



TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño y fabricación de un dispositivo de
ensayo multiaxial para sólidos
hiperelásticos

**GRADO INGENIERÍA MECÁNICA
(2016-2017)**

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Autor: Alvaro Jimenez Pijoan
Tutor académico: Jesús Pernas Sánchez

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a la Universidad Carlos III por formarme como ingeniero y enseñarme los conocimientos para poder desarrollar una buena carrera profesional de forma competente y preparada.

Agradecer a Jesús Pernas-Sánchez por aceptar ser mi tutor en este proyecto y ayudarme a lo largo de su duración para poder concluir mi carrera.

Por último y no por ello menos importante, dar las gracias a mi familia, en especial a mis padres por hacer un esfuerzo para costear mis estudios y criarme en un ambiente de constancia y esfuerzo con el que me he podido sobreponer a cualquier adversidad que se me ha presentado durante estos años. También me gustaría dar las gracias a mis compañeros durante este bonito periodo, tanto a Nicolás Fernández-Coppel como a Diego Prieto, quienes estudiaron conmigo en los momentos de más estrés y me ayudaron cuando lo necesitaba.

“Los científicos estudian el mundo como es, los ingenieros crean el mundo que
nunca ha existido” Theodore **Van Karman**

RESUMEN

El proyecto de ingeniería que se expone en esta memoria se basa en el diseño y la fabricación de un dispositivo con el que poder realizar ensayos multiaxiales en sólidos. Más en detalle, se centra en el análisis de los sólidos denominados hiperelásticos, los cuales poseen la capacidad de recuperar su forma y estado tensional original incluso después de haber sido sometidos a un sistema de fuerzas que ha multiplicado su área.

Debido a esa gran característica, este tipo de materiales son muy comunes en la industria actual de cualquier sector. Por ello, existe una necesidad de tener un dispositivo pequeño y barato con el que poder realizar pruebas. Dicha evaluación se ha realizado mediante una técnica moderna, denominada D.I.C, basada en programas informáticos de correlación de imágenes, capaces de establecer una superficie de estudio y analizar distintos parámetros como la deformación mayor o el desplazamiento de cada punto de la muestra.

En concreto, se ha utilizado el software GOM Correlate, con el que se ha sacado distintas graficas que permiten estudiar la multiaxialidad del conjunto en las distintas fotos tomadas durante de la experimentación.

ABSTRACT

The engineering project presented in this report is based on the design and manufacture of a device with which to carry out multiaxial tests in solids. More in detail, it focuses on the analysis of so-called hyper elastic solids, which have the ability to recover their original shape and tensional state even after they have been subjected to a system of forces that has multiplied their area.

Because of this great feature, these types of materials are very common in today's industry in any field. Therefore, there is a need to have a small and cheap tool with which to test. This evaluation was carried out using a modern technique, called D.I.C, based on image correlation software, capable of establishing a study surface and analyzing different parameters such as major deformation or displacement of each point in the sample.

In particular, the GOM Correlate software has been used, with which different graphs have been extracted that allow to study the multiaxiality of the set in the different photos taken during the experimentation.

ÍNDICE DEL PROYECTO

1.

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1- MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS	7
1.1.1- MOTIVACIÓN	7
1.1.2- OBJETIVOS	9
1.2- PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO	9
2. ESTADO DEL ARTE	11
2.1- RASGOS GENERALES DE LOS POLÍMEROS Y SU CLASIFICACIÓN	11
2.2 - ELASTOMEROS	13
2.3- POLIISOPRENO (CAUCHO NATURAL O SINTETICO)	14
2.3.1- VULCANIZACIÓN	16
2.3.2 - ESTRUCTURA DEL CAUCHO	16
2.4 - CARACTERIZACIÓN HIPERELÁSTICA	17
2.5 - RSS (RADIAL STRETCHING SYSTEM)	22
2.6 - DIC (DIGITAL IMAGE CORRELATION)	25
2.6.1- CALIBRACIÓN	27
2.6.2- MEDICIÓN DEL CONTORNO	27
2.6.3- MEDICIÓN Y CALCULO DE LAS DEFORMACIONES	27
2.7 - GOM CORRELATE	28
2.7.1- ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN Y MOVIMIENTO EN 3D	28
2.7.2- INSPECCIÓN BASADA EN LA LÍNEA DE TIEMPO	28
2.7.3- MAPEO DE IMÁGENES	29
2.7.4- MATEMÁTICAS PERSONALIZABLES	29
2.7.5- CONCEPTO DE SOFTWARE PARAMÉTRICO	29
3. DISEÑO	30
3.1 - PROBLEMAS CON LOS PLANOS ORIGINALES	31
4. FABRICACIÓN Y MONTAJE	34
5. EXPERIMENTAL: EVALUACIÓN DE LA BIAxIALIDAD	37
5.1- CONCEPTOS TEÓRICOS	37
5.2- PINTADO DE LOS SPECKLES	38
5.3 - REALIZACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS	40
5.4 - RESULTADOS DE LOS ENSAYOS	41
MUESTRA 1	42
5.5 – EXTENSION DEL CAMPO DE DEFORMACIONES UNIFORME	46
5.6 - INFLUENCIA DEL TIPO DE SPECKLE.	51
MUESTRA 2	52
MUESTRA 3	53
MUESTRA 4	55
6. CONCLUSIONES	57

7. PRESUPUESTO	58
7.1 - PRESUPUESTO ORIGINAL DE MATERIALES.	58
7.2 - PRESUPUESTO DESVIADO DE MATERIALES.	60
7.3 - PRESUPUESTO MANO DE OBRA.	60
8. TRABAJOS FUTUROS	61
8.1 – AUTOMATIZACION DEL PROCESO DEL MOVIMIENTO MECÁNICO.	61
8.2 – CONTROL DE LA FUERZA APLICADA.	61
8.3 – MEJORA EN LAS CONDICIONES DE CONTORNO.	61
8.4 – ESTUDIO DE DIFERENTES MATERIALES ELASTOMEROS.	62
8.5 – FEM.	62
9.BIBLIOGRAFÍA	62

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto se basa en el estudio del comportamiento de materiales elastómeros, en especial la rama cuyo comportamiento es hiperelástico, la cual cuenta con muchas aplicaciones a nivel industrial y científico. El estudio se centra en la actuación de un material elastómero, como es un globo hinchable corriente de caucho natural (látex).

El caucho natural se obtiene de un líquido lechoso de color blanco llamado látex, que se encuentra en numerosas plantas. Tras realizar una vulcanización sus propiedades son excelentes : incrementa su módulo de Young, elasticidad y mayor resistencia a los cambios de temperatura que el no vulcanizado; además es impermeable a los gases y resistente a la abrasión, acción química, calor y electricidad. También posee un alto coeficiente de rozamiento en superficies secas y un bajo coeficiente de rozamiento en superficies mojadas por agua. [1]

Este primer capítulo se divide en tres bloques fundamentales. En primer lugar, se expone la motivación para el desarrollo de este trabajo, así como los objetivos a cumplir para el correcto desarrollo del proyecto. A continuación, se detalla esquemáticamente el tiempo estimado que requiere cada fase del proyecto.

1.1- MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

Una vez descrito brevemente el tema de estudio de este proyecto, en este apartado se describen la motivación y objetivos planteados para la realización del mismo.

1.1.1- MOTIVACIÓN

Este tipo de elastómero tiene una gran función dentro de la angioplastia, que es un procedimiento para abrir vasos sanguíneos estrechos o bloqueados que suministran sangre a las piernas. Los depósitos de grasa se pueden acumular dentro de las arterias y bloquear el flujo de sangre. En la angioplastia, se usa un “globo” médico para dilatar las arterias bloqueadas. El globo ejerce presión contra la pared interior de la arteria para abrir

espacio y mejorar el flujo de sangre. Para impedir que la arteria se estreche de nuevo, a menudo se coloca un stent (malla de metal) a lo largo de la pared arterial. En la ilustración 1 se detalla gráficamente el proceso de la angioplastia citado: [3]

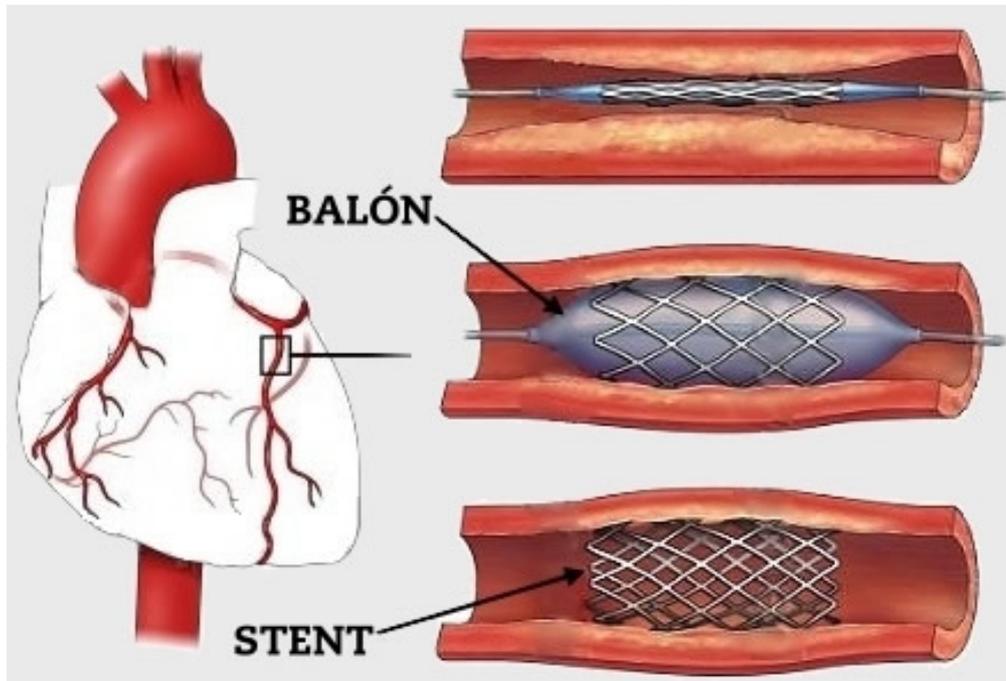


Ilustración 1- Ejemplo de la aplicación de un stent mediante angioplastia.

A su vez, a nivel industrial, se puede encontrar este tipo de material en las denominadas O-Rings o juntas tóricas, utilizadas en distintos cilindros hidráulicos y neumáticos con el fin de asegurar la estanqueidad de los fluidos. Este tipo de juntas con forma toroidal suelen estar en las uniones de piezas desmontables impidiendo el intercambio de fluidos, función muy importante como se pudo observar en el lanzamiento del Transbordador Espacial Challenger, el cual se desintegró rápidamente debido al fallo en una de estas juntas.

Debido a esta importancia en la industria tanto mecánica como sanitaria como se puede observar, se quería evaluar el comportamiento de este globo mediante un programa de correlación de imágenes llamado GOM Correlate que nos establece el desarrollo de su deformación gradual.

1.1.2- OBJETIVOS

El objetivo principal de este proyecto es evaluar el comportamiento de los materiales hiperelásticos como los globos nombrados anteriormente.

Para ello es necesario un dispositivo con el que poder realizar este experimento, y en el laboratorio de la universidad no contaban con este tipo de instrumento para poder realizar un ensayo multiaxial con el que nos permita evaluar el material en estados complejos de tensión.

Por este motivo, se pretende fabricar un dispositivo que nos permita estudiar el comportamiento elástico radial del material mediante la aplicación de distintas cargas y poder tomar varios fotogramas para su posterior estudio en el programa de simulación.

Por lo tanto, nuestros objetivos son:

- Fabricar un dispositivo de ensayo multiaxial para sólidos elastómeros.
- Estudiar la deformación de globos de látex a través de un programa informático de correlación digital de imágenes.
- Ser capaces de establecer el comportamiento multiaxial de las muestras que se utilizaran durante la experimentación.

1.2- PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO

El trabajo de ingeniería que se propone consta de una fase inicial más teórica relacionada con la documentación sobre el tema y el diseño; y otra parte práctica asociada a la fabricación del sistema experimental y a la evaluación de los resultados de deformación.

Para ello se estableció antes de su realización un GANTT que se encuentra en el anexo 3, el cual se planificaba el trabajo en cinco grandes módulos que tendrían subdivisiones. A continuación se presenta un resumen del mismo:

MÓDULO 1: DOCUMENTACIÓN

- Materiales elastómeros e hiperelásticos (10 horas).
- Programas de correlación de imágenes de deformación de sólidos y aprendizaje de los mismos a través de tutoriales didácticos (20 horas).

MÓDULO 2: DISEÑO

- Establecer el diseño correcto y modificar el ya previsto para las condiciones del proyecto (14 horas)

MÓDULO 3: FABRICACIÓN Y MONTAJE

- Preparación de cortes de metacrilato por láser (4 horas).
- Compra de herramientas y tornillería necesaria (3 horas).
- Montaje (7 horas).

MÓDULO 4: MEDICIONES

- Mediciones (20 horas).

MÓDULO 5: REALIZACIÓN DE LA MEMORIA

- Teoría, análisis y comparación de resultados (60 horas).
- Revisión y conclusiones (10 horas).

MÓDULOS	HORAS DE TRABAJO	SEMANAS APROXIMADAS
MÓDULO 1: DOCUMENTACIÓN	30	3
MÓDULO 2: DISEÑO	14	1

MÓDULO 3: FABRICACIÓN Y MONTAJE	14	1,5
MÓDULO 4: MEDICIONES	15	1,5
MÓDULO 5: ELABORACIÓN DE LA MEMORIA	70	5
TOTAL	143	12

Tabla 1 - Módulos de planificación del trabajo de ingeniería expuesto con la duración correspondiente.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1- RASGOS GENERALES DE LOS POLÍMEROS Y SU CLASIFICACIÓN

Los polímeros, como el origen griego de la palabra indica, son macromoléculas formadas por la unión de moléculas pequeñas denominadas monómeros, las cuales se unen entre sí mediante enlaces covalentes. Debido a esta forma de generación que tienen los polímeros, no es infrecuente que presenten grandes pesos moleculares, en algunos casos superiores a 100.000 moles. [2]

Gracias a las múltiples aplicaciones que pueden tener este tipo de material debido a sus magníficas propiedades y a su producción sintética es normal que formen parte de nuestro día a día. En general, la atracción de sus grandes cadenas poliméricas les aporta la gran resistencia mecánica característica. Estas fuerzas de atracción pueden ser de varias clases según la composición de la cadena polimérica. [2]

El patrón que se repite a lo largo de la cadena polimérica se denomina unidad repetitiva y a través de la reacción de polimerización se unen formando la estructura alargada. [2]

Este tipo de reacción puede ser de dos tipos:

- **Polimerización de crecimiento en cadena:** los monómeros se unen progresivamente uno a uno formando cada vez una cadena más larga (dímero-trímeros -tetrameros...) [4]
- **Polimerización de crecimiento en etapas:** los monómeros se unen progresivamente, pero de formas diferentes, existiendo la unión de dímeros entre sí o directamente entre cadenas de mayor longitud de monómeros, siendo mucho más rápido el proceso. [4]

Además, la polimerización puede ser de dos formas:

- **Por adición:** en la cual el monómero no pierde átomos al unirse a la cadena, por lo que la composición del polímero es la suma de sus monómeros, evitando subproductos. [4]
- **Por condensación:** en la cual el monómero por lo contrario pierde átomos en el proceso de unión, generando por tanto subproductos y quedando un polímero cuya composición no es la suma de sus monómeros. [4]

Respecto a la clasificación de los polímeros, existen muchas según lo que se quiera evaluar, aunque para el proyecto se ha escogido la que se muestra a continuación en la ilustración 2:

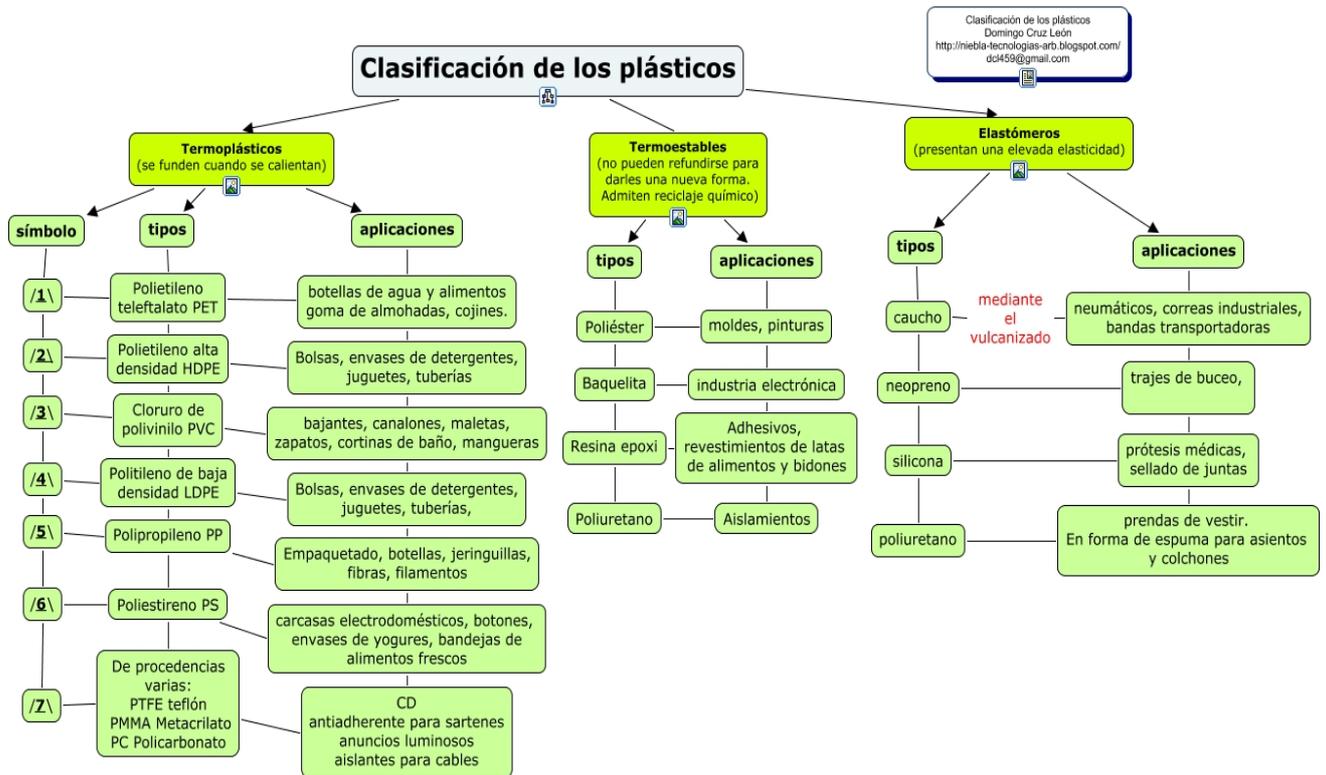


Ilustración 2 - Esquema de la clasificación de los polímeros.

