



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

**GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES**

TRABAJO FIN DE GRADO

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA  
INFERIR LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL  
TEJIDO ÓSEO PEDIÁTRICO**

Autor: Patricia Astobieta González

Director: Francisco José López Valdés

Madrid



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA INFERIR LAS  
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL TEJIDO ÓSEO PEDIÁTRICO**  
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2019/2020 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.: PATRICIA ASTOBIETA GONZALEZ Fecha: 15/ 07/ 2020

Autorizada la entrega del proyecto

**EL DIRECTOR DEL PROYECTO**

**LOPEZ VALDES  
FRANCISCO JOSE  
- 09437440B**

Firmado digitalmente por  
LOPEZ VALDES  
FRANCISCO JOSE -  
09437440B  
Fecha: 2020.07.16 11:38:18  
+02'00'

Fdo.: Francisco J. López Valdés

Fecha: ...16/ 07/ 2020.....





**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

## DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA INFERIR LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL TEJIDO ÓSEO PEDIÁTRICO

Autor: Patricia Astobieta González

Director: Francisco José López Valdés

Madrid



# Agradecimientos

*A mi director de proyecto, Francisco, por su dedicación, tiempo y cercanía en el desarrollo este proyecto.*

*A mis amigos de ICAI, en especial a Paula, por estar siempre a mi lado durante estos cuatro años ayudándome y animándome.*

*A mis amigas del Colegio Mayor Padre Poveda, por escucharme siempre que lo necesitaba y distraerme diariamente de la carga de la universidad.*

*A Marina y Ali, por todos los consejos y ánimos como veteranas de ICAI.*

*A mis padres, por haber confiado en mi en todo momento, por todos sus ánimos y por cada celebración después de cada logro.*

# DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA INFERIR LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL TEJIDO ÓSEO PEDIÁTRICO

**Autor: Astobieta González, Patricia.**

Director: López Valdés, Francisco José.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## RESUMEN DEL PROYECTO

### 1. Introducción

Desde antes de la Segunda Guerra Mundial la tecnología ha sido aplicada para mejorar la seguridad vial, dando lugar a un desarrollo tecnológico incremental donde las mejoras no dejan de producirse. Estos avances se producen gracias a la obtención de datos procedentes de ensayos realizados con cuerpos humanos. Sin embargo, el número de cadáveres donados a la ciencia, no es suficiente como para sacar conclusiones sólidas sobre el comportamiento del cuerpo ante colisiones sufridas en un automóvil. En concreto, es el bajo número de muestras de tejidos pediátricos lo que motiva a la realización de este proyecto.

Principalmente lo que se quiere analizar es el comportamiento del tejido óseo ante las colisiones sufridas en accidentes de coche, debido a que las fracturas de huesos son las más comunes en este tipo de accidentes. Este comportamiento es estudiado mediante la realización de ensayos mecánicos, como por ejemplo, el ensayo a tracción.

En los estudios *Subit et al. (2013)* y *Kemper et al. (2005)*, se realizaron ensayos a tracción con muestras de huesos humanos de diferentes edades y géneros, y se obtuvo como resultado que existía una influencia de ambos factores en las propiedades mecánicas del tejido óseo.

Este proyecto, tiene como objetivo principal desarrollar una metodología que permita estudiar la evolución de las propiedades mecánicas con la edad de dos especies animales (bovina y ovina), comprobar si evolucionan de manera similar a medida que avanzan hacia el estado adulto y extrapolar estos datos a los humanos.

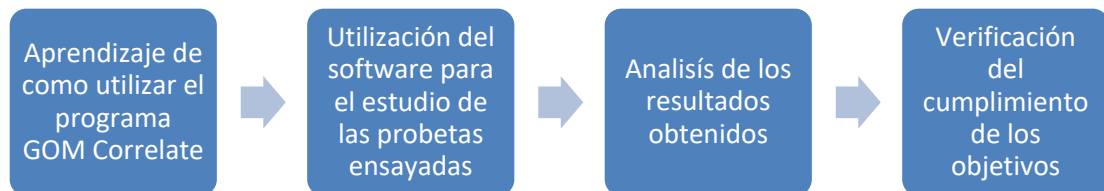
### 2. Definición del proyecto

Basado en los estudios *Subit et al. (2013)* y *Kemper et al. (2005)*, se mecanizaron en los laboratorios de ICAI probetas con los huesos de las especies bovina y ovina y fueron sometidas a ensayos a tracción. Este proyecto se encarga del estudio de la deformación de cada una de las probetas mediante la utilización del software GOM Correlate.

Este programa admite videos en diferentes formatos y proporciona las herramientas necesarias para realizar un estudio de la deformación preciso, proporcionando en una escala de colores, los valores de deformación que toma cada punto de la probeta.

Además, se obtuvo la velocidad con la que se deforma la probeta, magnitud que influye en la rigidez del material alterando sus propiedades mecánicas.

Los datos obtenidos son extraídos y utilizados para obtener las gráficas tensión deformación de diversos puntos seleccionados de la probeta. Estas gráficas permiten analizar si existe algún patrón de comportamiento de las zonas de la probeta y obtener las propiedades mecánicas de las mismas.



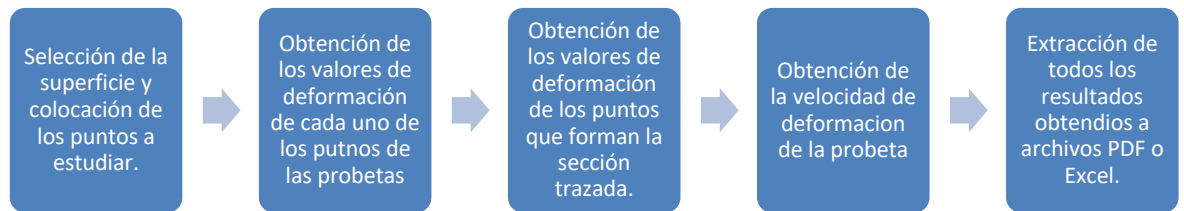
### 3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

El programa utilizado para el estudio del comportamiento de las probetas, es un software de medición de test con objetos tanto de 2 dimensiones como de 3 dimensiones. Permite la importación de datos mediante la utilización de imágenes 2D/3D – independiente del sistema y la medida de estos datos está basada en puntos o en campo completo. Para el análisis de la deformación de la pieza, el software nos proporciona la deformación, el desplazamiento, la velocidad y la aceleración con la que tiene lugar.

### 4. Resultados

El programa permite seleccionar puntos en la superficie que se quiere estudiar. En este caso se eligieron 6 puntos situados de igual manera en todas las probetas, y los cuales serán utilizados para analizar el comportamiento de los mismos mediante el estudio de los valores de su deformación. Los resultados obtenidos son los siguientes:

- Manual paso a paso de cómo utilizar el programa GOM Correlate para el estudio de sus propiedades mecánicas.
- Valores de la deformación que toma cada uno de los puntos a lo largo de todo el ensayo.
- Valores de deformación de cada uno de los puntos que forman una sección que divide la probeta por la mitad justo antes de que rompa.
- Velocidad de deformación de toda la probeta a lo largo de todo el ensayo.
- Gráficas Tensión-Deformación de cada uno de los puntos.
- Gráficas Deformación-Tiempo de cada uno de los puntos.
- Gráficas Deformación-Longitud de cada una de las secciones trazadas en las probetas.



## 5. Conclusiones

Para poder cumplir el objetivo principal del desarrollo de la metodología, es preciso llegar a tres objetivos parciales planteados para este proyecto:

1. *Desarrollo y aprendizaje del funcionamiento del programa Aramis (GOM Correlate)*. Cumplido mediante la realización de un manual de utilización.
2. *Aplicación del programa al estudio de las probetas*. Obtención de datos sobre el comportamiento del tejido óseo a través de los resultados obtenidos del software.
3. *Verificar la hipótesis mediante la obtención de alguna conclusión durante el estudio de las probetas*. No se ha podido llegar a ninguna conclusión debido al pequeño número de probetas ensayadas (6).

## 6. Referencias

GOM Correlate, <https://www.gom.com/3d-software/gom-correlate.html#downloadForm>

Kemper AR, McNally C, Kennedy EA, Manoogian SJ, Rath AL, Ng TP, Stitzel JD, Smith EP, Duma SM, Matsuoka F. Material properties of human rib cortical bone from dynamic tension coupon testing. *Stapp car crash journal*, 2005; 49:199-230

Subit D. *Update on the rib coupon tests, 2009*. Preparado para Japan Automobile Research Institute.

# **DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY TO INFER THE MECHANICAL PROPERTIES OF PAEDIATRIC BONE TISSUE**

**Author: Astobieta González, Patricia.**

Supervisor: López Valdés, Francisco José.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **ABSTRACT**

### **1. Introduction**

Since before World War II, technology has been applied to improve road safety, leading to incremental technological development where improvements do not stop. These advances are made thanks to the collection of data from tests carried out on human bodies. However, the number of corpses donated to science is not enough to draw solid conclusions about the body's behavior in collisions suffered in a car. In particular, it is the low number of pediatric tissue samples that motivates the implementation of this project.

We want to analyze is the behavior of bone tissue in the face of collisions suffered in car accidents, because bone fractures are the most common in these types of accidents. This behavior is studied by performing mechanical tests, such as the tensile test.

In the studies Subit et al.(2013) and Kemper et al. (2005), tensile tests were performed with samples of human bones of different ages and gender, and resulted in an influence of both factors on the mechanical properties of bone tissue.

The main objective of this project is to develop a methodology for studying the evolution, with the age, of mechanical properties of two animal species (bovine and ovine), check whether they evolve in a similar way as they move towards adult status and extrapolate this data to humans.

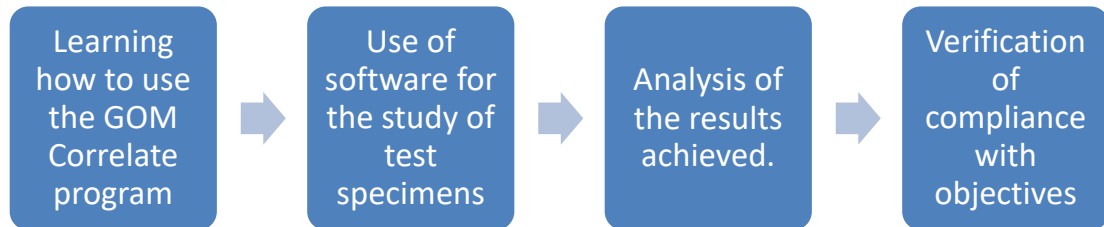
### **2. Definition of the project**

Based on the studies Subit et al.(2013) and Kemper et al. (2005), were processed in the ICAI laboratories, test pieces containing the bones of the bovine and ovine species and underwent traction tests. This project is responsible for the study of the deformation of each of the test pieces by using the software GOM Correlate.

This program supports videos in different formats and provides the necessary tools to carry out a study of the precise deformation, providing, on a colour scale, the deformation values taken at each point of the test piece. In addition, the velocity with which the test

piece is deformed was obtained, a magnitude that influences the stiffness of the material by altering its mechanical properties.

The data obtained are extracted and used to obtain the strain graphs of various selected points of the test piece. These graphs allow us to analyze if there is any pattern of behavior in the areas of the test piece and obtain the mechanical properties of them.



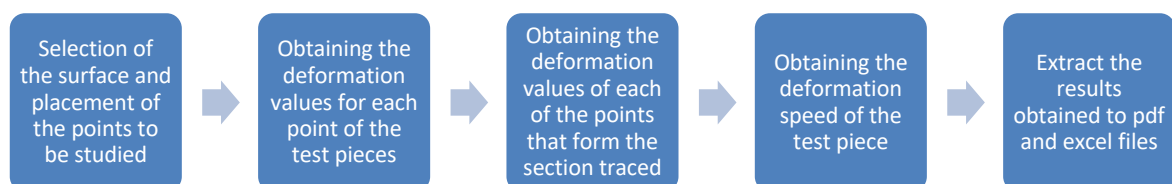
### 3. Description of the software

The program used for the study of the behavior of the test pieces is a test measurement software with objects of both 2 dimensions and 3 dimensions. This allows the data to be imported by using 2D/3D images - system independent and the measurement of this data is point-based or in full field. For the analysis of the deformation of the part, the software provides us with the deformation, displacement, speed and acceleration with which it takes place.

### 4. Results

The program allows you to select points on the surface you want to study. In this case 6 points equally located on all test pieces were chosen, and which will be used to analyze their behavior by studying the values of their deformation. The results obtained are as follows:

- Step-by-step manual on how to use the GOM Correlate program for the study of its mechanical properties.
- Deformation values taken by each point throughout the test.
- Deformation values of each of the points forming a section dividing the test piece in half just before it breaks.
- Deflection speed of the entire test piece throughout the test.
- Stress-Strain Graphs for each of the points.
- Strain-Time Graphs of each of the points.
- Strain-Length Graphs of each of the sections drawn on the test pieces.



## 5. Conclusions

In order to achieve the main objective of developing the methodology, three partial objectives have to be set for this project:

1. *Development and learning of the operation of the Aramis program (GOM Correlate)*. Accomplished by performing a user manual.
2. *Application of the program to the study of test pieces*. Obtaining data on the behavior of bone tissue through the results obtained from the software.
3. *Verify the hypothesis by obtaining some conclusion during the study of the test pieces*. No conclusions could be reached due to the small number of test pieces tested (6).

## 6. References

GOM Correlate, <https://www.gom.com/3d-software/gom-correlate.html#downloadForm>

Kemper AR, McNally C, Kennedy EA, Manoogian SJ, Rath AL, Ng TP, Stitzel JD, Smith EP, Duma SM, Matsuoka F. Material properties of human rib cortical bone from dynamic tension coupon testing. *Stapp car crash journal*, 2005; 49:199-230

Subit D. *Update on the rib coupon tests, 2009*. Preparado para Japan Automobile Research Institute.

## *Índice de la memoria*

<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>8</b>
1.1 Motivación del proyecto .....	9
1.2 Objetivos del proyecto.....	10
<b>Capítulo 2. Estado del Arte.....</b>	<b>12</b>
<b>Capítulo 3. Métodos y Datos.....</b>	<b>16</b>
3.1 Datos utilizados.....	16
3.2 Programa Aramis GOM Correlate .....	20
<b>Capítulo 4. Resultados.....</b>	<b>22</b>
4.1 Manual para utilizar el programa GOM Correlate .....	22
4.2 Resultados obtenidos del análisis de las probetas .....	56
4.2.1 Probetas y Gráficas Deformación vs Tiempo justo antes de romper .....	57
4.2.2 Gráficas tensión-deformación V1.....	60
4.2.3 Gráficas tensión-deformación V2.....	63
4.2.4 Gráficas tensión-deformación V3.....	65
4.2.5 Gráficas tensión-deformación O1 .....	69
4.2.6 Gráficas tensión-deformación O2 .....	72
4.2.7 Gráficas tensión-deformación O3 .....	76
4.3 Análisis de las gráficas .....	79
4.3.1 Estudio de los valores de deformación de los puntos que forman una sección de la probeta.....	84
4.3.2 Estudio de la velocidad (mm/s) con la que se deforma las probeta en el momento justo antes de romper.....	88
<b>Capítulo 5. Discusión y Análisis de Resultados.....</b>	<b>92</b>
5.1 Complicaciones surgidas durante el desarrollo del proyecto .....	92
5.2 Proyectos futuros.....	94
<b>Capítulo 6. 96</b>	
<b>Capítulo 7. Conclusiones.....</b>	<b>96</b>

<i>Capítulo 8. Bibliografía</i> .....	<b>98</b>
<i>ANEXO I: Objetivos de Desarrollo Sostenible</i> .....	<b>99</b>

## *Índice de figuras*

Ilustración 1: Mecanizado de la probeta desde el corte del hueso a la obtención de la lámina ósea. Subit et al.(2013) .....	13
Ilustración 2: Mecanización de la lámina. Subit et al.(2013) .....	13
Ilustración 3: Probeta mecanizada. Subit et al.(2011).....	13
Ilustración 4: Gráfica tensión-deformación de fémur y tibia pediátrico. Subit et al.(2011)	14
Ilustración 5: Gráfica tensión-deformación fémur y tibia adulto. Subit et al.(2011).....	15
Ilustración 6: Gráfica tensión-deformación fémur y tibia anciano. Subit et al.(2011).....	15
Ilustración 7: Probeta terminada. ....	16
Ilustración 8: Fotografías de las probetas preparadas para el ensayo.....	18
Ilustración 9: Fotograma de una probeta antes de comenzar a aplicar la fuerza. ....	19
Ilustración 10: Identificación de facetas. ....	21
Ilustración 11: Pantalla de inicio del programa .....	23
Ilustración 12: Ensayos descargados de la base de datos del programa. ....	24
Ilustración 13: Nuevo proyecto.....	25
Ilustración 14: Pasos para subir el documento a analizar. ....	25
Ilustración 15: Muestra del video seleccionado para abrir en el programa. ....	26
Ilustración 16: Asignación de la escala. ....	27
Ilustración 17: Asignación de la escala. ....	28
Ilustración 18: Comando a utilizar para seleccionar la superficie .....	29
Ilustración 19: Superficie seleccionada automáticamente. ....	30
Ilustración 20: Superficie seleccionada manualmente. ....	30
Ilustración 21: Comandos a utilizar una vez que finalizado el trazado del área.....	31
Ilustración 22: Comprobación de la calidad de la superficie seleccionada .....	32
Ilustración 23: Comando que se debe utilizar para el estudio de la elongación en el eje y	33
Ilustración 24: Comando a utilizar para el estudio de la elongación en el eje y.....	34
Ilustración 25: Evolución de la longitud y área seccional de la probeta ensayada .....	34
Ilustración 26: Curvas True Strain vs Technical Strain.....	35
Ilustración 27: Estado de la probeta en la centésima de segundo antes de que rompa .....	36

Ilustración 28: Estado de la probeta justo cuando rompe.....	37
Ilustración 29: Comandos para cambiar la visualización del archivo.....	38
Ilustración 30: Visión únicamente de la superficie a estudiar.....	39
Ilustración 31: Comando que se debe utilizar para fijar los puntos.....	40
Ilustración 32: Seis puntos seleccionados en la superficie con sus correspondientes valores de deformación.....	41
Ilustración 33: Comando que se debe utilizar para obtener la gráfica deformación-tiempo.....	42
Ilustración 34: Gráfica deformación-tiempo.....	42
Ilustración 35: Resalte de la gráfica mediante la pulsación de la leyenda.....	43
Ilustración 36: Fichero Excel obtenido.....	44
Ilustración 37: Exportación de los datos de la gráfica.....	45
Ilustración 38: Cambio del separador de decimales.....	45
Ilustración 39: Resumen de elementos realizados en el programa.....	46
Ilustración 40: Comando a seleccionar para dibujar la sección.....	47
Ilustración 41: Vista de la sección obtenida.....	48
Ilustración 42: Gráfica deformación-longitud a lo largo de la sección.....	49
Ilustración 43: Velocidad en dirección Y.....	50
Ilustración 44: Captura de la gráfica sola y captura de la gráfica con la probeta.....	52
Ilustración 45: Gráfica deformación-longitud a lo largo de la sección.....	53
Ilustración 46: Gráfica deformación-longitud a lo largo de la sección.....	54
Ilustración 47: Creación del PDF.....	55
Ilustración 48: Puntos seleccionados para el estudio del comportamiento de la muestra.....	57
Ilustración 49: Probeta V1 y gráfica Deformación vs Tiempo.....	58
Ilustración 50: Probeta V2 y gráfica Deformación vs Tiempo.....	58
Ilustración 51: Probeta V3 y gráfica Deformación vs Tiempo.....	58
Ilustración 52: Probeta O1 y gráfica Deformación vs Tiempo.....	59
Ilustración 53: Probeta O2 y gráfica Deformación vs Tiempo.....	59
Ilustración 54: Probeta O3 y gráfica Deformación vs Tiempo.....	60
Ilustración 55: Gráfica tensión-deformación.....	60
Ilustración 56: Gráfica tensión-deformación.....	61

Ilustración 57: Gráfica tensión-deformación.....	61
Ilustración 58: Gráfica tensión-deformación.....	62
Ilustración 59: Gráfica tensión-deformación.....	62
Ilustración 60: Gráfica tensión-deformación.....	63
Ilustración 61: Gráfica tensión-deformación.....	63
Ilustración 62: Gráfica tensión-deformación.....	64
Ilustración 63: Gráfica tensión-deformación.....	64
Ilustración 64: Gráfica tensión-deformación.....	65
Ilustración 65: Gráfica tensión-deformación.....	65
Ilustración 66: Gráfica tensión-deformación.....	66
Ilustración 67: Gráfica tensión-deformación.....	66
Ilustración 68: Gráfica tensión-deformación.....	67
Ilustración 69: Gráfica tensión-deformación.....	67
Ilustración 70: Gráfica tensión-deformación.....	68
Ilustración 71: Gráfica tensión-deformación.....	68
Ilustración 72: Gráfica tensión-deformación.....	69
Ilustración 73: Gráfica tensión-deformación.....	69
Ilustración 74: Gráfica tensión-deformación.....	70
Ilustración 75: Gráfica tensión-deformación.....	70
Ilustración 76: Gráfica tensión-deformación.....	71
Ilustración 77: Gráfica tensión-deformación.....	71
Ilustración 78: Gráfica tensión-deformación.....	72
Ilustración 79: Gráfica tensión-deformación.....	72
Ilustración 80: Gráfica tensión-deformación.....	73
Ilustración 81: Gráfica tensión-deformación.....	74
Ilustración 82: Gráfica tensión-deformación.....	74
Ilustración 83: Gráfica tensión-deformación.....	75
Ilustración 84: Gráfica tensión-deformación.....	76
Ilustración 85: Gráfica tensión-deformación.....	76
Ilustración 86: Gráfica tensión-deformación.....	77

Ilustración 87: Gráfica tensión-deformación. ....	77
Ilustración 88: Gráfica tensión-deformación. ....	78
Ilustración 89: Gráfica tensión-deformación. ....	78
Ilustración 90: Ejemplo curva tensión-deformación y sus partes. ....	79
Ilustración 91: Nuevos puntos y gráfica Deformación tiempo V2.....	81
Ilustración 92: Nuevos puntos y gráfica Deformación tiempo V3.....	82
Ilustración 93: Nuevos puntos y gráfica Deformación tiempo O1.....	83
Ilustración 94: Nuevos puntos y gráfica Deformación tiempo O2.....	84
Ilustración 95: Deformación a lo largo de la sección O1 .....	85
Ilustración 96: Deformación a lo largo de la sección O2 .....	85
Ilustración 97: Deformación a lo largo de la sección O3 .....	86
Ilustración 98: Deformación a lo largo de la sección V1 .....	86
Ilustración 99: Deformación a lo largo de la sección V2 .....	87
Ilustración 100: Deformación a lo largo de la sección V3 .....	87
Ilustración 101: Velocidad de deformación justo antes de romper O1 .....	88
Ilustración 102: Velocidad de deformación justo antes de romper O2 .....	89
Ilustración 103: Velocidad de deformación justo antes de romper O3 .....	89
Ilustración 104: Velocidad de deformación justo antes de romper V1 .....	90
Ilustración 105: Velocidad de deformación justo antes de romper V2 .....	90
Ilustración 106: Ilustración 106: Velocidad de deformación justo antes de romper V3.....	91

## *Índice de tablas*

Tabla 1: Características de las probetas ensayadas. ....	17
Tabla 2: Tensión y deformación en el punto de rotura.....	19

## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Desde antes de la Segunda Guerra Mundial la tecnología ha sido aplicada para mejorar la seguridad vial, dando lugar a un desarrollo tecnológico incremental donde las mejoras no dejan de producirse. Los avances tecnológicos en seguridad del automóvil se basan en previos estudios del comportamiento del cuerpo humano ante los impactos sufridos en el mismo. Algunos de estos estudios tienen como objetivo analizar las propiedades mecánicas de la estructura ósea, donde la fractura de huesos es una de las lesiones más comunes en los accidentes de tráfico. Uno de los hallazgos enunciados en los artículos *Subit et al. (2013)* y *Kemper et al. (2005)* da como resultado la influencia de ciertos factores, como la edad o el género, sobre el comportamiento del tejido óseo.

Las propiedades del tejido óseo se pueden obtener mediante la realización de ensayos mecánicos, como por ejemplo, el ensayo a tracción, donde es necesaria la utilización de muestras de cadáveres humanos de distintos géneros y edades como consecuencia de la influencia que tienen estos factores en el comportamiento del hueso a la hora de recibir un impacto.

En el ensayo se estudia la deformación resultante en cada punto de la muestra mediante una fuerza a tracción, obteniendo así la curva tensión-deformación y consecuentemente sus propiedades mecánicas.

En un estudio realizado en 2005 por Virginia Tech- Wake Forest, Center for Injury Biomechanics con la colaboración de Toyota Motor Corporation [*Kemper et al. (2005)*], se utilizó seis cadáveres humanos, tres masculinos y tres femeninos, con edades desde los 18-67 años. Los resultados obtenidos confirman que existe una correlación de la edad con las propiedades mecánicas del hueso. También confirma que el módulo de Young de un tejido óseo pediátrico es menor que el de un adulto o de un anciano, y por lo tanto, incrementa su valor con la edad. Por otro lado, el valor de la tensión y la deformación a la cual se produce la ruptura crece desde niño a adulto, y decrece de adulto a anciano.

Para realizar este tipo de estudio es necesario trabajar con huesos de personas humanas, de diferentes edades y géneros, tal y como se ha visto en el párrafo anterior. Sin embargo, la falta de datos biomecánicos pediátricos, debido a ciertas razones como el bajo número de cadáveres infantiles donados a la ciencia, o el menor número de fallecidos por accidentes de tráfico, dificulta la obtención de datos. Por este motivo, basado en diferentes estudios con tejidos óseos de humanos, se utilizarán probetas que simulan tejidos de 2 diferentes especies de animales, ovina y bovina. Se realizarán ensayos mecánicos para estudiar las propiedades de estos tejidos y ver los cambios en la composición química y estructural.

El objetivo del trabajo es estudiar la evolución de las propiedades mecánicas con la edad de las dos especies, comprobar si evolucionan de manera similar a medida que avanzan hacia el estado adulto y extrapolar estos datos a los humanos.

## ***1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO***

El motivo del proyecto es desarrollar una metodología que permita comprobar si se puede extrapolar las propiedades mecánicas óseas de las especies de animales citadas a los humanos, con objeto de aplicarla ante impactos sufridos en accidentes de automoción.

Debido a la correlación de las propiedades biomecánicas de diversos factores, como son la edad, género, y densidad mineral ósea, se necesita realizar estudios con muestras de niños, adultos y ancianos, que sean tanto de género masculino como femenino. Por ciertas razones, como son el bajo número de cuerpos infantiles donados a la ciencia, o el menor número de niños fallecidos en accidentes de coche, no se tienen datos biomecánicos suficientes de los tejidos óseos pediátricos.

Por este motivo, se ha desarrollado una metodología, que estudia el comportamiento de las propiedades mecánicas de probetas que simulan tejidos de dos diferentes especies animales (ovina y bovina), para ver que sus propiedades mecánicas con el crecimiento siguen un mismo

El estudio de este comportamiento se realizará de igual manera que los estudios con tejidos óseos humanos y la finalidad es comprobar que se puede extrapolar los datos obtenidos.

## ***1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO***

El objetivo de este proyecto es poner a punto la metodología de ensayos con especies animales, con la utilización del programa Aramis para medir las deformaciones en las probetas de hueso. Para poner a punto esta metodología, debemos poder verificar la hipótesis que establece que la relación entre las propiedades mecánicas del tejido óseo y los cambios en su composición química y estructural para estas especies evolucionan de manera similar a medida que avanzan en desarrollo hacia el estado adulto, independientemente de la especie. Para ello, se analizarán los resultados de los ensayos mecánicos de las probetas que simulan el tejido óseo con el software Aramis. El comportamiento de estas probetas ha sido grabado con una cámara de alta velocidad, y se estudiará los cambios producidos en patrón de puntos pintado en la superficie de la probeta para obtener sus propiedades. El software Aramis analizará los videos y proporcionará los datos de la deformación resultante de la aplicación de la fuerza sobre las probetas. Con estos resultados se podrá verificar la hipótesis planteada.

Para poder cumplir el objetivo principal de este trabajo, se deberá previamente cumplir otros dos objetivos. El primero es el aprendizaje del funcionamiento del programa GOM Correlate y su consecuente utilización. Se deberá estudiar cómo utilizar cada una de las herramientas que este programa ofrece. Una vez que se ha aprendido a utilizar el programa, se deberá ser capaz de utilizar las herramientas que ofrece y aplicarlas al estudio obteniendo los datos necesarios de las probetas para poder verificar la hipótesis establecida previamente.

Por lo que este trabajo tiene tres objetivos a cumplir:

1. Desarrollo y aprendizaje del funcionamiento del programa Aramis (GOM Correlate)
2. Aplicación del programa al estudio de las probetas

3. Verificar la hipótesis mediante la obtención de alguna conclusión durante el estudio de las probetas.

## **Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE**

La metodología desarrollada por varios estudios para la obtención de las propiedades mecánicas del tejido óseo, se basa en la realización de ensayos a tracción con probetas realizadas con huesos de humanos. Para el desarrollo de esta metodología, se ha tenido como referente dos estudios realizados previamente.

Para una mejor explicación de cómo se han llevado a cabo esta metodología, se desarrollarán los pasos seguidos en los estudios realizados. Uno de los ensayos ha sido realizado 117 probetas de costillas humanas extraídas de 6 cadáveres (3 masculinos y 3 femeninos). Para el otro estudio, se utilizaron tejidos óseos procedentes de fémures y tibias de 5 cadáveres humanos masculinos.

Ambos coinciden con los mismos pasos de preparación. En primer lugar, se limpia el hueso de cualquier tejido blando que lo rodea y se extrae el periostio (tejido fibroso que recubre la capa externa del hueso). Utilizando una sierra de diamante, se realizará un corte longitudinal en la costilla de unos 30 mm de longitud con la finalidad de retirar con un rascador el hueso trabecular y dejar solo el hueso cortical, parte que da sujeción mecánica a los huesos. En segundo lugar, una vez obtenido el hueso cortical, se realizará un corte paralelo, con la ayuda de una sierra de diamante, que proporcione una muestra lo más grande y fina posible, obteniendo así una lámina de 0,8 mm de espesor. Con la ayuda de una fresadora, se procederá a mecanizar el contorno de la lámina. Se realizarán dos agujeros, y se colocará la lámina del hueso entre dos piezas de delcron que serán, posteriormente, fijadas una superficie de acero templado. Para mecanizar y dar la forma deseada a la lámina se utilizará una fresadora equipada con rodamientos. El resultado obtenido es el mostrado en la imagen a continuación. La realización del ensayo a tracción debe realizarse 3 o 4 días después de la preparación de la lámina, que será conservada hasta entonces en una solución salina al 0,9%.

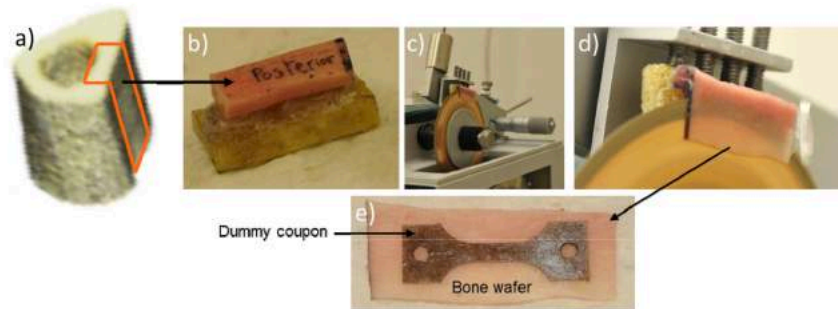


Ilustración 1: Mecanizado de la probeta desde el corte del hueso a la obtención de la lámina ósea. Subit et al.(2013)

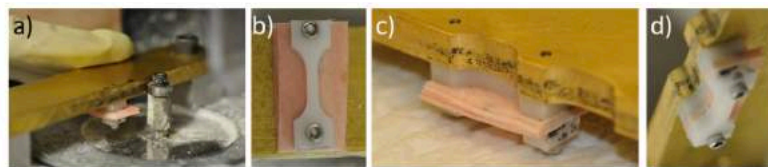


Ilustración 2: Mecanización de la lámina. Subit et al.(2013)



Ilustración 3: Probeta mecanizada. Subit et al.(2011)

Para la sujeción de la probeta en la máquina de ensayo, se colocará la pieza entre las mordazas de la propia máquina. Estas mordazas sujetan la probeta por presión impidiendo así que esta se mueva mientras la fuerza es aplicada.

El seguimiento de la deformación sufrida en la probeta se realiza mediante un patrón de puntos que se ha creado previamente sobre la superficie de la probeta con un spray de pintura. Con una cámara a alta velocidad se toman imágenes de la superficie, que posteriormente son estudiadas con el programa Aramis software package (V6.2, GOM, GmbH). Este software proporciona un seguimiento de la deformación del patrón de puntos y permite determinar el campo de tensiones creado en a la superficie de la probeta durante todo el ensayo. Muestra con una escala de colores las zonas que han sufrido deformación y en que porcentaje lo han hecho.

De esto dos ensayos se pudo llegar a ciertas conclusiones acerca del comportamiento del tejido óseo ante impactos. Los resultados obtenidos afirman que existe una dependencia de la edad en las propiedades mecánicas del hueso. El estudio afirma que el módulo de Young de un tejido óseo pediátrico es menor que el de un adulto o de un anciano, por lo tanto, incrementa su valor con la edad. Por otro lado, el valor de la tensión y la deformación a la cual se produce la ruptura crece desde niño a adulto, y decrece de adulto a anciano.

Estas son las gráficas tensión-deformación obtenidas en el ensayo realizado con fémures y tibias, en las cuales se puede apreciar la dependencia que existe en el comportamiento de la edad y el género.

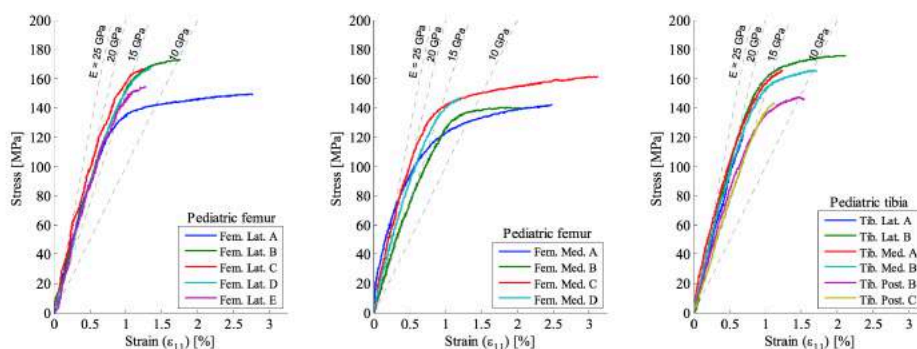


Ilustración 4: Gráfica tensión-deformación de fémur y tibia pediátrico. Subit et al.(2011)

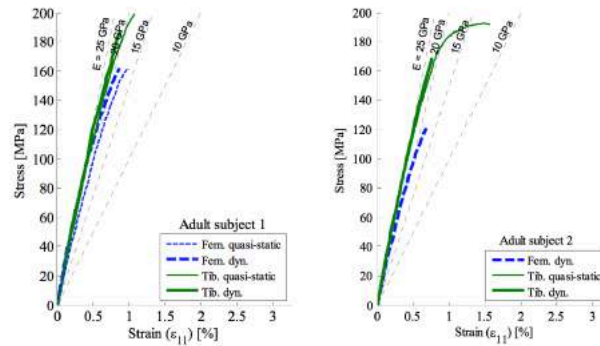


Ilustración 5: Gráfica tensión-deformación fémur y tibia adulto. Subit et al.(2011)

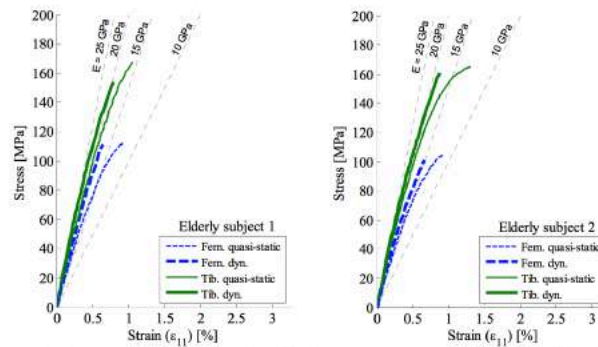


Ilustración 6: Gráfica tensión-deformación fémur y tibia anciano. Subit et al.(2011)

## Capítulo 3. MÉTODOS Y DATOS

### 3.1 DATOS UTILIZADOS

En primer lugar, para poder estudiar el comportamiento del tejido óseo con la utilización del programa Aramis, es necesario llevar a cabo la preparación de las probetas de huesos. Las probetas finales ensayadas proceden de dos especies animales, la bovina y la porcina, de las cuales se han obtenido 6 probetas, 3 de cada.

