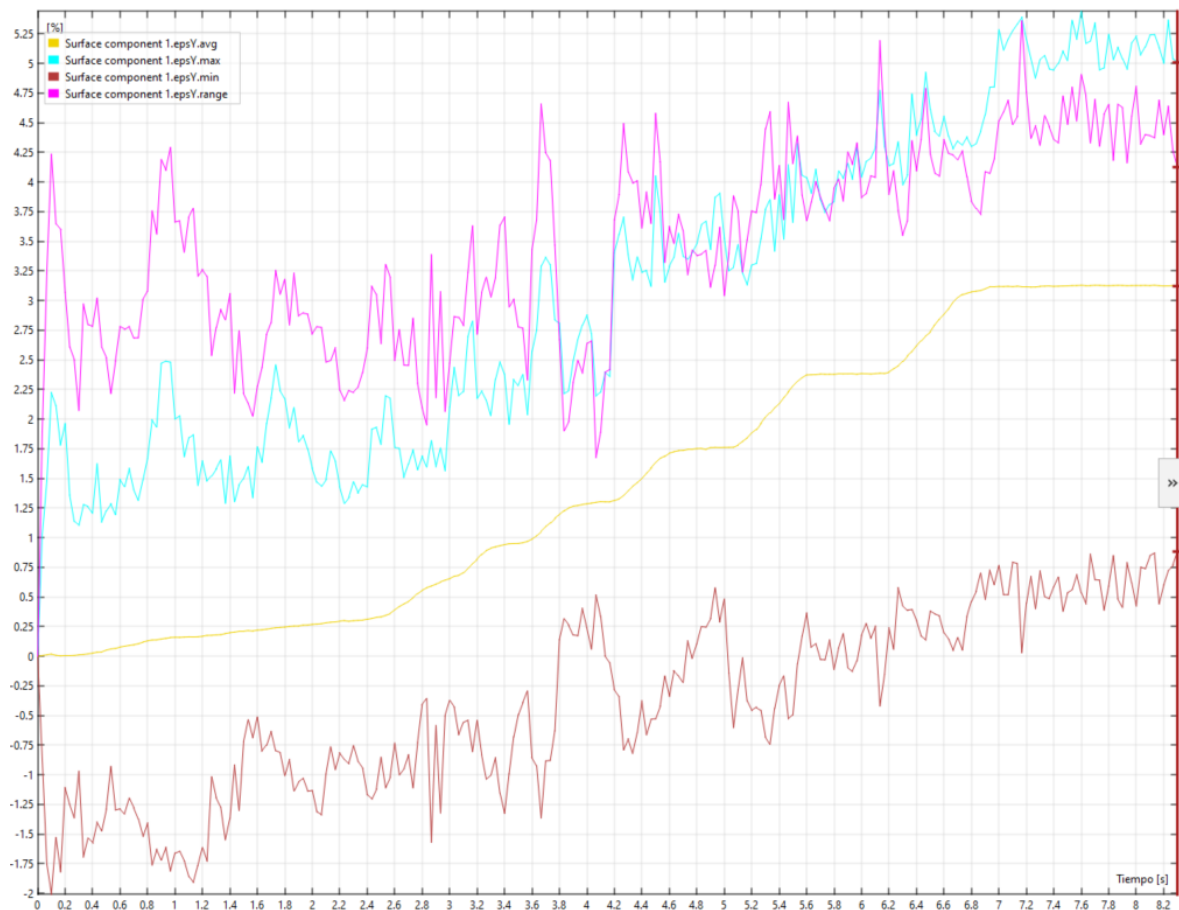


Figura 40. Probeta aluminio 2.1 f_10 d_10

- Deformación mínima: 0,004%
- Deformación máxima: 3,130%
- Rango máximo: 5,359%

6.1.4.2 Tamaño de faceta 15 y Distancia entre puntos 15

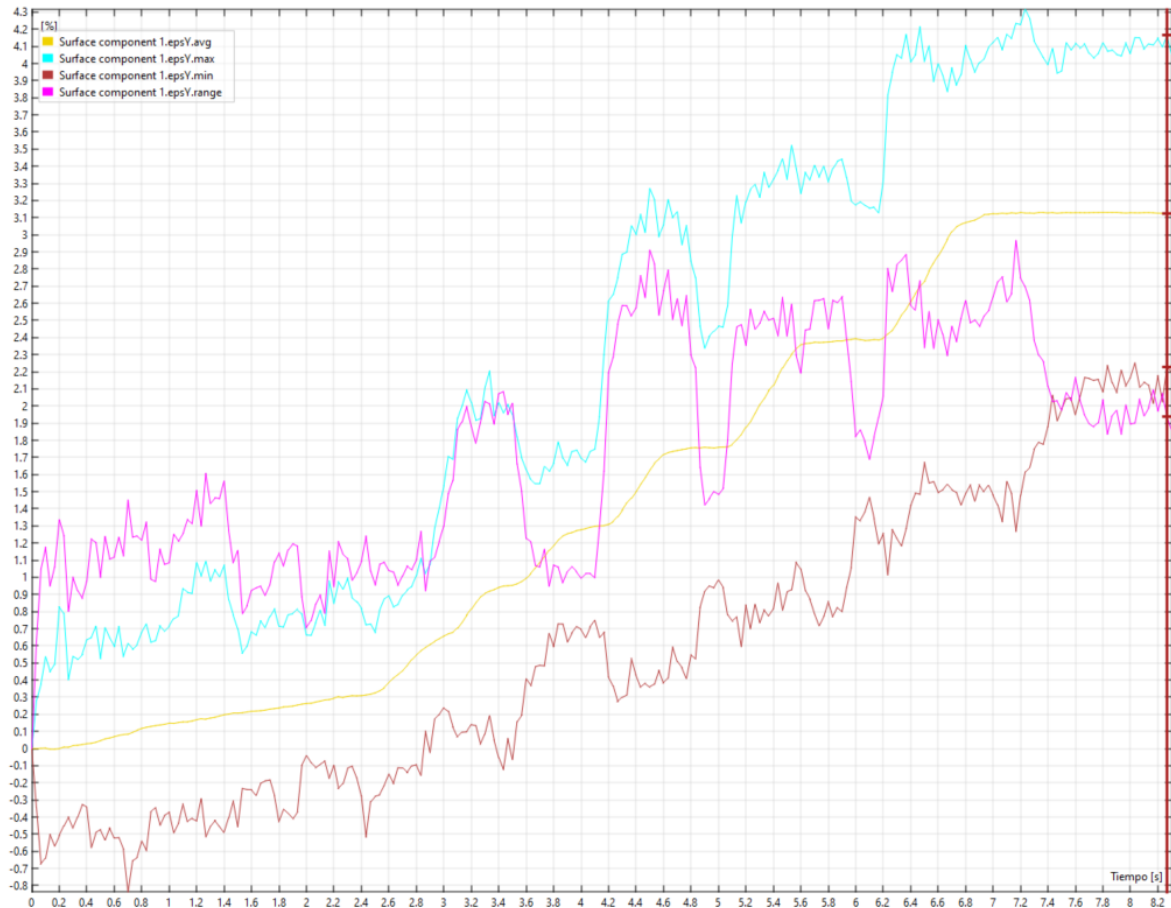


Figura 41. Probeta aluminio 2.1 f_15 d_15

- Deformación mínima: -0,004%
- Deformación máxima: 3,131%
- Rango máximo: 2,965%

6.1.4.3 Tamaño de faceta 20 y Distancia entre puntos 20

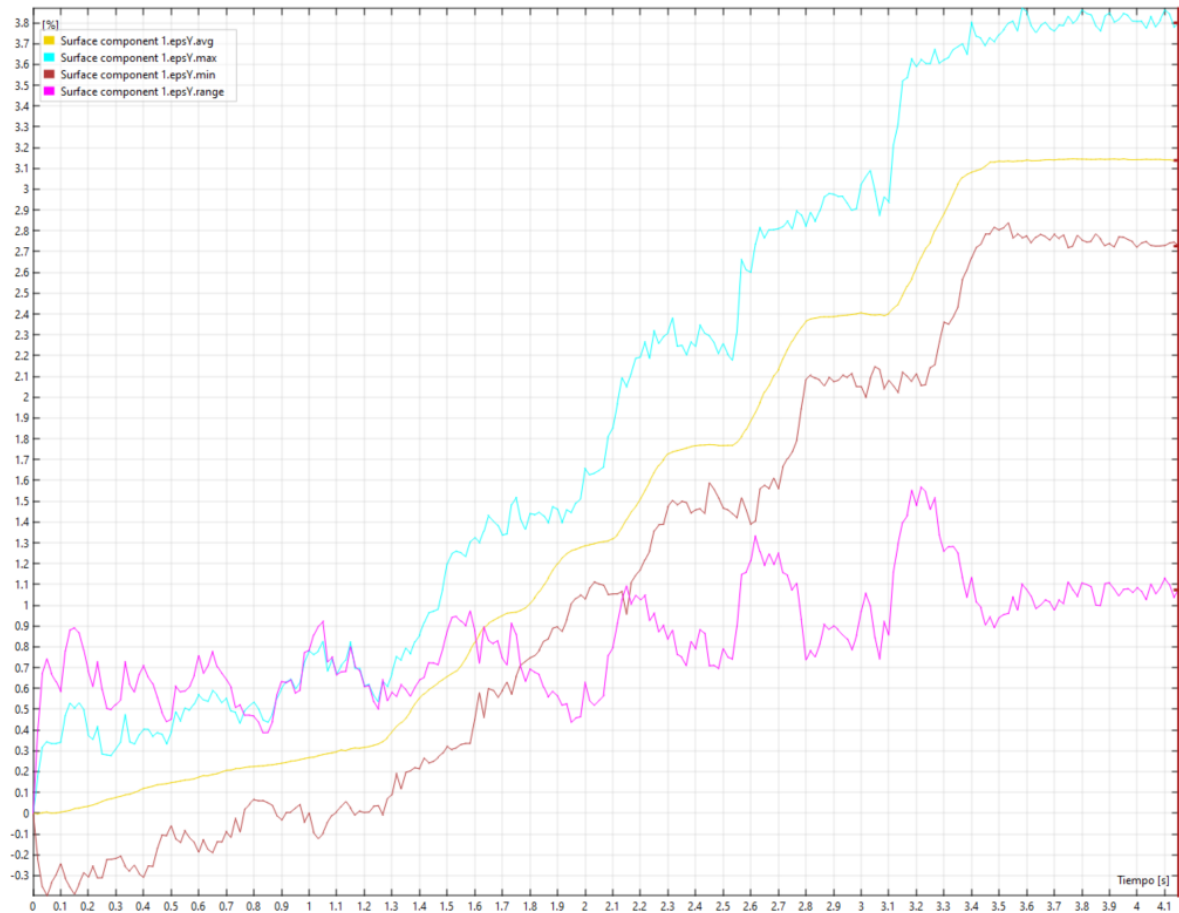


Figura 42. Probeta aluminio 2.1 f_20 d_20

- Deformación mínima: -0,004%
- Deformación máxima: 3,146%
- Rango máximo: 1,566%

6.1.5 PROBETA 2.2

6.1.5.1 Tamaño de faceta 10 y Distancia entre puntos 10

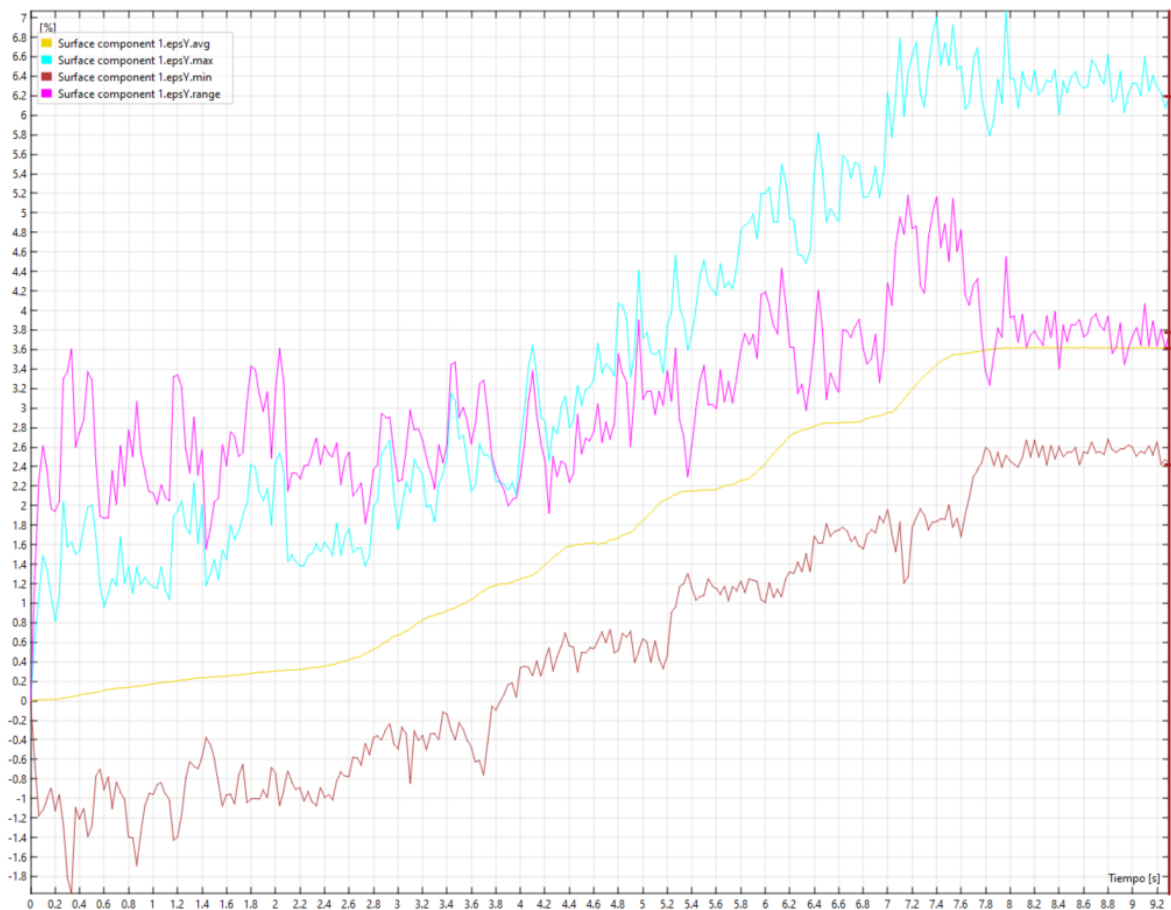


Figura 43. Probeta aluminio 2.2 f_10 d_10

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 3,621%
- Rango máximo: 5,178%

6.1.5.2 Tamaño de faceta 15 y Distancia entre puntos 15

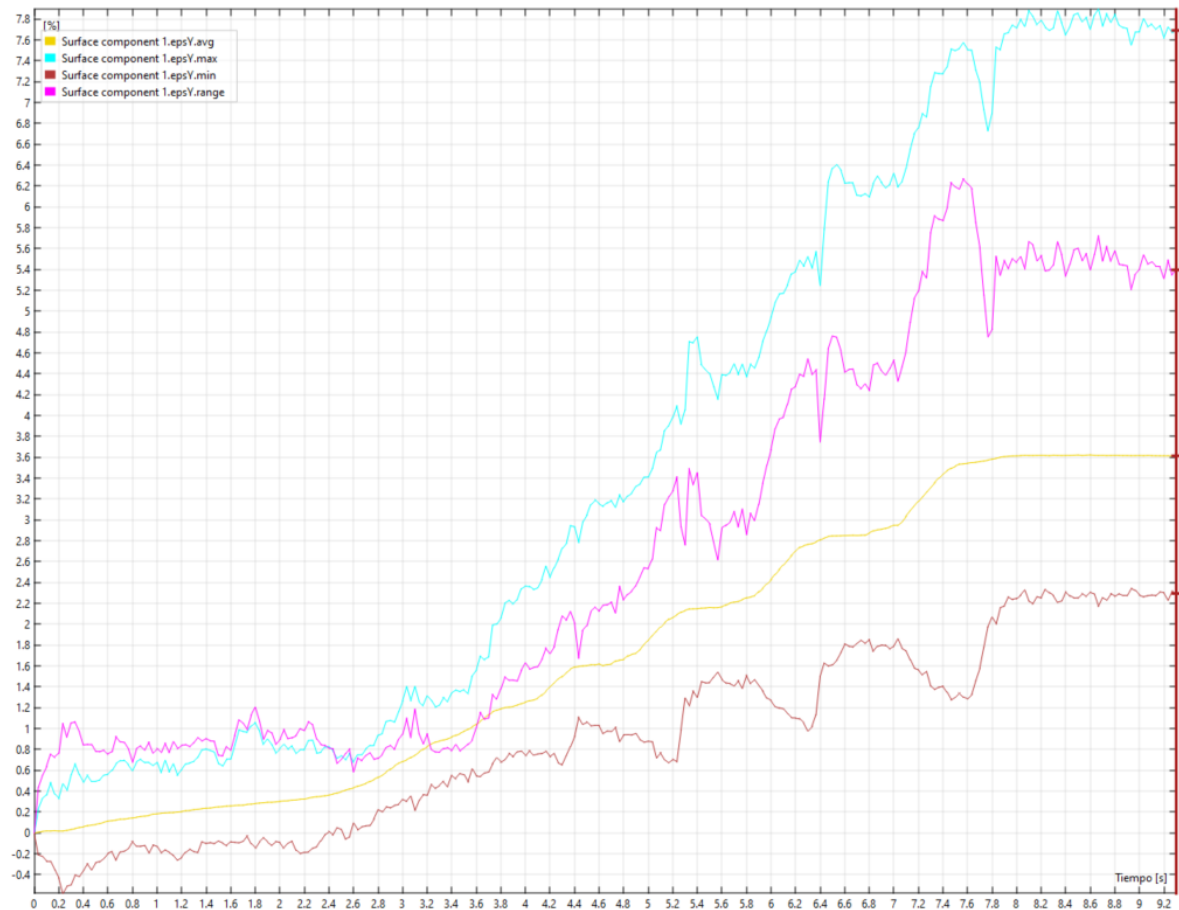


Figura 44. Probeta aluminio 2.2 f_15 d_15

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 3,623%
- Rango máximo: 6,270%