2.2 - ELASTOMEROS

Los elastómeros son un tipo de polímeros, cuyo nombre se podría definir como “caucho”, y cuya principal característica es que se pueden estirar hasta ocho veces su propia longitud sin producir en ellos una deformación permanente tras dicho esfuerzo. Hay distintos subtipos como pueden ser el polisopreno, el polibutadieno, el polisobutileno o los poliuretanos. [5]

Las moléculas que conforman esta cadena polimérica se encuentran desordenadas y enredadas entre ellas, y cuando se produce el estiramiento logran alinearse en la dirección del mismo. Cuando esto ocurre, puede haber riesgo de cristalización en las cadenas

debido al orden de dichas moléculas. Una vez se de someter a esa presión de estirado, las moléculas vuelven a su estado caótico, recuperando la forma original. [5]

Tras aplicarles numerosos aditivos en su producción, los elastómeros tienen diversas aplicaciones por su gran protección contra la corrosión y la abrasión o su aislamiento eléctrico; mangueras, suelas de calzado, recubrimientos o juntas son algunos de los ejemplos que nos podemos encontrar diariamente. [6]

El primer caucho disponible fue el látex de caucho natural, el poliisopreno. Sin embargo, el látex de caucho natural extraído del árbol no tiene muchas aplicaciones, pues gotea y se pone pegajoso cuando se calienta, y se endurece volviéndose quebradizo cuando se enfría.

2.3- POLIISOPRENO (CAUCHO NATURAL O SINTETICO)

El caucho es un hidrocarburo elástico, químicamente conocido como cis -1,4-poliisopreno o también denominado polímero del isopreno, el cual se extrae de una sustancia lechosa conocida como látex. Esta sustancia se encuentra en la savia de diversas plantas, aunque su fuente principal es un árbol llamado *Hevea brasiliensis*, del cual se extrae como se muestra en la ilustración 2, también se produce sintéticamente. Otras fuentes de látex menos comunes pueden ser el *ficus euphorkingdom heartsbias* y el diente de león común. [7]



Ilustración 3- Ejemplo de la extracción de látex de un tronco de Hevea Brasiliensis.

El látex se calienta o se mezcla con ácido acético, produciendo la coagulación entre pequeñas cantidades de la sustancia y los hidrocarburos en suspensión que permite la extracción del líquido. El resultado es el caucho en bruto, el cual no cuenta con la capacidad de recuperar la forma primitiva después de estirarse, tiene un aspecto viscoso y pegajoso, e incluso adopta un tacto duro y quebradizo en frío y blando en caliente. [7]

Debido a las condiciones que presenta fue un producto que, aunque se descubrió hace cientos de años en las indias occidentales, permaneció mucho tiempo en el desuso, hasta que Charles Goodyear en 1839 realizó su experimento más conocido. Tras amasar el caucho natural con azufre y calentar la mezcla por encima de los 100°, se produce la combinación química del azufre con el caucho obteniendo un producto con mejores propiedades. El nuevo hallazgo se trataba de un material que no se deformaba con el calor, ni se quebraba con el frío y perdía ese tacto pegajoso. Además, tras este proceso, se podía estirar el material sin perder su forma original tras dejar de aplicar la tensión. Nació así lo que hoy conocemos como caucho. A este proceso se le denomina vulcanización. [7]

2.3.1- VULCANIZACIÓN

Se trata de un proceso que se realiza generalmente con azufre, aunque hay muchas técnicas conocidas con otros aditivos como el peróxido orgánico. En la vulcanización del caucho, como se observa en la ilustración 4, los enlaces CH están al lado de los enlaces doble carbono-carbono, siendo reemplazados por cadenas de átomos de azufre que enlazan los sitios de cura de las cadenas poliméricas. Estos puentes contienen de uno a ocho átomos de azufre, y según dicho número nos podemos encontrar con un producto final con unas propiedades mecánicas u otras. Entrecruzamientos cortos derivan en una mayor resistencia al calor del caucho, sin embargo, los largos provocan mayor capacidad dinámica. [8]

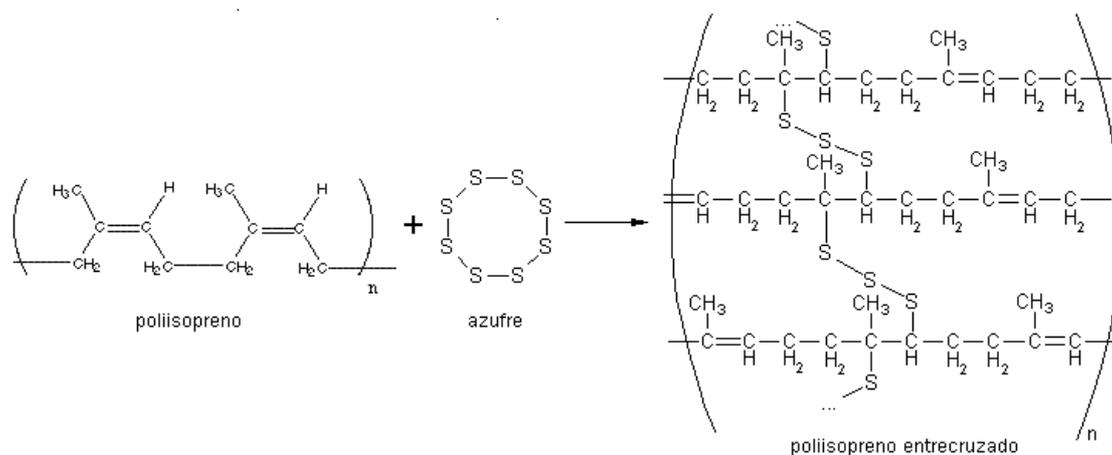


Ilustración 4- Esquema de la organización de átomos en el proceso químico que se produce en la vulcanización.

2.3.2 - ESTRUCTURA DEL CAUCHO

Michael Faraday determinó la fórmula empírica del caucho natural, C₅H₈. En concreto se trata de un polímero del 2-metil-1,3-butadieno. Las uniones de los monómeros del polímero pueden ser cis o trans como se aprecia en la ilustración 5. El natural, en concreto, presenta la conformación cis en todos sus enlaces, es decir, se trata de la adición 1,4 de varios miles de unidades de isopreno. [9]

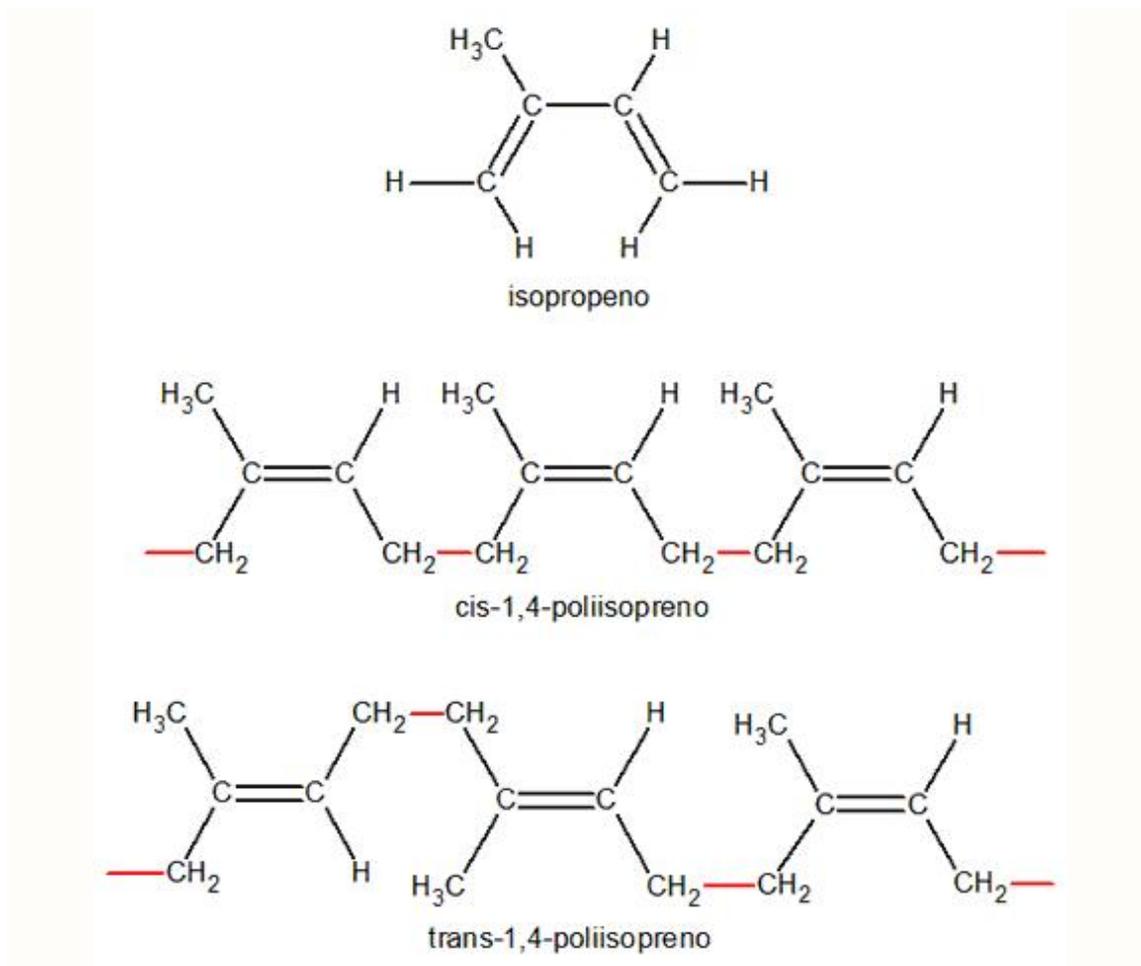


Ilustración 5 - Esquema de la composición cis y trans que puede presentar el caucho.

2.4 - CARACTERIZACIÓN HIPERELÁSTICA [12]

Un material hiperelástico es aquel que presenta la capacidad para poder experimentar deformaciones de gran tamaño, un 500% en tensión y un 90% a compresiones elásticas debido a cargas pequeñas, sin perder sus propiedades primitivas. Hay una amplia gama de polímeros que se pueden evaluar mediante ecuaciones constitutivas hiperelásticas, y se utiliza la teoría no lineal de la elasticidad para analizar estos casos. Este comportamiento significa que su rigidez, en lugar de ser constante, es función de la deformación. [10-11]

Las principales características que nos podemos encontrar en materiales que presenten este fenómeno son:

- Grandes deformaciones.
- No presenta deformaciones permanentes.
- Esfuerzo y deformación no son proporcionales.

En la siguiente ilustración se muestra el comportamiento standard de un material hiperelástico, el cual podemos dividir en tres: al principio el material sufre una deformación lineal, posteriormente se aprecia una pendiente de deformación con un rango pequeño, dando lugar a una región de densificación que provoca altos esfuerzos. [11]

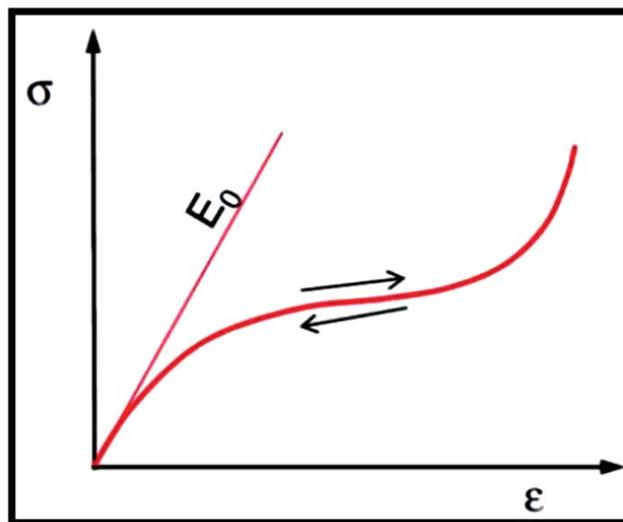


Ilustración 6 - Gráfica tensión- deformación de un material hiperelástico estándar.

. El comportamiento de un material hiperelástico se puede obtener a partir de la derivada de la energía de la deformación:

$$\sigma_{ij} = \partial U / \partial \epsilon_{ij}$$

La caracterización hiperelástica comienza con la elección de la función de energía elástica de deformación, la cual poseen todos los materiales elásticos.

Para definir una función de energía elástica, existen dos puntos de vista distintos [Gil-Negrete, 2004]:

1.- Teoría cinética o estadística:

Para obtener las propiedades elásticas del caucho, utiliza modelos idealizados de la estructura del caucho vulcanizado y se basa en las observaciones de que la fuerza elástica del caucho proviene casi completamente del decrecimiento de la entropía al aumentar la extensión aplicada.

Los modelos que se basan en esta teoría son: Treloar (modelo Neo-Hooke), Arruda-Boyce.

2.- Teoría fenomenológica:

Se trata el problema desde el punto de vista de la mecánica del continuo. Los términos de las funciones de la energía de deformación se eligen porque se ajustan a diferentes curvas en lugar de por su interpretación molecular, como el caso anterior.

Se construye un marco matemático para caracterizar el comportamiento del caucho, por lo que no se tiene en cuenta la estructura microscópica o conceptos moleculares.

Los modelos que se basan en esta teoría son: Ogden, Mooney-Rivlin, Gent.

Estas teorías carecen de conexión física directa con el mecanismo de deformación. La técnica consiste en un ajuste de curvas a uno o varios modos de deformación para obtener el valor de las constantes que dependen del material y extrapolarlos a modos de deformación más complejos.

La energía elástica de deformación por unidad de volumen (W) depende de la deformación medida [Rivlin, 1990]]:

$$W = W(B) \quad (1)$$

B: Tensor de deformaciones izquierdo de Cauchy-Green $\rightarrow \mathbf{B} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^T$

F: Matriz de gradiente de deformación $\rightarrow F_{ij} = \frac{\partial x_i}{\partial X_j}$

Gracias a las extensiones unitarias y las deformaciones principales, el estado de deformación quedará totalmente definido y la función energía de deformación se puede expresar como:

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, n_1, n_2, n_3)$$

Si el material se considera isótropo, no habrá dependencia direccional:

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$$

Se pueden utilizar las invariantes de deformación en vez de las extensiones unitarias, y, como es un caso de material incompresible, no habrá dependencia del tercer invariante, el cual expresa el cambio de volumen, por lo tanto:

$$W = W(I_1, I_2)$$

I_1 : Primer invariante (invariante lineal)

I_2 : Segundo invariante (invariante cuadrático)

I_3 : Tercer invariante (invariante volumétrico) Considerando las condiciones iniciales $I_3=1$.

Relacionando las configuraciones no deformada y deformada:

$$x_i = f(X_j) \quad \begin{aligned} x_1 &= \frac{l_1}{L_1} X_1 = \lambda_1 X_1 \\ x_2 &= \frac{l_2}{L_2} X_2 = \lambda_2 X_2 \\ x_3 &= \frac{l_3}{L_3} X_3 = \lambda_3 X_3 \end{aligned}$$

Si se sustituyen estos valores en el tensor de gradiente de deformación F se obtiene la siguiente matriz:

$$[F_{uniaxial}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial X_1} & \frac{\partial x_1}{\partial X_2} & \frac{\partial x_1}{\partial X_3} \\ \frac{\partial x_2}{\partial X_1} & \frac{\partial x_2}{\partial X_2} & \frac{\partial x_2}{\partial X_3} \\ \frac{\partial x_3}{\partial X_1} & \frac{\partial x_3}{\partial X_2} & \frac{\partial x_3}{\partial X_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}$$

Mediante la ecuación (1) calculamos el tensor de deformaciones izquierdo de Cauchy-Green:

$$[B] = [F][F]^T = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Por lo que los invariantes de deformación serán:

$$I_1 = \text{tr} (B) = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = 0,5 [\text{tr} (B)^2 - \text{Tr}(B^2)] = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2$$

$$I_3 = \det (B) = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2$$

Al ser material incompresible – $I_3=1 \Rightarrow \lambda_3= 1/(\lambda_1 \lambda_2)$

Como estableció Rivlin, el tensor de Cauchy de un material hiperelástico, isótropo e incompresible se puede establecer mediante la expresión:

$$[\sigma] = 2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + I_1 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) [B] - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} [B]^2 + P[I] \quad (3)$$

W: función de densidad de energía de deformación

B: Tensor de deformaciones.

Tras sustituir los valores de (2) y (3), se tienen las tensiones de Cauchy:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} \lambda_1^2 + 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} ((\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2) \lambda_1^2 - \lambda_1^4) + P \\ \sigma_2 &= 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} \lambda_2^2 + 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} ((\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2) \lambda_2^2 - \lambda_2^4) + P \\ \sigma_3 &= 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} \lambda_3^2 + 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} ((\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2) \lambda_3^2 - \lambda_3^4) + P \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Por lo tanto, eliminando las presiones que no conocemos de la expresión, obtenemos las relaciones de Rivlin entre las tensiones unitarias y las principales referidas a las dimensiones deformadas. Así nos queda una ecuación que depende de la forma de W:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\lambda_1^2 - \lambda_2^2} &= 2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_3^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \\ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\lambda_1^2 - \lambda_3^2} &= 2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_2^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \\ \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\lambda_2^2 - \lambda_3^2} &= 2 \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_1^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

2.5 - RSS (RADIAL STRETCHING SYSTEM)

El equipo de la Universidad Johannes Kepler en Linz (Austria) liderado por el Dr. Stefan E. Schausberger, tras observar la necesidad de un equipo de prueba compacto y fácil de disponer para medir materiales elásticos, desarrollo un dispositivo de tamaño de escritorio que realiza una deformación radial. Este nuevo dispositivo tiene código abierto para el público y permite duplicar el diámetro de una membrana de elastómero mientras se mide la fuerza aplicada. A su vez, la sencillez relativa del producto supone unos costes muy reducidos comparándolos con los aparatos de deformación equibiaxial disponibles en el mercado. [13]

Para llevar a cabo la caracterización del material se utilizan sensores de desplazamiento y de fuerza que miden la deformación y la tensión en la membrana de

muestra. Estas mediciones se llevan a cabo mientras se realizan ensayos de cizalladura pura y de estiramiento equiaxial para evaluar las propiedades de los elastómeros. [13]

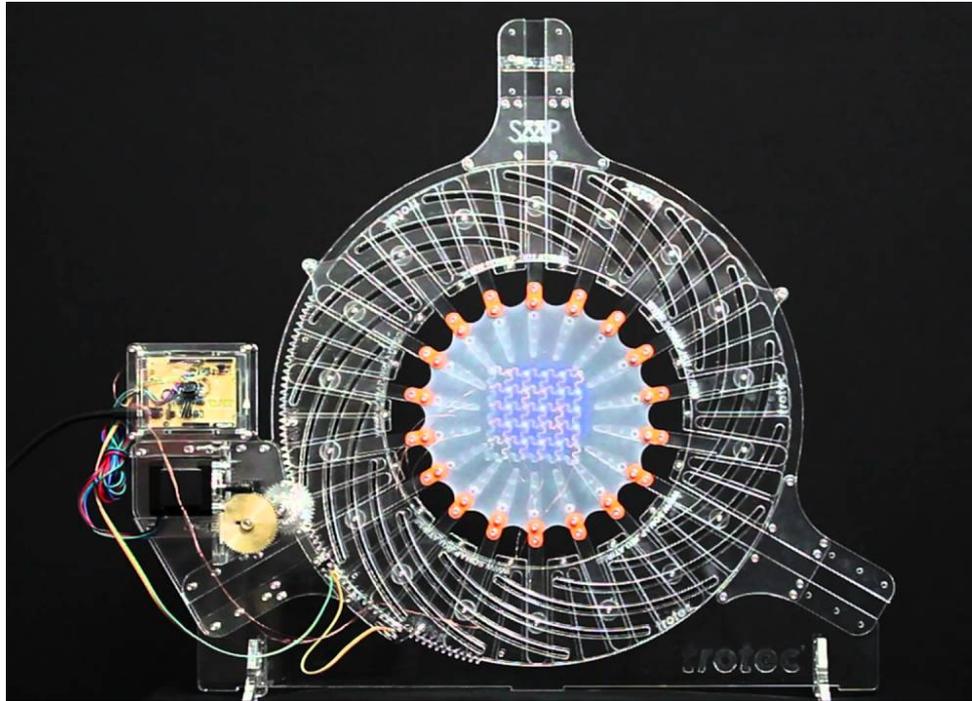


Ilustración 7- Diseño del Radial Stretching System original, en su versión v4.