Previamente a la preparación de las probetas, es necesario buscar el tipo de hueso más adecuado de cada especie, que permita la elaboración de un gran número de probetas y que tengan una capa cortical de un grosor suficiente para su mecanización. Se realizaron varios ensayos utilizando costillas de cerdo y diferentes tipos de hueso de cordero, pero ambos resultaron no ser adecuados para el desarrollo de la metodología debido a que tienen una capa ósea reducida. Finalmente se utilizaron tibias y fémures de huesos bovinos y ovinos debido su considerable capa cortical. Estos huesos fueron comprados en carnicerías.

La higiene y la limpieza tomaron un papel muy importante en este proyecto al trabajar con material biológico. Las probetas fueron limpiadas y mecanizadas en los laboratorios de la universidad siguiendo los pasos del artículo Subit *et al.* (2011), obteniendo probetas con la forma necesaria para realizar el ensayo a tracción, tal y como se muestra en la ilustración 7.



Ilustración 7: Probeta terminada.

En la tabla 1 se muestra el código de clasificación utilizado para cada probeta, el tipo de hueso (bovino u ovino), el nombre del hueso se ha utilizado y la etapa de la vida del animal.

Tabla 1: Características de las probetas ensayadas.

	Especie animal	Edad del animal	Tipo de hueso
V1.1	Bovino	Temprana edad	Fémur
V2.1	Bovino	Mediana edad	Fémur
V3.1	Bovino	Avanzada edad	Fémur
O1.1	Ovino	Temprana edad	Tibia
O2.1	Ovino	Mediana edad	Tibia
O3.1	Ovino	Avanzada edad	Tibia

La ilustración 8 muestra las probetas una vez mecanizadas y preparadas para realizar el ensayo. Para poder llevar a cabo el estudio de su comportamiento mediante la utilización del programa Aramis, se realiza un patrón de puntos negros en la superficie de las probetas. Este patrón se realiza con un spray negro y de forma muy precisa, debido a que el estudio posterior del ensayo con el programa se basa en los cambios entre blanco y negro que encuentre en la superficie.

Se desea que el espesor de las probetas sea de unos 0,8 mm aproximadamente. Debido a la complejidad de ser exactos en el corte, se midió el espesor de la probeta en 3 puntos diferentes, obteniendo medidas próximas a 0,8 pero no iguales. Por lo tanto, para los cálculos se utilizará la media de las tres medidas obtenidas. Resultó ser que las probetas eran más precisas (homogéneas en su grosor) (1,06%) que exactas (3,68%). Hecho satisfactorio a la hora de validar la metodología, lo que dará lugar a una sección transversal y

consecuentemente una tensión, uniforme. Es muy importante que las probetas tengan espesores similares para poder realizar posteriormente comparaciones entre los resultados obtenidos de cada una de ellas.



Ilustración 8: Fotografías de las probetas preparadas para el ensayo.

Una vez preparadas las láminas, se colocará la muestra ósea en la fresadora para proceder a la realización del ensayo a tracción. La máquina utilizada proporciona las gráficas Fuerza vs Alargamiento, de las cuales se obtuvieron la tensión y deformación máxima de cada probeta. Estos datos serán de gran ayuda a la hora de verificar los resultados obtenidos durante el estudio con el programa Aramis. La tensión máxima se calcula dividiendo la última fuerza aplicada entre el área seccional de la zona central. Por otro lado, la deformación máxima se calculó dividiendo la carrera máxima de la probeta entre la longitud de su sección central (10mm).

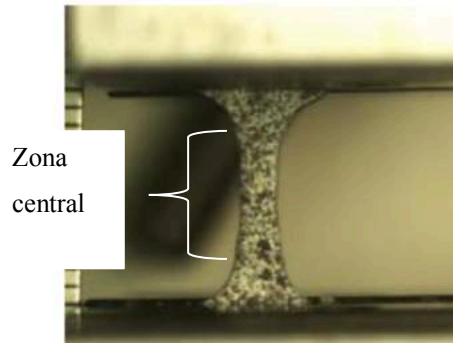


Ilustración 9: Fotograma de una probeta antes de comenzar a aplicar la fuerza.

Los datos obtenidos de las gráficas proporcionadas por la máquina son mostrados en la siguiente tabla y los cuales se utilizarán como referencia al cuantificar las deformaciones utilizando el software.

Tabla 2: Tensión y deformación en el punto de rotura.

Probeta	Media espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Fuerza Máx (N)	Tensión Máx (MPa)	Longitud Máx (mm)	Deformación Máx (%)
V1.1	0,777	1,9425	93,73	48,25	0,230	2,30%
V2.1	0,827	2,0675	231,20	111,83	0,350	3,50%
V3.1	0,830	2,0750	103,28	49,77	0,380	3,80%
O1.1	0,837	2,0925	260,48*	124,48*	0,640*	6,40%*
O2.1	0,833	2,0825	263,25	126,41	0,510	5,10%
O3.1	0,827	2,0675	189,15	91,49	0,490	4,90%

### **3.2 PROGRAMAS ARAMIS GOM CORRELATE**

El software GOM Correlate será utilizado para el estudiar el comportamiento de la probeta durante este ensayo. En concreto, con este software se estudiará la evolución de la deformación sufrida en la probeta desde el momento que se aplica la carga hasta el momento en el que rompe. También se estudiará la velocidad con la que se deforman los puntos, factor el cual influye en la rigidez de cada material.

Este programa es un software de medición de test con objetos tanto de 2 dimensiones como de 3 dimensiones. Permite la importación de datos mediante la utilización de imágenes 2D/3D – independiente del sistema y la medida de estos datos está basada en puntos o en campo completo. Para el análisis de la deformación de la pieza, el software nos proporciona la deformación, el desplazamiento, la velocidad y la aceleración con la que tiene lugar.

El programa puede ser descargado de forma gratuita desde su página web. Para el estudio de este ensayo hemos utilizado la versión gratuita del programa ya que abastecía todo lo que era necesario para llevar a cabo el análisis. Para la utilización de este programa se necesita un ordenador con las siguientes características:

- CPU: Intel Core i3
- RAM: 4 GB RAM
- Operating System: Windows 7 SP1 64 Bit with current security updates
- Graphics board: OpenGL-compatible graphics board (NVIDIA quadro for optimized hardware rendering)

Para el análisis de los ensayos, el programa admite tanto subir una secuencia de imagen o un video. Los formatos que admite el programa son, para imagen jpeg, png o tif, y para video los formatos MP4 o AVI

El programa, mediante el proceso estocástico, es decir al azar, selecciona áreas de la imagen en las que se reconoce cambios de color entre blanco y negro a las cuales llama facetas. Normalmente, estas facetas tienen forma de cuadrado y se puede ajustar su tamaño y la

distancia entre las diferentes facetas que reconozca el software. El patrón estocástico que sigue el programa al determinar dichas facetas es un patrón lo más aleatorio posible. Mediante la identificación de facetas, el programa marcará la superficie.

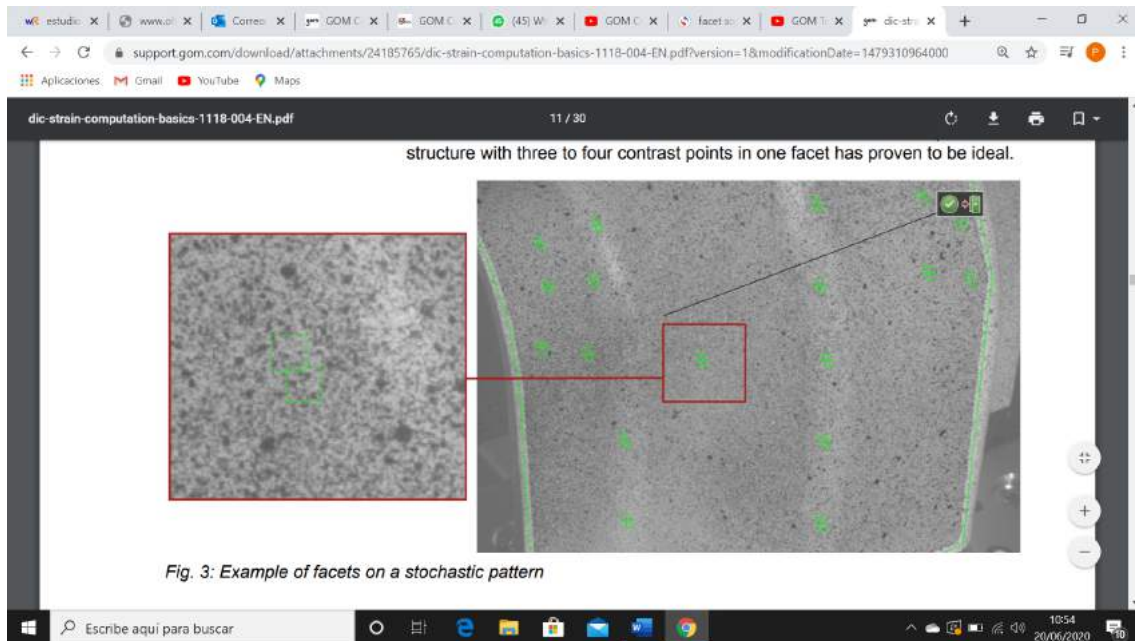
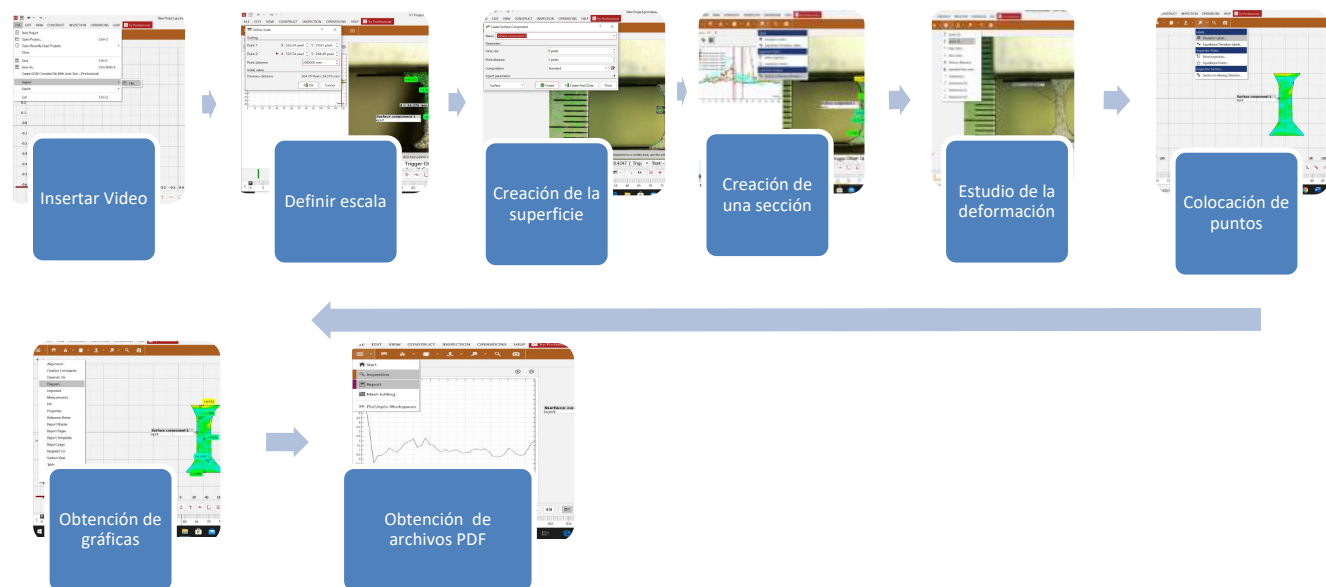


Ilustración 10: Identificación de facetas.

## Capítulo 4. RESULTADOS

### 4.1 MANUAL PARA UTILIZAR EL PROGRAMA GOM CORRELATE



#### Insertar video:


- File → Import

#### Definir escala:

- Segundo comando
- Definir lo que mide (mm) en la realidad en mm la distancia entre dos puntos

#### Creación de la superficie:

- Tercer comando
- Surface component
- Dibujar la superficie

manualmente utilizando  y



- Ajustar los tamaños de facet y point size

#### Creación de una sección:

- Sexto comando

- Section in viewing direction

#### Estudio de la deformación:

- Cuarto comando
- $\epsilon_y$


#### Colocación de puntos:

- Sexto comando
- Deviation labels. Colocar los puntos manteniendo presionado la tecla ctrl.

#### Obtención de gráficas:

-  → Diagram
- Extraer datos → 

#### Obtención archivos PDF:

- Primer comando → Report
- 

A continuación, se explicará de forma detallada cada paso que se tiene que dar para poder analizar las probetas utilizando este programa.

### **Importación del archivo a estudiar:**

En primer lugar, deberemos subir el documento que contenga el ensayo que queremos estudiar. En la página principal que se muestra en la figura 1, se pueden observar 6 posibles funciones que ofrece el programa. El software permite empezar un nuevo proyecto o abrir un proyecto ya que se ha creado con anterioridad. Además, en Sample date se podrá descargar una variedad de ensayos procedentes de una base de datos proporcionada por el propio programa (Figura 2)

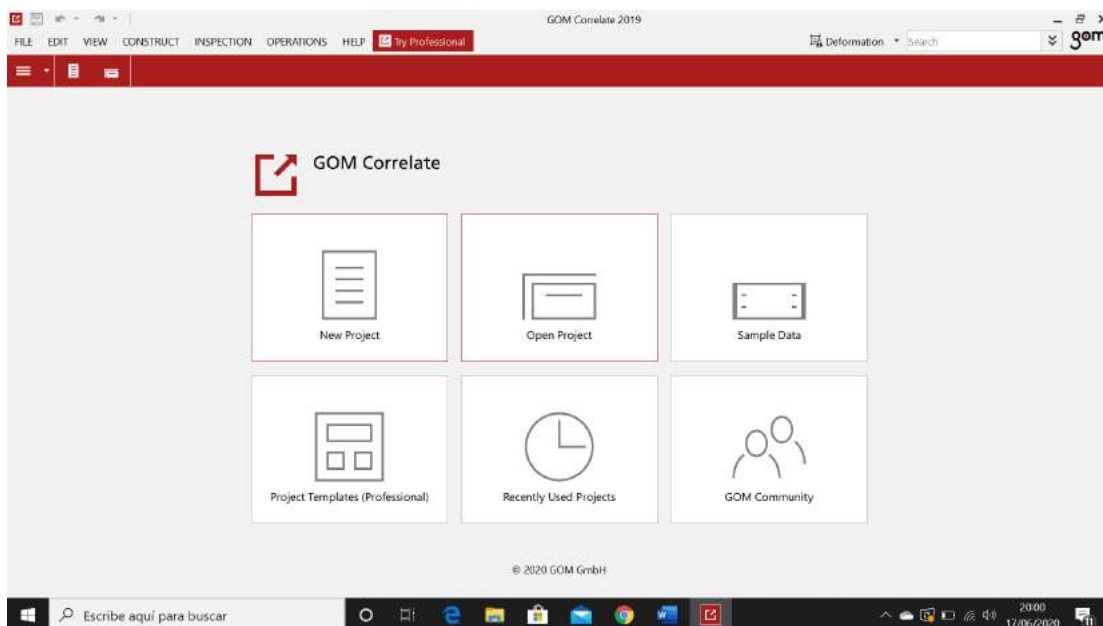


Ilustración 11: Pantalla de inicio del programa

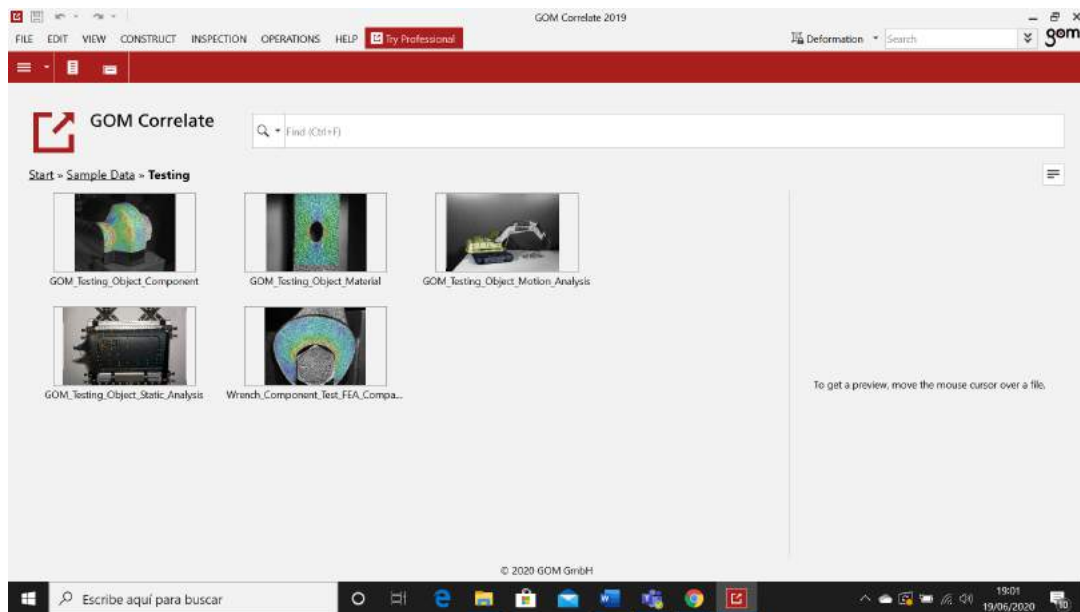

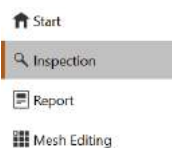


Ilustración 12: Ensayos descargados de la base de datos del programa.

Una vez seleccionado comenzar un nuevo proyecto, se abrirá una página en blanco.

Utilizando este comando  se podrá encontrar las diferentes secciones que tiene el programa. Haciendo click sobre la flecha se abrirá la siguiente lista de opciones.



Start vuelve a la página principal, Inspection es la sección de trabajo donde se realizan los análisis y Report muestra una vez terminado el estudio el informe de los datos que se han elegido extraer para realizar presentaciones o escribir informes.

Para poder subir un archivo que no ha sido analizado previamente, se abrirá un nuevo proyecto. Este proceso se lleva a cabo con la utilización de la herramienta File → Import.

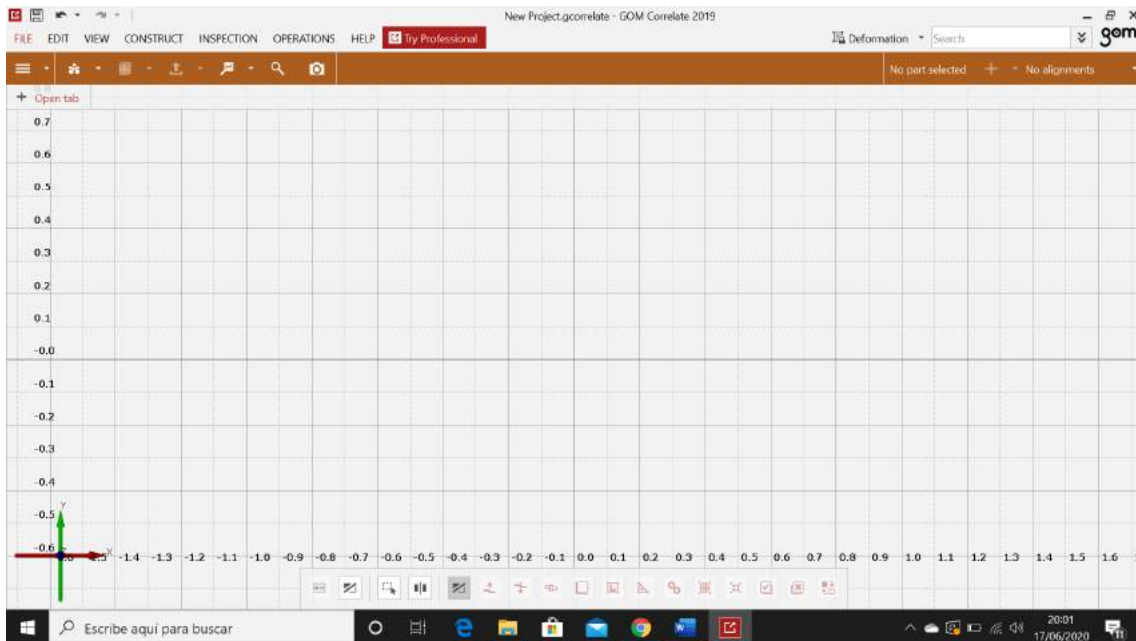


Ilustración 13: Nuevo proyecto

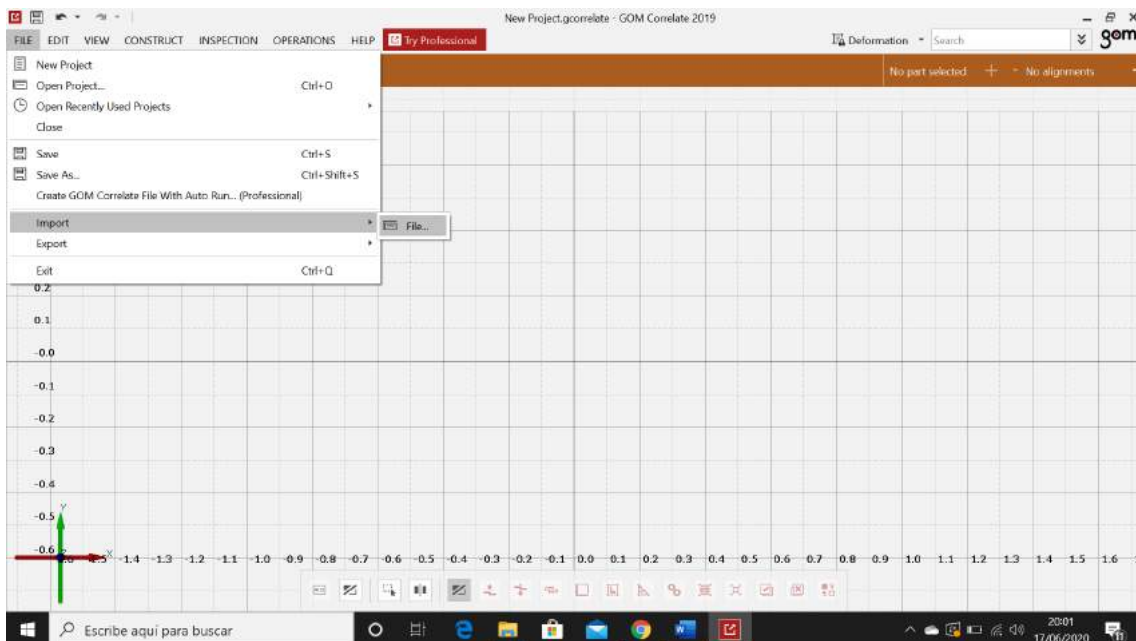


Ilustración 14: Pasos para subir el documento a analizar.

En este caso, se hará el análisis de un video realizado a cámara rápida. Como se ha mencionado anteriormente, el programa admite tanto secuencia de imágenes (las cuales deben de estar enumeradas) como videos en distintos formatos (AVI o MP4).

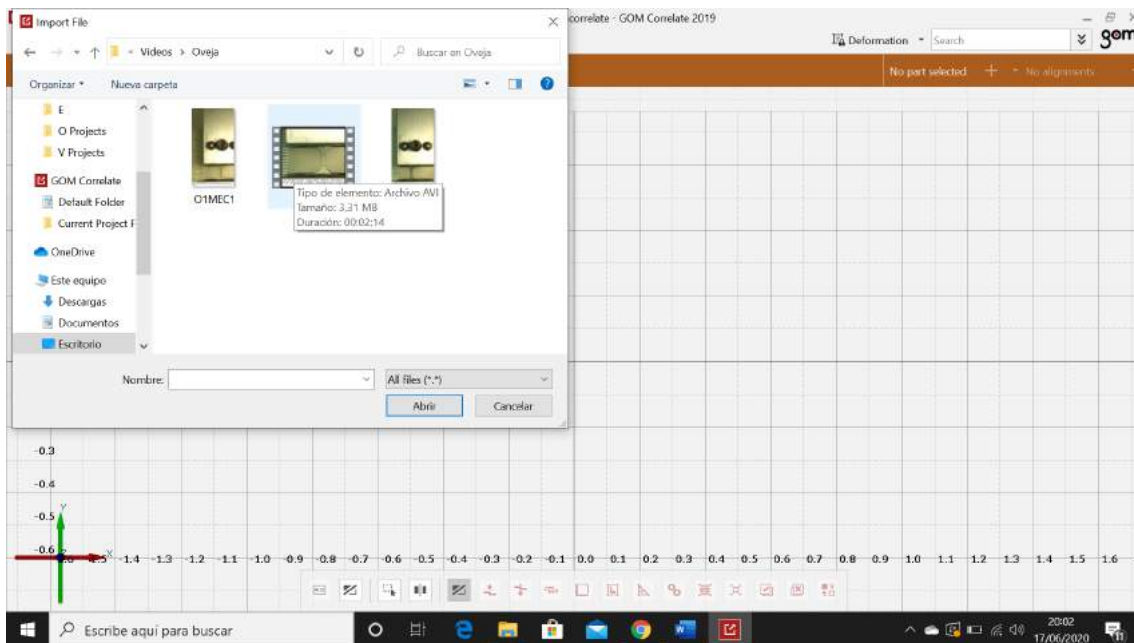


Ilustración 15: Muestra del video seleccionado para abrir en el programa.

Una vez abierto el video del cual se quiere hacer el análisis, se puede observar en la parte inferior del programa una escala que muestra los segundos que dura el video. Con la barra roja que en la Figura 15 está situada en el 0 se puede avanzar y retroceder en el video. Además, se puede realizar cortes en los videos si solo se quiere analizar una determinada secuencia. En la parte inferior izquierda de la pantalla, el programa muestra el sistema de coordenadas utilizado por defecto. Se puede establecer un propio sistema de coordenadas, pero para este análisis no es necesario y se utilizará el que ya está establecido por el software.

### Determinación de la escala:

En primer lugar, para obtener resultados precisos, es muy importante fijar la escala sobre la cual se va a trabajar. En la parte superior izquierda se encuentran los comandos donde se muestran todas las herramientas que ofrece el programa necesarias para realizar el estudio. El segundo comando empezando por la izquierda será el utilizado para precisar esta escala. Para ello, el programa pedirá marcar dos puntos de la imagen y marcar la distancia real que existe entre ambos. En este caso, la distancia inicial entre las dos mordazas, punto superior y inferior de la probeta, es de 20 mm. Es necesario comprobar que las coordenadas en la dirección X de ambos puntos coinciden para así asegurar que la línea trazada entre ambos es completamente vertical.

Point 1	X	326.54 pixel
Point 2	X	326.54 pixel

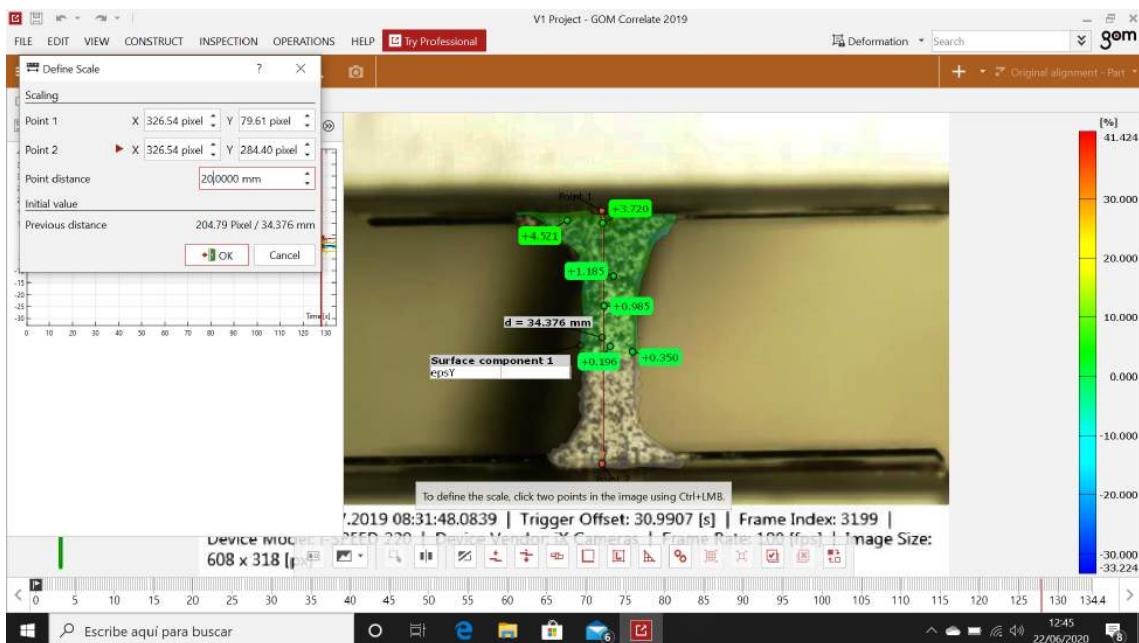


Ilustración 16: Asignación de la escala.

**Selección de la superficie que se quiere analizar:**

Ya teniendo la escala asignada, se procederá a la selección de la superficie del documento sobre la que se quiere obtener información. El tercer comando de la barra de herramientas previamente utilizada nos permitirá seleccionar la superficie a analizar.

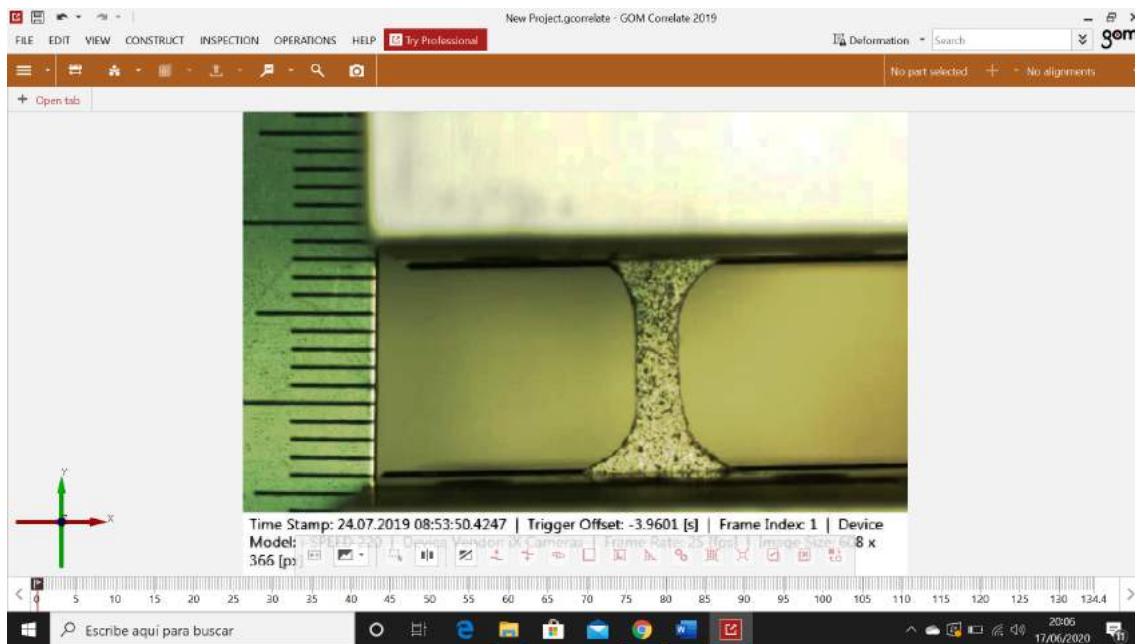


Ilustración 17: Asignación de la escala.

En este caso, la superficie que se quiere abarcar es solamente la probeta. Para ello, se utiliza el tercer comando, y a continuación Surface Component.

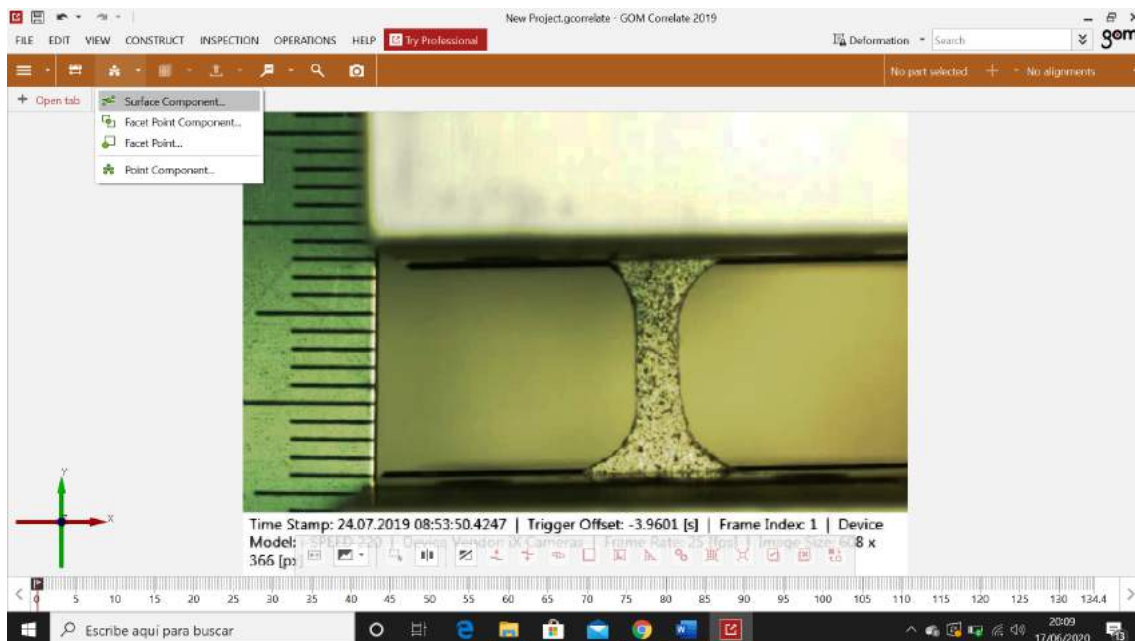




Ilustración 18: Comando a utilizar para seleccionar la superficie

De manera automática, el software creará una superficie, pero en este caso al crearla, selecciona también la parte de la regla métrica que aparece en el video, la cual no debe ser examinada. Para seleccionar la superficie de forma manual, se utilizarán los comandos que se encuentran en la parte inferior. Primero se pulsará este comando  y en segundo lugar el comando que nos permitirá dibujar un polígono . Estos dos comandos permiten dibujar una superficie más precisa. Como se ha explicado anteriormente, el programa reconoce facetas cuadradas según los cambios de color de color de negro a blanco que encuentre en la superficie. Además, el tamaño de estas facetas y la distancia entre los puntos es medida en píxeles y pueden ser ajustados para una mayor recopilación de datos. En la figura mostrada, se ha utilizado una medida de 9 píxeles para las facetas una distancia de 3 píxeles entre los puntos, lo que hace que la superficie creada manualmente se ajuste de forma más precisa a la forma de la probeta. No todos los ensayos se ha utilizado las mismas medidas, sino que se han ajustado observando la forma de la superficie de la probeta.