6.1.5.3 Tamaño de faceta 20 y Distancia entre puntos 20

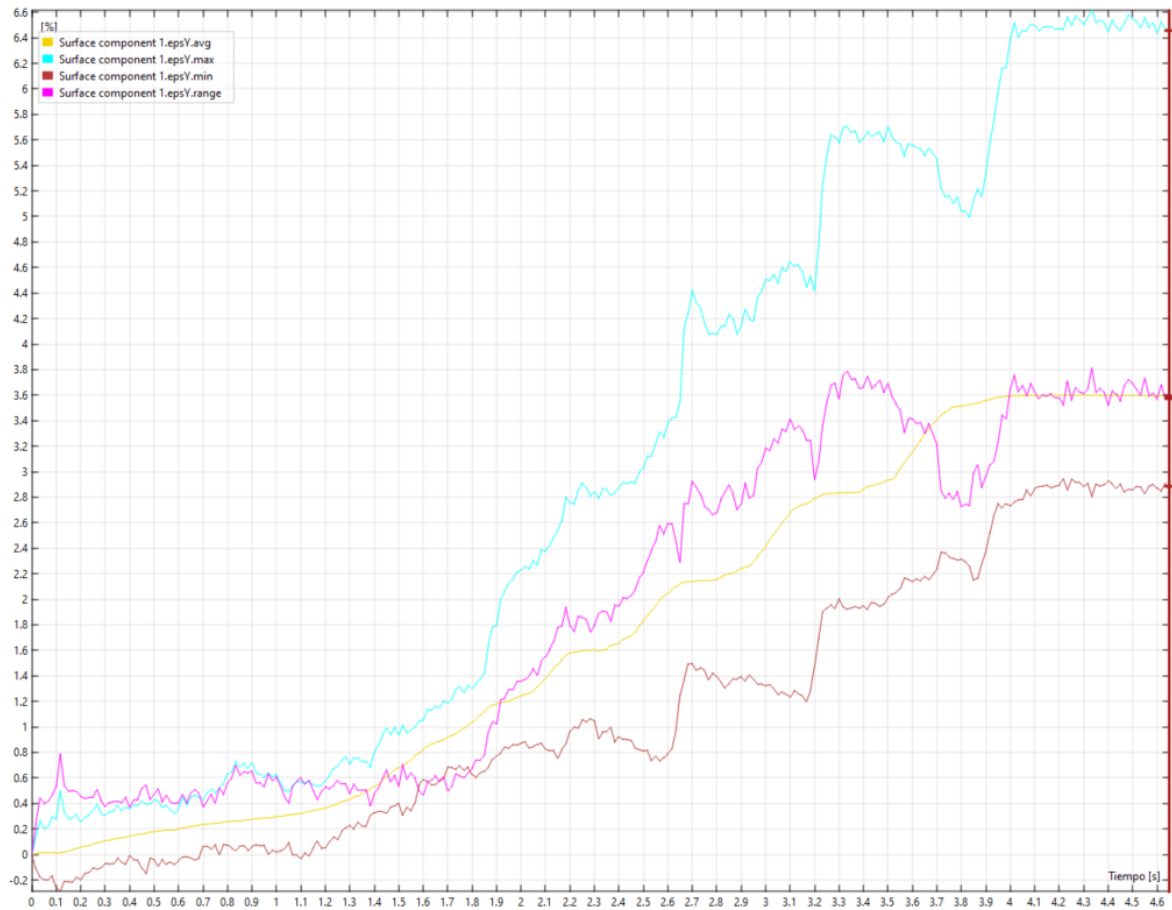


Figura 45. Probeta aluminio 2.2 f_20 d_20

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 3,6%
- Rango máximo: 3,812%

6.1.6 PROBETA 2.3

6.1.6.1 Tamaño de faceta 10 y Distancia entre puntos 10

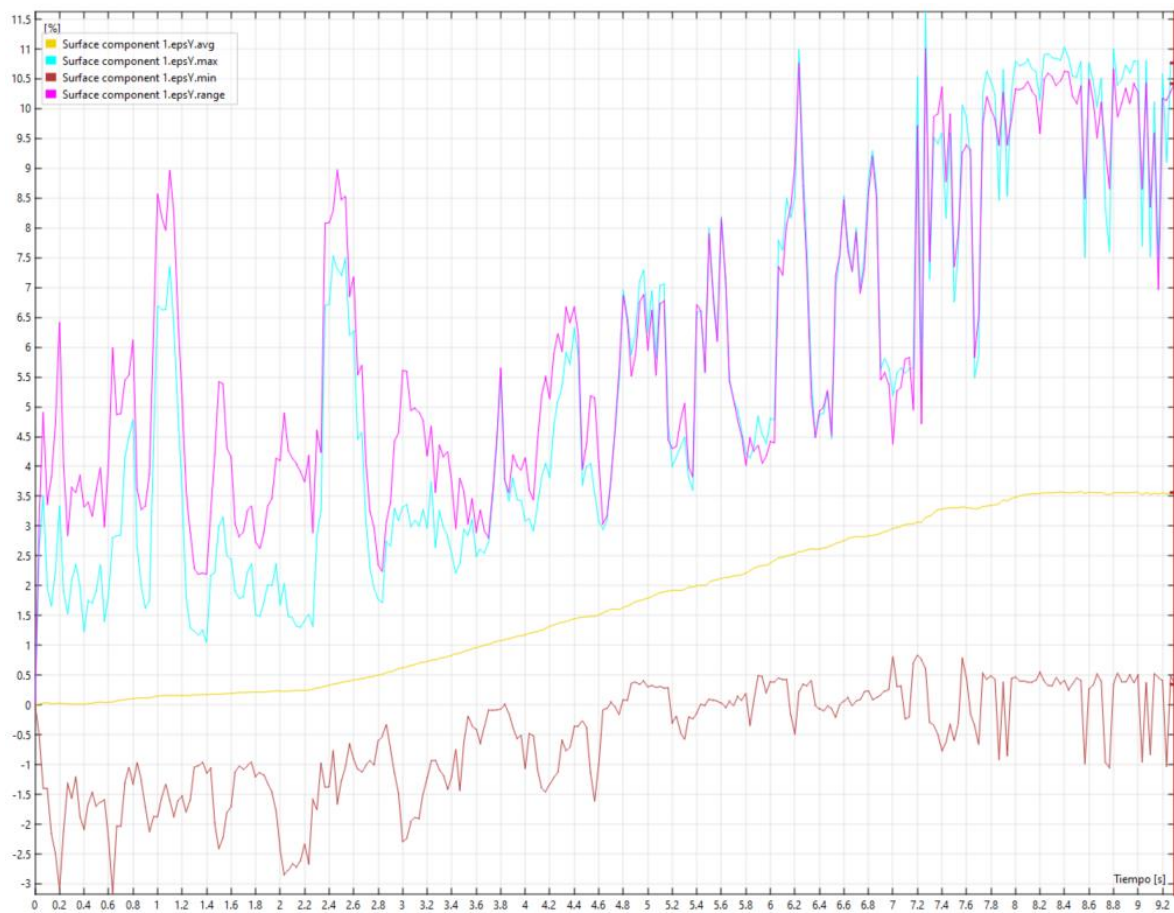


Figura 46. Probeta aluminio 2.3 f_10 d_10

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 3,577%
- Rango máximo: 11,005%

6.1.6.2 Tamaño de faceta 15 y Distancia entre puntos 15

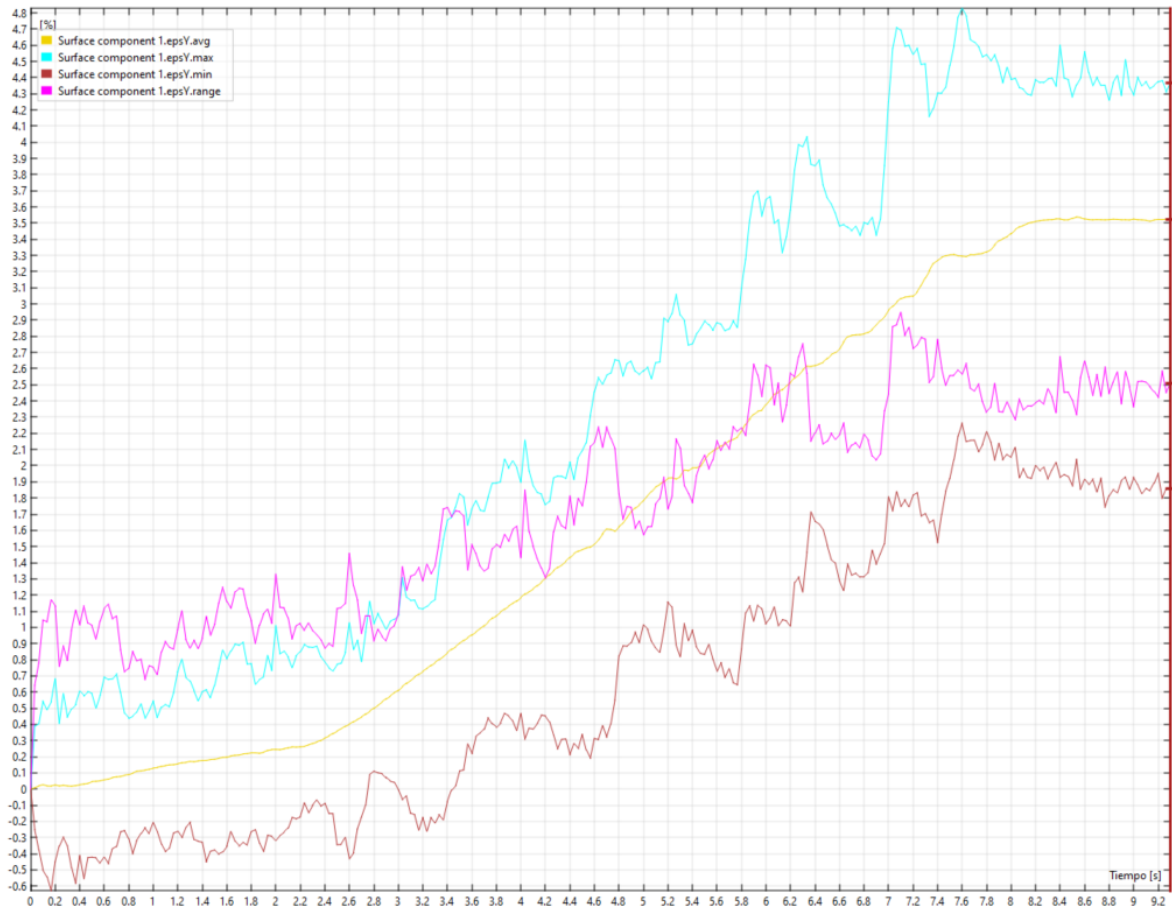


Figura 47. Probeta aluminio 2.3 f_15 d_15

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 3,538%
- Rango máximo: 2,948%

6.1.6.3 Tamaño de faceta 20 y Distancia entre puntos 20

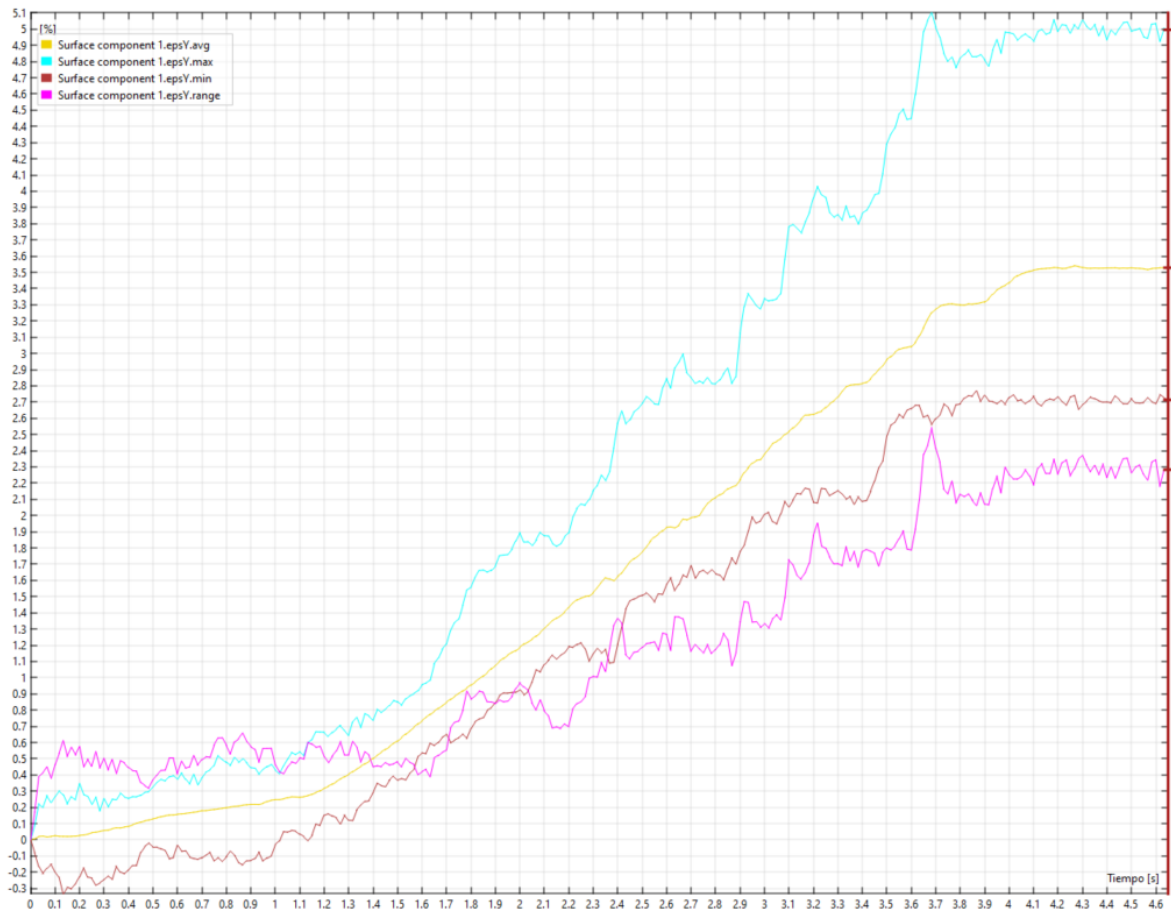


Figura 48. Probeta aluminio 2.3 f_20 d_20

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 3,541%
- Rango máximo: 2,542%

6.1.7 PROBETA 3.1

6.1.7.1 Tamaño de faceta 10 y Distancia entre puntos 10

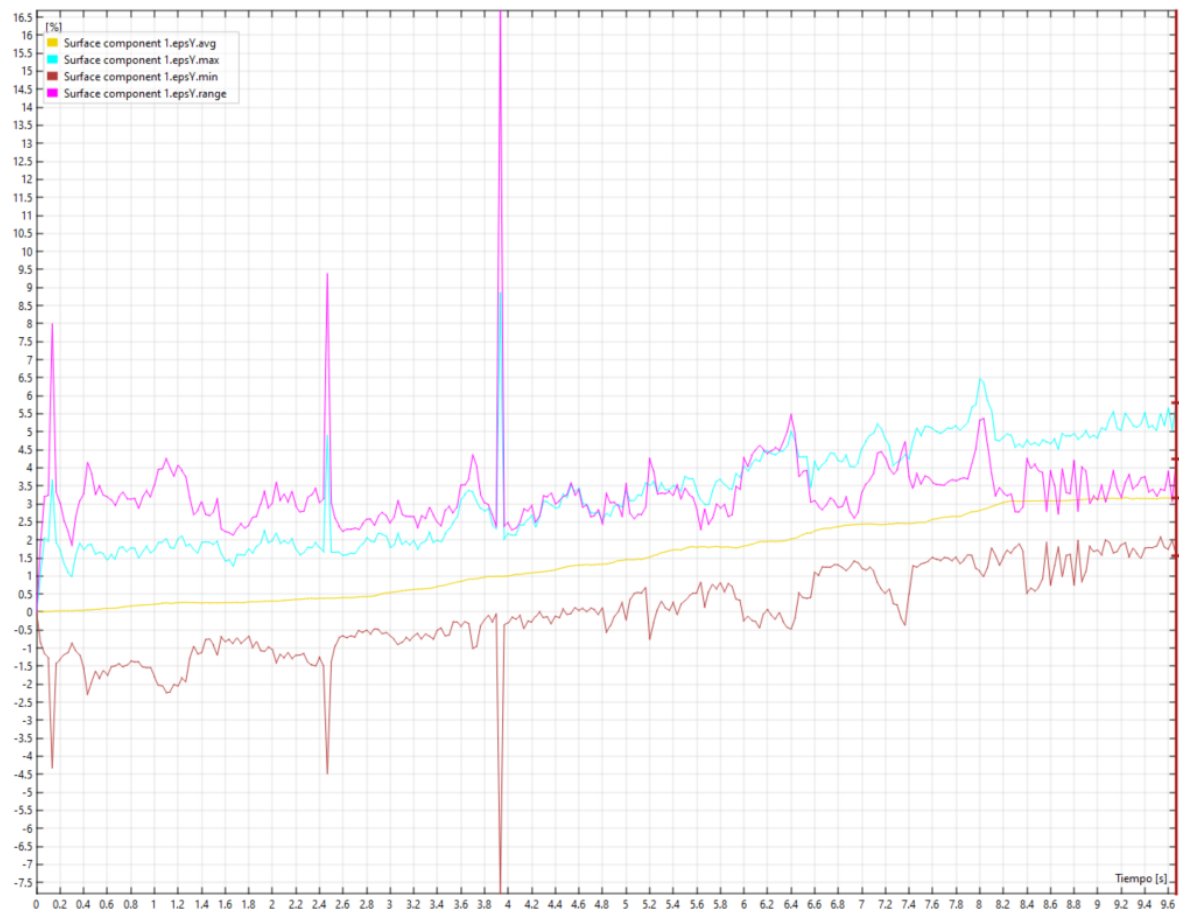


Figura 49. Probeta aluminio 3.1 f_10 d_10

- Deformación mínima: -0,001%
- Deformación máxima: 3,164%
- Rango máximo: 16,675%

6.1.7.2 Tamaño de faceta 15 y Distancia entre puntos 15

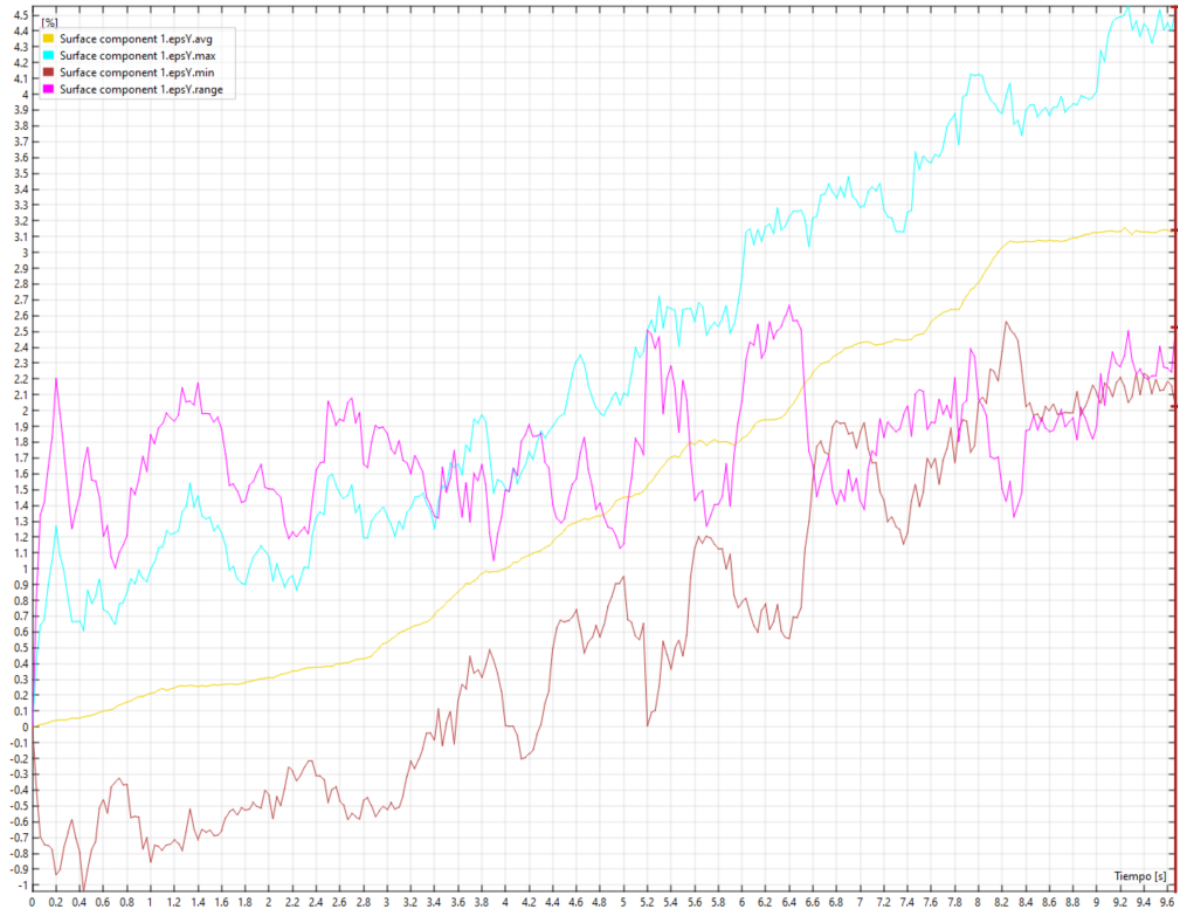


Figura 50. Probeta aluminio 3.1 f_15 d_15

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 3,155%
- Rango máximo: 2,666%