El principio básico de trabajo del RSS es extender la muestra girando manualmente un bastidor montado sobre una base. La rotación del bastidor da lugar al movimiento radial de varios brazos que sostienen la muestra. La ubicación de un sensor de fuerza se ajusta al mismo radio que la muestra mediante una manivela que permite la lectura de una medida de fuerza válida desde una pantalla digital. [13]

El diseño del RSS mostrado en la ilustración 7 consta de 18 brazos encargados de sostener y extender la membrana, cada cual sigue una pista curvada que pertenece a un bastidor giratorio, cuya rotación produce la separación de estos de manera sincronizada, aumentando el diámetro de la muestra. Dichos brazos se guían dentro de un bastidor estático intercalado entre las partes giratorias gracias a los rodamientos de bolas y a una lubricación con aceite de silicona. Cada uno consta de un orificio de 3mm donde se colocan las arandelas (previamente impresas en 3D) ancladas con un tornillo, que dotan

de la rugosidad necesaria para la liberación del estrés. Uno de estos brazos se sustituye por un sensor de fuerza que permite el cálculo de curvas tensión-deformación bajo carga equiaxial, teniendo un balance de resorte con una barra de núcleo de ferrita montada en su interior que se desliza libremente. [13]

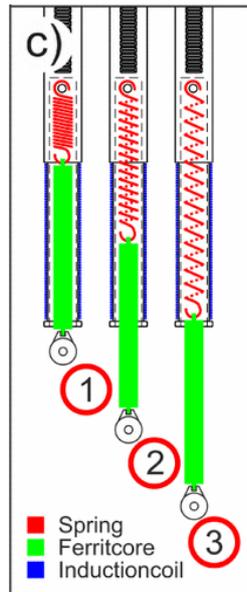


Ilustración 8 - Ejemplo simplificado del movimiento resorte-varilla en el brazo con el sensor de fuerzas.

La inducción varía a medida que el núcleo se mueve por la bobina. Como se aprecia en la ilustración 8 cuando se aplica la fuerza el resorte se alarga y la varilla de ferrita se mueve fuera, dando lugar a una inductancia más baja que se mide con el circuito eléctrico. Los puntos obtenidos están equipados con una relación parabólica entre la inducción y la fuerza. Esta parábola se utiliza para relacionar las mediciones de la inductancia con la fuerza mecánica aplicada. El uso de diferentes salidas de resorte (por ejemplo, 1, 10, 100 N) se implementa en el código fuente. [13-14]

Por lo tanto, el RSS se encarga de alcanzar el equilibrio con una deformación constante fijando la extensión radial de la muestra y variando la fuerza en consecuencia. Conociendo el grosor y la relación de deformación de fuerza se obtiene la curva de

tensión-deformación cuya inspección detallada permite analizar cualquier modelo hiperelástico, como el modelo de Kuhn o Gent. [13-14]

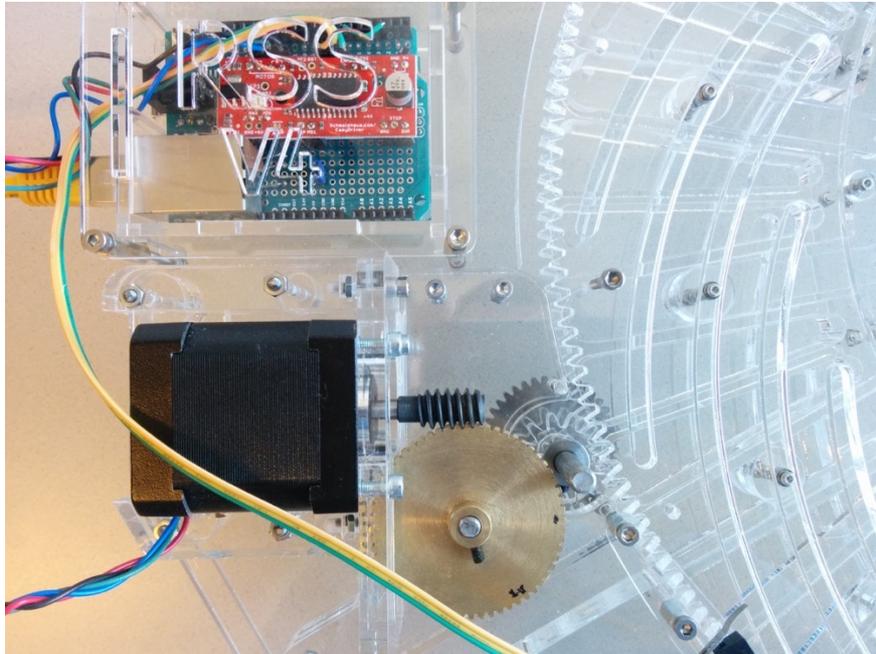


Ilustración 9 - El motor del sistema RSS y los engranajes en detalle.

2.6 - DIC (DIGITAL IMAGE CORRELATION)

La correlación de imagen digital, denominada por sus siglas en inglés D.I.C es una técnica para medir el contorno y la deformación en casi cualquier material en 3D o 2D a campo completo y sin contacto. Gracias a los nuevos avances en cuanto a fotografía de alta resolución para aplicaciones estáticas y dinámicas se han ampliado las fronteras para este método, siendo en el momento actual una opción flexible y útil para el análisis de deformación. La técnica se puede utilizar en muchas pruebas, incluyendo tracción, torsión, flexión y carga combinada desde micro áreas hasta áreas de gran tamaño. [15-16]

Las características de esta técnica son: [15-17]

- Visualización en tiempo real del desplazamiento y la tensión en una imagen 3D.
- Correlación en vivo con una salida analógica que evalúa, muestra y emite datos al instante en la pantalla de un equipo externo.
- Un sistema de cámaras capaces de captar el material en 360° midiendo los datos necesarios y de tomar 1.000.000 de fotogramas por segundo.
- Un área de medición desde menos de 1mm² hasta áreas de más de 1m².
- Procedimiento de calibración automática rápido y sencillo.
- Todos los datos obtenidos con un margen de error mínimo.
- Grabación sincronizada de los datos analógicos.
- Diferentes sistemas de coordenadas.

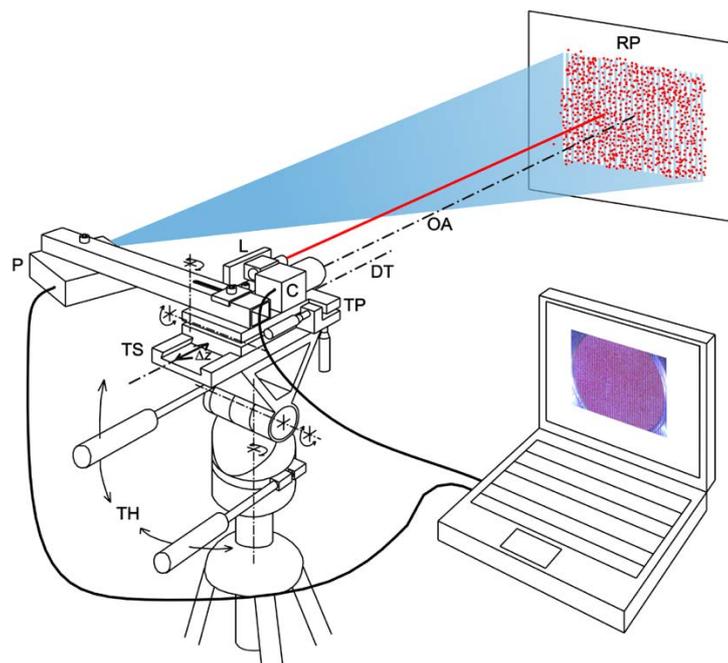


Ilustración 10 - Esquema de un experimento estándar utilizando una técnica D.I.C. Se necesita una cámara que dote de imágenes de la muestra al programa.

En la ilustración 10 se muestra un esquema de cómo se realizan los experimentos con esta técnica. El método consiste en emplear un algoritmo de reconocimiento de patrones para la detección de cambios en la distribución en escala de grises de los patrones

superficiales que se producen durante el esfuerzo elástico-plástico. A continuación se presentan un poco más a fondo alguna de sus ventajas. [15-17]

2.6.1- CALIBRACIÓN

La calidad en la medición se obtiene gracias a la precisión con la cual los parámetros intrínsecos (ocupados de la distancia focal, punto principal y parámetro de distorsión) y extrínsecos (vector de traducción y matriz de rotación) se combinan a la hora de tomar las imágenes. [16]

2.6.2- MEDICIÓN DEL CONTORNO

A través del algoritmo de correlación se identifica un punto de objeto en las imágenes, del cual se buscan puntos homólogos, realizando así el contorno de la muestra. [16]

2.6.3- MEDICIÓN Y CALCULO DE LAS DEFORMACIONES

Una vez calculados los parámetros que se van transformando en las imágenes bajo distintas condiciones de carga, es relativamente sencillo determinar tanto el vector desplazamiento como la deformación de cada punto estudiado. [16]

Debido a las grandes ventajas que presenta esta técnica, sus aplicaciones son variadas y la han convertido en una de las practicas más usadas en sectores de industria automovilística y aeroespacial, haciéndola ideal por ejemplo en casos de investigación de fracturas mecánicas, ya que nos puede proporcionar información exacta de la distribución local y global de las deformaciones. [15-17]

2.7 - GOM CORRELATE

Dentro de la tecnología D.I.C existen varios programas de correlación de imágenes. Para el proyecto se ha considerado utilizar un programa de la empresa GOM, una empresa alemana muy conocida en el sector de análisis de materiales, denominado GOM Correlate. Las características principales de este software son:

2.7.1- ANÁLISIS DE DEFORMACIÓN Y MOVIMIENTO EN 3D

Este trabajo se realiza mediante un rastreo exhaustivo de los grupos de puntos definidos por el usuario con el fin de consolidarlos. Tras este estudio se establecen automáticamente unas coordenadas 3D en todas las imágenes evaluadas, con las cuales obtenemos los desplazamientos como se muestra en la ilustración 11. Esto nos permite jugar con 6 grados de libertad que podemos rotar en el espacio 3D. [18]

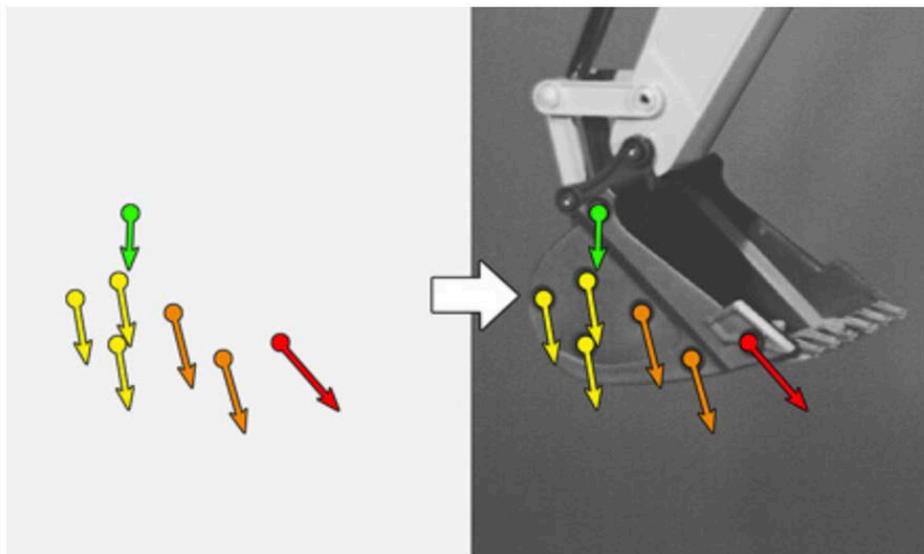


Ilustración 11- Ejemplo del análisis de desplazamientos de varios puntos del balde de una excavadora.

2.7.2- INSPECCIÓN BASADA EN LA LÍNEA DE TIEMPO

Se trata de un elemento integrado en la interfaz gráfica que ayuda a la gestión de proyectos de medición. Con el fin de definir las áreas de interés, estas funciones se

implementan como escalas de etapas permitiendo navegar por los datos de medición y enfocar las evaluaciones. [18]

2.7.3- MAPEO DE IMÁGENES

El mapeo de imágenes realiza una función de interfaz intuitiva de usuario que lo encamina por todos los pasos del trabajo para la definición del proyecto y el análisis de los resultados. Las imágenes finales se muestran instantáneamente como en la siguiente ilustración. [18]

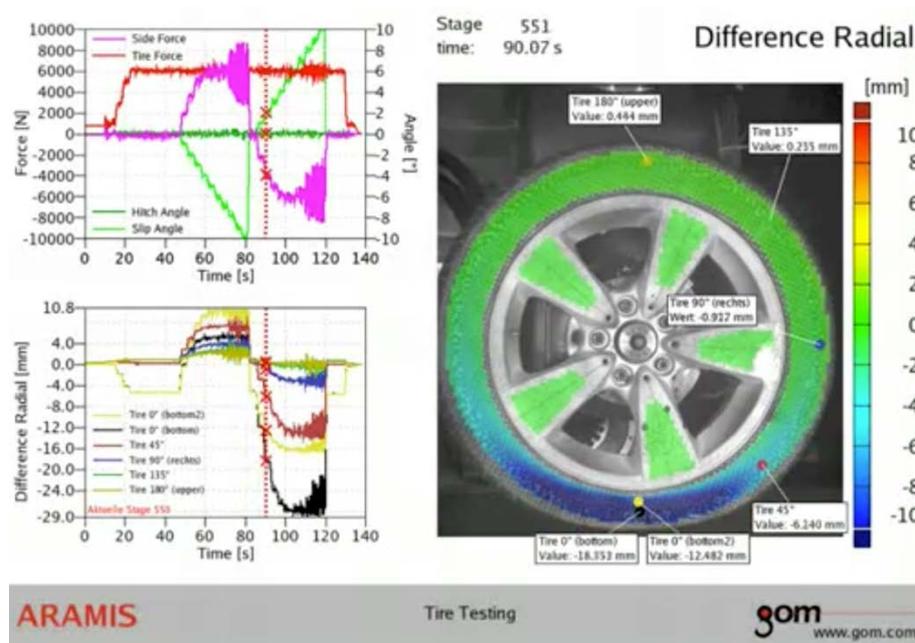


Ilustración 12- Ejemplo de la interfaz intuitiva en la muestra de resultados de un análisis en una rueda de coche.

2.7.4- MATEMÁTICAS PERSONALIZABLES

Este software nos permite aplicar matemáticas y formulas definidas previamente por nosotros mismos, aunque la mayoría de los resultados se calculan utilizando principios preestablecidos en el programa. [18]

2.7.5- CONCEPTO DE SOFTWARE PARAMÉTRICO

Con el concepto paramétrico de GOM, cada elemento individual retiene su ruta de creación dentro de la estructura del software. Todas las acciones y pasos de evaluación

son completamente trazables y están interrelacionados. Los elementos individuales se pueden modificar y ajustar en cualquier momento, y una solución de un solo botón actualiza todos los elementos dependientes automáticamente después de realizar los cambios. [18]

3. DISEÑO

El diseño de dispositivos pequeños y compactos con los que poder aplicar un estiramiento multiaxial se remonta hasta el trabajo sobre la deformación de los cascos textiles realizado por Haas a principios del siglo XX. No fue hasta 1958 cuando Treloar publica el uso de un sistema de estiramiento que lograba un aumento del área de la muestra de un 800%, a través de cuerdas fijadas en una chapa de caucho cuadrado y guiadas por poleas usando abrazaderas equidistantes, aplicando un esfuerzo prácticamente homogéneo. Rivlin y Saunders se basaron en este proyecto y reemplazaron los pesos con resortes logrando un control de la fuerza y la tensión aplicada. Pero la mayoría de estas técnicas no permiten el estiramiento cíclico y gracias al avance en las propiedades de los materiales es necesario este dispositivo moderno.

El proyecto se basa en el Radial Stretching System creado por la Universidad de Kepler en Linz, aunque sufriendo unas modificaciones con el fin de simplificarlo. Esta variación respecto al diseño original se basa en la ausencia del modelo electrónico del sistema, perdiendo así el motor que alimenta los engranajes y los aspectos electrónicos como el sensor de fuerza automático y el sistema eléctrico, así como el Arduino.

Tras establecer conexión con la universidad austriaca y con el Dr. Schausberger vía email durante varias semanas explicándole el interés en el proyecto, se decidió empezar una colaboración que iba a tener sus frutos para ambas partes con la realización de este proyecto. Los planos del dispositivo se han obtenido a través de la página web de la universidad citada, en una sección donde cuelgan los proyectos realizados. Dichos planos se han acotado y se encuentran en el Anexo 1. Las piezas para la construcción se obtuvieron cortando estos mismos mediante cortes por láser en Taller Resopal Madrid,

tras pedir presupuesto en varios establecimientos dedicados al corte por láser de distintos materiales como Ceplasa, Lasercor o Fiber Laser. Este establecimiento nos ofreció la posibilidad de realizar los cortes en un periodo corto de tiempo y con un coste de aproximadamente 100 € menor que los otros establecimientos a los que se acudió.

3.1 - PROBLEMAS CON LOS PLANOS ORIGINALES

Una vez cortados los planos originales, obtenidas ya todas las herramientas y tornillería necesaria, se llevó a cabo el montaje del dispositivo. En este montaje se apreció que se había producido un error en alguno de los pasos previos ya que las piezas no encajaban como debería. Las caras laterales del sistema, las cuales giran proyectando ese movimiento a los brazos, debían de apoyar sobre los rodamientos instalados en la pieza base para facilitar el giro, y esto no sucedía. Existía una holgura palpable entre dicha pieza y los rodamientos por lo que estas dos piezas no se ubicaban bien y tenían impedido el giro por el contacto con la base como se aprecia en la ilustración 13. Este problema también se observaba en el contacto de la cara lateral con la base, el cual no debería existir en un diseño normal ya que impide el desplazamiento fluido por el rozamiento como se expone en la ilustración 14.