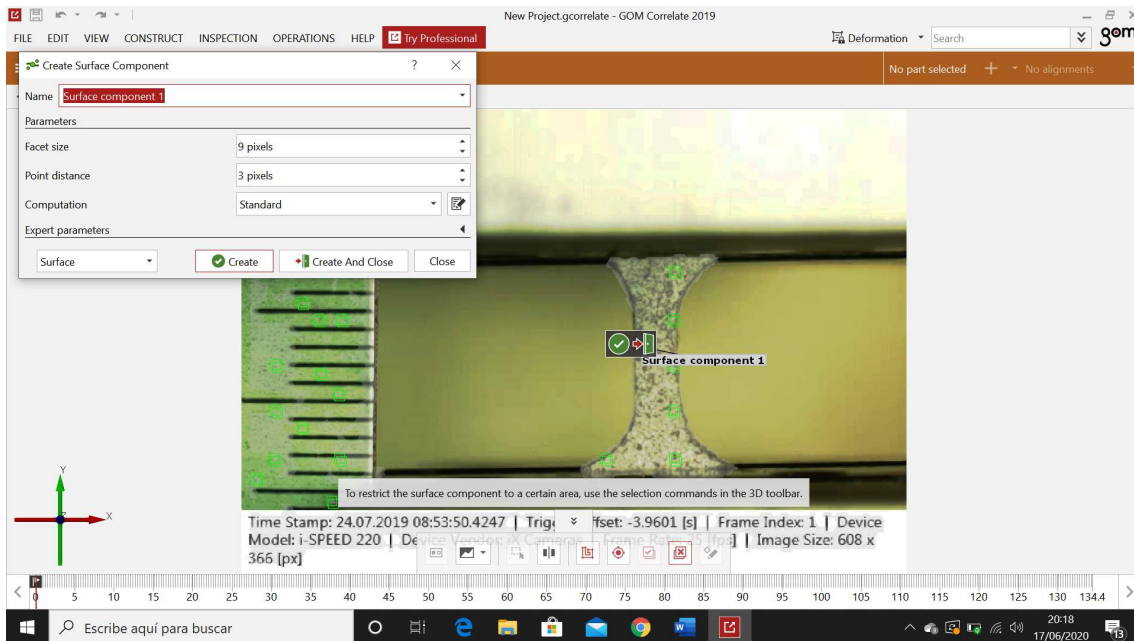


Ilustración 19: Superficie seleccionada automáticamente.

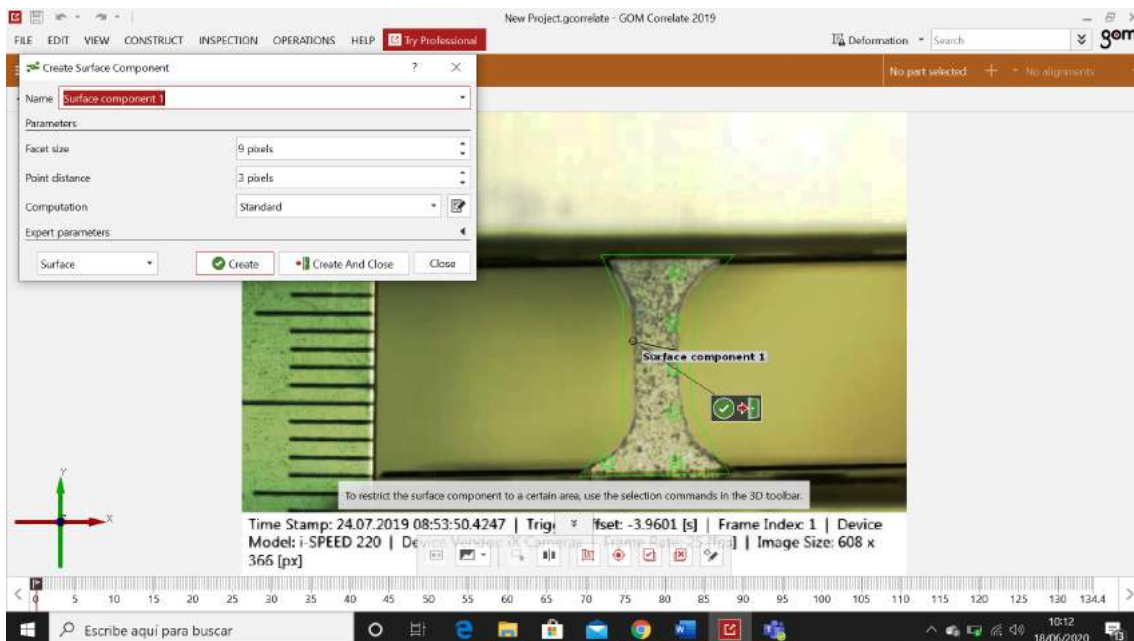


Ilustración 20: Superficie seleccionada manualmente.

Ya dibujado el polígono y sin haber soltado el botón del ratón, lo colocaremos sobre uno de los tres comandos que aparecen. El primer comando permite la selección de esa área, mientras que el segundo se utiliza para deseleccionar ciertas partes del archivo de los que no se quiere obtener datos. Por último, lugar, el tercer comando sirve para cancelar la figura realizada

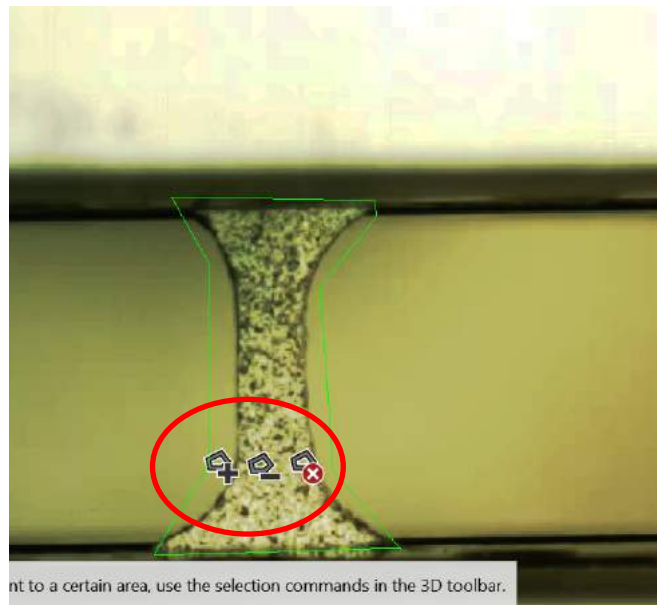


Ilustración 21: Comandos a utilizar una vez que finalizado el trazado del área

Teniendo la superficie que se quiere analizar ya seleccionada, se creará el componente del área para su estudio. Se ajustará la superficie con la ayuda del tamaño de faceta y la distancia entre puntos hasta que sea lo más precisa posible y recoja gran parte de la probeta (puede resultar que partes muy pequeñas no sean leídas por el programa). Además, se deberá verificar la calidad de esta superficie. Para ello existe un comando, dentro de Expert Parameters denominado Surface Quality que muestra con una gráfica de colores la calidad de la superficie dibujada. Se procurará que la gráfica que dibuja el programa se encuentre en verde.

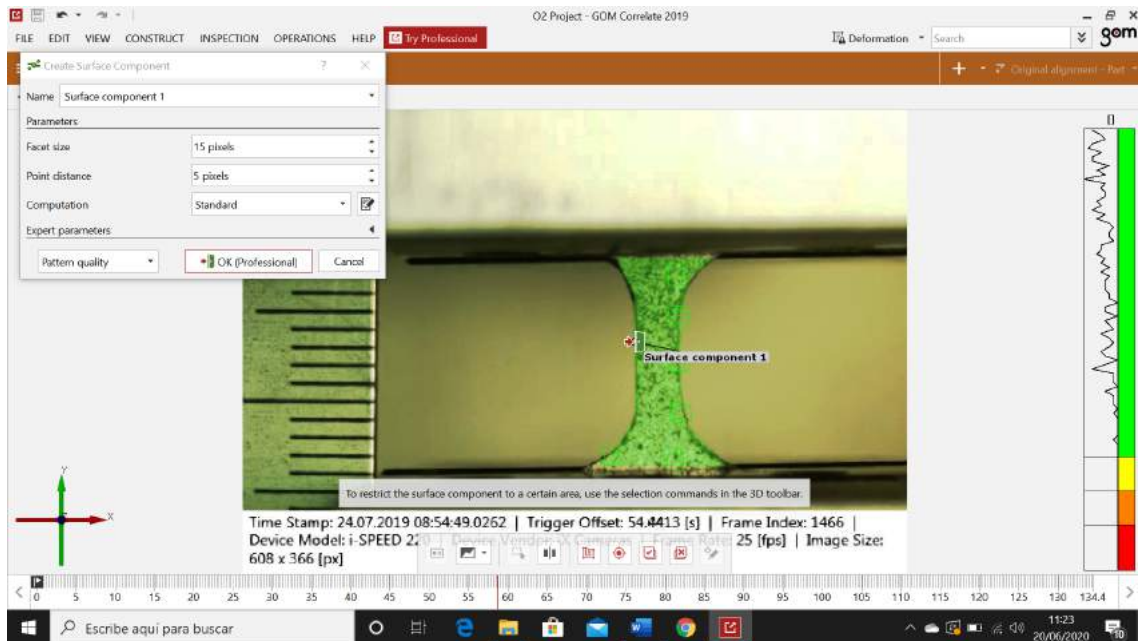


Ilustración 22: Comprobación de la calidad de la superficie seleccionada

**Obtención de la deformación en toda la superficie creada:**

Tras haber obtenido una superficie de buena calidad y que recoja la mayoría de la probeta el programa ofrece estudios de las propiedades mecánicas del material que se ven modificadas en un ensayo a tracción. En este ensayo, la fuerza está siendo aplicada por la máquina en la dirección del eje Y, por lo que el objetivo es estudiar la evolución de la deformación en cada probeta en la dirección Y ( $\epsilon_y$ ).

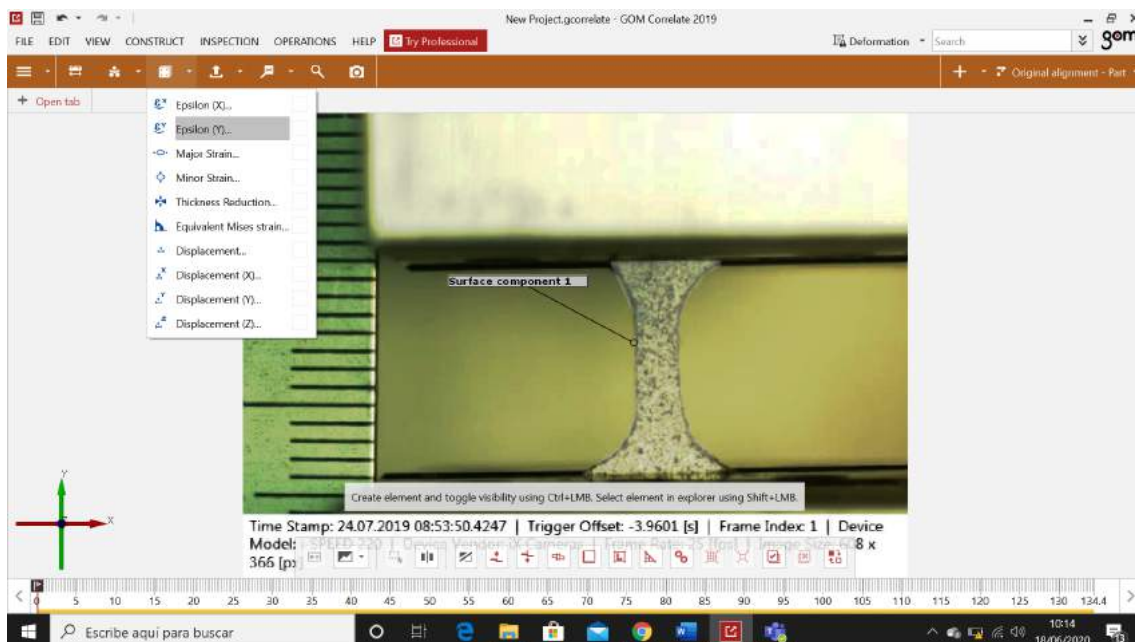


Ilustración 23: Comando que se debe utilizar para el estudio de la elongación en el eje y

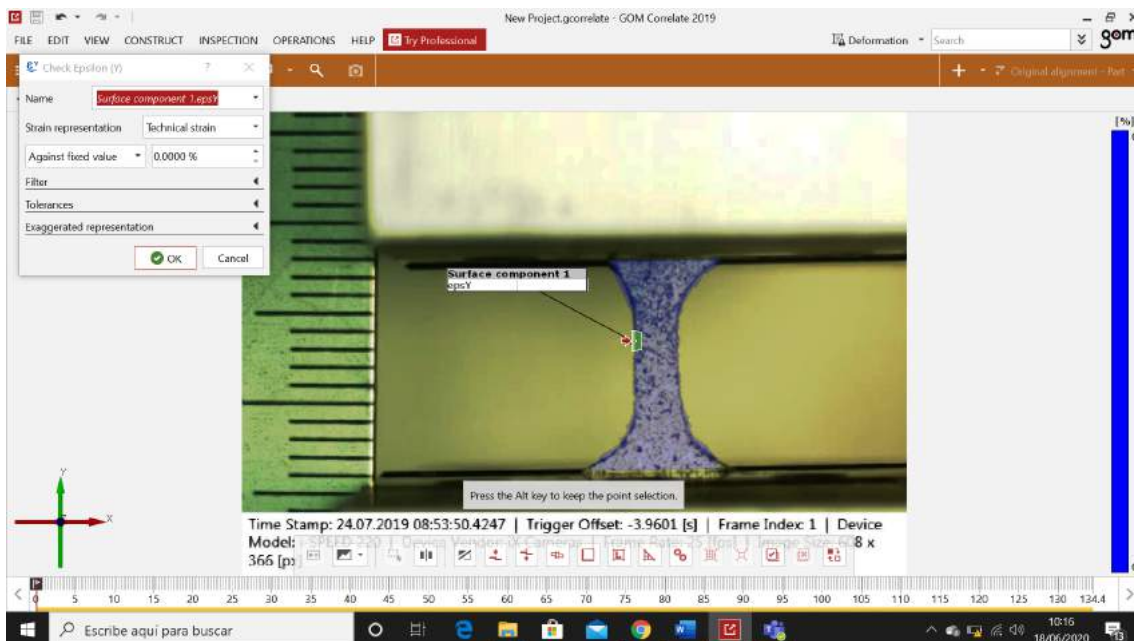


Ilustración 24: Comando a utilizar para el estudio de la elongación en el eje y.

Seleccionando este comando, se abrirá una pestaña la cual permite elegir qué tipo de representación de la deformación se quiere obtener (True strain or Technical strain). A medida que la fuerza es aplicada, la longitud de la probeta ensayada aumenta y su área seccional disminuye. Cuando se tiene en cuenta en todo momento estos valores, se está hablando de True Strain. Cuando se utiliza valores constantes de longitud y área seccional, los valores de deformación son Technical Strain.

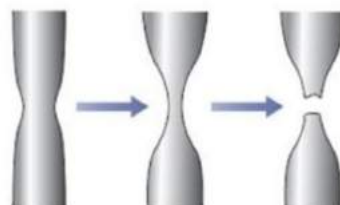


Ilustración 25: Evolución de la longitud y área seccional de la probeta ensayada

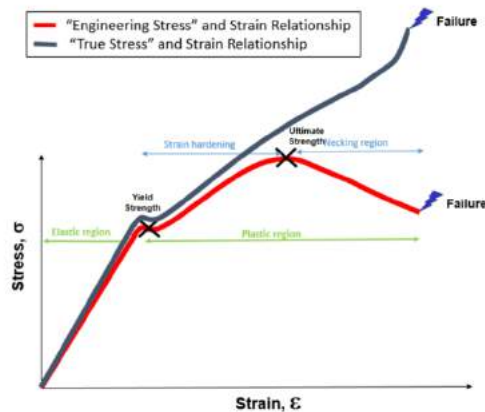


Ilustración 26: Curvas True Strain vs Technical Strain

El programa representa la deformación sufrida en la probeta con una escala de colores. En la parte derecha se obtiene la barra de colores graduada con los valores correspondientes a cada color. Se puede observar como en el segundo 0 del ensayo, en el cual todavía no se ha empezado a aplicar la fuerza, la deformación medida es de cero en toda la probeta y consecuentemente toda la probeta se encuentra en color azul oscuro (Figura N). No es necesario comenzar a estudiar la deformación en el segundo 0, sino que el programa proporcionara los valores de formación indierentemente al segundo en el que se encuentre. A medida que se avanza en el video con la barra del tiempo situada en la parte inferior, se observa el cambio de colores en toda la superficie y a la vez el cambio de la graduación que le corresponde a cada color de la escala de colores.

Para realizar el análisis, el video es avanzado hasta la centésima de segundo antes de que rompa, en el caso del ejemplo corresponde con el segundo 58,54s. Si se coloca el ratón sobre la barra color roja que se encuentra en la escala de segundo, se mostrará en una pequeña etiqueta el segundo en el que encuentra, tal y como se puede observar en la figura N.

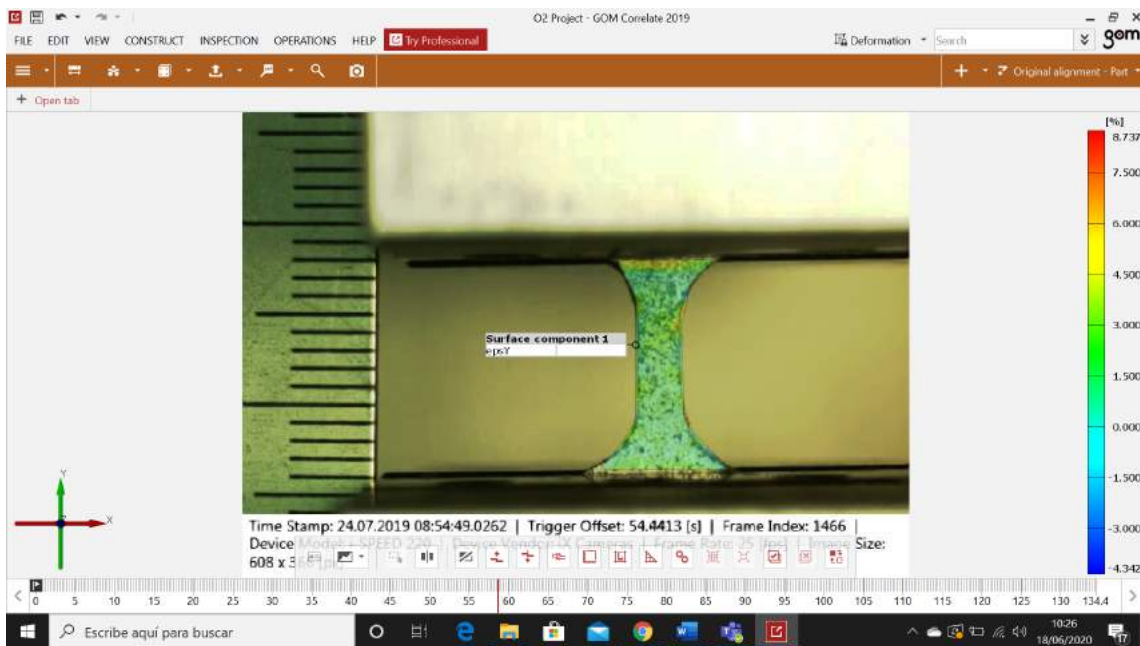


Ilustración 27: Estado de la probeta en la centésima de segundo antes de que rompa

En estas dos imágenes se puede comparar como se ve la superficie coloreada y los valores de deformación correspondientes antes y después de la rotura. Cabe destacar como estos valores se alteran en el momento que la probeta rompe.

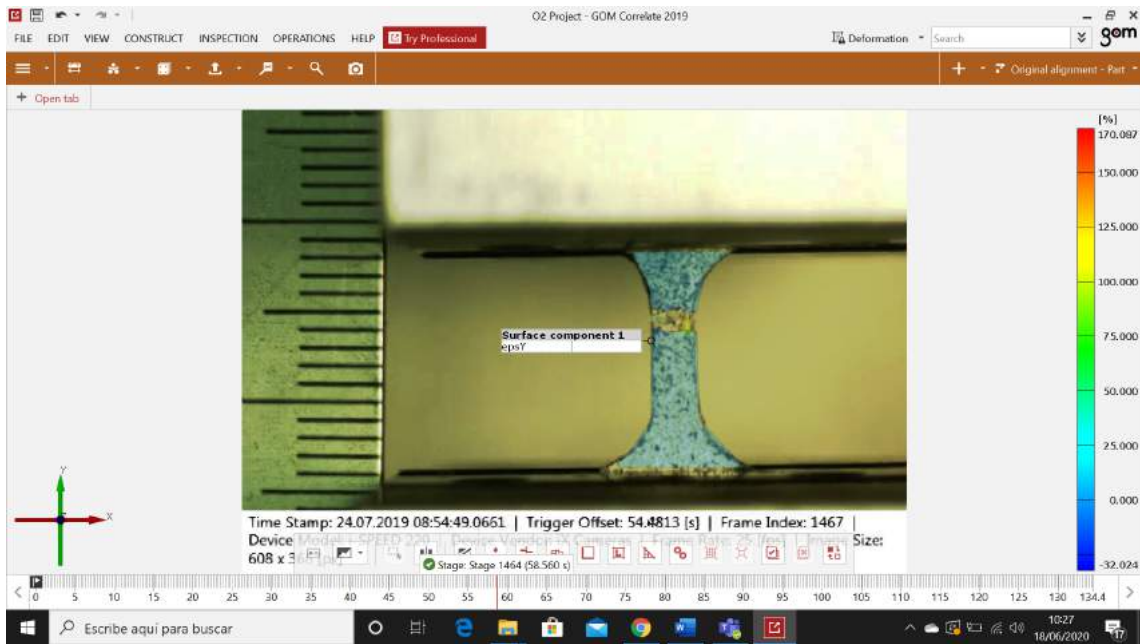



Ilustración 28: Estado de la probeta justo cuando rompe.

**Visualización de la imagen:**

El software proporciona la opción de seleccionar varios puntos de la probeta. Para ello, se buscará un fondo cuadrículado para colocar los puntos de forma coherente. Esta cuadrícula de obtendrá moviendo el sistema de coordenadas que aparece en la parte inferior izquierda del programa. Para volver a la imagen del archivo subida previamente, se utilizará el comando  y el comando Mapping On. Estos comandos permiten cambiar la imagen y solo visualizar la superficie que se está examinando.

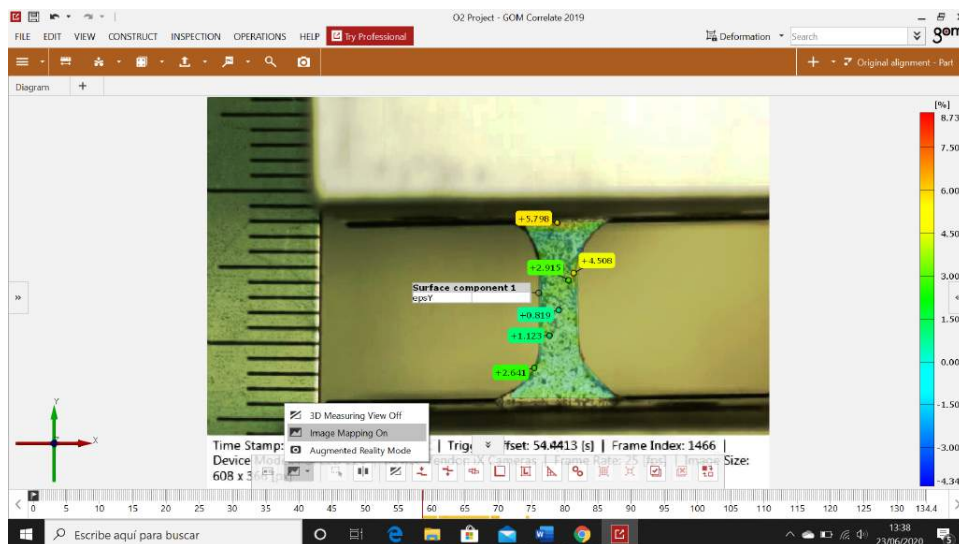


Ilustración 29: Comandos para cambiar la visualización del archivo

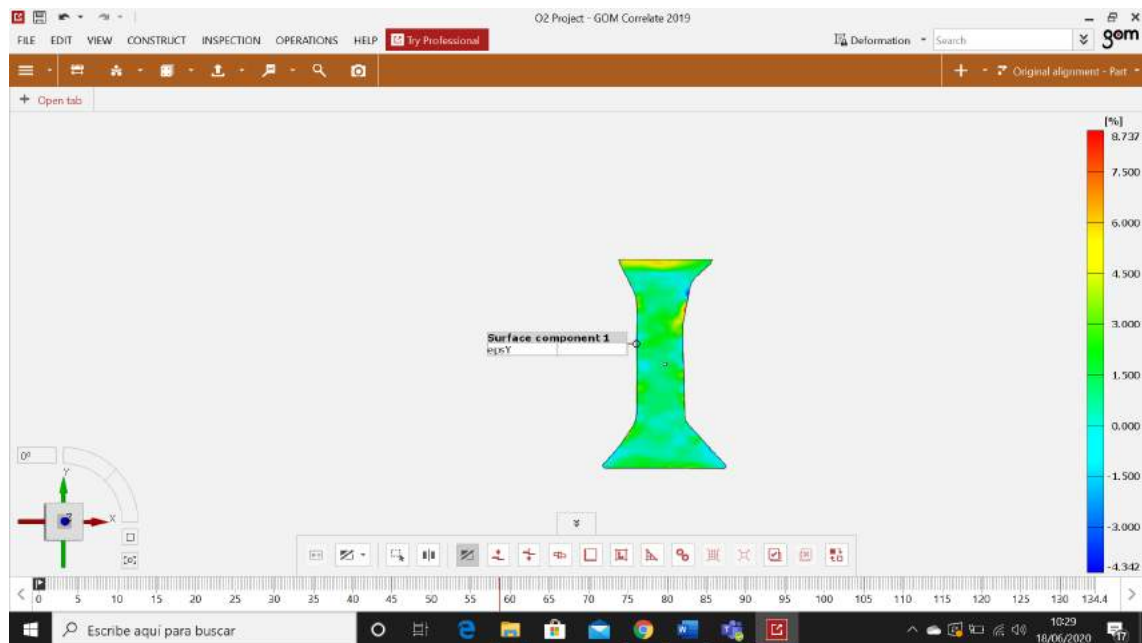


Ilustración 30: Visión únicamente de la superficie a estudiar.

### Fijación de los puntos y extracción de sus datos:

En este caso, el objetivo es dibujar las gráficas de tensión-deformación de varios puntos de cada probeta para estudiar su comportamiento y verificar que el ensayo ha sido realizado correctamente. Los puntos, para este estudio, serán colocados por zonas para verificar si existe algún patrón de comportamiento entre ellos.

Como se ha mencionado previamente, el programa ofrece la posibilidad de seleccionar puntos aleatorios en la superficie y seguir su comportamiento a lo largo del ensayo. Para ello, se volverá a utilizar la barra de herramientas situada en la parte superior izquierda de la pantalla, y dentro de esa herramienta se elegirá el comando Deviation Labels. El software mostrará con una etiqueta el valor de la deformación del punto seleccionado.

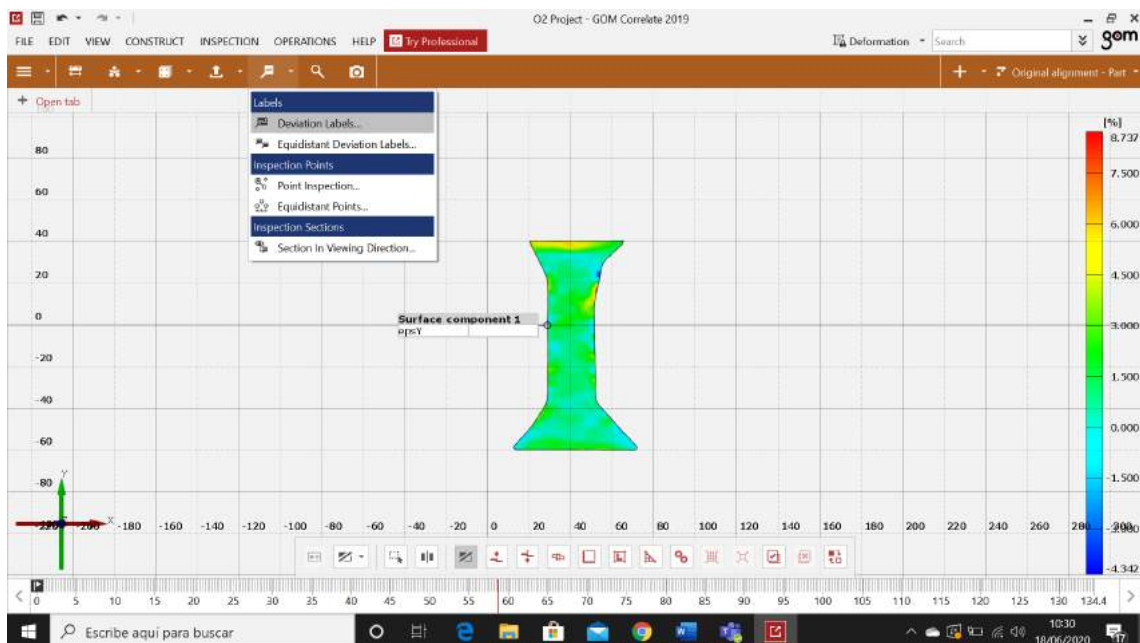


Ilustración 31: Comando que se debe utilizar para fijar los puntos

La colocación de las etiquetas es muy sencilla. Manteniendo presionada la tecla Control, se arrastrará el ratón por encima de la superficie y el programa ira indicando el valor que tiene la deformación de cada punto que se ha sobrepasado. Para colocar la etiqueta, simplemente

se hará click izquierdo con el ratón. Una vez colocada la etiqueta, se podrá elegir cualquier momento del ensayo y la etiqueta mostrará el valor de la deformación que tiene ese punto. Estas etiquetas quedarán fijas y mostrarán el valor correspondiente de la deformación del punto seleccionado según el segundo del ensayo en el que se encuentre.

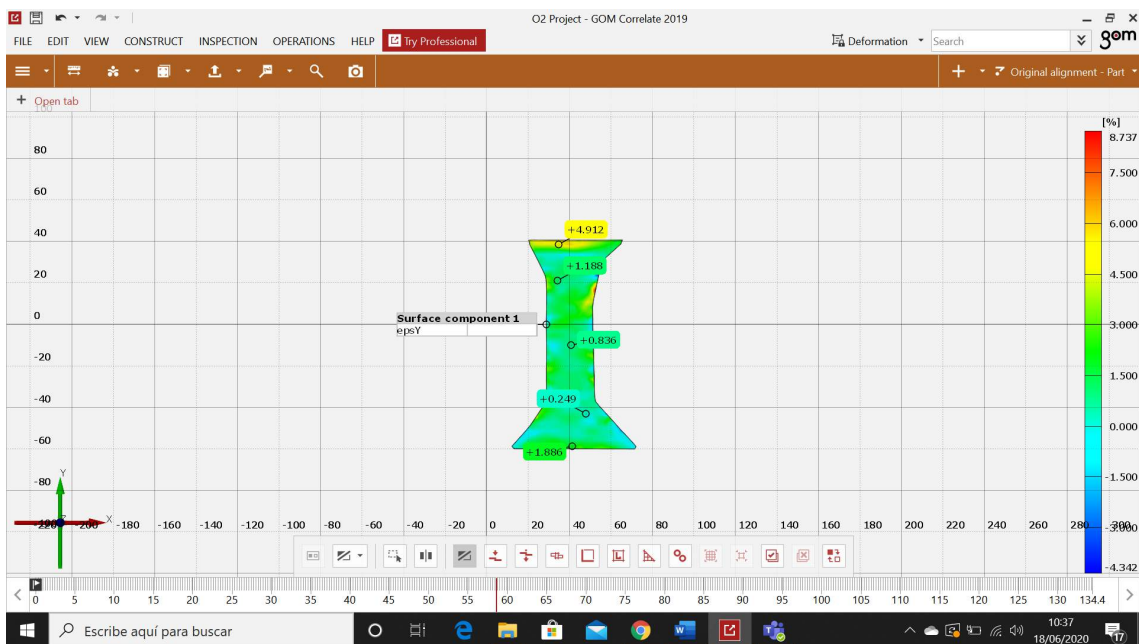
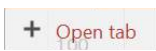


Ilustración 32: Seis puntos seleccionados en la superficie con sus correspondientes valores de deformación.

GOM Correlate ofrece la representación de los valores que toma la deformación de cada punto a lo largo de todo el ensayo. Para obtener esta gráfica, se utilizará este comando

 situado en la parte izquierda superior, debajo de la barra de herramientas. Este comando nos ofrece diferentes opciones, y la que proporciona la gráfica es Diagram.

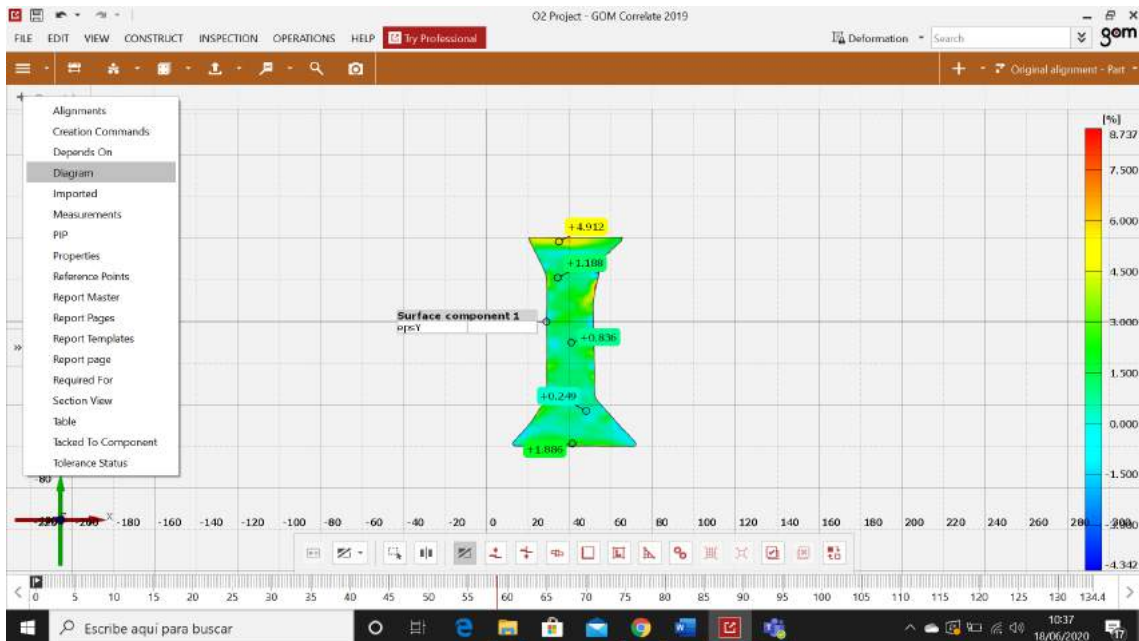


Ilustración 33: Comando que se debe utilizar para obtener la gráfica deformación-tiempo

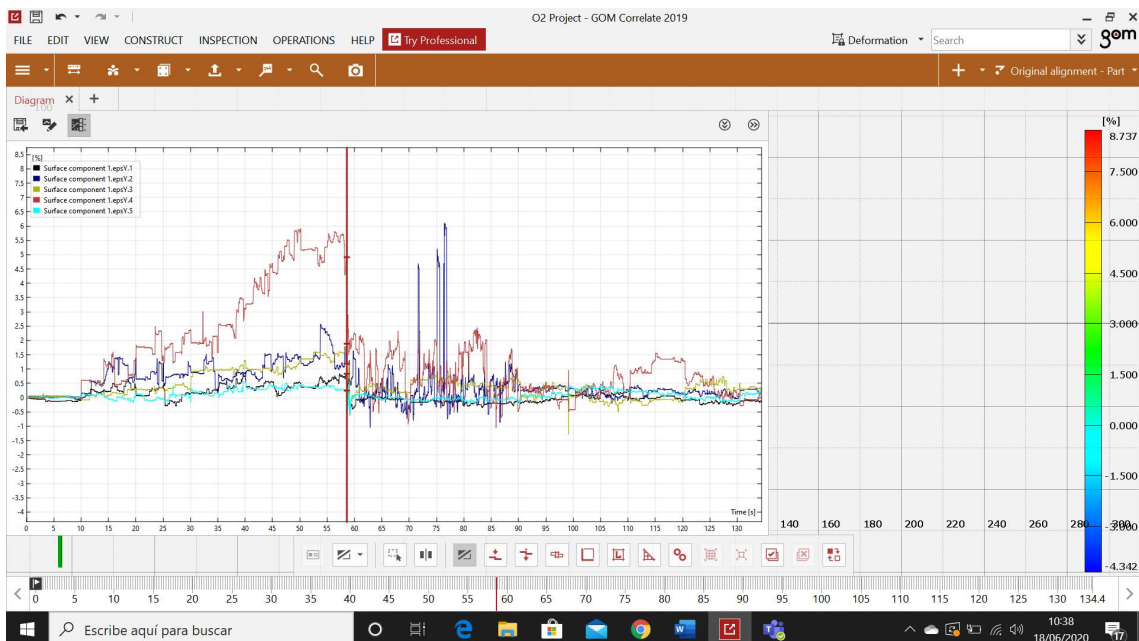



Ilustración 34: Gráfica deformación-tiempo

La gráfica obtenida representa los valores de deformación (%) que toma cada punto en el que se ha colocado una etiqueta durante todo el tiempo que dura el ensayo. En la gráfica se puede observar un cursor (de color rojo) que permite moverse por cada una de las gráficas y nos proporciona el segundo y el valor de la deformación del punto de la gráfica elegida.

