



Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO Y COMPARACIÓN NUMÉRICA
MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS
DE ENSAYOS EXPERIMENTALES DE TENSIÓN
TANGENCIAL PURA Y SIMPLE EN MEMBRANAS
DE SILICONA MÉDICA

Autor/es

MARCOS MURILLO ROYO

Director/es

ESTEFANÍA PEÑA BAQUEDANO

Facultad / Escuela

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA DE ZARAGOZA

Año

SEPTIEMBRE 2015



Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO Y COMPARACIÓN NUMÉRICA
MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS
DE ENSAYOS EXPERIMENTALES DE TENSIÓN
TANGENCIAL PURA Y SIMPLE EN MEMBRANAS
DE SILICONA MÉDICA

Autor/es

MARCOS MURILLO ROYO

Director/es

ESTEFANÍA PEÑA BAQUEDANO

Facultad / Escuela

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA DE ZARAGOZA

Año

SEPTIEMBRE 2015

RESUMEN

ESTUDIO Y COMPARACIÓN NUMÉRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE ENSAYOS EXPERIMENTALES DE TENSIÓN TANGENCIAL PURA Y SIMPLE EN MEMBRANAS DE SILICONA MÉDICA

Este proyecto tiene como objetivo el estudio de los parámetros geométricos que condicionan los resultados obtenidos en ensayos de tensión tangencial para la caracterización de materiales compuestos, elastómeros y tejidos biológicos. En este proyecto se han realizado dos tipos de ensayos, el denominado ensayo de tensión tangencial simple, y el otro de tensión tangencial pura.

Dado que el tejido biológico es limitado, y que el estudio de muestras característico necesita una gran cantidad de muestras, se ha reproducido el comportamiento del material biológico mediante una silicona del mismo espesor y con características de rigidez semejantes.

Con objeto de poder asegurar la reproducibilidad de la silicona, se han realizado en el laboratorio ensayos con probetas rectangulares variando su relación entre la longitud y la anchura de las mismas, todas ellas normalizadas y cuyas medidas se reproducen en el ámbito de la ingeniería biomédica.

Una vez realizados todos los ensayos, se han obtenido los datos de deformación mediante la máquina “Instron”, y los proporcionados por los mapas de un sistema de cámaras de “Lavision”, siendo más precisos estos últimos, ya que no se realiza el promedio entre todos los puntos de la probeta, sino que se eligen los puntos donde se quiere calcular dicha deformación.

Se puede asegurar que para las probetas de mayor tamaño, es decir, las que tienen mayor longitud, se cumple de manera más precisa la uniformidad de las tensiones en el ensayo de tensión tangencial pura.

Para el ensayo de tensión tangencial simple, la uniformidad de las tensiones en las probetas se encuentra influenciada cuanto más preciso sea el cuadrado resultante entre las mordazas utilizadas en el ensayo.

TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN	7
1.1.	OBJETO DEL PROYECTO	7
1.2.	ALCANCE DEL PROYECTO	7
1.3.	JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	8
2.	ENSAYOS EXPERIMENTALES DE LABORATORIO	9
2.1.	ENTORNO DE TRABAJO.....	9
2.2.	SILICONA BIOMÉDICA	11
2.3.	ENSAZO DE TENSIÓN TANGENCIAL PURA	12
2.3.1.	INTRODUCCIÓN	12
2.3.2.	BASES DEL ENSAYO.....	12
2.3.3.	PROTOCOLO DEL ENSAYO	14
2.3.4.	TIPOS DE MORDAZAS	15
2.4.	ENSAZO DE TENSIÓN TANGENCIAL SIMPLE.....	17
2.4.1.	INTRODUCCIÓN	17
2.4.2.	BASES DEL ENSAYO.....	17
2.4.3.	PROTOCOLO DEL ENSAYO	18
2.4.4.	TIPOS DE MORDAZAS	19
2.5.	TIPOS DE PROBETAS.....	21
3.	ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	23
3.1.	OBJETO	23
3.2.	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL	23
3.3.	MODELADO Y CONDICIONES DE LAS PROBETAS	25
3.3.1.	ENSAZO TENSIÓN TANGENCIAL PURA	25
3.3.2.	ENSAZO TENSIÓN TANGENCIAL SIMPLE.....	26
4.	GRÁFICAS EXPERIMENTALES Y COMPARATIVA.....	28
4.1.	ENSAZO DE TENSIÓN TANGENCIAL PURO	28
4.1.1.	GRÁFICA RESUMEN DE LA “INSTRON”	28

4.1.2. GRÁFICA RESUMEN DE “LAVISION”	29
4.1.3. COMPARATIVA INSTRON-LAVISION	30
4.1.4. COMPARATIVA DE TAMAÑOS CON EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	31
4.2. ENSAYO DE TENSIÓN TANGENCIAL SIMPLE.....	33
4.2.1. GRÁFICA RESUMEN DE LA “INSTRON”	33
4.2.2. GRÁFICA RESUMEN DE “LAVISION”	34
4.2.3. COMPARATIVA INSTRON-LAVISION	35
4.2.4. COMPARATIVA DE TAMAÑOS CON EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	35
5. CONCLUSIONES DEL ENSAYO	37
6. BIBLIOGRAFÍA	38
ANEXO A – Resultados numéricos a partir del método de los elementos finitos.....	40
A.1. ENSAYO DE TENSIÓN TANGENCIAL PURA	40
A.1.1. RESULTADOS NUMÉRICOS Y GRÁFICAS OBTENIDAS POR EL M.E.F.	40
A.2. ENSAYO DE TENSIÓN TANGENCIAL SIMPLE	43
A.2.1. RESULTADOS NUMÉRICOS Y GRÁFICAS OBTENIDAS POR EL M.E.F.	43
ANEXO B – Resultados y graficado de todos los ensayos experimentales.....	46
B.1. ENSAYO DE TENSIÓN TANGENCIAL PURA	46
B.1.1. Resultados y gráficas de la Máquina de ensayos “Instron”	46
B.1.2. Resultados y gráficas de las cámaras de “Lavision”	51
B.1.3. Comparativa Instron-Lavision	56
B.2. ENSAYO DE TENSIÓN TANGENCIAL SIMPLE	59
B.2.1. Resultados y gráficas de la Máquina de ensayos “Instron”	59
B.2.2. Resultados y gráficas de las cámaras de “Lavision”	64
B.2.3. Comparativa Instron-Lavision	69
7. TABLA DE ILUSTRACIONES.....	71
ENSAYOS EXPERIMENTALES DE LABORATORIO	71
ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	71
GRÁFICAS EXPERIMENTALES Y COMPARATIVA.....	72
ANEXO A – ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	72
ANEXO B – RESULTADOS Y GRAFICADO COMPLETO DE TODOS LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES	73

ENsayo de tensión tangencial pura	73
ENsayo de tensión tangencial simple	74

1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETO DEL PROYECTO

Se va a establecer como objetivo de este proyecto el estudio de los parámetros geométricos que condicionan los resultados en dos tipos de ensayos, el primero es el ensayo de tensión tangencial pura, y en segundo lugar, el ensayo de tensión tangencial simple.

Debido a que las muestras de tejido biológico son pequeñas, se debe optimizar el tamaño de las muestras sin perder precisión, y dada la dificultad para poder tener un elevado número de muestras, se ha elegido un material que se asemeje y reproduzca en parte, el comportamiento en cuanto a la rigidez de dicho tejido biológico.

De esta manera se pretende establecer la caracterización de dicho material, la silicona médica, la cual se ha modelado a partir de unas probetas de forma rectangular, con unas pequeñas variaciones en la relación longitud-ancho, dando lugar a cinco tipos de probetas que se mostraran en capítulos posteriores.

A partir de los datos obtenidos por las máquinas utilizadas en los ensayos, se realizará el graficado de los mismos, con ayuda de las curvas de tensión-alargamiento se comparará con los resultados numéricos obtenidos con el software ABAQUS, así se establecerán las conclusiones que nos llevaran a poder comprobar las hipótesis tomadas en el ensayo de tensión tangencial y asegurar además, la reproducibilidad y la repetitividad de las muestras.

1.2. ALCANCE DEL PROYECTO

El presente proyecto se puede englobar dentro de la rama de la Biomecánica, la cual es la ciencia encargada del estudio de fenómenos cinemáticos y mecánicos que presentan los seres vivos considerados como sistemas complejos formados por tejidos, sólidos y cuerpos mecánicos.

La Biomecánica se estableció como disciplina reconocida y como área de investigación autónoma en la segunda mitad del siglo XX, en gran parte, gracias a los trabajos de Yuan C. Fung, cuyas investigaciones a lo largo de unas cuatro décadas, marcaron en gran parte los temas de interés de cada momento.

En esta área de conocimiento, existen apoyos en diversas ciencias biomédicas, utilizando conocimientos de mecánica, ingeniería, anatomía, fisiología y demás disciplinas, para así resolver los problemas derivados de las diversas condiciones a las que el cuerpo humano puede verse sometido.

1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La caracterización de materiales dentro del área de la Biomecánica es, por tanto, un campo en continua expansión dentro del mundo de la investigación médica.

La realización de estos ensayos, ya sean ensayos de inflado, ensayos de tracción uniaxial o biaxial, o los citados ensayos de tensión tangencial, permiten definir el comportamiento mecánico de aquellos tejidos biológicos que sean de gran interés. De esta manera se pueden llegar a determinar características mecánicas que de otro modo serían totalmente inaccesibles.

Caracterizar correctamente un tejido es de suma importancia para predecir su comportamiento una vez sometido a un esfuerzo. Por esto se ha elegido una silicona con propiedades similares al tejido biológico.

También cabe destacar que las mordazas de sujeción según el tipo de ensayo, son distintas, lo cual podría afectar de manera negativa el ensayo y condicionar las posteriores conclusiones.

Todos los ensayos se han realizado dentro del Grupo de Mecánica Aplicada y Bioingeniería del Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), perteneciente a la Universidad de Zaragoza. Los equipos usados para los ensayos, y su funcionamiento se detallaran a lo largo del presente proyecto.

Una vez se tengan realizados todos los ensayos del laboratorio, se procede a su análisis obteniendo resultados relacionados con la tensión y el alargamiento que sufren las probetas, para así compararlos con los modelos numéricos obtenidos a través de la simulación mediante el programa de elementos finitos “ABAQUS”, y así poder comparar y discutir los resultados obtenidos sacando las pertinentes conclusiones.

2. ENSAYOS EXPERIMENTALES DE LABORATORIO

2.1. ENTORNO DE TRABAJO

Como se ha comentado con anterioridad, todos los ensayos experimentales, ya sean pertenecientes al tipo tensión tangencial pura, o al simple, se han realizado dentro del Laboratorio de Caracterización de Materiales perteneciente al Grupo de Mecánica Aplicada y Bioingeniería del Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería de Aragón (I3A) de la Universidad de Zaragoza.

Dicho laboratorio cuenta lo necesario para este tipo de ensayos, desde la máquina que realiza el ensayo y su correspondiente software para la obtención de resultados, además de sus mordazas en función del tipo de ensayo que proceda y las diferentes células de carga para mayor o menos esfuerzo.

La máquina utilizada para llevar a cabo los ensayos, ya sean ensayos uniaxiales de tracción, o ensayos de tensión tangencial es la mostrada en la Figura 2.1.

Es un modelo de la marca comercial “Instron”, 5548 MicroTester, diseñada específicamente para ensayos de tracción uniaxial en tejidos blandos.

El avanzado software y la cantidad de sensores que conforman el sistema garantizan una notable exactitud en los resultados a pesar de las bajas cargas de ensayo.

El modo de sujeción que proporciona este sistema consiste en unas mordazas neumáticas controladas por un circuito auxiliar, que a través de un pedal, permite una sujeción firme y asegura que no se produzca el deslizamiento de la probeta que se está ensayando. Los tipos de mordazas utilizadas se detallarán en capítulos posteriores.



Fig. 2.1 Máquina de ensayos “Instron”

Todos los ensayos de este proyecto han sido grabados simultáneamente por dos cámaras de alta resolución pertenecientes al sistema StrainMaster, de la marca líder global “LaVision” en soluciones completas para la correlación de imágenes digitales (DIC), ver Figura 2.2.

Este sistema óptico basado en métodos no invasivos para la muestra permite, mediante la técnica de extensiometría sin contacto y su correspondiente software llamado “DaVision 8”, el “tracking” pixel a pixel de las imágenes almacenadas durante el ensayo, y el análisis del campo de desplazamientos en toda la muestra, así como la representación de dicho campo mediante el posterior procesado del vídeo grabado en el ensayo.



Fig. 2.2 Cámaras de “LaVision”

La capacidad de superponer datos numéricos, las redes o mallas de deformación, y los medidores de tensiones virtuales en la imagen cruda, permite a los usuarios identificar rápidamente y de forma global, la deformación elástica, así como el comportamiento del material plástico y los posibles mecanismos de fractura en caso de que se ensayara para ello.

Estos tipos de máquinas o instrumentos han de ser perfectamente calibrados antes de los ensayos, ya que estamos trabajando con tensiones, desplazamientos y deformaciones de bajos valores, y se deben asegurar resultados óptimos ya que cualquier error podría poner en peligro la validez del ensayo.

2.2. SILICONA BIOMÉDICA

Para realizar los ensayos llevados a cabo en este proyecto se ha usado una silicona biomédica, la cual se asemeja, en cuanto a la rigidez y a la deformabilidad, a un tejido biológico.

Este material tiene un comportamiento totalmente isótropo, lo cual quiere decir, que presenta las mismas propiedades elásticas sea cual sea la dirección en la que actúa la carga. Se ha tomado una densidad aproximada de $0,25 \text{ gr/cm}^3$ según los datos proporcionados por el fabricante.

Además cuenta con la ventaja de que no es necesario ningún tratamiento previo para su procesado. Como se muestra en la Figura 2.3, el espesor es de 3 mm, intentando reproducir al máximo el espesor de los tejidos biológicos.



Fig. 2.3 Lámina de Silicona

2.3. ENSAYO DE TENSIÓN TANGENCIAL PURA

2.3.1. INTRODUCCIÓN

Como se ha comentado con anterioridad, los tejidos biológicos del cuerpo humano están sometidos constantemente a deformaciones de carácter tridimensional provocadas por los esfuerzos a lo que están expuestos, ya sean de tracción, compresión, de cizalladura, o la combinación entre estos.

La deformación para este tipo de ensayos, siempre se dará en el plano de un material relativamente delgado para muestrear. Se parte de un material isotrópico y se estudiará su matriz de deformaciones y las interacciones entre los alargamientos producidos.

Los resultados del estudio se compararán con los resultados numéricos obtenidos por el software de simulación mediante el método de elementos finitos para poder sacar las pertinentes conclusiones sobre el ensayo.

Para que se puedan establecer conclusiones de mayor índole, se han realizado los ensayos con los 5 tipos de probetas, las cuales se mostrarán en el capítulo 2.5, en las que se han producido variaciones de la relación longitud-ancho. Además, de cada una de ellas, se han tomado 5 muestras para poder asegurar la reproducibilidad del ensayo.

2.3.2. BASES DEL ENSAYO

Los primeros ensayos de la tensión tangencial en tejidos biológicos datan de 1972 aproximadamente, en los cuales se pretendía, mediante el esfuerzo de cizalla, caracterizar tejidos blandos, como por ejemplo, el miocardio y los ligamentos.

Chu Feng y su equipo de investigación realizaron en vivo mediciones de cizalla pura en el mesenterio de un gato, para analizar el efecto de la perfusión, la presión sanguínea, los movimientos respiratorios y la escisión de las muestras desde el órgano adyacente.

En teoría de grandes deformaciones, el estado de deformación de la probeta asociado a este tipo de ensayos se determina por dos características principales:

1. En el plano de mayor valor de tensión, la componente perpendicular de la velocidad de deformación es idénticamente cero en todo momento.
2. No se produce rotación del cuerpo rígido del material ensayado.

El tipo de probeta utilizado para este tipo de ensayos es rectangular, ver Figura 2.4.

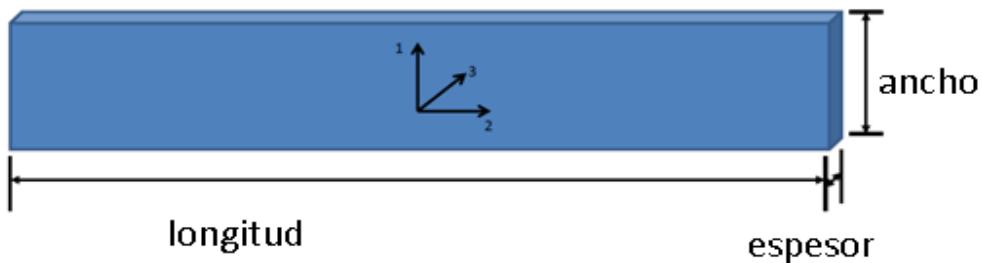


Fig. 2.4 Tipo de probeta para el ensayo tangencial puro

Como hipótesis de ensayo se parte de la ligera compresibilidad del material, la suavidad de la superficie y parte de su visco-elasticidad. Su gradiente de deformación (\mathbf{F}) en términos de estiramiento axial (λ) quedará de la siguiente manera:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda^{-1} \end{bmatrix}$$

Así se determina que la velocidad de deformación (\mathbf{D}) puede escribirse como:

$$\mathbf{D} = \frac{\cdot}{\lambda} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Realizando el estudio con el círculo de “Mohr” sobre el valor del tensor de deformación, se puede comprobar que los planos de mayor tensión tienen asociada un valor de deformación perpendicular cero, y que la tensión tangencial y normal es idénticas, por lo que se denomina tensión pura. Ver Figura 2.5.

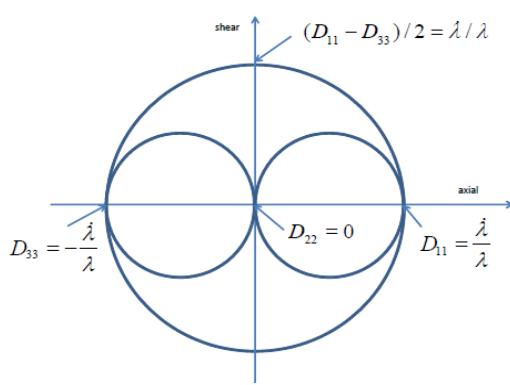


Fig. 2.5 Círculo de “Mohr” Tensión Pura

Nótese que las hipótesis solo se cumplen de forma exacta en la zona central de la probeta por la simetría del problema, siendo más exacta en el resto cuanto mayor es el ratio ancho/alto, y que en ningún caso se cumplirían en los extremos de la misma.

En el capítulo 4 del presente proyecto, se explica con mayor detalle, como se lleva a cabo el ensayo a partir de las hipótesis tomadas, y como se realiza el análisis de los datos para poder hacer las comparaciones y establecer las conclusiones finales.

2.3.3. PROTOCOLO DEL ENSAYO

En este caso, el protocolo de ensayo dentro del laboratorio ha sido el siguiente:

1. Una vez definidos los tipos de probetas a utilizar, y sus correspondientes medidas, se utilizaban los modelos en acero para realizar los cortes de las probetas en el rollo de la silicona biomédica.
2. Se realizaban los correspondientes ensayos con cada tipo de probeta, recogiendo todos los datos que nos proporcionaba la máquina de ensayos “Instron”, y por supuesto, grabándolo mediante el sistema de cámaras de “Lavision” para su posterior procesado y obtención de las gráficas correspondientes.
3. Se hacía una rápida comprobación mediante el tratamiento de los datos obtenidos en una hoja de cálculo para verificar que el ensayo se había ejecutado de manera adecuada.

Debido al tipo de material utilizado, la célula de carga de la máquina de ensayos era de 10 N, la más pequeña, y la velocidad de deformación del ensayo con la que se producía el desplazamiento de la probeta era de un 10%/min hasta un nivel del 10% sobre la longitud resultante entre las mordazas. Con esta velocidad se garantizaba que la probeta no sufría ningún tipo de daño adicional a la deformación y se minimizaba los efectos viscoelásticos.

En cuanto a la duración del ensayo, era de unos 8 minutos por muestra, variando la cantidad en función del desplazamiento, pero siempre se realizaba el ensayo realizando 3 ciclos de carga, es decir, aplicando el desplazamiento calculado y volviendo al desplazamiento nulo, sin llegar nunca a la rotura de la probeta.

De esta manera, y tomando como válido el desplazamiento del tercer ciclo, se aseguraba que no influyera la histéresis en el material para garantizar los resultados. En la gráfica de la Figura 2.6 se puede apreciar con mayor detalle la representación de los tres ciclos:

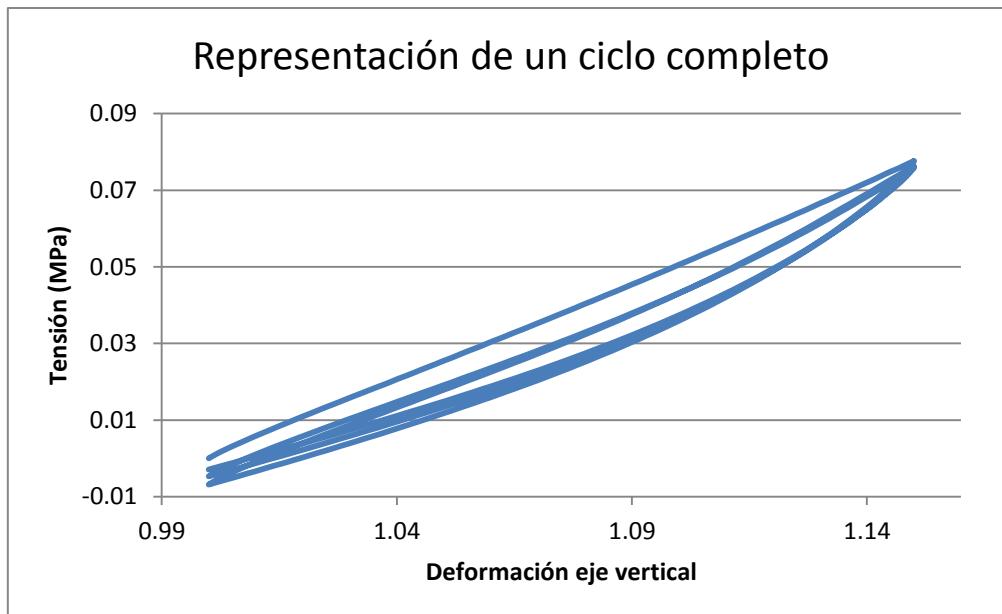


Fig. 2.6 Representación de un ciclo completo de ensayo

En todos los ensayos se tomará el tercer ciclo de aplicación de la carga para el graficado de los resultados de las deformaciones producidas. A continuación se detallará el método de cálculo y los resultados obtenidos haciendo distinción de los dos procesados, el de la propia máquina de ensayos, y el de “tracking” a partir de las cámaras utilizadas.

2.3.4. TIPOS DE MORDAZAS

Un detalle importante en este tipo de ensayos realizados a través de probetas, son los métodos de sujeción de las mismas, ya que deberán de proporcionar seguridad y fiabilidad durante el procesado en la máquina de ensayos.

En este tipo de ensayo el sistema utilizado consta de dos mordazas, mostradas en la Figura 2.7, ambas realizadas en acero, el cual, aun siendo un sistema tradicional, asegura fiabilidad y firmeza en el agarre de la probeta. La máquina de ensayos lleva incorporado el sistema de alojamiento de las mordazas mediante una unión atornillada, junto con un perno de seguridad.

Las mordazas se encuentran conectadas a un circuito neumático, controlado por el operario a través de un pedal, para así asegurar la sujeción cuando la probeta esté totalmente calibrada entre las mordazas.

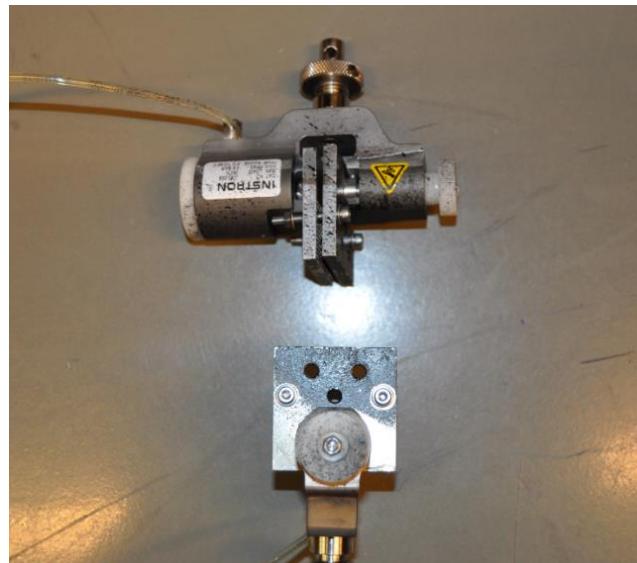


Fig. 2.7 Mordazas Ensayo Tangencial Puro

La colocación de la probeta se realiza a lo largo de su eje horizontal, es decir, no importa la longitud que tenga, si no la anchura de la misma y el espacio que resulte entre las dos mordazas.

En este ensayo, la mordaza inferior se mantendrá en todo momento fija, reproduciendo que la probeta se encuentra empotrada por la parte inferior, y será la mordaza superior la que ejerza una fuerza en el sentido de su eje vertical y de valor positivo, como se diría vulgarmente, tirando hacia arriba. Se puede observar cómo queda la probeta una vez realizado el ensayo. Ver figura 2.8.

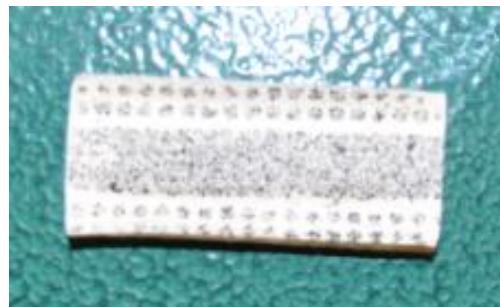


Fig. 2.8 Probeta Tipo Ensayo Puro

Antes de cada ensayo, se debe calibrar la distancia libre entre las mordazas, es decir, la anchura que tiene la probeta en el ensayo antes de producirle los ciclos de carga correspondientes, para así controlar cual ha sido la deformación producida según el desplazamiento impuesto.

2.4. ENSAYO DE TENSIÓN TANGENCIAL SIMPLE

2.4.1. INTRODUCCIÓN

La mayor diferencia con el otro ensayo radica en que en este caso, se produce una rotación del cuerpo rígido, es decir, la probeta, afectando al tensor de giro, y modificando las ecuaciones correspondientes al estudio de las deformaciones.

2.4.2. BASES DEL ENSAYO

Del mismo modo que en el ensayo de tensión tangencial pura se tomaba como referencia el tensor de deformaciones en términos de estiramiento axial, en este caso queda modificado el tensor ya que se produce una clara rotación del cuerpo rígido, afectando así al estado de deformaciones (\mathbf{F}) que en este caso se toma como:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & \gamma & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En el caso de cizalla simple, se comprueba el estado de tensiones a partir del gradiente de velocidad (\mathbf{L}) y se aplica la condición del tensor de giro (\mathbf{W}), por lo que resulta:

$$\mathbf{L} = \dot{\mathbf{F}}\mathbf{F}^{-1} = \mathbf{D} + \mathbf{W} = \dot{\gamma} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \frac{\dot{\gamma}}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \frac{\dot{\gamma}}{2} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

La manera de poder estudiar las deformaciones producidas en la probeta es ensayar la misma probeta pero aplicando la teoría, es decir, produciendo en este caso un desplazamiento lateral que hace que el cuerpo tenga ese giro. De esta manera la probeta ensayada tendrá esta forma, ver Figura 2.9.