6.1.7.3 Tamaño de faceta 20 y Distancia entre puntos 20

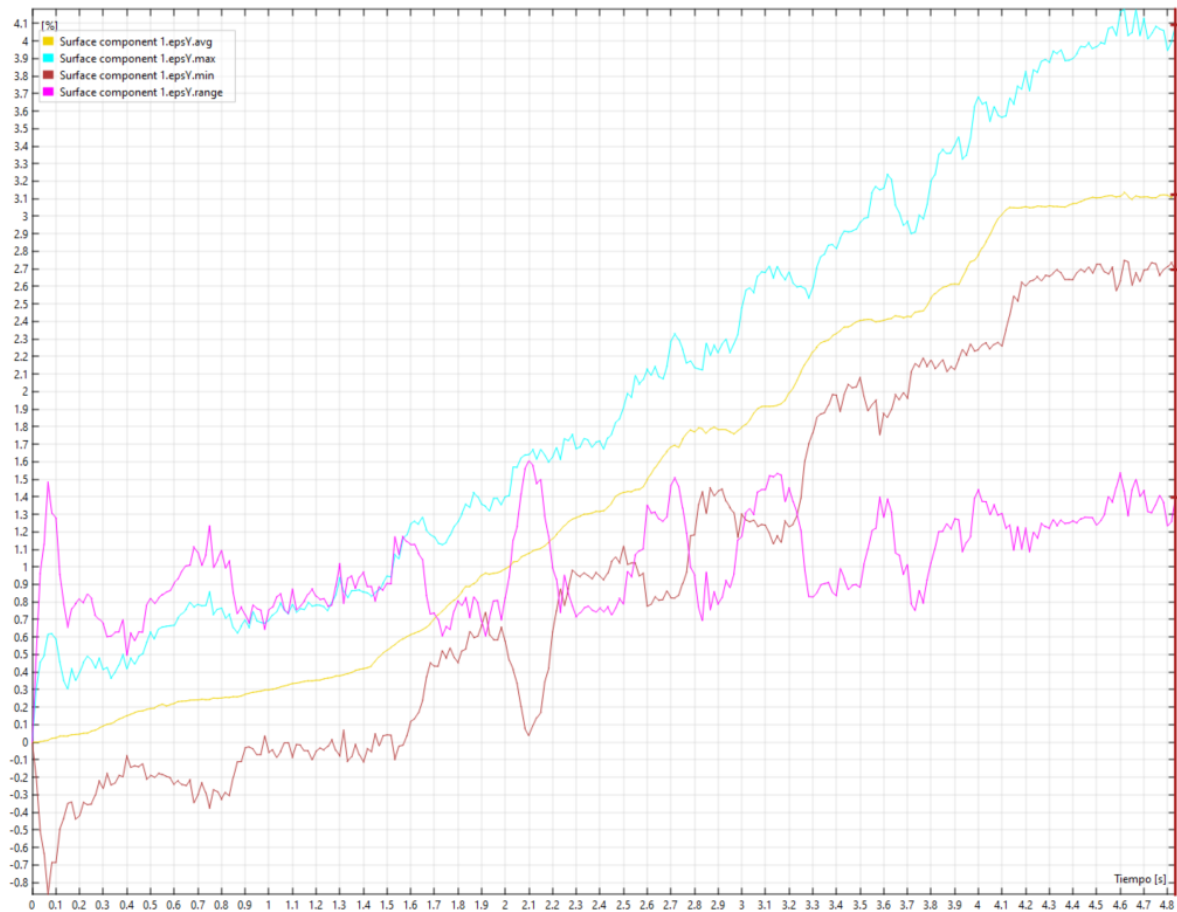


Figura 51. Probeta aluminio 3.1 f_20 d_20

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 3,135%
- Rango máximo: 1,603%

6.1.8 PROBETA 3.2

6.1.8.1 Tamaño de faceta 10 y Distancia entre puntos 10

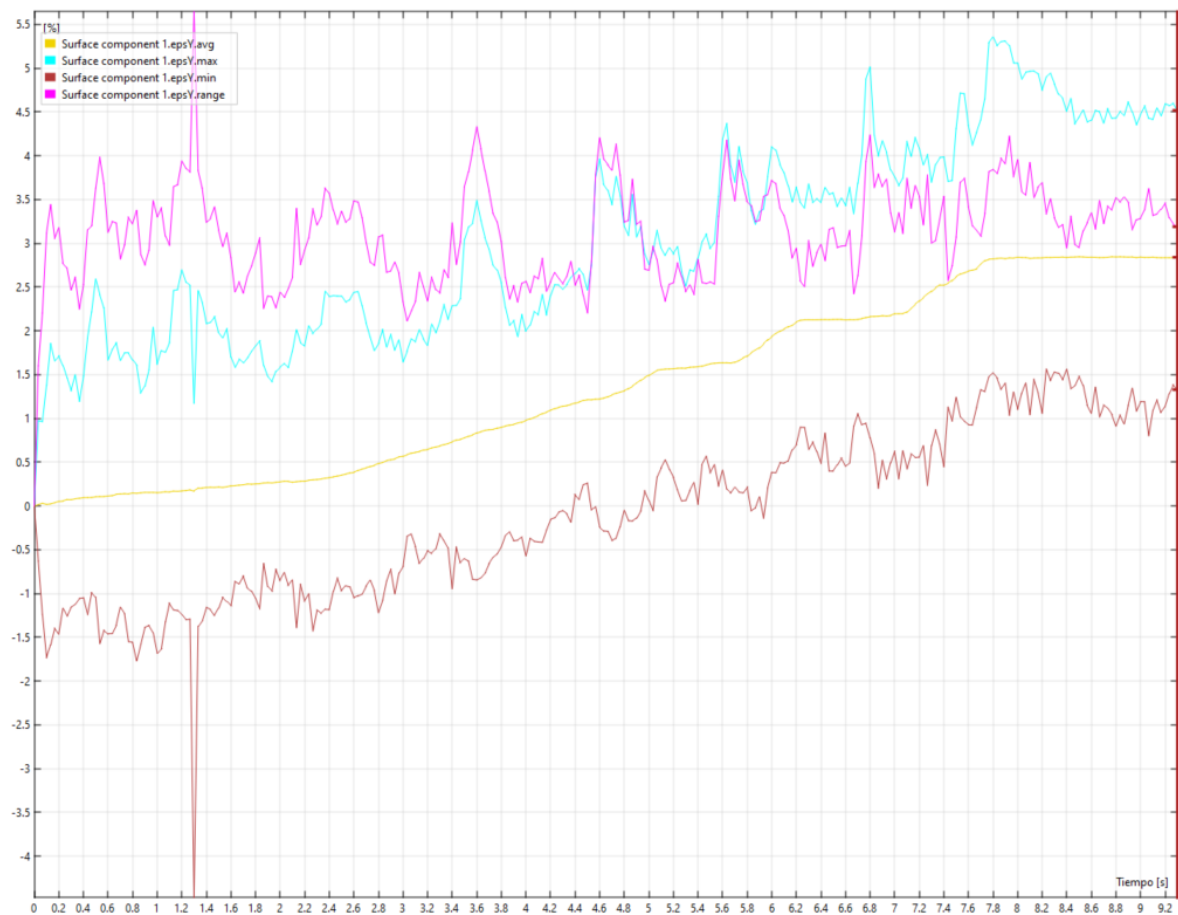


Figura 52. Probeta aluminio 3.2 f_10 d_10

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 2,847%
- Rango máximo: 5,646%

6.1.8.2 Tamaño de faceta 15 y Distancia entre puntos 15

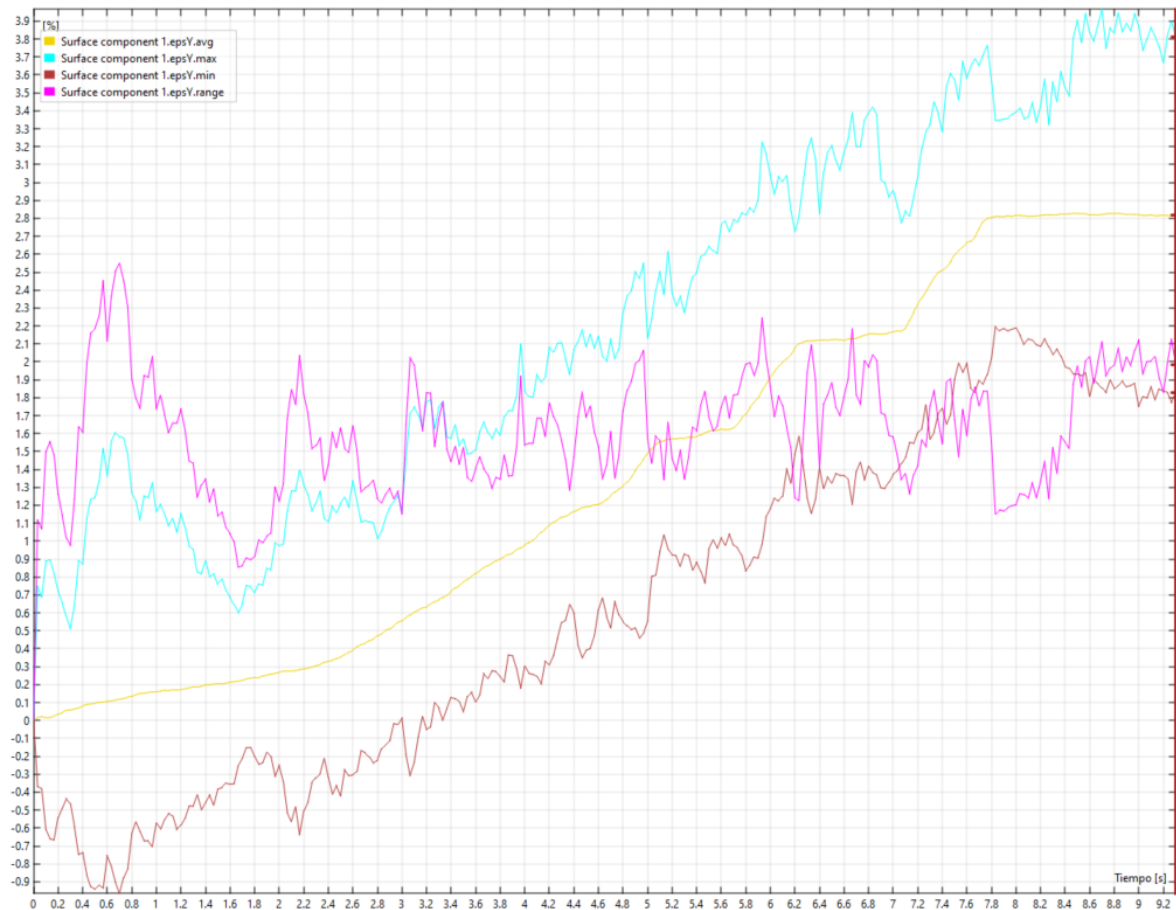


Figura 53. Probeta aluminio 3.2 f_15 d_15

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 2,829%
- Rango máximo: 2,549%

6.1.8.3 Tamaño de faceta 20 y Distancia entre puntos 20

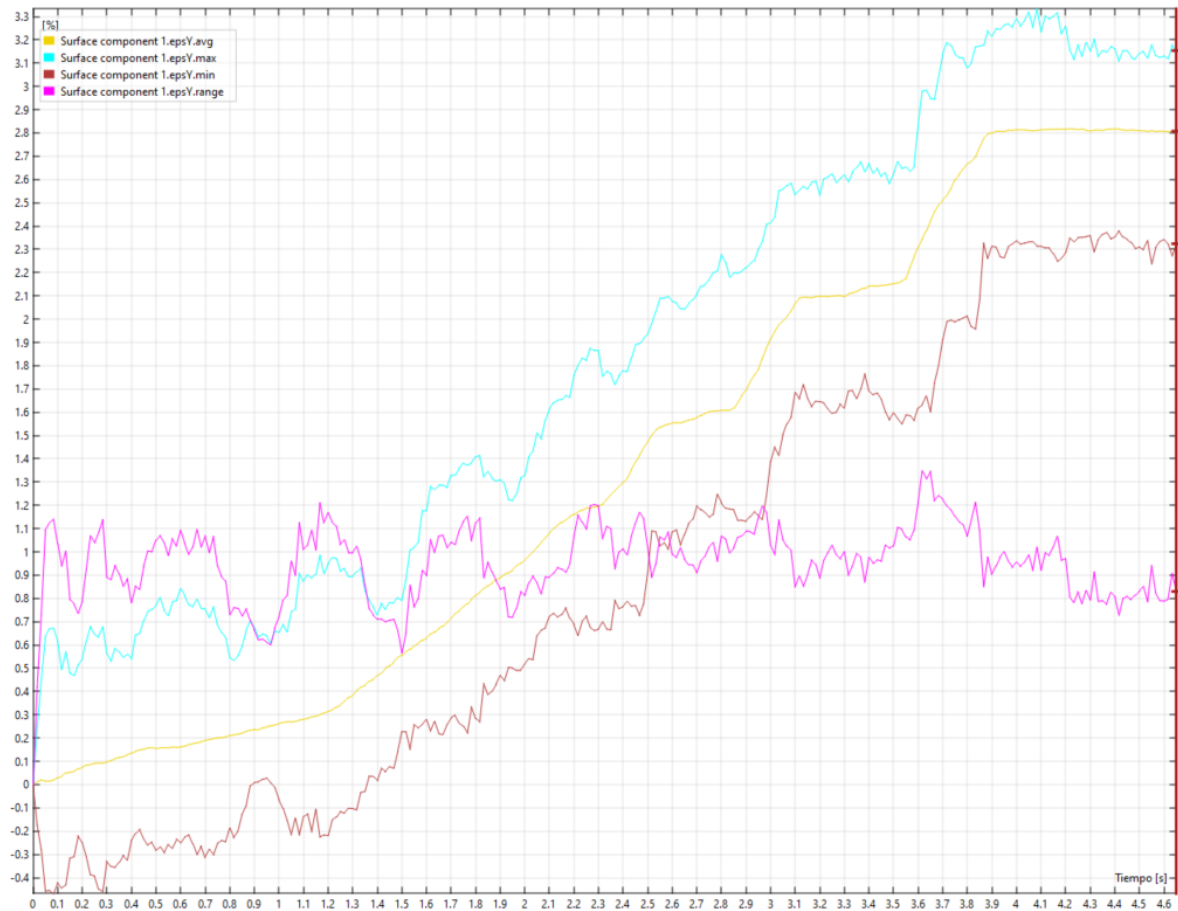


Figura 54. Probeta aluminio 3.2 f_20 d_20

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 2,817%
- Rango máximo: 1,384%

6.1.9 PROBETA 3.3

6.1.9.1 Tamaño de faceta 10 y Distancia entre puntos 10

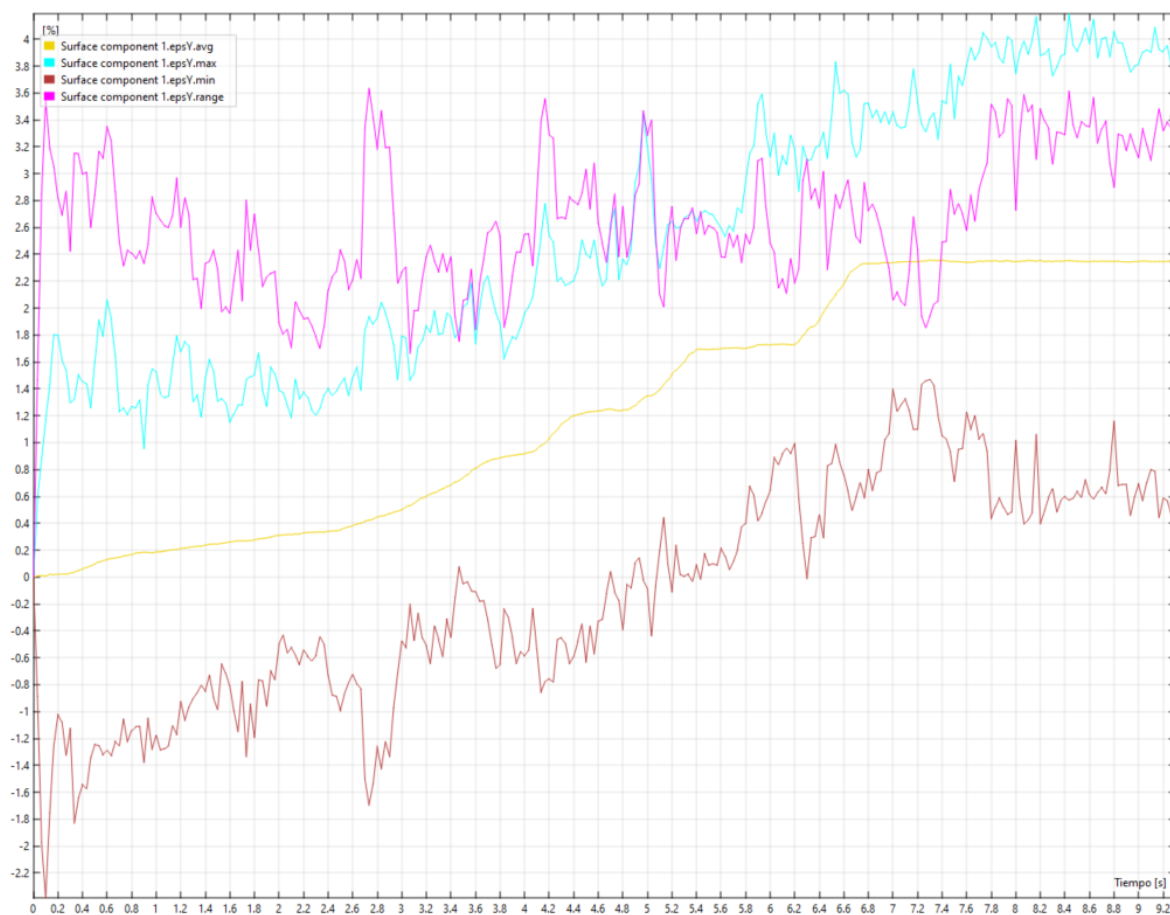


Figura 55. Probeta aluminio 3.3 f_10 d_10

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 2,357%
- Rango máximo: 3,633%

6.1.9.2 Tamaño de faceta 15 y Distancia entre puntos 15

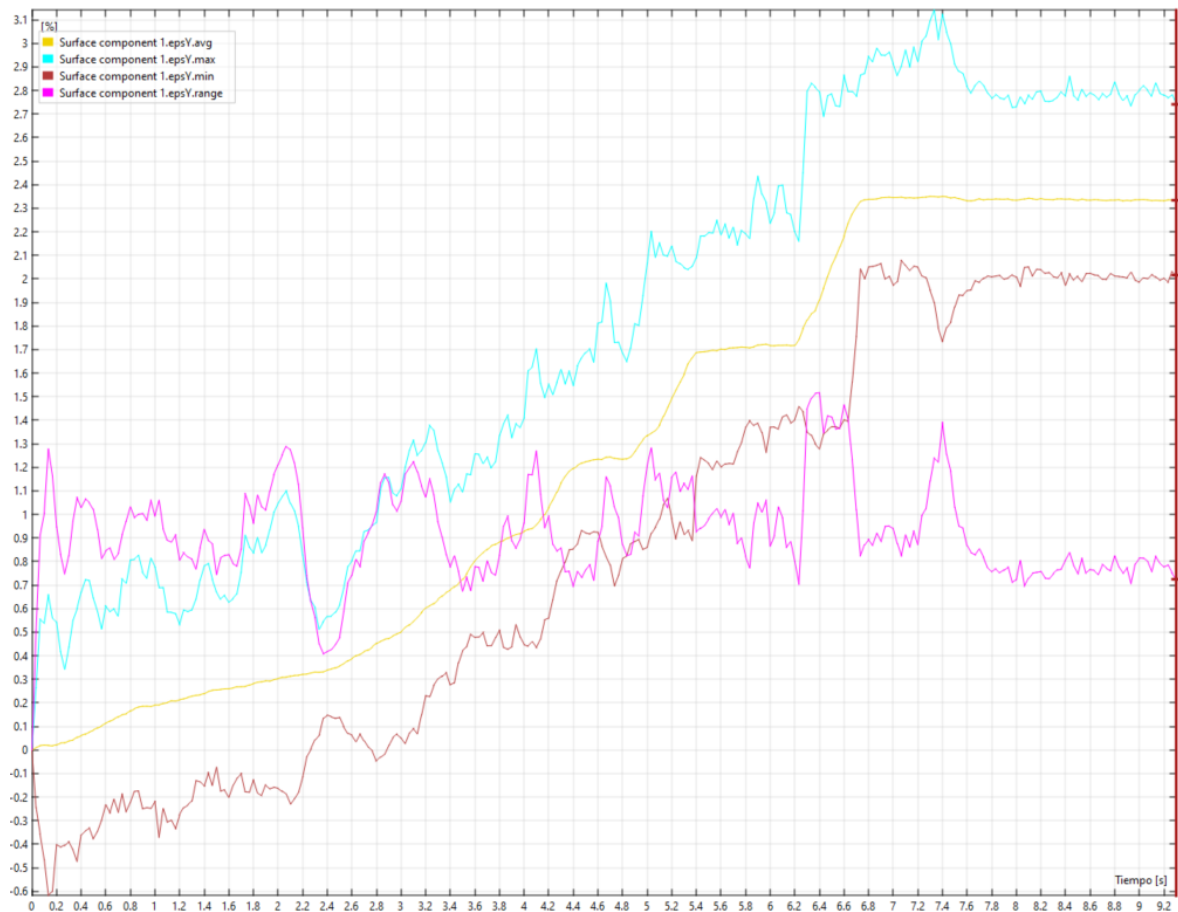


Figura 56. Probeta aluminio 3.3 f_15 d_15

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 2,350%
- Rango máximo: 1,516%