Con diferentes colores, el programa crea una leyenda y nombra cada punto según su orden de colocación, siendo el número 1 el primero fijado. La leyenda se mostrará pulsando el tercer comando situado en la parte superior de la gráfica (  ). Si se hace click sobre un nombre de la leyenda, el programa resaltará la gráfica correspondiente para poder distinguirla de las demás representaciones, tal y como se puede observar en la imagen a continuación.

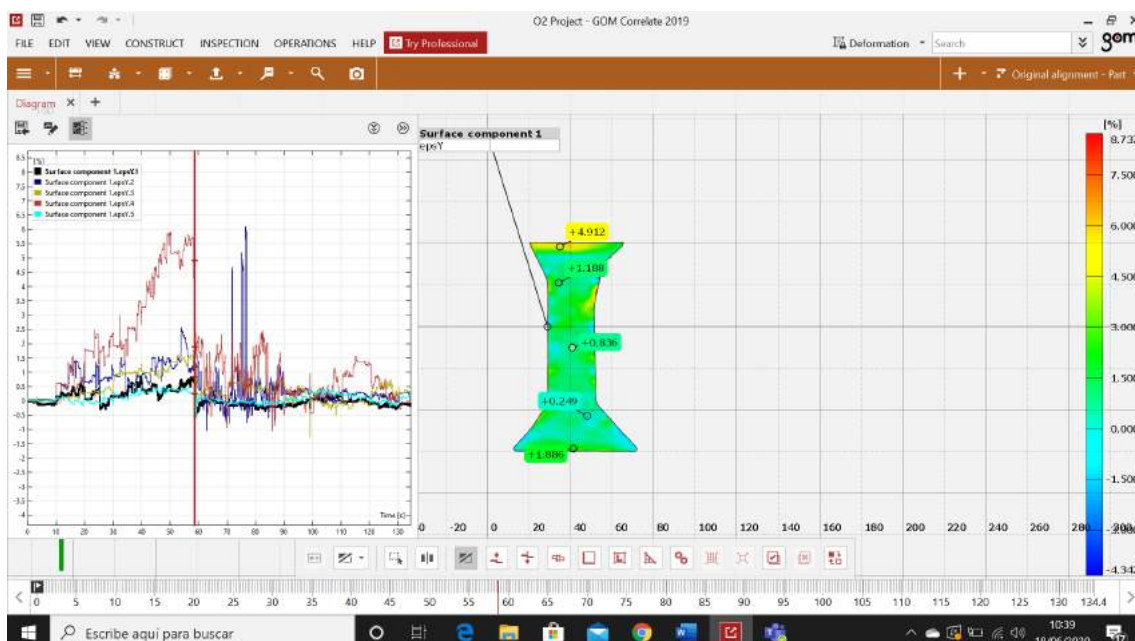

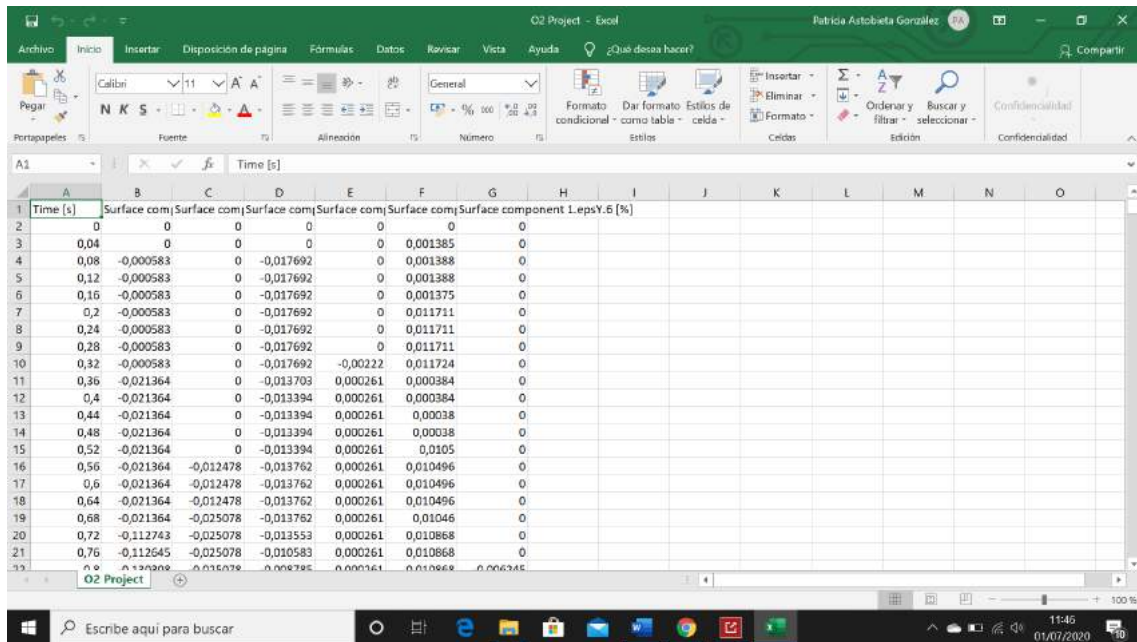


Ilustración 35: Resalte de la gráfica mediante la pulsación de la leyenda.

Para la realización de la gráfica tensión-deformación, se necesita obtener el valor de deformación correspondiente a cada punto a medida que se aplica la fuerza. Utilizando el

comando , el programa proporciona en un documento Excel con los tiempos divididos en intervalos de 0,02 segundos y los valores respectivos de deformación de cada punto tal y como se puede observar en la Ilustración 36.



Time [s]	Surface com	Surface com	Surface com	Surface com	Surface com	Surface component 1	LepsV.6 [%]
0	0	0	0	0	0	0	0
0,04	0	0	0	0	0,001385	0	0
0,08	-0,000583	0	-0,017692	0	0,001388	0	0
0,12	-0,000583	0	-0,017692	0	0,001388	0	0
0,16	-0,000583	0	-0,017692	0	0,001375	0	0
0,2	-0,000583	0	-0,017692	0	0,011711	0	0
0,24	-0,000583	0	-0,017692	0	0,011711	0	0
0,28	-0,000583	0	-0,017692	0	0,011711	0	0
0,32	-0,000583	0	-0,017692	-0,00222	0,011724	0	0
0,36	-0,021364	0	-0,013703	0,000261	0,000384	0	0
0,4	-0,021364	0	-0,013394	0,000261	0,000384	0	0
0,44	-0,021364	0	-0,013394	0,000261	0,00038	0	0
0,48	-0,021364	0	-0,013394	0,000261	0,00038	0	0
0,52	-0,021364	0	-0,013394	0,000261	0,0105	0	0
0,56	-0,021364	-0,012478	-0,013762	0,000261	0,010496	0	0
0,6	-0,021364	-0,012478	-0,013762	0,000261	0,010496	0	0
0,64	-0,021364	-0,012478	-0,013762	0,000261	0,010496	0	0
0,68	-0,021364	-0,025078	-0,013762	0,000261	0,01046	0	0
0,72	-0,112743	-0,025078	-0,013553	0,000261	0,010868	0	0
0,76	-0,112645	-0,025078	-0,010583	0,000261	0,010868	0	0
0,8	-0,135078	-0,008785	0,000161	0,010868	0,006345	0	0

Ilustración 36: Fichero Excel obtenido.

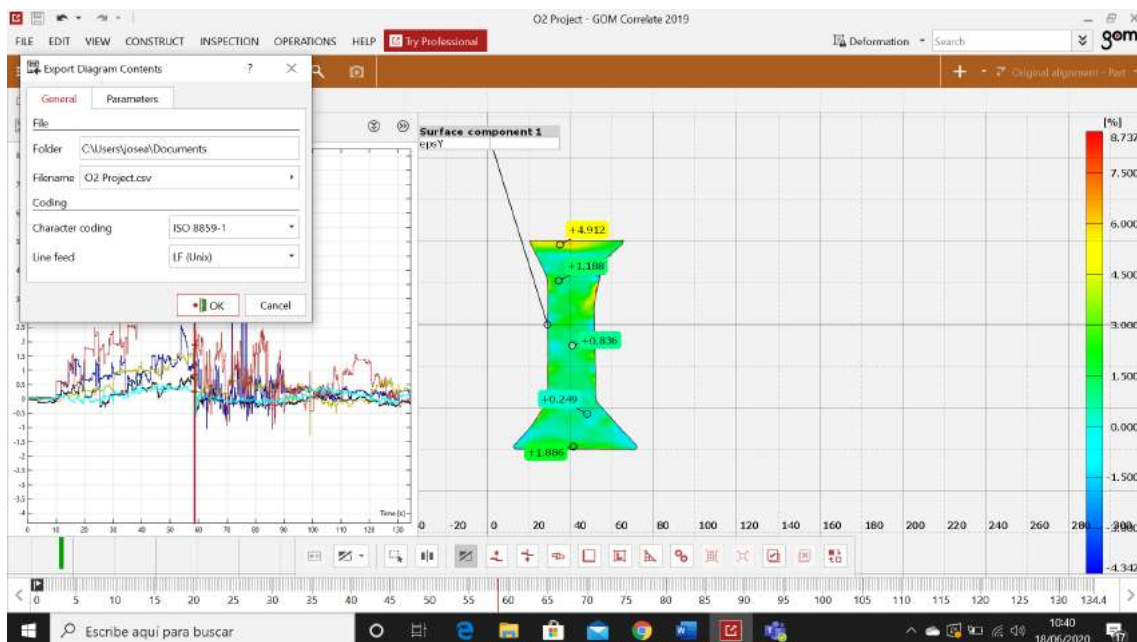


Ilustración 37: Exportación de los datos de la gráfica

Por defecto, el programa utiliza como parámetro decimal el punto, siendo el parámetro empleado en el documento Excel. Debido a que Excel trabaja con la coma como separador de decimales, se realizará el cambio previo a la exportación del documento en la sección parameters. Para la separación de las columnas correspondientes a cada punto se elegirá un .

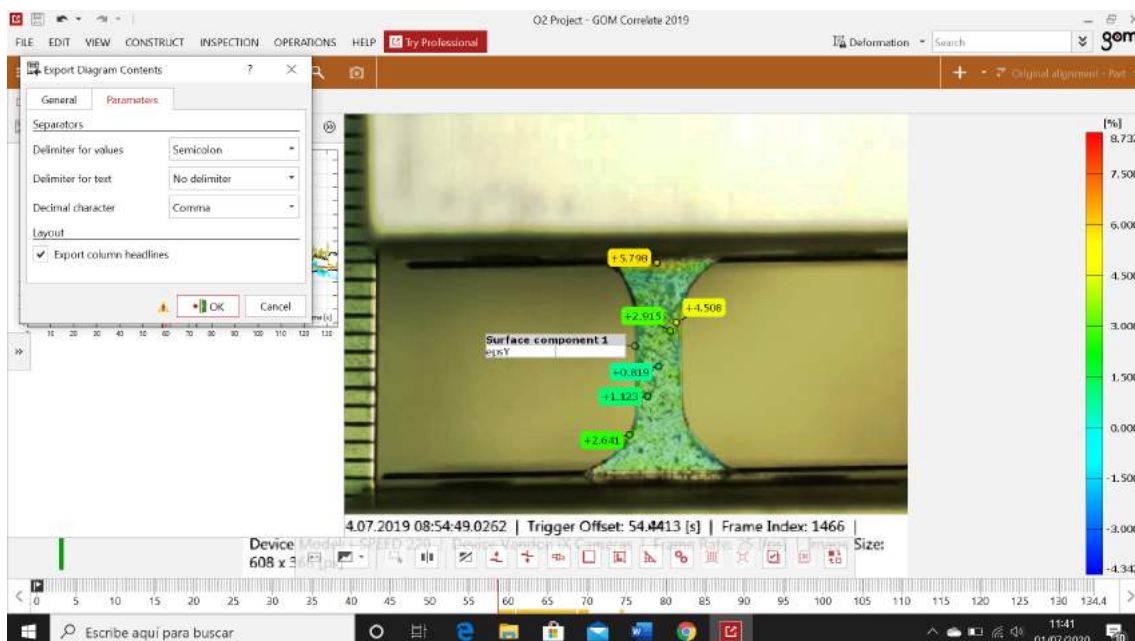


Ilustración 38: Cambio del separador de decimales.

En la extensión de la derecha, se irán almacenando cada uno de los elementos, documentos y operaciones realizadas. Se puede observar en la imagen inferior que el software almacena el componente de la superficie dibujado, la deformación de dicha superficie y en la parte de páginas de informe todas las capturas de la pantalla que hemos realizado (cuya explicación viene más adelante). Con un click derecho sobre estos elementos se podrá realizar modificaciones como por ejemplo eliminar, editar o hacer o no visible, aunque alguna de estas funciones solo están disponibles con el programa de pago.

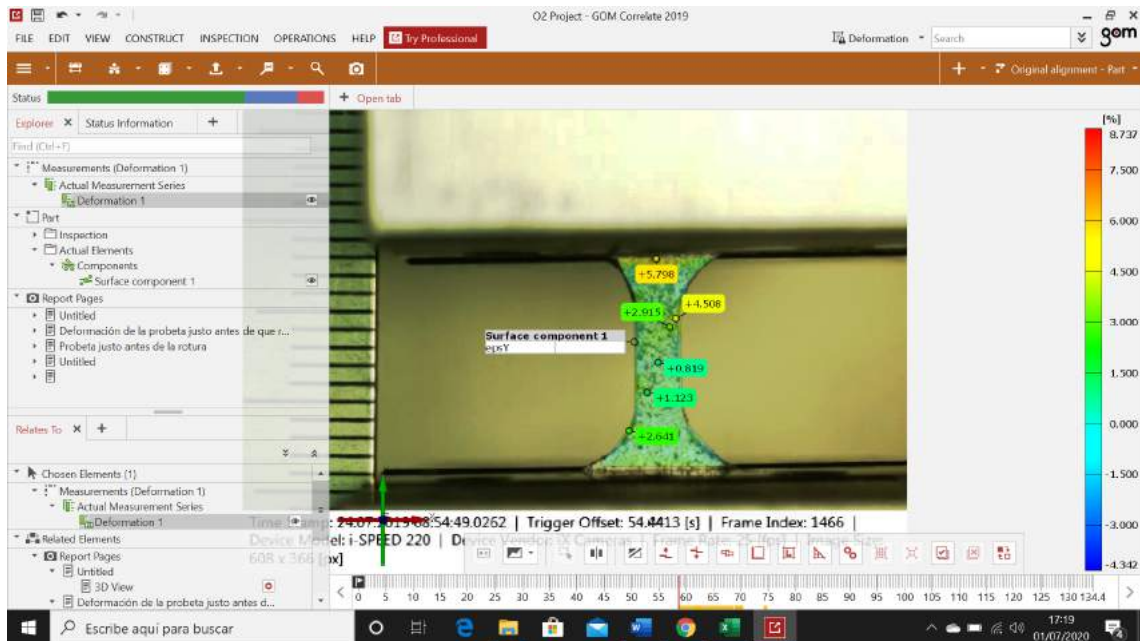


Ilustración 39: Resumen de elementos realizados en el programa.

## Realización de una sección en la probeta y el estudio de su comportamiento

Para un mejor estudio sobre el comportamiento de la probeta, se deberá estudiar la deformación de la probeta a lo largo de toda una sección que tendrá la misma longitud que la probeta ( $l=20$  mm). La realización de este paso requiere que la escala haya sido fijada, tal y como se ha enseñado en los primeros pasos.

La herramienta necesaria para la realización de la sección se encuentra en el mismo comando utilizado para la colocación de las etiquetas, el sexto empezando por la izquierda de la barra de herramientas superior. Para el dibujo de esta sección se utilizará el comando Section in Viewing Direction.

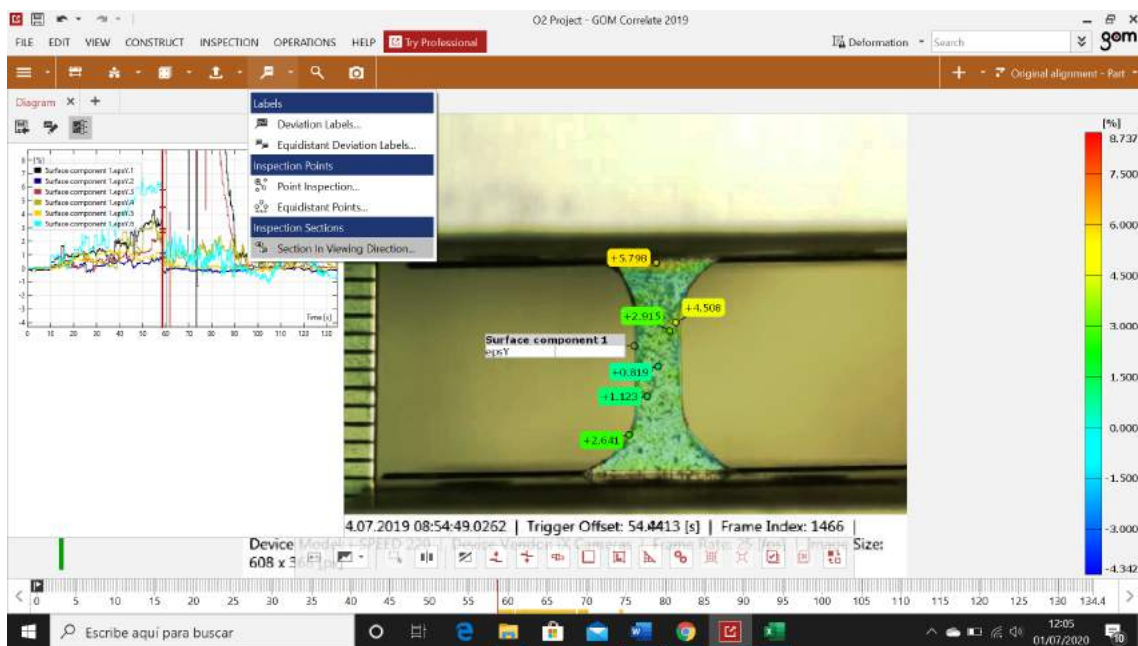



Ilustración 40: Comando a seleccionar para dibujar la sección.

El programa requiere que se marquen dos puntos para crear la sección. Para marcar los puntos se deberá seguir las siguientes instrucciones,  En este caso, se colocará el primer punto en el extremo superior de la probeta y el segundo en el extremo

inferior, trazando entre ellos una línea recta. El programa creará una sección de forma automática siguiendo la línea trazada por los dos puntos. Una vez creada la sección, se volverá a pulsar el comando que nos da la deformación ( $\epsilon_y$ ).

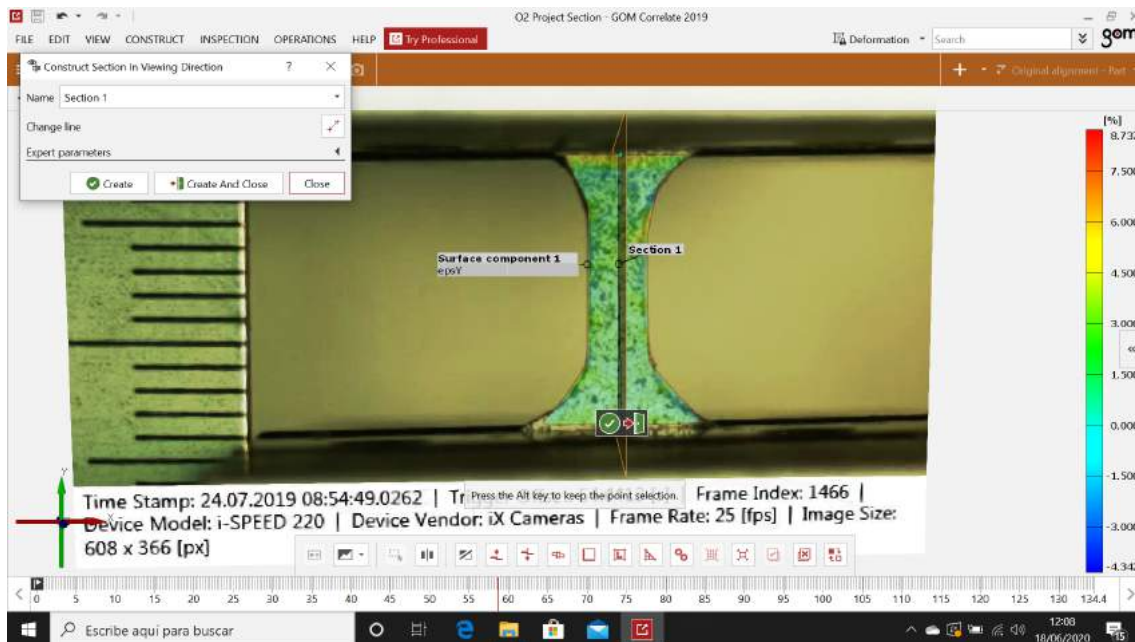
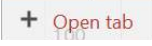


Ilustración 41: Vista de la sección obtenida.

El objetivo principal de la realización de la sección es el estudio de cada uno de los puntos que componen la sección, desde el milímetro 0 al 20, para ver si existe algún patrón de comportamiento por zonas en las probetas. GOM Correlate ofrece una representación gráfica de los valores de deformación de cada uno de los puntos que forman la sección vs su posición con respecto al punto de referencia. En este caso, el punto de referencia será el primer punto marcado para la creación de la sección, siendo la longitud final lo que mide la probeta. El proceso para obtener esta gráfica es similar al de la gráfica deformación-tiempo. Se pulsará la opción Diagram que se encuentra en botón  y el programa mostrará la gráfica buscada.

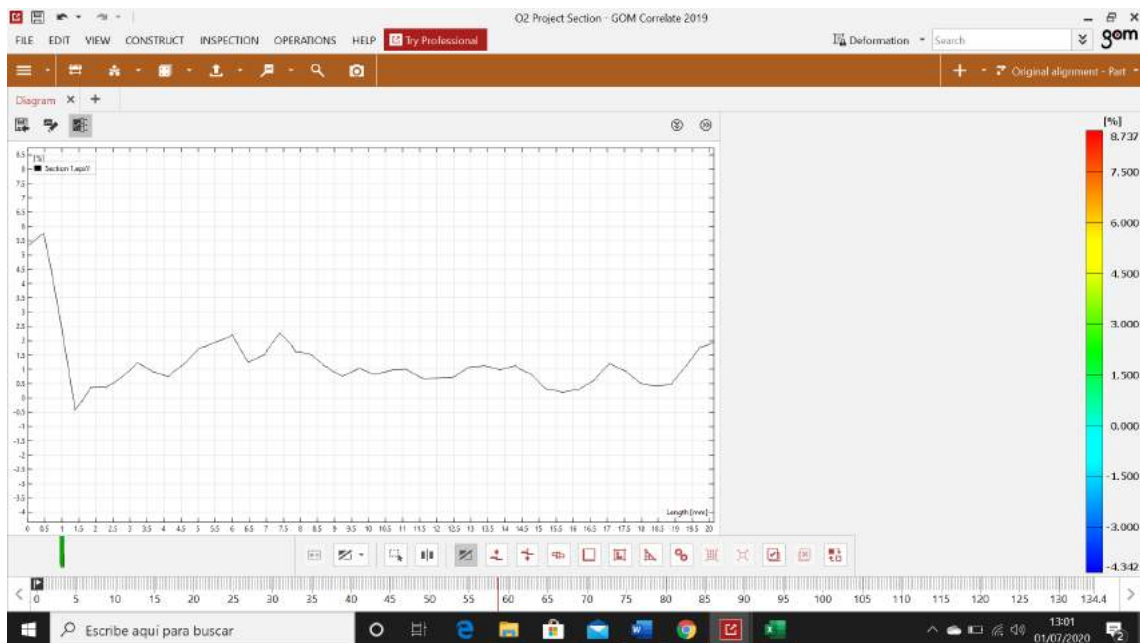


Ilustración 42: Gráfica deformación-longitud a lo largo de la sección.

**Estudio de la velocidad con la que se deforma la probeta:**

GOM Correlate ofrece además la posibilidad de calcular la velocidad con la que se deforma la probeta. Utilizando, al igual que la deformación, una escala de colores, marca en mm/s la velocidad con la se deforma cada una de las partes de la probeta. Utilizando el quinto comando, se obtiene la velocidad en la dirección Y.

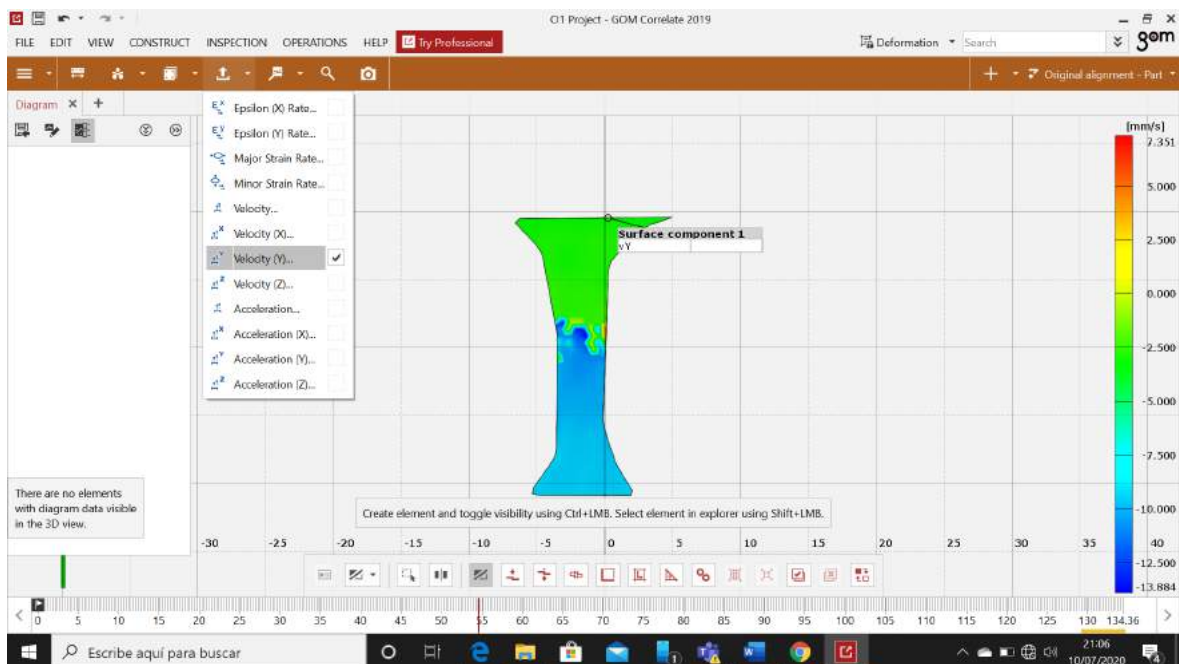


Ilustración 43: Velocidad en dirección Y



### Extracción de documentos sobre el estudio del programa a PDF o video:

GOM Correlate ofrece la posibilidad de extraer toda la información obtenida en su software en diferentes formatos de archivos, tanto video como PDF. Esto es de gran comodidad a la hora de realizar informes o presentaciones en los que puede mostrar, por ejemplo, un video en el que se incluye una secuencia del ensayo para observar los cambios que sufre el objetivo estudiado.

Según el trabajo que se haya realizado el programa se podrá representar hasta dos acciones distintas en una misma página. En el caso de un ensayo a tracción con es este, se ofrece la oportunidad de poder colocar, por ejemplo, la gráfica deformación-longitud a la par que una imagen de la probeta con su escala de colores y los valores de las deformaciones en cada punto, tal y como se puede observar a continuación.

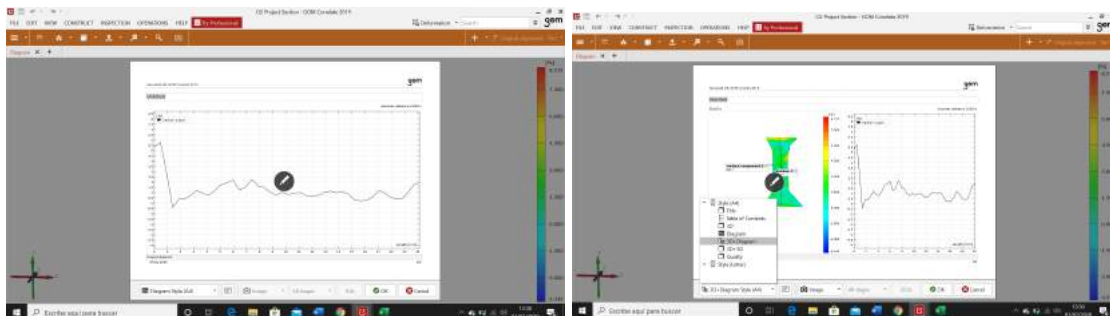


Ilustración 44: Captura de la gráfica sola y captura de la gráfica con la probeta

Los pasos a seguir son muy intuitivos. Volviendo a la barra de herramientas superior, en este caso se utilizará el último comando que representa una cámara. Este comando desarrolla la función de realizar una captura al trabajo que se está realizando en el programa. La ventana que se abre al pulsar la cámara, ofrece lo mencionado anteriormente además de la posibilidad de ser un archivo imagen o video. En la parte superior, se podrá renombrar la imagen/video.

Una vez realizada la captura y seleccionada la información deseada para extraer, cambiaremos el programa de la función Inspection a la función Report.

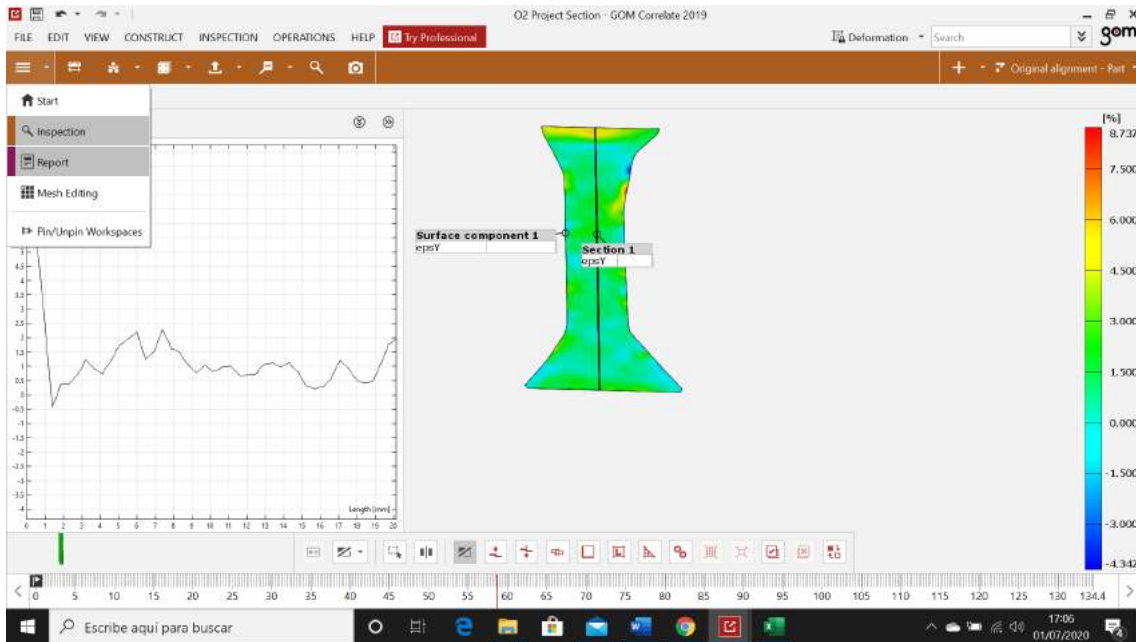



Ilustración 45: Gráfica deformación-longitud a lo largo de la sección.

La sección Report ofrece distintas aplicaciones, entre ellas la de exportar las imágenes seleccionadas como formato PDF pulsando este comando 

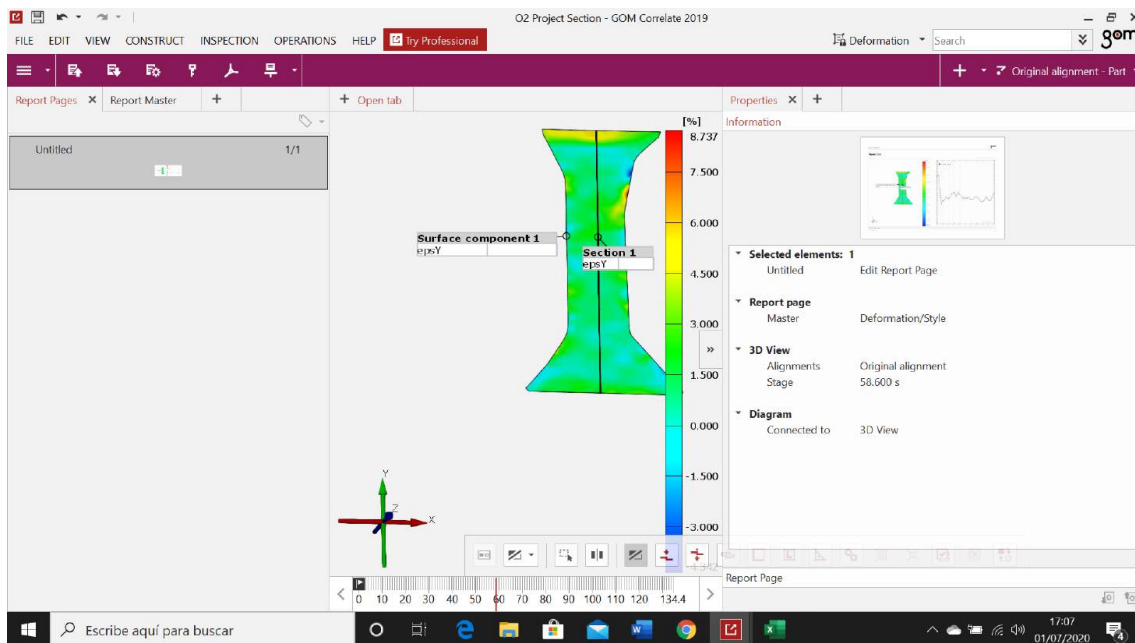


Ilustración 46: Gráfica deformación-longitud a lo largo de la sección.

El programa ofrece la posibilidad de renombrar el documento y de elegir donde guardar el documento una vez realizado. Dependiendo de las capturas que se hayan tomado, se creará por defecto un solo documento PDF con una o varias páginas.