Fig. 2.9 Probeta Ensayo Tangencial Simple

En la Figura 2.10 se muestra con gran detalle cómo se produce el ensayo y queda reflejado el giro que se produce en la probeta.

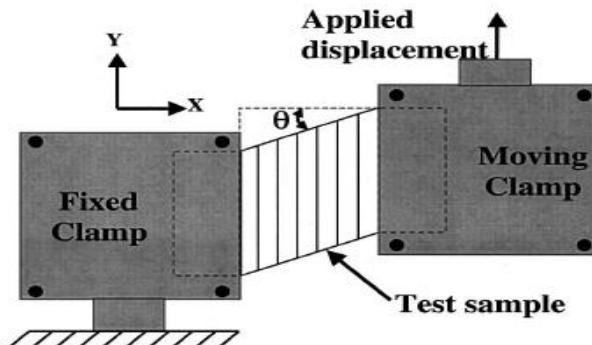


Fig. 2.10 Representación Ensayo Tangencial Simple

2.4.3. PROTOCOLO DEL ENSAYO

En cuanto a este tipo de ensayos, el protocolo llevado a cabo en el laboratorio es idénticamente el mismo:

1. Dado que las probetas son iguales para los dos ensayos, se realizaran los moldes de silicona a partir de las guillotinas de acero.
2. Se realizará el cambio de las mordazas en la máquina de ensayos y se tomarán los datos que nos proporcionaba la máquina “Instron”, y de igual manera, los datos e imágenes de las cámaras.
3. Se realiza la misma comprobación que en el otro ensayo mediante el tratamiento de los datos obtenidos para su verificación.

La célula de carga será la misma, de 10 N, y el desplazamiento seguirá siendo un 10% de la longitud entre las mordazas, con una velocidad de deformación del 10%/min, eliminando en la medida de lo posible los efectos viscoelásticos.

La duración del ensayo es diferente que en el primer tipo de ensayo, dado que el valor del desplazamiento en este caso es mayor, pero dicha variación no supera los dos minutos aproximadamente.

El ensayo también consta de 3 ciclos completos sin llegar nunca a la rotura y del mismo modo, se tomarán igualmente los datos de tensión y deformación en el tercer ciclo de desplazamiento, con la diferencia de que en este caso, la deformación que nos interesa es la tangencial, es decir la "Exy", y cuyas fórmulas para el cálculo se detallaran a continuación.

2.4.4. TIPOS DE MORDAZAS

Se puede apreciar claramente en la Figura 2.11, que en este ensayo la probeta también se coloca en posición horizontal, es decir, a lo largo de su eje longitudinal, pero con la diferencia de que en este caso no es la anchura resultante la que nos interesa, sino que la distancia entre las mordazas sea la misma que la anchura de la probeta, quedando como forma final entre ellas un cuadrado perfecto.

A diferencia con el otro ensayo, en este caso la mordaza izquierda actuará como elemento de sujeción de la probeta, representando el empotramiento, y será en la parte derecha de la probeta donde se le aplique la fuerza de sentido vertical y de valor positivo, hacia arriba, a través de la otra mordaza.

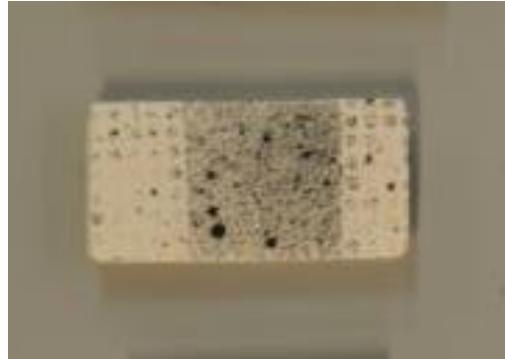


Fig. 2.11 Probeta ensayada Tipo Simple

La mayor diferencia entre las mordazas radica en que en este caso no son neumáticas, sino que la sujeción es de la probeta es de tipo atornillada (Figura 2.12). Primero se atornilla una de ellas, y se calibra el cuadrado que se precisa a través de su longitud, atornillando en segundo lugar la otra mordaza.

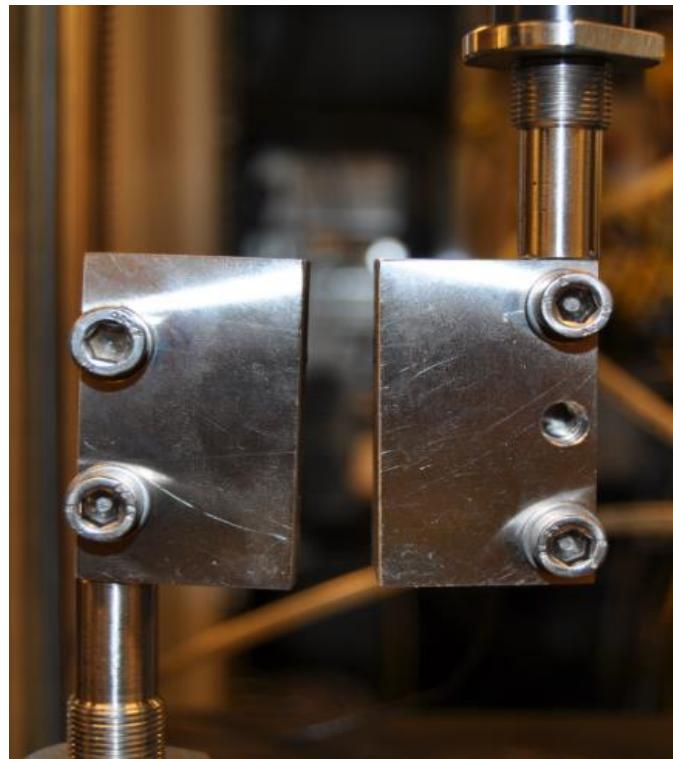


Fig. 2.12 Mordazas Ensayo Tangencial Simple

El sistema de unión con la máquina de ensayos es exactamente igual que en el caso anterior, utilizando un perno de seguridad para asegurar que la mordaza no se desplace y haya que volver a repetir el ensayo.

2.5. TIPOS DE PROBETAS

Para realizar los dos tipos de ensayos, se han establecido 5 tipos de probetas con forma rectangular cuyas medidas se muestran a continuación de mayor a menor tamaño. Como se ha comentado con anterioridad, no se hará distinción entre las probetas para el ensayo tangencial de tipo puro y el simple, ya que el estudio se realiza con el mismo tipo de muestras.

Las medidas se establecen todas en milímetros, siendo la medida real de la probeta, la indicada en el recuadro (ver Figuras 2.13, 2.14, 2.15, 2.16 y 2.17)

El orden establecido en los paréntesis corresponde a: Longitud x Anchura x Espesor

Tipo de probeta Nº1 (35 x 15 x 3)

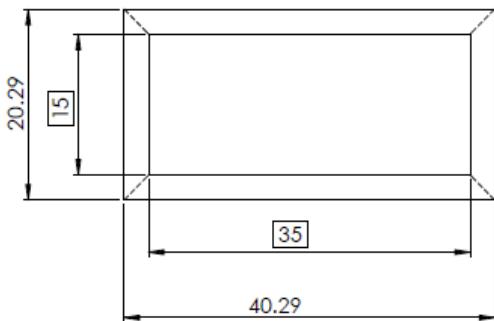


Fig. 2.13 Probeta Tipo 1

Tipo de probeta Nº2 (30 x 15 x 3)

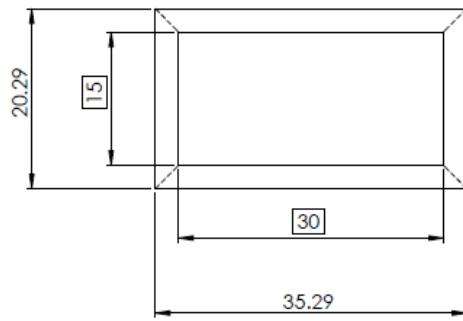


Fig. 2.14 Probeta Tipo 2

Tipo de probeta Nº3 (25 x 15 x 3)

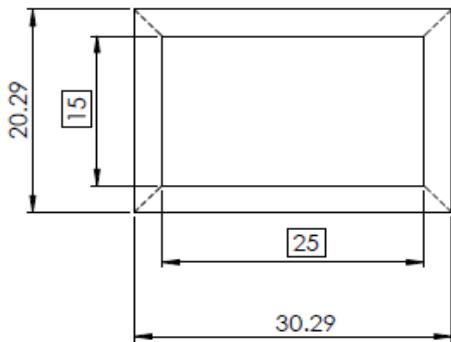


Fig. 2.15 Probeta Tipo 3

Tipo de probeta Nº4 (25 x 10 x 3)

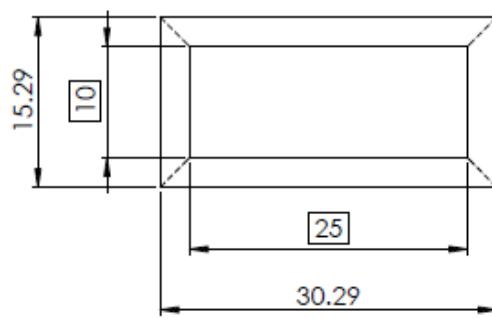
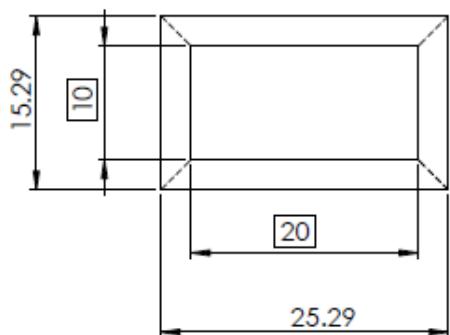
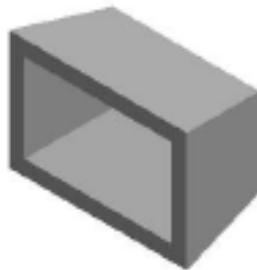


Fig. 2.16 Probeta Tipo 4

Tipo de probeta Nº5 (20 x 10 x 3)**Fig. 2.17 Probeta Tipo 5**

Las probetas para ensayar se recortan directamente de la lámina de silicona biomédica mostrada con anterioridad mediante unos moldes de acero disponibles en el laboratorio, y realizados con las medidas deseadas para nuestro estudio. Estos moldes precisan de un canto afilado para realizar el corte lo más limpio posible, y así obtener la mayor precisión posible en las probetas.

En la Figura 2.17 se puede apreciar con mayor detalle la forma de la guillotina utilizada:

**Fig. 2.18 Esquema guillotina de acero**

3. ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

3.1. OBJETO

En este tipo de ensayos, los resultados experimentales son importantes para poder establecer las conclusiones, pero el progreso de la tecnología y la mejora de software de simulación ha supuesto que se pueda predecir lo que debería ocurrir dadas unas determinadas condiciones y el tipo de material empleado, validando las hipótesis tomadas para el correspondiente ensayo.

Así pues, se ha realizado el modelado de las probetas a través del método de elementos finitos, realizando las simulaciones necesarias con el programa de cálculo “ABAQUS”, cuyo estudio ha permitido establecer todas las condiciones del ensayo, una perfecta caracterización de la silicona empleada, y unos resultados teóricos y muy semejantes a los resultados experimentales que se discutirán en apartados posteriores.

3.2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

Como se ha comentado en el apartado 2.2, el material usado es una silicona médica similar al tejido biológico, ya que tiene 3 mm de espesor y cuenta con unas características de compresibilidad y rigidez parecidas.

Ya que la silicona no es material elástico lineal, sino que por sus características se aproxima a un elastómero donde no existe relación lineal entre tensión y deformación, se modelará como un material isótropo y con un comportamiento hiperelástico.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que la caracterización del material se ha realizado con el modelo de sólido “neo-Hookeano”, a través de los coeficientes que conforman las ecuaciones necesarias para definirlo.

$$W = W(I_1, I_2, I_3)$$

El primer coeficiente utilizado “C1” se denomina “coeficiente de Rivlin” y pertenece a un modelo anterior donde se establece que “la función de densidad de energía de deformación (W) se puede expresar como un polinomio de los alargamientos principales o los invariantes de deformación”. El valor de “C1” que se ha tomado es 0,0978 Mpa, determinado previamente en otro proyecto mediante ensayos biaxiales.

$$W = C_1(I_1 - 3) + \frac{1}{D}(J - 1)^2$$

El segundo coeficiente que define el material es “D”, el cual asume la incompresibilidad del material, que en este caso toma el valor de 0, ya que es una de las hipótesis de cálculo tomadas en este tipo de ensayos.

En la Figura 3.1 se muestra con detalle las características aplicadas al material y las propiedades del mismo; hay que añadir que se ha tomado una densidad aproximada de 0.25 gr/cm³ proporcionada por el fabricante.

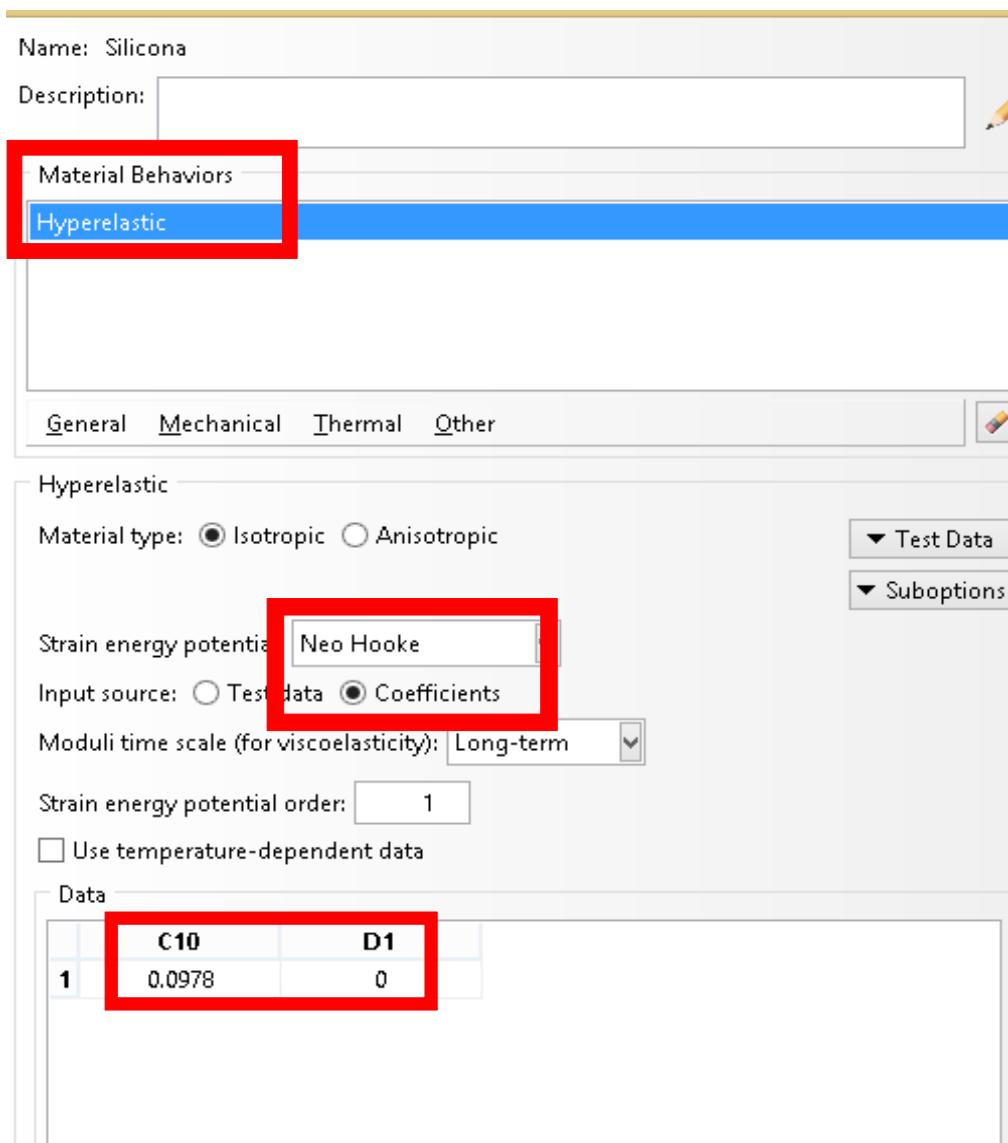


Fig. 3.1 Tabla de Características del Material

3.3. MODELADO Y CONDICIONES DE LAS PROBETAS

3.3.1. ENSAYO TENSIÓN TANGENCIAL PURA

Dado que la posición de la probeta es la misma para los dos ensayos, cabe destacar, que las mordazas no, por lo que es necesario hacer dos modelados de las mismas.

En el caso del ensayo de tensión tangencial pura, se han hecho dos particiones, representando cada una de ellas la parte agarrada por las mordazas y en la cual se impondrán las condiciones de contorno y el desplazamiento correspondiente.

Una vez conocida la longitud final que resulta de colocar la probeta entre las mordazas, se aplican las condiciones del ensayo, es decir, en la parte de arriba se aplica un desplazamiento vertical correspondiente al 15% de la longitud resultante, lo que nos dará resultados teóricos de las tensiones que sufre la probeta y valores de las deformaciones producidas.

En la parte de debajo se imponen desplazamientos nulos para las tres direcciones principales, representando así el empotramiento que sufre con la mordaza de abajo, la cual no se mueve en todo el ensayo. Ver Figura 3.3.

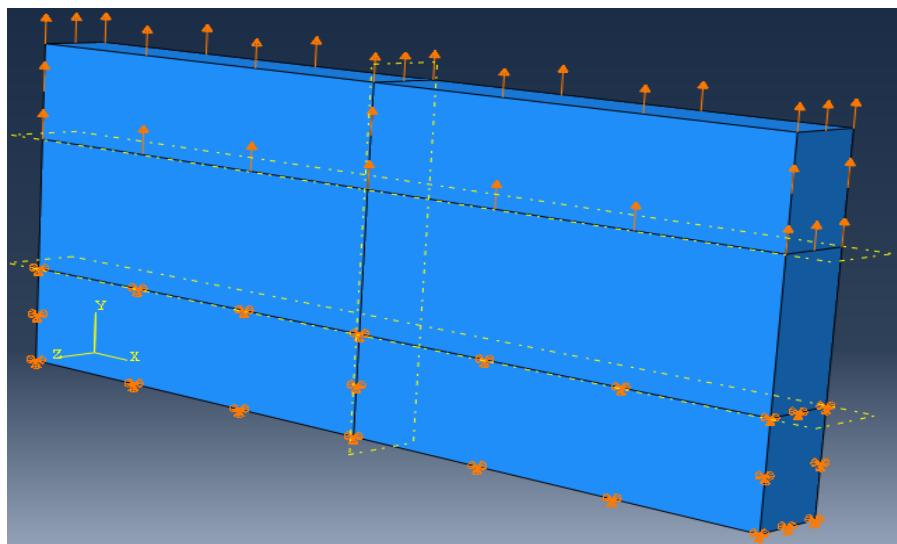


Fig. 3.2 Condiciones y cargas para Ensayo Tensión Pura

Para el mallado de la probeta se han utilizado elementos lineales “C3D8H” y una malla lo suficientemente fina, ya que dada la simplicidad de la geometría, no existen zonas de transición donde se puedan producir dislocaciones de los elementos. Ver Figura 3.3.

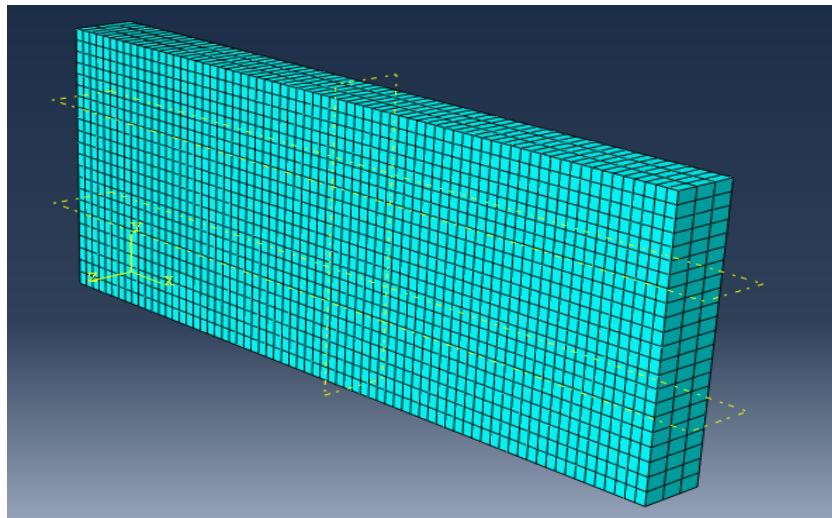


Fig. 3.3 Mallado del modelo. Ensayo Tensión Pura

3.3.2. ENSAYO TENSIÓN TANGENCIAL SIMPLE

La diferencia con el otro ensayo radica en que en este caso, la probeta está amordazada por los laterales, es decir, el empotramiento se producirá en la partición izquierda y el desplazamiento impuesto se considerará en la partición de la derecha.

Por esta razón, se puede comprobar en la Figura 3.4 que las particiones están realizadas, de distinta manera y orientación, pero los pasos a seguir en el modelo son los mismos que en el otro tipo de ensayo. También se pueden visualizar las nuevas condiciones de contorno y la diferente orientación del desplazamiento comentado en el primer párrafo.

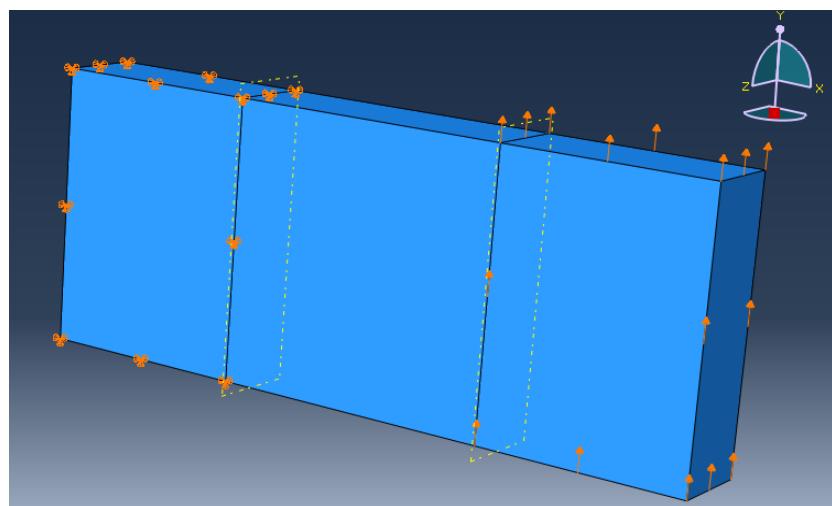


Fig. 3.4 Modelo con cargas y condiciones de contorno. Ensayo Tensión Simple

La otra diferencia que cabe destacar, es que en este tipo de ensayo, la malla de la probeta tiene 4 elementos en el espesor, cuando en la anterior eran 3, dado que en este caso se hace una mayor aproximación en el espesor, ya sea por la parte de arriba o por la parte de abajo, donde no importa tanto la parte central de la probeta; en la Figura 3.5 se presenta el mallado en este caso:

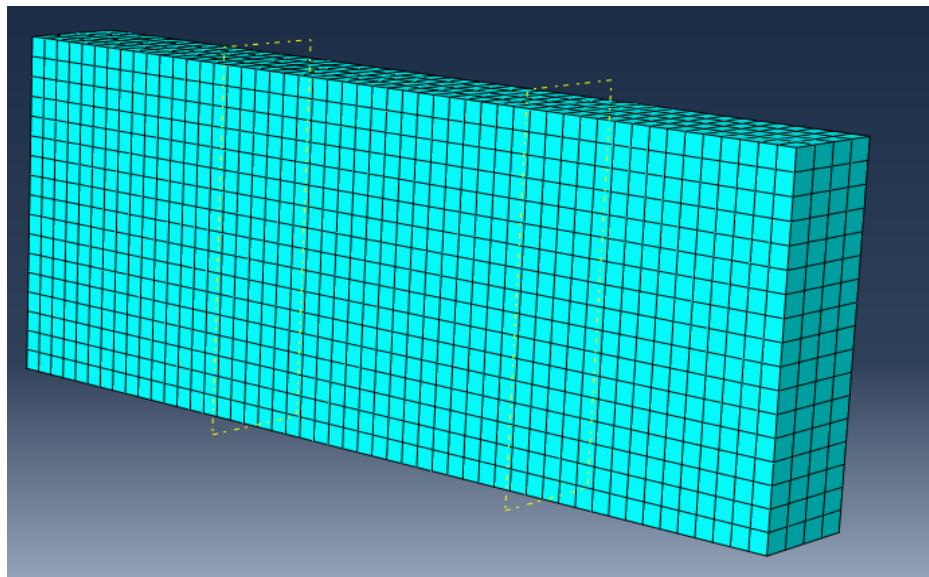


Fig. 3.5 Mallado del modelo del Ensayo de Tensión Simple

4. GRÁFICAS EXPERIMENTALES Y COMPARATIVA

4.1. ENSAYO DE TENSIÓN TANGENCIAL PURO

4.1.1. GRÁFICA RESUMEN DE LA “INSTRON”

Una vez terminados los ensayos de todas las muestras que componen el estudio del proyecto, se dispone a recabar toda la información proporcionada por la máquina de ensayos que proporciona una serie de datos en función del tipo de probeta ensayado, y sobre un intervalo de tiempo determinado, recogiendo así en cada momento datos numéricos sobre la extensión provocada y de la carga ejercida por la célula.

Una vez agrupados los datos de cada muestra en función del tipo de probeta, debemos llegar a sacar las gráficas en las que se relaciona la tensión con la deformación unitaria de cada probeta para así poder comprobar la repetitividad del ensayo y asegurar la reproducibilidad en función del tipo elegido.

Para el cálculo de la tensión aplicada en la probeta se toma la fórmula que relaciona la fuerza ejercida sobre la probeta, proporcionada directamente como dato en los archivos que nos aporta la máquina de ensayos, frente al área en la cual se aplica dicha fuerza, por lo que resulta que:

$$\sigma [MPa] = \frac{F [Newton]}{A [mm^2]} \times \lambda [adimensional]$$

Para la obtención de la deformación unitaria de la probeta en la dirección elegida, se ha tomado la relación entre el incremento del alargamiento producido, denominando “u” a la extensión producida, y la longitud que tenía la probeta entre las dos mordazas antes del ensayo, llamada en este caso “Lo”, de tal manera que resulta esta relación:

$$\lambda [adimensional] = \frac{\Delta L [mm]}{Lo [mm]} = 1 + \frac{u}{Lo}$$

Una vez se tienen todos los datos, se recogen en un único archivo para tratarlos y se procede a realizar el graficado de los mismos, para poder sacar las posteriores conclusiones y comprobar la reproducibilidad y repetitividad del ensayo realizado.