6.1.9.3 Tamaño de faceta 20 y Distancia entre puntos 20

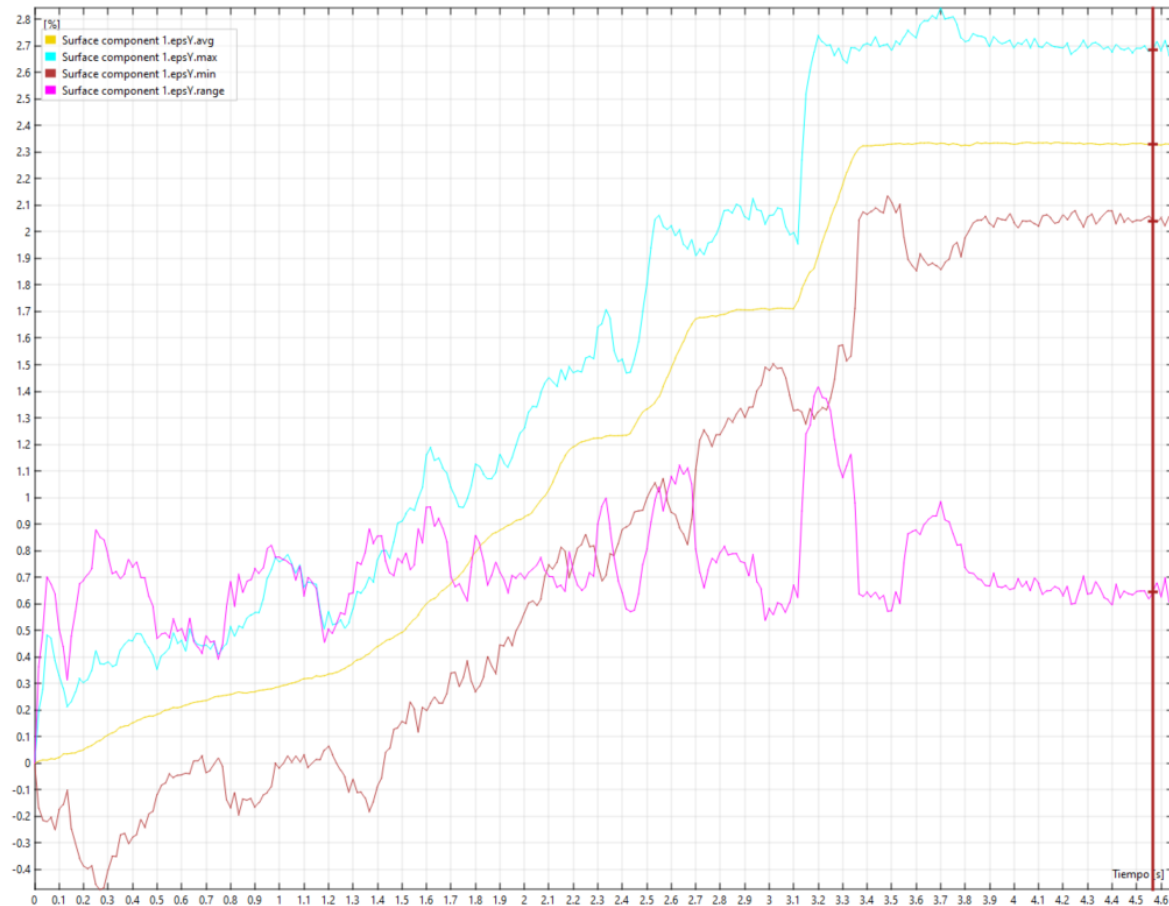


Figura 57. Probeta aluminio 3.3 f_20 d_20

- Deformación mínima: 0%
- Deformación máxima: 2,335%
- Rango máximo: 1,416%

6.1.10 MEDIDAS DE DESPLAZAMIENTO Y DEFORMACIÓN DE CADA CASO

	d (mm)		Δd (mm)	ϵ_y (a partir de d) (%)		Error (%)
	Extensómetro	GOM		Extensómetro	GOM	
1.1	1,432	1,794	0,362	2,864	3,588	25,28
1.2	1,866	2,337	0,471	3,733	4,674	25,22
1.3	1,098	1,920	0,822	2,196	3,840	74,83
2.1	1,222	1,560	0,338	2,444	3,120	27,67
2.2	1,338	1,815	0,477	2,676	3,630	35,64
2.3	1,224	1,694	0,470	2,449	3,388	38,36
3.1	1,102	1,537	0,435	2,205	3,074	39,43
3.2	1,070	1,425	0,355	2,140	2,850	33,20
3.3	0,940	1,190	0,250	1,879	2,380	26,64

Tabla 2. Medida desplazamientos y deformación probetas aluminio

En la Tabla 2, se ha representado la medida final en milímetros tanto del extensómetro como de GOM Correlate así como el error de medida entre las dos. Además, se ha incluido la medida de porcentaje de deformación calculado a partir de la medida “d” y la medida del extensómetro. Este error no es relevante en este caso ya que no se está estudiando con este grupo de probetas la similitud en resultados de los dos métodos.

ϵ_y (a partir de d), %	ϵ_y (calculado en GOM), %					
	Min			Max		
GOM	$fs10_pd10$	$fs15_pd15$	$fs20_pd20$	$fs10_pd10$	$fs15_pd15$	$fs20_pd20$
3,588	0	-0,001	0	3,644	3,591	3,644
4,674	0	0	0	4,585	4,582	4,594
3,840	-0,002	0	-0,003	3,841	3,803	3,777
3,120	0	-0,004	-0,004	3,130	3,131	3,146
3,630	0	0	0	3,621	3,623	3,600
3,388	0	0	0	3,577	3,538	3,541
3,074	-0,001	0	0	3,164	3,155	3,135
2,850	0	0	0	2,847	2,829	2,817
2,380	0	0	0	2,357	2,350	2,335

Tabla 3.Comparativa valores min/max deformación en GOM

Como se puede ver en la Tabla 3, si se estudia la influencia de los parámetros observando solo el valor inicial y final, cualquiera de las tres combinaciones puede ser válida ya que todas inician la medida en torno al 0 y los valores finales son prácticamente iguales entre los obtenidos con GOM Correlate y los calculados a partir de la distancia desplazada d.

	$\Delta\epsilon_{y\max}$, %		
	$fs10_pd10$	$fs15_pd15$	$fs20_pd20$
1.1	114,036	51,867	3,598
1.2	22,443	8,423	2,582
1.3	28,872	7,842	3,506
2.1	5,359	2,965	1,566
2.2	5,178	6,270	3,812
2.3	11,005	2,948	2,542
3.1	16,675	2,666	1,603

3.2	5,646	2,549	1,384
3.3	3,633	1,516	1,416

Tabla 4. Rango máximo de la medida de deformación en cada caso

Sin embargo, como se puede observar en la Tabla 4, si se analiza el valor máximo del rango entre la desviación máxima y mínima del porcentaje de deformación, se puede concluir con que la combinación de parámetros más precisa a lo largo del ensayo es la de tamaño de faceta 20 y distancia entre puntos 20.

Juntando las dos ramas de comparación, se ha obtenido que la mejor combinación de las estudiadas es la corresponde a ambos parámetros de valor 20, ya que las otras dos presentan claramente un mayor grado de error durante el ensayo exceptuando los valores iniciales y finales. Esto se justifica sabiendo que al coger más puntos de los deseados se introduce más ruido en el sistema lo que puede provocar errores en el cálculo de la malla en la simulación. Además, esto se puede observar analizando la superficie de control en la secuencia de fotogramas de los ensayos ya que se pueden llegar a formar agujeros en la malla interviniendo de forma negativa en la calidad de la misma, así como en la de la medida.

6.2 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON GOM CORRELATE Y CON EL EXTENSÓMETRO DE LAS PROBETAS DE ACERO

- El primer número del índice de cada probeta indica distancia entre las mordazas. Los tres primeros 70 mm, los tres siguientes 100 mm y los tres siguientes 150 mm.
- El segundo número del índice se usa como forma de clasificar las probetas según su preparación y tamaño de los puntos de color pintados. El primero es fino, el segundo es intermedio y el tercero es grueso.
- Por cada probeta se ha analizado solo la combinación de parámetros de GOM Correlate justificada como la más precisa de las tres estudiadas en el apartado

anterior. Esto significa que por cada probeta se ejecutará una única simulación con tamaño de faceta 20 y distancia entre puntos 20 buscando verificar la hipótesis de similitud entre los valores obtenidos mediante el uso del extensómetro y mediante GOM Correlate.

- Los vídeos de los ensayos se han cortado de forma que se tengan unos segundos previos al inicio de la acción de la máquina. Así posteriormente se ha podido mover el origen de la gráfica de desplazamiento de GOM Correlate para que coincida con el inicio del registro temporal de valores por parte del extensómetro para que se puede comprobar si es correcta la hipótesis inicial elaborada.
- Para el cálculo de los errores, se ha tomado como tiempo final el momento en el que el extensómetro alcanza su valor máximo.
- Para cada probeta se representará la curva de la medida de desplazamiento del extensómetro y la curva de la medida del desplazamiento de GOM tanto con los tiempos originales como con los tiempos sincronizados.