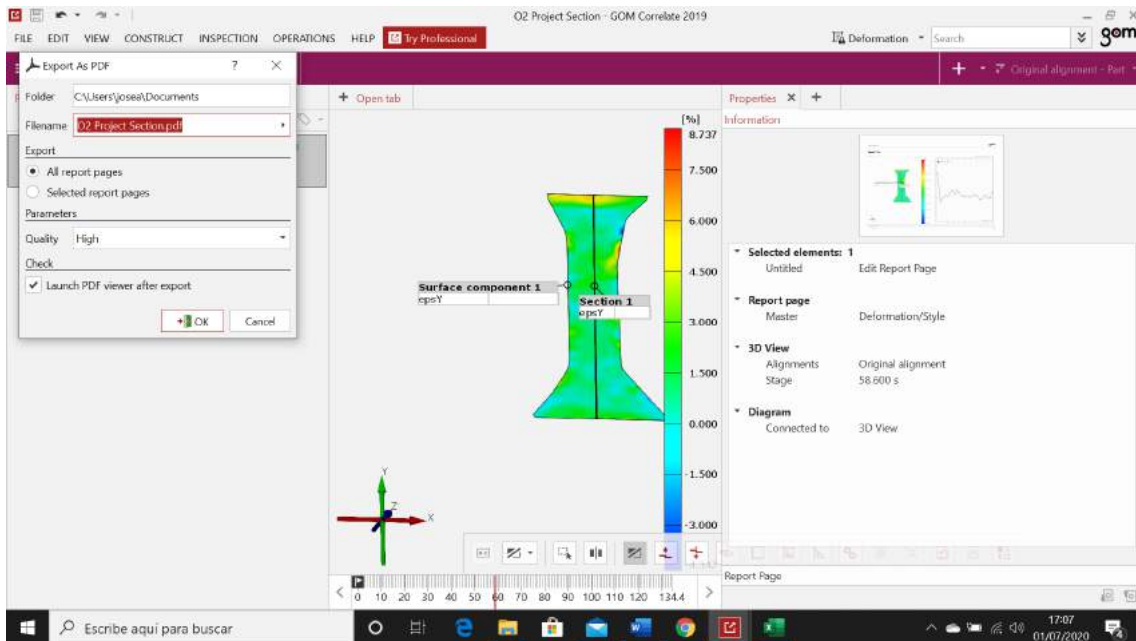


Ilustración 47: Creación del PDF

## **4.2 RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS DE LAS PROBETAS**

Con el principal objetivo de cuantificar la deformación de los distintos tipos de hueso ensayados, es necesario la utilización del programa Aramis. Este software permite, como se ha mostrado en el manual paso a paso, obtener la deformación en cada punto de la probeta durante el ensayo entero además de exportar esos datos en un archivo Excel.

La hipótesis planteada defiende una correlación entre el comportamiento de las propiedades mecánicas óseas de los animales y los humanos. Para poder confirmar esta hipótesis, es necesario obtener las propiedades mecánicas de cada una de las probetas mediante el análisis de las curvas tensión-deformación dibujadas con los datos obtenidos de deformación obtenidos con el programa. Se irá comprobando la validez de los resultados obtenidos mediante la comparación con los datos sacados de la gráficas proporcionadas por la fresadora que realizó el ensayo (*Tabla 2*).

Con objeto de estudio, se colocaron 6 puntos en cada probeta con los siguientes criterios: uno de ellos el correspondiente al punto central, dos de ellos son aquellos que marcan los valores de mayor y menos deformación, y el resto se colocan en la zona central superior e inferior y en los extremos de la probeta.

Estos puntos son colocados con el mismo criterio en las 6 probetas para poder realizar una comparación más precisa. Con los valores que toma la deformación a cada 0,02 segundos extraídos en un archivo Excel, los valores de la fuerza aplicada que proporciona la máquina que realiza el ensayo y el área seccional de la zona central, se obtendrán con la ayuda del programa Excel, las gráficas de tensión-deformación de cada uno de los puntos de las probetas. Esta gráficas permitirán observar si existe algún tipo de patrón de seguimiento entre las zonas que forma la muestra del tejido óseo.

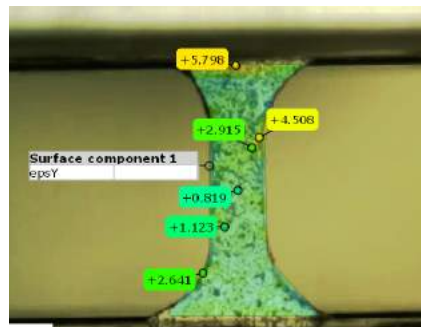


Ilustración 48: Puntos seleccionados para el estudio del comportamiento de la muestra.

#### 4.2.1 PROBETAS Y GRÁFICAS DEFORMACIÓN VS TIEMPO JUSTO ANTES DE ROMPER

A continuación, se mostrarán las imágenes obtenidas del programa de las probetas antes de romper. El programa ofrece con una escala de colores los valores de deformación tomados en la probeta y un diagrama Deformación vs Tiempo de cada uno de los puntos seleccionados.

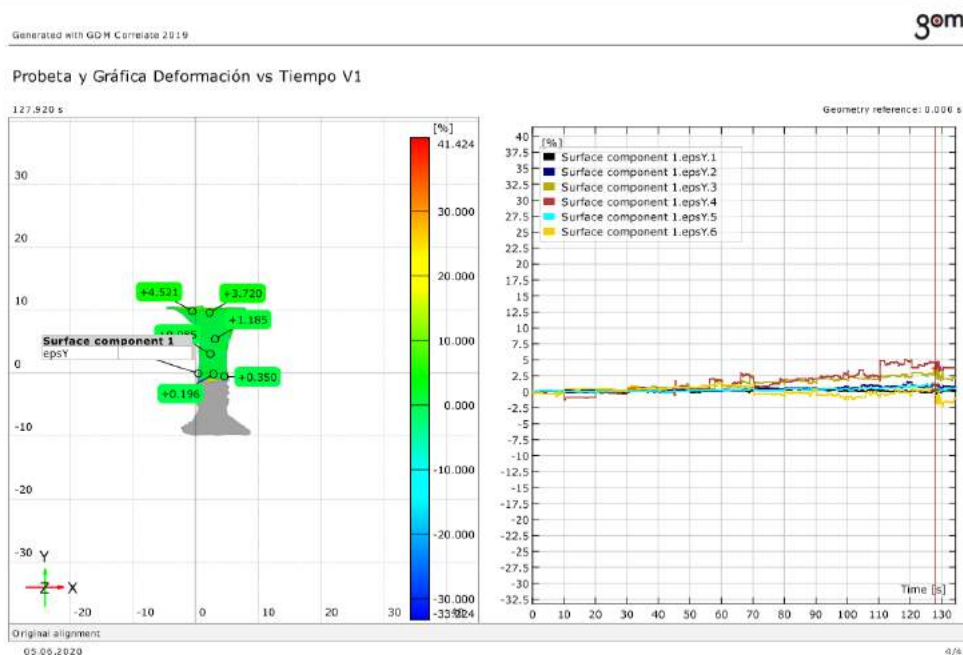


Ilustración 49: Probeta V1 y gráfica Deformación vs Tiempo

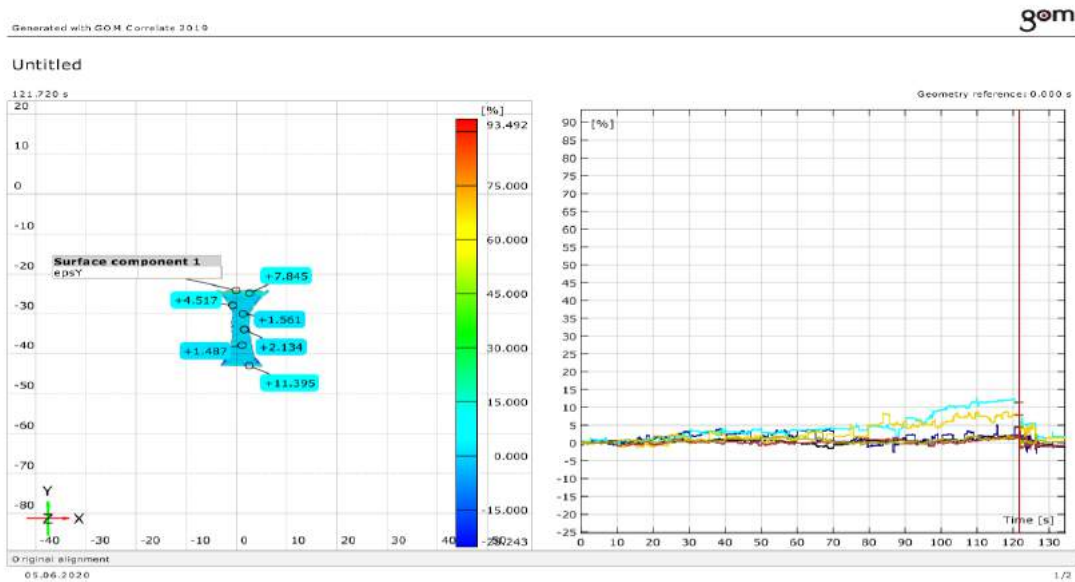


Ilustración 50: Probeta V2 y gráfica Deformación vs Tiempo

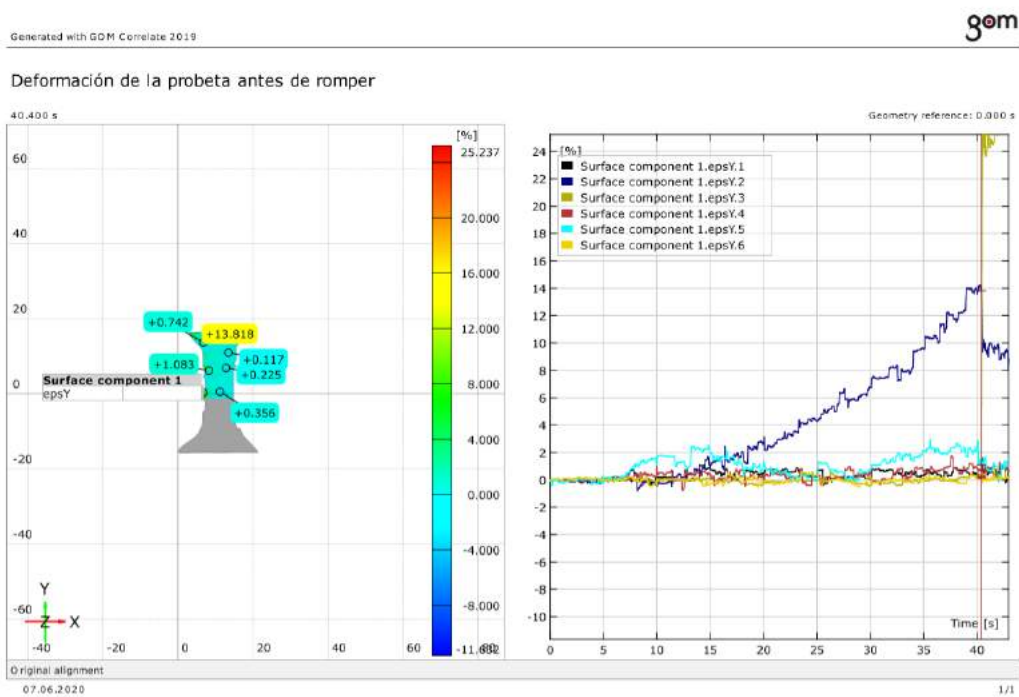


Ilustración 51: Probeta V3 y gráfica Deformación vs Tiempo

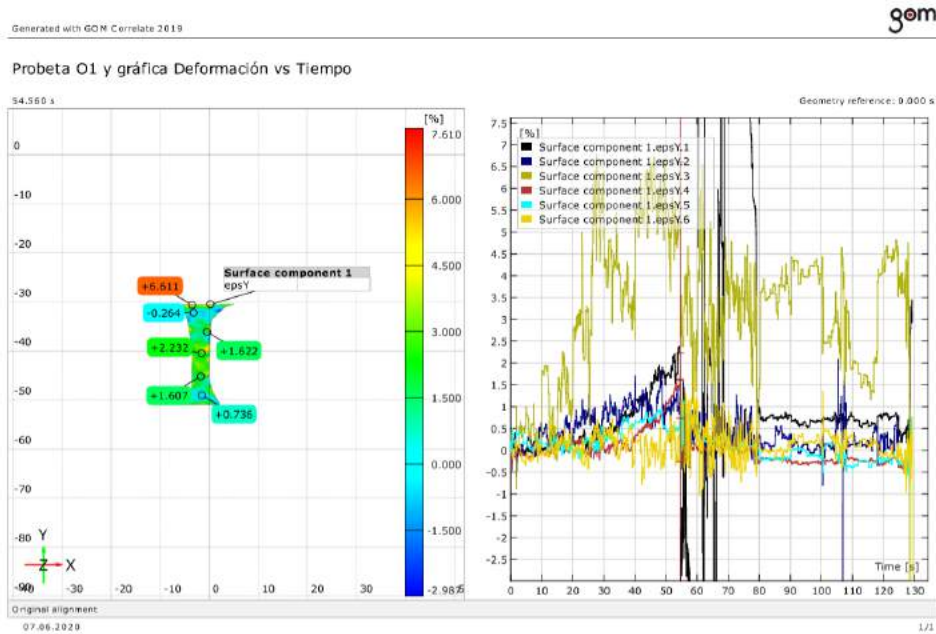


Ilustración 52: Probeta O1 y gráfica Deformación vs Tiempo.

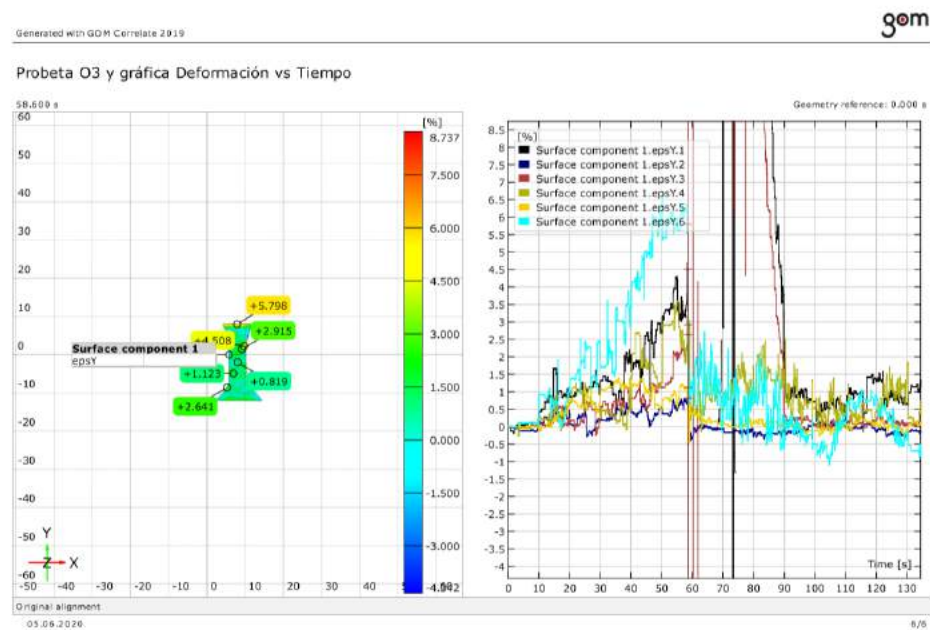


Ilustración 53: Probeta O2 y gráfica Deformación vs Tiempo

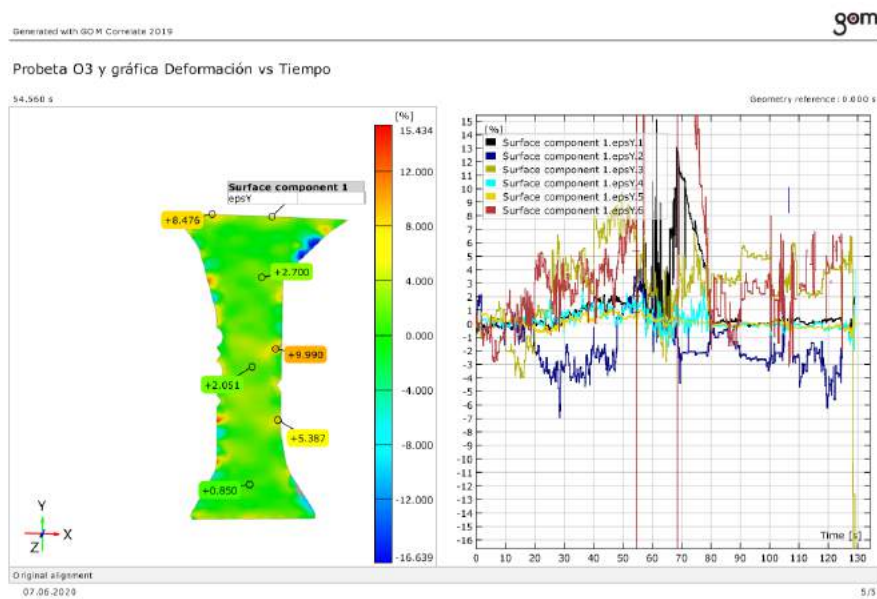


Ilustración 54: Probeta O3 y gráfica Deformación vs Tiempo

## 4.2.2 GRÁFICAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN V1

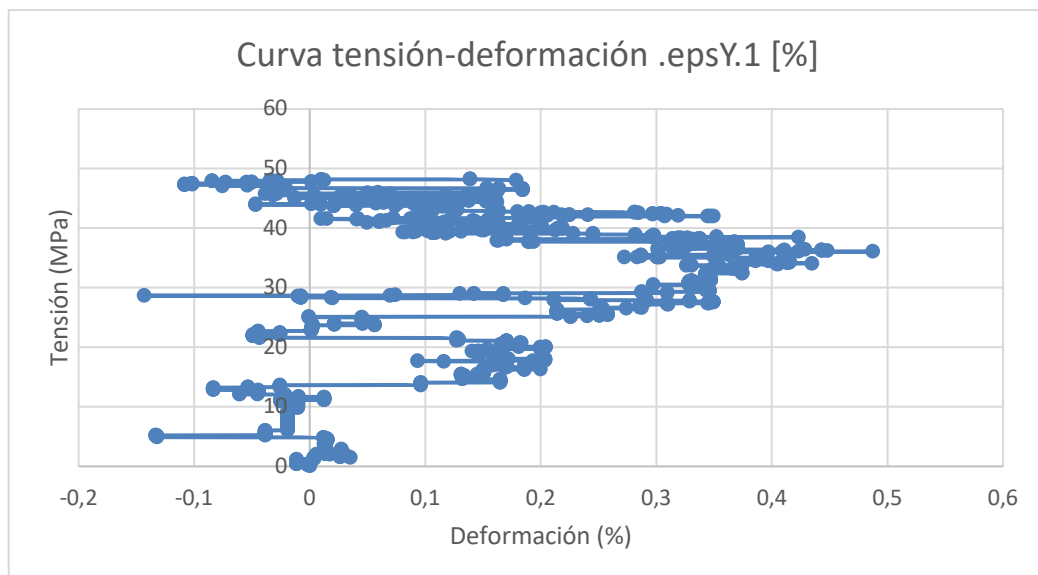


Ilustración 55: Gráfica tensión-deformación V1 Punto 1.

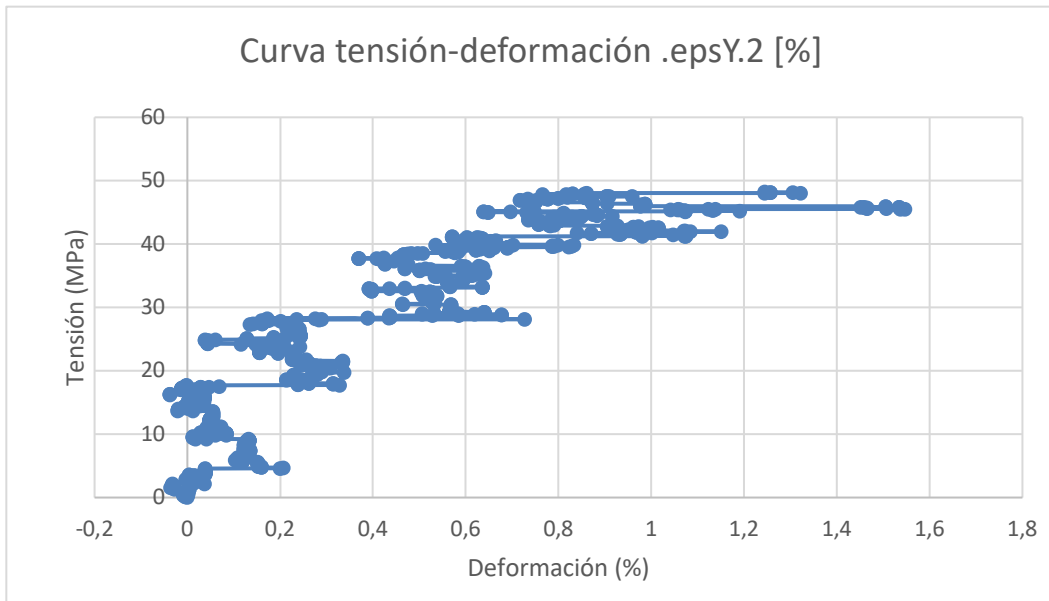


Ilustración 56: Gráfica tensión-deformación V1 Punto 2.

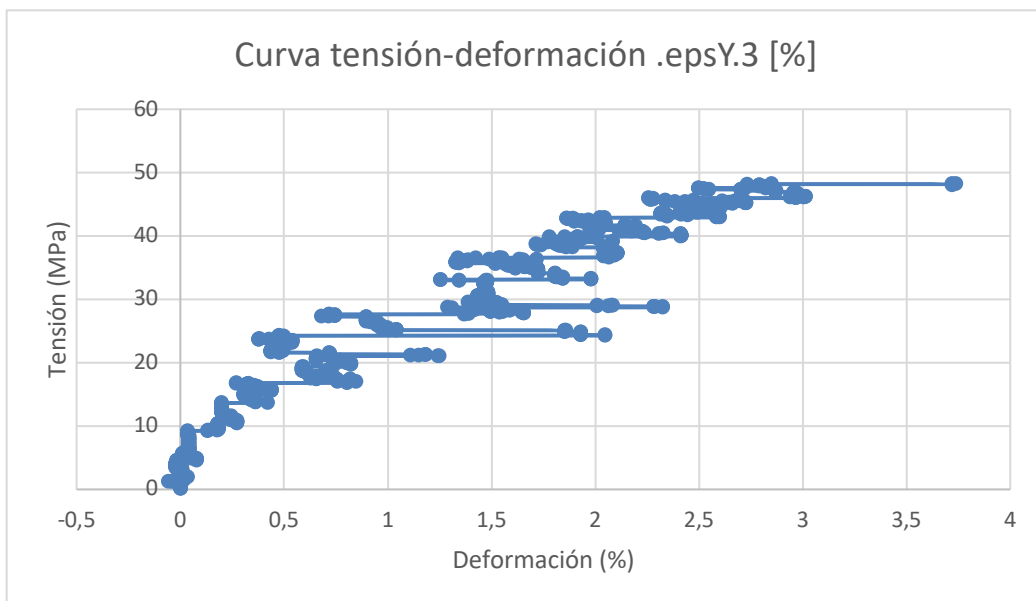


Ilustración 57: Gráfica tensión-deformación V1 Punto 3.

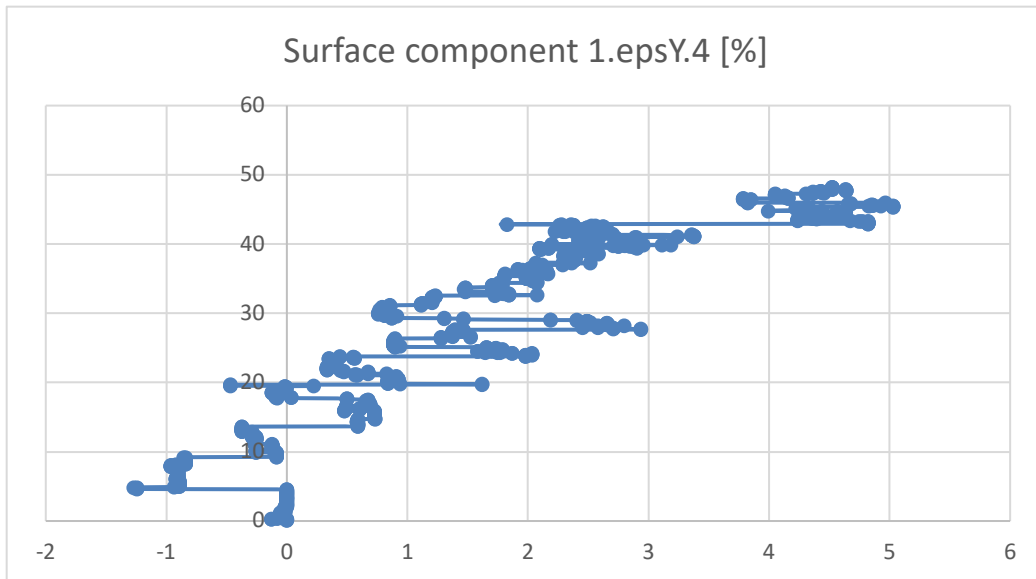


Ilustración 58: Gráfica tensión-deformación V1 Punto 4.

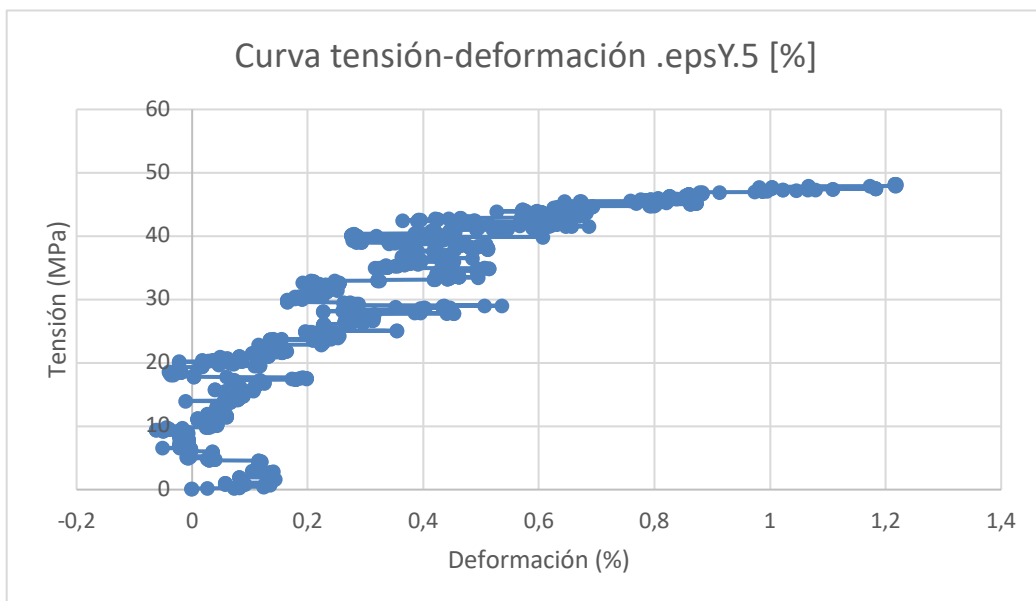


Ilustración 59: Gráfica tensión-deformación V1 Punto 5

### 4.2.3 GRÁFICAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN V2

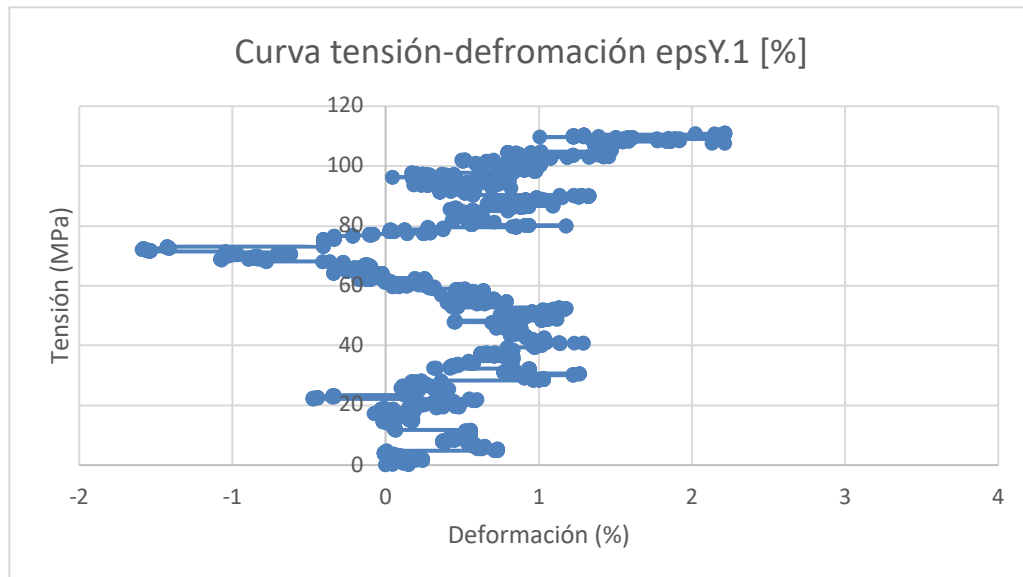


Ilustración 60: Gráfica tensión-deformación V2 Punto 1.

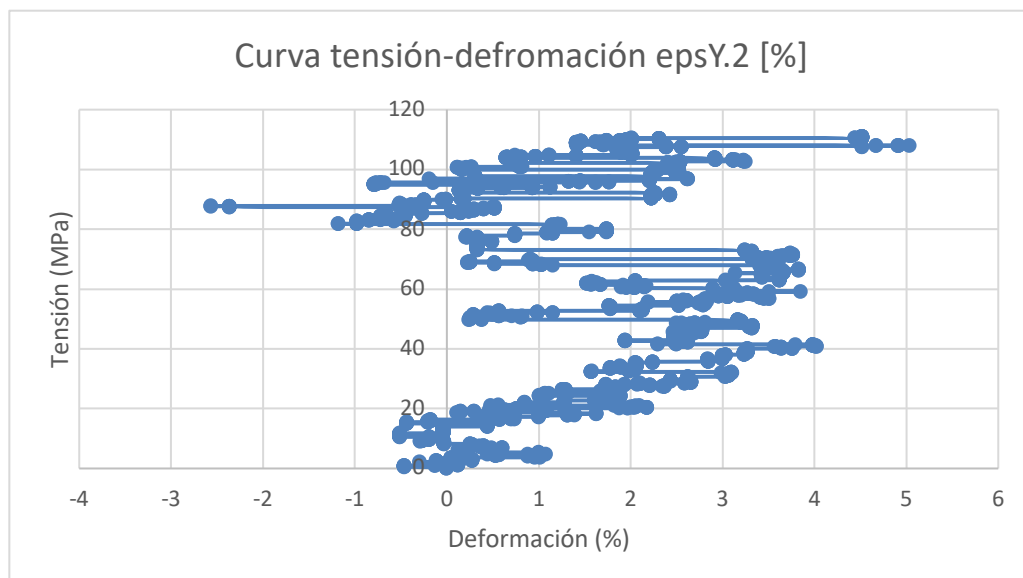


Ilustración 61: Gráfica tensión-deformación V2 Punto 2

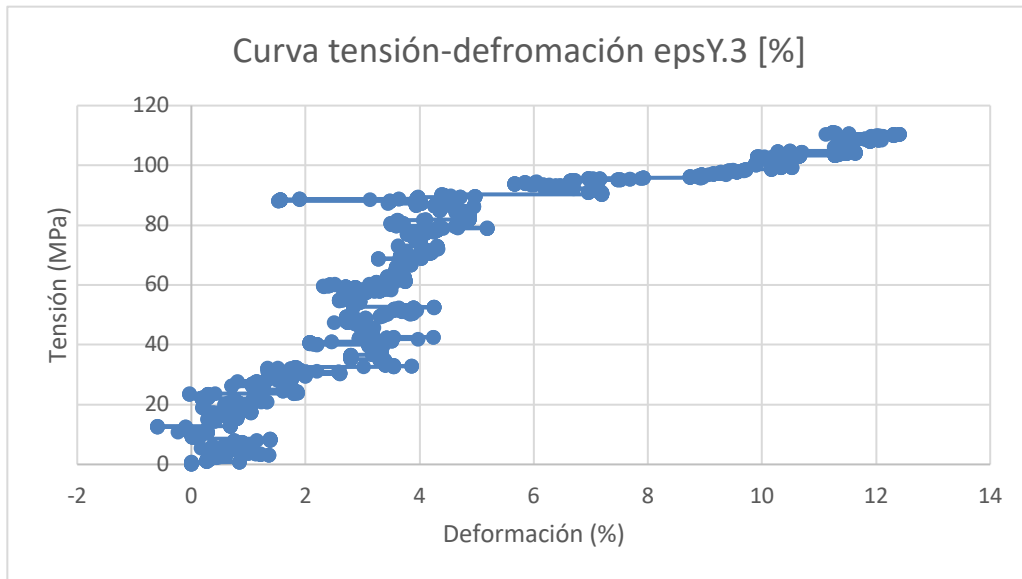


Ilustración 62: Gráfica tensión-deformación V2 Punto 3.

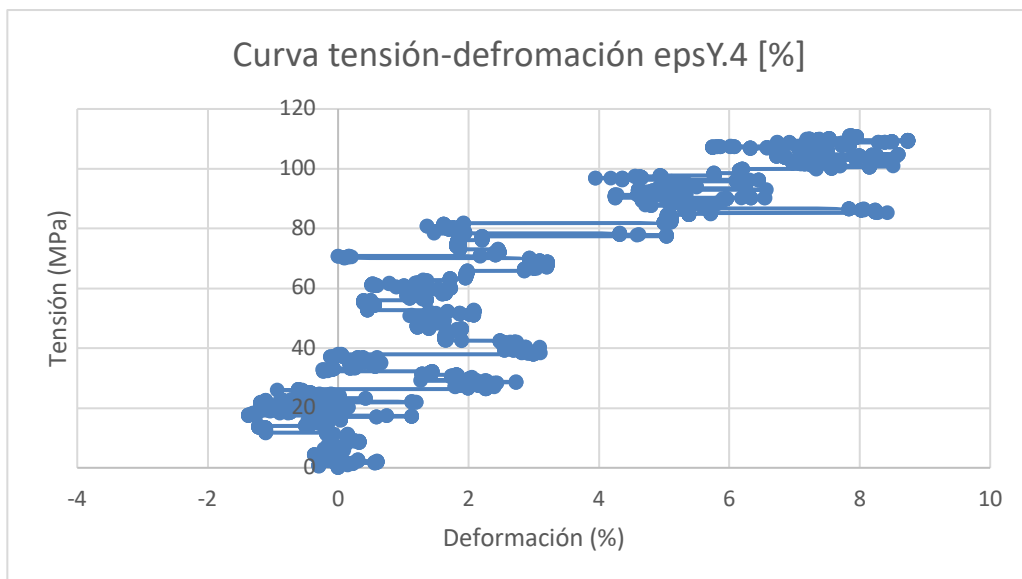


Ilustración 63: Gráfica tensión-deformación V2 Punto 4

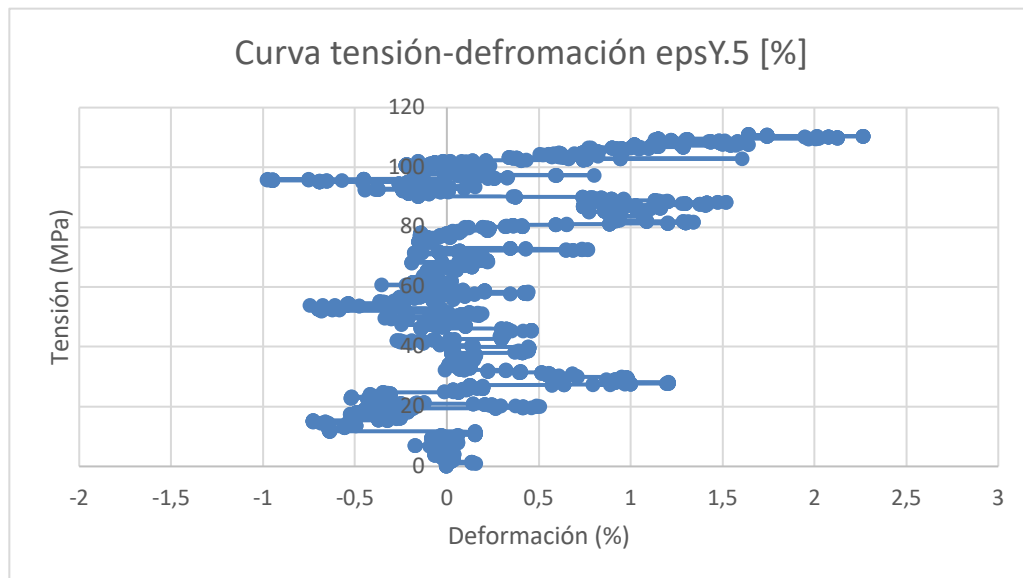


Ilustración 64: Gráfica tensión-deformación V2 Punto 5.