Como se muestra en la Figura 4.1, se ha realizado una media entre las tensiones y las deformaciones de cada tipo de probeta, es decir, la media entre los resultados de las 5 muestras de cada una, para obtener una curva de cada tipo y poder compararlas.

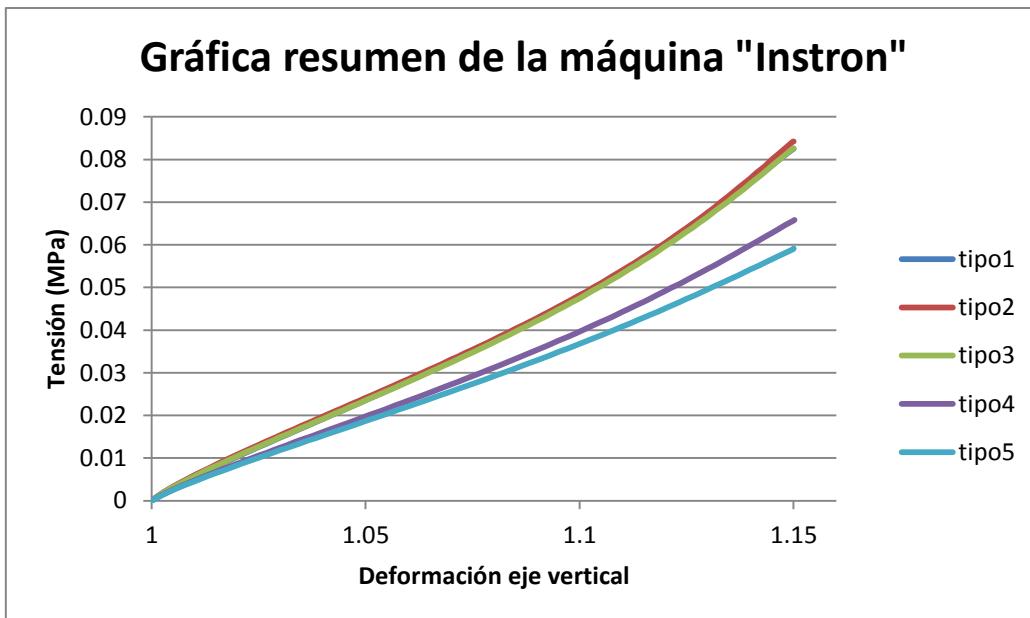


Fig. 4.1 Gráfica “Instron” con los 5 tipos

En el Anexo B, se encuentran todas las gráficas y la representación de la desviación producida entre las diferentes muestras de cada tipo, donde se puede apreciar con mayor detalle la reproducibilidad de los ensayos y como varían los resultados en cuanto a deformaciones, según el tamaño de probeta que se está ensayando.

4.1.2. GRÁFICA RESUMEN DE “LAVISION”

Del mismo modo que la máquina de ensayos “Instron” proporcionaba unas series de datos de tensión y de extensión en los intervalos de tiempo impuestos, el post-procesado de las imágenes grabadas pixel a pixel por las cámaras de “Lavision” también proporciona datos de deformación en el eje vertical y horizontal, por separado, en tanto por ciento, por lo que resulta más fácil su cálculo.

El método consiste en seleccionar dos puntos de la probeta en el software de la máquina y la deformación sufrida entre ellos, aplicando esta sencilla fórmula mostrada a continuación, se obtiene la deformación unitaria a partir de la deformación sufrida en el eje vertical “ ε_y ”, siempre para las mismas tensiones, y así comprobar cuanto se desvíe sobre los resultados obtenidos por la máquina “Instron”. Ver Figura 4.2.

$$\lambda \text{ [adimensional]} = 1 + \frac{\varepsilon_y [\%]}{100}$$

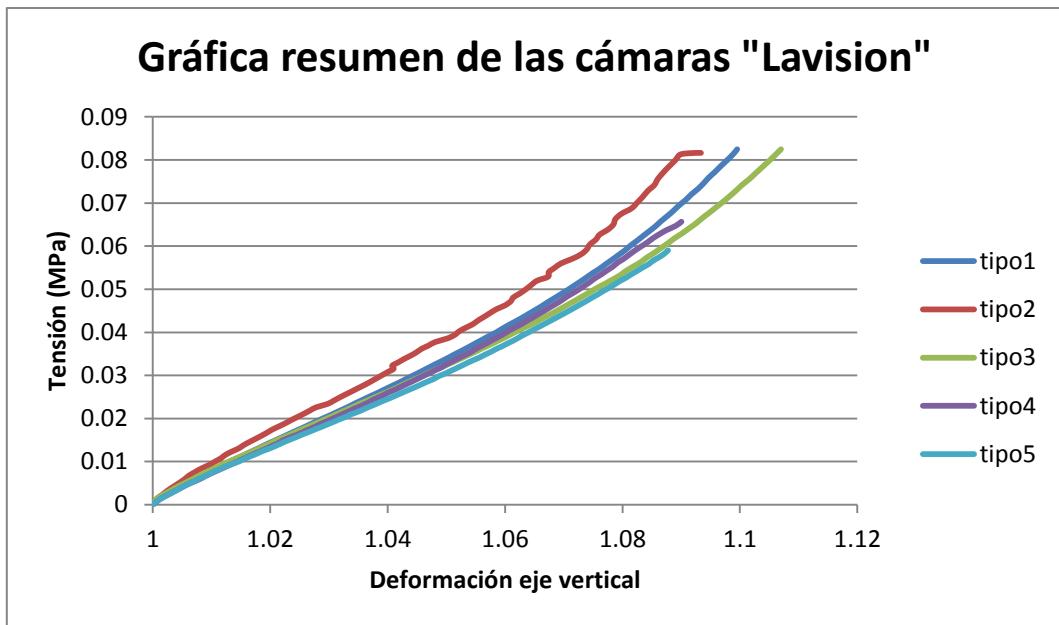


Fig. 4.2 Gráfica de “Lavision” con los 5 tipos

Al igual que en el apartado anterior, en los anexos, en concreto en el Anexo B, se encuentran los demás gráficos de todas las probetas a partir de los cuales se han obtenidos las medias de cada tipo, para así poder hacer la comparación en una sola gráfica, demostrando como afecta la variación de la longitud y de la anchura a la hora de soportar el esfuerzo aplicado.

4.1.3. COMPARATIVA INSTRON-LAVISION

Una vez obtenidos todos los resultados de la máquina “Instron” y los proporcionados a través del “tracking” pixel a pixel mediante las cámaras de “Lavision”, se hace la comparación en una única gráfica para asegurar la veracidad de las conclusiones, y se puede ver que se cumple la hipótesis de que las desviaciones de los alargamientos son mayores a través de “Lavision”, ya que no realiza la media en todos los puntos de la probeta, sino que la mide en los puntos seleccionados en el estudio.

La Figura 4.3 muestra dicha comparación tomando como probeta el Tipo 1, es decir, el de mayor longitud, quedando demostrada lo explicado en las posteriores conclusiones.

Puede observarse que la rigidez aparente del material es mayor si se emplea el sistema de medida de “Lavision”, el cual además es más exacto, que si se emplea el sistema de la máquina “Instron”.

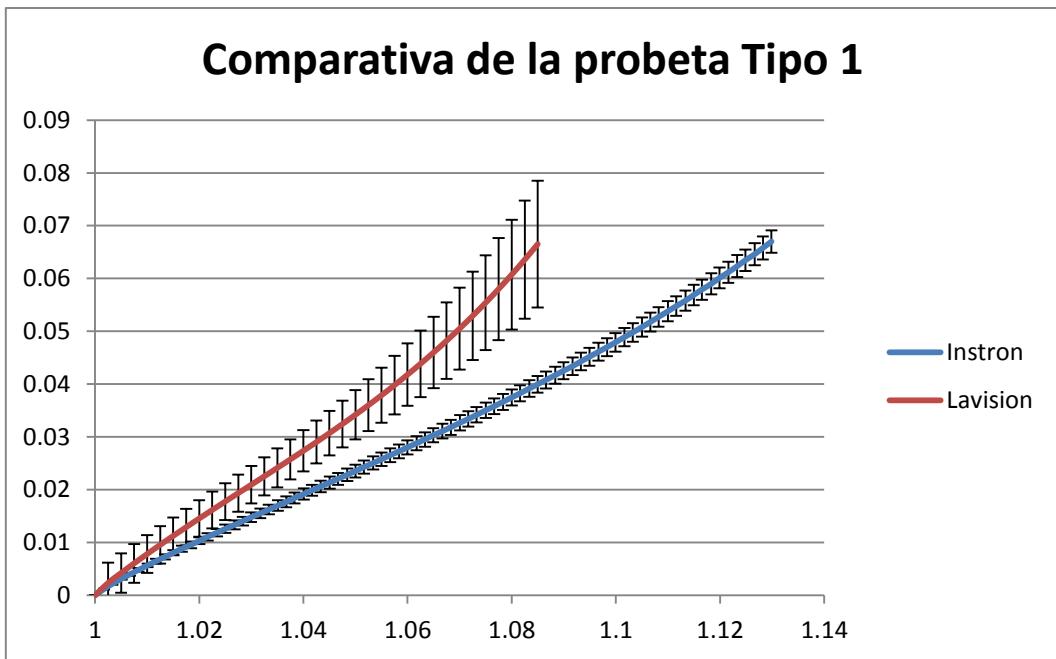


Fig. 4.3 Gráfica comparativa Instron/Lavision probeta Tipo 1

4.1.4. COMPARATIVA DE TAMAÑOS CON EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

En la Figura 4.4 se muestran los resultados numéricos que proporciona el software de simulación para la probeta del Tipo 1, donde puede verse que las tensiones en el centro de la probeta son mayores, y que la uniformidad en la probeta es menor.

Los valores de las tensiones normales en el eje vertical varían entre 0.09 y 0.1 Mpa, siendo la parte central de la probeta las más afectada.

El resto de las simulaciones de los otros tipos de probetas, se encuentran recogidos en el Anexo A.

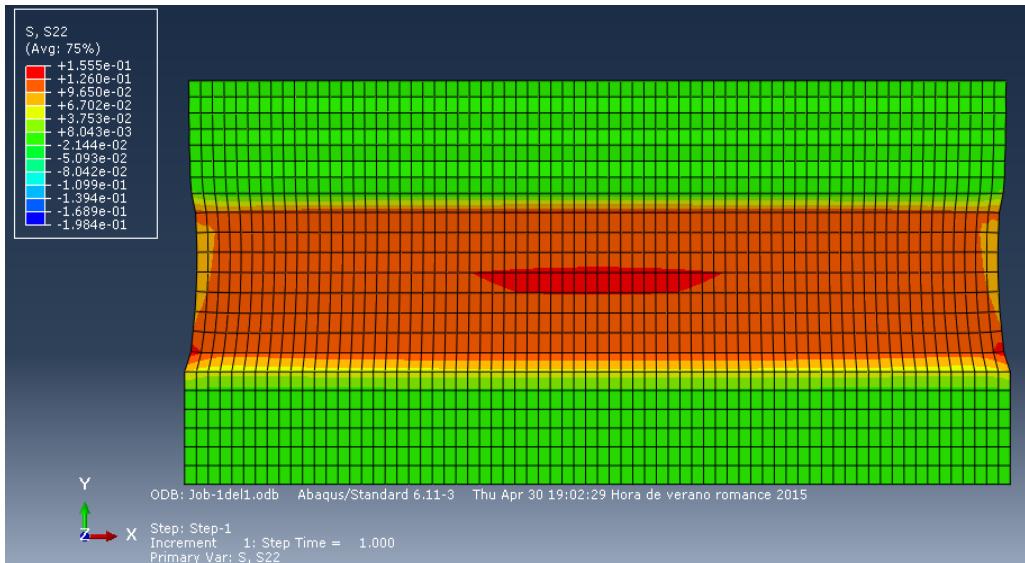


Fig. 4.4 Representación de las tensiones verticales probeta Tipo 1

4.2. ENSAYO DE TENSIÓN TANGENCIAL SIMPLE

4.2.1. GRÁFICA RESUMEN DE LA “INSTRON”

Dado que la máquina de ensayos es la misma para los dos tipos de ensayos, en este caso, la obtención de datos mediante los correspondientes archivos es la misma, ya que ésta recoge los datos en hojas de cálculo a partir de ciertos intervalos de tiempo, donde se muestra la extensión producida, la carga, la tenacidad, la deformación real y algún dato más que en este caso no se necesita.

Para el cálculo de la tensión solo precisaremos de la carga producida en cada momento, la cual relacionaremos con el área en la que se aplica y aplicaremos esta fórmula:

$$\sigma [MPa] = \tau xy [MPa] = \frac{F [Newton]}{A [mm^2]}$$

A la hora de calcular la deformación tangencial de la probeta, tenemos que tener en cuenta la rotación que se produce de la probeta, cuyo ángulo hemos denominado por la letra “θ” y donde se cumple la siguiente relación, siendo “gamma” la deformación tangencial producida:

$$\tan(\theta) = \frac{u[mm]}{L_0[mm]} = \gamma xy [adimensional]$$

Una vez realizados todos los cálculos y recogidos en una hoja de cálculo, se procede a su tratamiento con las ecuaciones citadas, los cuales quedan plasmados en la gráfica de la Figura 4.5, que muestra las medias de los 5 tipos de probetas ensayados.

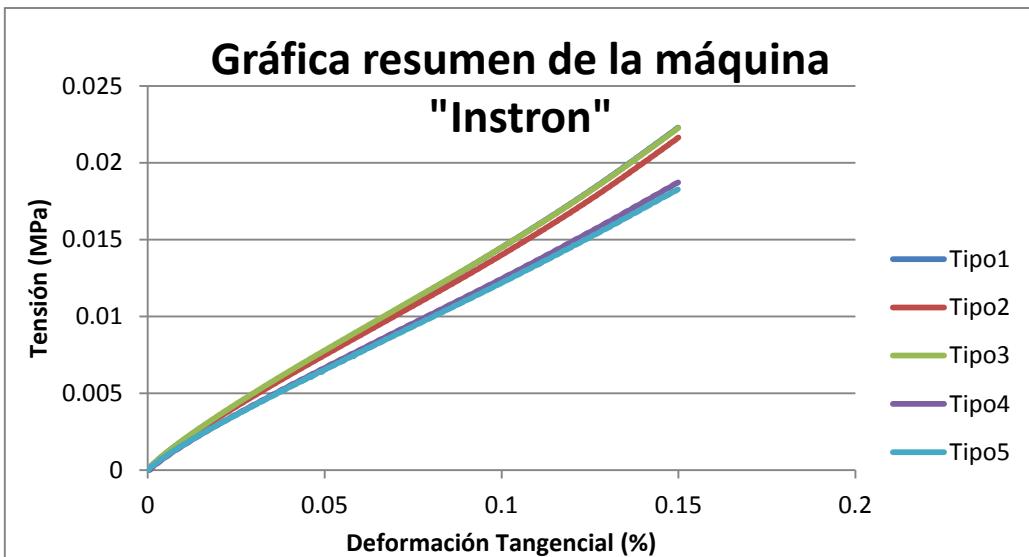


Fig. 4.5 Gráfica "Instron" con los 5 tipos

4.2.2. GRÁFICA RESUMEN DE "LAVISION"

Debido a problemas con los valores pixel a pixel de las deformaciones tangenciales donde algunos se disparaban a la hora de realizar los cálculos para las gráficas, se optó por calcular la deformación directamente sobre un punto, es decir, el porcentaje de la deformación producida, por lo que en este caso, no hizo falta usar ninguna fórmula para el cálculo, sino que bastaba con calcular el tanto por uno de dicha deformación.

La gráfica resultante se muestra en la Figura 4.6:

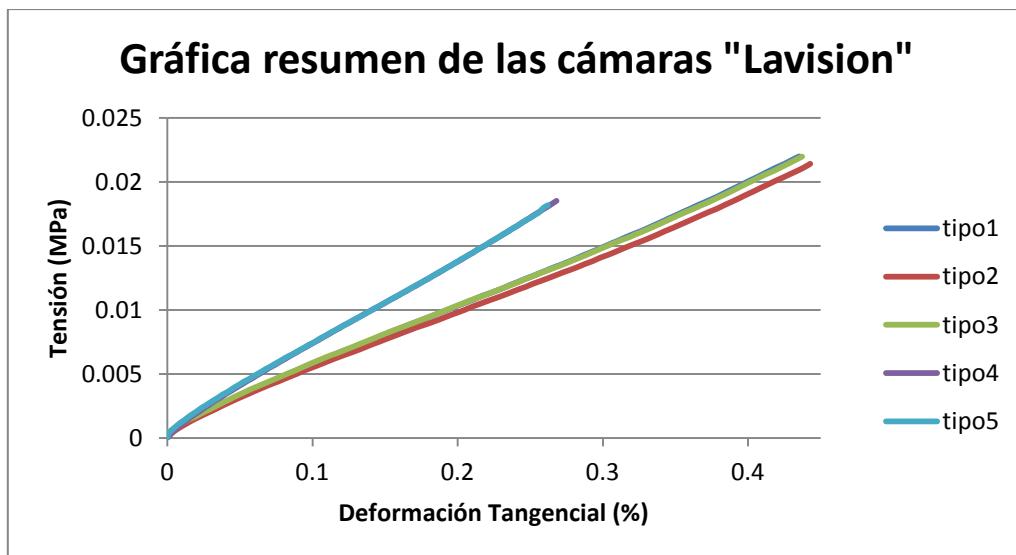


Fig. 4.6 Gráfica "Lavision" con los 5 tipos

4.2.3. COMPARATIVA INSTRON-LAVISION

Como se ha comentado en el apartado 4.2.2, al tomar las deformaciones tangenciales directamente de los puntos centrales de la probeta, en este ensayo, son mayores las obtenidas por los mapas de las cámaras de “Lavision”, que las obtenidas por la máquina “Instron”, ya que las calcula haciendo el promedio de los puntos de toda la probeta, incluyendo la parte exterior, en las cuales tienen menor valor.

En la figura 4.7, queda reflejada esta comparación para la probeta de Tipo 5, las comparativas de los otros 4 tipos de probeta, se encuentran en el Anexo B.

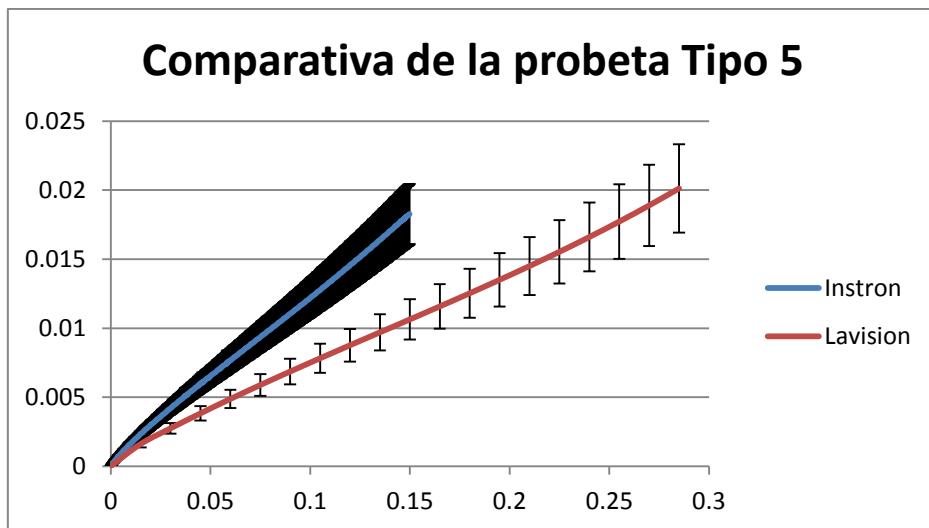


Fig. 4.7 Gráfica comparativa Instron/Lavision probeta Tipo 5

Puede verse que en este tipo de ensayos, el sistema de medida de “Lavision” da lugar a curvas de menor rigidez que las de la máquina “Instron”, debido a que la deformación local tangencial es siempre mayor que la promedio.

4.2.4. COMPARATIVA DE TAMAÑOS CON EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Del mismo modo que en el otro tipo de ensayo, en la Figura 4.8, se muestra el porcentaje de la tensión tangencial calculado por el software de elementos finitos que oscila entre 0.17 y 0.19, coincidiendo con los resultados de las Figuras 4.5 y 4.6.

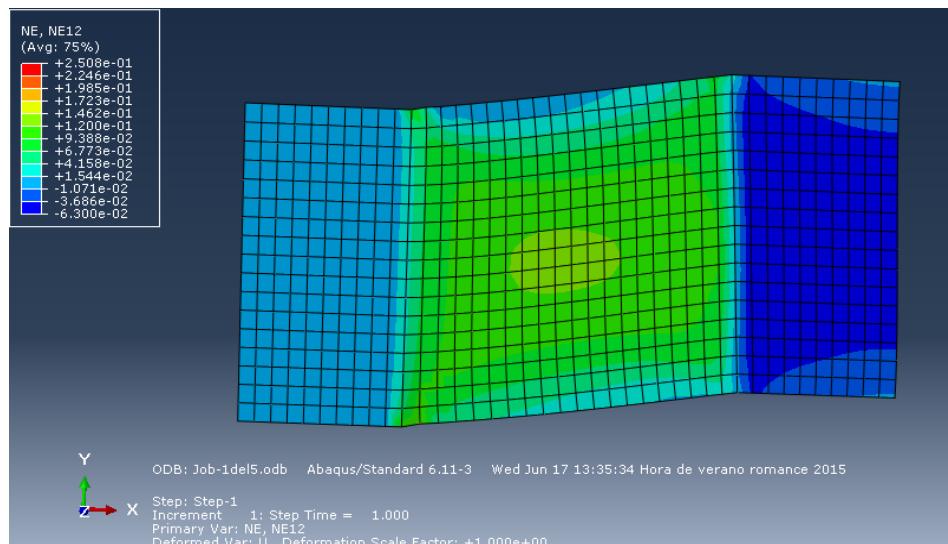


Fig. 4.8 Representación de las deformaciones tangenciales probeta Tipo 5

5. CONCLUSIONES DEL ENSAYO

Una de las conclusiones que cabe destacar por encima de las demás, es la gran influencia que tienen la forma y el tamaño de las probetas elegidas para este tipo de ensayos.

Se puede asegurar que para las probetas de mayor tamaño, es decir, las que tienen mayor longitud, se cumple de manera más precisa la uniformidad de las tensiones en el ensayo de tensión tangencial pura. La cual se ha comprobado a través de las comparativas realizadas entre los resultados de la máquina “Instron” y los de “Lavision”.

Por otro lado, para el ensayo de tensión tangencial simple, la uniformidad de las tensiones en las probetas se encuentra influenciada cuanto más preciso sea el cuadrado resultante entre las mordazas utilizadas en el ensayo, ya que en el centro de la probeta se producen las mayores deformaciones y deben cumplirse las hipótesis de uniformidad tomadas en el ensayo.

A la hora de la comparativa entre los resultados de la máquina “Instron” y los mapas obtenidos por las cámaras de “Lavision”, hay que tener en cuenta que en el primer caso, los datos se toman como promedios de las deformaciones de toda la probeta, por lo que todas las desviaciones son menores, y en el segundo caso, podemos elegir los puntos donde estudiar las deformaciones, aunque conlleve mayores desviaciones.

En las simulaciones realizadas con el software de elementos finitos, se puede comprobar que los valores de tensiones y alargamientos obtenidos con el análisis de los datos de las máquinas son semejantes, lo cual nos asegura que hemos realizado de forma correcta los ensayos de la probeta.

De esta manera, queda demostrado que se han cumplido los objetivos del estudio de este tipo de ensayos en la silicona utilizada.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] "Biomecánica" [En línea] <http://es.wikipedia.org/wiki/Biomecanica>
- [2] Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería de Aragón. Universidad de Zaragoza <http://i3a.unizar.es/datos/grupo/amb-105>
- [3] <http://www.instron.com.es/wa/glossary/Modulus-of-Elasticity.aspx>
- [4] StrainMaster Material Testing
http://www.lavision.de/en/industries/material_testing.php
- [5] Marc Hollenstein, Alexander Ehret, Edoardo Mazza y Mikhail Itskov. Pure Shear testing of porcine skin. 2011. Biomech Model Mechanobiol. Volumen 10. Págs 651-661
- [6] John C. Gardiner and Jeffrey A. Weiss. Simple Shear Testing of Parallel-Fibered Planar Soft Tissues. Abril 2001. Journal of Biomechanical Engineering. Universidad de Utah. Volumen 123. Págs 170-175
- [7] "How does Pure Shear compare to Simple Shear?". 2012. Endurica LLC
- [8] "Where do the Pure and Shear come from in the Pure Shear test?". 2011. Endurica LLC
- [9] John C. Gardiner, Jeffrey A. Weiss. Elastic and Viscoelastic Shear Properties of the Medial Collateral Ligament. Marzo 2000.
- [10] Simulia, Abaqus/CAE User's Manual
- [11] Mónica Torres García. Estudio de ensayos uniaxiales en tejidos biológicos. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Zaragoza. (Septiembre 2014)
- [12] Raquel Simón Allué. Estudio de los parámetros que condicionan el ensayo biaxial en silicona médica. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Zaragoza. (Abril 2012).

ANEXOS

ANEXO A – Resultados numéricos a partir del método de los elementos finitos

A.1. ENSAYO DE TENSIÓN TANGENCIAL PURA

A.1.1. RESULTADOS NUMÉRICOS Y GRÁFICAS OBTENIDAS POR EL M.E.F.

Una vez aplicado el desplazamiento en función de las medidas de las probetas y de las condiciones del ensayo, la probeta en este tipo de ensayo adquiere esta forma, produciéndose las deformaciones verticales que se detallaran a continuación en la Figura A.1 obtenida a partir del programa de simulación.

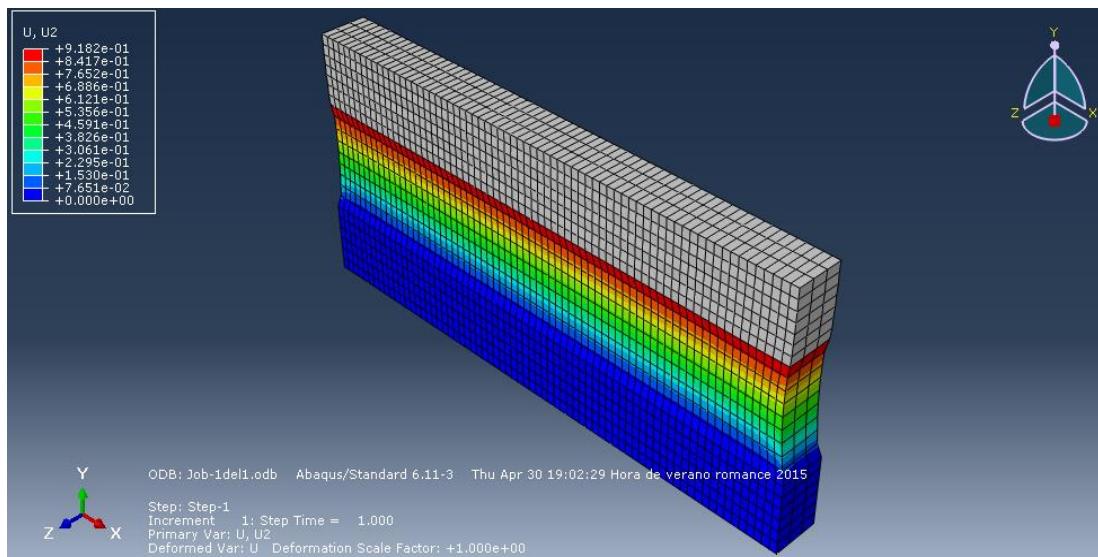


Fig. A.1 Ejemplo gráfico de probeta ensayada. Tensión Pura

A continuación se detallarán las 5 ilustraciones pertenecientes a cada una de las probetas, ver Figuras A.2, A.3, A.4, A.5 y A.6, donde se muestra y se puede comprobar que la tensión normal en el eje y se mantiene uniforme a lo largo de la probeta, adquiriendo valores muy parecidos a los obtenidos mediante los cálculos realizados con los datos proporcionados por la máquina “Instron”.