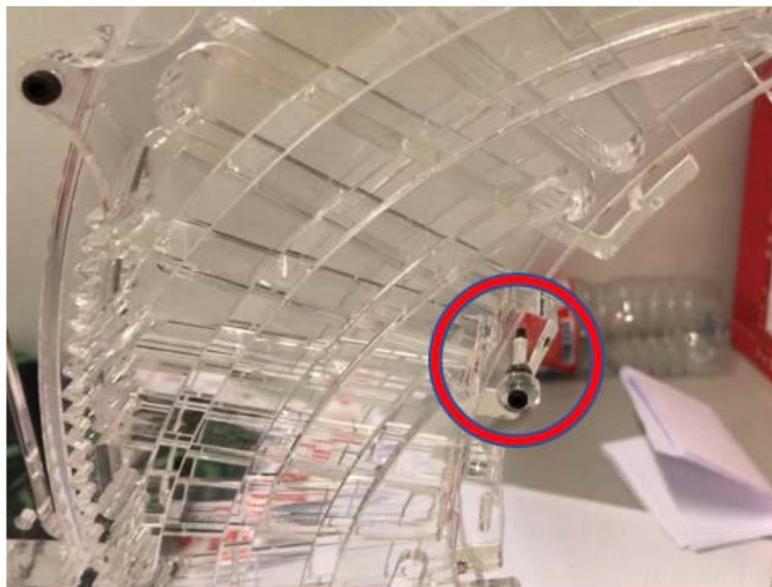


Ilustración 13 - El círculo rojo muestra la holgura existente entre el rodamiento y la cara lateral que impide el movimiento fluido.

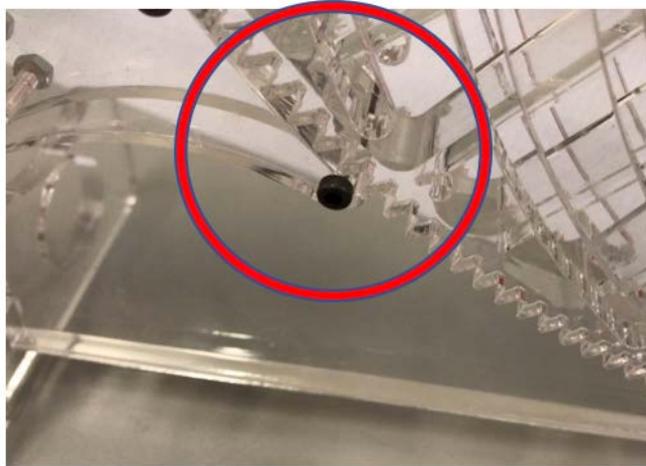


Ilustración 14 - El círculo rojo muestra el contacto entre la cara lateral y la base por no encajar bien las piezas.

Esto supuso una gran controversia al no saber cuál era la raíz del problema; un mal corte por láser o unos planos erróneos. Se decidió realizar el conjunto del dispositivo combinando todos los planos de las piezas sueltas en AutoCAD y los resultados fueron positivos. Existía una holgura de 3mm entre los rodamientos y el diámetro interior de las caras laterales, el resto del conjunto encajaba perfectamente. Se llevó a cabo la reducción de dicho diámetro para un nuevo corte y una vez resuelto este problema el sistema era fluido. El error se notificó al Dr. Stefan E. Schausberger vía email, quien tras revisarlo asumió su culpa y agradeció nuestra colaboración colgando los planos del conjunto en la página web oficial, los cuales se encuentran también en el Anexo 2, junto con mi nombre y las imágenes mostradas anteriormente del problema existente en los planos originales del proyecto. Esto ayudó a afianzar la colaboración entre las universidades que seguirán colaborando en los próximos avances y modificaciones del RSS. En el siguiente extracto del plano principal del conjunto se detalla el cambio:

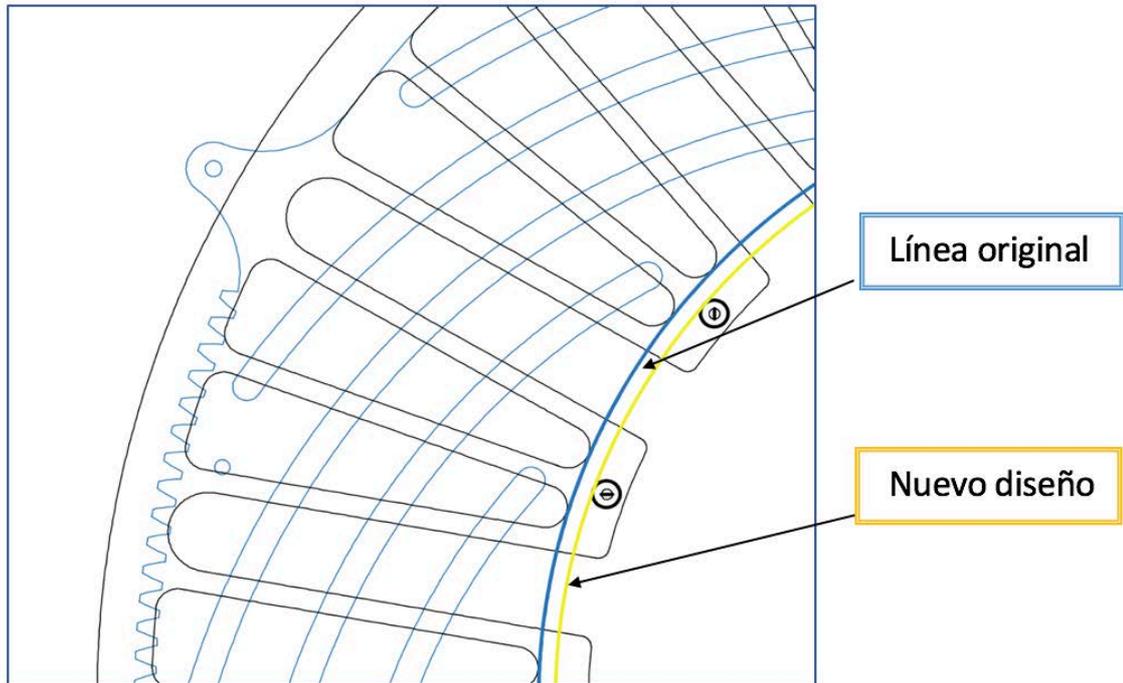
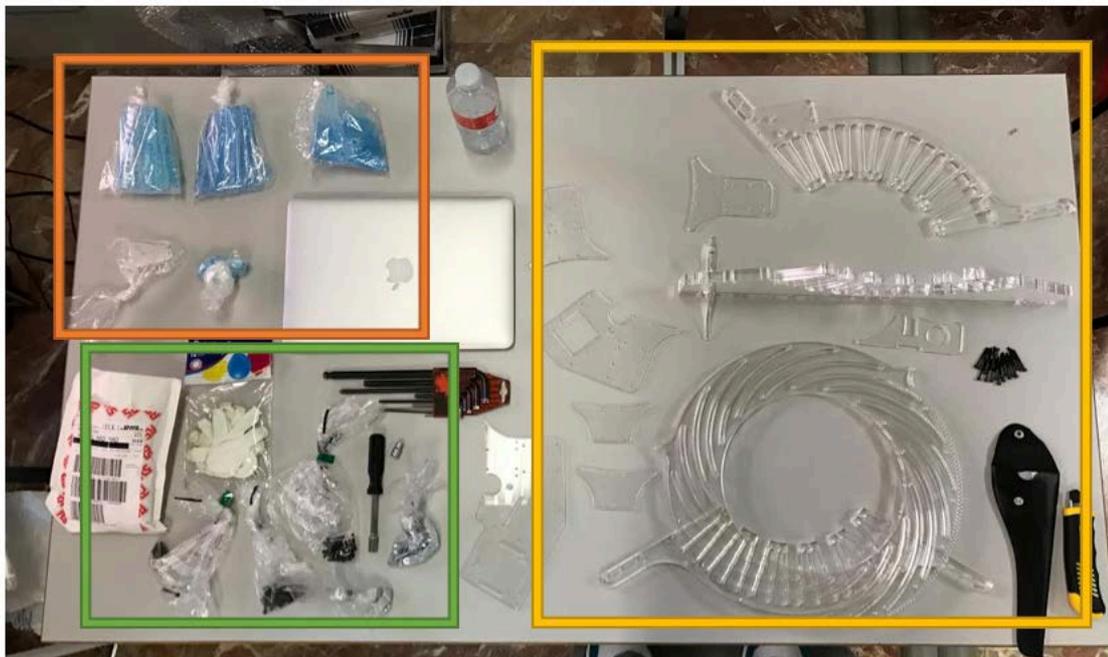


Ilustración 15 - Extracto del plano del conjunto en el cual se aprecia la modificación del diámetro realizada.

4. FABRICACIÓN Y MONTAJE

Una vez cortadas todas las piezas por láser, y recibida toda la tornillería y herramientas necesarias se llevó a cabo el montaje. El montaje se terció un poco laborioso, debido a la cantidad de piezas y en especial al pequeño tamaño de la tornillería en general, siendo en gran parte de métrica 2. Éste se realizó en un aula de la universidad siguiendo las fotos que aporta la página web del proyecto RSS original y consto de tres partes diferenciadas:



 Piezas base

 Tornillería y
rodamientos

 Piezas
secundarias

Ilustración 16 - Esquema general de los objetos utilizados en el montaje.

Partiendo de la disposición que se muestra en la ilustración 16; Primero se montó la pieza base que consta de tres partes principales que se disponen creando una figura circular mediante varias piezas que logran sujetar estas tres partes con tornillos y tuercas de métrica 3. Tras esta primera parte el conjunto quedaría así:



Ilustración 17 - Disposición del dispositivo tras la primera parte del montaje.

Después se realizó el montaje de los brazos con sus correspondientes ejes de rodamientos, y los ejes transversales a las piezas base en los que apoyarían las caras laterales. Este paso fue el que más tiempo consumió dentro de la fabricación ya que se trata de sistemas complejos en los que es necesario montar entre cuatro y cinco tuercas por brazo y eje como se muestra en la imagen siguiente:



Ilustración 18 - Izq: Foto detallada del montaje final de un brazo del dispositivo. Der: Foto que muestra la disposición de cada eje acoplado a la base del dispositivo en el cual apoyan las caras laterales.

Finalmente se ensamblaron los brazos en las piezas base entre las dos caras laterales, que se unieron entre sí mediante un tornillo de métrica 3 atravesando un cilindro hueco que ayudaría a ejercer el movimiento del conjunto de manera manual. Tras el montaje de las caras laterales se fijaron todas las tuercas con el fin de que el dispositivo cumpliera las expectativas y funcionara mejor. La siguiente imagen muestra el dispositivo final montado completamente y con un speckle preparado para la experimentación en el estado inicial del mismo:



Ilustración 19 - Apariencia final del dispositivo montado.

5. EXPERIMENTAL: EVALUACIÓN DE LA BIAxIALIDAD

5.1- CONCEPTOS TEÓRICOS

El objetivo de esta experimentación es el ajuste del diseño y la verificación del estado de cargas biaxial de las muestras (speckles), es decir, validar el equipo de experimentación fabricado para que permita realizar ensayos multiaxiales, concepto que se basa en diferentes apuntes teóricos que se exponen a continuación:

Un estado biaxial de tensiones como el que se presenta en los ensayos del proyecto, en el cual se produce una elongación igual en todos los puntos de la muestra, produce una relación entre las ϵ equiparables a la de un punto singular, circular o isótropo en tensión plana, en el cual $\sigma_z=0$ y $\sigma_x=\sigma_y$ al tratarse de un sistema radial que en el que todas las direcciones son iguales.

A pesar de que en grandes deformaciones no se debe aplicar la Ley de Hooke, en elastómeros se pueden alcanzar deformaciones finitas en las que esta aproximación deja de tener validez por lo que en este ejemplo basándose en las ecuaciones constitutivas de la elasticidad, que son:

$$\begin{aligned}\epsilon_{\theta} &= \frac{1}{E}\sigma_{\theta} - \frac{\nu}{E}(\sigma_r + \sigma_z) \\ \epsilon_r &= \frac{1}{E}\sigma_r - \frac{\nu}{E}(\sigma_{\theta} + \sigma_z)\end{aligned}$$

Observamos que si establecemos las relaciones citadas anteriormente, correspondientes a un estado biaxial ($\sigma_z=0$ y $\sigma_{\theta}=\sigma_r$), las deformaciones tendrán el mismo valor cumpliéndose también la relación $\epsilon_{\theta}=\epsilon_r$. Por lo tanto, se trata de un sistema en el cual Epsilon X, Epsilon Y, Epsilon 1 y Epsilon 2 serán iguales ya que las tensiones principales coincidirían también y el parámetro γ_{xy} será de valor nulo. En el

caso que se expone a continuación el software está limitado y no permite obtener el valor de γ_{xy} , el cual debería de ser muy pequeño contando que no se trata de un experimento cuyos valores reflejan perfectamente los teóricos por distintos motivos que se expondrán en la realización.

El Circulo de Mohr correspondiente a un estado multiaxial equitensional, debido a lo citado anteriormente, quedaría de la siguiente manera:

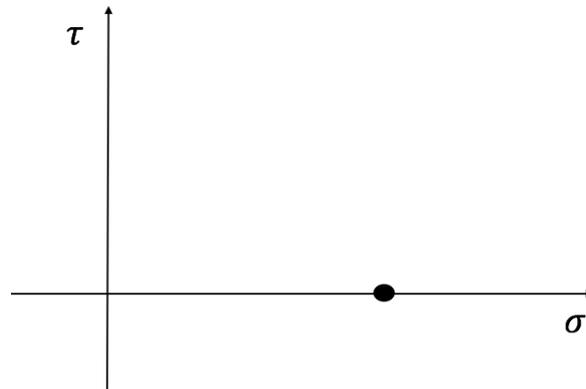


Ilustración 20 - Ejemplo del Circulo de Mohr de un sólido sometido a un estado multiaxial con ciertas restricciones.

5.2- PINTADO DE LOS SPECKLES

Para llevar a cabo los experimentos con el dispositivo que se ha fabricado, contamos con una serie de globos de látex de dos colores: negro y blanco. En primera instancia, tras cortar los globos dándoles la forma circular que se buscaba para la experimentación, se decidió pintar los puntos para el reconocimiento DIC de los speckles con un rotulador permanente como se aprecia en la ilustración 21.

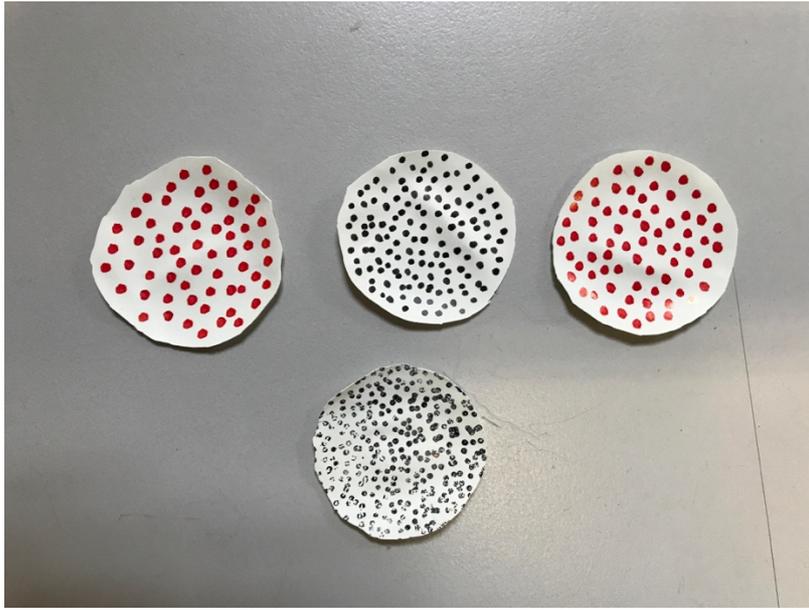
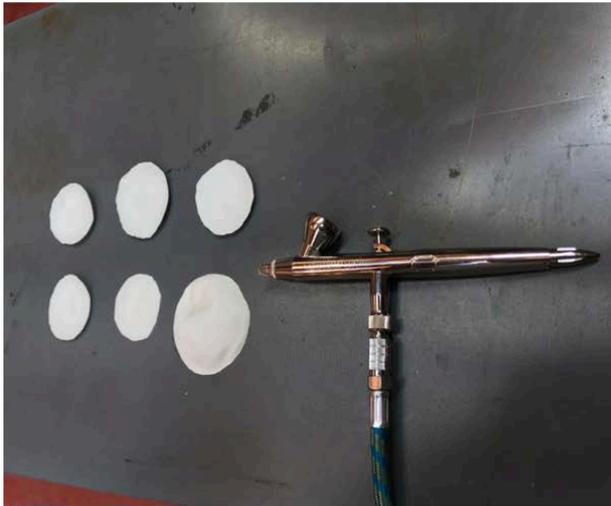


Ilustración 21 - Speckles pintados a mano con rotulador permanente.

De esta manera, el programa de correlación no era capaz de seguir la deformación de la superficie a través de todos los frames y se perdía debido al gran tamaño de los puntos, que al deformarse en el látex quedaban como grandes motas de pintura, impidiendo un buen análisis de los speckles.

Para solucionar este problema, se decidió pintar los speckles con un aerógrafo que se encontraba en los laboratorios, con el fin de realizar mayor cantidad de puntos y con menor diámetro. Para ello, se utilizó pintura negra en los speckles blancos y viceversa para dar mayor contraste al área pintada y facilitar el reconocimiento de los puntos por parte del programa informático. En la siguiente ilustración se observa el antes y el después de este proceso de pintado:

ANTES:



DESPUES:



Ilustración 22 - Antes y después del proceso de pintado de los speckles.

5.3 - REALIZACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Una vez cortados y pintados los speckles, se llevó a cabo la realización de los experimentos. En este paso, se precisa de varios alfileres para realizar la conexión de las muestras con el dispositivo y de una cámara réflex para realizar las fotos de la evolución de la deformación. Dicha cámara se ancló a un trípode con el fin de minimizar los movimientos a la hora de realizar las fotos y para que se realizaran todas con la misma distancia con respecto al suelo y al dispositivo. Como se ha citado anteriormente, la conexión de los speckles con el dispositivo se realizó a través de alfileres, lo cual fue costoso por la facilidad con la que se salían de los huecos predeterminados de fijación de las muestras.

También se realizó una serie de líneas en el canto del dispositivo siguiendo una sucesión de ángulos de 15° con los que poder ir variando la deformación en función del ángulo girado en todas las speckles de la misma forma. Se escogieron los cinco speckles que mejor estaban pintados y que a priori iban a presentar mayor facilidad a la hora de analizar en D.I.C y se les realizó 6 fotos a cada uno variando el ángulo 15°

progresivamente, provocando un aumento de la deformación biaxial mediante los brazos del dispositivo.

