



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Estudio numérico-experimental del
comportamiento mecánico de la fascia

Autor/es

David Ruiz-Alejos Sánchez

Director/es

Estefanía Peña Baquedano

Juan Antonio Peña Baquedano

Facultad / Escuela

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza

Año

Febrero 2015

Resumen

A pesar de que es sabida la importancia e influencia de la fascia en el desarrollo de patologías locomotoras, todavía no hay un conocimiento claro de sus propiedades mecánicas. Por ello, en este proyecto se van a realizar ensayos mecánicos y se va a desarrollar un modelo de comportamiento que se ajuste a las propiedades observadas en los ensayos realizados.

Para su caracterización se ha procedido a ensayar distintas muestras de fascia de oveja, concretamente de los cuádriceps de las patas traseras de distintos ejemplares. Los ensayos llevados a cabo han sido uniaxiales y de tensión plana, disponiendo de 6 tipos de probetas. Además de la máquina de tracción uniaxial utilizada, se ha contado con un equipo de cámaras que ha permitido el ajuste de las curvas obtenidas en los ensayos, y ha sido capaz de proporcionar los campos de deformaciones en cada instante.

Por último, se ha procedido a la implementación de los modelos de dos muestras en concreto en un programa de elementos finitos. De esta manera, se han podido comparar los resultados obtenidos con los que se disponían de los ensayos experimentales evaluando el trabajo desarrollado y, por tanto, valorando su posible uso o continuidad en investigaciones o proyectos futuros.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Objeto.....	1
1.2	Alcance	1
1.3	Justificación	1
2	Ensayos experimentales.....	3
2.1	Introducción	3
2.2	Entorno de trabajo	3
2.3	Obtención de probetas	5
2.4	Protocolo de ensayo y recogida de datos	8
2.5	Interpretación de los datos.....	9
2.5.1	Instron	9
2.5.2	LaVision	11
3	Análisis mediante MEF	15
3.1	Introducción	15
3.2	Obtención de los contornos reales.....	15
3.3	Caracterización de la fascia.....	16
3.4	Introducción del modelo en Abaqus	17
3.5	Comprobación del ajuste	18
4	Conclusiones y líneas futuras.....	21
4.1	Conclusiones	21
4.2	Líneas futuras	21
5	Bibliografía	23
Anexo A	Listado de muestras y probetas.....	27
A.1	FA30514	27
A.2	FA34114	27
A.3	FA34414	27
A.4	FA35814	27
A.5	FA36314	28
A.6	FA37014	28
Anexo B	Resultados de los ensayos experimentales	29
B.1	Fascia profunda.....	29
B.2	Fascia superficial	32

Anexo C	Comprobación del modelo de comportamiento.....	35
C.1	Muestra FA34414 (fascia profunda).....	36
C.2	Muestra FA35814 (fascia superficial)	43
Anexo D	Campos de tensiones.....	49
D.1	Muestra FA34414 (fascia profunda).....	49
D.2	Muestra FA35814 (fascia superficial)	54
	Tabla de ilustraciones.....	57

1 Introducción

1.1 Objeto

El objetivo de este trabajo es la elaboración y aplicación de una metodología numérico-experimental para la determinación de las propiedades mecánicas de la fascia de oveja, para su aplicación posterior en otros trabajos de investigación enfocados en el diseño de mallas protésicas.

1.2 Alcance

La caracterización del comportamiento mecánico de la fascia se ha llevado a cabo con 6 muestras distintas de las patas traseras de ovejas. Los ensayos se han realizado dentro del Grupo de Mecánica Aplicada y Bioingeniería del Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería de Aragón (I3A), perteneciente a la Universidad de Zaragoza.

Para la obtención de dichas propiedades mecánicas se han ejecutado ensayos uniaxiales y de tensión plana en las dos direcciones preferentes de anisotropía del tejido [1]. Dichos ensayos han sido grabados mediante un sistema de cámaras que permite conocer la deformada de la fascia en cada instante. A partir de los ensayos uniaxiales y de tensión plana, cuya solución analítica es conocida, se han determinado las propiedades elásticas. Para ello, se ha propuesto un nuevo modelo hiperelástico anisótropo que se adapta a la microestructura de la fascia y que considera la concentración de fibras de colágeno en cada dirección [2].