Las conclusiones una vez realizadas las comparaciones se encuentran en el capítulo 5 de la presente memoria.

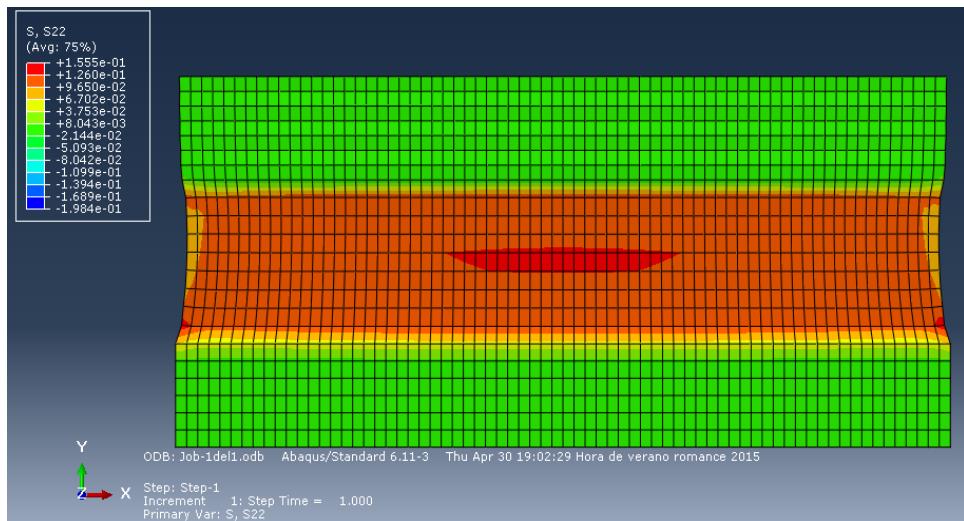


Fig. A.2 Tensión normal eje vertical Probeta Tipo 1

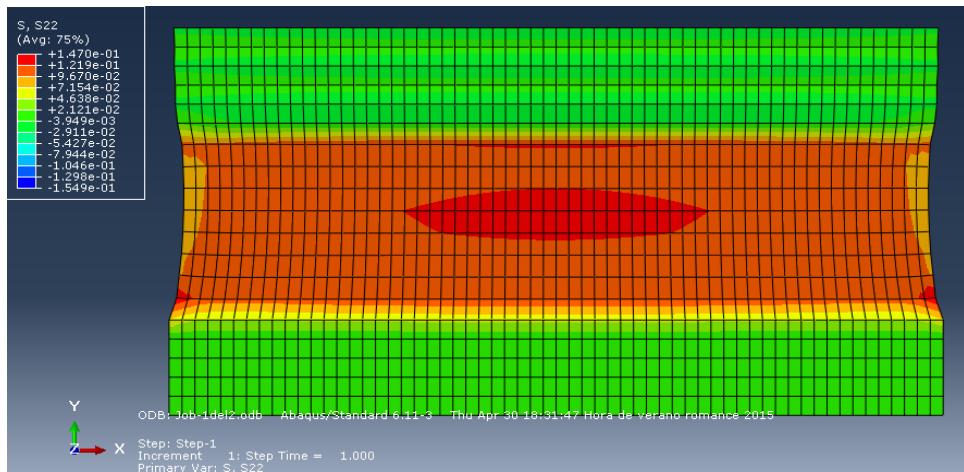


Fig. A.3 Tensión normal eje vertical Probeta Tipo 2

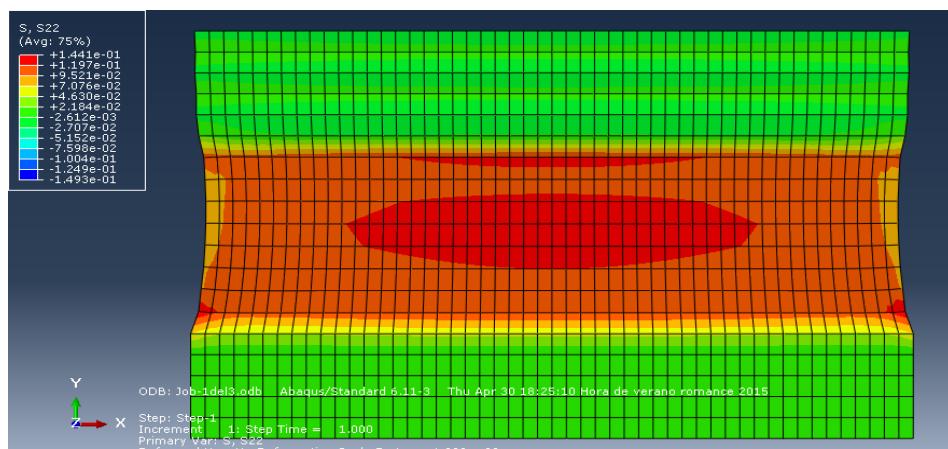


Fig. A.4 Tensión normal eje vertical Probeta Tipo 3

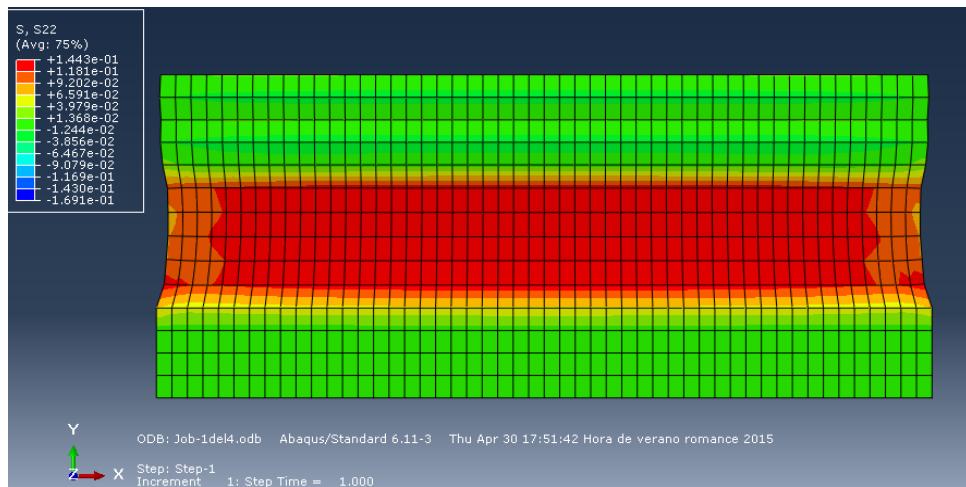


Fig. A.5 Tensión normal eje vertical Probeta Tipo 4

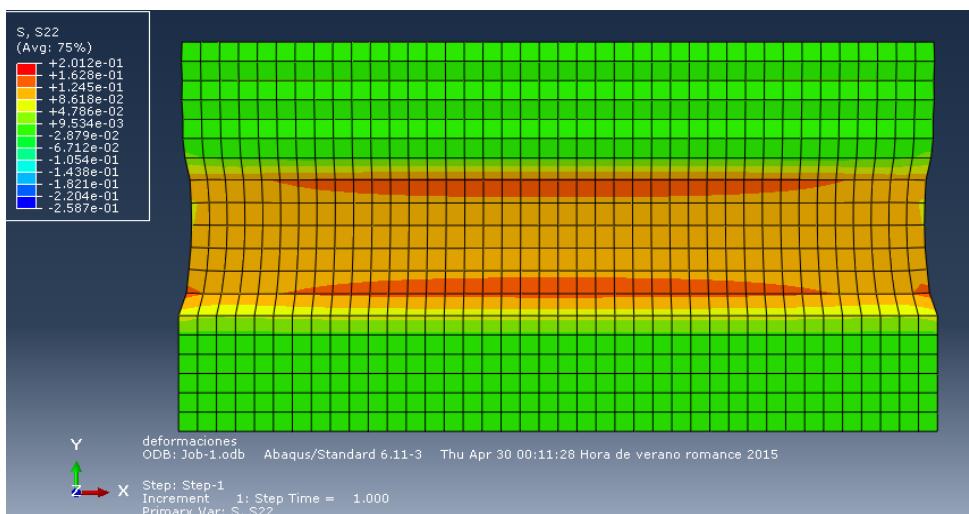


Fig. A.6 Tensión normal eje vertical Probeta Tipo 5

A.2. ENSAYO DE TENSIÓN TANGENCIAL SIMPLE

A.2.1. RESULTADOS NUMÉRICOS Y GRÁFICAS OBTENIDAS POR EL M.E.F.

Como se aprecia en la Figura A.7, el desplazamiento aplicado es mayor en cuanto a valor que en los ensayos de tensión pura, y se puede observar claramente cómo se produce el giro del sólido en la parte central, permitiendo a través de las fórmulas anteriormente explicadas, validar las hipótesis tomadas para el ensayo.

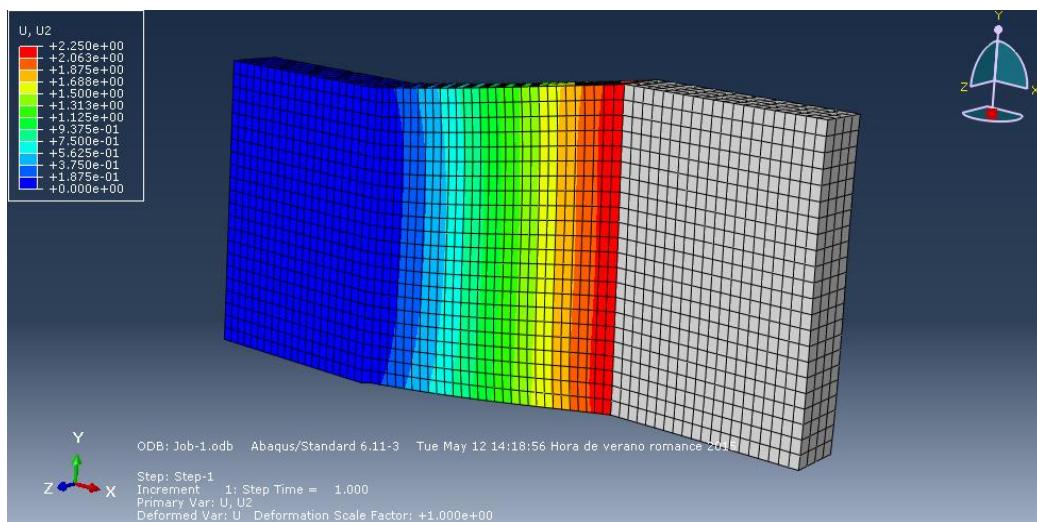


Fig. A.7 Ejemplo gráfico de probeta ensayada. Tensión Simple

Como se ha comentado en las conclusiones, una vez hechos los ensayos del laboratorio y obtenidos los datos de la máquina de ensayos, se comparan con los obtenidos en el software, comprobando así la uniformidad de la deformación tangencial en la probeta.

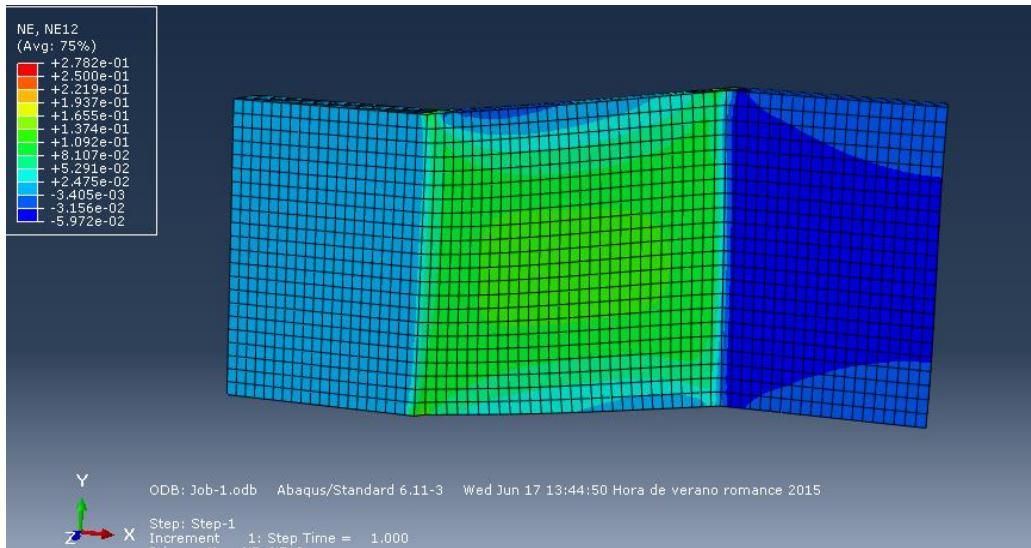


Fig. A.8 Deformación tangencial Probeta Tipo 1

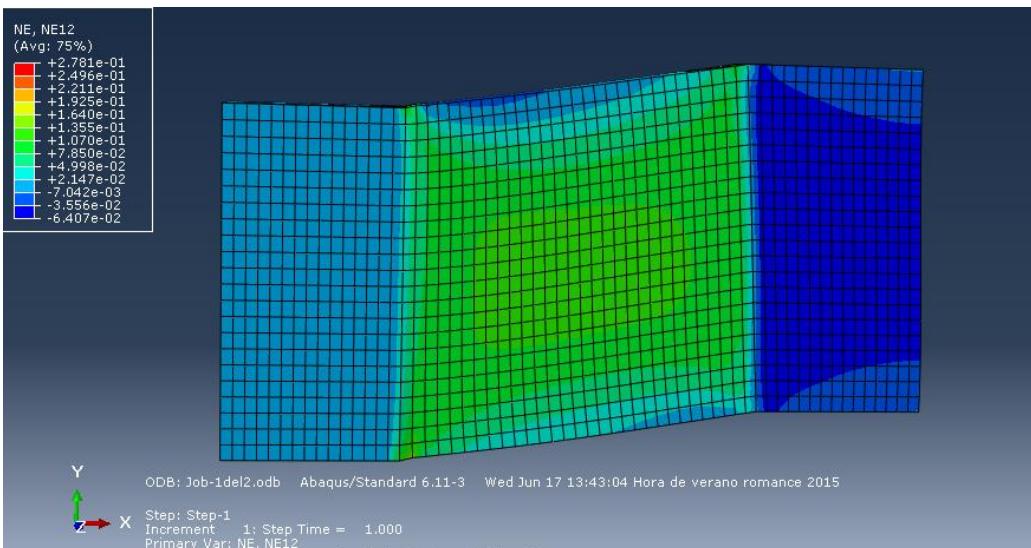


Fig. A.9 Deformación tangencial Probeta Tipo 2

De la misma manera que para el ensayo de tensión tangencial pura, hemos hecho la comprobación de los mapas de deformaciones con las 5 probetas, para comprobar la reproducibilidad del ensayo, y así poder dar validez al estudio del presente proyecto (ver Figuras A.8, A.9, A.10, A.11 y A.12).

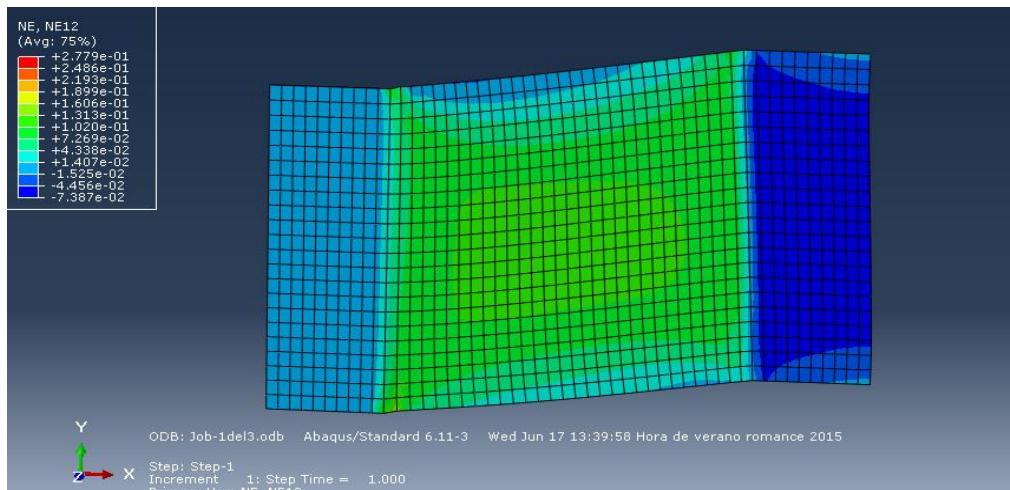


Fig. A.10 Deformación tangencial Probeta Tipo 3

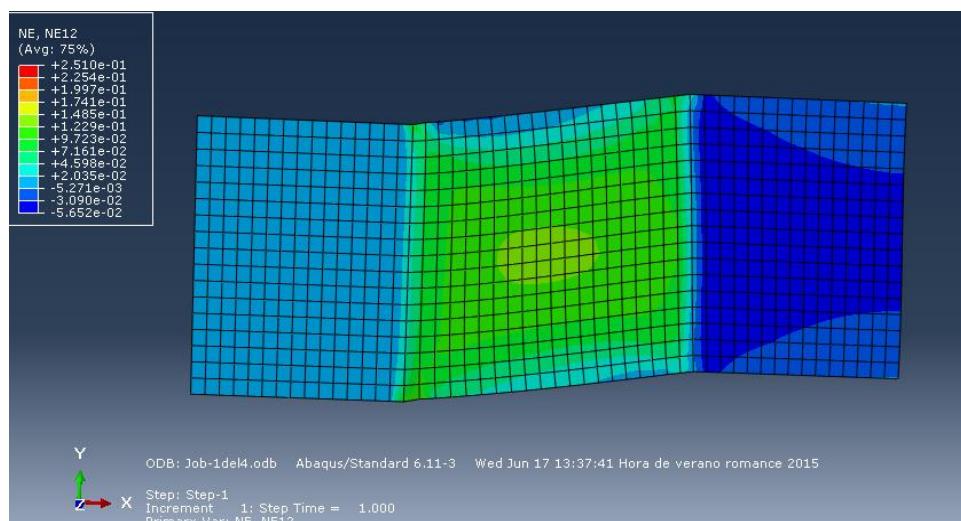


Fig. A.11 Deformación tangencial Probeta Tipo 4

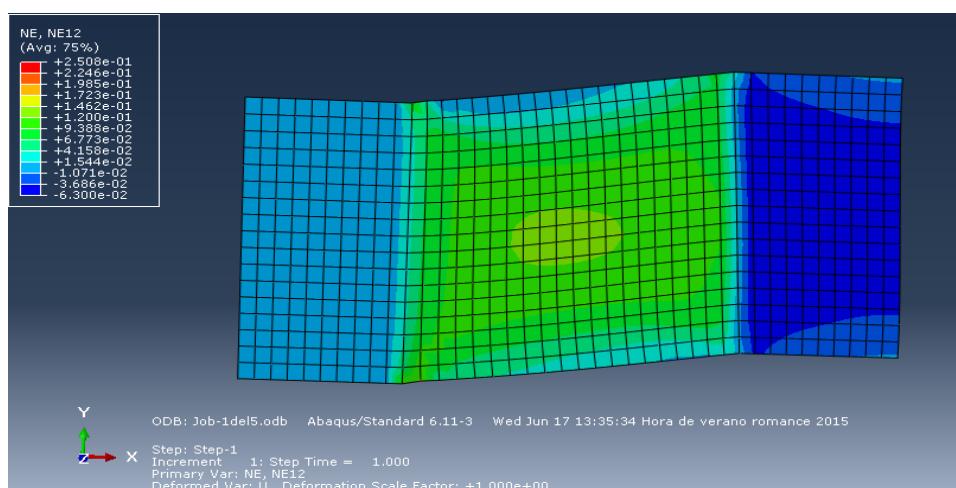


Fig. A.12 Deformación tangencial Probeta Tipo 5

ANEXO B – Resultados y graficado de todos los ensayos experimentales

B.1. ENSAYO DE TENSIÓN TANGENCIAL PURA

B.1.1. Resultados y gráficas de la Máquina de ensayos “Instron”

Como se ha comentado en el capítulo 4, y usando las fórmulas correspondientes para establecer la tensión y la deformación producidas, se procede al graficado de las 5 muestras de cada tipo para poder hallar la media y la desviación producidas y comprobar que se cumple la reproducibilidad del ensayo.

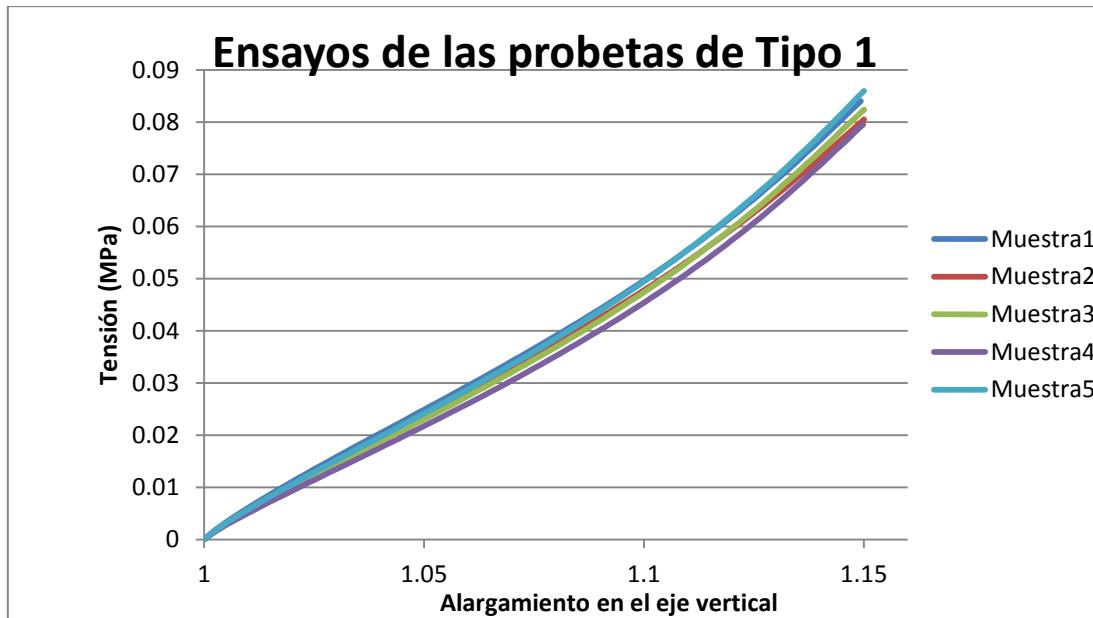


Fig. B.1 Gráfica de “Instron” completa del Tipo 1

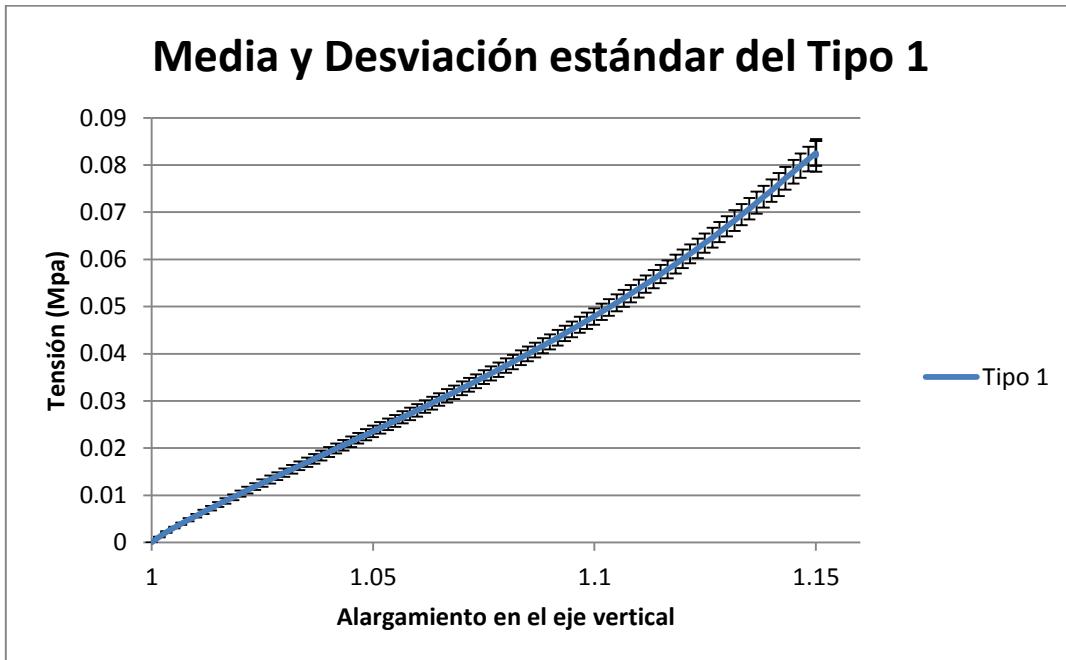


Fig. B.2 Gráfica de “Instron” media y desviación Tipo 1

Recordamos que el Tipo 2 mantiene la anchura con respecto al Tipo 1, pero la longitud es algo menor, los resultados son muy similares como se puede comprobar.