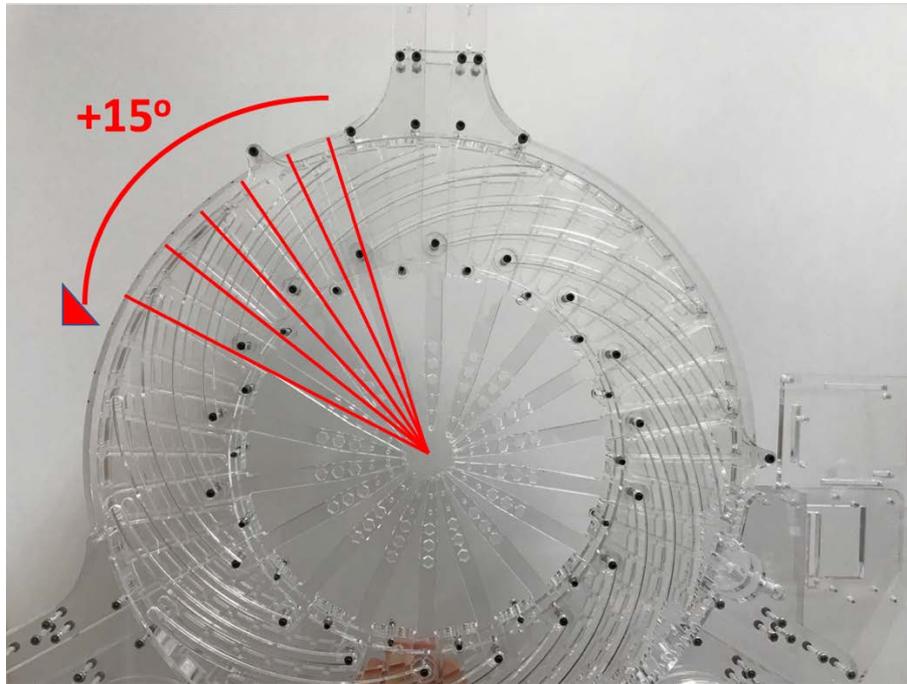


Ilustración 23- Esquema del procedimiento seguido en los experimentos para tomar la fotografía de cada frame cada 15 °

5.4 - RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Una vez realizadas las fotos de la evolución de los speckles, se comprimieron para tener una mayor fluidez al procesarlas en el software de correlación de imágenes. En GOM Correlate se cargan las sucesiones de fotos de cada muestra y se establece una superficie de estudio (en el caso del proyecto solo se analizó el área de los speckles) para ver la evolución de los distintos parámetros que nos ofrece el software.

Los parámetros que se han estudiado para determinar ese carácter multiaxial del dispositivo son: Epsilon X, Epsilon Y, Epsilon 1 y Epsilon 2. Se establecieron cinco puntos de estudio en cada speckle; uno central y los otros colocados arriba, abajo, a la

derecha y la izquierda de este respectivamente. A continuación se presentan los resultados de la muestra 1, la cual refleja la multiaxialidad del estado, analizada en todos los frame, con los valores de las distintas épsilon en cada punto:

MUESTRA 1

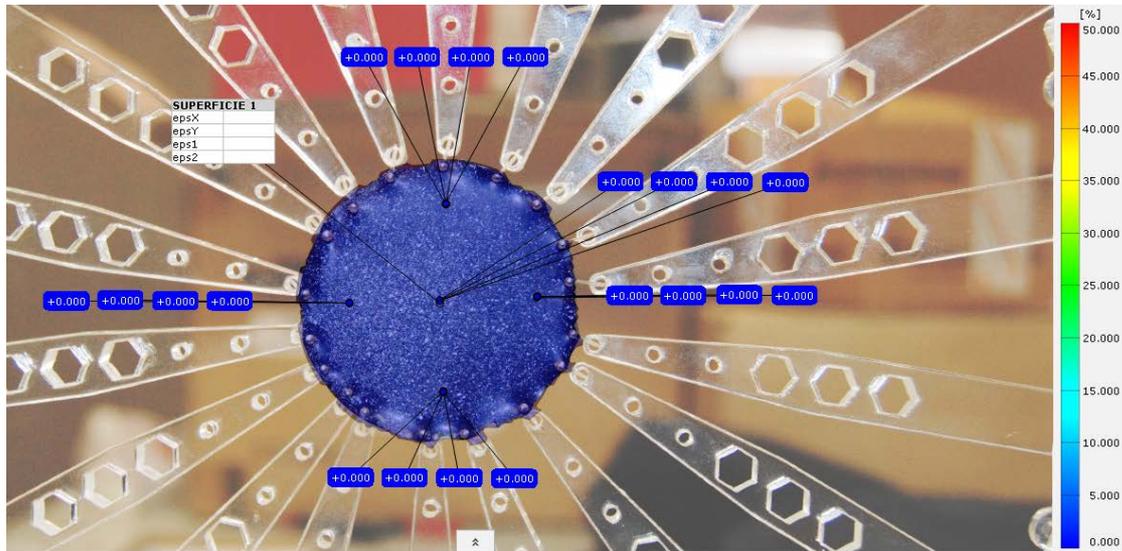


Ilustración 24 - Muestra 1 / frame 0. Análisis de las épsilon en los puntos de la superficie.

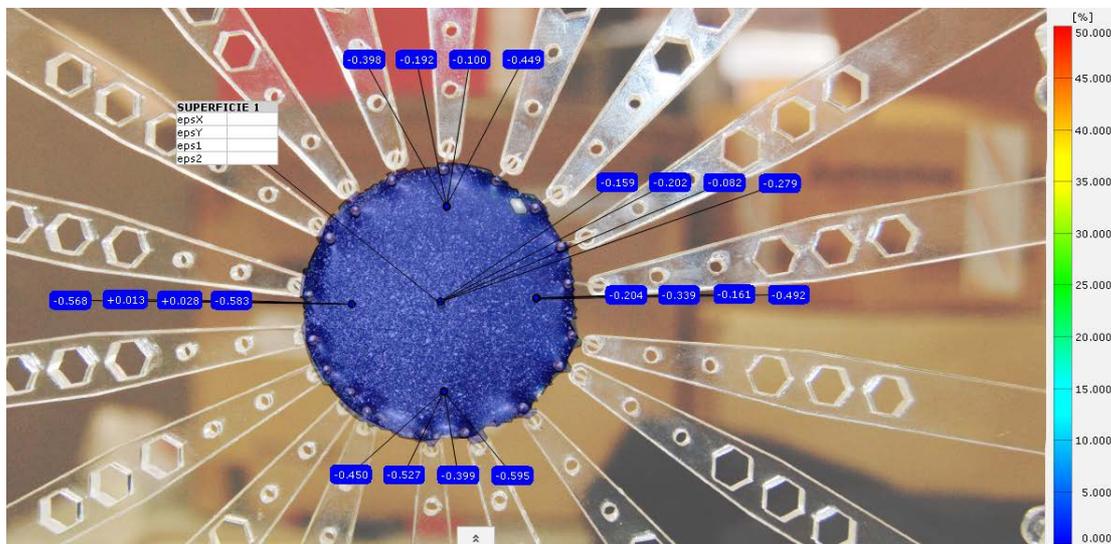


Ilustración 25 - - Muestra 1 / frame 1. Análisis de las épsilon en los puntos de la superficie.

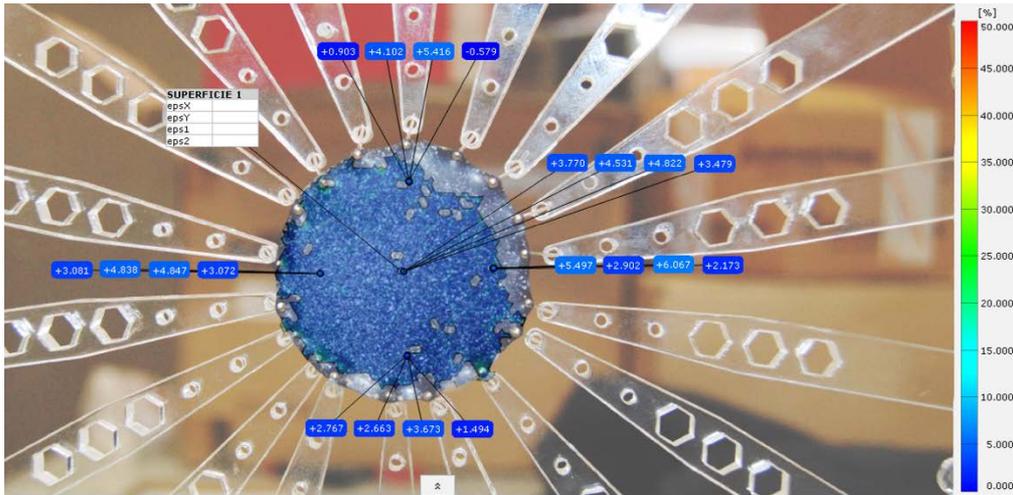


Ilustración 26 - - Muestra 1 / frame 2. Análisis de las ϵ en los puntos de la superficie.

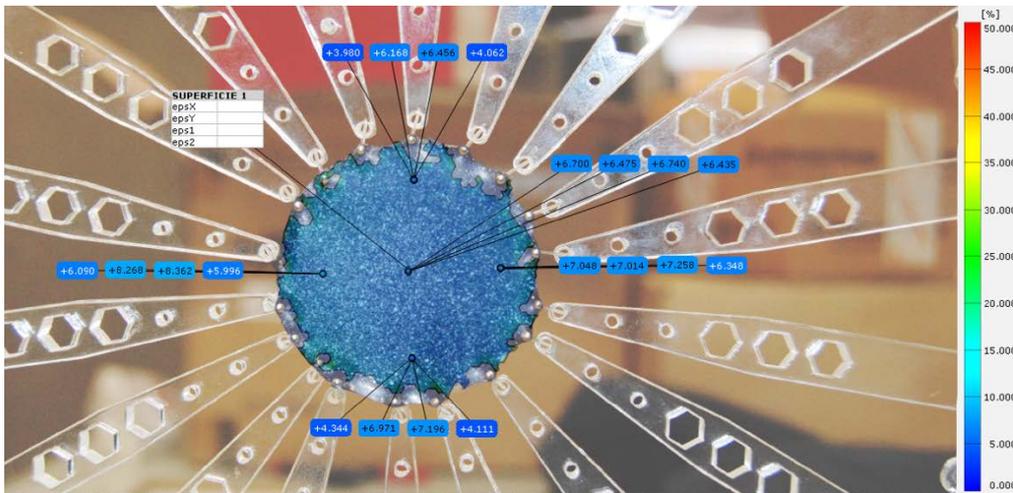


Ilustración 27 - - Muestra 1 / frame 3. Análisis de las ϵ en los puntos de la superficie.

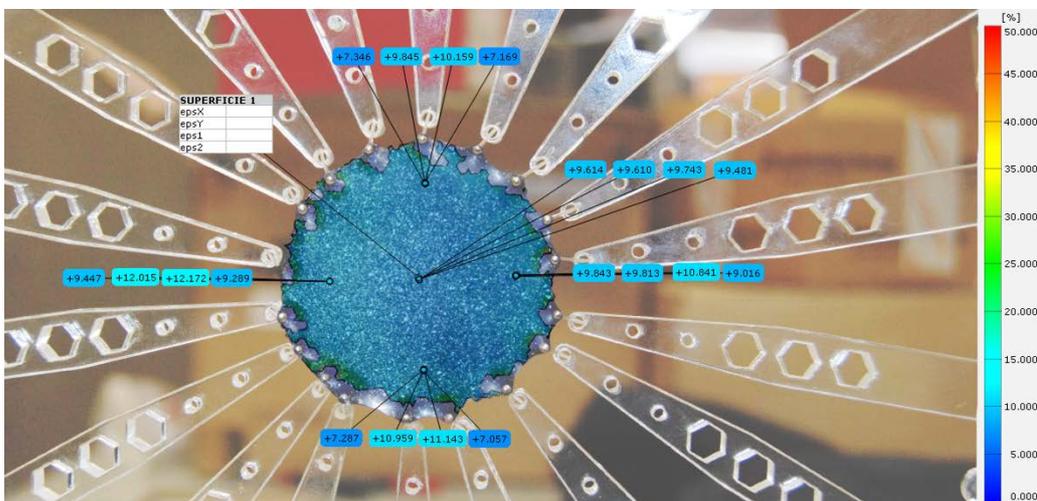


Ilustración 28 - - Muestra 1 / frame 4. Análisis de las ϵ en los puntos de la superficie.

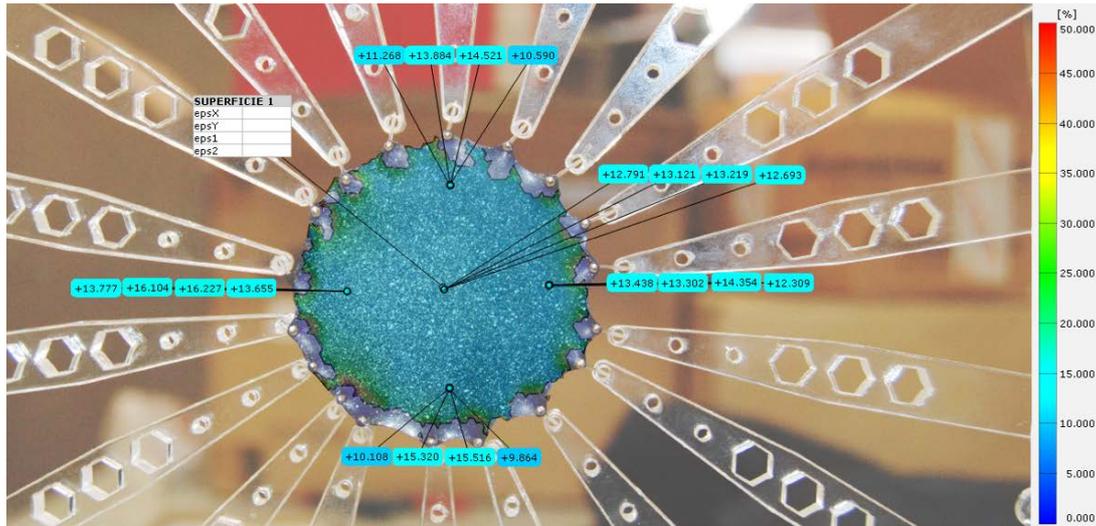


Ilustración 29 - - Muestra 1 / frame 5. Análisis de las epsilon en los puntos de la superficie.

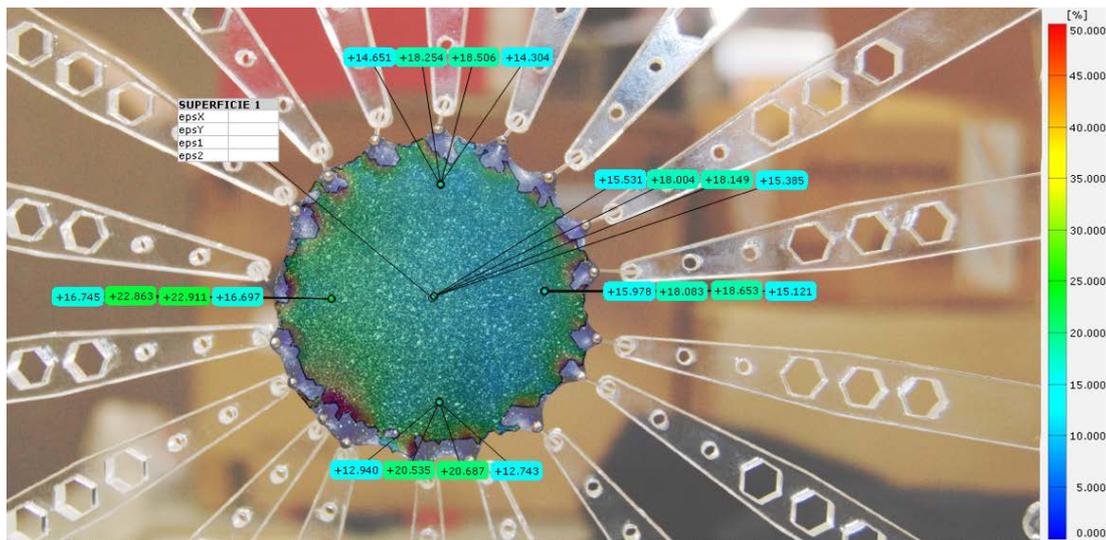


Ilustración 30 - - Muestra 1 / frame 6. Análisis de las epsilon en los puntos de la superficie.

En las ilustraciones mostradas se detallan en una escala de 0-50 % (Deformación ingenieril) los valores de las distintas epsilon en cada punto, siendo el orden de izquierda a derecha; Epsilon X, Epsilon Y, Epsilon 1 y Epsilon 2. Escogiendo el punto central como objeto de estudio ya que es el que menos se ve afectado por las condiciones de contorno, se han plasmado en una gráfica los valores siguiendo la evolución:

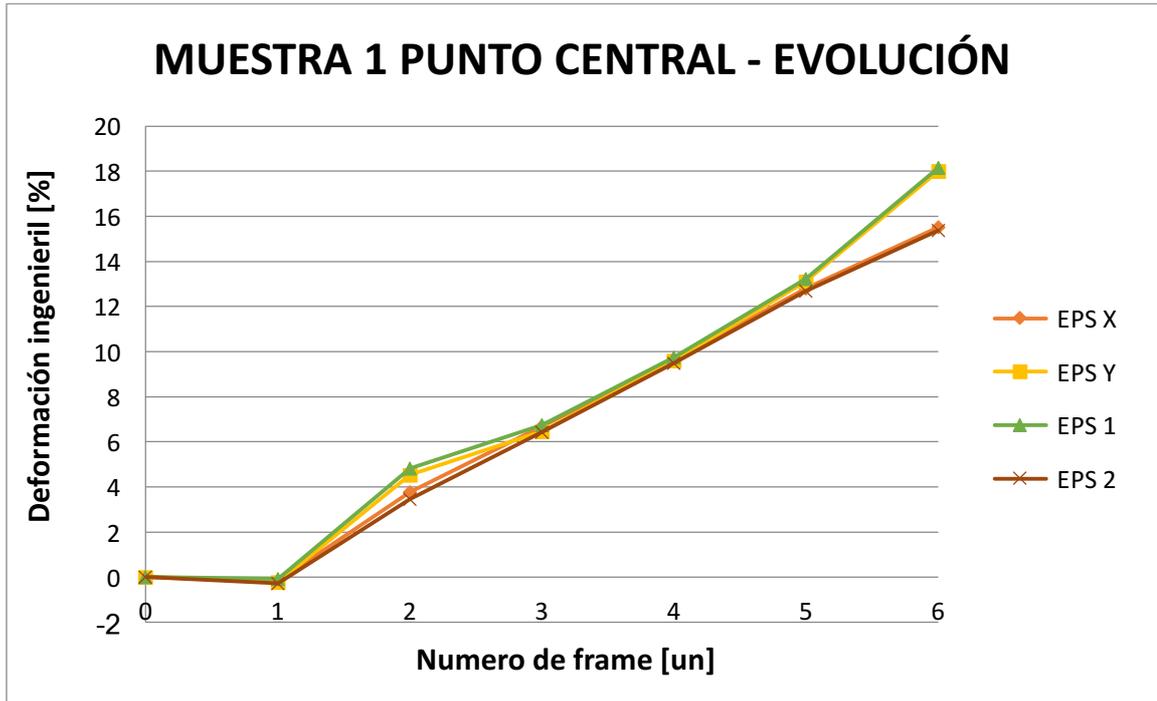


Tabla 2 - Grafica deformación-nº de frame del punto central de la muestra 1.

En la gráfica de la evolución se observa claramente como todas las ϵ toman prácticamente los mismos valores durante la deformación radial, apreciándose un ligero desvío en el frame 6, motivado en gran medida por las condiciones de contorno, ya que como se observa en la ilustración correspondiente a este frame los alfileres de la derecha están empezándose a salir, variando así la tensión aplicada respecto al conjunto y modificando el estado multiaxial.