Utilizando un modelo de elementos finitos se ha procedido a la simulación de los ensayos con el objetivo de validar dichas propiedades y determinar el daño en el tejido. Para ello se han comparado los mapas de desplazamientos obtenidos con el sistema de cámaras y la curva experimental con los resultados numéricos.

1.3 Justificación

El presente proyecto se engloba dentro del área de la Biomecánica. Esta disciplina, nacida en la segunda mitad del siglo XX, agrupa los conocimientos de distintas ramas de la ciencia y en un intento por indagar en el conocimiento del ser humano, aplica las herramientas más comunes de la ingeniería al extenso ámbito de la medicina. A partir de la consideración del cuerpo humano como una estructura de carácter mecánico, se ha permitido avanzar sobremedida en el estudio de sus partes y órganos, así como en la aparición de nuevos diagnósticos [3]. 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 ensayos mecánicos, tales como el ensayo de inflado, tensión uniaxial o biaxial, permite definir el comportamiento mecánico de aquellos tejidos biológicos que sean de interés [4]. De esta manera, tomando como objeto de muestra diversos tejidos biológicos, se pueden llegar a determinar características mecánicas que de otro modo serían totalmente inaccesibles.

Este proyecto se concibe como un estudio para caracterizar el comportamiento de la fascia. La correcta caracterización de un tejido es de vital importancia para poder predecir su comportamiento una vez sometido a un esfuerzo. En el caso de los tejidos biológicos, este estudio se vuelve todavía más relevante ya que puede permitir el diseño de prótesis utilizando materiales con unas propiedades y un comportamiento semejantes.

2 Ensayos experimentales

2.1 Introducción

La fascia es un tejido conectivo muy resistente que tiene la función de proteger, formar compartimentos y conectar todos los órganos del cuerpo haciendo de revestimiento [5]. Este tejido está formado por dos capas de fibras de colágeno que interactúan muy poco entre sí, incluso se podría decir que estas capas son totalmente independientes. Las fibras de ambas capas forman un ángulo entre 70-85° y la capa que contiene las fibras orientadas en la dirección longitudinal tiene mayor densidad de fibras y está formada por fibras de mayor grosor [6,7].

La fascia muscular consiste en la fascia superficial y la fascia profunda. La fascia profunda es un tejido conectivo denso que se encuentra debajo de la fascia superficial. Dada la continuidad de tejido conjuntivo por todo el cuerpo, la función mecánica de la fascia y la capacidad de los fibroblastos para comunicarse entre sí a través de uniones de hendidura, es probable que esta sirva como un sistema de señalización mecanosensible de todo el cuerpo con una función de integración análoga a la del sistema nervioso. Sin embargo, son relativamente pocos los autores abordan principalmente la fascia profunda, particularmente la biomecánica de la fascia profunda. Esta es una omisión trascendental, debido a su importancia general en todo el cuerpo y al interés en su biomecánica [8].

2.2 Entorno de trabajo

Los ensayos experimentales del presente proyecto se han realizado con fascia muscular de oveja, en concreto con muestras de los cuádriceps de las patas traseras que se han obtenido en la Facultad de Veterinaria. Todos los ensayos presentados en este proyecto se han llevado a cabo en el Laboratorio de Caracterización de Materiales del I3A, en la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.

La máquina utilizada para realizar dichos ensayos es el modelo 5548 MicroTester de la marca comercial Instron, diseñada específicamente para ensayos uniaxiales en tejidos biológicos. El sistema es muy versátil, ya que lleva a cabo ensayos con fuerzas muy bajas con muy alta resolución de desplazamiento, y es capaz de ejercer cargas de hasta 2 kN. Como se muestra en la siguiente figura (figura 2.1), la máquina va conectada a un software donde agrupa todos los datos recogidos en tablas y gráficas, fácilmente manejables posteriormente.