6.2.1 PROBETA 1.1

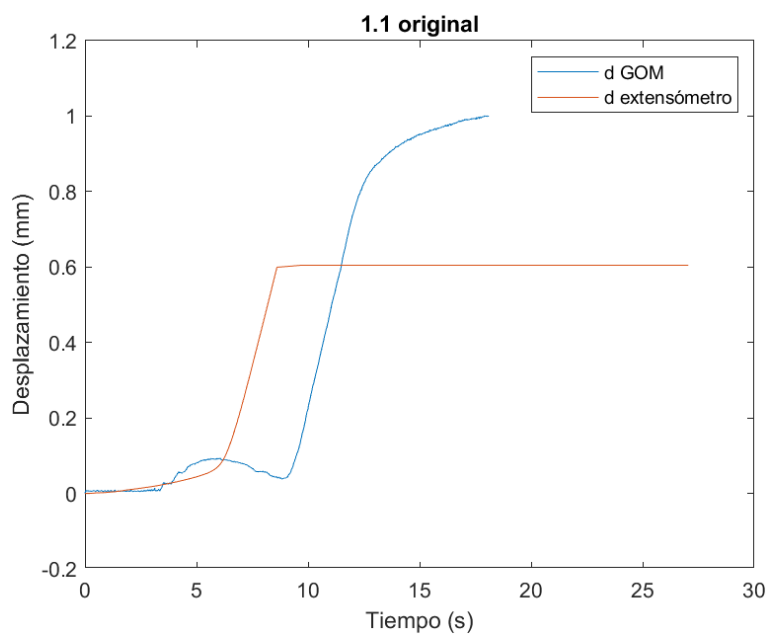


Figura 58. Probeta 1.1 original

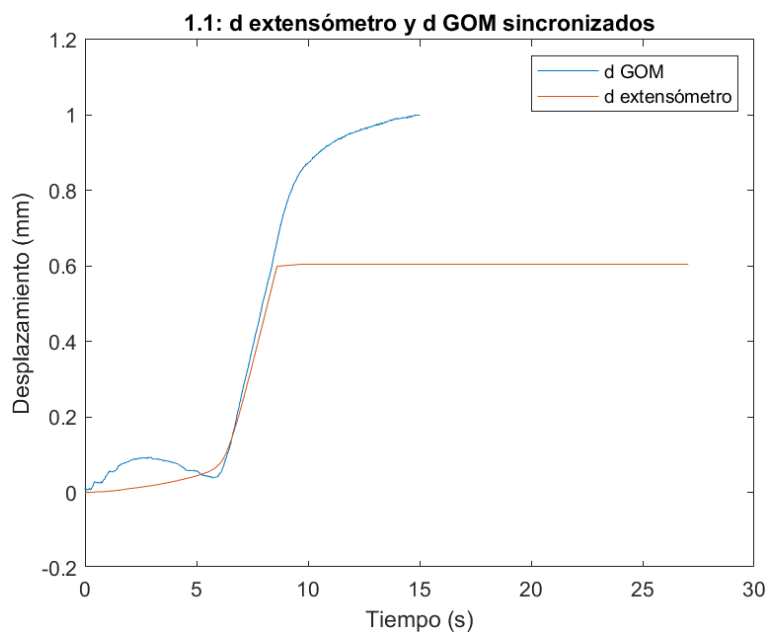


Figura 59. Probeta 1.1 gráficas sincronizadas

6.2.2 PROBETA 1.2

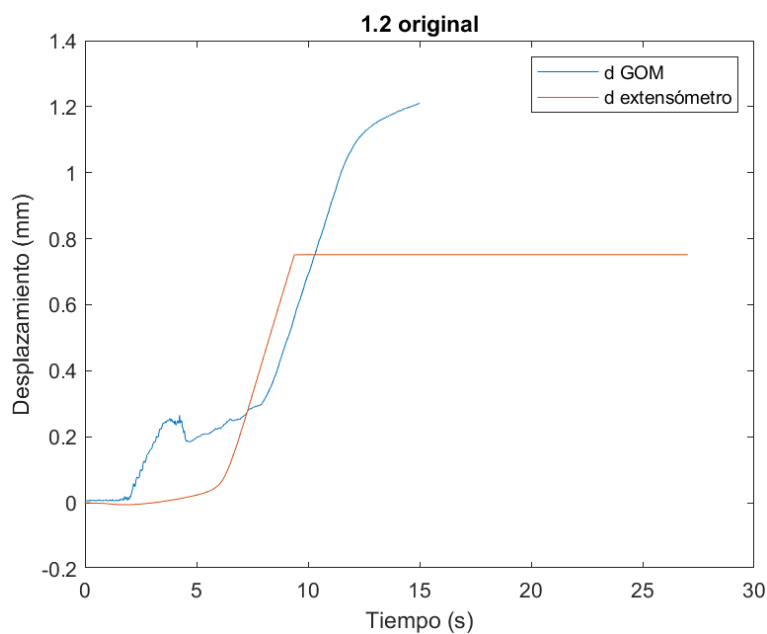


Figura 60. Probeta 1.2 original

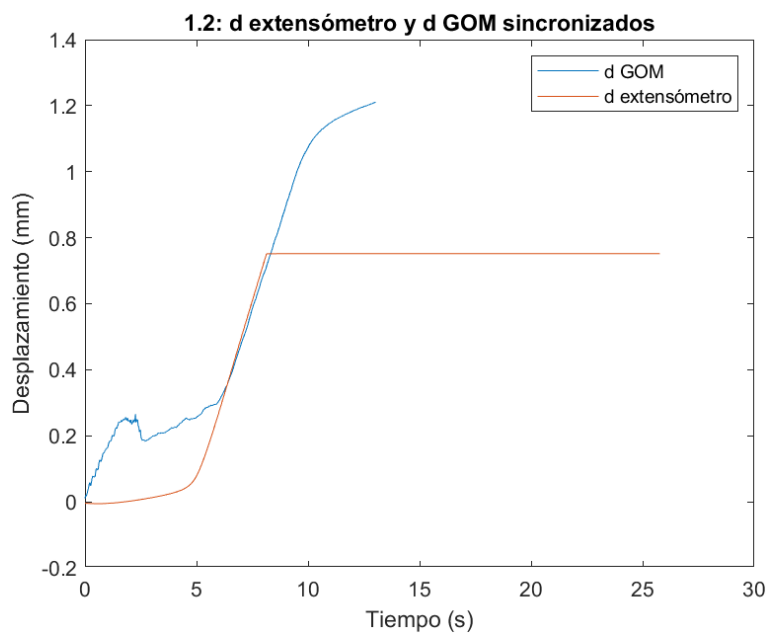


Figura 61. Probeta 1.2 gráficas sincronizadas

6.2.3 PROBETA 1.3

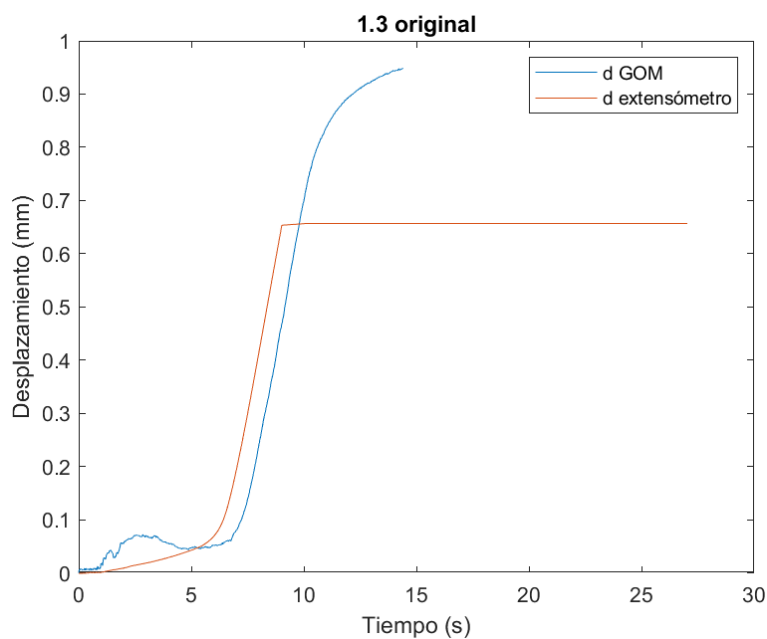


Figura 62. Probeta 1.3 original

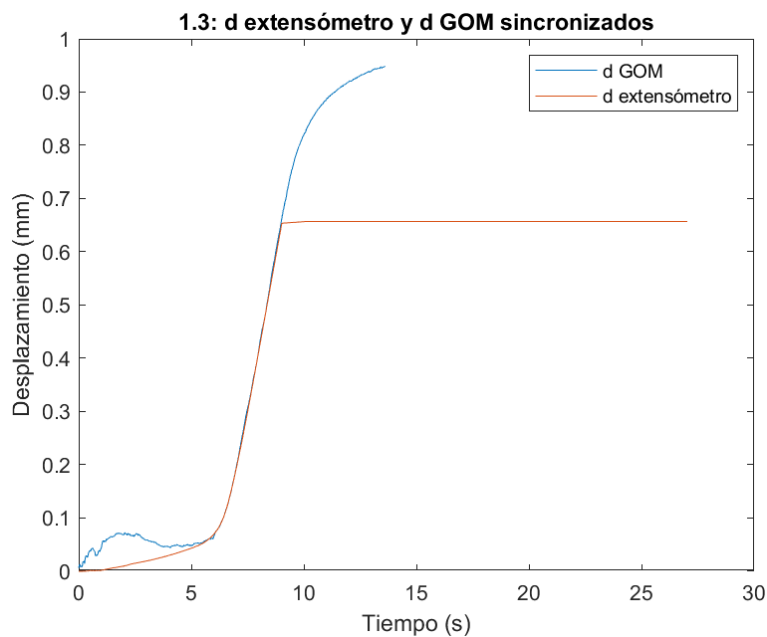


Figura 63. Probeta 1.3 gráficas sincronizadas

6.2.4 PROBETA 2.1

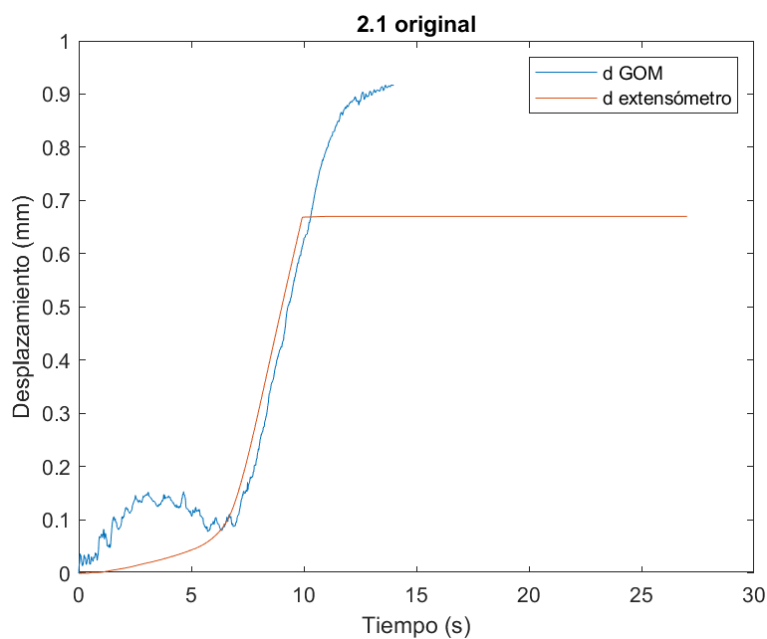


Figura 64. Probeta 2.1 original

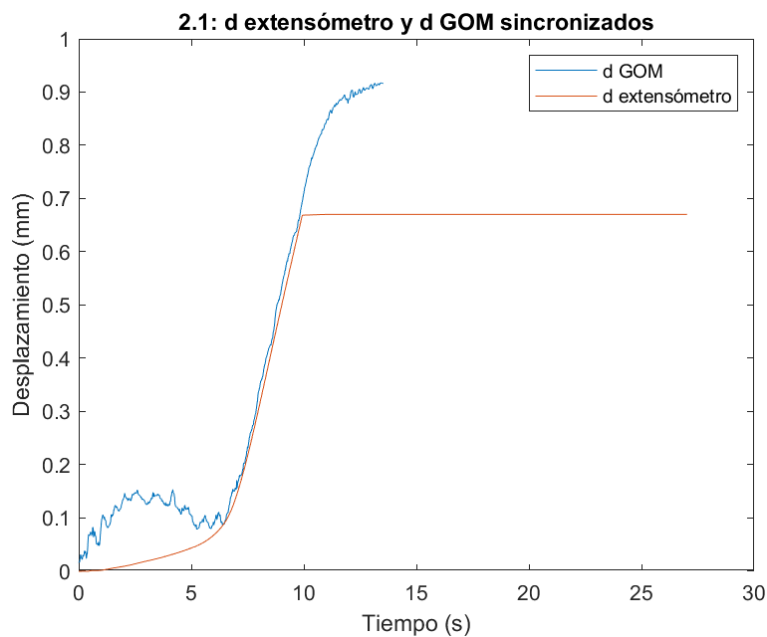


Figura 65. Probeta 2.1 gráficas sincronizadas

6.2.5 PROBETA 2.2

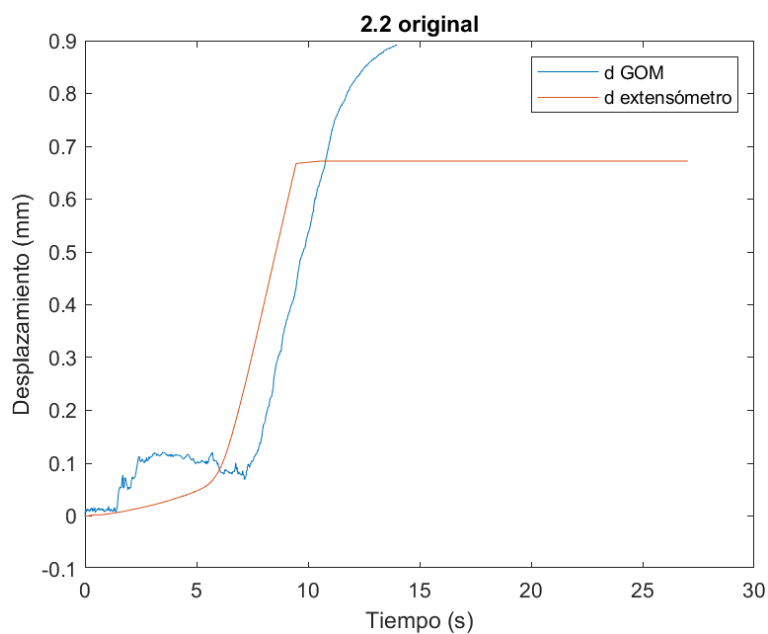


Figura 66. Probeta 2.2 original

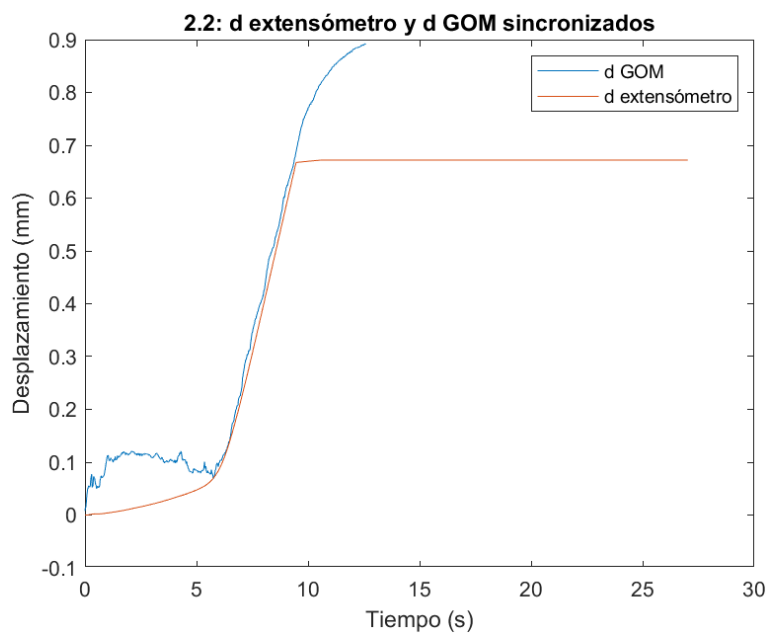


Figura 67. Probeta 2.2 gráficas sincronizadas

6.2.6 PROBETA 2.3

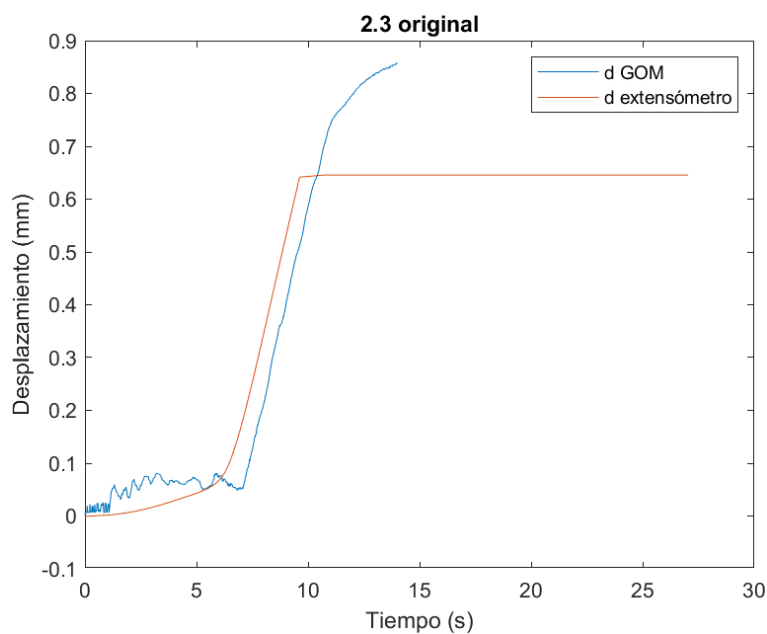


Figura 68. Probeta 2.3 original

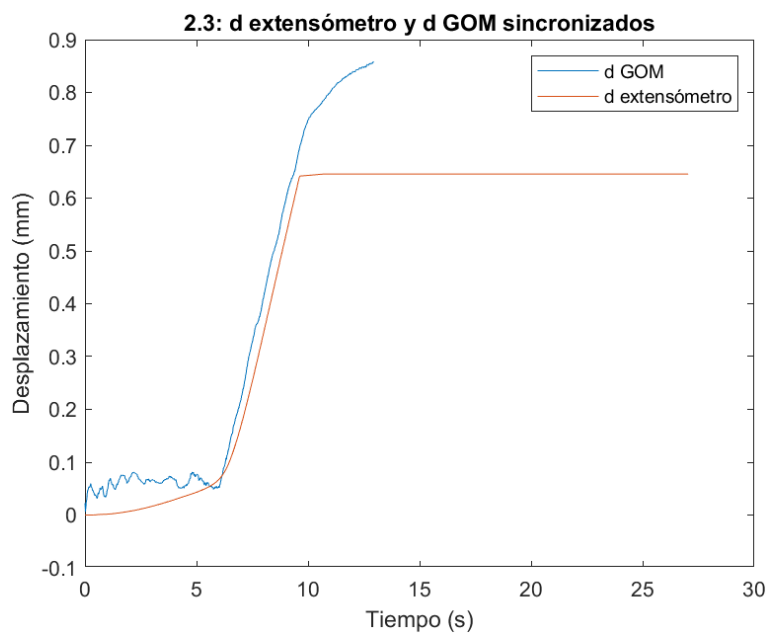


Figura 69. Probeta 2.3 gráficas sincronizadas

6.2.7 PROBETA 3.1

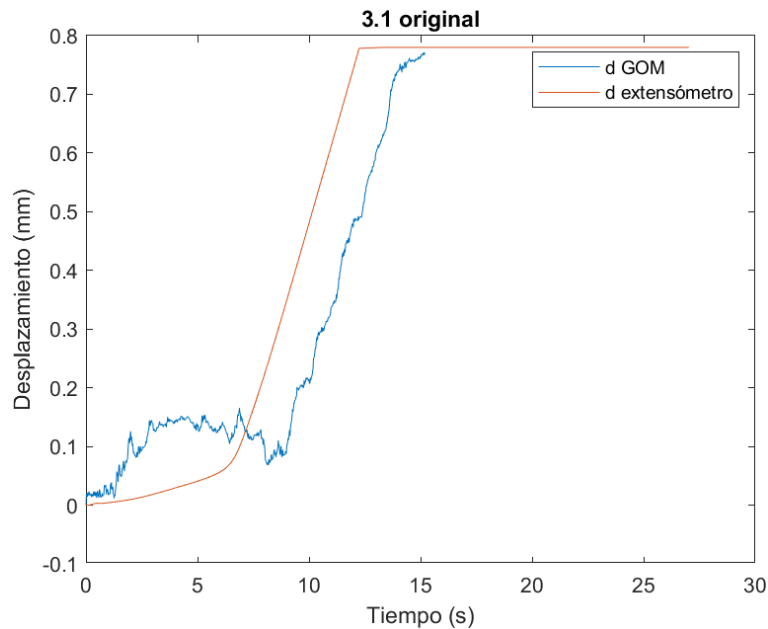


Figura 70. Probeta 3.1 original

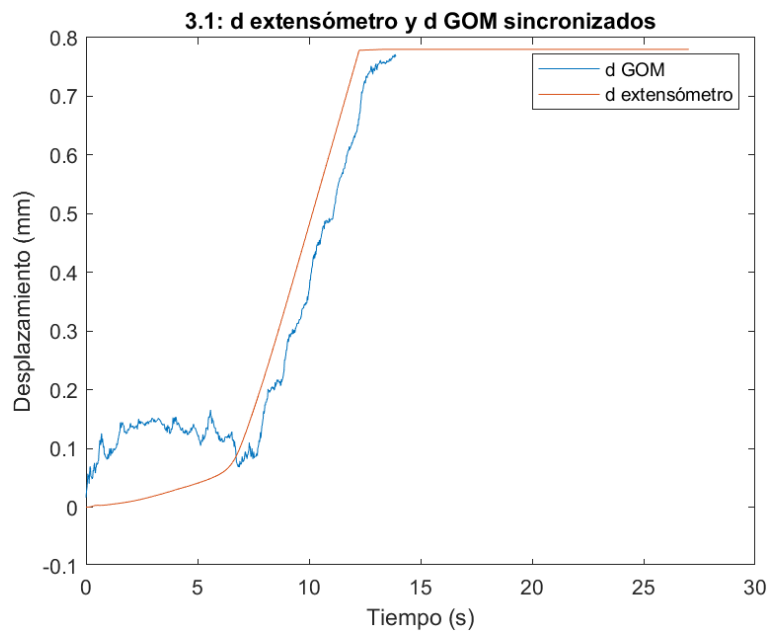


Figura 71. Probeta 3.1 gráficas sincronizadas

6.2.8 PROBETA 3.2

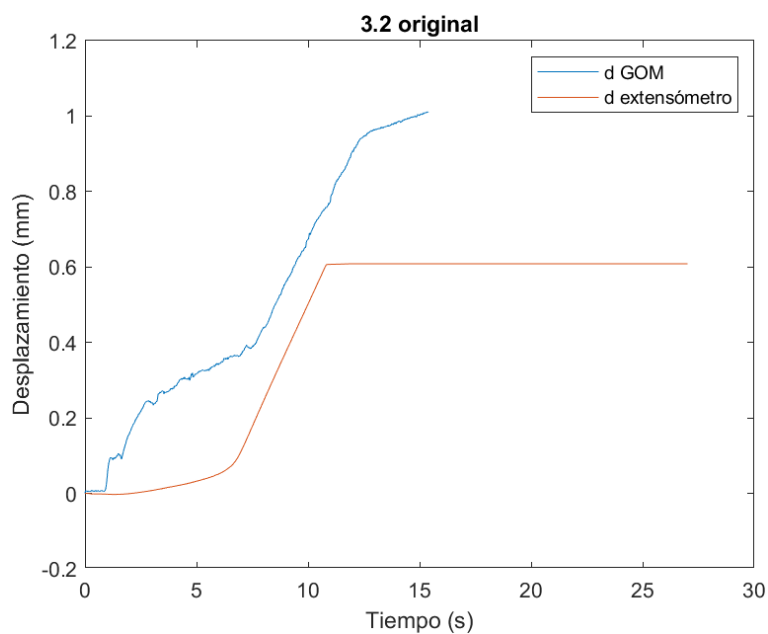


Figura 72. Probeta 3.2 original

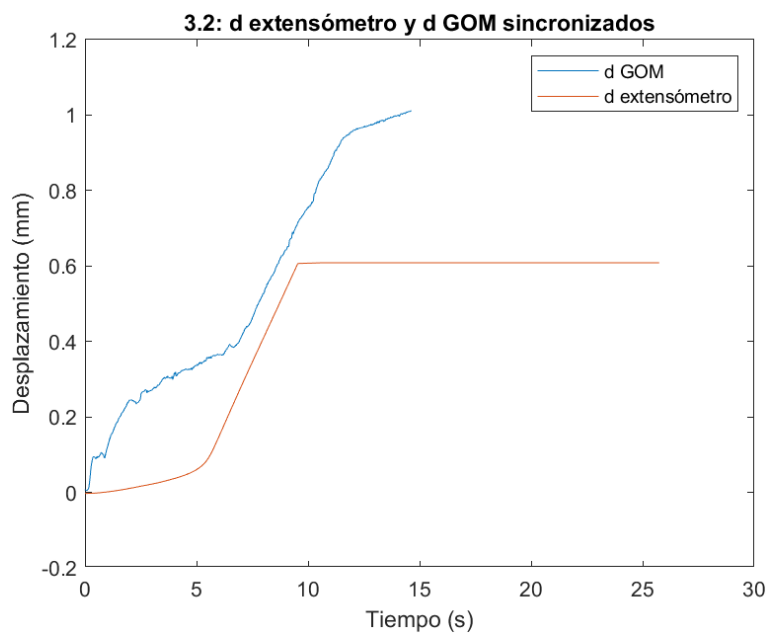


Figura 73. Probeta 3.2 gráficas sincronizadas

6.2.9 PROBETA 3.3

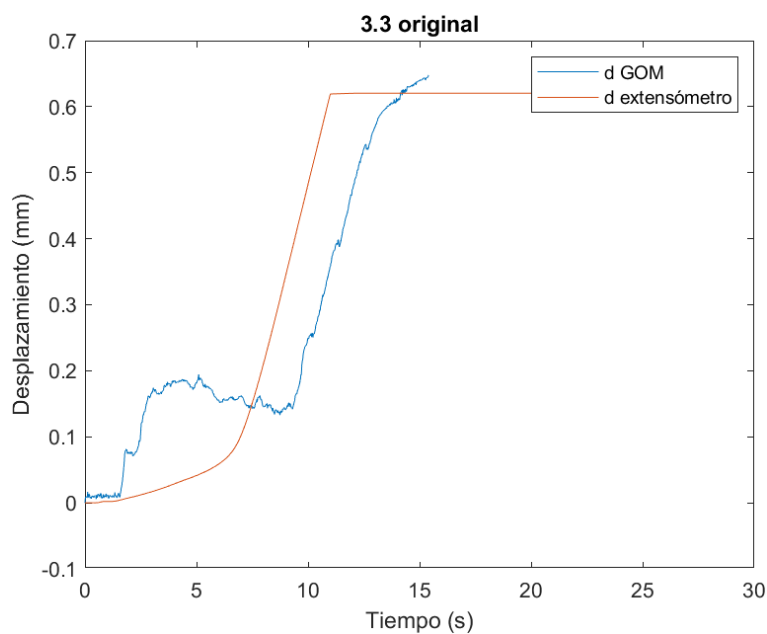


Figura 74. Probeta 3.3 original

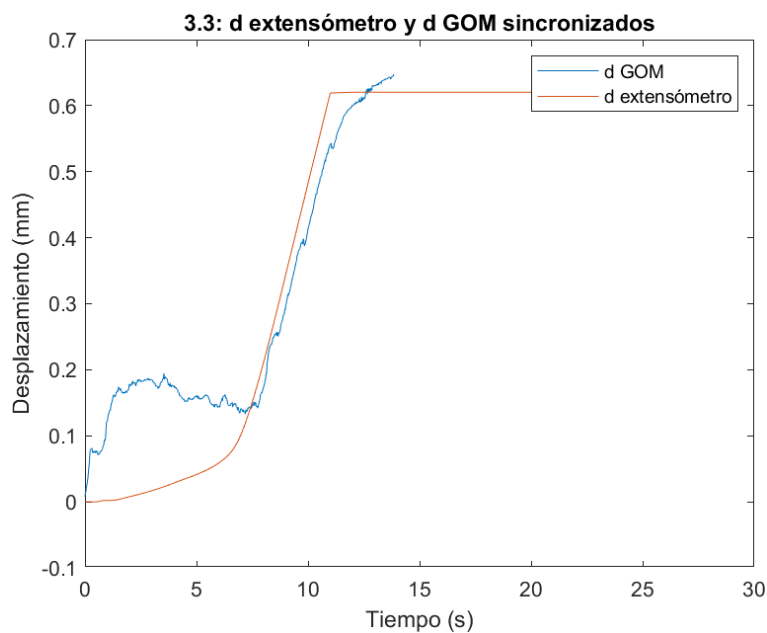


Figura 75. Probeta 3.3 gráficas sincronizadas

6.2.10 RESULTADOS DE LAS GRÁFICAS SINCRONIZADAS

Para poder extraer los resultados, se ha elaborado un código de MatLab con el que juntar cada grupo de gráficas y sincronizarlas en el tiempo. Se ha tomado como inicio del ensayo el punto en el que la máquina empieza a ejercer fuerza y como final del ensayo el momento en el que el extensómetro alcanza la máxima apertura. En ese punto los valores de desplazamiento sacados de las gráficas de cada probeta son los siguientes:

	d (mm)		Δd (mm)	Error (%)
	Extensómetro	GOM		
1.1	0,605	0,664	0,059	9,76
1.2	0,752	0,713	-0,039	-5,12
1.3	0,657	0,662	0,005	0,72
2.1	0,670	0,696	0,026	3,83
2.2	0,672	0,688	0,016	2,35
2.3	0,646	0,695	0,049	7,64
3.1	0,780	0,660	-0,120	-15,35
3.2	0,609	0,714	0,105	17,32
3.3	0,620	0,542	-0,079	-12,70

Tabla 5. Errores y medidas de desplazamiento final

Con estos valores se puede analizar que este método es viable para usar como alternativa o complemento para extensómetros en la medición de deformaciones en ensayos de tracción. Se puede ver como el error relativo es, en la mayoría de los ensayos, menor del 15% y la variación de la medida con el extensómetro y con GOM Correlate menor de 0,1 mm. Los únicos dos casos en los que la medida es mayor que este valor lo superan por muy poco.