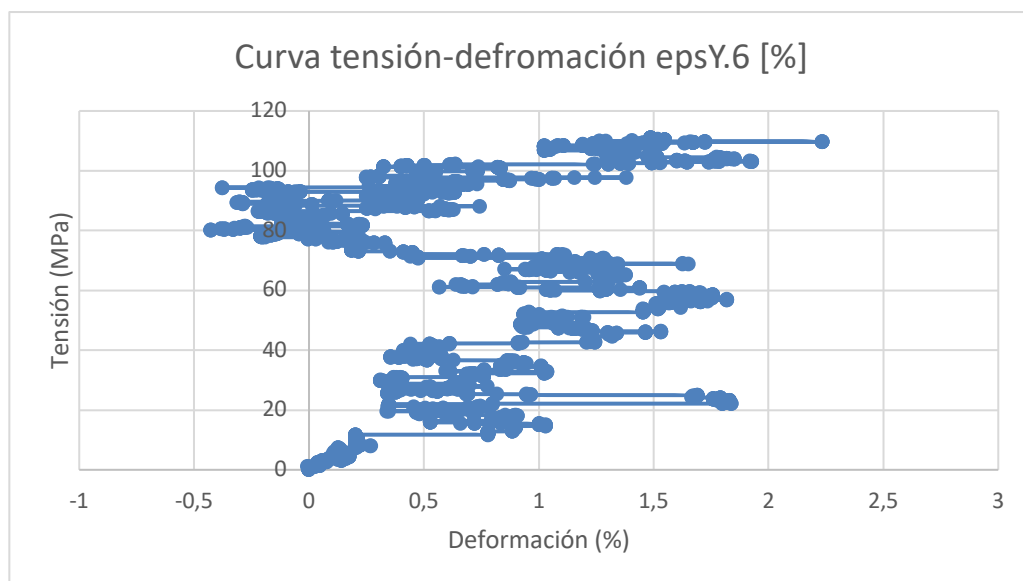


Ilustración 65: Gráfica tensión-deformación V2 Punto 6.

#### 4.2.4 GRÁFICAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN V3

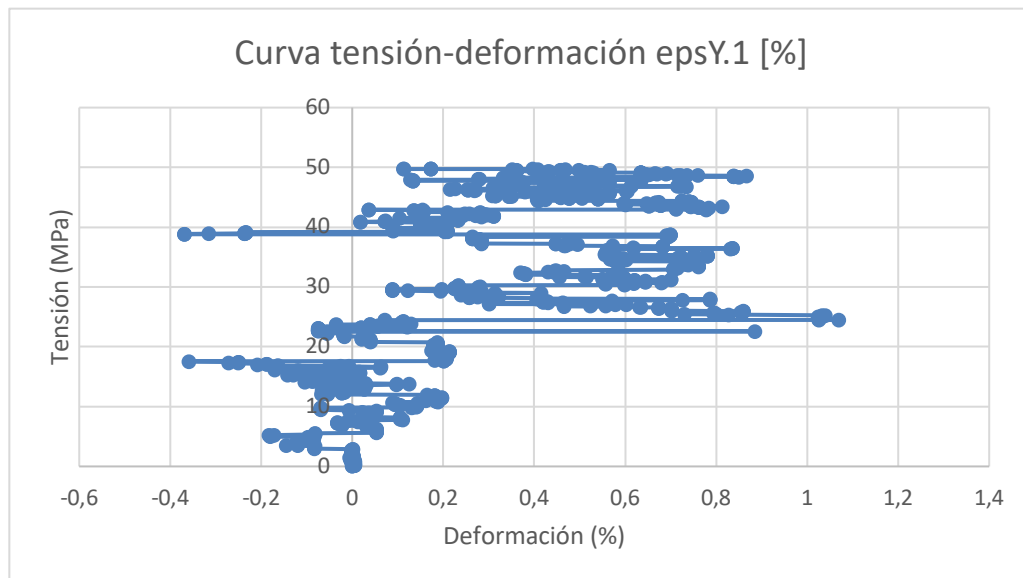


Ilustración 66: Gráfica tensión-deformación V3 Punto 1.

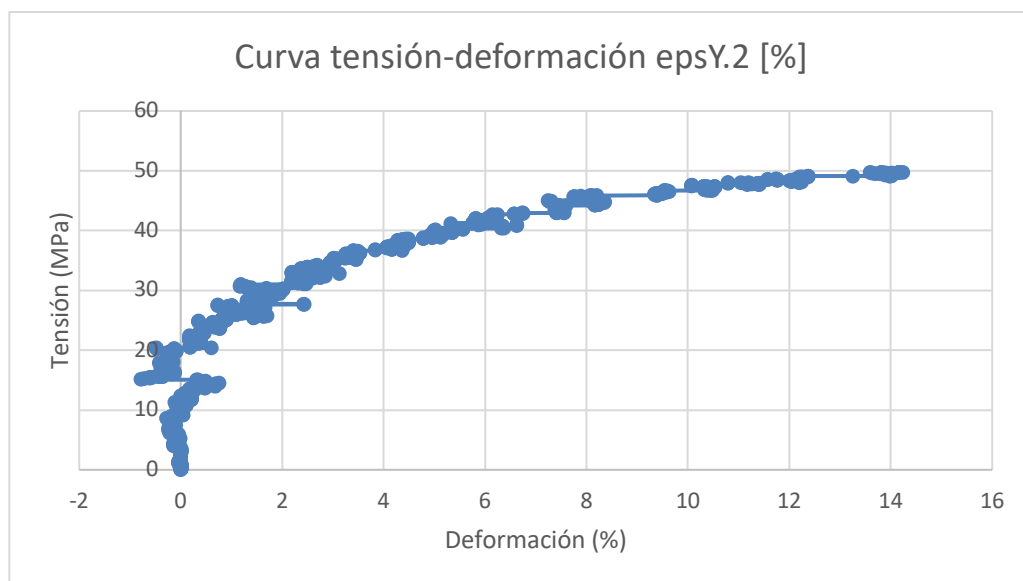


Ilustración 67: Gráfica tensión-deformación V3 Punto 2.

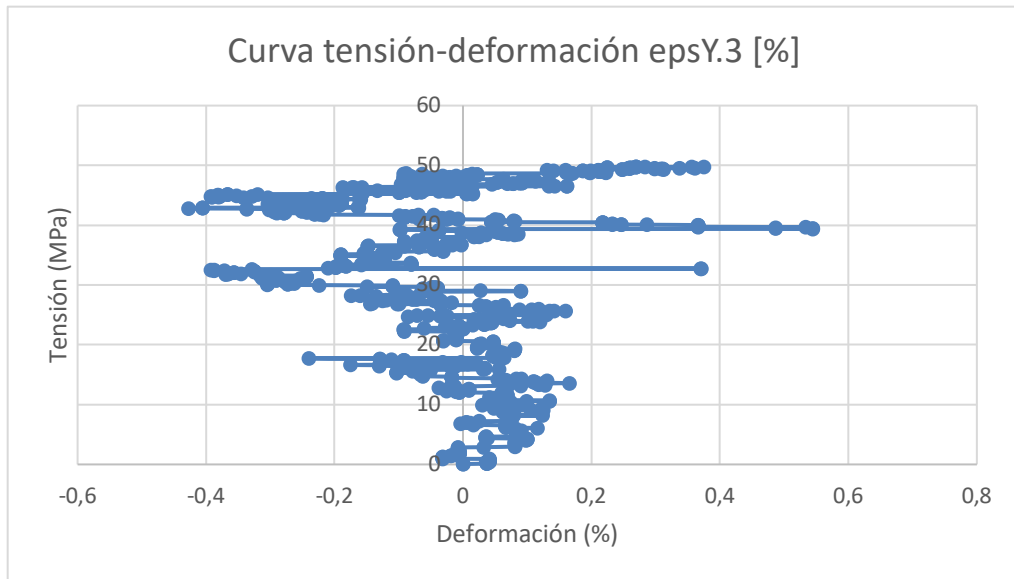


Ilustración 68: Gráfica tensión-deformación V3 Punto 3.

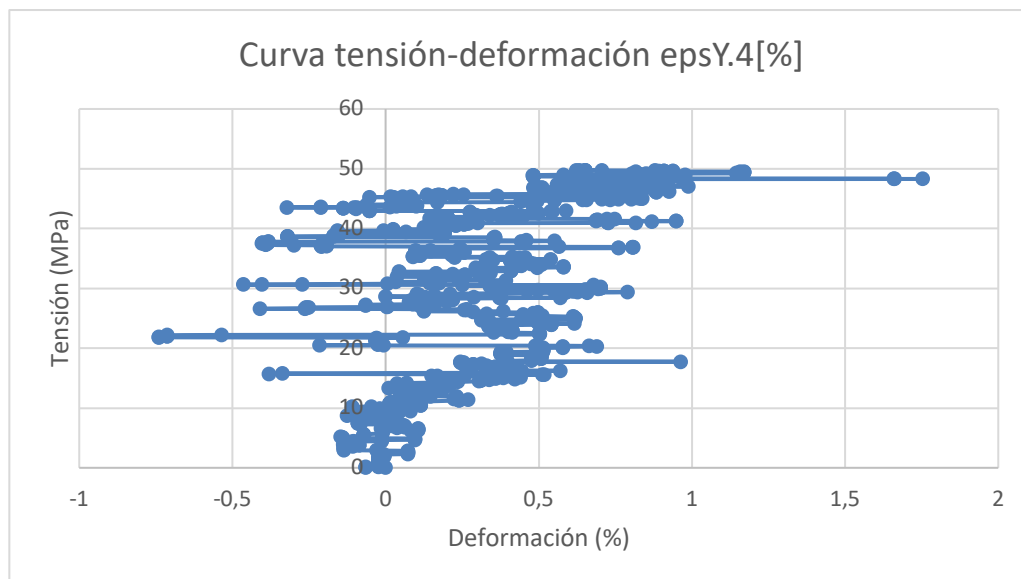


Ilustración 69: Gráfica tensión-deformación V3 Punto 4.

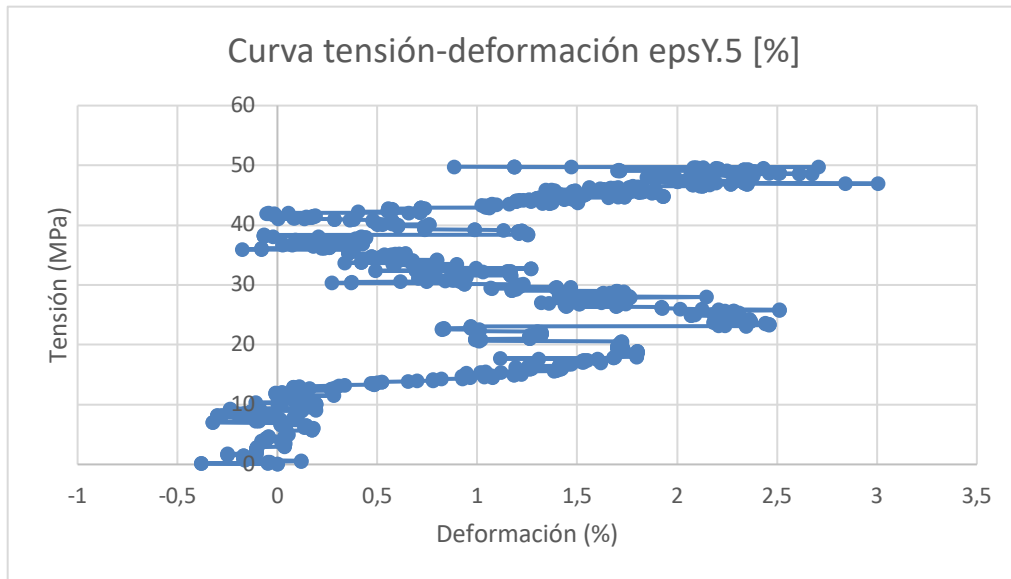


Ilustración 70: Gráfica tensión-deformación V3 Punto 5.

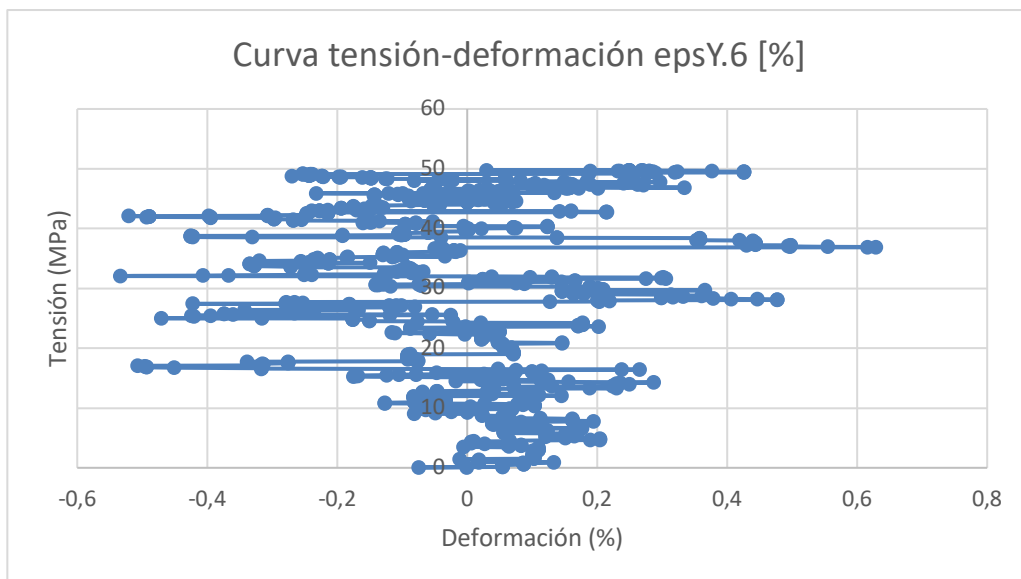


Ilustración 71: Gráfica tensión-deformación V3 Punto 6.

### 4.2.5 GRÁFICAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN O1

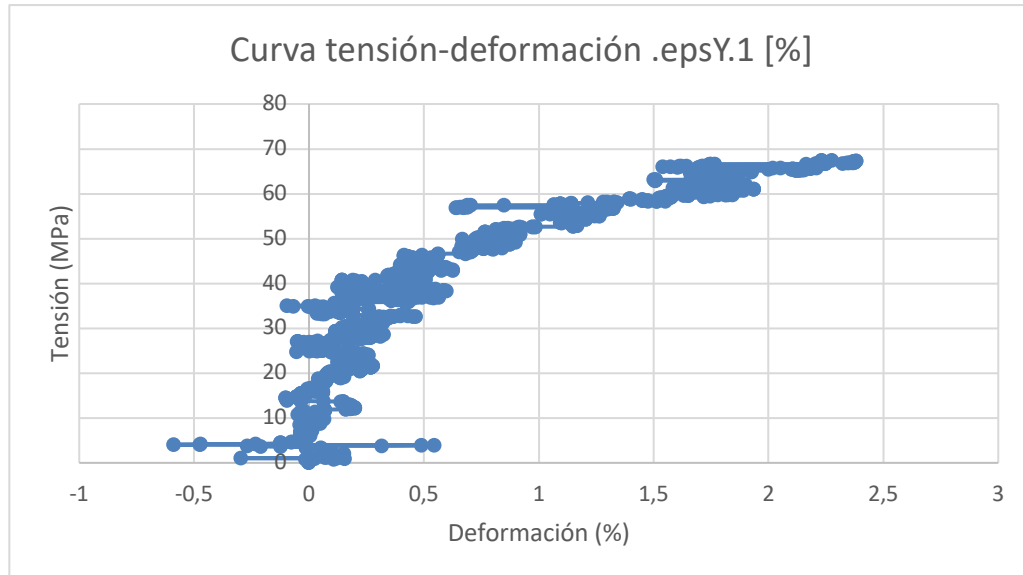


Ilustración 72: Gráfica tensión-deformación O1 Punto 1.

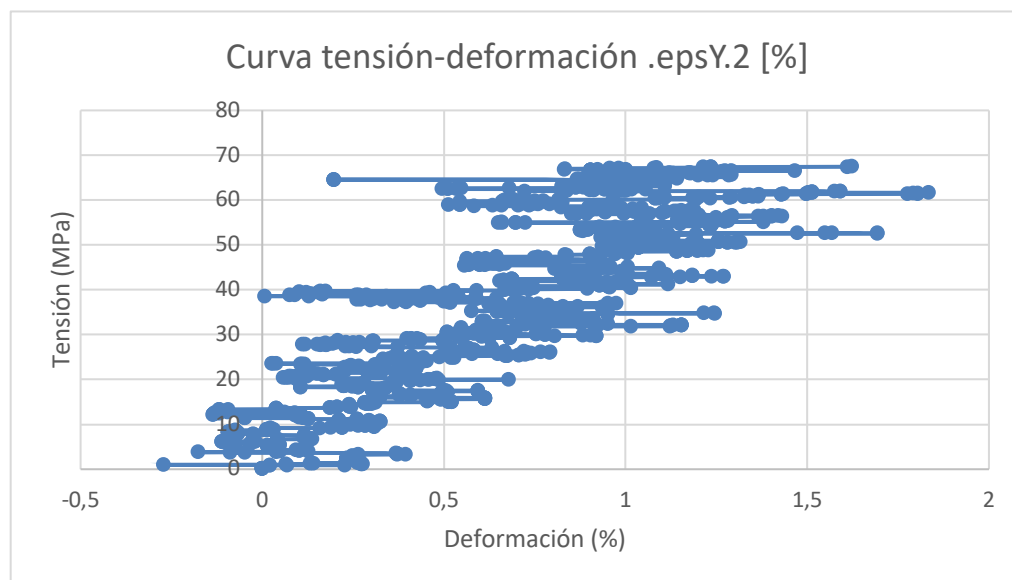


Ilustración 73: Gráfica tensión-deformación O1 Punto 2.

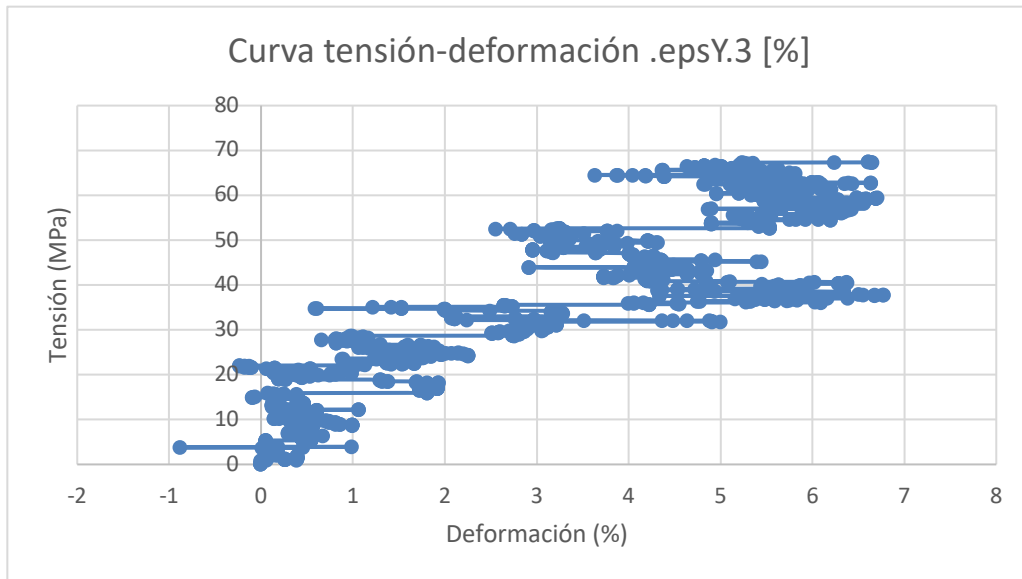


Ilustración 74: Gráfica tensión-deformación O1 Punto 3.

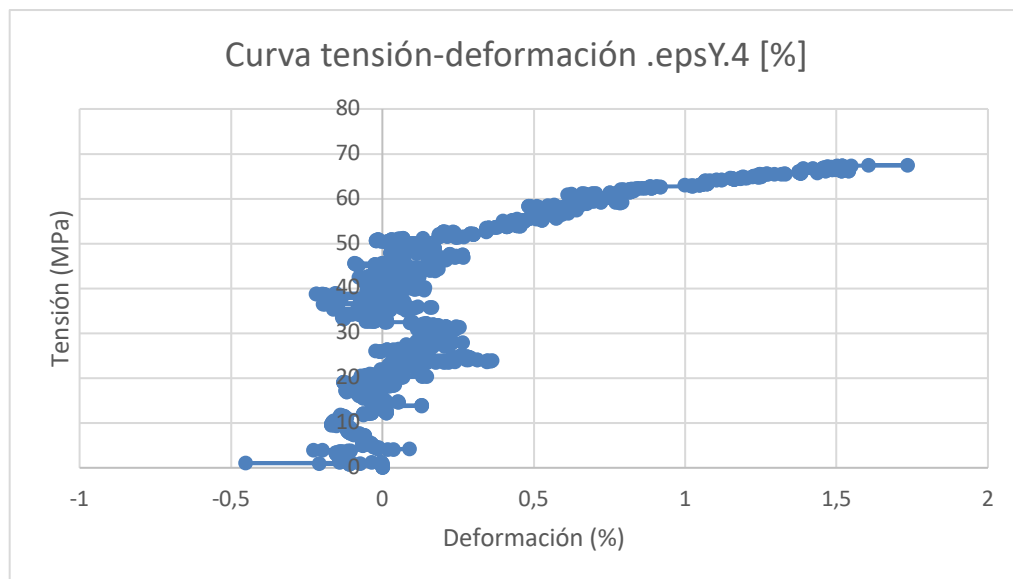


Ilustración 75: Gráfica tensión-deformación O1 Punto 4.

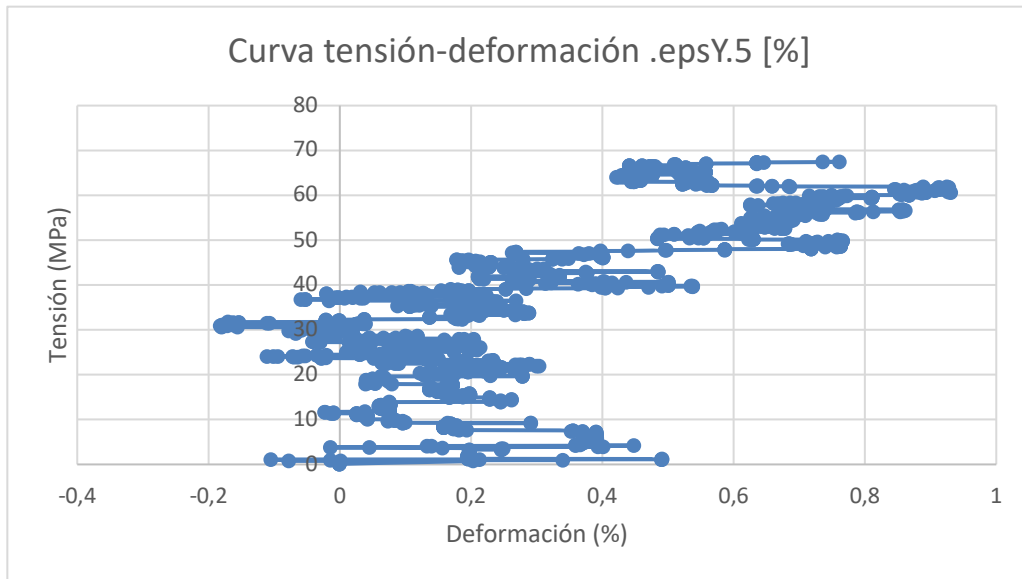


Ilustración 76: Gráfica tensión-deformación O1 Punto 5.

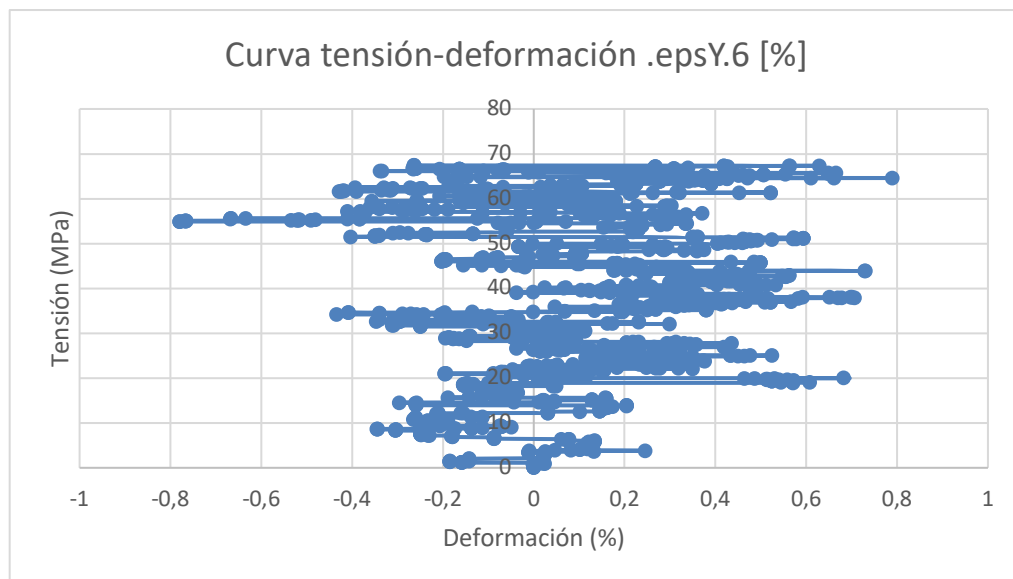


Ilustración 77: Gráfica tensión-deformación O1 Punto 6.

### 4.2.6 GRÁFICAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN O2

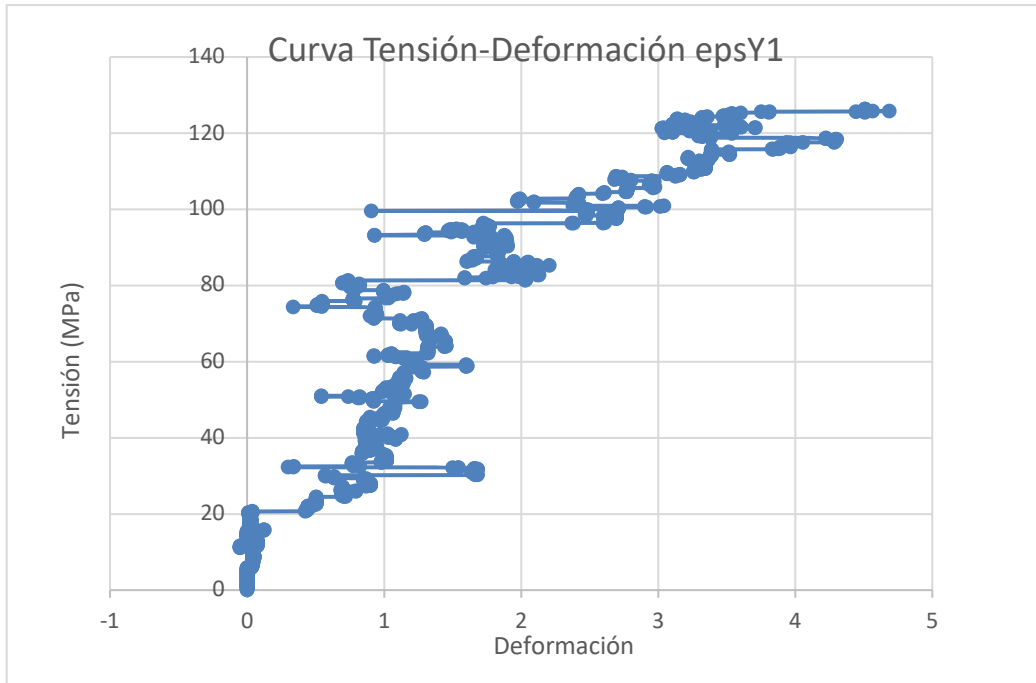


Ilustración 78: Gráfica tensión-deformación O2 Punto 1.

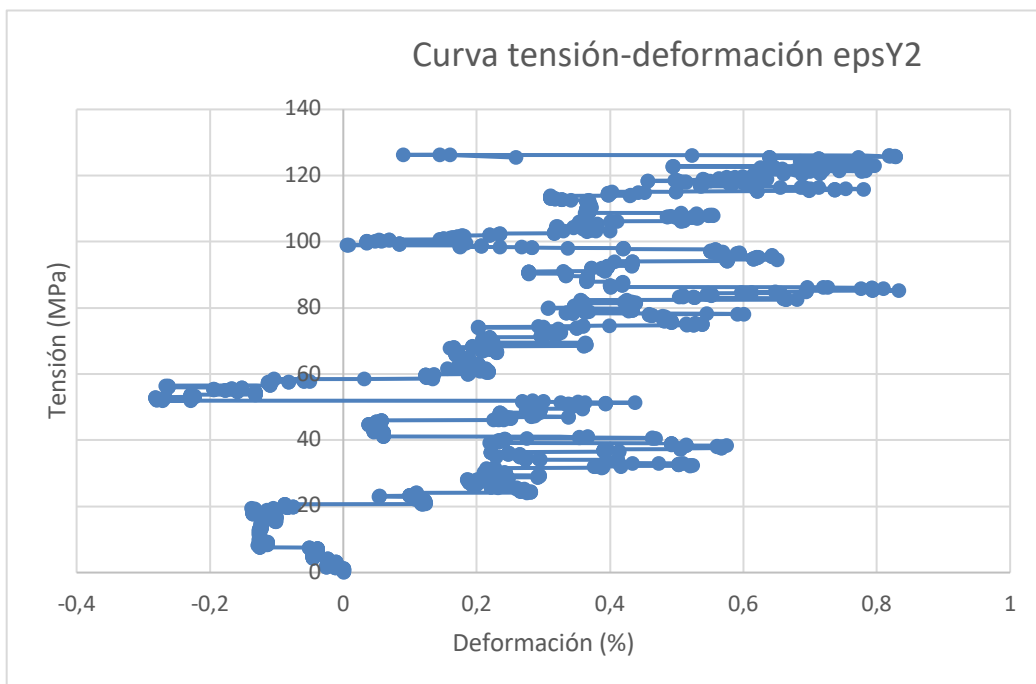


Ilustración 79: Gráfica tensión-deformación O2 Punto 2.

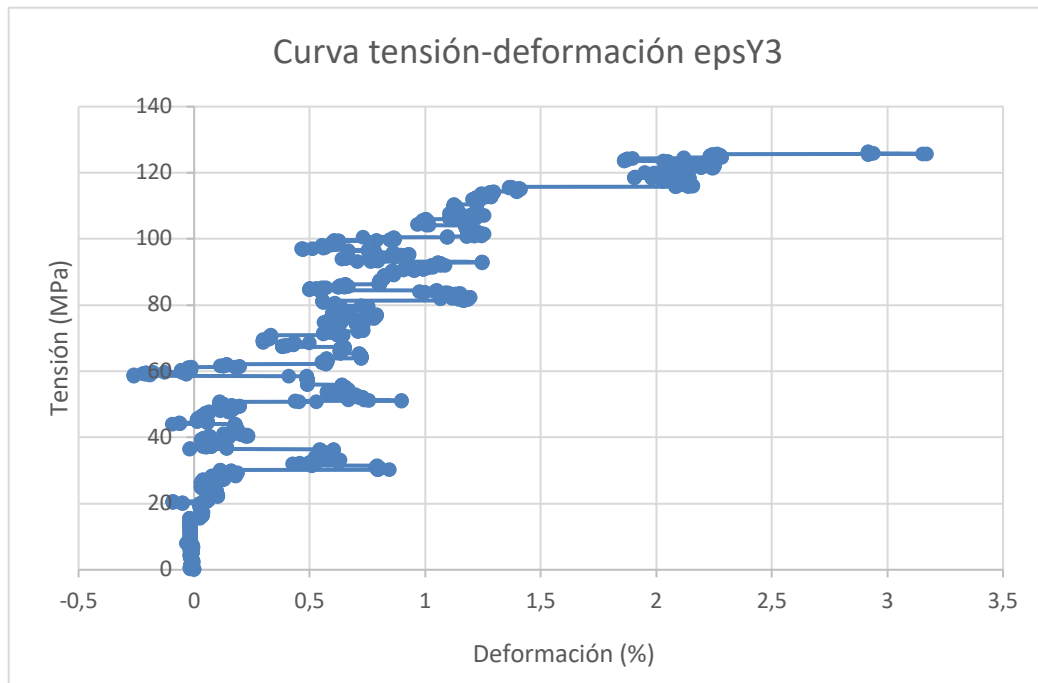


Ilustración 80: Gráfica tensión-deformación O2 Punto 3.

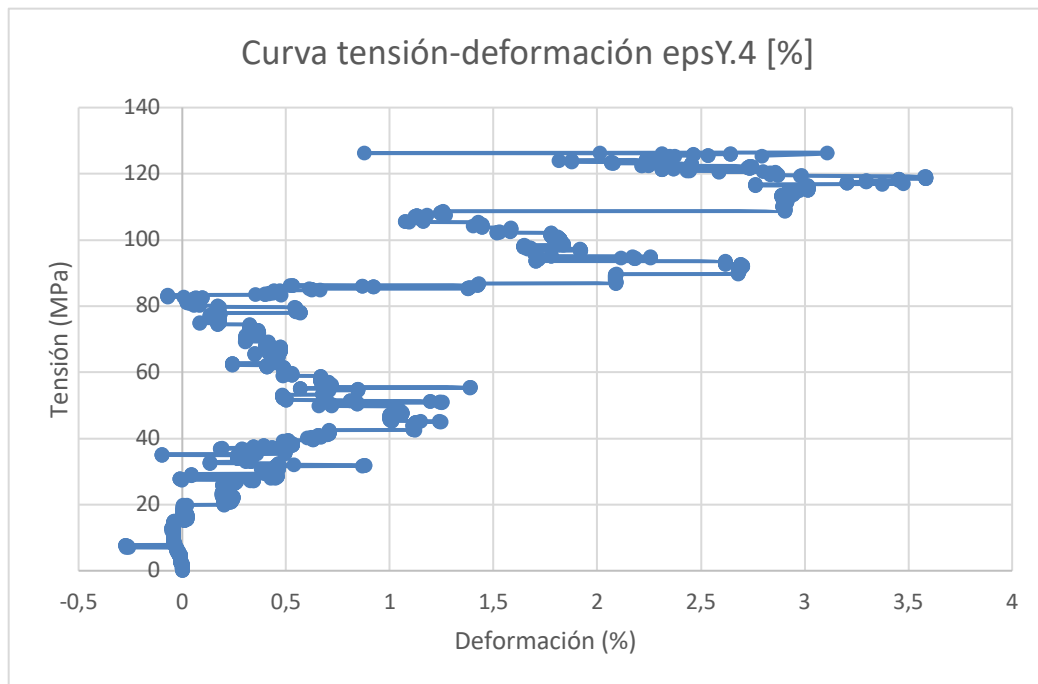


Ilustración 81: Gráfica tensión-deformación O2 Punto 4.