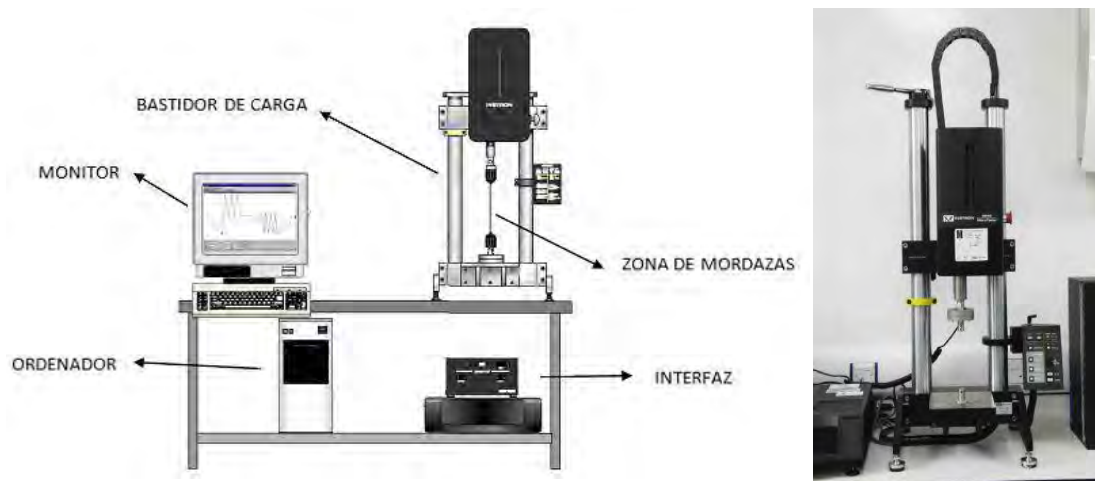


Figura 2.1. Instron 5548 MicroTester

El modo de sujeción que ofrecía el sistema inicialmente no permitía el ensayo de muestras de tamaño muy pequeño. Por este motivo, se han utilizado unas mordazas neumáticas distintas de las originales de Instron, modificadas específicamente para probetas con estas características, asegurando una perfecta sujeción frente a deslizamientos y una distribución uniforme de tensiones del mismo modo que lo hacen las probetas originales de la marca.

Todos los ensayos han sido grabados por un sistema de cámaras de LaVision (figura 2.2). Este sistema óptico no intrusivo para la muestra permite, por extensometría sin contacto y un software para el tracking pixel a pixel de las imágenes, el análisis del campo de desplazamientos en toda la muestra así como la determinación de dicho campo mediante el procesamiento y posterior tratamiento del video grabado durante el ensayo.



Figura 2.2. Equipo de cámaras de LaVision

Además, han sido perfectamente calibrados antes de cada ensayo y utilizados de manera minuciosa para asegurar unos resultados óptimos al tratarse de valores de desplazamientos y deformaciones muy pequeños. Se considera que cualquier error en la medición por muy pequeño que sea pueda afectar al ensayo.

2.3 Obtención de probetas

Cada día de ensayo se ha utilizado una fascia distinta. Las fascias se guardaban en el congelador hasta el día previo a los ensayos con el fin de mantenerlas en las mejores condiciones posibles.

El primer paso era limpiarla de grasa y otros tejidos que no aportan rigidez y pueden complicar la realización de los ensayos, evitando molestias a la hora de colocar la probeta en las mordazas y previniendo leves deslizamientos de esta durante el transcurso del ensayo.