5.5 – EXTENSION DEL CAMPO DE DEFORMACIONES UNIFORME

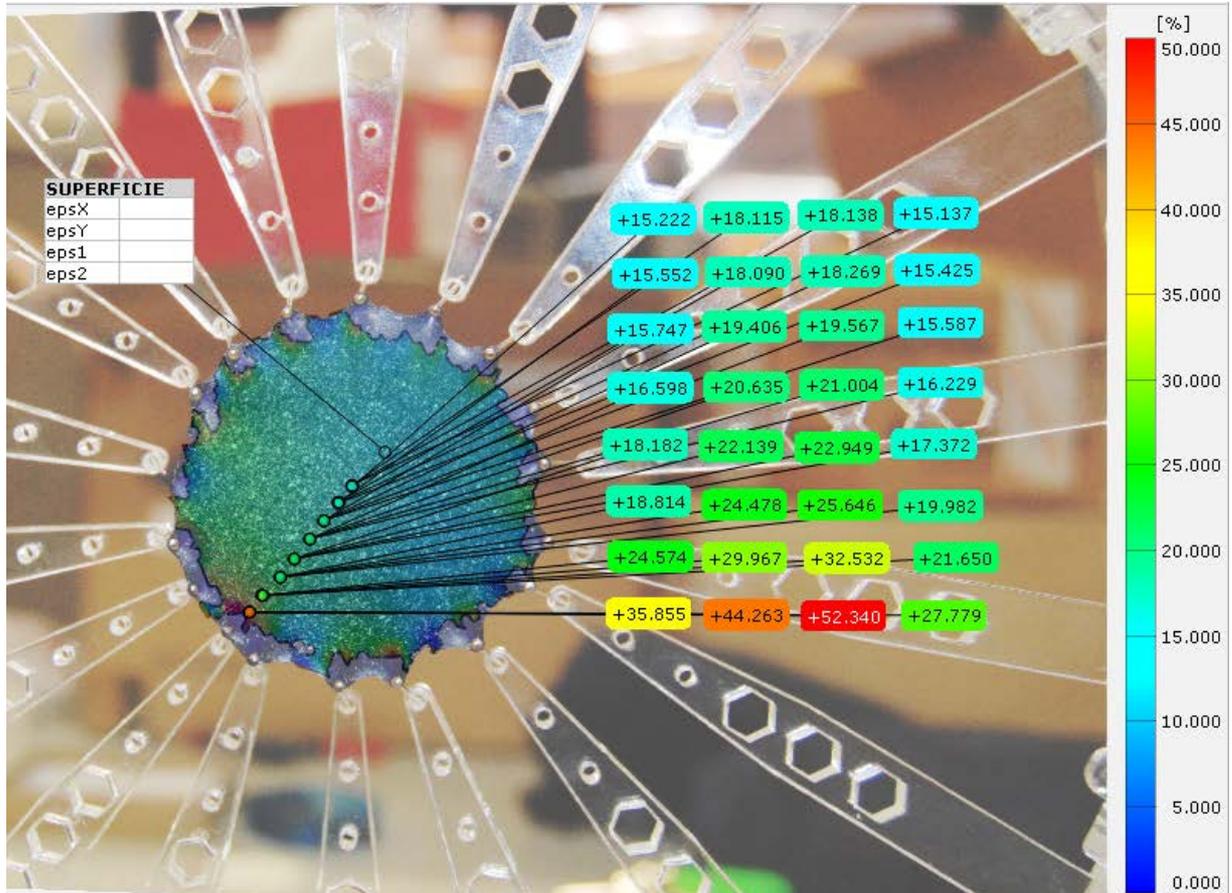


Ilustración 31- Representación de los puntos de la línea establecida para analizar la multiaxialidad del dispositivo.

Con el fin de analizar la fiabilidad del dispositivo tras los resultados obtenidos, se realizó otro estudio con el programa de correlación de imágenes. Este consistió en establecer una línea de puntos desde el centro a un extremo del speckle, como se aprecia en la ilustración 31, con el objetivo de ver como evoluciona el estado tensional una vez te vas acercando cada vez más a las condiciones de contorno y establecer hasta qué punto de distancia podemos asegurar que las condiciones se cumplen. A continuación se muestran las distintas graficas de la evolución de las épsilon correspondientes a cada punto:

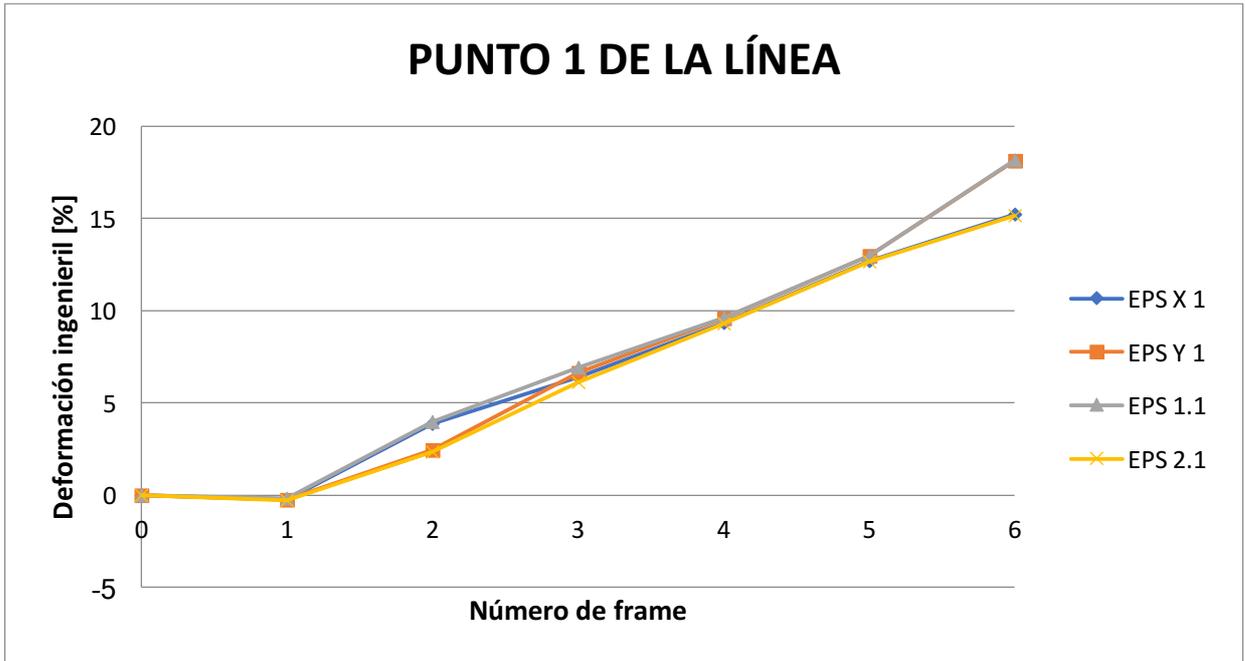


Tabla 3 – Grafica deformación – n° de frame. Punto 1 de la línea.

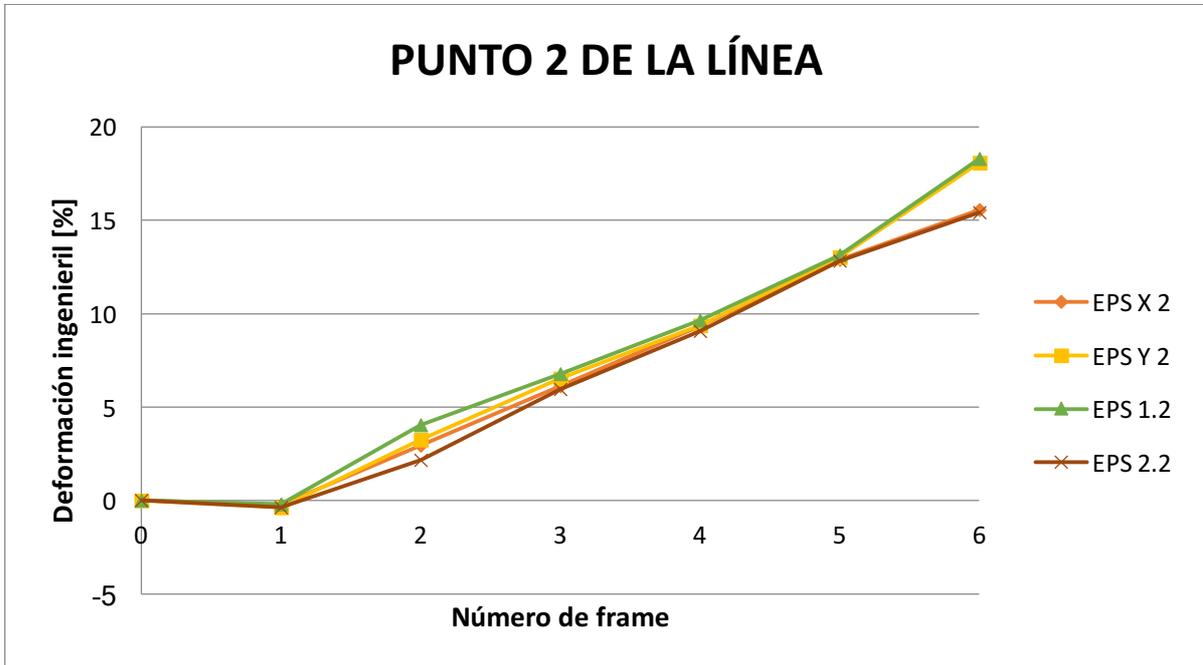


Tabla 4 - Grafica deformación – n° de frame. Punto 2 de la línea

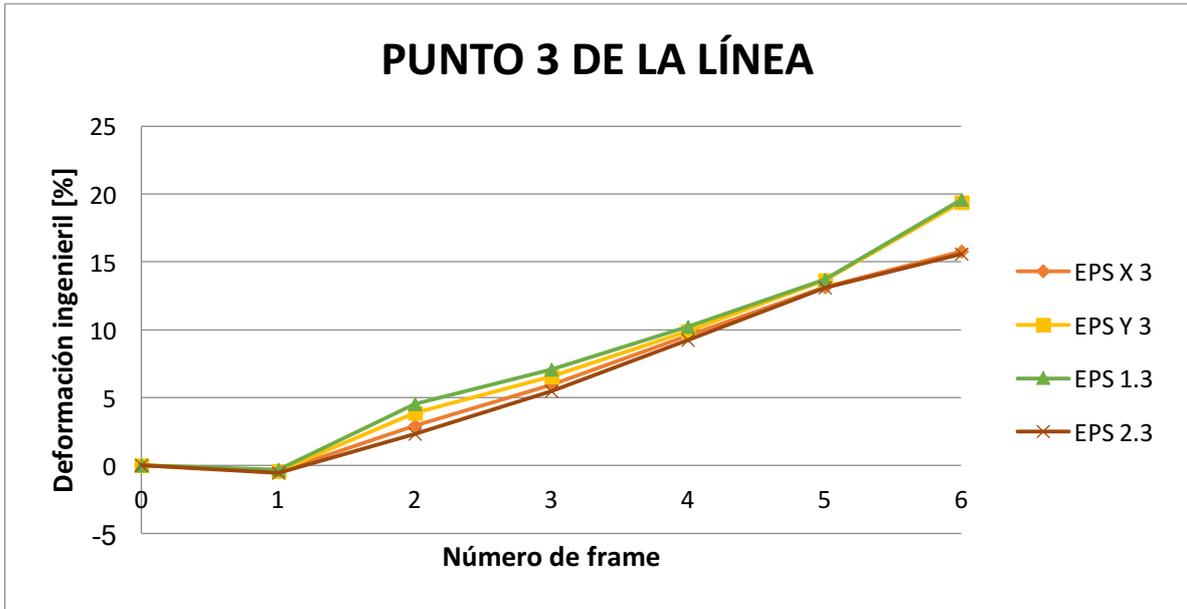


Tabla 5- Grafica deformación – n° de frame. Punto 3 de la línea

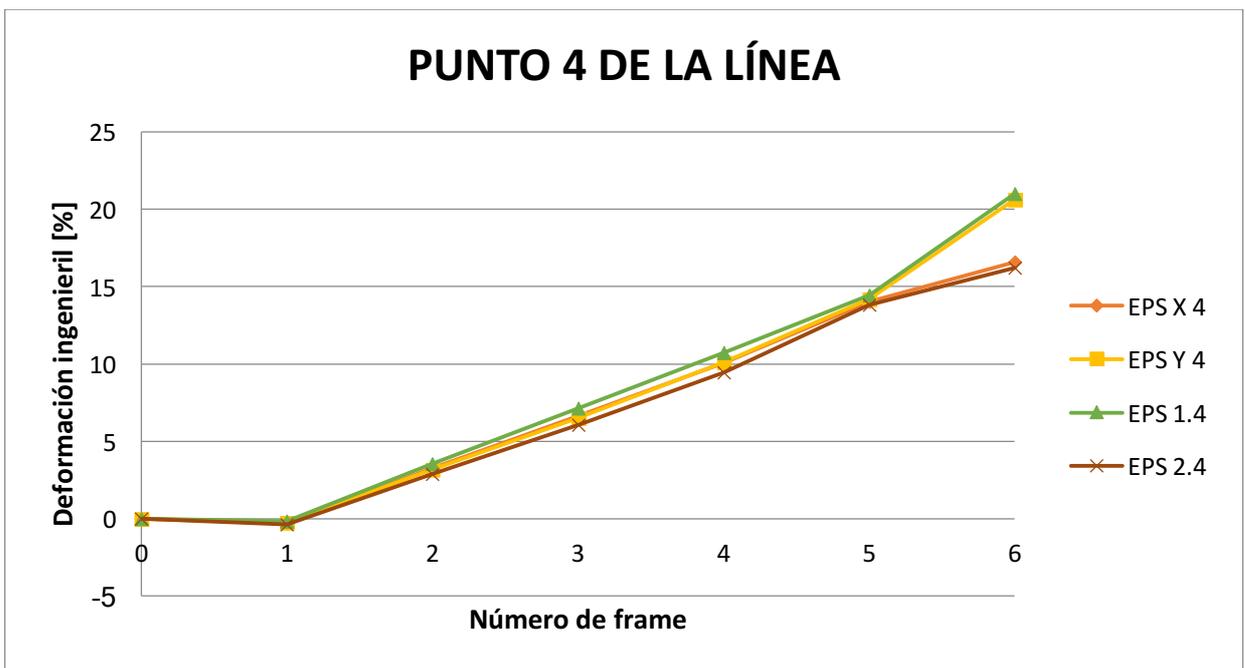


Tabla 6 - Grafica deformación – n° de frame. Punto 4 de la línea

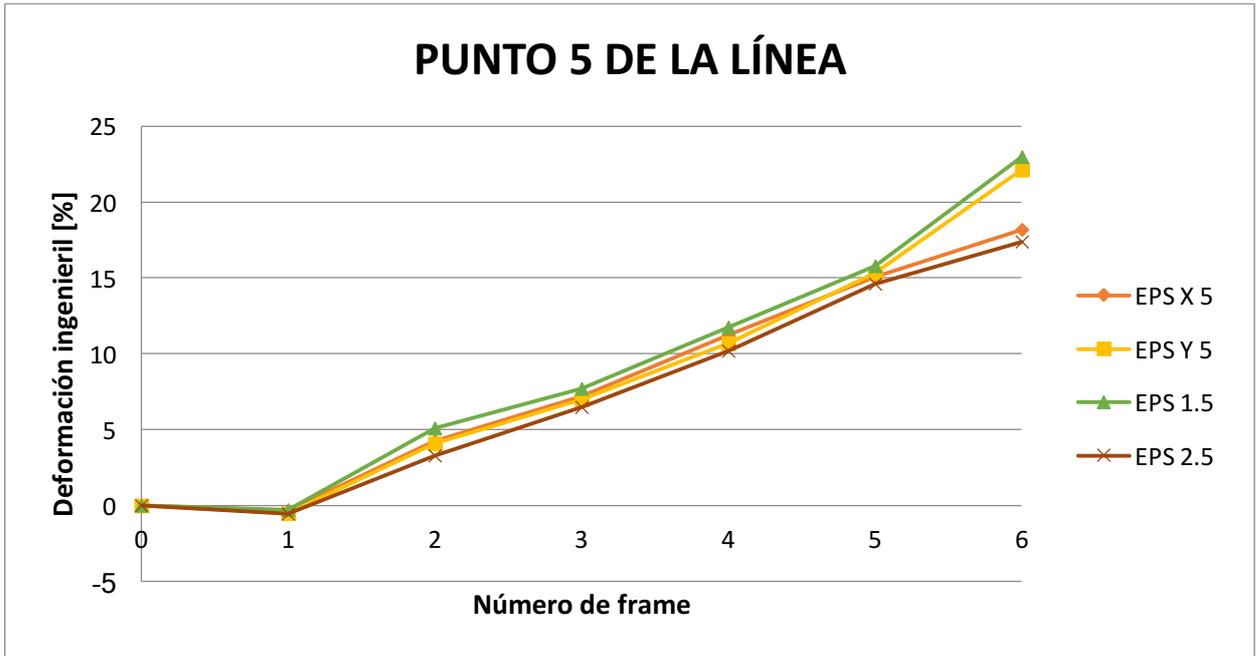


Tabla 7 - Grafica deformación – n° de frame. Punto 5 de la línea

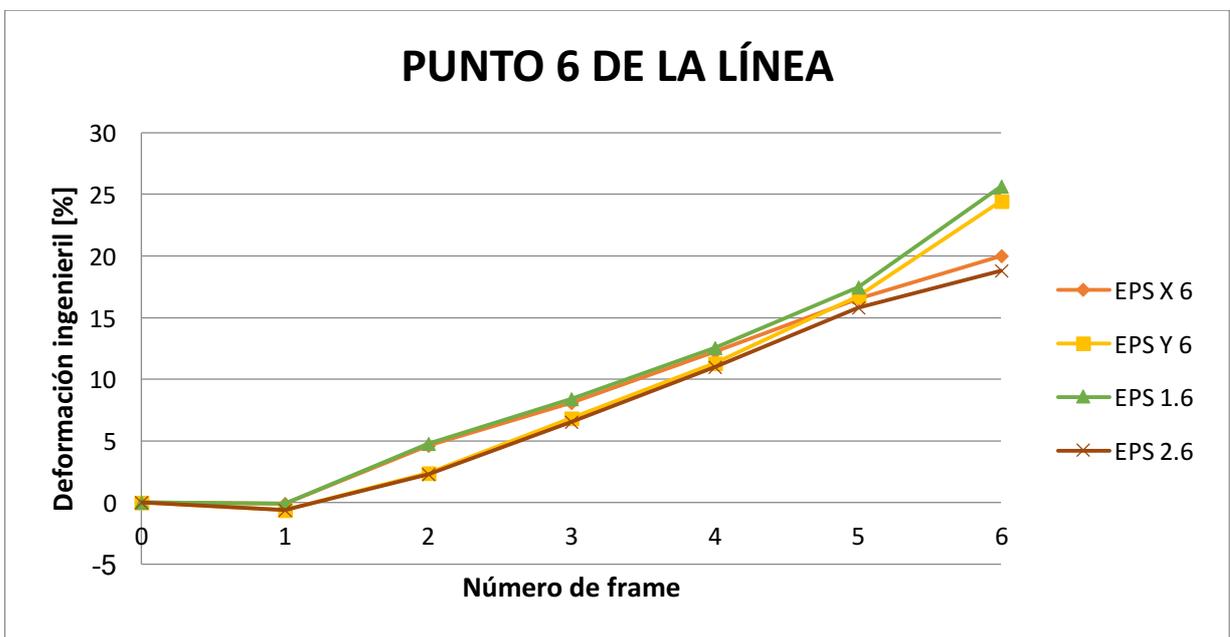


Tabla 8 - Grafica deformación – n° de frame. Punto 6 de la línea.