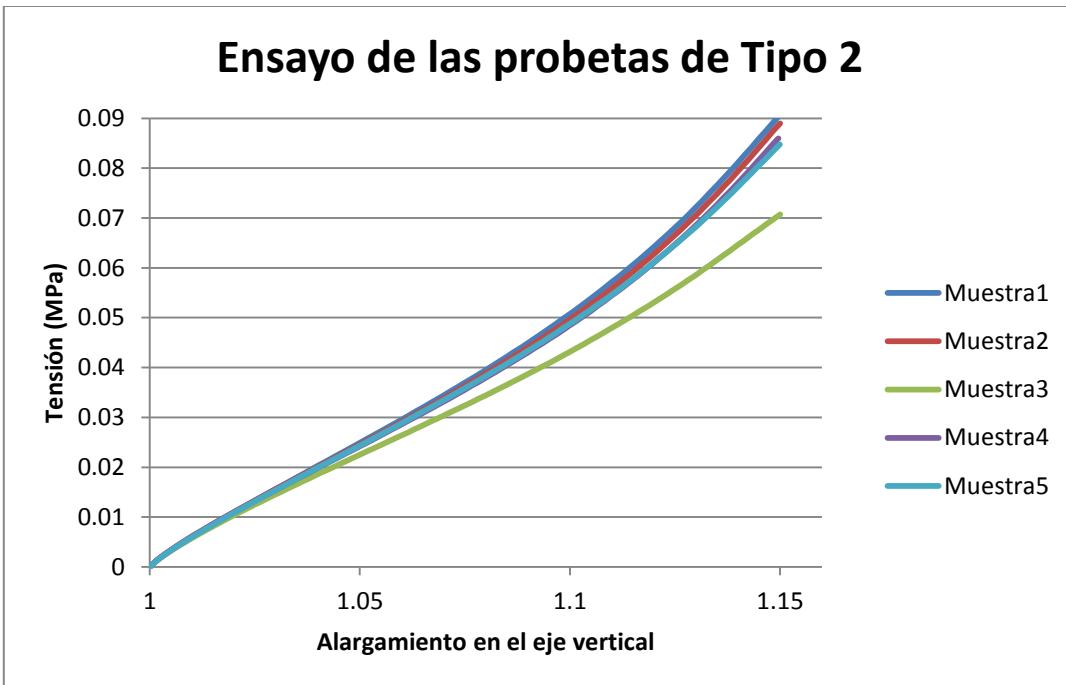


Fig. B.3 Gráfica de “Instron” completa del Tipo 2

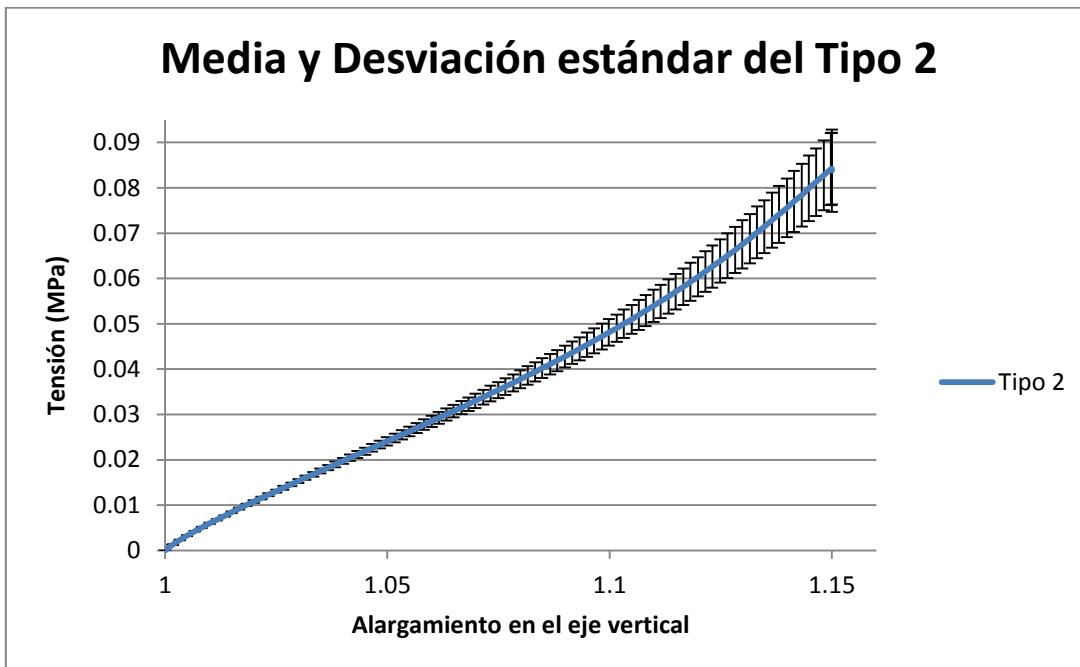


Fig. B.4 Gráfica de “Instron” media y desviación Tipo 2

Estas son las dos gráficas correspondientes al Tipo 3, donde se aprecia que la deformación es similar, pero en la tensión sí que se produce un descenso, aunque muy poco apreciable.

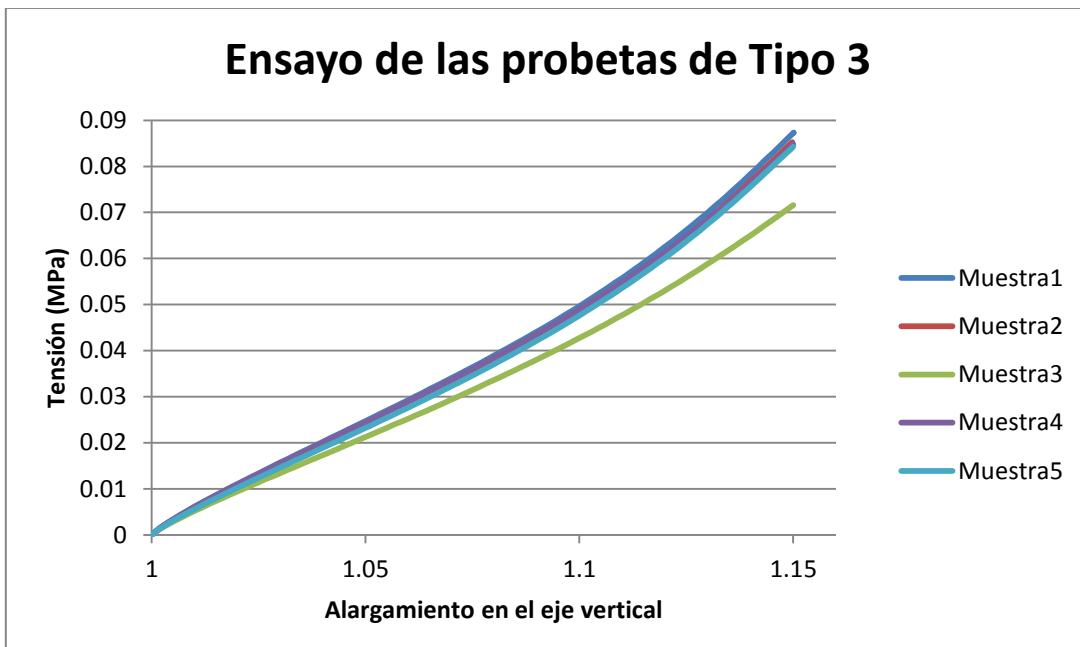


Fig. B.5 Gráfica de “Instron” completa del Tipo 3

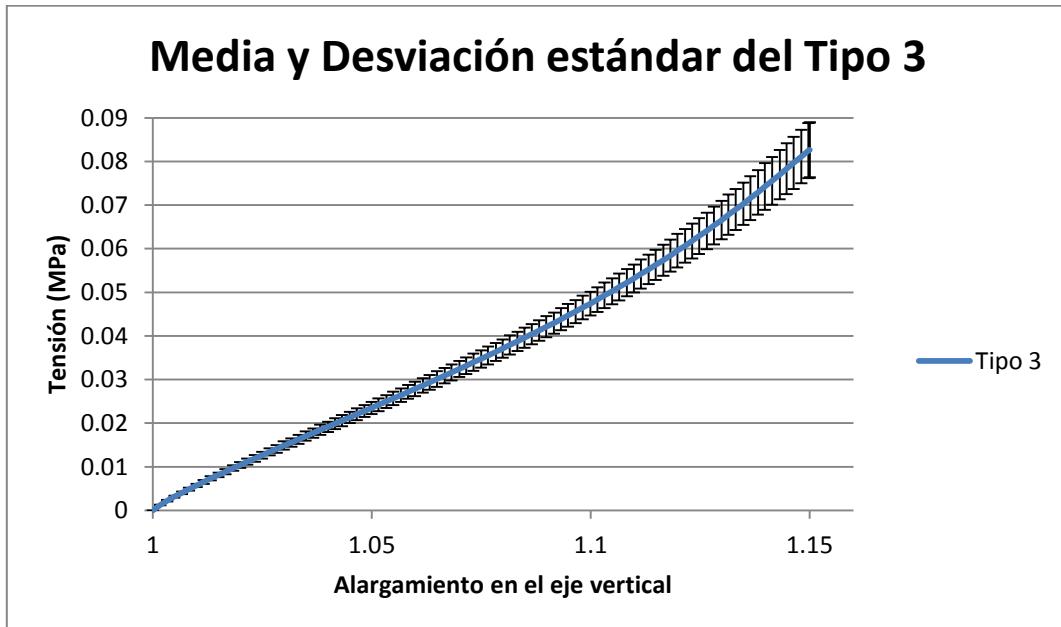


Fig. B.6 Gráfica de “Instron” media y desviación Tipo 3

En las probetas del Tipo 4, sí que se ha producido variación en la longitud, pero también en la anchura, por lo que la probeta al tener menos área soporta de manera diferente el esfuerzo aplicado, siendo las curvas de deformación un tanto irregulares.

Se puede comprobar que se producen desviaciones de mayor rango.

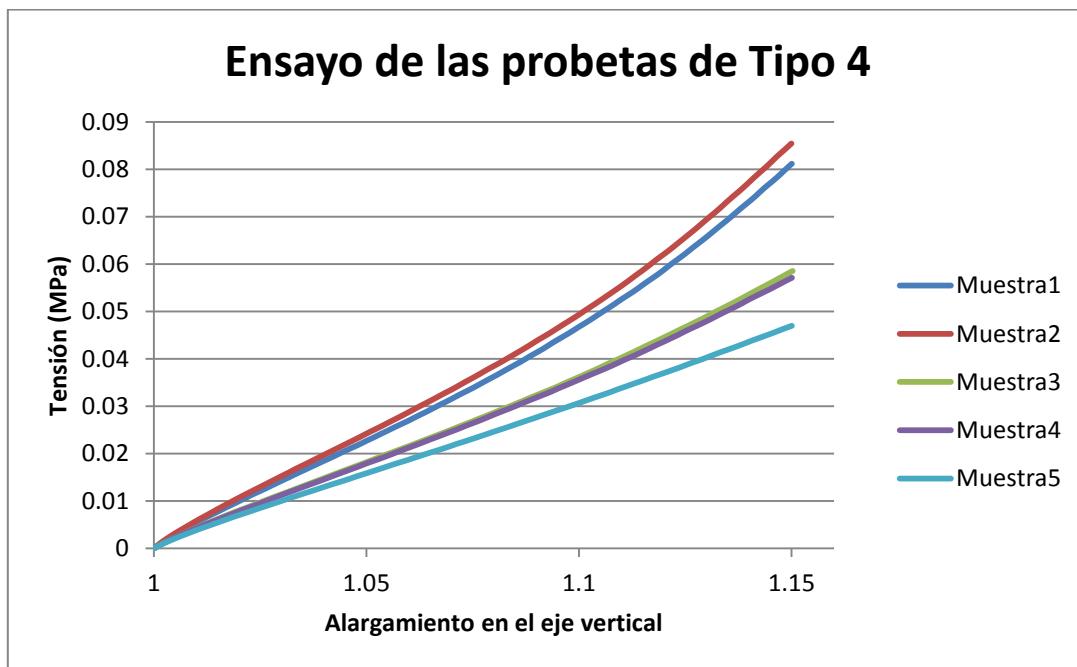


Fig. B.7 Gráfica de “Instron” completa del Tipo 4

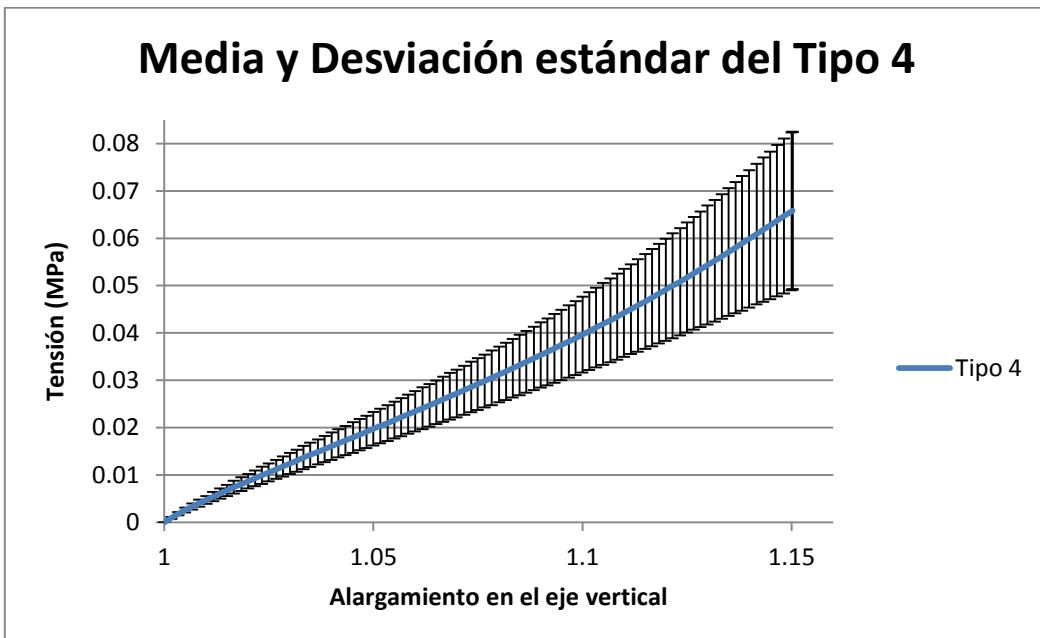


Fig. B.8 Gráfica de “Instron” media y desviación Tipo 4

Aun siendo las probetas del Tipo 5 las más pequeñas, las curvas de todas las muestras se asemejan al mismo comportamiento, pero se puede comprobar que la tensión es de menor valor que para los anteriores ensayos ya que el desplazamiento impuesto es también más pequeño.

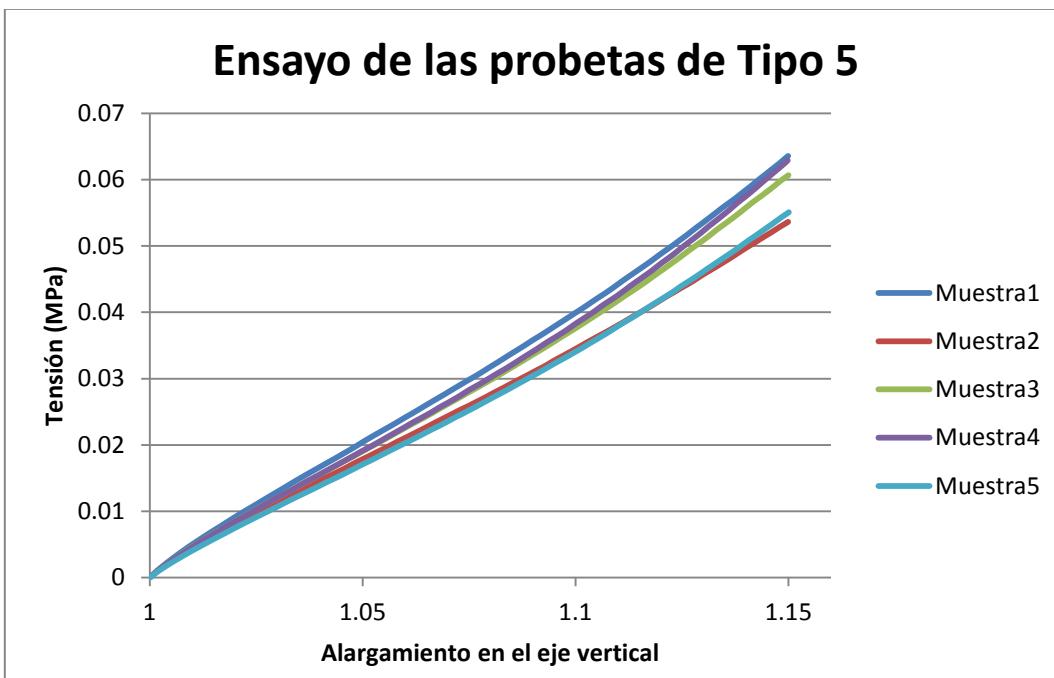


Fig. B.9 Gráfica de “Instron” completa del Tipo 5

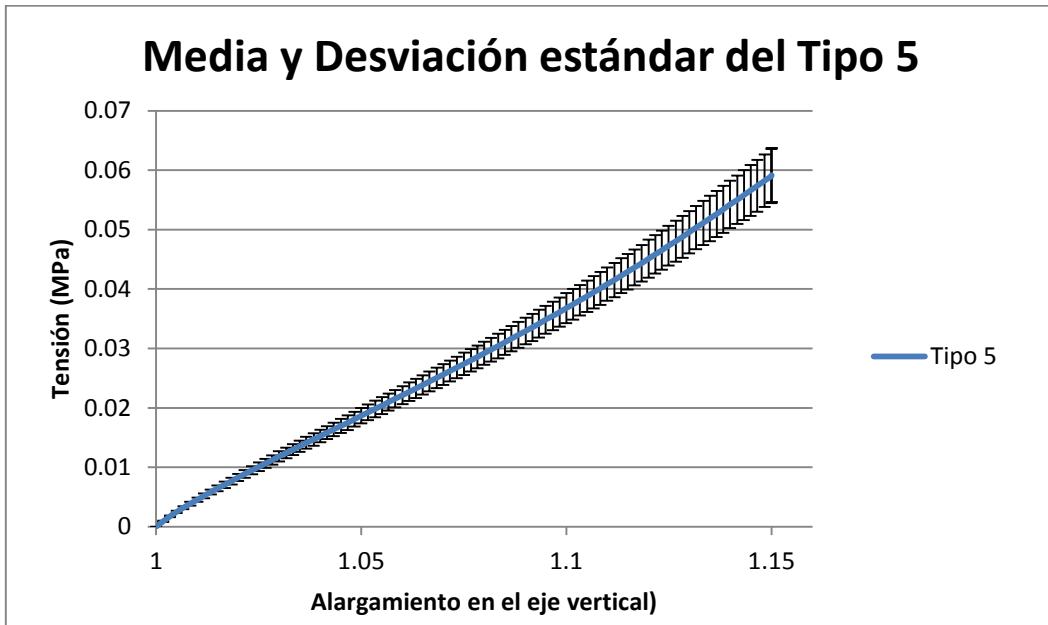


Fig. B.10 Gráfica de “Instron” media y desviación Tipo 5

B.1.2. Resultados y gráficas de las cámaras de “Lavision”

Como se explicó con anterioridad, el cálculo de las deformaciones en este caso viene dado a partir del post-procesado de las imágenes recogidas por las cámaras, y su tratamiento mediante el “tracking” pixel a pixel de las mismas.

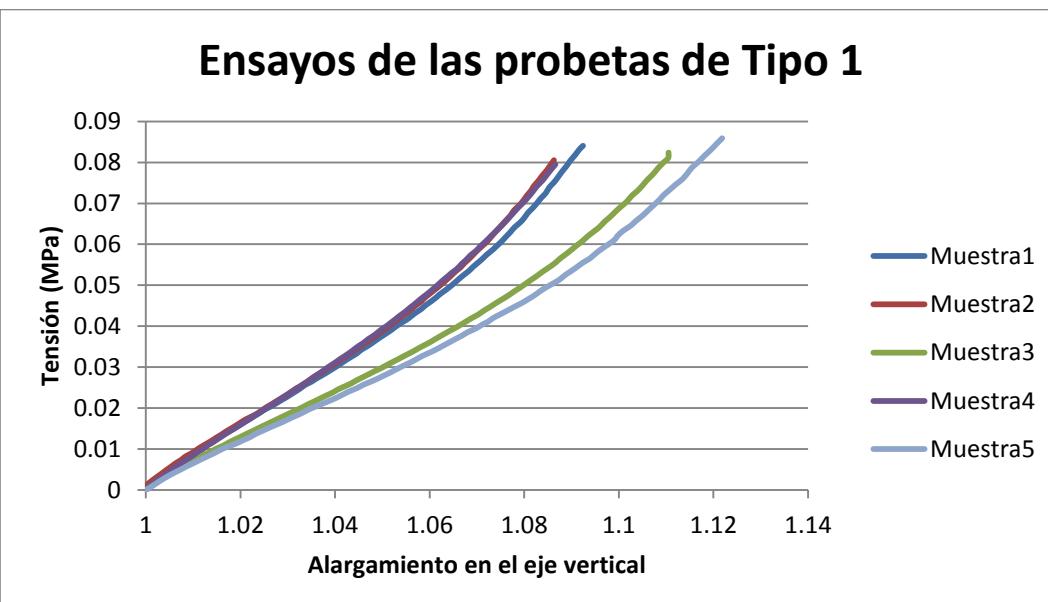


Fig. B.11 Gráfica de “Lavision” completa del Tipo 1

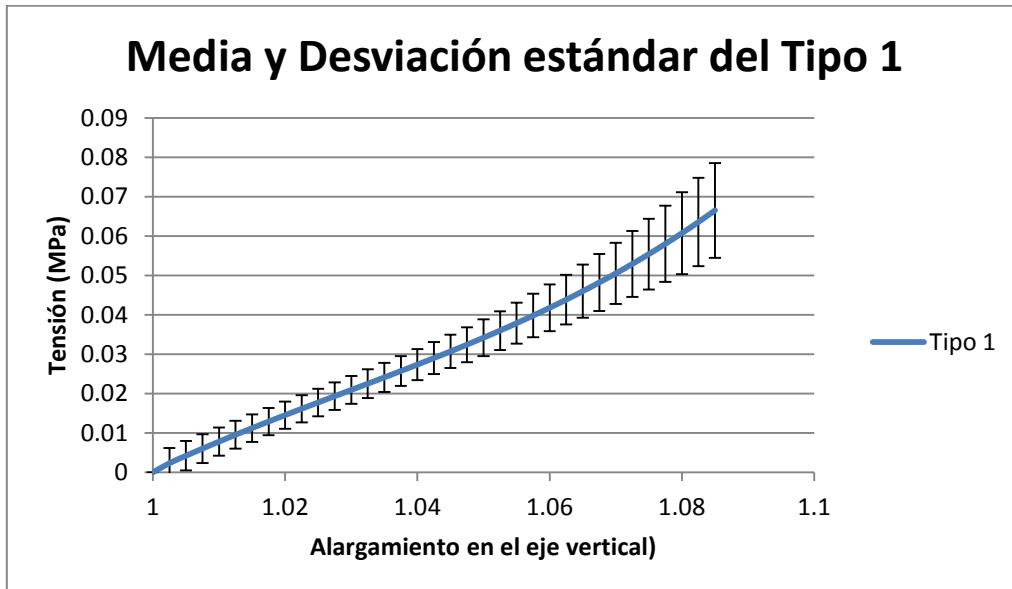


Fig. B.12 Gráfica de “Lavision” media y desviación Tipo 1

Como se puede comprobar en el gráfico de la desviación estándar, no se producen grandes diferencias entre las tensiones que sufre la probeta, aunque sí que se ve afectado el valor del desplazamiento que el obtenido mediante la gráfica de la máquina “Instron”.

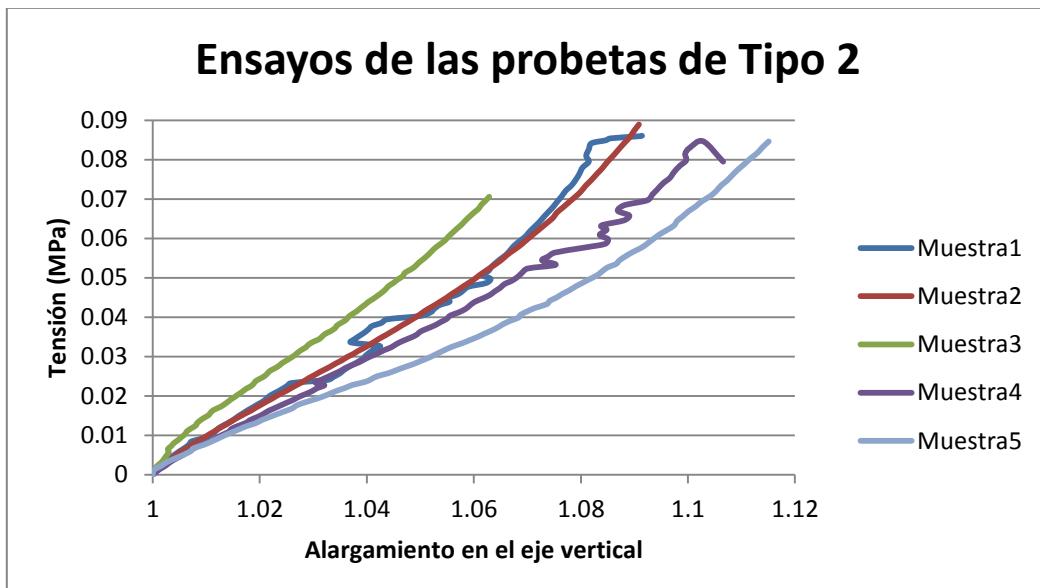


Fig. B.13 Gráfica de “Lavision” completa del Tipo 2

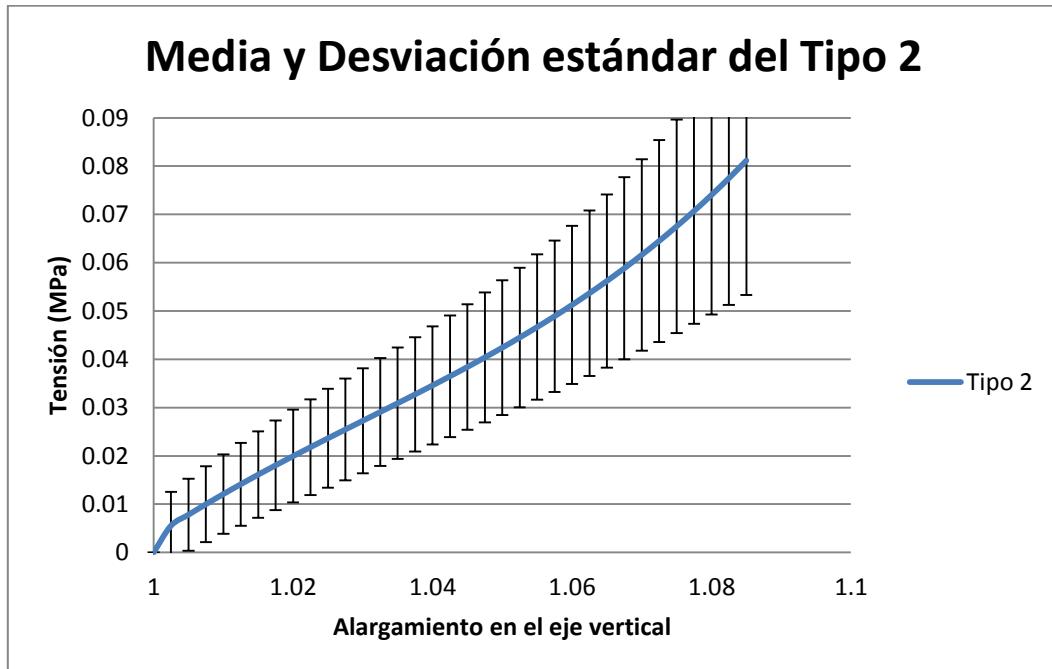


Fig. B.14 Gráfica de “Lavision” media y desviación Tipo 2

Se puede apreciar, que el procesado pixel a pixel es menos preciso, y que al ser el usuario el que selecciona los dos puntos de la probeta a estudiar, los datos pueden ser confusos y dar lugar a gráficas donde se produzcan variaciones abruptas, pero se sigue cumpliendo la relación entre tensión y deformación que establecían los resultados obtenidos por la “Instron”.