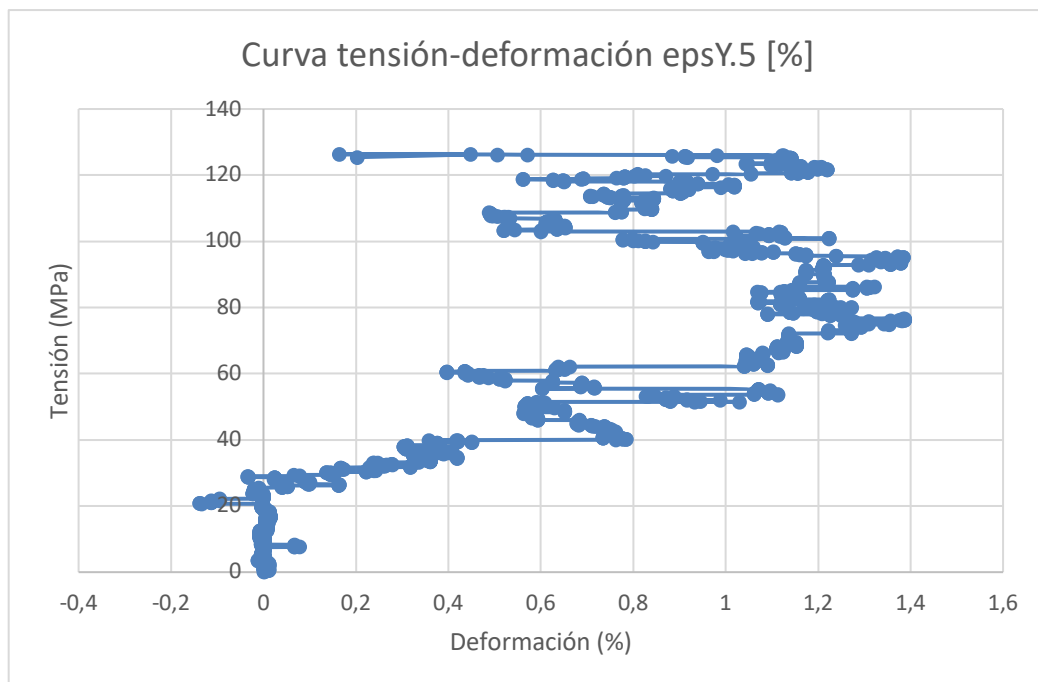


Ilustración 82: Gráfica tensión-deformación O2 Punto 5.

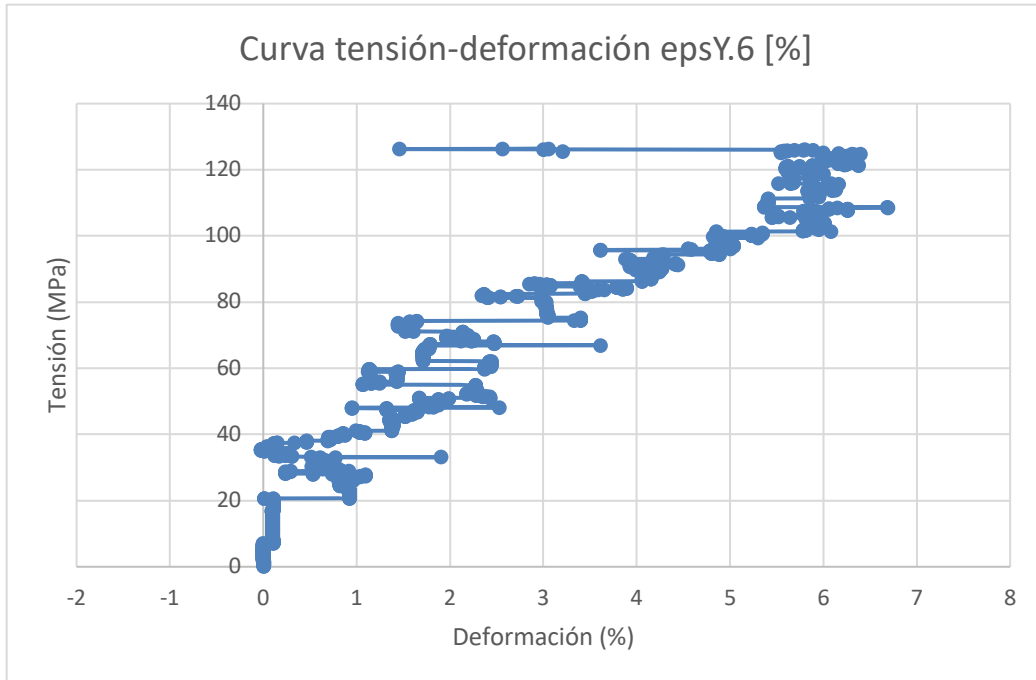


Ilustración 83: Gráfica tensión-deformación O2 Punto 6.

### 4.2.7 GRÁFICAS TENSIÓN-DEFORMACIÓN O3

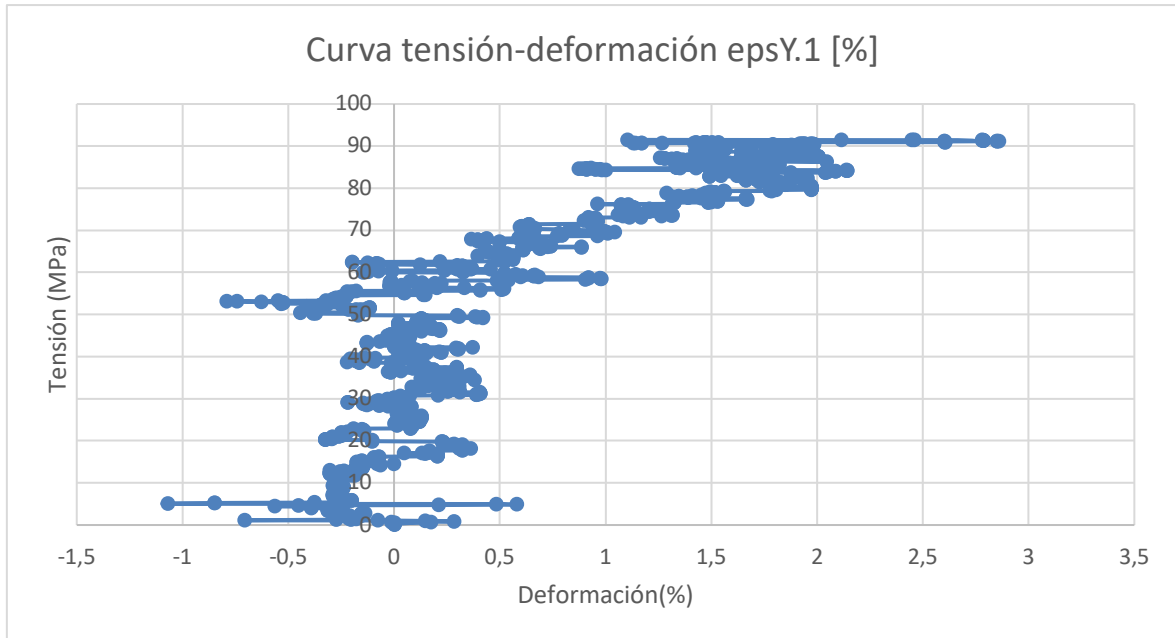


Ilustración 84: Gráfica tensión-deformación O3 Punto 1.

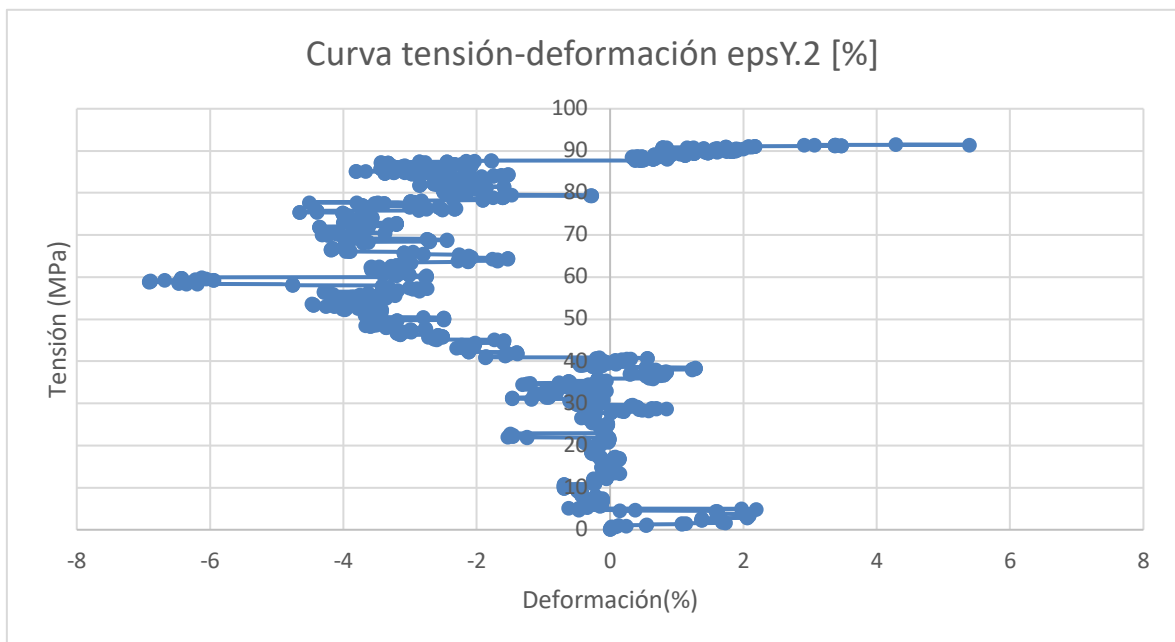


Ilustración 85: Gráfica tensión-deformación O3 Punto 2.

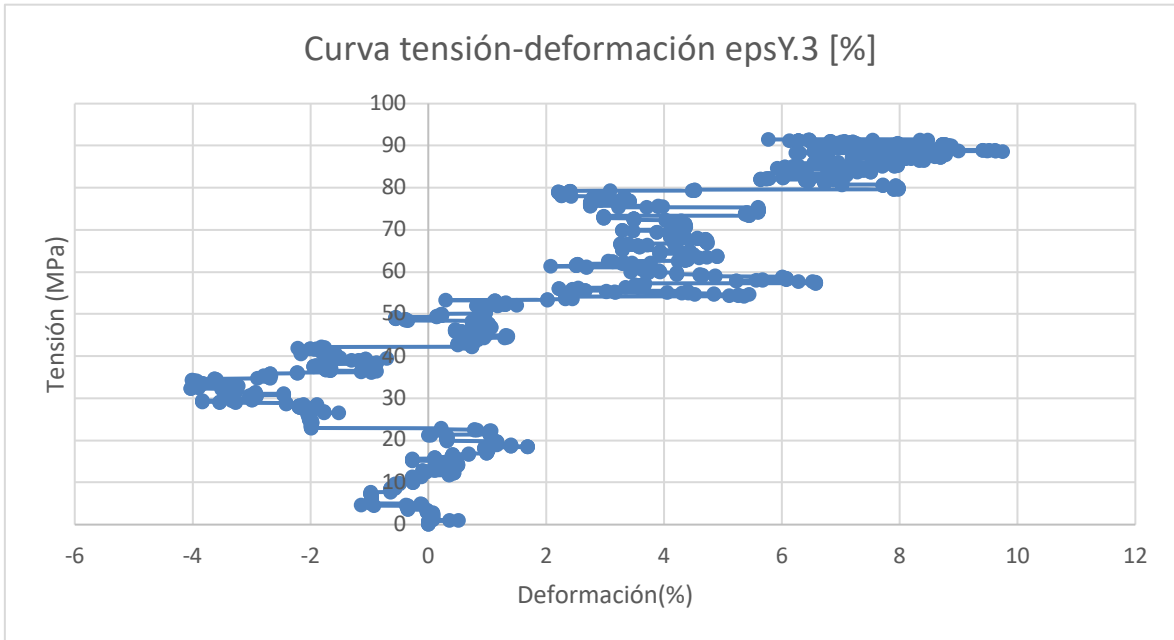


Ilustración 86: Gráfica tensión-deformación O3 Punto 3.

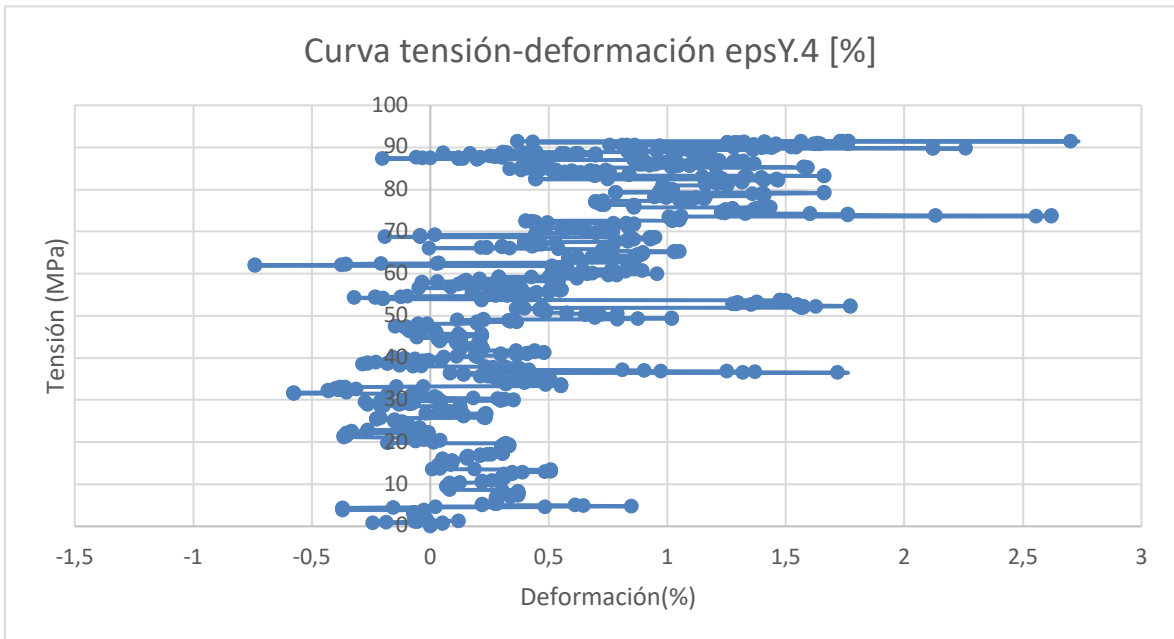


Ilustración 87: Gráfica tensión-deformación O3 Punto 4.

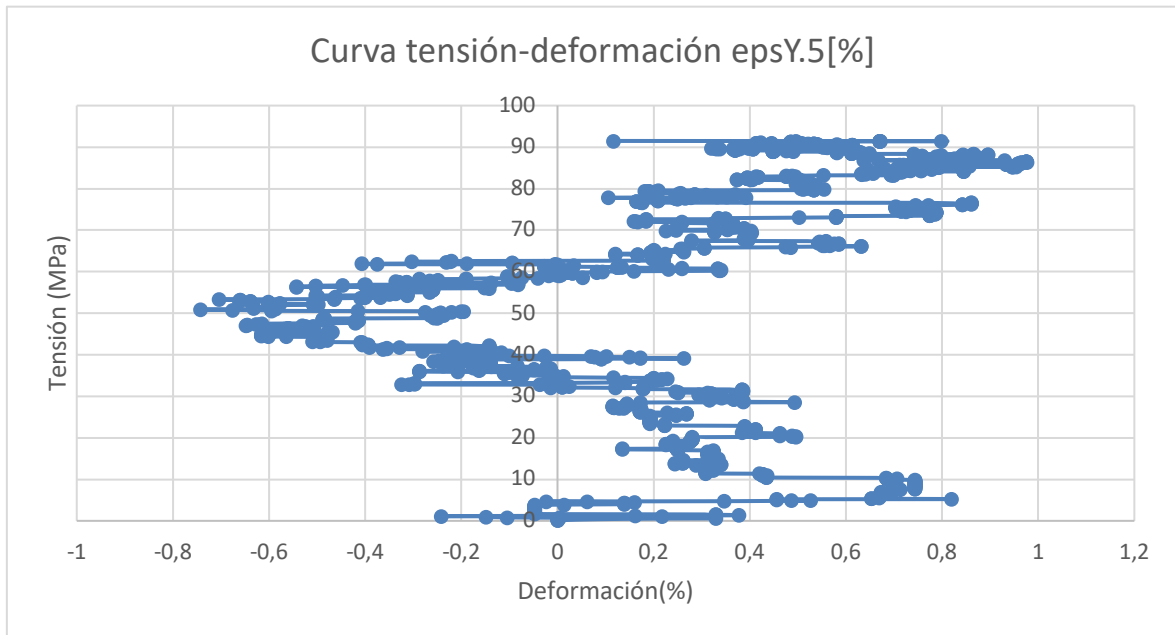


Ilustración 88: Gráfica tensión-deformación O3 Punto 5.

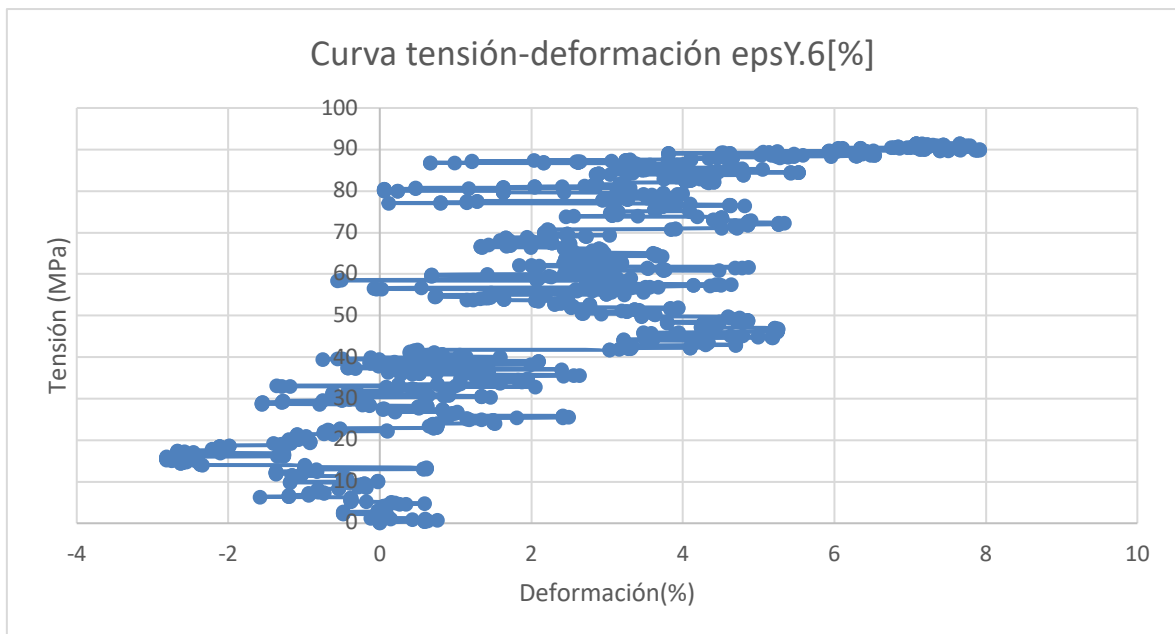


Ilustración 89: Gráfica tensión-deformación O3 Punto 3.

### 4.3 ANÁLISIS DE LAS GRÁFICAS

La gráfica tensión-deformación ideal muestra una pendiente pronunciada en los primeros segundos de ensayo, zona denominada como región elástica debido a la capacidad que tiene el material, en ese momento, de recuperar su forma inicial si se cesa la fuerza aplicada. Tras pasar el límite elástico, la pendiente de la curva pierde fuerza y se adentra en la región plástica donde la deformación es irreversible. Una vez alcanzada la máxima tensión soportada, el material romperá.

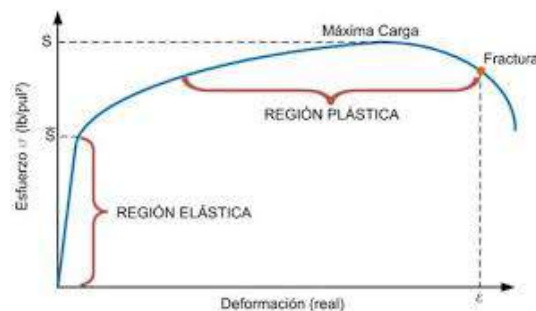


Ilustración 90: Ejemplo curva tensión-deformación y sus partes.

Se puede observar en las gráficas trazadas para cada uno de los puntos, que no todos dan lugar a la curva tensión-deformación ideal, aunque existen puntos cuyo comportamiento sí es el deseado. Es una buena señal a la hora de validar la metodología que existan puntos con un comportamiento deseado, y cuyos valores de deformación en el momento de rotura no se diferencien mucho de los calculados con los datos extraídos de la máquina.

Debido a que no todos los puntos dan lugar a las mismas gráficas, en primer lugar se buscará si existe un patrón de comportamiento entre los puntos dependiendo de su localización. Para ello se analizaron las curvas y se plantearon hipótesis sobre la posible relación existente entre comportamiento y localización. Además se crearon puntos adicionales en los alrededores de aquellos puntos sobre los que queremos estudiar su comportamiento y verificar las hipótesis que se plantearon en un primer análisis de las curvas.

En primer lugar, se analizó la probeta V1, correspondiente a tejido óseo procedente de una ternera rosada. De los 5 puntos marcados, sólo el punto central (Punto 1) tiene un comportamiento no ideal, tal y como se puede observar en la Ilustración 55, dando lugar a una gráfica en la cual los valores de deformación en vez de aumentar a medida que aumenta la carga aplicada, crecen y decrecen sin seguir ningún patrón e incluso llegando a valores negativos. Para obtener el por qué de ese comportamiento, se marcó otro punto cercano a él, el punto 9. Este punto muestra tener el mismo comportamiento aleatorio que el punto central, por lo que lleva a planteamiento de varias hipótesis:

1. La zona central de la probeta presenta un comportamiento distinto al deseado y al resto de la probeta.
2. El patrón de puntos pintado en la muestra no es preciso por lo que dificulta al programa la cuantificación de la deformación.
3. Aquellos puntos cuyos valores máximos coinciden con los medidos por la máquina del ensayo (2-4 %) son los únicos que presentan gráficas ideales.

\*Se deberá tener en cuenta la falta de ensayos debido al estado de alarma declarado en consecuencia de la pandemia sufrida por el COVID-19 que prohibía la entrada a los laboratorios del centro.

En segundo lugar y con la hipótesis planteadas, se procede al análisis de las curvas de la probeta V2. Los valores obtenidos de las deformaciones de los puntos 3 y 4 crecen a medida que aumenta la fuerza aplicada, por lo tanto sus curvas tienen la forma deseada. Los valores obtenidos de estos puntos en el momento que rompe la probeta son mayores que 8. Además, aquellos cuyo valor máximo de deformación están entre 2-4 (valores coincidentes con los leídos por la máquina al hacer el ensayo) no siguen el patrón esperado de crecer a medida que la fuerza aumenta, por lo que la tercera hipótesis planteada previamente se descarta. Estos puntos son 1,2,5 y 6 y se colocan puntos adicionales en sus alrededores para comprobar que la zona en la que se encuentran se comporta igual, lo cual ocurre. El punto 1 es el punto central, por lo que se examinará la zona de alrededor del punto central debido a su comportamiento para verificar la hipótesis planteada anteriormente. Para ello se colocan 2

puntos nuevos alrededor (puntos 7 y 8). Los valores de estos puntos tienen un comportamiento semejante al punto central, por lo que no tenemos evidencias suficientes para descartar la hipótesis. En esta probeta los puntos que tienen un comportamiento idóneo, son los dos puntos colocados en los extremos.

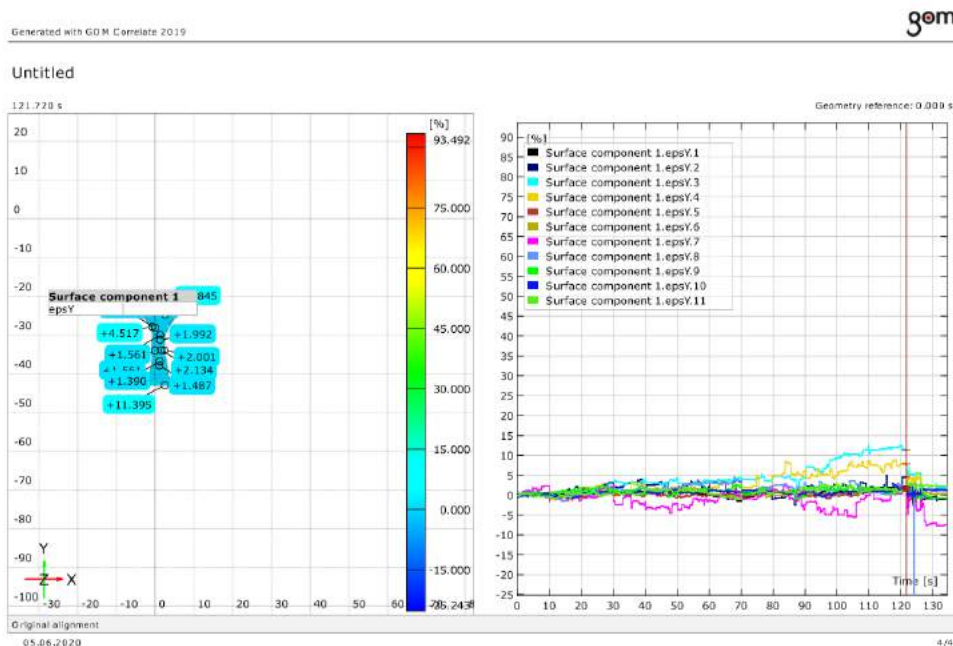


Ilustración 91: Nuevos puntos y gráfica Deformación tiempo V2

El estudio de la probeta V3, se hace teniendo en cuenta la primera y segunda hipótesis, ya que la tercera fue descartada. A diferencia de los puntos examinados en las probetas V2 y V3, gran parte de los puntos seleccionados tienen un comportamiento bastante irregular. Se examinarán las zonas de alrededor de estos puntos para poder verificar las hipótesis, los cuales siguen el comportamiento de los primeros puntos creados, esto afianza la hipótesis de que el patrón de puntos dibujado no es tan preciso como necesita el programa que sea. La zona central de la probeta sigue teniendo un comportamiento irregular, por lo que no se puede descartar ninguna de las hipótesis.

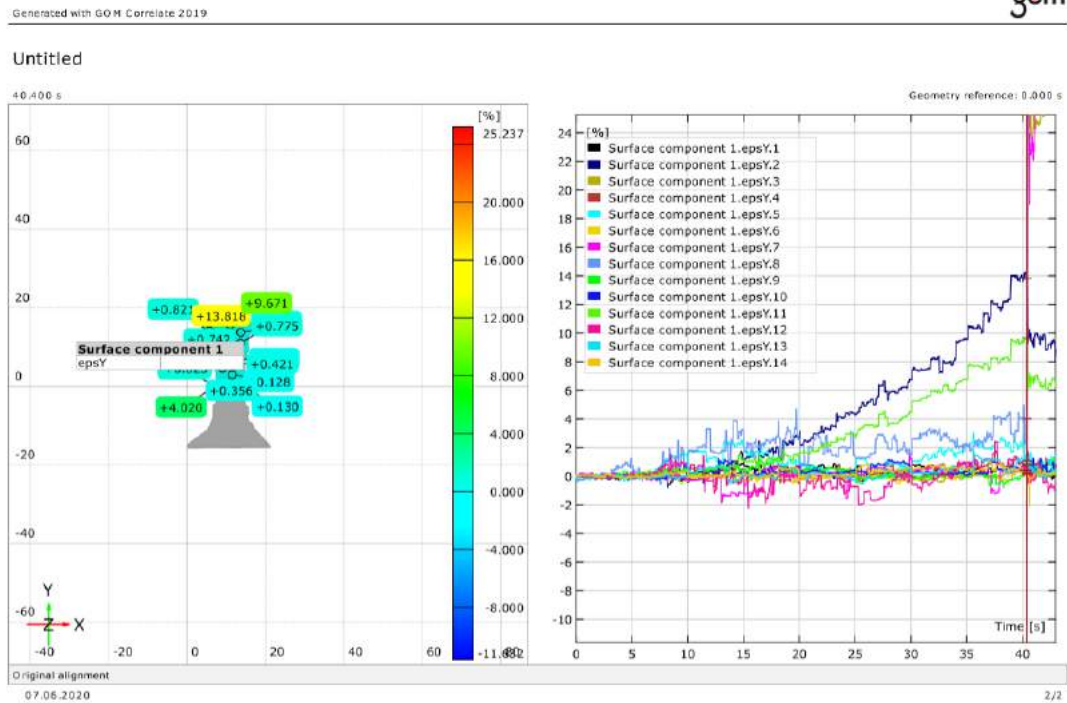


Ilustración 92: Nuevos puntos y gráfica Deformación tiempo V3

Se procede al análisis del comportamiento de las probetas procedentes de tejidos óseos ovinos. En el caso de la probeta O1, se puede observar una mejoría en las formas de las curvas de los puntos seleccionados, a excepción de algunos valores que son negativos al comenzar el ensayo, los valores de deformación crecen a medida que aumenta el valor de la fuerza aplicada. Los puntos cuya gráfica es la más ideal son los números 1 y 4, siendo el punto 1 el punto central. Se examina la zona central creando los puntos (7 y 8), y su comportamiento permite descartar la hipótesis planteada sobre el comportamiento irregular presente en el centro de la muestra. El único punto que no sigue la forma deseada de la gráfica es el punto 6. Los puntos (9 y 10) sirven para estudiar la zona de alrededor del punto 6. Estos se comportan de igual manera que el punto 6. Podríamos decir que esto se debe a que el patrón de puntos dibujado en esa zona no es uniforme. Los resultados positivos obtenidos en las demás zonas de la probeta permiten evidenciar que se debe al patrón dibujado.

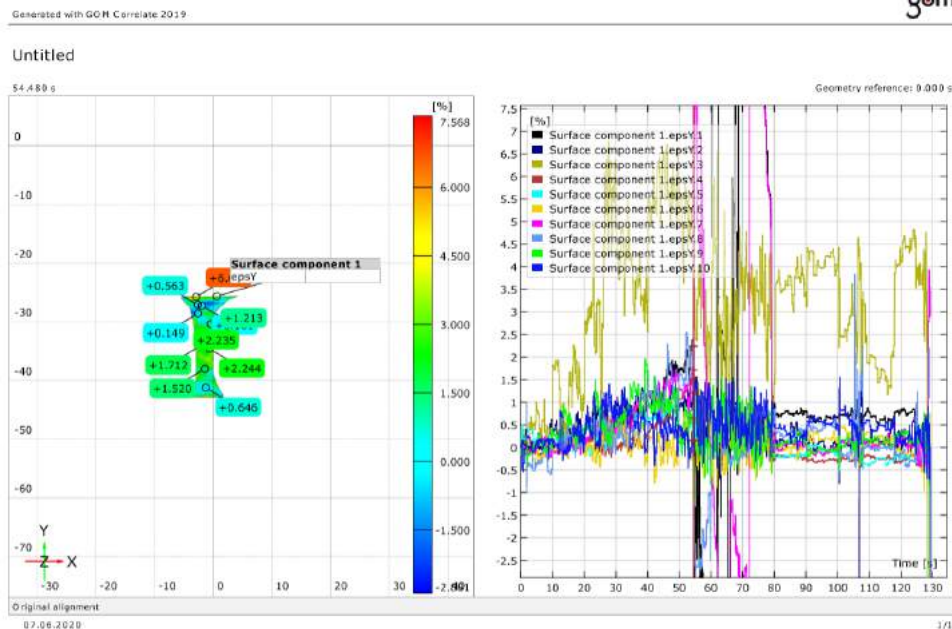


Ilustración 93: Nuevos puntos y gráfica Deformación tiempo O1

A pesar de haber llegado a una posible conclusión, se seguirá analizando las dos muestras restantes en caso de que se encuentre alguna evidencia adicional que permita explicar estos comportamientos en las deformaciones. En las muestras O2 y O3 se puede observar que varios puntos dan lugar a la gráfica deseada. En cambio, los puntos centrales que representa el punto central de la probeta, muestran los peores valores en comparación con el resto de puntos seleccionados en las muestras, aunque haciendo una evaluación general sí alcanza los valores de deformación máximos justo antes de que rompa. Las gráficas en esta probeta aunque no sean perfectas, se puede ver como los valores de las deformaciones de los puntos van aumentando con el tiempo. En un análisis global de las gráficas, cumplen con el patrón deseado para clasificar una curva tensión-deformación como ideal.

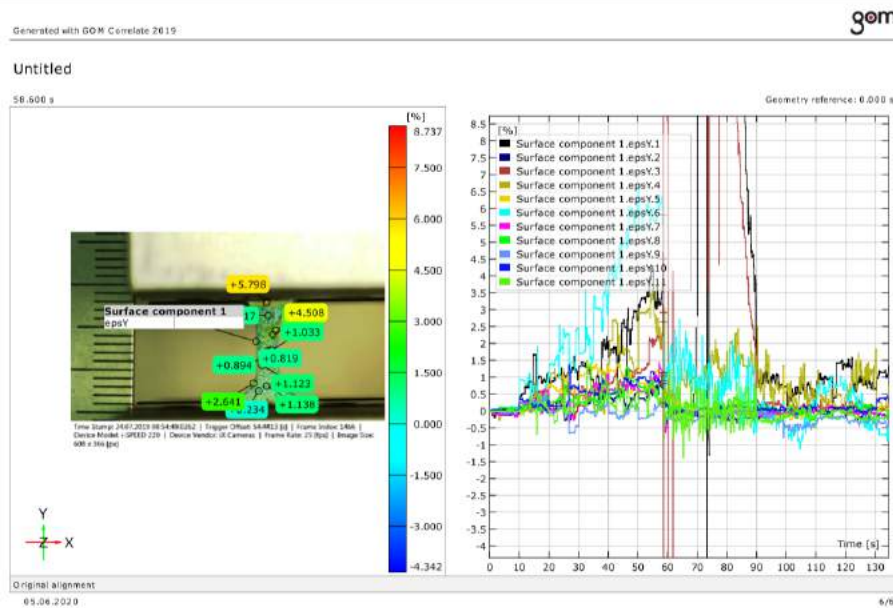


Ilustración 94: Nuevos puntos y gráfica Deformación tiempo O2

### 4.3.1 ESTUDIO DE LOS VALORES DE DEFORMACIÓN DE LOS PUNTOS QUE FORMAN UNA SECCIÓN DE LA PROBETA

Al no haber llegado a ninguna conclusión mediante el estudio de las Gráficas tensión-deformación, se planteó estudiar cómo se comportaba las deformaciones en la sección trazada por la mitad de la probeta. Para ello, tal y como se explicar en el manual, se trazó una sección que cortará la probeta en dos partes iguales y de esa sección se obtuvieron los valores de las deformaciones de cada punto que forma la sección. EL programa proporcionó las gráficas deformación longitud, que en este caso son 20 mm.

Generated with GOM Correlate 2019



Deformación a lo largo de la sección seleccionada. O1.