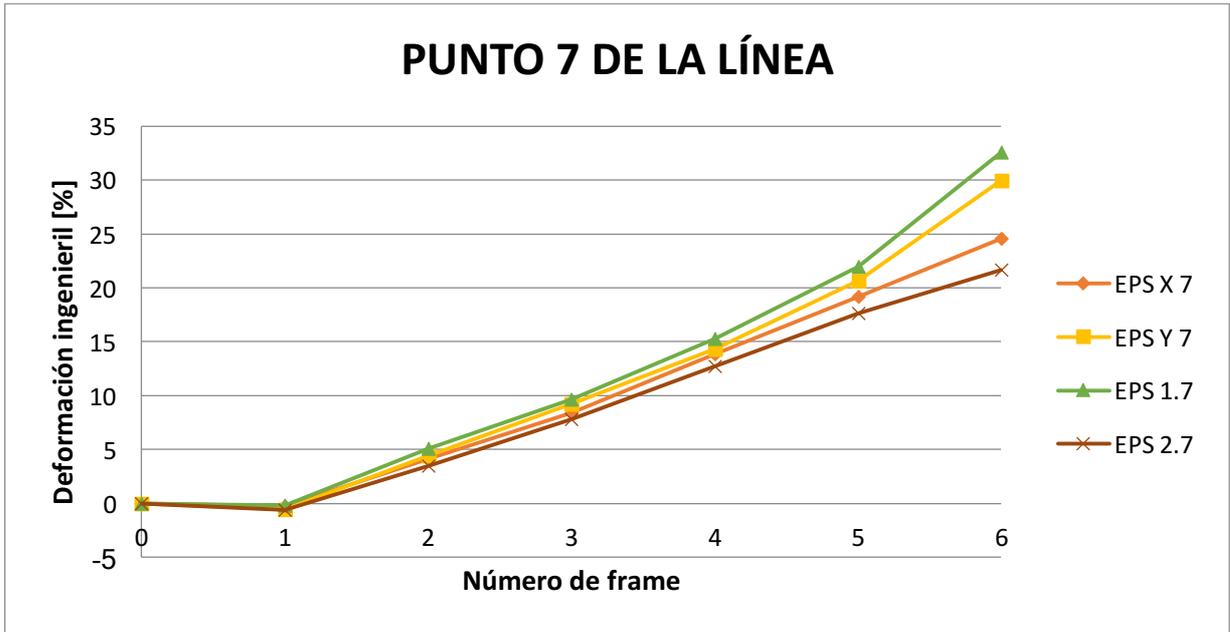


Tabla 9 - Gráfica deformación – n° de frame. Punto 7 de la línea

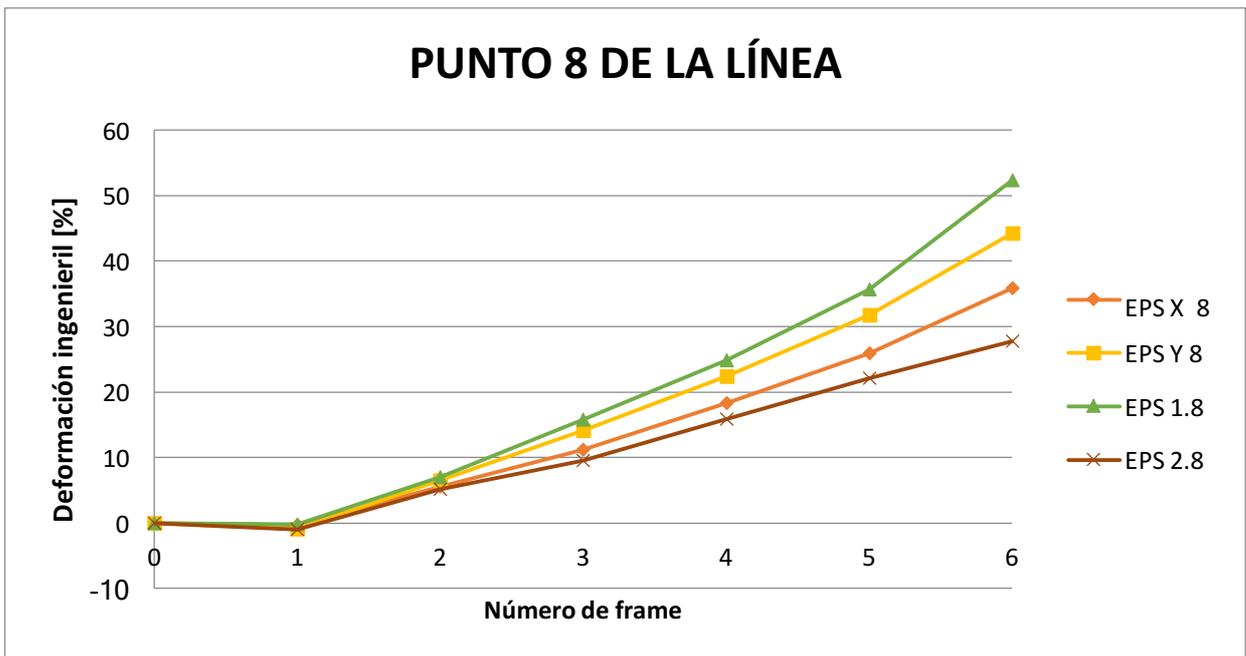


Tabla 10 - Gráfica deformación – n° de frame. Punto 8 de la línea

Como se observa en la sucesión de las gráficas, a medida que el punto se acerca a las condiciones de contorno, el estado tensional empieza a variar de manera irregular y los valores de las ϵ comienzan a distanciarse unos de otros. Si no consideramos el estado tensional producido en el frame 6 ya que como se observa es un punto crítico en todos los puntos en el cual las ϵ comienzan a desviarse considerablemente, podemos establecer que hasta el punto 6 el dispositivo cumple con el objetivo de multiaxialidad ya que durante los cinco primeros frames no se alcanzan desviaciones en los valores de las ϵ de más del 3%.

Se establece así que el dispositivo cumple con los objetivos y se pueden realizar ensayos multiaxiales de sólidos hiperelásticos con gran rango de fiabilidad.

5.6 - INFLUENCIA DEL TIPO DE SPECKLE.

Esta muestra refleja que el dispositivo cumple con los requisitos establecidos y es capaz de realizar un ensayo multiaxial, a su vez cabe destacar el potencial de los software de correlación de imágenes, capaces de analizar de una manera sencilla la evolución en la deformación de un objeto con datos precisos. Por lo tanto, la muestra 1 ha sido la que mejor ha representado ese carácter multiaxial del dispositivo, pero se han analizado otras cuatro muestras más del mismo material con distintos diámetros y formas de círculos irregulares debido a las imperfecciones producidas por el corte manual. El resultado de estas muestras es el siguiente:

MUESTRA 2

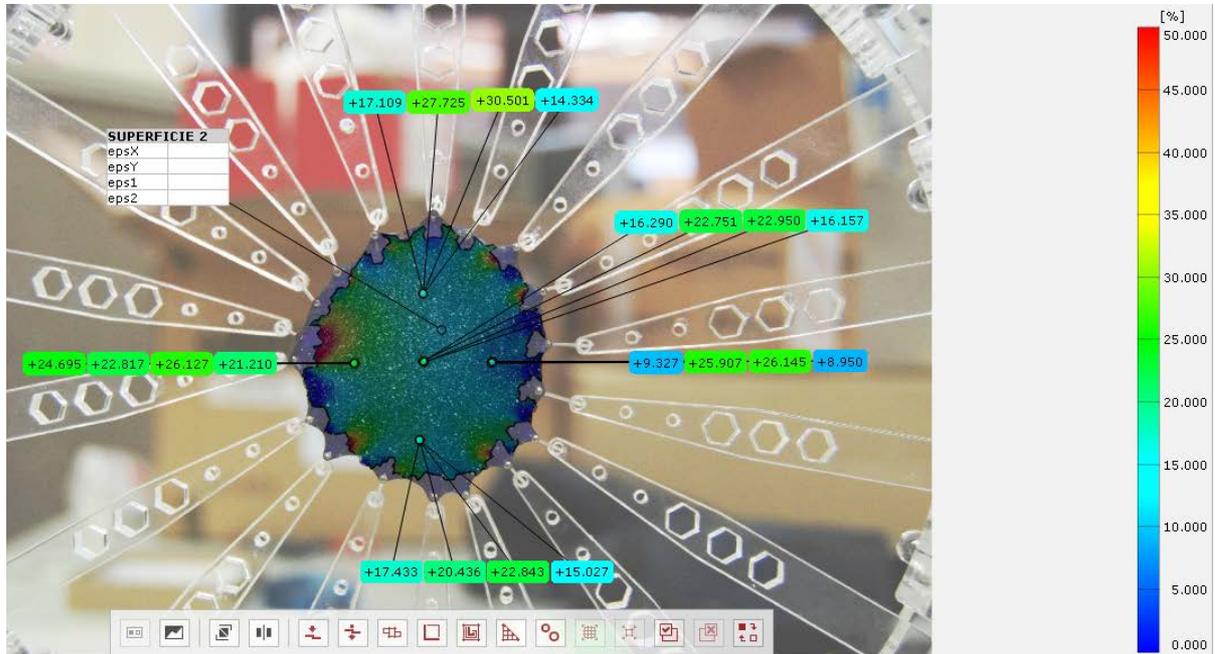


Ilustración 32 - - Muestra 2 / frame 6. Análisis de las epsilon en los puntos de la superficie.

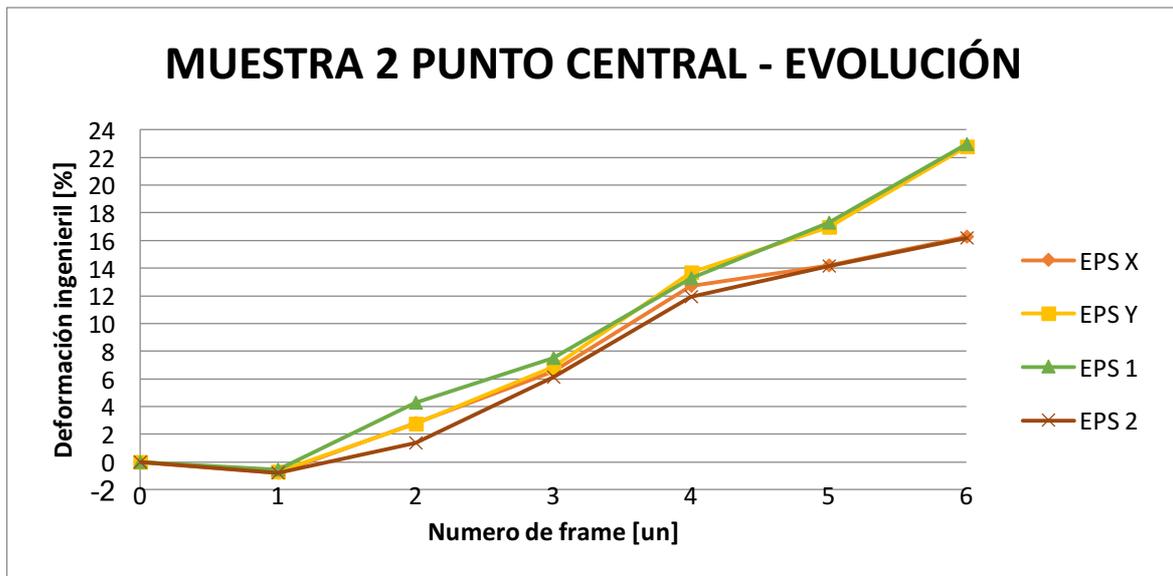


Tabla 11 - Gráfica deformación - n° de frame del punto central de la muestra 2.

En esta muestra se observa también que la variación de los valores de las ϵ es mínima durante los sucesivos frames, alcanzando una mayor diferencia en el último, el cual se observa en la ilustración y que presenta el mismo error, pero en menor medida que la muestra anterior. Este error en las condiciones de contorno, que se observa de manera recurrente en la mayoría de las muestras en mayor o menor medida, condiciona la multiaxialidad del conjunto y afecta negativamente en la resolución de los experimentos.

MUESTRA 3

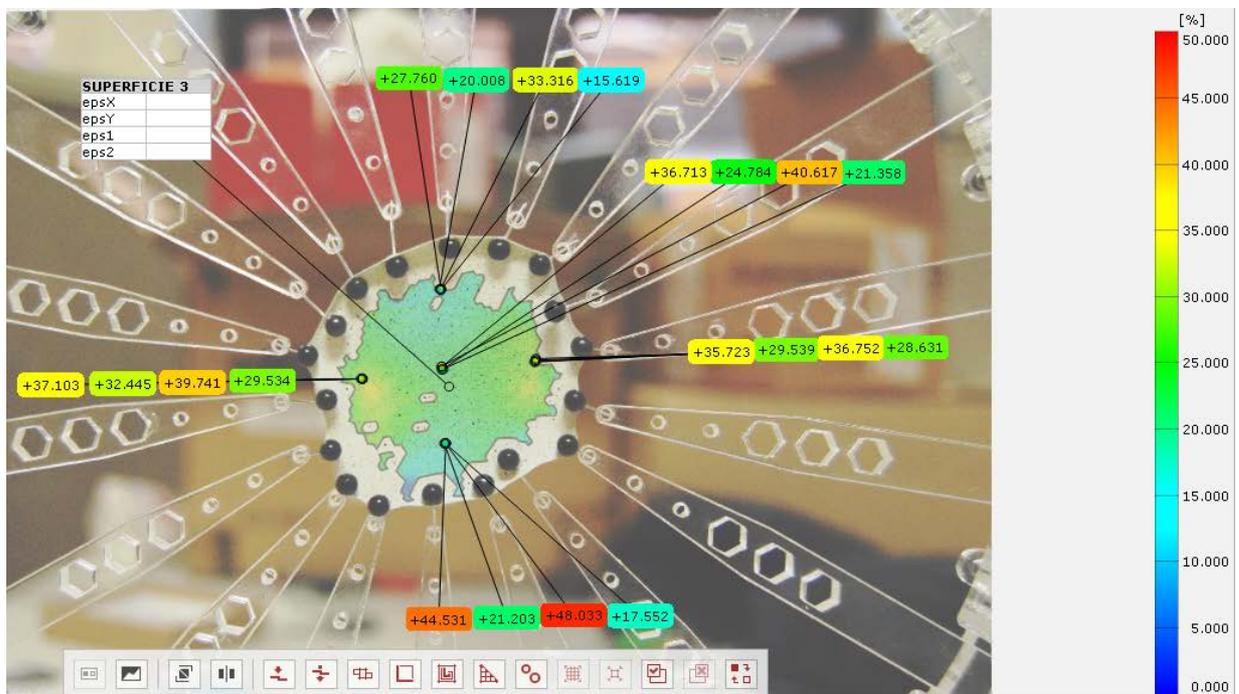
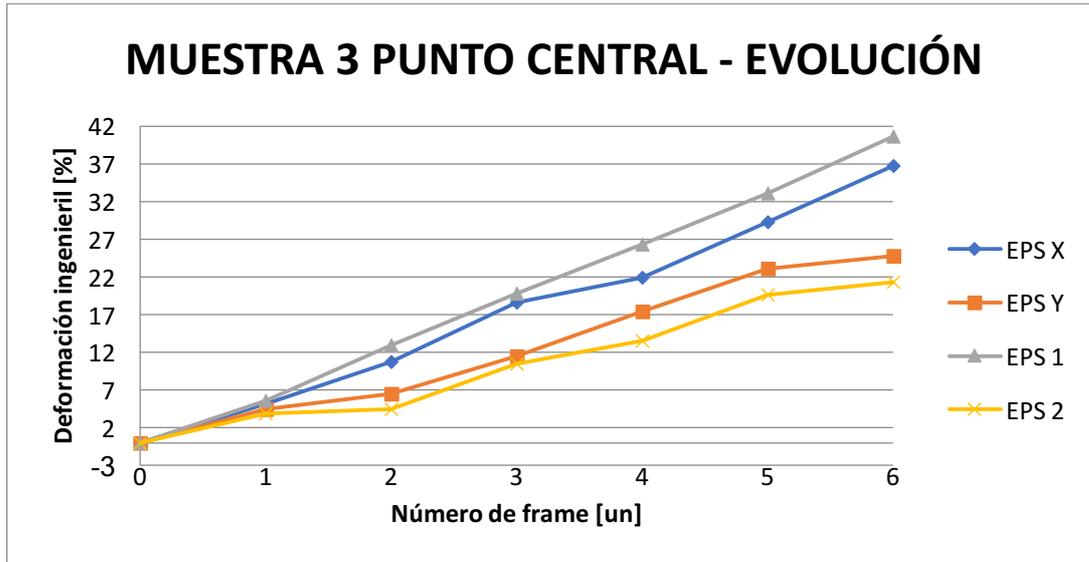


Ilustración 33 - - Muestra 3 / frame 6. Análisis de las ϵ en los puntos de la superficie.



En el speckle blanco de la muestra 3, se realizó la conexión de este al dispositivo con unos alfileres diferentes como se observa en la ilustración. Estos alfileres tienen en la cabeza una bola negra y su longitud es un 150 % mayor respecto a los básicos utilizados en las demás muestras. De esta manera se intentó reducir el impacto que producía en los experimentos la salida de los alfileres de los huecos predeterminados cuando se alcanzaba una deformación alta debido a la tensión producida. Esta solución no fue eficaz ya que se evitó la salida imprevista de los alfileres, pero seguían deslizándose más en unos huecos que en otros al no estar suficientemente fijos y los resultados así los corroboran. La gráfica y la ilustración muestran que no se deforma la muestra de forma similar en todas las direcciones y por lo tanto los valores de las ϵ distancian en gran medida unos de otros.

MUESTRA 4

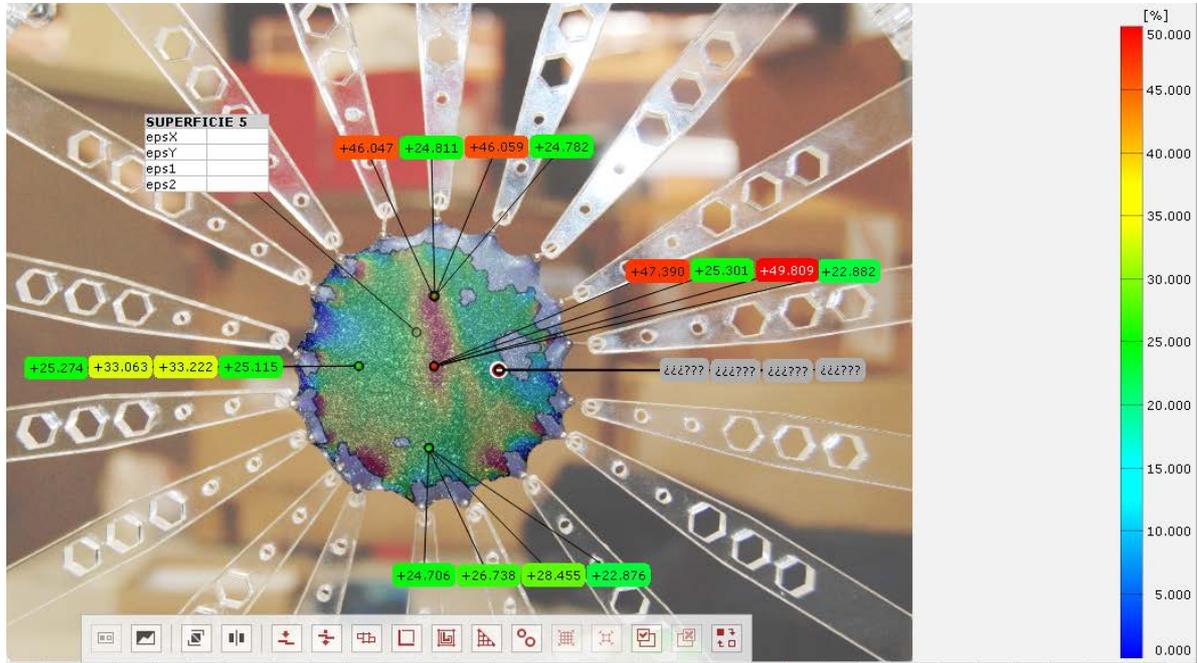


Ilustración 34 - - Muestra 4 / frame 6. Análisis de las epsilon en los puntos de la superficie.