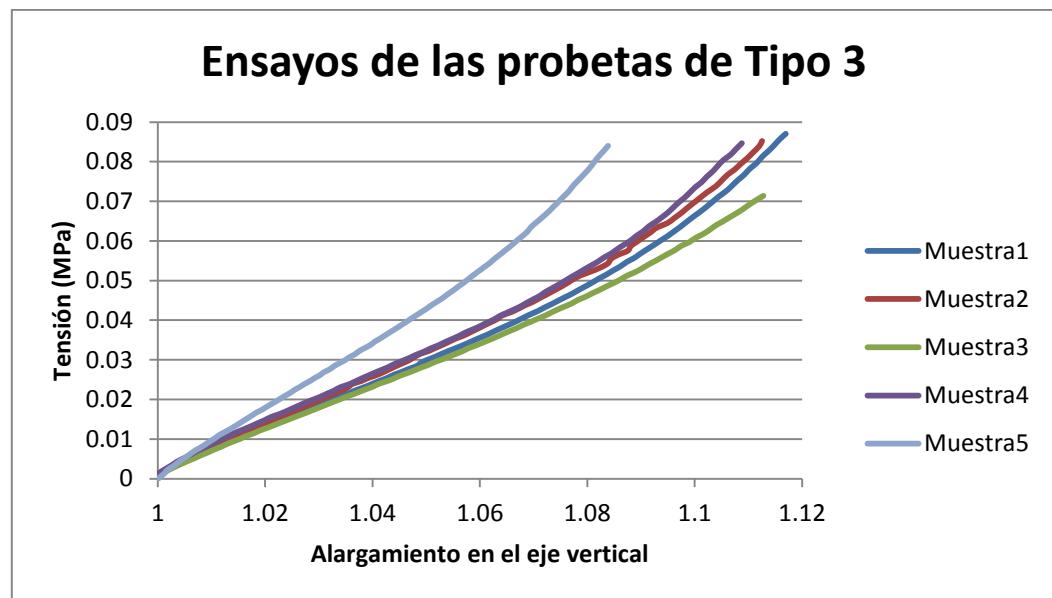


Fig. B.15 Gráfica de “Lavision” completa del Tipo 3

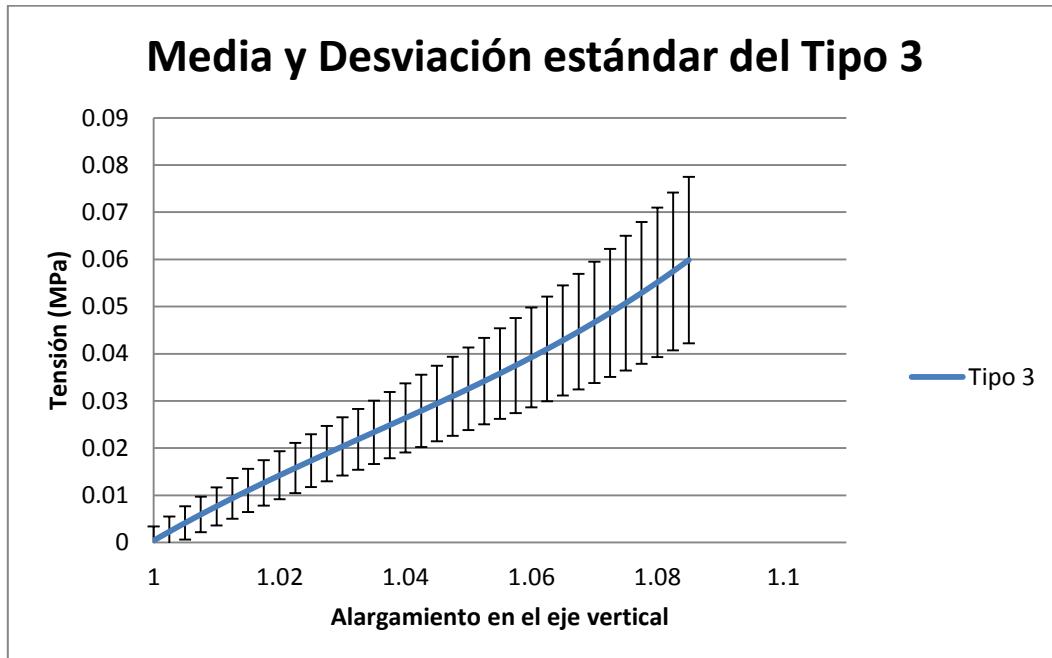


Fig. B.16 Gráfica de “Lavision” media y desviación Tipo 3

Al realizar un ensayo basado en 5 muestras de cada tipo, alguna puede reaccionar de manera diferente al esfuerzo, como la quinta muestra del Tipo 3, causada por las condiciones de amarre, por ejemplo, o simplemente porque en ese momento la máquina ha detectado esa deformación.

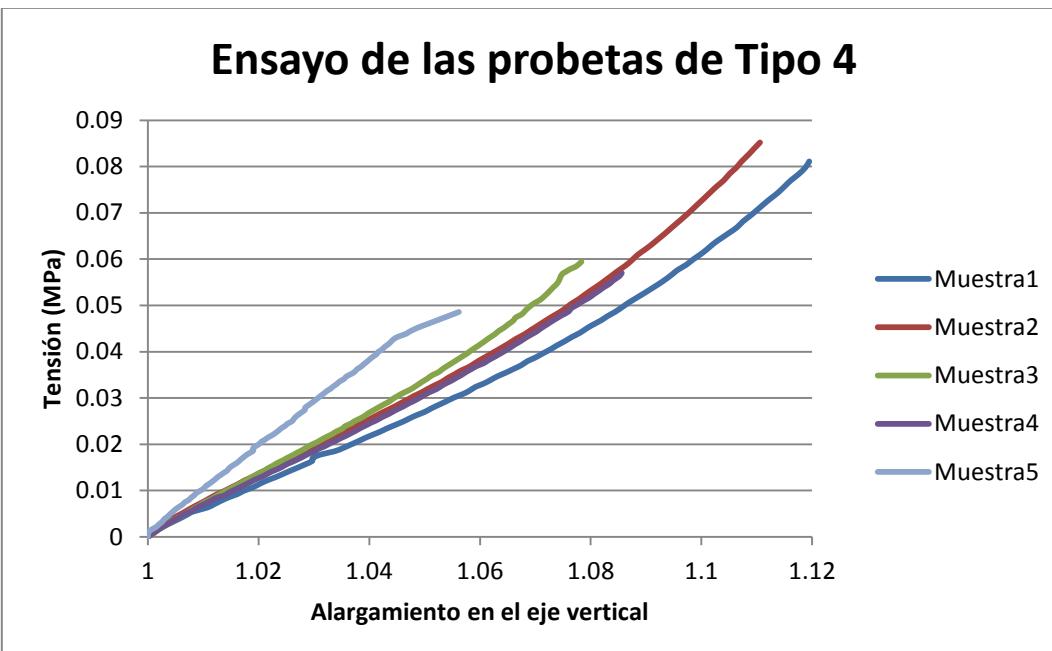


Fig. B.17 Gráfica de “Lavision” completa del Tipo 4

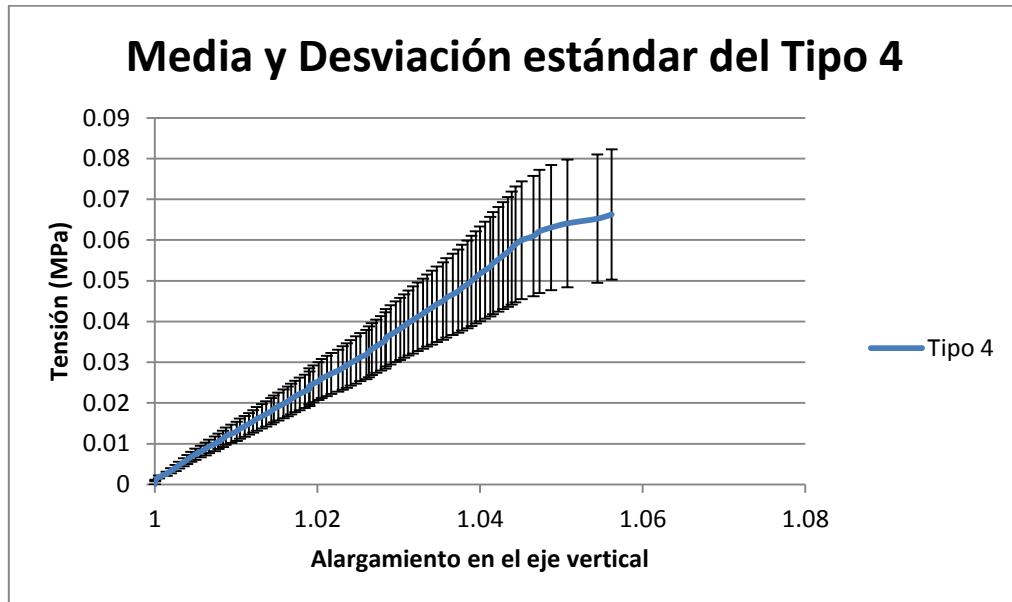


Fig. B.18 Gráfica de “Lavision” media y desviación Tipo 4

Conforme la probeta es más pequeña, es decir, los tipos 4 y 5, se producen variaciones de la relación tensión-deformación más acusadas, dado que al tener menor superficie, soporta de manera distinta el desplazamiento impuesto y que dan lugar a las variaciones que se aprecian en las curvas dibujadas.

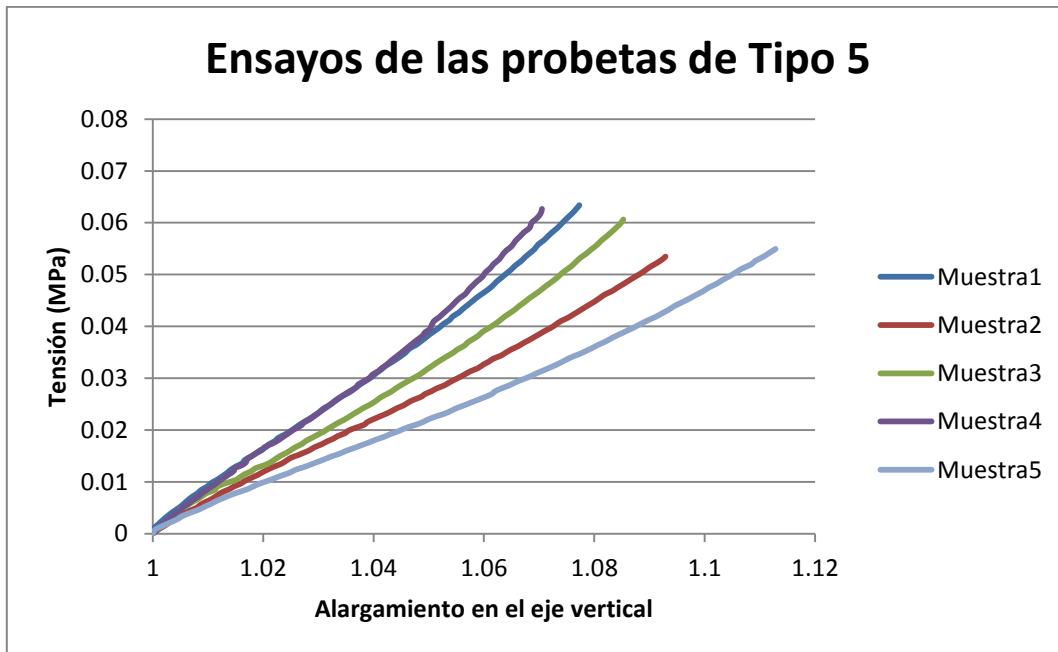


Fig. B.19 Gráfica de “Lavision” completa del Tipo 5



Fig. B.20 Gráfica de “Lavision” media y desviación Tipo 5

B.1.3. Comparativa Instron-Lavision

A continuación, se muestran las comparativas entre los resultados de la máquina “Instron” y de “Lavision” para las probetas del Tipo 2, 3, 4 y 5. (Ver Figuras B.21, B.22, B.23 y B.24)

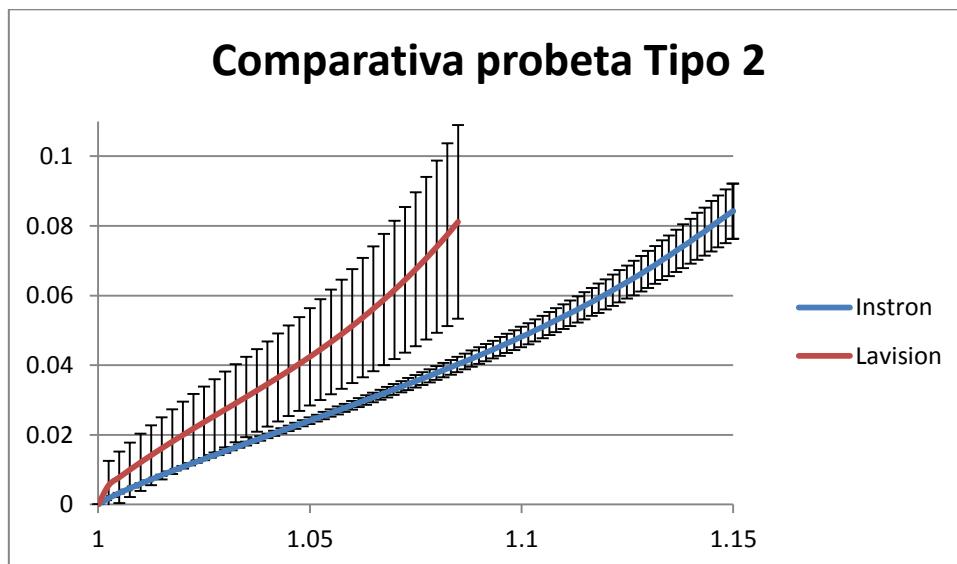


Fig. B.21 Gráfica comparativa Instron/Lavision probeta Tipo 2

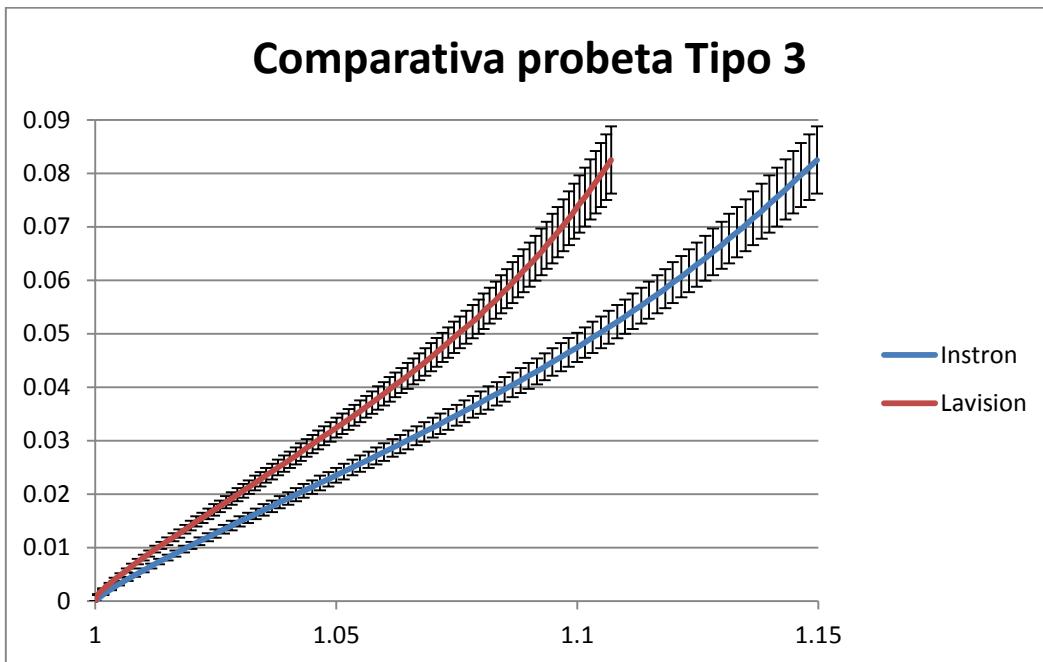


Fig. B.22 Gráfica comparativa Instron/Lavision probeta Tipo 3

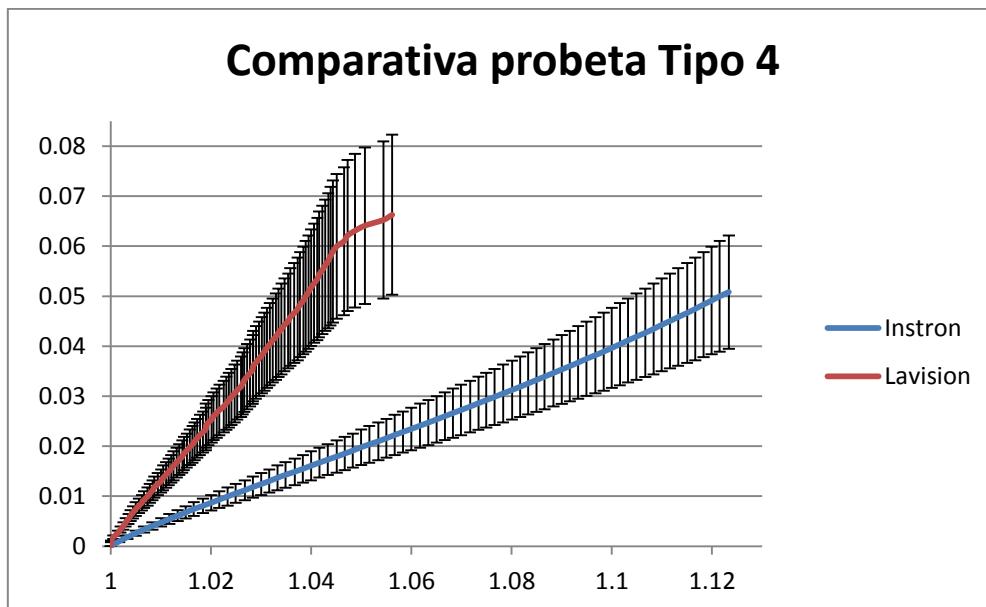


Fig. B.23 Gráfica comparativa Instron/Lavision probeta Tipo 4

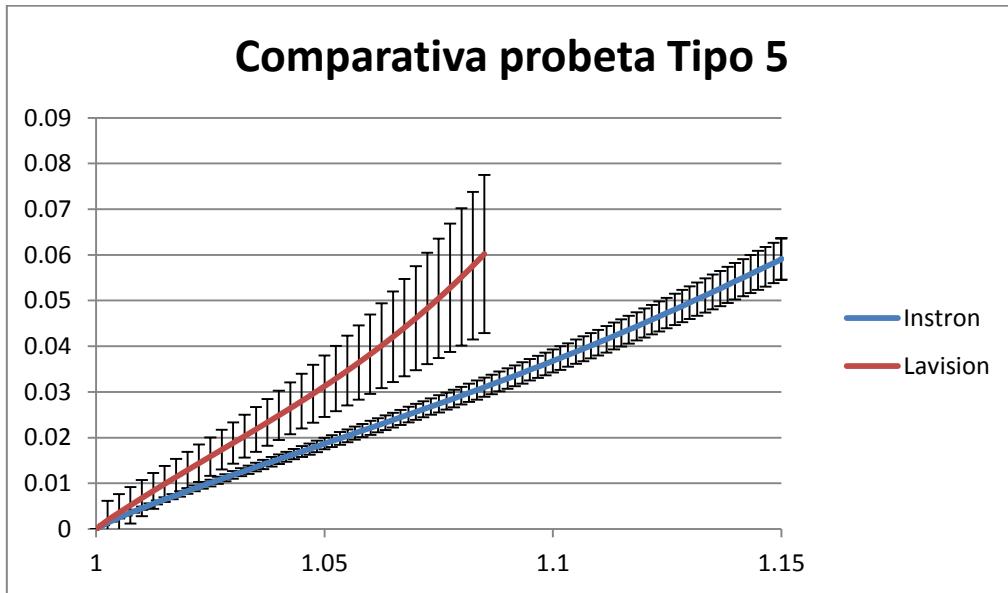


Fig. B.24 Gráfica comparativa Instron/Lavision probeta Tipo 5

B.2. ENSAYO DE TENSIÓN TANGENCIAL SIMPLE

B.2.1. Resultados y gráficas de la Máquina de ensayos “Instron”

La manera de proceder del ensayo de tensión tangencial simple es la misma que en tensión pura, dado que se tiene la serie de datos de la muestra de cada tipo, y se llevan a una hoja de cálculo donde se realiza la comparación para obtener la gráfica correspondiente.

De esta manera se obtienen las 5 gráficas, una para cada tipo de probeta, y se comprueba su reproducibilidad a través de la desviación entre los valores de la tensión.

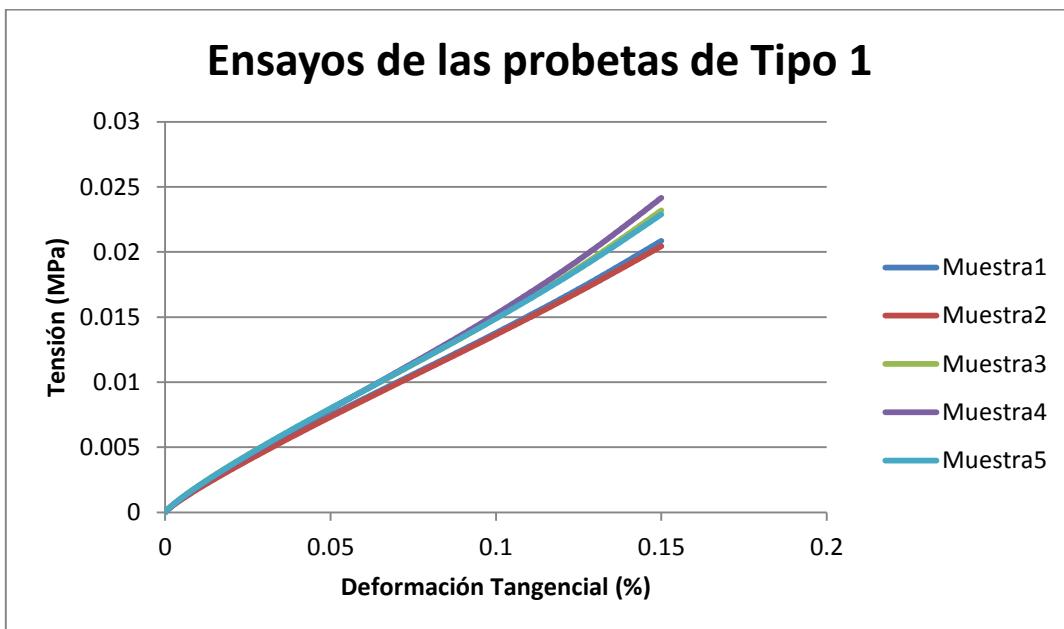


Fig. B.25 Gráfica de “Instron” completa del Tipo 1

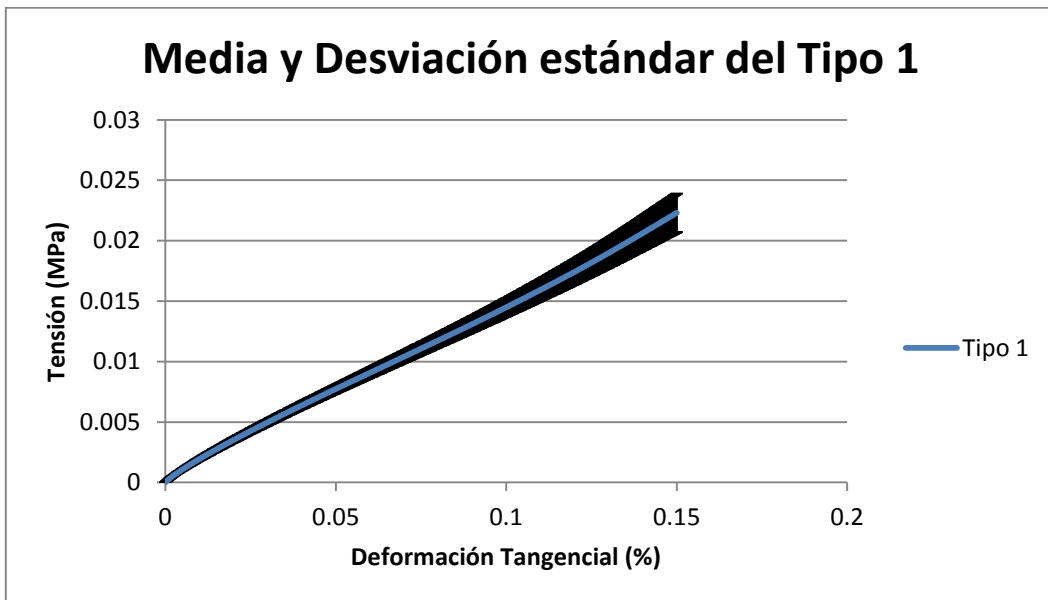


Fig. B.26 Gráfica de “Instron” media y desviación Tipo 1

Se puede observar una gran similitud entre las 5 probetas del Tipo 1 y las 5 probetas del Tipo 2, ya que su desviación en cuanto a las tensiones es mínima y las deformaciones son muy parejas, lo cual da que pensar, que en probetas más grandes se mantiene mejor la relación y no se producen grandes alteraciones a la hora de aplicar el desplazamiento.