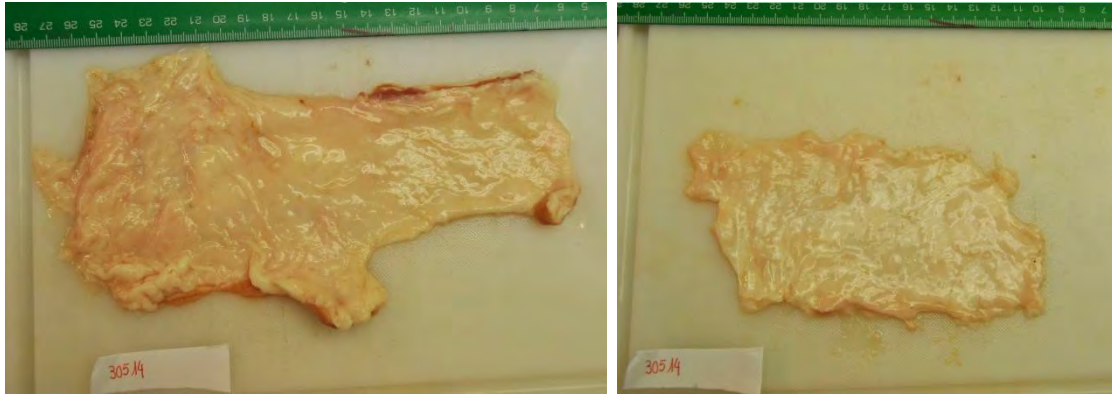


Figura 2.3. Fascia FA30514 antes y después de su limpieza

Una vez se disponía de la muestra libre de materia insertable se analizaba detenidamente para poder identificar correctamente las direcciones preferentes de anisotropía. Esta tarea se realizaba con la ayuda de una lupa 3D, que ha permitido una vista muy aumentada de la muestra además de darle relieve y volumen en la tercera dirección del espacio (figura 2.4).



Figura 2.4. Lupa 3D de Vision Engineering

Teniendo localizadas dichas direcciones se procedía al corte de las probetas con un bisturí médico de hojas desechables, habiendo marcado previamente con unas plantillas metálicas el contorno a cortar. Normalmente se seguía un orden de corte de las probetas, siendo este el siguiente: L1, L2, T1, T2, SS1 y SS2. Ya que de este modo se aprovechaba para cortar las probetas con la misma dirección (longitudinal o transversal) de la misma zona de la muestra.

Las geometrías planteadas para las 3 formas de probeta escogidas son las que se presentan a continuación en la figura 2.5:

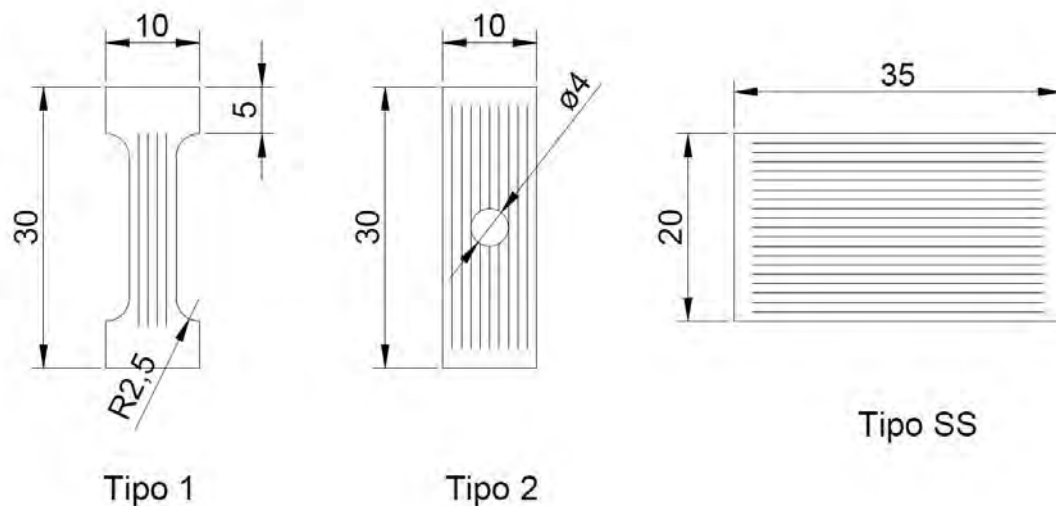


Figura 2.5. Geometrías iniciales para las probetas

Si considerásemos que las fibras de las probetas presentadas en la figura anterior son de la dirección longitudinal (siempre que se hable de fibras longitudinales o dirección longitudinal se entenderá que se trata de aquellas que son paralelas al eje de la pata de la oveja), se trataría en realidad de probetas L1, L2 y SS1. Si las fibras representadas fueran de la dirección transversal se trataría de las probetas T1, T2 y SS2, siendo la vertical la dirección de aplicación de la carga.