En la Tabla 5, se ve claramente que los casos Probeta 3.1, Probeta 3.2 y Probeta 3.3, que tienen la distancia entre mordazas más grande, son los casos en los que se ha obtenido mayor error. Esto se debe que al tener que abarcar más superficie de la probeta, pero manteniendo la distancia entre la cámara y la máquina, se ha de abrir más el plano lo que hace que sea menos precisa la focalización de la cámara en la probeta. Para los otros 6 casos se puede ver que esto influye mucho menos obteniéndose valores mucho más pequeños para los errores que rondan los 0,05 mm. Aun así, al ser el rango de error de extensómetro de 0,5% sobre la longitud base (50 mm), todas las medidas se pueden aceptar como correctas ya que el error máximo se corresponde con 0,25 mm.

Analizando las gráficas de cada ensayo, se pueden distinguir tres zonas claras: inicio, rampa y final. En el inicio se puede ver como la curva del extensómetro va incrementando su inclinación poco a poco mientras que la de GOM Correlate presenta ruido. Esto se debe a que en estos ensayos se ha optado por no pretensar la muestra con las mordazas ya que se llegó a la conclusión de que al realizar esta acción la máquina empezaba a ejercer fuerza con la probeta ya tensionaba un poco. Ese ruido aparece porque, al no ser fijos los cabezales, estos tienen un cierto rango de movimiento libre que hace que la pieza al tensarse tenga que corregir su posición ya que al principio no se encuentra alineada. Por ello no se usa la probeta como elemento de referencia para la colocación de la cámara sino los pasadores de los cabezales. Además, a esto se suma la propia inestabilidad de un ensayo de tracción.

Una vez ya estabilizada la pieza, se adentra el ensayo en la zona de rampa de la gráfica. Esta zona se corresponde con la deformación elástica. Se puede ver en las primeras 6 probetas como la pendiente de la curva del extensómetro y la de GOM son prácticamente iguales ya que las curvas parecen paralelas. Esto verifica que la medida de GOM se está tomando de

forma correcta. En los 3 últimos casos se puede ver como en esta zona hay más picos que se deben al ruido que aparece debido a que al abrir el plano de la cámara se pierde resolución y por ello la medida es menos exacta y hay presente mayor error.

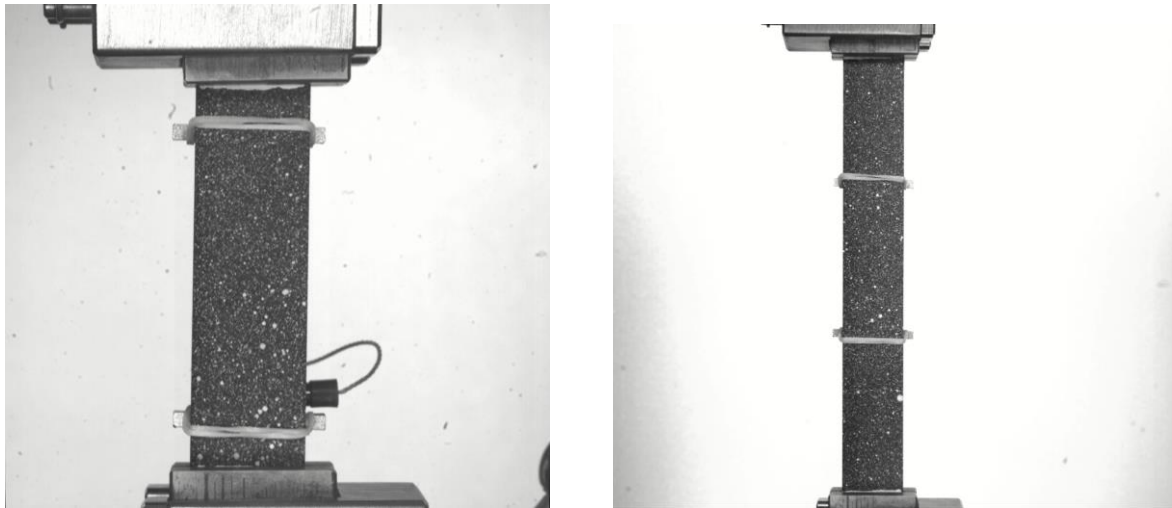


Figura 76. Diferencia entre vídeo 1.1 y vídeo 3.1

Cuando ya se llega al punto en el que el extensómetro deja de tomar medidas, la curva del mismo pasa a ser una línea horizontal. En este proyecto se ha cogido de la curva de GOM en ese instante, pero si nos fijamos, GOM Correlate sigue cogiendo valores debido a que, aunque la máquina muestre una alerta avisando para retirar el extensómetro, la máquina no se para por completo. Esto se puede ver si se representa la curva del desplazamiento del extensómetro junto a la curva de desplazamiento de la máquina. Por ejemplo, en la Figura 77 se puede ver esto ejemplificado para el caso 1.1.

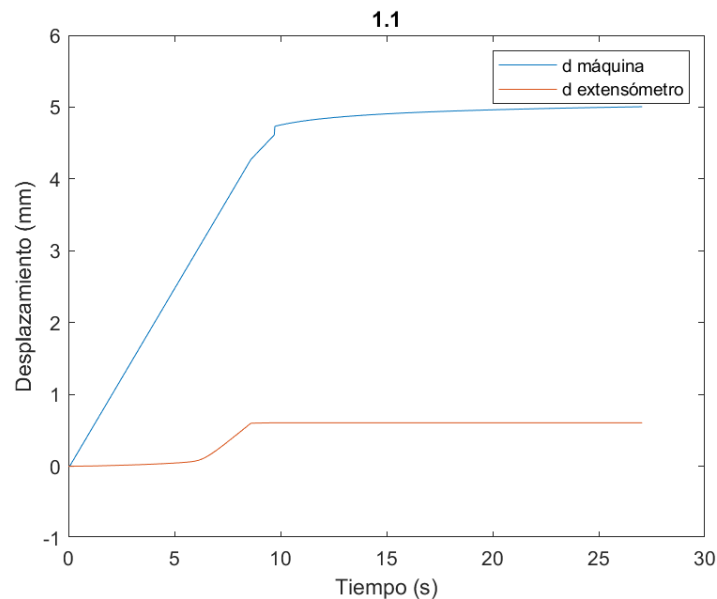


Figura 77. Comparativa del desplazamiento del extensómetro y desplazamiento de la máquina 1.1

Además de estudiar el valor final de desplazamiento, también se ha estudiado el rango de deformación media porcentual a lo largo del ensayo. Para obtener el valor del extensómetro se ha dividido la medida del desplazamiento entre la longitud inicial entre las patillas de este. Para el valor de GOM se ha calculado la media mínima de deformación y la media máxima de deformación obteniéndose el rango restandole el mínimo al máximo.

ϵ_y (calculado en GOM, $fs20_pd20$), %		
Min	Max	$\Delta\epsilon_y$ GOM (%)
-0,140	1,056	1,196
-0,001	1,563	1,564
-0,107	1,257	1,364
-0,241	1,131	1,372
-0,206	1,126	1,332
-0,107	1,244	1,351
-0,239	1,294	1,533
-0,006	1,527	1,533
-0,376	0,935	1,311

Tabla 6. Deformación porcentual GOM para cada probeta de acero

$\Delta\epsilon_y$ GOM (%)	ϵ_y Extensómetro (%)	Error absoluto(%)	Error relativo(%)
1,196	1,209	-0,013	1,120
1,564	1,504	0,060	-3,849
1,364	1,314	0,050	-3,666
1,372	1,341	0,031	-2,289
1,332	1,344	-0,012	0,886
1,351	1,291	0,060	-4,426
1,533	1,560	-0,027	1,761
1,533	1,217	0,316	-20,613
1,311	1,241	0,070	-5,370

Tabla 7. Error entre la deformación porcentual de GOM y del extensómetro

En la Tabla 6 se puede observar como la deformación porcentual mínima en muchos casos tiene un valor negativo esto se debe a la inestabilidad que se crea en la probeta durante los primeros segundos del ensayo ya que es en este tiempo cuando la muestra se está tensando y a su vez colocando perpendicularmente a la cámara.

Como se muestra en la Tabla 7, tanto el error absoluto como el error relativo son muy bajos para casi todos los casos. Esto indica que ambos métodos no solo se asemejan mucho en los valores de desplazamiento final, sino que también mantienen valores muy similares para la deformación porcentual media de la probeta. Esto también nos indica que con los parámetros de GOM utilizados podemos obtener buenos resultados. Los dos últimos casos, al tener que usar la longitud de lente más pequeña para capturar la probeta entera en la imagen, pueden presentar mayor distorsión e inestabilidades, especialmente al inicio del ensayo durante la fase de recolocación de la probeta.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Este apartado se ha organizado según los objetivos principales del trabajo.

1. Comprobación de la posibilidad de usar la correlación digital de imágenes como método alternativo para medición de deformaciones
2. Estudio de la influencia del cambio de parámetros de simulación del programa en la calidad de los resultados y la posible fluctuación de los mismos dependiendo de la configuración.
3. Comparación entre los resultados obtenidos usando diferentes tipos de preparación de muestras.

7.1 POSIBILIDAD DE USAR LA DIC COMO MÉTODO ALTERNATIVO PARA MEDICIÓN DE DEFORMACIONES.

Este es el objetivo principal del trabajo y se ha llegado a la conclusión de que sí se puede usar esta técnica como alternativa a métodos invasivos tradicionales como los extensómetros o las galgas extensométricas.

Entre los requisitos principales para que esto sea posible, deben coincidir en el tiempo el inicio del ensayo con el inicio de la simulación. Por ello, los ensayos se grabaron dejando de margen unos segundos previos a que comenzase la acción de la máquina. Además, se ha optado por sincronizar ambas curvas con MatLab estableciendo como origen para la gráfica de GOM Correlate el instante en el que el programa empieza a registrar valores.

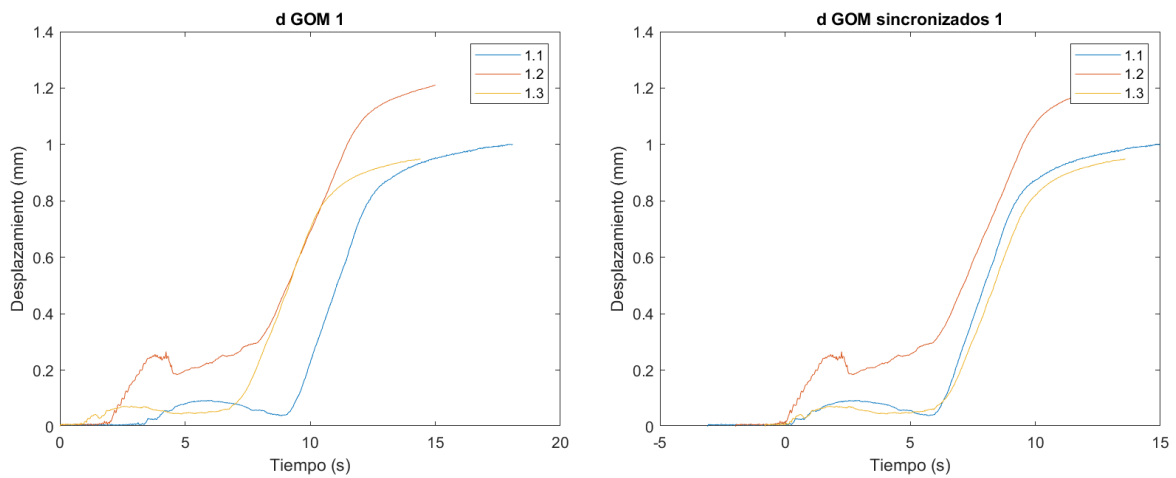


Figura 78. Ejemplo de gráficas de GOM originales y sincronizadas

Observando las gráficas para cada ensayo, como por ejemplo la Figura 79, se puede ver como para cada caso se pueden diferenciar claramente tres zonas:

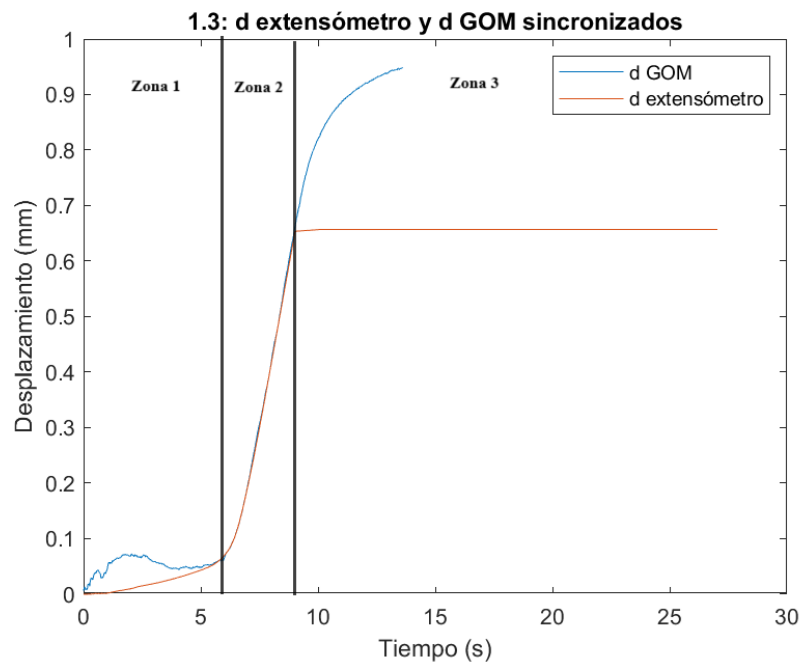


Figura 79. Distinción zonas de las gráficas sincronizadas

La zona 1 se corresponde con el inicio del ensayo, la zona 2 se corresponde con la deformación elástica y la zona 3 se corresponde con el final del ensayo.

Analizando la zona 1, se puede ver como en la curva representada con los valores de GOM Correlate hay mucho ruido. Este ruido se debe a que, para evitar manipular las propiedades del material, en los ensayos realizados con probetas de acero al carbono no se pretensó la probeta. Al no ser fijas las mordazas de la máquina si no que tenían cierto juego, provocó que en los primeros segundos del ensayo la probeta no estuviese colocada tensa y perpendicularmente a la cámara ya que para la colocación de esta se tomó como referencia la máquina y sus mordazas. En esos primeros instantes, la muestra se está colocando en la posición adecuada, pero ese pequeño movimiento provoca que haya variación en los valores extraídos de la simulación.

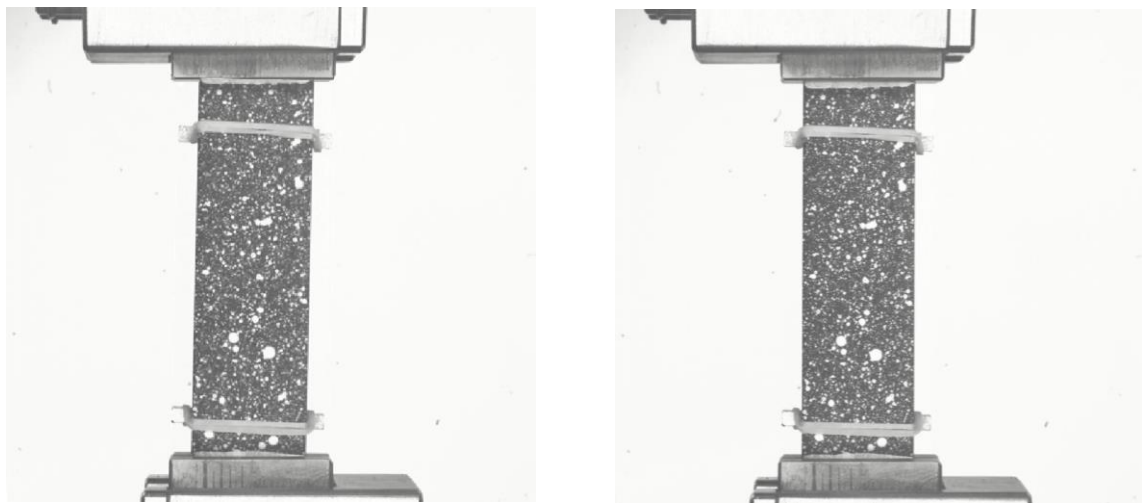


Figura 80. Comparativa entre principio y final de la zona 1

En la Figura 80. Comparativa entre principio y final de la zona 1, se ha exagerado el grado de inclinación de la probeta en el inicio del ensayo para que se puede ver con mayor claridad la colocación desde el inicio hasta el final de esta zona ya que si no, sería imposible apreciar la variación de la posición con simples fotos. Este ruido no se aprecia en la gráfica del extensómetro ya que este está fijo en la pieza y se desplaza solidariamente con la probeta.

En la zona 2 se aprecia el tramo en el que la probeta se está deformando de forma elástica. Aquí se puede ver como en las curvas de prácticamente todos los ensayos, la inclinación que siguen los valores tomados por el extensómetro y la inclinación de los valores tomados por GOM son iguales. En otras palabras, en esta zona ambas curvas tienden a ser paralelas lo cual es un signo de que se está consiguiendo obtener una buena precisión ya que, al fin y al cabo, se está buscando que ambas curvas sean iguales.

En la zona 3 se puede ver como el extensómetro ya ha dejado de tomar valores ya que el ensayo iba a entrar en zona de deformación plástica por lo que la máquina avisa para que se retire el extensómetro y evitar que se pueda romper. La máquina no se detiene justo en ese momento si no que disminuye mucho su velocidad y eso se puede ver en la Figura 77. En nuestro caso se ha cogido el valor de ambas curvas en el instante de tiempo en el que empieza la zona 3 para verificar si el resultado final aportado por los dos métodos es similar. Como se ha demostrado con los resultados de la Tabla 5, los valores obtenidos por ambas técnicas son muy parecidos. Los primeros 6 casos se puede ver que tienen un error absoluto de entorno a 0,05 mm. Los otros 3 ensayos tienen un error que ronda los 0,1 mm. Esto se debe a que al ser mayor la distancia entre las mordazas de la máquina (150 mm), para poder capturar con la cámara toda la probeta se debe abrir mucho el plano por lo que se puede distorsionar la imagen. Esto hace que aparezcan picos en la gráfica de GOM y sea menos exacta la aproximación de la correlación digital de imágenes al uso de técnicas tradicionales. Aun así, al ser el rango de error de extensómetro de 0,5% sobre la longitud base (50 mm), todas las medidas se pueden aceptar como correctas ya que el error máximo se corresponde con 0,25 mm.