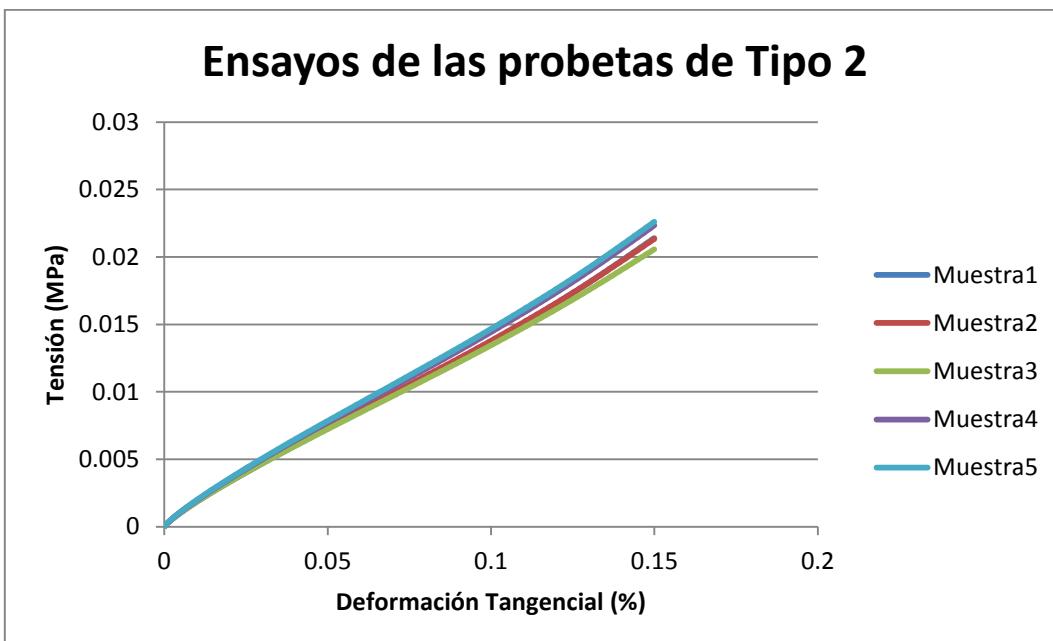


Fig. B.27 Gráfica de “Instron” completa del Tipo 2

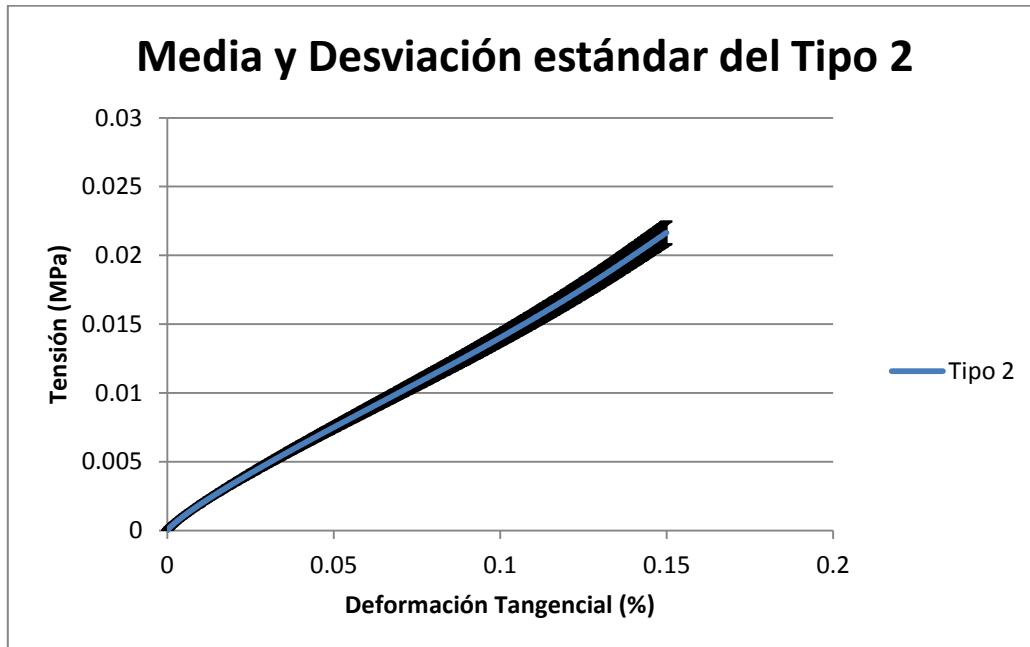


Fig. B.28 Gráfica de “Instron” media y desviación Tipo 2

Cabe destacar, que los datos de la máquina “Instron” son bastante exactos y cumplen con la linealidad guardando en todo momento la relación que se produce entre la tensión y la deformación durante el ensayo, ya que ninguna de las probetas sufre alteraciones apreciables.

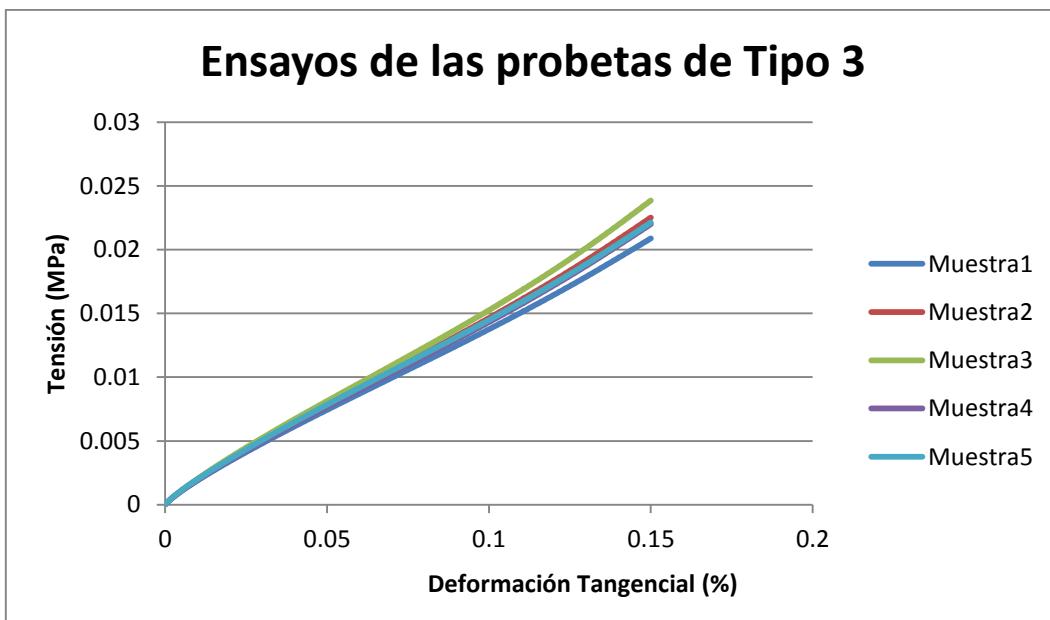


Fig. B.29 Gráfica de “Instron” completa del Tipo 3

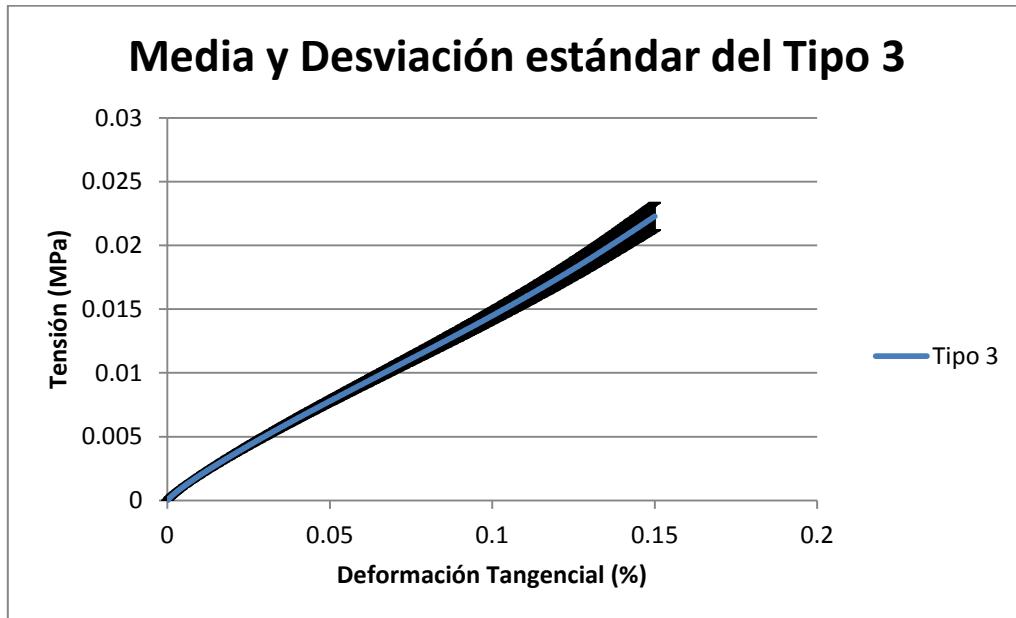


Fig. B.30 Gráfica de “Instron” media y desviación Tipo 3

Hay que decir que el material utilizado en el ensayo, ya se había utilizado con anterioridad para este y otros tipos de ensayos, comprobando que su actuación ante esfuerzos goza de uniformidad y que las características de rigidez y deformabilidad son idóneas para este tipo de ensayo.

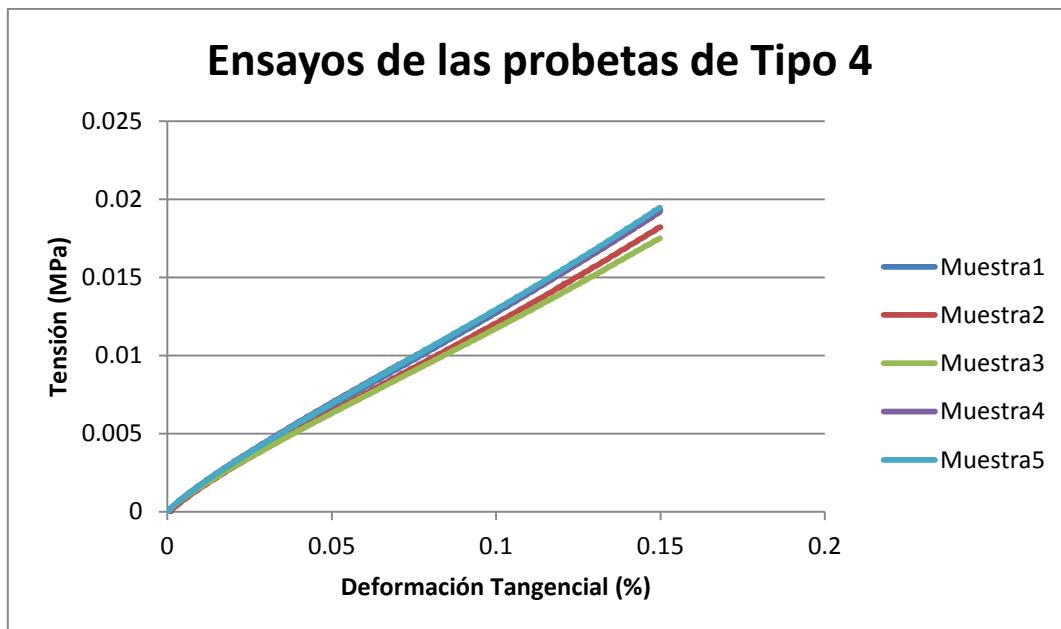


Fig. B.31 Gráfica de “Instron” completa del Tipo 4

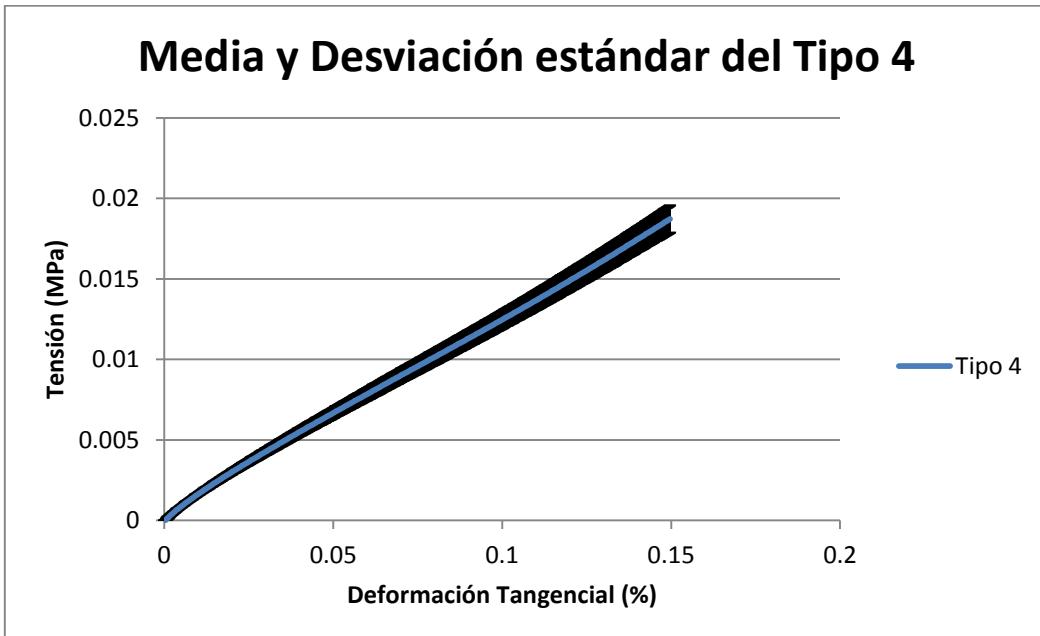


Fig. B.32 Gráfica de “Instron” media y desviación Tipo 4

Como se puede ver en la siguiente gráfica, conforme se disminuye el tamaño de las probetas, se producen mayores discrepancias entre las muestras, obteniendo mayor desviación, lo cual da que pensar que para muestras de silicona menores que el tamaño de las probetas de tipo 5, se podrían producir anomalías en el material a la hora de soportar según qué tipo de esfuerzos.

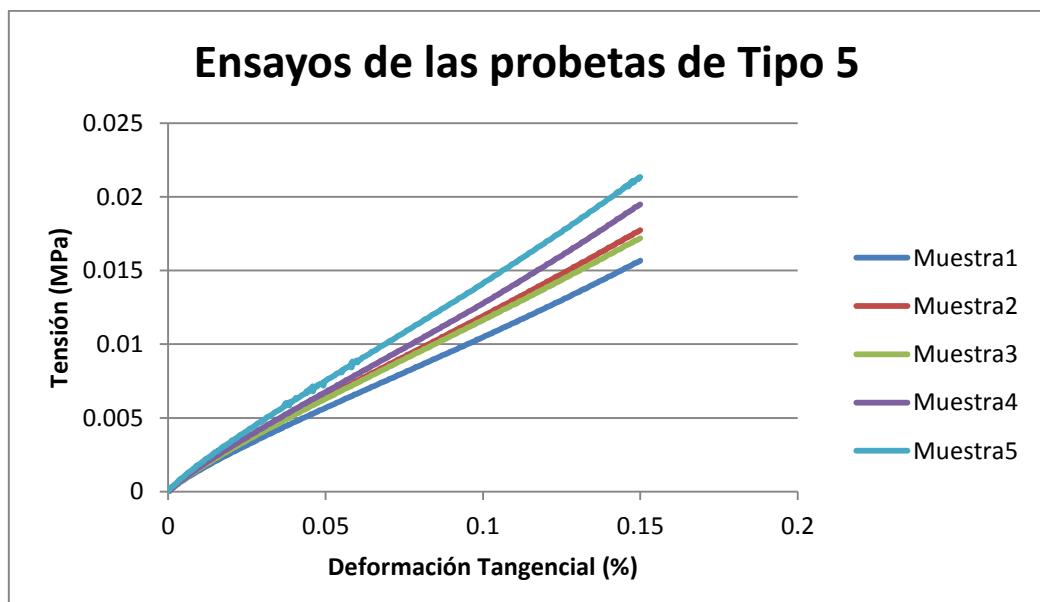


Fig. B.33 Gráfica de “Instron” completa del Tipo 5

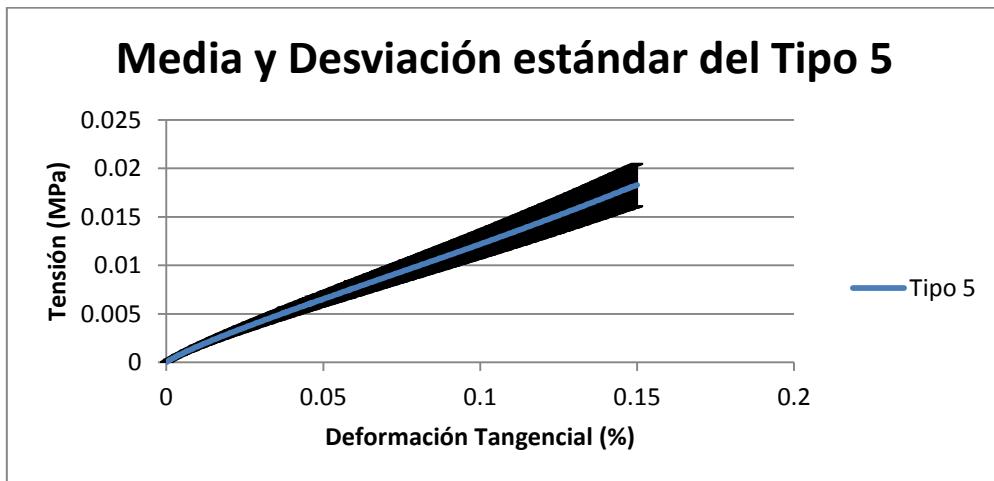


Fig. B.34 Gráfica de “Instron” media y desviación Tipo 5

B.2.2. Resultados y gráficas de las cámaras de “Lavision”

Como se ha comentado con anterioridad en el apartado 4.2.2, correspondiente a las curvas del ensayo de tensión tangencial simple a través de los datos obtenidos por las cámaras de “Lavision” de los 5 tipos de probetas, resultaba casi imposible seleccionar 2 pixeles que guardaran la relación tensión-deformación de manera exacta.

Así que se decidió obtener la medida de la deformación de manera directa seleccionando un punto de la probeta y calculando la variación sufrida.

De esta manera, las gráficas toman una forma bastante parecida a los datos obtenidos a través de la “Instron”, pero siendo las deformaciones un tanto mayores como se puede apreciar en las gráficas que se detallan a continuación.

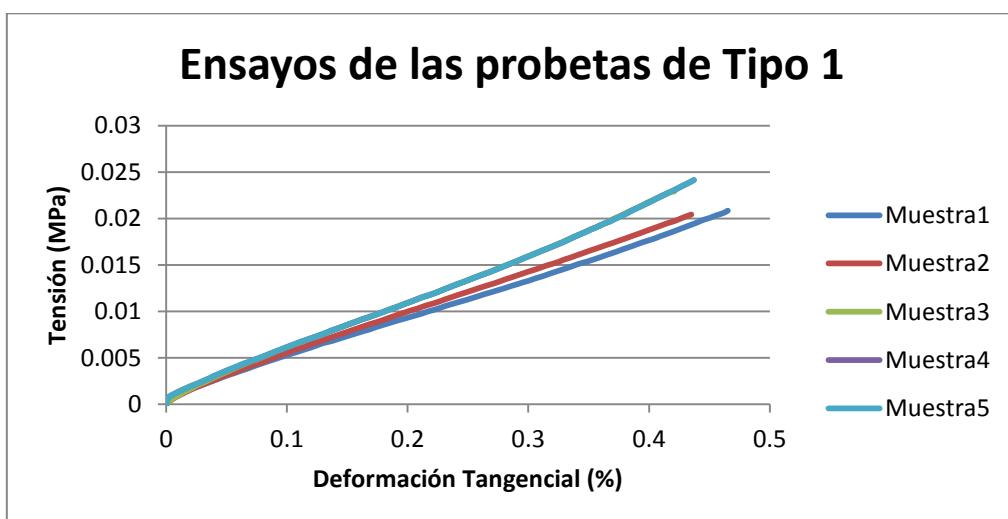


Fig. B.35 Gráfica de “Lavision” completa del Tipo 1

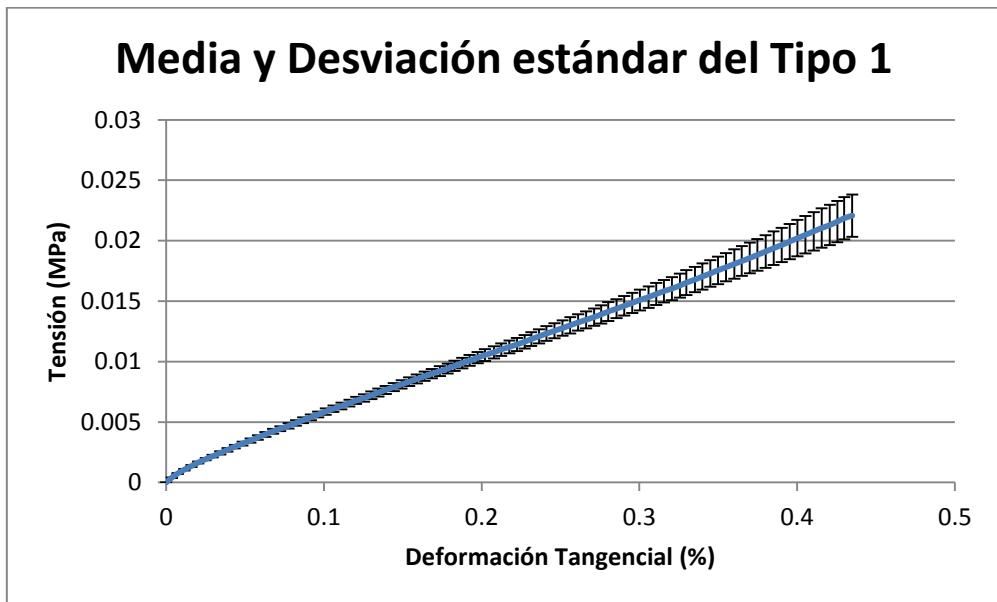


Fig. B.36 Gráfica de “Lavision” media y desviación Tipo 1

Al igual que en el otro tipo de ensayo, las probetas de mayores dimensiones, es decir, el Tipo 1, el Tipo 2 y el Tipo 3, se comportan de una manera muy parecida y no se producen casi alteraciones en la relación tensión-deformación.

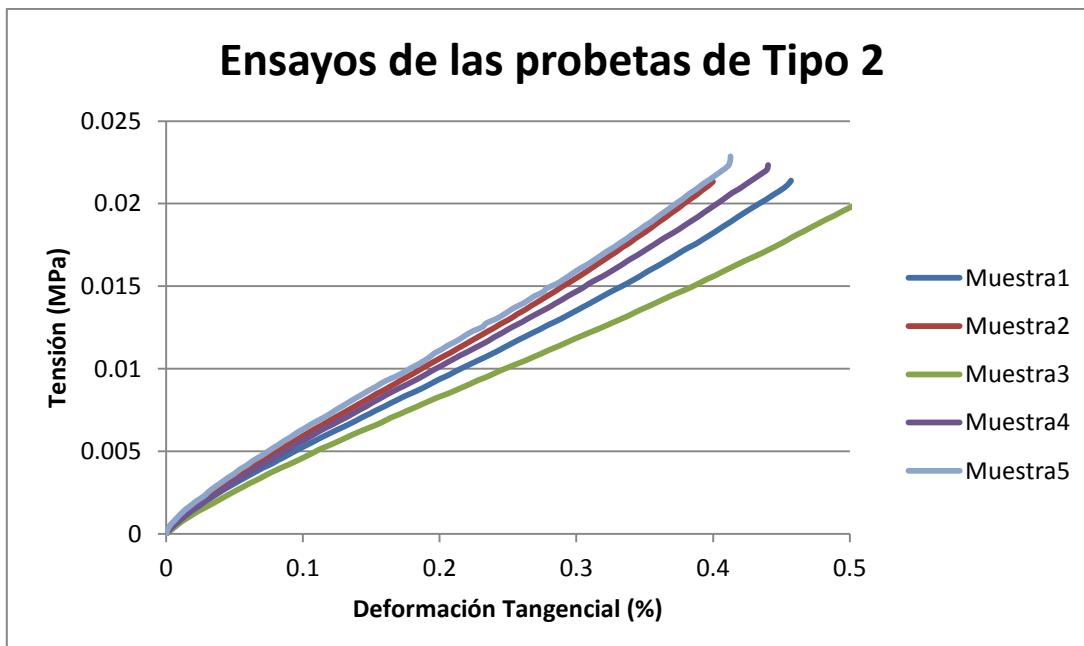


Fig. B.37 Gráfica de “Lavision” completa del Tipo 2

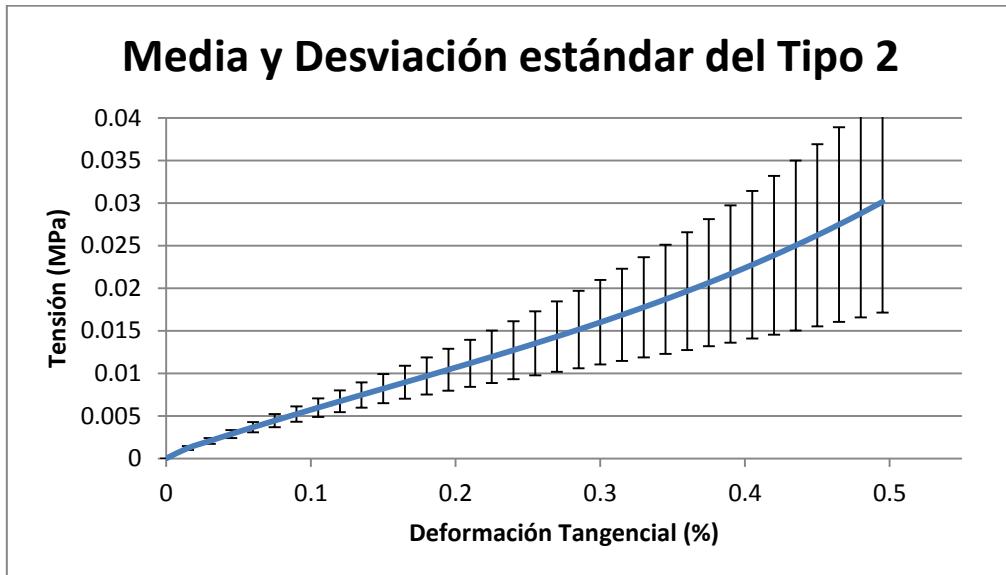


Fig. B.38 Gráfica de “Lavision” media y desviación Tipo 2

Se comprueba, como en las probetas de Tipo 3, que tienen un área de aplicación algo menor, las tensiones sufridas tienen un valor algo menos que para los tipos 1 y 2.

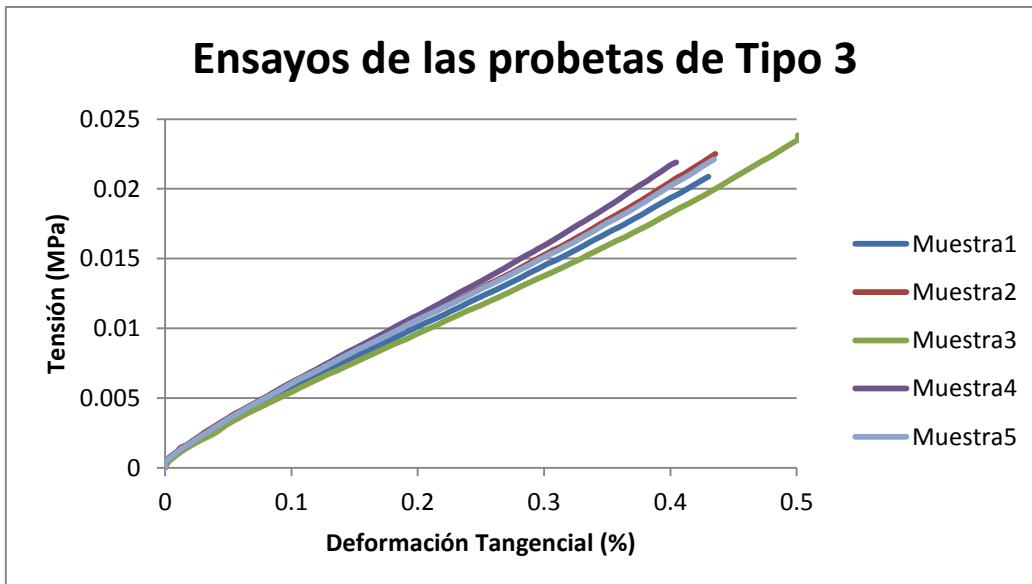


Fig. B.39 Gráfica de “Lavision” completa del Tipo 3

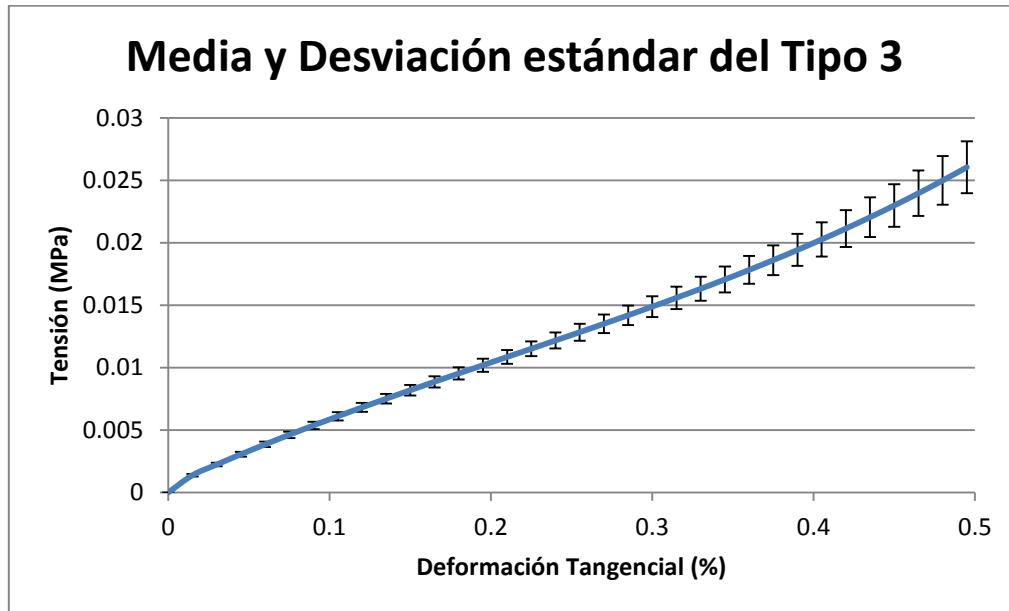


Fig. B.40 Gráfica de “Lavision” media y desviación Tipo 3

Se puede apreciar el claro descenso de la tensión y de las deformaciones para las probetas del Tipo 4, ya que en este caso, la longitud y la anchura son menores, y deben guardar la relación entre ellas.