En la siguiente figura (figura 2.6) se muestran todos los tipos de probeta siendo las fibras representadas las pertenecientes a la dirección longitudinal.

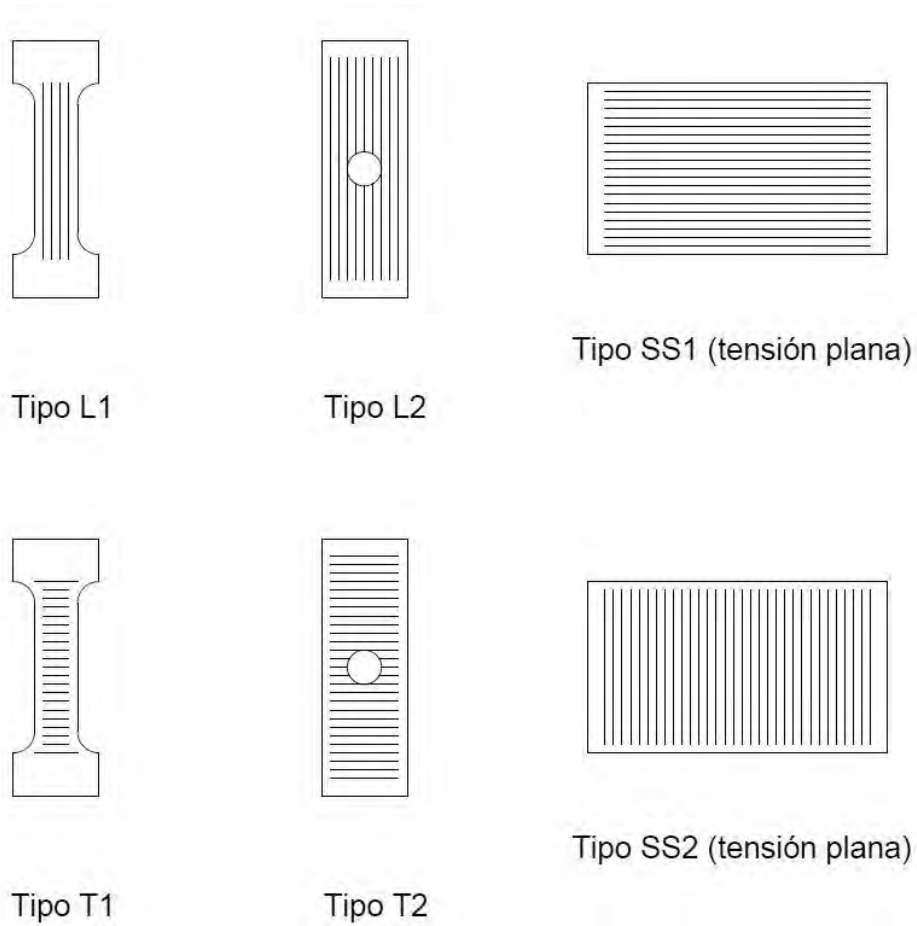


Figura 2.6. Tipos de probetas representando las fibras longitudinales de la fascia

Las dimensiones de las probetas una vez cortadas podían desviarse un poco de las planteadas en un inicio debido a que es un tejido difícil de cortar y se encoje al seccionar sus fibras por encontrarse pretensadas. Por este motivo se procedía a medir de nuevo las dimensiones de dichas probetas después de haber sido cortadas incluyendo también la medida de su espesor.