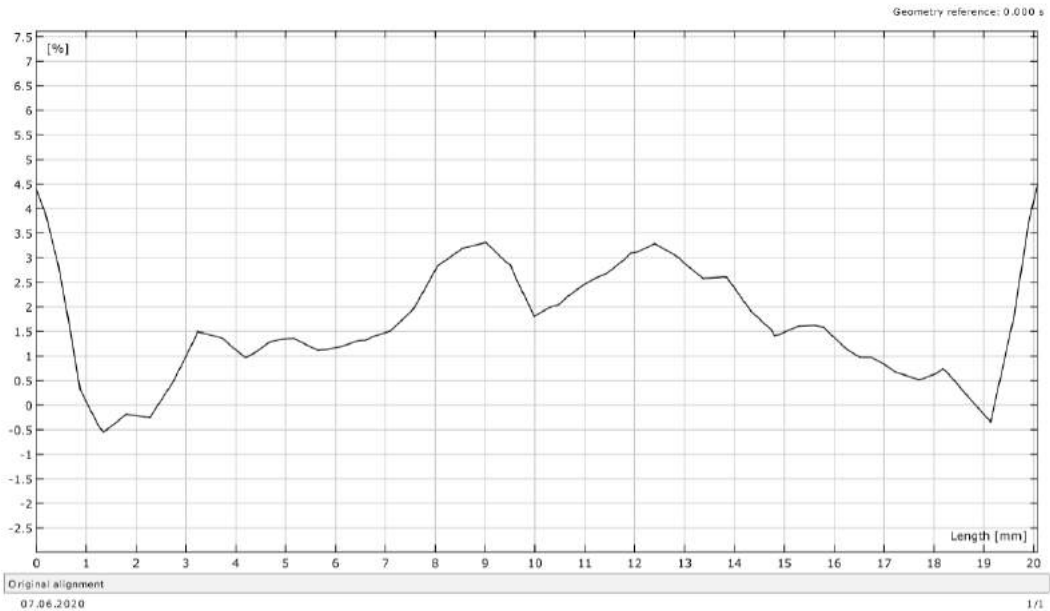


Ilustración 95: Deformación a lo largo de la sección O1

Generated with GOM Correlate 2019



Deformación a lo largo de la sección seleccionada

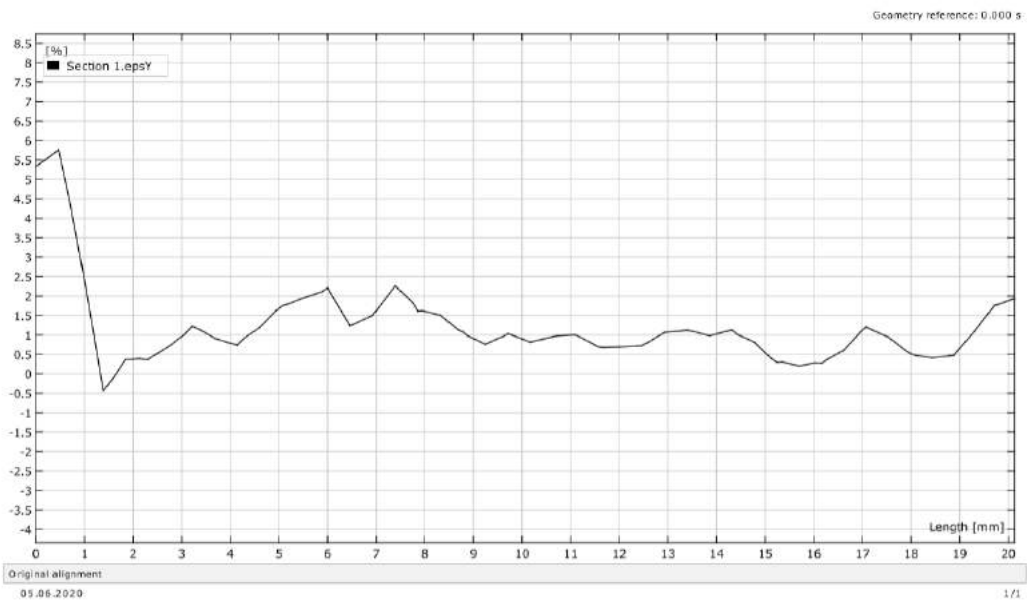


Ilustración 96: Deformación a lo largo de la sección O2

Generated with GOM Correlate 2019



Deformación a lo largo de la sección seleccionada. O3.

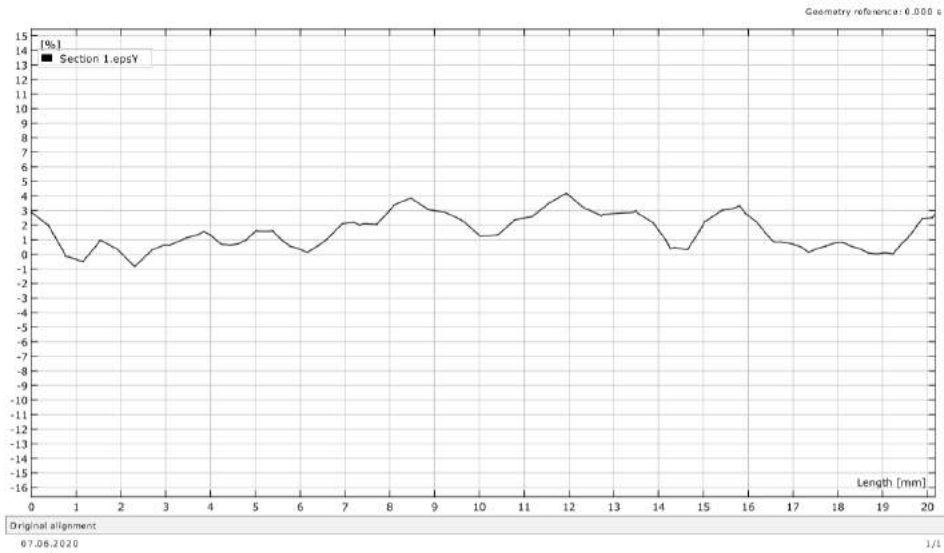


Ilustración 97: Deformación a lo largo de la sección O3

Generated with GOM Correlate 2019



Deformación a lo largo de la sección seleccionada. V1.

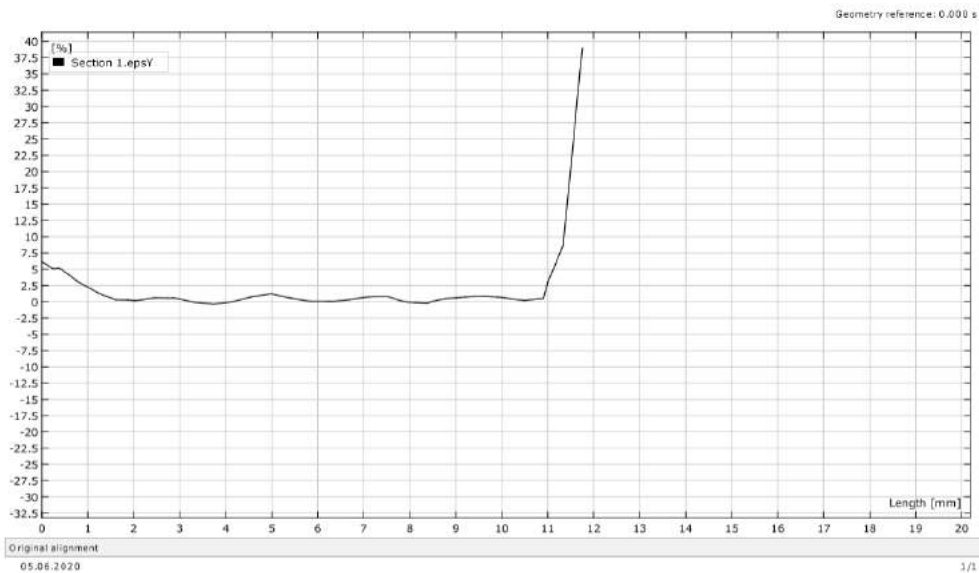


Ilustración 98: Deformación a lo largo de la sección V1

Generated with GOM Correlate 2019



Deformación a lo largo de la sección seleccionada. V2.

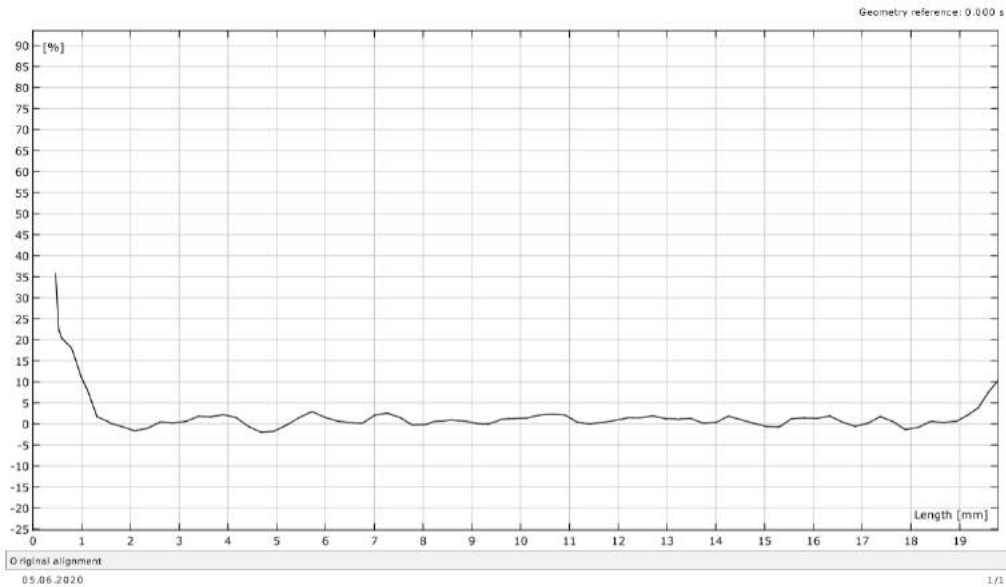


Ilustración 99: Deformación a lo largo de la sección V2

Generated with GOM Correlate 2019



Deformación a lo largo de la sección seleccionada. V3.

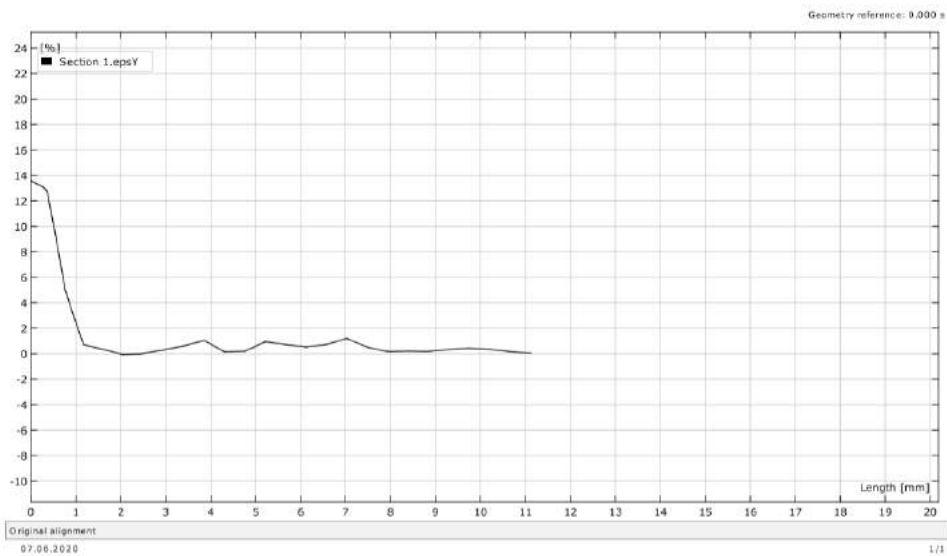


Ilustración 100: Deformación a lo largo de la sección V3

Se observa que la gráfica que forma los valores de las deformaciones es casi plana y que los valores no cambian mucho a lo largo de la probeta y son bastante similares a los leídos por la máquina que ha realizado el ensayo a tracción. Este hecho es bastante positivo a la hora de analizar si se ha cumplido el objetivo de poder utilizar el programa Aramis para analizar estas probetas.

#### 4.3.2 ESTUDIO DE LA VELOCIDAD (MM/S) CON LA QUE SE DEFORMA LAS PROBETA EN EL MOMENTO JUSTO ANTES DE ROMPER

La velocidad a la que se deforma un material tiene su influencia en sus propiedades mecánicas. A mayor velocidad, el material se vuelve más rígido y consecuentemente su tensión máxima es mayor que si la deformación se realiza a menor velocidad. Además, a mayor velocidad, el ultimo valor de deformación leído es menor que si se compara con un ensayo realizado a menor velocidad. Debido a esta influencia, es interesante también estudiar este factor

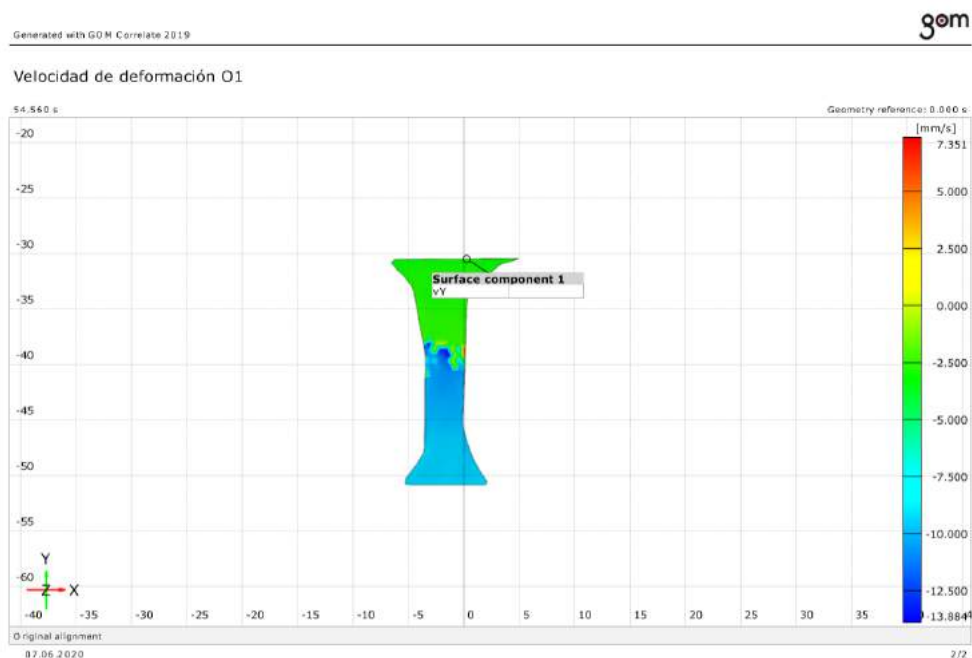


Ilustración 101: Velocidad de deformación justo antes de romper O1

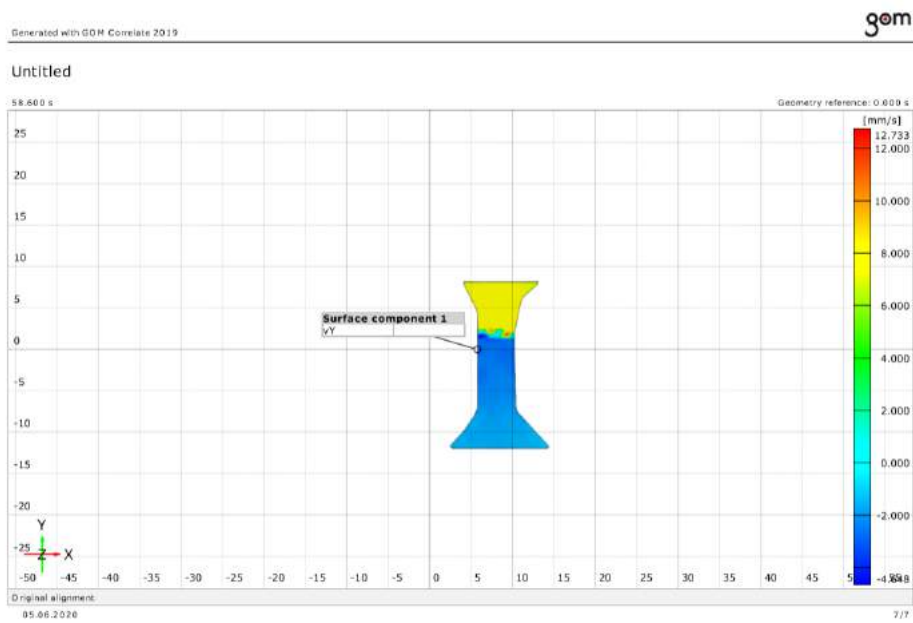


Ilustración 102: Velocidad de deformación justo antes de romper O2

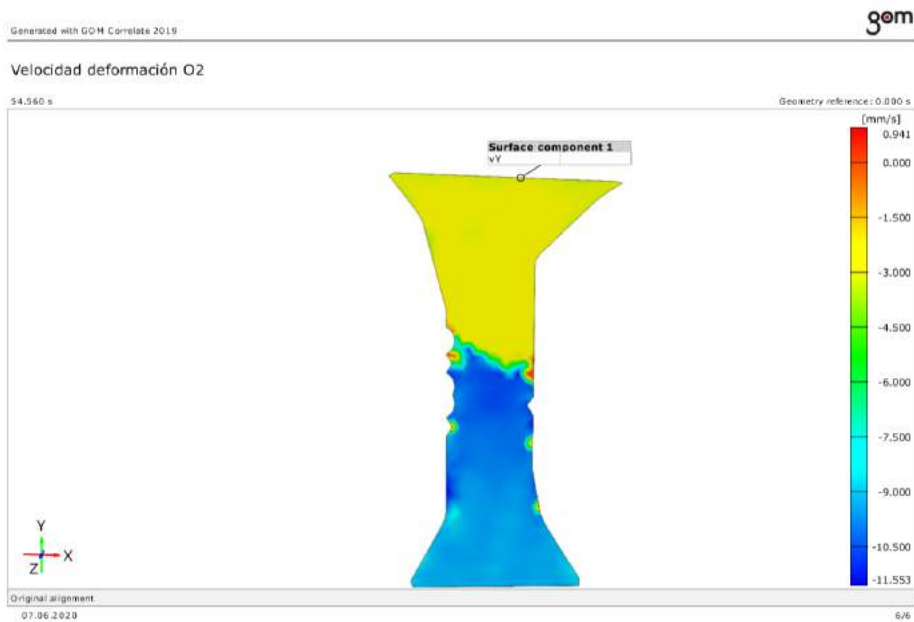


Ilustración 103: Velocidad de deformación justo antes de romper O3

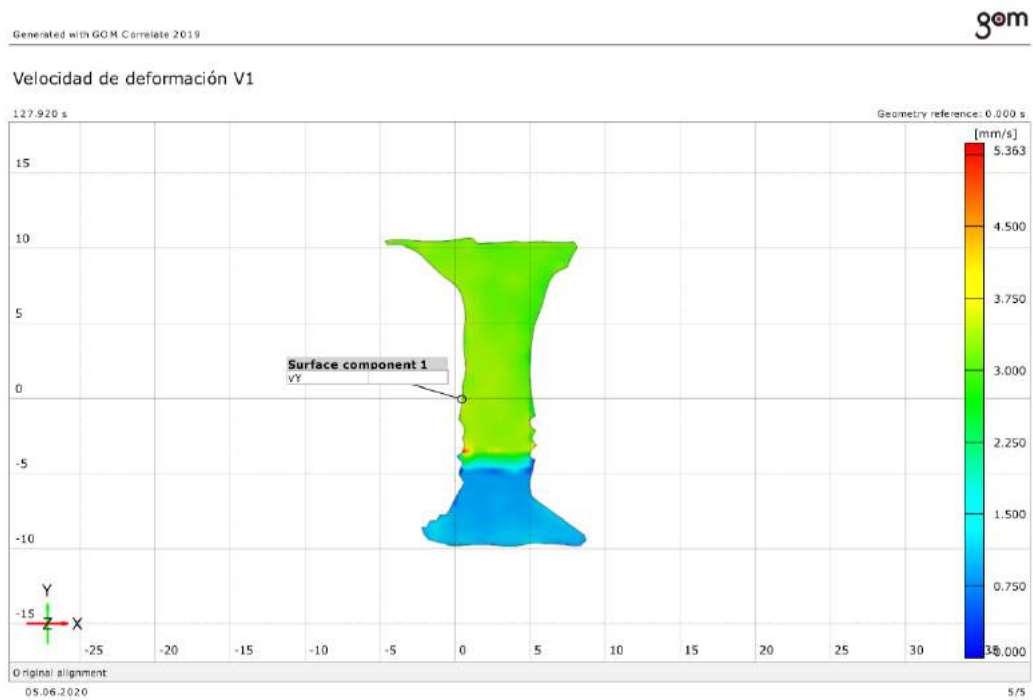


Ilustración 104: Velocidad de deformación justo antes de romper V1

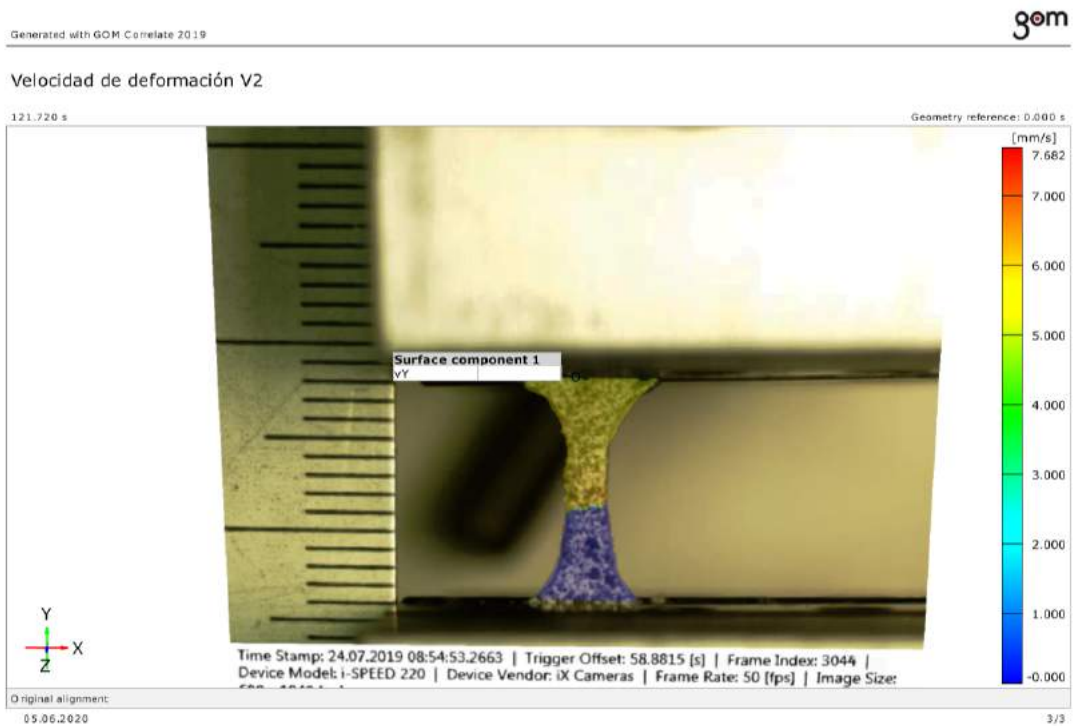


Ilustración 105: Velocidad de deformación justo antes de romper V2

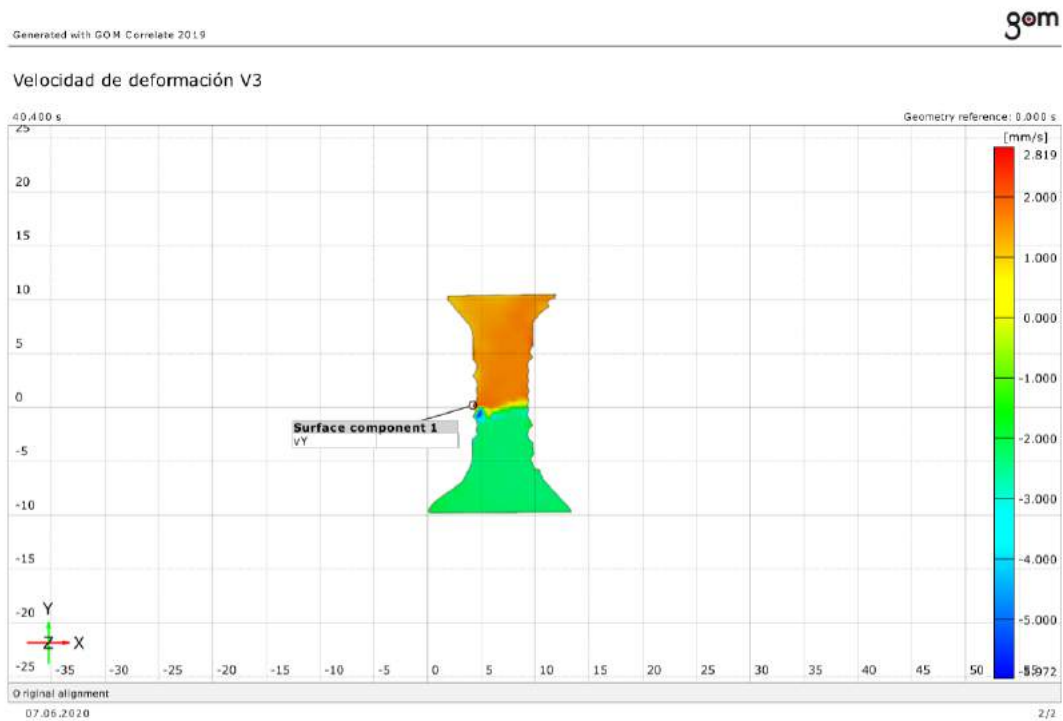


Ilustración 106: Ilustración 106: Velocidad de deformación justo antes de romper V3

Se observa fácilmente que, en todas las probetas, la velocidad con la que se deforman los puntos no es la misma en toda la probeta, sino que es mayor en la zona superior de la probeta que en la zona inferior.

## **Capítulo 5. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### ***5.1 COMPLICACIONES Y LIMITACIONES SURGIDAS DURANTE EL DESARROLLO DEL PROYECTO***

Como en todo trabajo realizado con un programa informático, surgen diversas complicaciones. En primer lugar, cabe destacar la incompatibilidad del programa con iOS, lo que limita su utilización a ordenadores que funcionen con procesador Windows. Debido esto, al principio se utilizó el programa en los ordenadores que ofrecía la universidad de intercambio (Rochester Insitute of Techonology), y posteriormente la situación inesperada vivida por el COVID-19 requirió la compra de un nuevo ordenador portátil para el trabajo desde casa que tuviese los siguientes requisitos: CPU Intel Core i3 y RAM: 4 GB RAM.

Una vez comenzado el estudio de los videos de los ensayos, el programa enviaba un mensaje de error cuando se ejecutaban órdenes de forma seguida. El propio programa ofrecía como solución usar el procesamiento por software en lugar de procesamiento GPU. Este cambio se realiza desde el panel de control del ordenador, en la sección de Opciones avanzadas de las propiedades de internet. Este cambio ayudó al software a procesar las órdenes recibidas, aunque el mensaje de error seguía apareciendo, pero no de forma tan frecuente. Se debía continuar controlando desde el administrador de tareas, el CPU del procesador y la memoria RAM para que el programa no se bloquease. Esto puede deberse a que el programa necesita una tarjeta gráfica más potente para procesar las órdenes.

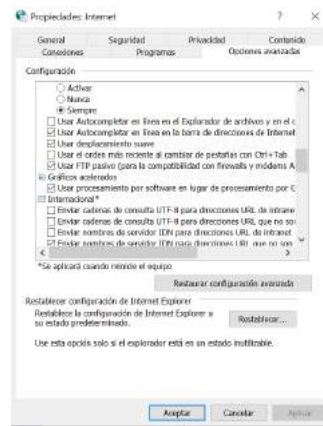


Ilustración 107: Cambio a la utilización del procesamiento por software.

Otra de las complicaciones que aparecieron durante la utilización del programa, fue que al crear el componente superficie, la superficie resultante no tenía la misma forma que la probeta, por lo que se tuvo que regular los tamaños de las facetas y la distancia entre los puntos para que su forma fuera lo más ajustada posible. Además, se tuvo que volver a realizar todos los cálculos al descubrir que la calidad de la superficie dibujada no era buena, y debido a que el programa utilizado es la versión gratuita, no permite realizar cambios en la forma de la superficie, por lo que se tuvo que crear una nueva empezando de cero.

Las probetas V1 y V3, han dado dificultades a la hora de la creación de la probeta. A pesar de seleccionar toda la probeta, el programa solo leía la mitad de ella, siendo los resultados obtenidos basados solo en la parte superior de la misma. La razón por la que ocurre esto no ha sido investigada, y quedará como tarea a mejorar para futuros estudios.

Además, el pequeño número de muestras a estudiar limitaba la práctica de la utilización del programa.

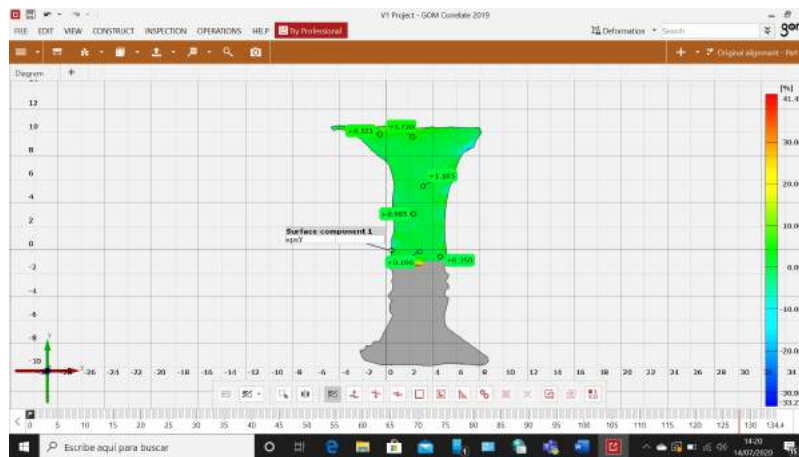


Ilustración 108: Probeta V1 con la superficie solo creada para la mitad superior de la superficie.

## **5.2 POSIBLES MEJORAS**

Con objeto de obtener mejores datos, hubiese sido de ayuda haber estudiado que calidad de imagen requiere el programa para que los resultados sean buenos. Esto ayudaría a la previa grabación del ensayo y aseguraría que los datos obtenidos son los correctos.

Además, se podría haber estudiado más profundamente el funcionamiento del programa. Esto podría haber dado la solución al por qué en las probetas V1 y V3 la superficie solo es reconocida en la mitad superior, aun que también puede deberse a una falta de calidad en el grabado de la imagen.

Para facilitar el trabajo con el software en proyectos futuros, seria aconsejable utilizar un ordenador con una tarjeta gráfica más potente, o añadirle la tarjeta que recomienda el propio programa: NVIDIA quadro for optimized hardware rendering.

## **5.3 PROYECTOS FUTUROS**

De cara a trabajos futuros se propone seguir estudiando más probetas y ver si, mejorando el patrón de puntos dibujados en la probeta, los datos obtenidos se acercan más a lo ideal, dando lugar a gráficas tensión-deformación en donde se pueda distinguir fácilmente la región

elástica de la plástica y los valores de deformación aumenten a la vez que aumenta la fuerza aplicada

## Capítulo 6. CONCLUSIONES

Tal y como se ha explicado en la introducción, para llegar a desarrollar una metodología válida y poder obtener resultados de ella, que es la principal finalidad, es necesario previamente cumplir otros objetivos. En concreto, los objetivos planteados en este proyecto fueron tres.

Con los resultados obtenidos en este TFG, se presentan las siguientes conclusiones:

- **Objetivo 1, Desarrollo y aprendizaje del funcionamiento del programa Aramis (GOM Correlate):** Este objetivo se ha cumplido satisfactoriamente. Se ha realizado un manual paso a paso, en el que se explica los pasos a seguir para realizar el estudio de la deformación, la velocidad de deformación, el trazado de una sección de la muestra y su consecuente estudio y al extracción de los resultados obtenidos en archivos PDF y Excel.
- **Objetivo 2, Aplicación del programa al estudio de las probetas:** Tal y como muestra el Capítulo 4.2, se ha sido capaz de aplicar las herramientas que ofrece el software al estudio de las propiedades mecánicas de cada una de las seis probetas. Se ha estudiado la deformación de varios puntos de cada probeta cuyos valores han sido extraídos y utilizados para calcular las gráficas Tensión-Deformación de cada uno de los puntos. Además, se ha estudiado los valores de deformación de cada uno de los puntos que forma una sección trazada por la mitad de la probeta y se ha obtenido la velocidad de deformación de la probeta debido a su influencia en la rigidez del material.
- **Objetivo 3, verificar la hipótesis planteada mediante la obtención de alguna conclusión durante el estudio de las probetas.** Se ha llevado a cabo el estudio de cada una de las seis probetas, pero no ha sido posible llegar a ningún patrón de

comportamiento de las propiedades mecánicas de las probetas según su edad. Esto se debe al pequeño número de ensayos que se ha podido realizar.

- **Objetivo principal:** En relación al objetivo principal del trabajo, que es **el desarrollo de una metodología para inferir las propiedades mecánicas del tejido óseo pediátrico**, con los resultados obtenidos en este trabajo sobre la utilización del software, se puede considerar que se ha cumplido con éxito.

## Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

GOM Correlate, <https://www.gom.com/3d-software/gom-correlate.html#downloadForm>

Kemper AR, McNally C, Kennedy EA, Manoogian SJ, Rath AL, Ng TP, Stitzel JD, Smith EP, Duma SM, Matsuoka F. Material properties of human rib cortical bone from dynamic tension coupon testing. *Stapp car crash journal*, 2005; 49:199-230

Luis García Rodríguez, *Desarrollo de una metodología para inferir las propiedades mecánicas del tejido óseo pediátrico con fines biomecánicos*. Madrid , Junio 2020.

Services, W., 2020. *La Movilidad Sostenible Es El Peaje Imprescindible Para Lograr Los ODS*. [online] Motorpasion.com.

Available at: <https://www.motorpasion.com/espaciotoyota/movilidad-sostenible-peaje-imprescindible-para-lograr-ods>

Subit D. *Update on the rib coupon tests, 2009*. Preparado para Japan Automobile Research Institue.

Subit D, Arregui C, Salzar R, Crandall J. Pediatric. *Adult and elderly bone material properties*. International Research Council on Biomechanics of Injury, 2013. Gothenburg, Sweden. 760-769

Youtube, G., 2020. *Youtube*. [online] Youtube.com. Available at: <https://www.youtube.com/user/GOMMetrology>

## ANEXO I: OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los objetivos de desarrollo sostenible son diecisiete metas a cumplir por los 193 estados que componen la ONU de aquí al 2030. Esta iniciativa tiene sus principios en el año 2000 donde los objetivos propuestos eran 8 y cuyo plazo era hasta 2015. En 2015, tras el cumplimiento de los 8 objetivos anteriores, los países desarrollaron una Agenda de Desarrollo 2030, que es un plan de acción en favor de las personas, el planeta y la prosperidad. También tiene por objeto fortalecer la paz universal dentro de un concepto más amplio de la libertad.

Los 17 objetivos de desarrollo sostenible son los siguientes:



Si se observan los títulos de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible en ninguno de ellos se puede encontrar la palabra movilidad; tampoco términos como seguridad vial o incluso movilidad sostenible. Pero para alcanzar algunas de las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, la movilidad representa un objetivo transversal imprescindible. Por lo tanto, aunque sea indirectamente su implicación en todos los Objetivos de Desarrollo Sostenible, es importante.

En primer lugar, para llegar a favorecer la salud y el bienestar de los seres humanos, Objetivo de Desarrollo Sostenible número 3, es necesario garantizar la seguridad en el automóvil. El objetivo de este proyecto, es desarrollar una metodología que permita mejorar la seguridad de los pasajeros mediante el estudio del comportamiento de las propiedades del tejido óseo

de especies animales y extrapolarlas a las propiedades humanas ante colisiones sufridas en un accidente de coche. Gracias al desarrollo de este proyecto, se podrá determinar la influencia que tienen ciertos factores como la edad o el género en las propiedades mecánicas óseas y consecuentemente mejorar los sistemas de seguridad en automoción. El desarrollo de esta metodología permitirá ampliar el número de muestras a ensayar, debido a la utilización de tejidos óseos animales, y con los resultados obtenidos se obtendrá más información acerca del comportamiento de los huesos. Estos descubrimientos proporcionarán datos para saber si ajustar el sistema de seguridad de un automóvil a las características del pasajero disminuiría las lesiones sufridas en los impactos. Como objetivo para el 2020, se propuso reducir a la mitad el número de muertes y lesiones causadas por accidentes de tráfico en el mundo entero con respecto a 2010.

En segundo lugar, en el Objetivo de Desarrollo Sostenible número 11 se habla de la correcta planificación de las ciudades a nivel urbanístico y de servicios, la cual engloba un sistema de transporte seguro, que de servicio a toda la población. La concentración de la población en las ciudades es un hecho. Si en el año 2015 alrededor de 4.000 millones de personas se concentraban en núcleos urbanos, en 2030 las previsiones suben esa cifra hasta aproximadamente 5.000 millones de personas. Esta densidad de población, unida a la necesaria interconexión entre localidades, hace que sea necesario plantearse desplazamientos sostenibles.

En este sentido, una de las metas es la siguiente: *“De aquí a 2030, proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público, prestando especial atención a las necesidades de las personas en situación de vulnerabilidad, las mujeres, los niños, las personas con discapacidad y las personas de edad”*.