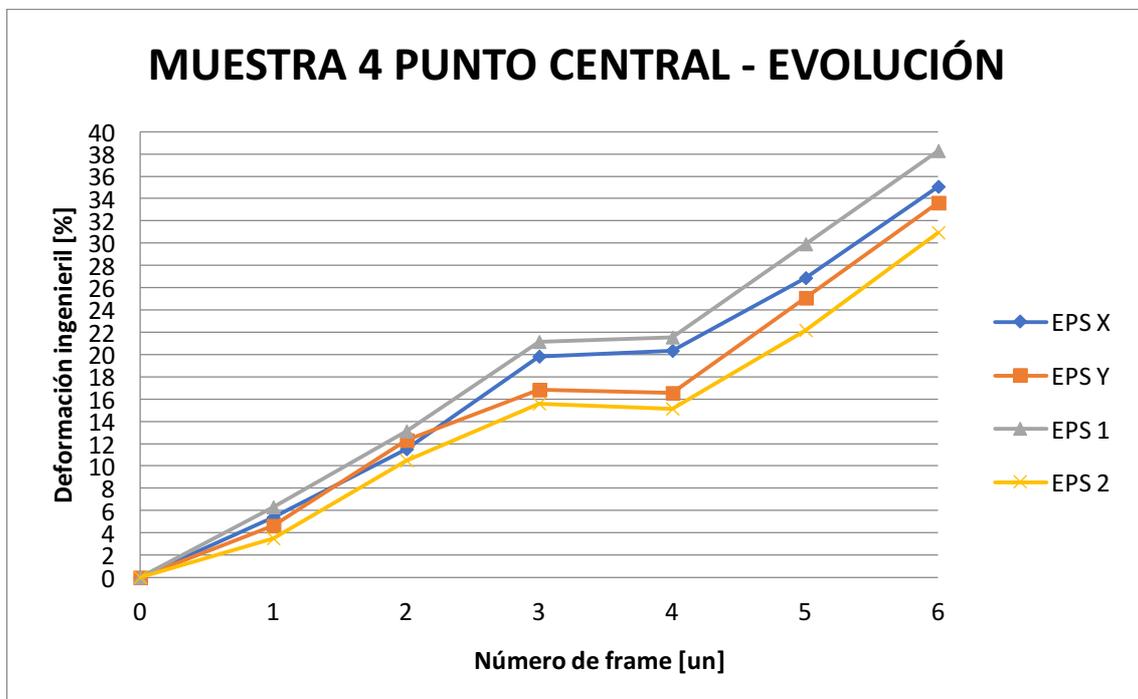


Tabla 12 - Gráfica deformación - n° de frames del punto central de la muestra 4.

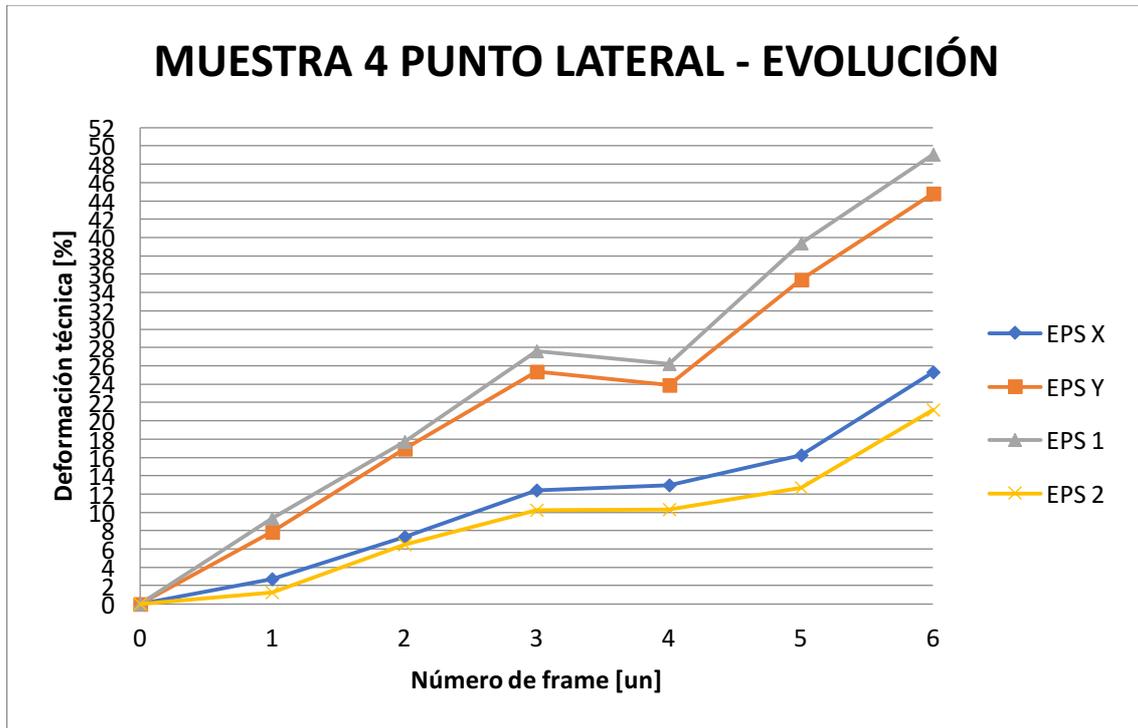


Tabla 13 - Gráfica deformación- n° de frames de un punto lateral de la muestra 4.

En la muestra 4, con la intención de asegurar el fallo en las condiciones de contorno y la sujeción de los speckles, se han analizado dos puntos: el punto central y el punto lateral derecho. En la ilustración vemos que el error sigue manifestándose de la misma manera en esta muestra y por ello en las gráficas se refleja claramente. El punto central al estar menos condicionado nos reporta una gráfica en cuyos valores de ϵ son muy similares durante todos los frames, pero el punto lateral obtiene valores muy diferentes.

6. CONCLUSIONES

Tras el análisis de los resultados, se puede determinar que el diseño del Radial Stretching System es un diseño innovador, debido a su bajo coste y peso en comparación a las máquinas de análisis tradicionales de este tipo de materiales, y que ha cumplido con los objetivos marcados al inicio del proyecto en el cual se pretendía fabricar y validar su multiaxialidad.

Los resultados nos muestran claramente dicha multiaxialidad que se ve afectada por unas malas condiciones de contorno que hacen que no se pueda asegurar el estado tensional de biaxialidad durante toda la evolución ni en los extremos de las muestras. Dicho esto, se aprecia en las gráficas la poca variación de los valores de las ϵ que establecen la biaxialidad del conjunto y avalan los conceptos teóricos en los que se basa la experimentación.

Cabe destacar el agradecimiento al Dr. Stefan Schausberger por la ayuda prestada en la realización del proyecto dando a conocer su proyecto original y estableciendo una colaboración mutua con el objetivo de mejorarlo continuamente.

7. PRESUPUESTO

A continuación se presenta tres tablas con los diferentes gastos que han formado el presupuesto:

7.1 - PRESUPUESTO ORIGINAL DE MATERIALES.

ARTÍCULO	PRECIO (IVA y TRANSPORTE INCLUIDO)
<p>Cortes por láser de las distintas piezas en distintos grosores y con el material incluido (metacrilato):</p> <ul style="list-style-type: none"> • 2 Metacrilato de 6 mm. Incoloro • 1 Metacrilato de 15 mm. Incoloro • 1 Metacrilato de 3 mm. Incoloro <p>Proveedor: Taller Resopal Madrid</p> <p>Página web: www.resopal.com</p>	286,69 €
<p>50 tornillos de M2 x 30 mm. Cabeza hexagonal</p> <p>Proveedor: Amazon</p> <p>Link:https://www.amazon.es/dp/B00NQA3PX0/ref=pe_386191_41384461_TE_item</p>	12,97 €
<p>240 Tuercas M2. Hexagonales.</p> <p>Proveedor: Amazon</p> <p>Link:https://www.amazon.es/dp/B0126YDWWK/ref=pe_386191_41384461_TE_item</p>	27,00 €

<p>40 Tornillos M2 x 16 mm. Caja con tornillería variada.</p> <p>Proveedor: Amazon</p> <p>Link:https://www.amazon.es/dp/B01MZ3VCAW/ref=pe_386191_41384461_TE_item</p>	<p>23,98 €</p>
<p>56 Rodamientos 682 W 5x2x1.5 mm</p> <p>Proveedor: Kugellager Express</p> <p>http://www.kugellager-express.de/miniatur-kugellager-682-682z-r682s-2x5x2-3</p>	<p>71,21 €</p>
<p>Bolsa de globos de látex.</p>	<p>1,00 €</p>
<p>Tornillería variada de métrica 3:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 42 M3 x 30 mm. • 2 M3x 12mm. • 15 M3 x 10mm. • 4 M3 x 10mm. • 48 tuercas M3. • 3 M3 x 10mm 	<p>10,50€</p>
<p>TOTAL</p>	<p>433,35 €</p>

7.2 - PRESUPUESTO DESVIADO DE MATERIALES.

ARTÍCULO	PRECIO (IVA y TRANSPORTE INCLUIDO)
<p>Cortes por láser de las dos piezas laterales erróneas en los planos originales.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 metacrilato de 6 mm. Incoloro <p>Proveedor: Taller Resopal Madrid</p>	114,10 €
TOTAL	114,10 €

7.3 - PRESUPUESTO MANO DE OBRA.

PERSONAL	PRECIO
<p>Jesús Pernas-Sánchez – Tutor académico del proyecto 30 horas x 35 €/hora</p>	1050 €
<p>Alvaro Jimenez Pijoan, alumno que realiza el proyecto. 100 horas x 10 €/hora</p>	1000 €
TOTAL	2050 €

Por lo tanto, el presupuesto asciende a la suma total de 2597,45 €

8. TRABAJOS FUTUROS

Dado los resultados de este trabajo, se proponen como trabajos futuros:

8.1 – AUTOMATIZACION DEL PROCESO DEL MOVIMIENTO MECÁNICO.

Para realizar el movimiento mecánico de los brazos del dispositivo, sería necesario un motor con el que poder mediante unos engranajes facilitar la automatización del proceso. Las caras laterales del dispositivo ya poseen cavidades en su contorno con en los que poder acoplar los engranajes necesarios y también se han cortado por láser las distintas piezas que contendrán al futuro motor.

8.2 – CONTROL DE LA FUERZA APLICADA.

Con el fin de poder controlar la fuerza aplicada a la hora de deformar el material, se puede cambia uno de los brazos del dispositivo por un sensor de fuerzas o una banda extensiométrica que nos permita analizar este tipo de datos de una forma más precisa

8.3 – MEJORA EN LAS CONDICIONES DE CONTORNO.

Es necesario mejorar las condiciones del contorno del dispositivo, ya que resulta muy costoso realizar la conexión entre las muestras y el dispositivo a través de alfileres. Este método suponía una mala inserción debido a que los diámetros de los alfileres eran muy inferiores a los huecos predeterminados con los que contaban los brazos del dispositivo facilitando mucho su salida cuando se empieza a ejercer la tensión. A su vez se intentó que se clavaran en un cartón inferior, peor finalmente se desechó la idea, ya que era más laborioso quitar el cartón una vez encajaban los alfileres la muestra en el dispositivo. Por lo tanto, haría falta realizar una pieza, quizás magnetizada, similar a la denominada Magnetic Clamp desarrollada por el holandés Alessandro Iannarelli para el RSS V4. Con esta pieza se podría solucionar el problema y facilitar mucho el acople de las muestras al dispositivo.

8.4 – ESTUDIO DE DIFERENTES MATERIALES ELASTOMEROS.

Con el dispositivo se van a poder realizar experimentos con diferentes materiales elastómeros según la necesidad o el tipo de investigación que se desee realizar. Se trata de un dispositivo versátil que permite analizar cualquier material que presente capacidades elásticas.

8.5 – FEM.

En este proyecto se han analizado los resultados mediante un software de correlación de imágenes, pero se podría establecer un análisis con un programa de elementos finitos para estudiar las muestras por otra rama precisa de estudio.

9. BIBLIOGRAFÍA

[1] *El caucho por Leonardo Rescia:*

<http://www.monografias.com/trabajos4/elcaucho/elcaucho.shtml#ixzz4ckTymjBw>

[2] <http://www.monografias.com/trabajos97/tipos-polimeros/tipos-polimeros.shtml>

[3] *Angioplastia y colocación de stent en arterias periféricas*

<https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/007393.htm>

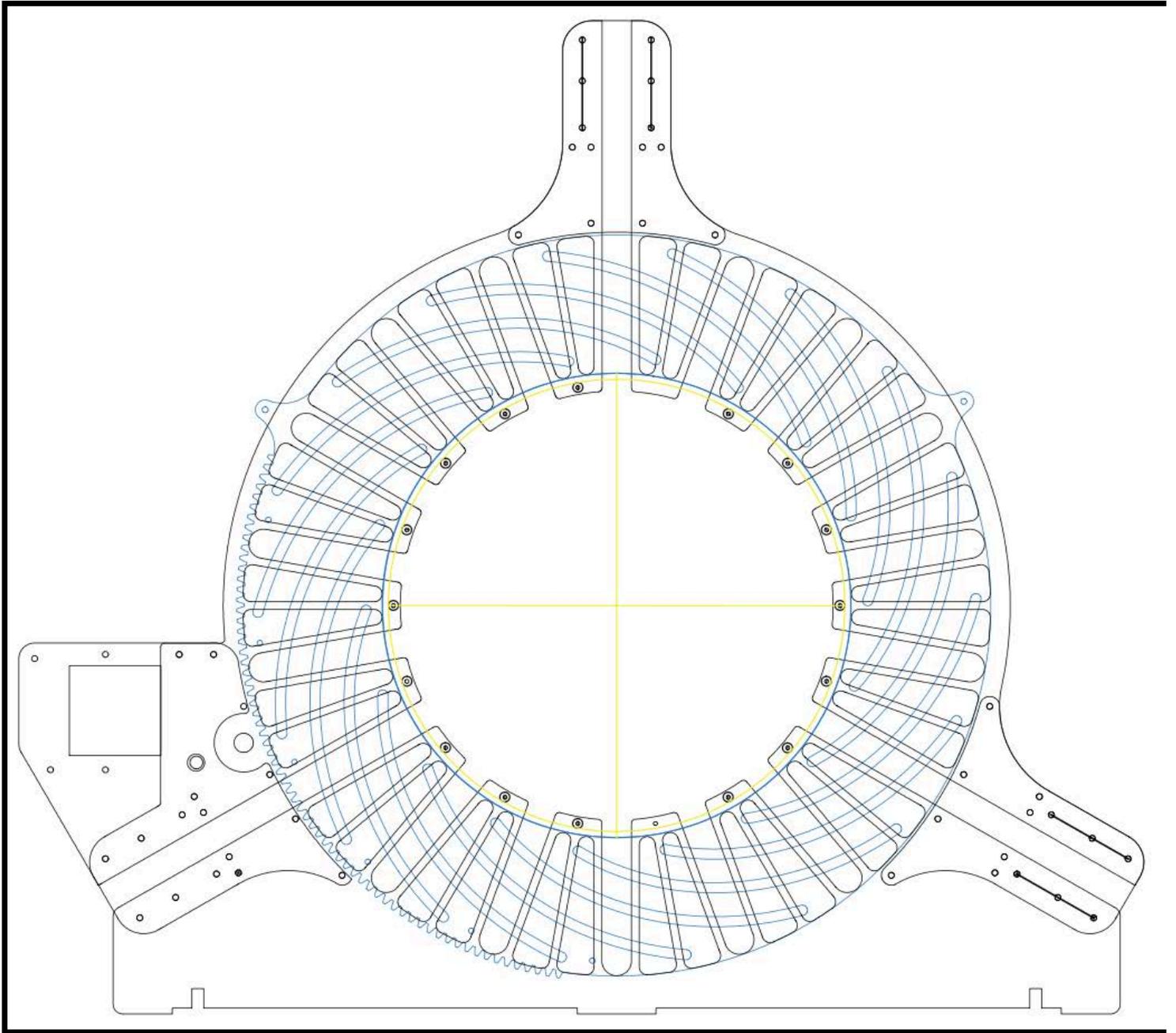
Instituto Nacional de Buenos Aires- Angioplastia

<http://www.icba.com.ar/hemodinamia/angioplastia.html>

[4] <https://curiosoando.com/que-es-un-polimero>

- [5] <https://www.3ciencias.com/wp-content/uploads/2012/08/2.clasificacion-elastomeros.pdf>
- [6] <http://www.monografias.com/trabajos102/elastomeros-contenido-completo/elastomeros-contenido-completo.shtml>
- [7] <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es/2011/07/poliisopreno-caucho-natural-y-sintetico.html>
- [8] <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.es/search/label/Elastómeros?updated-max=2012-01-12T06:42:00-08:00&max-results=20&start=7&by-date=false>
- [9] <http://www.quimitube.com/polimeros-de-adicion-el-caucho-natural-y-el-caucho-sintetico>
- [10] G. Liang, K. Chandrasshekhara, *Neural network based constitutive model for elastomeric foams*, Elsevier.
- [11] G. Silber, M. Alizadeh & M. Salimi, *Large deformation analysis for soft foams based on hyperelasticity*, *Journal of Mechanics*, Vol. 26, No. 3, September 2010.
- [12] <https://addi.ehu.es/bitstream/10810/14942/5/memoria.pdf>
- [13] *Cost-Efficient Open Source Desktop Size Radial Stretching System With Force Sensor*
<http://www.somap.jku.at/rss/>
- [14] *Cost-Efficient Open Source Desktop Size Radial Stretching System With Force Sensor*
http://ieeexplore.ieee.org/xpls/icp.jsp?arnumber=7107973#fig_1
- [15] <http://correlatedsolutions.com/digital-image-correlation/>
- [16] <https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-dic>
- [17] *Digital Image Correlation Nick McCormick , Jerry Lord*
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702110702352>
- [18] *Pagina web oficial del software:*<http://www.gom-correlate.com/en/overview.php>

ANEXO 2: PLANO DEL CONJUNTO



ANEXO 1: PLANOS

ESCALA 1:2