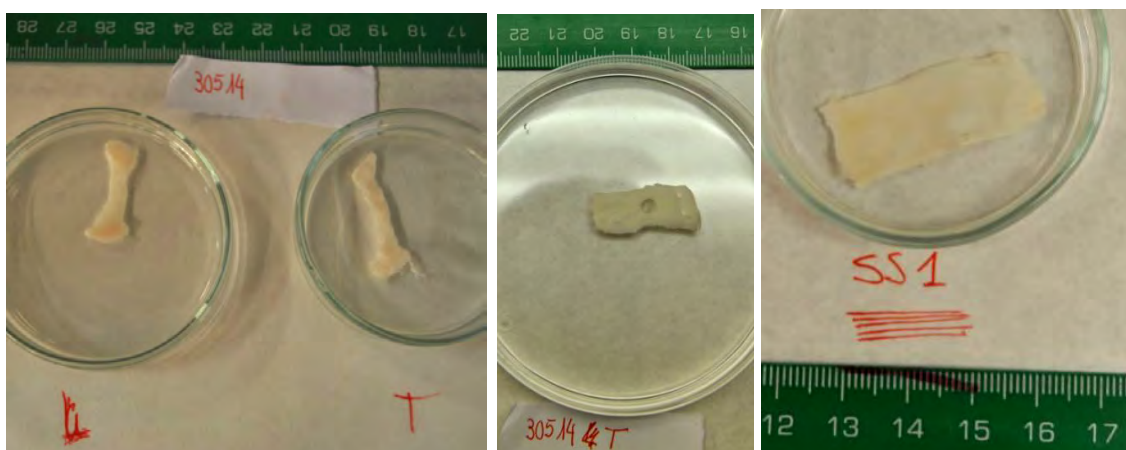


Figura 2.7. Ejemplos de probetas reales tras ser cortadas de la muestra FA30514

2.4 Protocolo de ensayo y recogida de datos

Cada probeta ensayada lleva asignado un código que incluye material, número de ensayo, año y tipo de probeta (indicando de esta manera también su geometría y dirección principal) para poder manejar posteriormente con facilidad todos los datos y videos recogidos en cada ensayo.

Antes de la colocación de la probeta, y con el fin de optimizar la grabación y procesamiento de las imágenes, se aplicaba una fina capa de spray negro sobre la probeta para facilitar el tracking de los píxeles en el postproceso al generar puntos aleatorios para el seguimiento.

Para una mejor colocación se procedía primero a colocar la parte superior de esta, ya que la mordaza superior era la móvil, y luego se bajaba la distancia necesaria hasta cerrar la mordaza inferior (mordaza fija). Tras el cierre de la segunda mordaza se aplica (subiendo la mordaza superior con los controles de la máquina) una precarga fija de 0.1 N dejando la probeta perfectamente preparada para el inicio del ensayo.

Según el tipo de probeta se han realizado dos tipos de ensayos distintos, todos ellos con una célula de carga de 50 N:

- Ensayos para probetas tipo 1 y SS: Consistían en 3 ciclos de carga-descarga hasta el 10% de deformación a una velocidad constante de 5 mm/min, se conocía previamente que estos ciclos no iban a dañar la fascia, sino que la condicionaba para llevarla a un comportamiento estable. Después de estos ciclos (curvas de histéresis), se mantenía con esa misma velocidad hasta llegar a la rotura.
- Ensayos para probetas tipo 2: Se elimina el preciclado y solo se realiza la segunda parte del ensayo descrito anteriormente, se mantiene constante la velocidad de 5 mm/min hasta la rotura.

El software de Instron utilizado durante los ensayos nos permitía observar una gráfica carga-extensión en tiempo real. Además, al finalizar el ensayo, nos proporciona los datos de carga, extensión, esfuerzo de tracción, y deformación en cada instante de tiempo recogido (10 capturas por segundo, $f=10$ Hz).

Al mismo tiempo, el sistema de cámaras de LaVision tomaba imágenes de todo el ensayo, que posteriormente se procesarían para darnos unos segundos datos que permitan ajustar las curvas obtenidas mediante los valores de Instron. Estos datos fueron obtenidos con el software DaVis de LaVision, que permite colocar galgas imaginarias en las imágenes y así conocer la deformación de ese segmento en cada instante mediante el seguimiento de los píxeles.