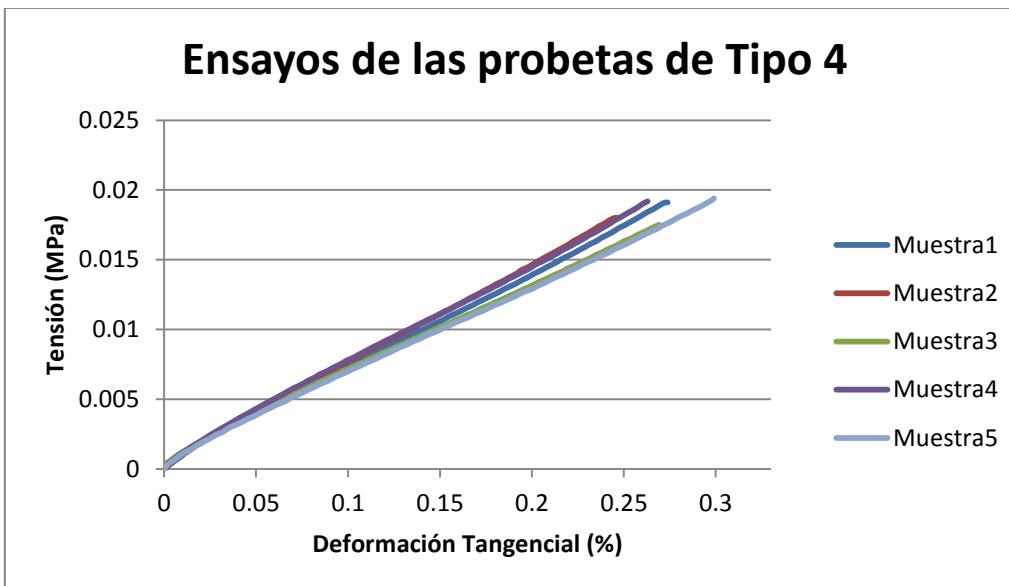


Fig. B.41 Gráfica de “Lavision” completa del Tipo 4

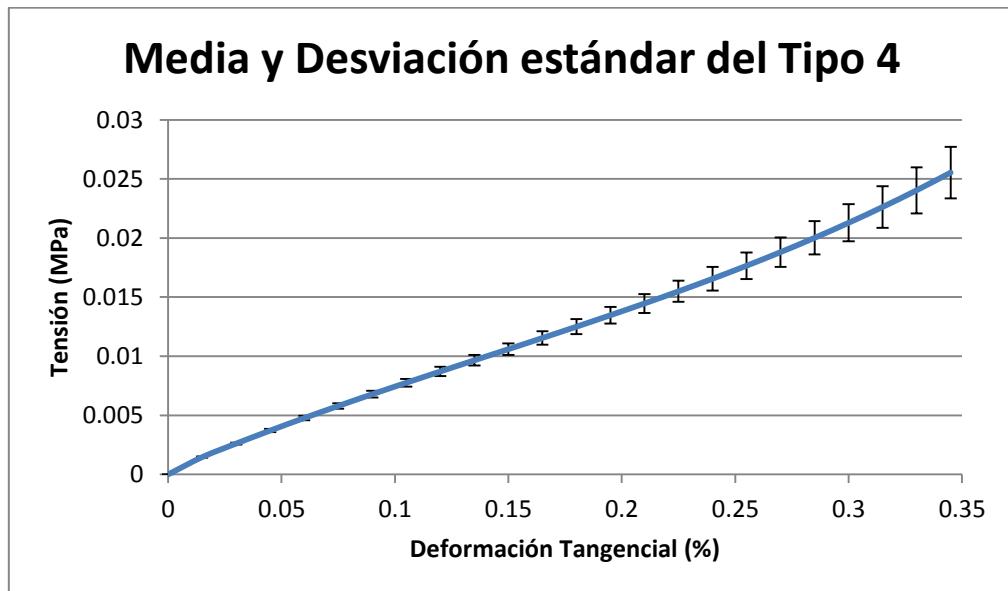


Fig. B.42 Gráfica de “Lavision” media y desviación Tipo 4

Las probetas del Tipo 5 son las que mayor desviación presentan en términos de tensión, ya que al tener las dimensiones más pequeñas, es menos probable que mantengan la relación de igual manera.

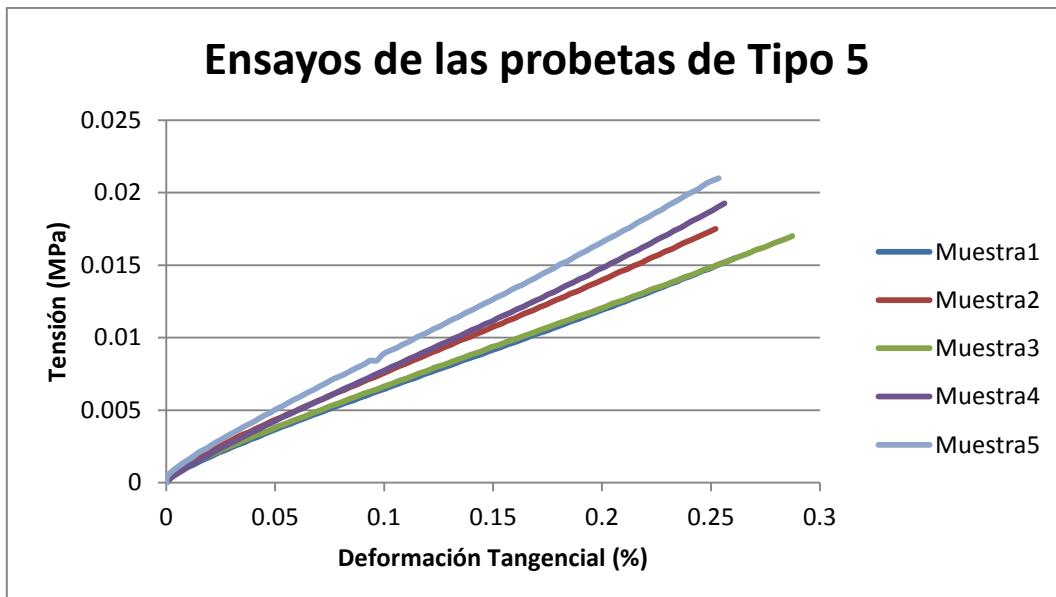


Fig. B.43 Gráfica de “Lavision” completa del Tipo 5

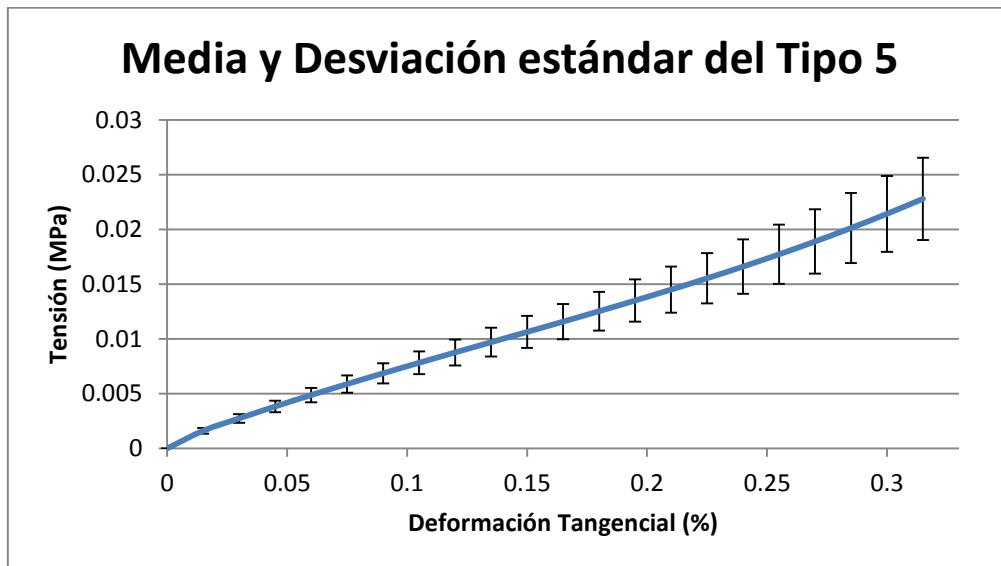


Fig. B.44 Gráfica de “Lavision” media y desviación Tipo 5

B.2.3. Comparativa Instron-Lavision

En este capítulo se muestran las demás comparaciones entre los resultados de la máquina “Instron” y “Lavision” para poder asegurar las conclusiones citadas en el capítulo 5, y comprobar la influencia de las variaciones de tamaño en las probetas ensayadas. Ver Figuras B.45, B.46, B.47 y B.48.

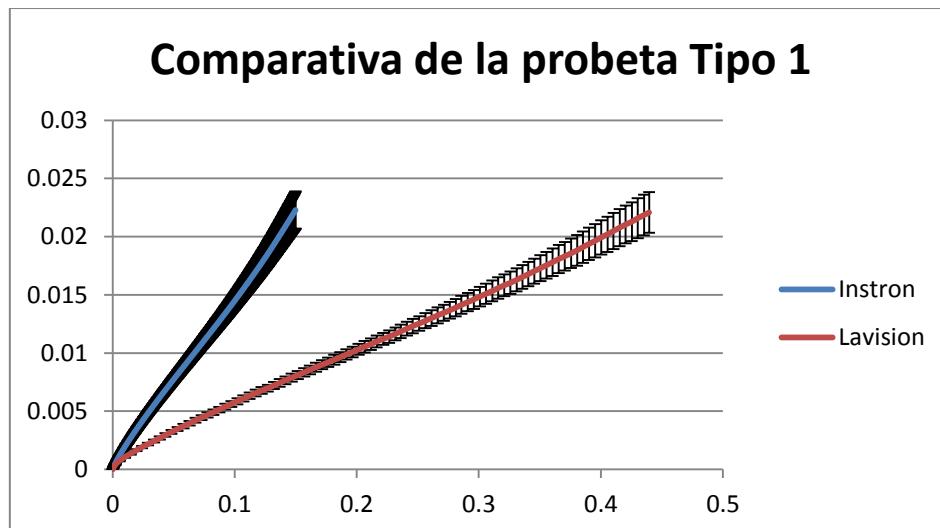


Fig. B.45 Gráfica comparativa Instron/Lavision probeta Tipo 1

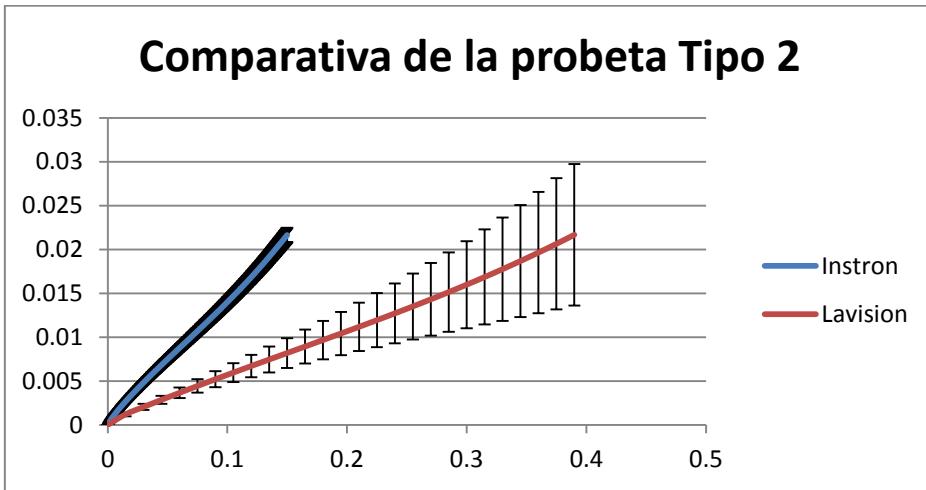


Fig. B.46 Gráfica comparativa Instron/Lavision probeta Tipo 2

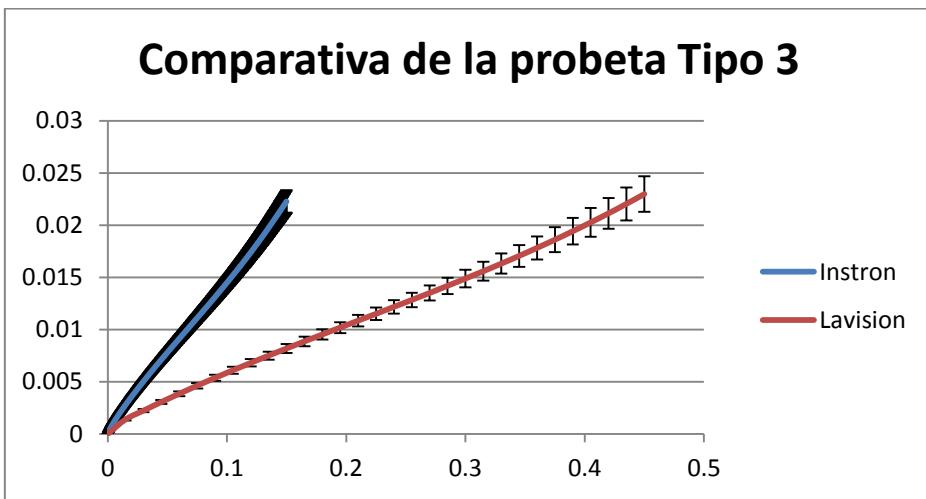


Fig. B.47 Gráfica comparativa Instron/Lavision probeta Tipo 3

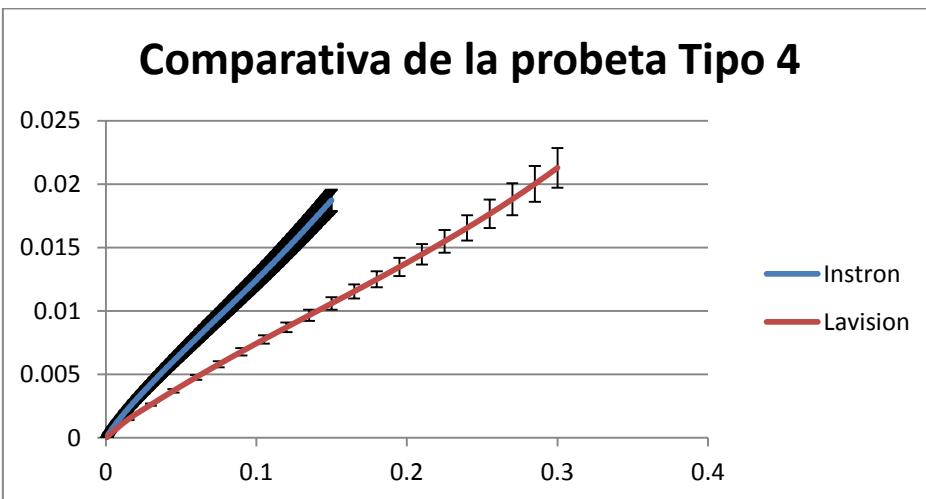


Fig. B.48 Gráfica comparativa Instron/Lavision probeta Tipo 4

7. TABLA DE ILUSTRACIONES

ENSAYOS EXPERIMENTALES DE LABORATORIO

- Figura 2.1: Máquina de ensayos uniaxial modelo “Instron”.....	9
- Figura 2.2: Sistema “StrainMaster” de cámaras de “LaVision”.....	10
- Figura 2.3: Rollo de lámina de silicona biomédica.....	11
- Figura 2.4: Tipo de probeta para el ensayo de tensión tangencial pura.....	13
- Figura 2.5: Círculo de “Mohr” asociado al ensayo de tensión tangencial pura..	13
- Figura 2.6: Representación gráfica de las tres curvas de tensión/deformación que componen un ciclo completo de ensayo.....	15
- Figura 2.7: Mordazas usadas para el ensayo de tensión tangencial pura.....	16
- Figura 2.8: Ejemplo de probeta ensayada en el ensayo de tensión tangencial puro.....	16
- Figura 2.9: Tipo de probeta utilizada para el ensayo de tensión tangencial simple.....	17
- Figura 2.10: Representación del equipo para el ensayo de tensión tangencial simple.....	18
- Figura 2.11: Posición y resultado de la probeta en el ensayo de tensión tangencial simple.....	19
- Figura 2.12: Mordazas usadas para el ensayo de tensión tangencial simple.....	20
- Figura 2.13: Probeta de ensayo denominada Tipo 1.....	21
- Figura 2.14: Probeta de ensayo denominada Tipo 2.....	21
- Figura 2.15: Probeta de ensayo denominada Tipo 3.....	21
- Figura 2.16: Probeta de ensayo denominada Tipo 4.....	21
- Figura 2.17: Probeta de ensayo denominada Tipo 5.....	22
- Figura 2.18: Esquema de una guillotina de acero para cortar las probetas.....	22

ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

- Figura 3.1: Tabla de características del material del ensayo para “ABAQUS”....	24
- Figura 3.2: Condiciones de contorno y estado de cargas del modelo.....	25
- Figura 3.3: Mallado del modelo en el ensayo de tensión tangencial pura para el cálculo con el M.E.F.....	26
- Figura 3.4: Modelo con particiones y el estado de cargas y condiciones de contorno en la probeta para el ensayo de tensión tangencial simple.....	26

- Figura 3.5: Mallado del modelo en el ensayo de tensión tangencial simple para el cálculo con el M.E.F.....27

GRÁFICAS EXPERIMENTALES Y COMPARATIVA

- Figura 4.1: Gráfica de tensión/deformación de tensión pura de los cinco tipos a partir de los datos de la Máquina de Ensayos “Instron”29
- Figura 4.2: Gráfica de tensión/deformación de tensión pura de los cinco tipos a partir del tracking pixel a pixel de las cámaras de “Lavision”30
- Figura 4.3: Gráfica comparativa entre los resultados de las desviaciones de la máquina “Instron” y las cámaras de “Lavision” para la probeta Tipo 1.....31
- Figura 4.4: Representación mediante ABAQUS de las tensiones normales en el eje vertical del ensayo de tensión pura en la probeta del Tipo 1.....32
- Figura 4.5: Gráfica de tensión/deformación de tensión simple de los cinco tipos a partir de los datos de la Máquina de Ensayos “Instron”34
- Figura 4.6: Gráfica de tensión/deformación de tensión simple de los cinco tipos a partir del tracking pixel a pixel de las cámaras de “Lavision”34
- Figura 4.7: Gráfica comparativa entre los resultados de las desviaciones de la máquina “Instron” y las cámaras de “Lavision” para la probeta Tipo 5.....35
- Figura 4.8: Representación mediante ABAQUS de las tensiones tangenciales del ensayo de tensión simple en la probeta del Tipo 5.....36

ANEXO A – ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

- Figura A.1: Ejemplo de probeta ensayada en el “ABAQUS” para el ensayo de tensión tangencial pura.....40
- Figura A.2: Representación en “ABAQUS” de la tensión normal en el eje vertical del ensayo de tensión tangencial pura. Probeta Tipo 1.....41
- Figura A.3: Representación en “ABAQUS” de la tensión normal en el eje vertical del ensayo de tensión tangencial pura. Probeta Tipo 2.....41
- Figura A.4: Representación en “ABAQUS” de la tensión normal en el eje vertical del ensayo de tensión tangencial pura. Probeta Tipo 3.....41
- Figura A.5: Representación en “ABAQUS” de la tensión normal en el eje vertical del ensayo de tensión tangencial pura. Probeta Tipo 4.....42
- Figura A.6: Representación en “ABAQUS” de la tensión normal en el eje vertical del ensayo de tensión tangencial pura. Probeta Tipo 5.....42

- Figura A.7: Ejemplo de probeta ensayada en el “ABAQUS” para el ensayo de tensión tangencial simple.....	43
- Figura A.8: Representación en “ABAQUS” de la deformación tangencial del ensayo de tensión tangencial simple. Probeta Tipo 1.....	44
- Figura A.9: Representación en “ABAQUS” de la deformación tangencial del ensayo de tensión tangencial simple. Probeta Tipo 2.....	44
- Figura A.10: Representación en “ABAQUS” de la deformación tangencial del ensayo de tensión tangencial simple. Probeta Tipo 3.....	45
- Figura A.11: Representación en “ABAQUS” de la deformación tangencial del ensayo de tensión tangencial simple. Probeta Tipo 4.....	45
- Figura A.12: Representación en “ABAQUS” de la deformación tangencial del ensayo de tensión tangencial simple. Probeta Tipo 5.....	45

ANEXO B – RESULTADOS Y GRAFICADO COMPLETO DE TODOS LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES

ENSAYO DE TENSIÓN TANGENCIAL PURA

- Figura B.1: Gráfica de “Instron” completa de las probetas Tipo 1.....	46
- Figura B.2: Gráfica “Instron” con la media y desviación estándar del Tipo 1.....	47
- Figura B.3: Gráfica de “Instron” completa de las probetas Tipo 2.....	47
- Figura B.4: Gráfica “Instron” con la media y desviación estándar del Tipo 2.....	48
- Figura B.5: Gráfica de “Instron” completa de las probetas Tipo 3.....	48
- Figura B.6: Gráfica “Instron” con la media y desviación estándar del Tipo 3.....	49
- Figura B.7: Gráfica de “Instron” completa de las probetas Tipo 4.....	49
- Figura B.8: Gráfica “Instron” con la media y desviación estándar del Tipo 4.....	50
- Figura B.9: Gráfica de “Instron” completa de las probetas Tipo 5.....	50
- Figura B.10: Gráfica “Instron” con la media y desviación estándar del Tipo 5.....	51
- Figura B.11: Gráfica de “Lavision” completa de las probetas Tipo 1.....	51
- Figura B.12: Gráfica “Lavision” con la media y desviación estándar del Tipo 1.....	52
- Figura B.13: Gráfica de “Lavision” completa de las probetas Tipo 2.....	52
- Figura B.14: Gráfica “Lavision” con la media y desviación estándar del Tipo 2.....	53
- Figura B.15: Gráfica de “Lavision” completa de las probetas Tipo 3.....	53
- Figura B.16: Gráfica “Lavision” con la media y desviación estándar del Tipo 3.....	54
- Figura B.17: Gráfica de “Lavision” completa de las probetas Tipo 4.....	54
- Figura B.18: Gráfica “Lavision” con la media y desviación estándar del Tipo 4.....	55
- Figura B.19: Gráfica de “Lavision” completa de las probetas Tipo 5.....	55
- Figura B.20: Gráfica “Lavision” con la media y desviación estándar del Tipo 5.....	56

- Figura B.21: Gráfica comparativa entre los resultados de las desviaciones de la máquina “Instron” y las cámaras de “Lavision” para la probeta Tipo 2.....56
- Figura B.22: Gráfica comparativa entre los resultados de las desviaciones de la máquina “Instron” y las cámaras de “Lavision” para la probeta Tipo 3.....57
- Figura B.23: Gráfica comparativa entre los resultados de las desviaciones de la máquina “Instron” y las cámaras de “Lavision” para la probeta Tipo 4.....57
- Figura B.24: Gráfica comparativa entre los resultados de las desviaciones de la máquina “Instron” y las cámaras de “Lavision” para la probeta Tipo 5.....58

ENSAYO DE TENSIÓN TANGENCIAL SIMPLE

- Figura B.25: Gráfica de “Instron” completa de las probetas Tipo 1.....59
- Figura B.26: Gráfica “Instron” con la media y desviación estándar del Tipo 1...60
- Figura B.27: Gráfica de “Instron” completa de las probetas Tipo 2.....60
- Figura B.28: Gráfica “Instron” con la media y desviación estándar del Tipo 2...61
- Figura B.29: Gráfica de “Instron” completa de las probetas Tipo 3.....61
- Figura B.30: Gráfica “Instron” con la media y desviación estándar del Tipo 3...62
- Figura B.31: Gráfica de “Instron” completa de las probetas Tipo 4.....62
- Figura B.32: Gráfica “Instron” con la media y desviación estándar del Tipo 4...63
- Figura B.33: Gráfica de “Instron” completa de las probetas Tipo 5.....63
- Figura B.34: Gráfica “Instron” con la media y desviación estándar del Tipo 5...64
- Figura B.35: Gráfica de “Lavision” completa de las probetas Tipo 1.....64
- Figura B.36: Gráfica “Lavision” con la media y desviación estándar del Tipo 1..65
- Figura B.37: Gráfica de “Lavision” completa de las probetas Tipo 2.....65
- Figura B.38: Gráfica “Lavision” con la media y desviación estándar del Tipo 2..66
- Figura B.39: Gráfica de “Lavision” completa de las probetas Tipo 3.....66
- Figura B.40: Gráfica “Lavision” con la media y desviación estándar del Tipo 3..67
- Figura B.41: Gráfica de “Lavision” completa de las probetas Tipo 4.....67
- Figura B.42: Gráfica “Lavision” con la media y desviación estándar del Tipo 4..68
- Figura B.43: Gráfica de “Lavision” completa de las probetas Tipo 5.....68
- Figura B.44: Gráfica “Lavision” con la media y desviación estándar del Tipo 5..69
- Figura B.45: Gráfica comparativa entre los resultados de las desviaciones de la máquina “Instron” y las cámaras de “Lavision” para la probeta Tipo 1.....69
- Figura B.46: Gráfica comparativa entre los resultados de las desviaciones de la máquina “Instron” y las cámaras de “Lavision” para la probeta Tipo 2.....70
- Figura B.47: Gráfica comparativa entre los resultados de las desviaciones de la máquina “Instron” y las cámaras de “Lavision” para la probeta Tipo 3.....70
- Figura B.48: Gráfica comparativa entre los resultados de las desviaciones de la máquina “Instron” y las cámaras de “Lavision” para la probeta Tipo 4.....70