La diferencia entre el plano de la imagen si la distancia entre las mordazas es 50 mm y 150 mm se puede ver en la Figura 76.

Analizando los datos de la Tabla 6 y la Tabla 7, se puede ver como el rango de deformación porcentual obtenido con GOM Correlate es prácticamente igual al obtenido del extensómetro. Esta es otra justificación válida para verificar nuestra hipótesis inicial. Llama la atención que el valor mínimo de deformación porcentual media en todos los casos tenga

un valor negativo, esto se debe a que en la zona 1, explicada previamente en este mismo apartado, en sus primeros segundos la probeta no se encuentra estrictamente recta y es aquí donde la muestra corrige su posición hasta colocarse en la posición deseada; recta y perpendicular a la cámara. Este pequeño error es asumible ya que, de pretensar previamente la muestra, estaríamos obteniendo unos valores incorrectos del ensayo ya que le estaríamos aplicando tensión a la probeta antes del ensayo lo cual modificaría completamente sus propiedades.

7.2 COMBINACIÓN DE PARÁMETROS DE SIMULACIÓN EN GOM CORRELATE

Como se ha podido comprobar con los resultados del apartado 6.1, para seleccionar el mejor par de parámetros de los estudiados se ha evaluado:

- Valor inicial y final.
- Variación del rango de deformación en la probeta durante el ensayo.

En la Tabla 3.Comparativa valores min/max deformación en GOMTabla 3, se puede observar que, analizando exclusivamente el principio y el final del ensayo, los tres pares de parámetros aportan valores muy similares. Todos los valores iniciales se encuentran en torno a cero y los valores finales obtenidos con GOM Correlate aproximan el valor obtenido por el extensómetro en cada ensayo. Por ello, necesitamos otra variable a analizar para determinar cuál es el más acertado y esa es la razón por la que se analiza el dato del rango máximo dentro de la pieza en cada instante. Esto se ve reflejado en la Tabla 4. Se puede observar que las simulaciones en las que se ha utilizado tamaño de faceta 20 y distancia entre puntos 20 tienen un rango menor. Esto significa que el error es menor que en los demás y se debe a la calidad de la malla que creó el programa sobre la superficie de control. Juntando las dos justificaciones, se puede deducir que este par de parámetros es el que aporta información de forma más precisa.

Cuanto mayor sea la distancia entre puntos y mayor sea el tamaño de los puntos, menos ruido tendrá la simulación, que se puede observar claramente ya que se pueden generar agujeros en la malla en algún instante de la simulación. Esto demuestra que para obtener precisión se debe prestar mucha importancia en la definición de la superficie de control y de su calidad comprobando que no se generan huecos a lo largo del vídeo mientras que se encierra en ella la mayor área posible de la zona a analizar de la probeta. Cabe destacar que los puntos más conflictivos suelen ser las esquinas y los bordes de la superficie de control.

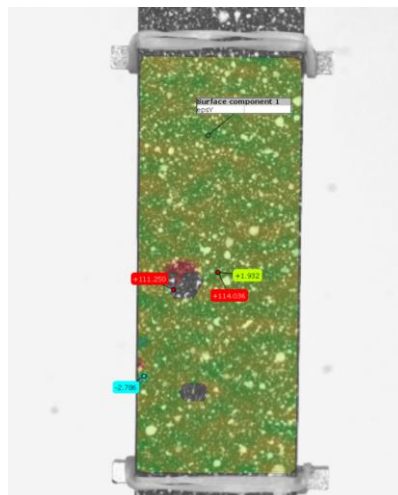


Figura 81. Ejemplo de malla defectuosa con tamaño de puntos 10 y distancia entre puntos 10

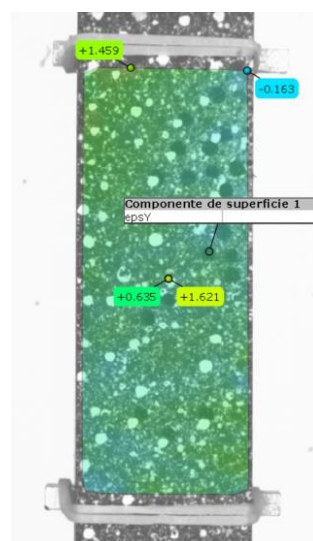


Figura 82. Ejemplo de malla de alta calidad con tamaño de puntos 20 y distancia entre puntos 20

7.3 INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DEL TAMAÑO DEL PATRÓN DE PUNTOS

Uno de los puntos más críticos del ensayo es la preparación de las probetas. En este proyecto se ha trabajado con tres tamaños distintos de patrón: fino, intermedio y grueso. Para buscar cual de todos es el más adecuado se analizan tanto los valores de la Tabla 4 y de la Tabla 5. Juntando toda la información no se ha llegado a una conclusión que nos determine si alguno de los tres es mejor que los otros dos, ya que dependiendo de la distancia de focal puede variar la precisión de cada patrón. Además, las probetas que se han pintado con un mismo tamaño no son exactamente iguales ya que al pintar las probetas con espray no es posible replicar exactamente el mismo patrón. De todas formas, con los datos obtenidos sí se puede afirmar que con distintos tamaños de patrones se pueden obtener resultados válidos. Lo que se debe evitar son zonas en las que se vea a simple vista que hay mayor presencia, de forma evidente, de alguno de los dos colores ya que en esas áreas es donde presenta problemas el programa para crear la malla.

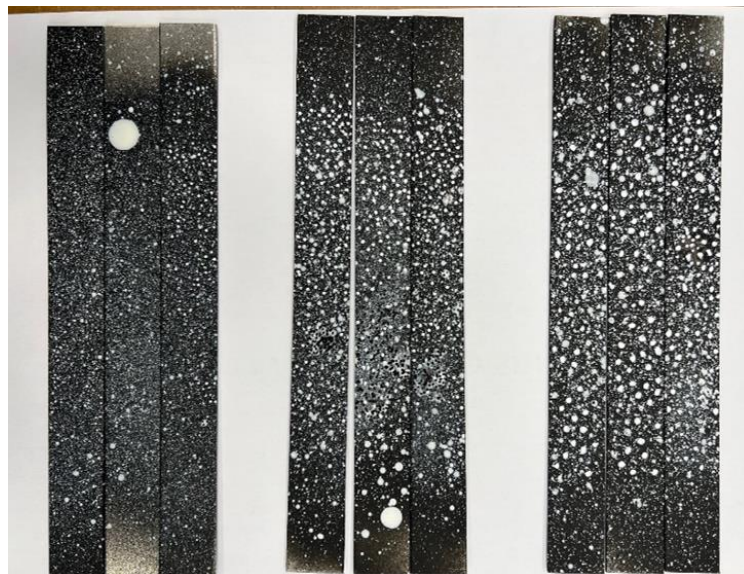


Figura 83. Patrones probetas de aluminio

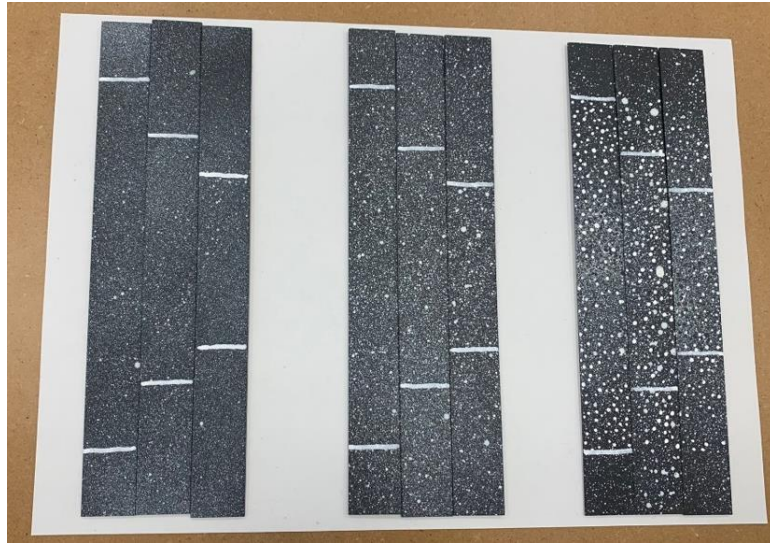


Figura 84. Patrones probetas de acero

7.4 LÍNEAS FUTURAS

Algunas de las líneas futuras de investigación en torno a este trabajo son:

- Encontrar unos parámetros óptimos de GOM con los que reducir al máximo el error: una vez probada la validez de la DIC como alternativa en la medición de deformaciones, se podría hacer un estudio más exhaustivo de los parámetros de GOM para encontrar que combinación de parámetros con la que se obtiene el error más pequeño.
- Encontrar un tamaño ideal para el patrón de puntos: se conoce que es posible calcular un tamaño ideal de mota, pero se desconoce como generar puntos uniformes de ese tamaño manteniendo la aleatoriedad que requiere GOM Correlate para seleccionar los puntos.
- Emplear dos cámaras en vez de una para hacer un análisis más detallado de la deformación de la probeta: el uso de dos cámaras en vez de una nos permite estudiar la deformación en 3D, lo que aportaría más información sobre cómo se comporta un material cuando se aplica una fuerza sobre él.

- Aplicar esta metodología a otro tipo de ensayos mecánicos: como ya se ha probado, esta metodología se puede utilizar para analizar deformaciones en ensayos estáticos, pero, también se podría emplear en ensayos dinámicos como por ejemplo en ensayos de compresión para conocer de forma detallada como se deforma el material.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Szalai, S. K. Szürke, D. Harangozó, and S. Fischer, “Investigation of deformations of a lithium polymer cell using the Digital Image Correlation Method (DICM),” *Reports in Mechanical Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 116–134, 2022, doi: 10.31181/rme20008022022s.
- [2] E. López-Alba,) R López-García, R. Dorado, and F. A. Díaz, “Aplicación de correlación digital de imágenes para el análisis de problemas de contacto”.
- [3] “Sistemas de cámara 3D Aramis — A3DTEC.” Accessed: Apr. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.a3dtec.com/aramis-1>
- [4] “Extensómetro o transductor de deformación - Servosis.” Accessed: Apr. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.servosis.com/extensometro-o-transductor-de-deformacion/>
- [5] “Máquina de Ensayo Electromecánica Serie TESTCOM | IBERTEST.” Accessed: Apr. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.ibertest.es/products/maquina-de-ensayo-electromecanica-serie-testcom/>
- [6] “PHOTRON | FASTCAM SA3 High Speed Camera.” Accessed: Jun. 21, 2024. [Online]. Available: <https://techimaging.com/products/legacy/legacy-high-speed/product/photron-fastcam-sa3>
- [7] “PHOTRON | FASTCAM SA3 High Speed Camera.” Accessed: Jun. 21, 2024. [Online]. Available: <https://techimaging.com/products/legacy/legacy-high-speed/product/photron-fastcam-sa3>
- [8] “ZEISS INSPECT Correlate: Evaluación sencilla de mediciones dinámicas.” Accessed: Apr. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.zeiss.com/metrology/products/software/inspect/correlate.html>

- [9] “Extensómetros.” Accessed: Jun. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.ibertest.es/categoria-producto/productos/accesorios-dispositivos-de-ensayo-y-equipos-auxiliares/extensometros-traccion-accesorios-dispositivos-de-ensayo-y-equipos-auxiliares/>
- [10] “WPDICSpanishWEB”.
- [11] “Historia del grupo ZwickRoell | ZwickRoell.” Accessed: Apr. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/es/compania/historia/>
- [12] C. B. Gamboa *et al.*, “2D-3D Digital Image Correlation Comparative Analysis for Indentation Process,” 2019, doi: 10.3390/ma12244156.
- [13] Á. Pardo, B. Tutor, : Carlos, and N. Pintado, “Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Industrial Aplicación de la correlación de imágenes digitales a diversos ensayos mecánicos”.
- [14] “Correlación digital de imágenes - Photron.” Accessed: Jun. 22, 2024. [Online]. Available: <https://photron.com/es/digital-image-correlation/>
- [15] E. López-alba and L. Felipe Sesé, “Aplicaciones industriales de técnicas ópticas de campo completo para la medida de tensiones y deformaciones en elementos de máquinas,” vol. 80, pp. 98–108, 2013.
- [16] “Dominar la velocidad de obturación: guía de fotografía para principiantes - Canon Spain.” Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.canon.es/get-inspired/tips-and-techniques/how-to-use-shutter-speed/>
- [17] “CAMERA SHUTTER: Should You Only Use 1/50 for Video? - YouTube.” Accessed: Jun. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=9tacNTkG0sw>
- [18] E. López-Alba,) R López-García, R. Dorado, and F. A. Díaz, “Asociación Española de Ingeniería Mecánica XIX CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA

MECÁNICA Aplicación de correlación digital de imágenes para el análisis de problemas de contacto”.

- [19] “Tutorial Introducción | GOM Correlate | Interfaz de usuario - YouTube.” Accessed: Jun. 23, 2024. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=pUTzyR3W_3M
- [20] “Calibración del extensómetro: Aspectos a tener en cuenta | ZwickRoell.” Accessed: Jul. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/es/noticias-y-eventos/noticias/extensometer-calibration/>

ANEXO I- OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

El 25 de septiembre de 2015, la organización de Naciones Unidas (ONU) publicó los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que son las metas que todos los países pertenecientes a este grupo deben cumplir hasta 2030. Estos principios cubren toda actividad industrial, social o económica. Consiste en una lista que busca crear un consenso con respecto a lo que todas las actividades deberían satisfacer para garantizar un desarrollo sostenible de la sociedad. Este desarrollo se basa en satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras. Los ODS abarcan todos los niveles posibles: ecológico, social, económico o de la salud.



Figura 85. Objetivos de Desarrollo Sostenible

A continuación, se enumeran los objetivos de desarrollo sostenible con los que el proyecto se alinea y su aportación al respecto:

- *Objetivo 4: Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos.*

Uno de los objetivos principales del proyecto tiene su foco en este objetivo ya que gracias a la puesta a punto de este método de deformaciones se impulsaría la educación de los alumnos de estudios de ingeniería ya que se podría explicar en los talleres prácticos de las asignaturas relacionadas con ciencia de materiales ya que permitiría ampliar el rango de posibles formas de medir deformaciones.

- *Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.*

Este es otro de los objetivos principales ya que el proyecto fomenta la innovación para descubrir nuevas formas de medir las deformaciones de las probetas ensayadas a tracción siempre con el objetivo de que los resultados obtenidos se asemejen lo más posible a la realidad y así conocer con mayor exactitud el comportamiento de las muestras en frente a ensayos como los que se van a llevar a cabo en el desarrollo de este proyecto.