LaVision también proporciona un mapa de desplazamientos donde podemos ver mediante una sola imagen la distribución de desplazamientos en la probeta, lo que será importante para poder comparar con los resultados numéricos mediante elementos finitos.

Por último, se creaba una carpeta que contuviese los datos de cada probeta ensayada: las medidas de las dimensiones exactas, los datos recogidos por el software de Instron en formato .xls, las fotos tomadas con la cámara del laboratorio, el pdf generado por el software de Instron con la gráfica carga-extensión y las imágenes y videos obtenidos por el sistema de cámaras de LaVision. De esta forma se encontraba todo ordenado y disponible para el posterior trabajo.

2.5 Interpretación de los datos

2.5.1 Instron

El software utilizado por la máquina uniaxial Instron 5548 MicroTester exportaba todos los datos obtenidos en cada instante de tiempo en un archivo de formato .xls. Este archivo recoge los valores de carga, extensión, esfuerzo de tracción, y deformación.

Una vez conocidos todos estos valores se ha procedido al cálculo de las curvas esfuerzo-deformación a través de la siguiente fórmula:

$$\sigma = \lambda \frac{F}{A}, \text{ siendo } \lambda = 1 + \varepsilon$$

donde F es la carga aplicada en cada instante de tiempo, A es la superficie transversal inicial de la probeta y λ es el alargamiento que en grandes deformaciones nos permite calcular la sección transversal real.

La deformación se define como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

donde L es la longitud inicial entre mordazas y ΔL representa el incremento de longitud.

Una vez conocidos los valores de deformación y tensión para cada instante, se obtuvieron gráficos de dispersión con todos los puntos tensión-deformación, que posteriormente permitirían disponer de las curvas completas de los ensayos desde su inicio hasta la rotura de la probeta (figura 2.8).

A partir de estas gráficas, se ha tomado la decisión de trabajar con la parte que queda por debajo del 10% de deformación tras el precipitado, ya que el objeto del proyecto es conocer y caracterizar el comportamiento en la zona elástica.