ANEXO II- PROBETAS POST-ENSAYO

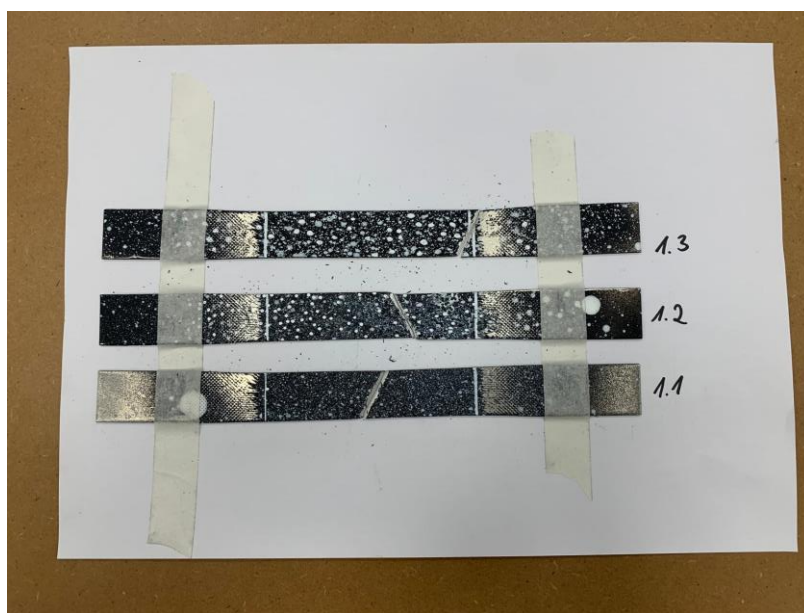


Figura 86. Probetas 1 aluminio post-ensayo

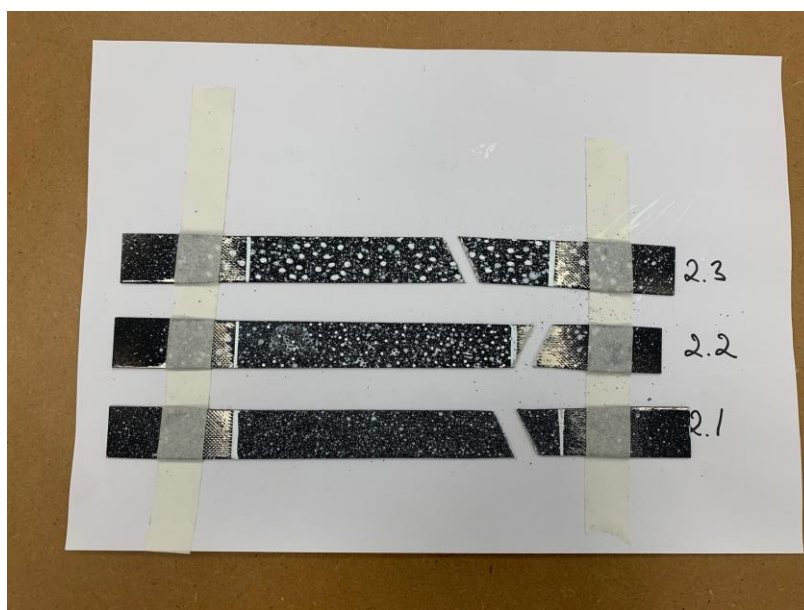


Figura 87. Probetas 2 aluminio post-ensayo

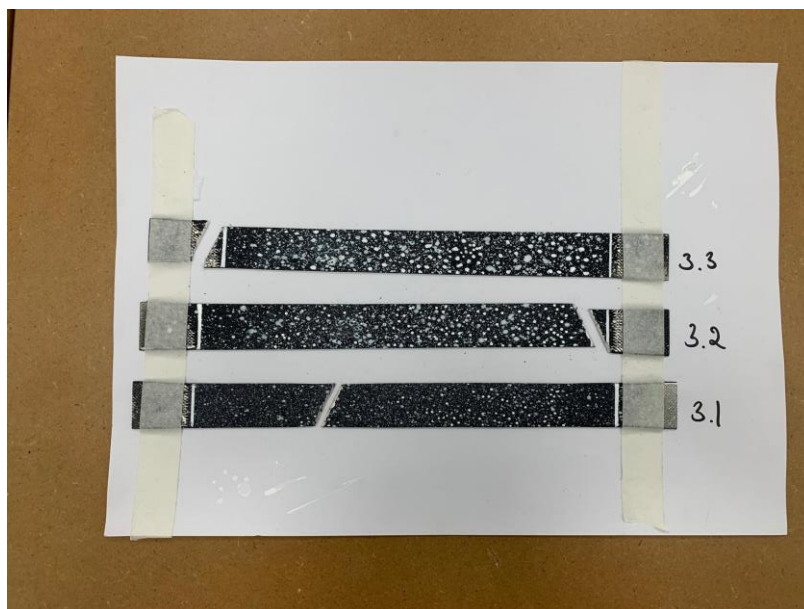


Figura 88. Probetas 3 aluminio post-ensayo

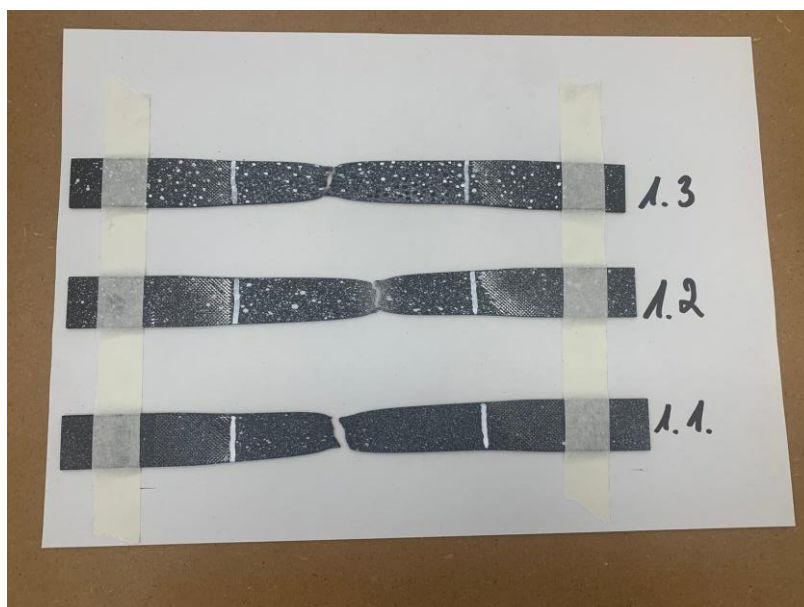


Figura 89. Probetas 1 acero post-ensayo

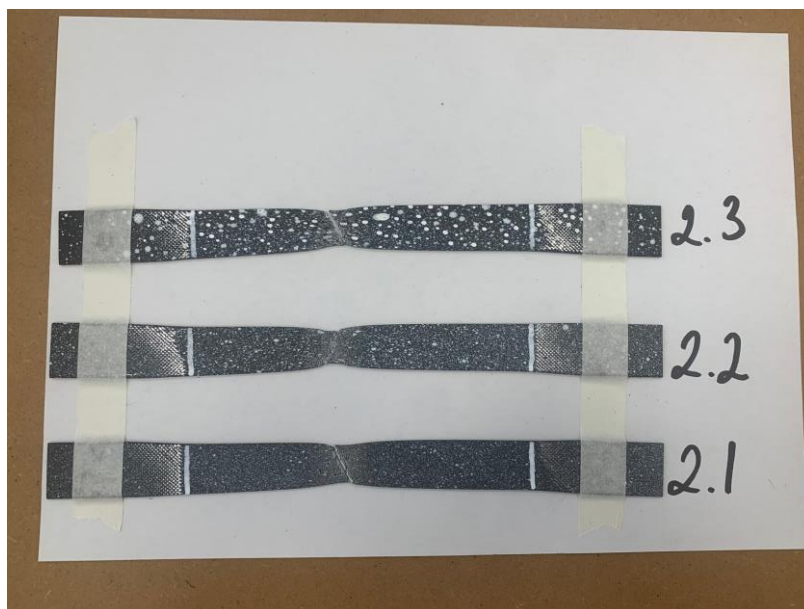


Figura 90. Probetas 2 acero post-ensayo

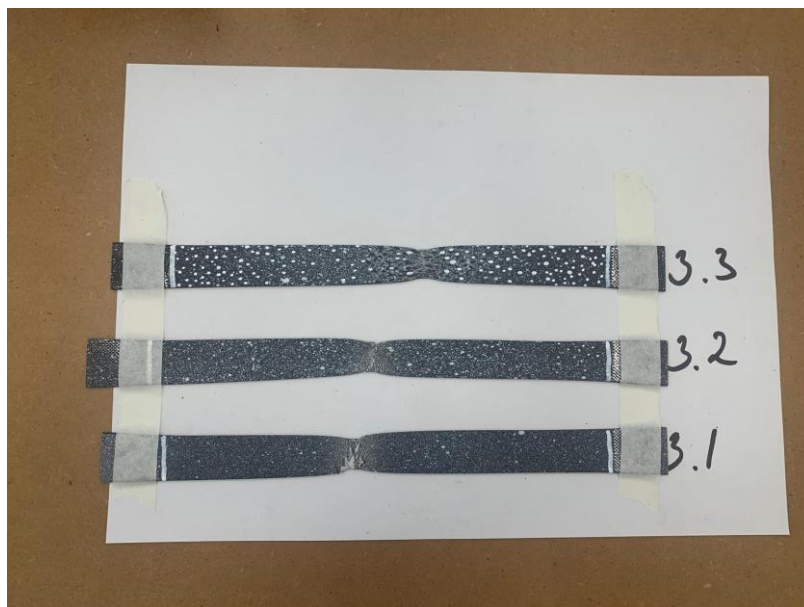


Figura 91. Probetas 3 acero post-ensayo

ANEXO III – CHECKLIST

1. Specimen preparation:

- ☐ Ready the specimen painting area by covering it (for example with paper towels) to not stain the surface below.
- ☐ Practice creating the stochastic pattern on a piece of paper. Wear protective gloves.
- ☐ Clean the specimen.
- ☐ Prime the specimen by spraying an even, thin layer of black paint on the faces of the object that will be measured. Wear protective gloves. Let the paint dry.
- ☐ Create the stochastic pattern by spraying white paint. At the beginning, point the spray tin at a point next to the measuring object and as soon as you reach the desired spray intensity, drag the tin fast over the specimen as many times as needed.
- ☐ If needed, stop to clean the nozzle and continue with spraying the specimen.
- ☐ Let the paint dry.

2. Workplace setup:

- ☐ Install the grip position transforming insertions to change the machine grip position from perpendicular to parallel to the machines' front.
- ☐ Bring the lightning setup made up of 4 led lights and place the light plate against the machine as close as possible (minimum possible gap).
- ☐ Turn the lights away from the specimen measurement place, making around 30-40 deg angle from its front plane to ensure lesser light reflection.
- ☐ Install the high-speed camera on the plate, placing the tripod legs in between the white tape areas (if present).
- ☐ Connect the camera power cable (port: DC22-32V 60VA) and the trigger cable (port: I/O PORT -> TRIG SW IN) to the camera.
- ☐ Connect the ethernet cables between the camera and switch, switch and the computer.
- ☐ Plug everything (computer, camera, switch, lights, tensile test machine) to outlets.
- ☐ Secure the cables on the ground or other structures if they create obstacles for passing.
- ☐ Determine the hardware properly secured.
- ☐ Install a white background (white foam plate) behind the specimen measurement place.

3. High-speed camera setup:

- ☐ Power up the camera and open 'PFV4 (x64)' software in the computer.
- ☐ Set the camera parameters (In the software, 'LIVE' window by the right).
 - ☐ Frame rate: 50 fps.
 - ☐ Shutter speed: 1/125 (aim for the rule: shutter speed = 1/(2 x frame rate)).

- ☐ Sensor resolution 1024x1024 Px (default).
- ☐ Trigger mode: Manual (default).
- ☐ 'Trigger parameters': Pre-trigger frames: 616; Post-trigger frames: 2110 (default).
- ☐ Cover the camera lens with lid and by 'Shading' click 'Calibrate'. Remove the lid when complete.
- ☐ 'Adjustments' -> 'Color Correction' -> 'Auto white balance' with area boundaries reduced to coverage of the specimen only.
- ☐ 'Saturation' to 0 to achieve grayscale values only.
- ☐ Define a suitable focal length based on specimen initial length and ductile properties. Set the camera's optical parameters.
- I. Focal length of 70mm** (FOV = 12.2 x 12.2 cm)
 - Suitable when:
 - 1) $L_0 < 60$ mm, $\epsilon < 100$ %.
 - 2) $L_0 = [60; 80]$ mm, $\epsilon = [10; 15]$ %.
 - ☐ Lens focal length at a maximum 70 mm.
 - ☐ Tripod height at 82 cm.
 - ☐ In 'Special Effects' -> 'Lens Calibration' load the calibration file.
- II. Focal length of 50mm** (FOV = 16.2 x 16.2 cm)
 - Suitable when:
 - 1) $L_0 = [60; 80]$ mm, $\epsilon < 100$ %.
 - 2) $L_0 = [80; 120]$ mm, $\epsilon = [10; 15]$ %.
 - ☐ Lens focal length at 50 mm.
 - ☐ Tripod height at 84 cm.
 - ☐ In 'Special Effects' -> 'Lens Calibration' load the calibration file.
- III. Focal length of 35mm** (FOV = 24.6 x 24.6 cm)
 - Suitable when:
 - 1) $L_0 = [120; 140]$ mm, $\epsilon < 100$ %.
 - 2) $L_0 = [140; 180]$ mm, $\epsilon = [10; 15]$ %.
 - ☐ Lens focal length at 35 mm.
 - ☐ Tripod height at 87 cm.
 - ☐ In 'Special Effects' -> 'Lens Calibration' load the calibration file.
- ☐ Set the camera parameters (on the camera)
 - ☐ Aperture at 11f (or different, if it seems to result in better exposure level. Decide by evaluating the exposure of 'LIVE' window view and the noise level (curve instability – aim for as smooth as possible) in 'Adjustments' -> 'LUT',. In case of uncertainty deciding between options, aim for relatively darker exposure since it produces more detail).

- ☐ Object distance at around 0.7 m (for this point, later will be altered).
- ☐ Redo the calibration at 'Shading'. Don't forget to cover the lens with lid before and remove it afterwards.

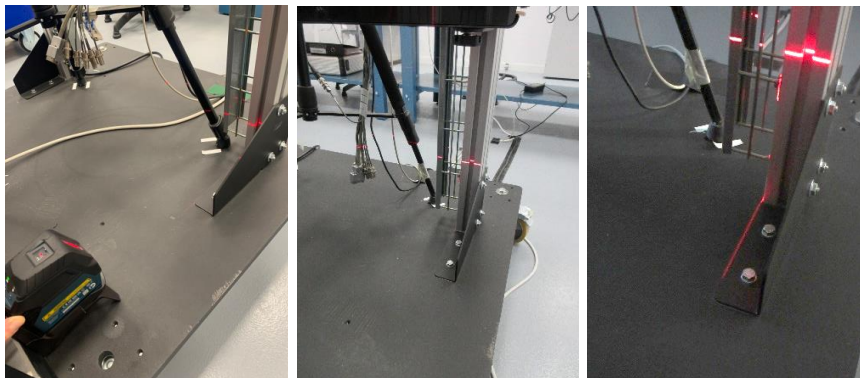
4. Tensile strength test machine setup:

- ☐ Set up the test machine computer by inserting the license flash drive and connecting the machine to the computer.
- ☐ Turn on the machine (switch on the frame right side bottom).
- ☐ Open up the WinTest32 SAE Ibertest software.
- ☐ Set up the test parameters in 'Parámetros del ensayo'.
 - ☐ *Ensayo simple; Modo de ensayo: Tracción; Modo de control: Carrera.*
 - ☐ Velocidad: 30 mm/min.
 - ☐ Hit 'Aceptar'.

- ☐ In 'Parámetros de la probeta' enter the test name.
- ☐ Make sure the 'Encendido de los motores' icon is not crossed out.

5. Camera leveling:

- ☐ Push the lightning plate against the machine as close as possible and while applying pressure to the plate to be held in place, lock its wheels.
- ☐ Rotate locked wheels until their side faces are parallel to machine front face. Make sure the plate is still as close as possible to the front of the machine.
- ☐ Take the Line and Point laser, mount it onto its rotating mount, center the laser in respect to the mount and secure their sides with tape to eliminate relative motion between them.
- ☐ Turn on the laser by setting the self-leveling function (On with open lock icon).
- ☐ Establish structural parallels and perpendiculars:
 - ☐* Place the laser mount back against the machine in a position until it is close enough to the lightning plate frame support.



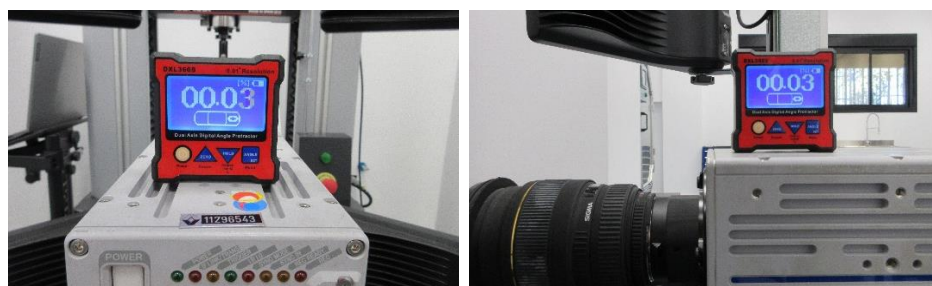
- ☐ After defining the plate frame support being perpendicular to the machine front edge, place the laser by it, mount back aligned with the support, laser facing the camera.



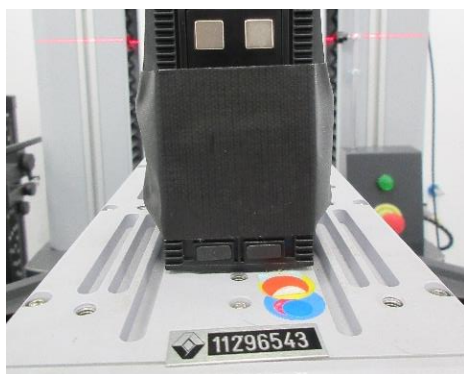
- [] Choose a structure (front line for example) of the camera body that can be compared to the laser line and by rotating the camera to left or right, match the chosen camera structure and laser line to be parallel.



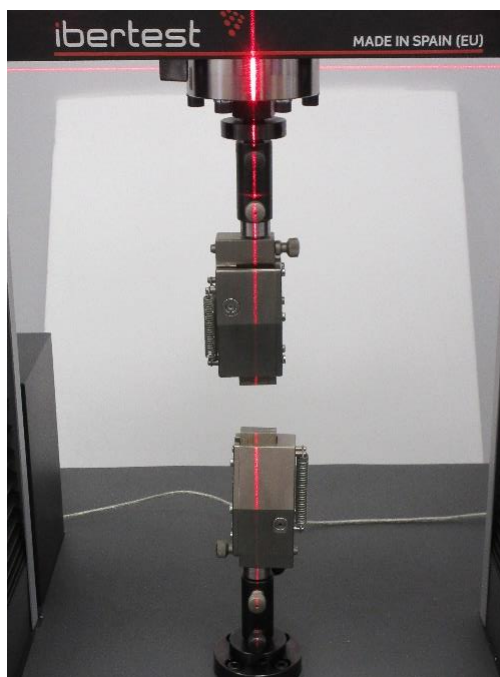
- [] Level the camera by using a protractor on the camera's top surface, both axes offset from 0 no more than 0.2 deg. Alter the angles by changing tripod legs heights.



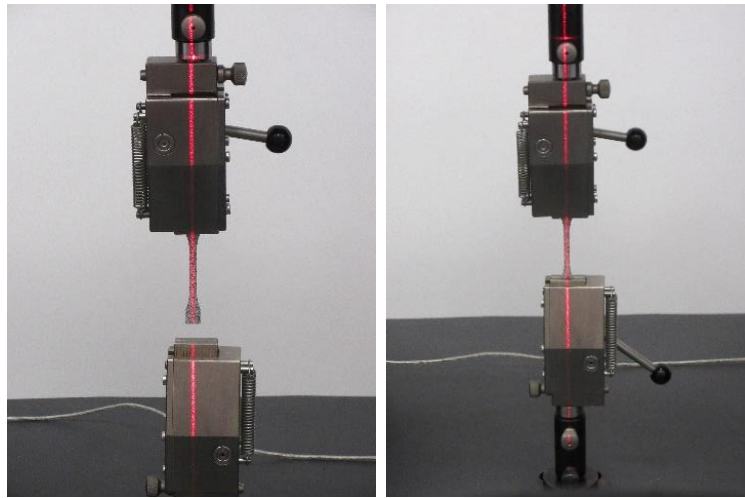
- [] Place the laser on top of the camera and center as much as possible - use camera's slot-type surface features to aid the procedure.



- [] Match the vertical laser to go through the middle of both top and bottom grips fixation pins by pushing the lightning plate to either sides until it matches (while maintaining pushed against the machine and enabling brakes when done).



- [] A reevaluation of lightning plate perpendicularity to the machine is needed after its position has been altered. Repeat from * step, excluding the camera tilting and leveling. At this point only the plate should be moved if needed.
- [] Specimen leveling:
- [] With laser still present in the position above, raise the top grip and insert the specimen in it, centered by the laser vertical line.



- [] If leveling is successfully completed, but satisfactory FOV is gone, readjust everything again from the * step.
- [] When satisfactory FOV is achieved and leveling completed, adjust object distance (on camera lens) if needed by zooming in (in PFV4) on specimen by 300, 400% and deciding on the object distance that gives the most focus, the most defined pattern visibility.

6. Pattern evaluation:

- [] Take a snapshot of the satisfactory positioned specimen in PFV4.
- [] Open ZEISS Quality Suite, open INSPECT Correlate software.
- [] Click 'New Project' and drag the specimen snapshot to 'Explorer' window.
- [] In 'View' -> '3D Views' -> disable 'Lighten Image Mapping' if active.
- [] In 'Define Component' () -> 'Surface Component':
 - [] Redraw the area selection to achieve a selected area of the specimen only, and with its edges smooth too.
 - [] Select 'Pattern quality' in bottom left window.
 - [] Define 'Facet size' by the calculated theoretical facet size W_{facet} , 'Point Distance' by aiming for the best pattern quality shown in the scale in the right of the window.
 - [] Analyze the pattern quality, evaluate if tweaking the 'Facet Size' or "Point Distance" makes a difference. Aim for a pattern quality distributed between 5-10 – no yellow color on the pattern area is allowed.
 - [] If altering 'Surface Component' parameters does not work, analyze the yellow areas in the pattern quality map and improve the specimen pattern manually with black and/or white paint markers. Look out for black and white spots that are of larger area, perimeter – these are the ones that usually cause lower quality in software.
 - [] When pattern is painted over to liking with markers, put the specimen back into the grips and repeat the 7th part until satisfactory pattern quality is achieved from the snapshot.

7. Test run procedure:

- [] In PFV4 press 'Record' -> 'OK'.

- [] In WinTest32 press 'Inicio' -> 'Si'.
- [] Press the camera trigger and Ctrl + Space bar in test machine computer simultaneously.
- [] After specimen breakage:
 - In PFV4:
 - [] Click 'Stop recording'.
 - [] Crop video to only relevant frames.
 - [] Click 'Save', define path and filename, check the 'Apply image processing' box to export video in grayscale, Click 'Save' again.
 - In WinTest32:
 - [] Click 'Gestion'.
 - [] Define path in 'Carpeta actual' (by default saved in ../documents/Ema).
 - [] Click 'Grabar' and 'Exportar a Excel'.
- [] Import the data from both computers to a flash drive.
- 8. Video processing:**
 - [] Open the video, saved in grayscale, in PFV4 again.
 - [] In 'Adjustments' -> 'LUT', tweak the 4 parameters of the grayscale curve if needed – the aim is to make the curve as less noisy (moving when video is running) and as distributed evenly throughout 50-255 grayscale curve X values as possible.
 - [] Open ZEISS Quality Suite, open INSPECT Correlate software.
 - [] Click 'New Project' and drag the video to 'Explorer' window.
 - [] In 'View' -> '3D Views' -> disable 'Lighten Image Mapping' if active.
 - [] In 'Define Component' () -> 'Surface Component':
 - [] Redraw the area selection to achieve a marked area of the specimen only, and with its edges smooth too.
 - [] Select 'Pattern quality' in bottom left window.
 - [] Define 'Facet size' and 'Point distance' by aiming for the best pattern quality shown in the scale in the right of the window.
 - [] 'Computation' at 'High accuracy'.
 - [] Create and continue with 'OK'.
 - [] In 'Project Guide', click on 'Recalculate Project Without Report Pages'.
 - [] Check all stages, and, if lacking quality throughout them, tweak the 'Facet size' or 'Point Distance' values in "Surface Component".
 - [] In 'Inspect All Visible Actual Elements', select a parameter of interest.
 - [] In 'Project Guide', click on 'Recalculate Project Without Report Pages'.