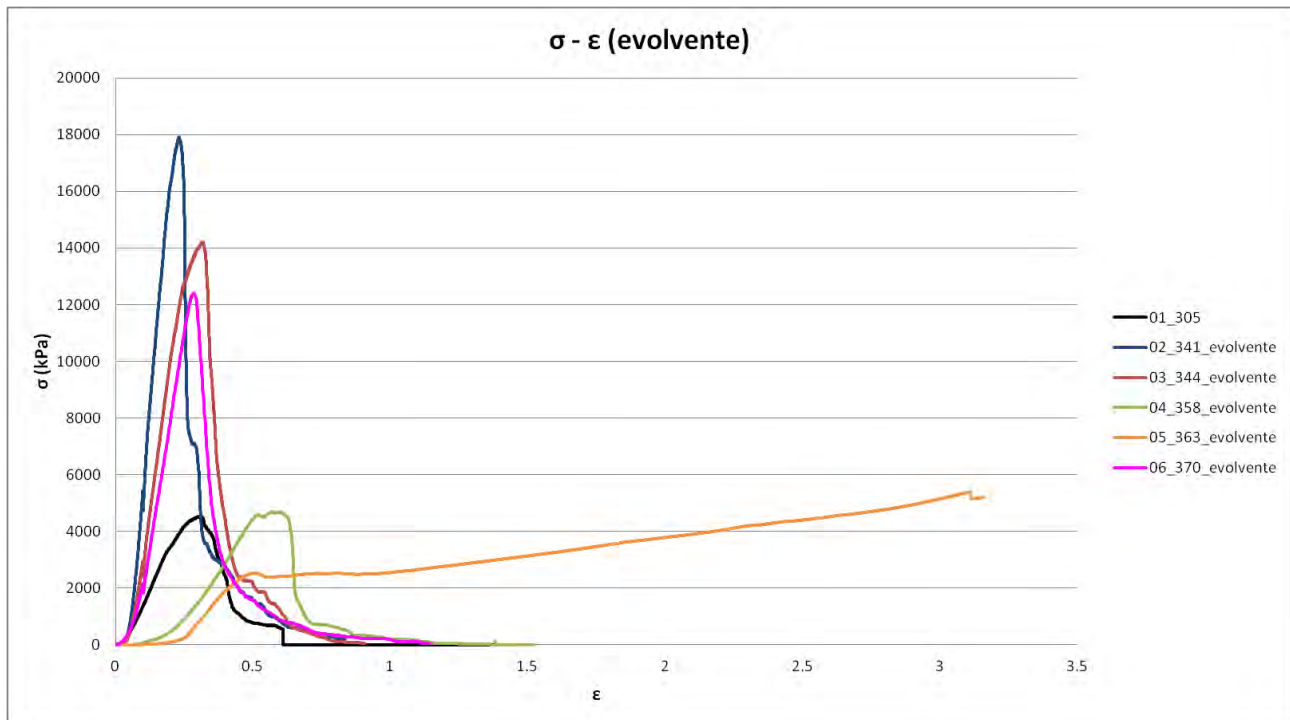


Figura 2.8. Gráfica de las probetas tipo T1 hasta su rotura

Tras aislar la nueva curva deformación con ese tramo, utilizando siempre la última subida (carga inicial y única en caso de las probetas tipo 2 y cuarta carga tras los tres ciclos en los casos de las probetas tipo 1 y SS), hemos buscado el punto en el que la fascia vuelve a estar sometida a un esfuerzo, ya que como se muestra en las siguientes imágenes (figuras 2.9 y 2.10) tras los 3 ciclos la fascia se encuentra ligeramente elongada y tiene un tramo inicial plano en el que no existe esfuerzo a pesar de que se está deformando.

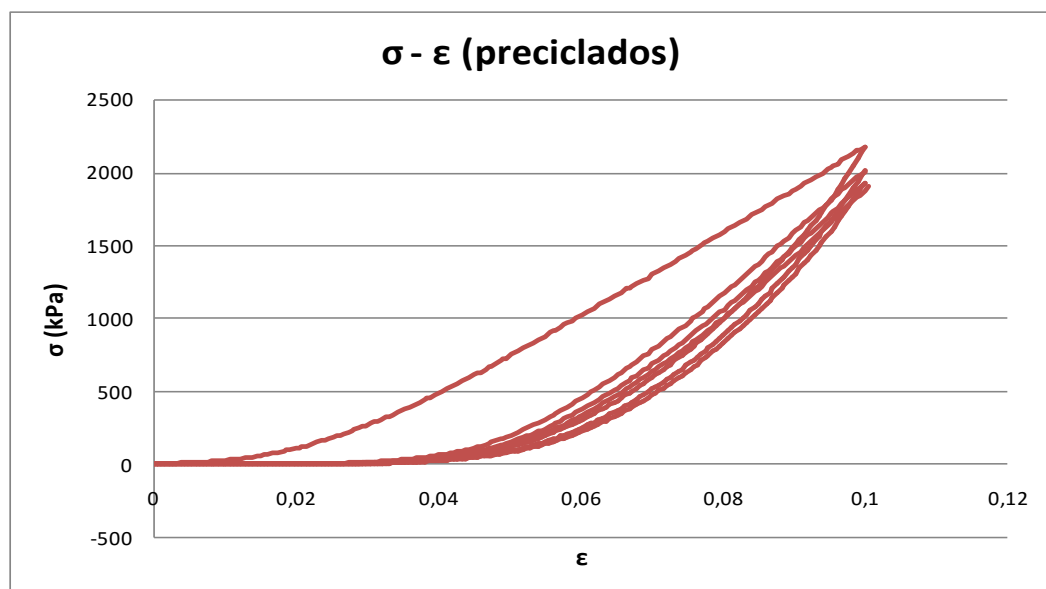


Figura 2.9. Preciclado y cuarta carga hasta 10 de la probeta FA34414_T1

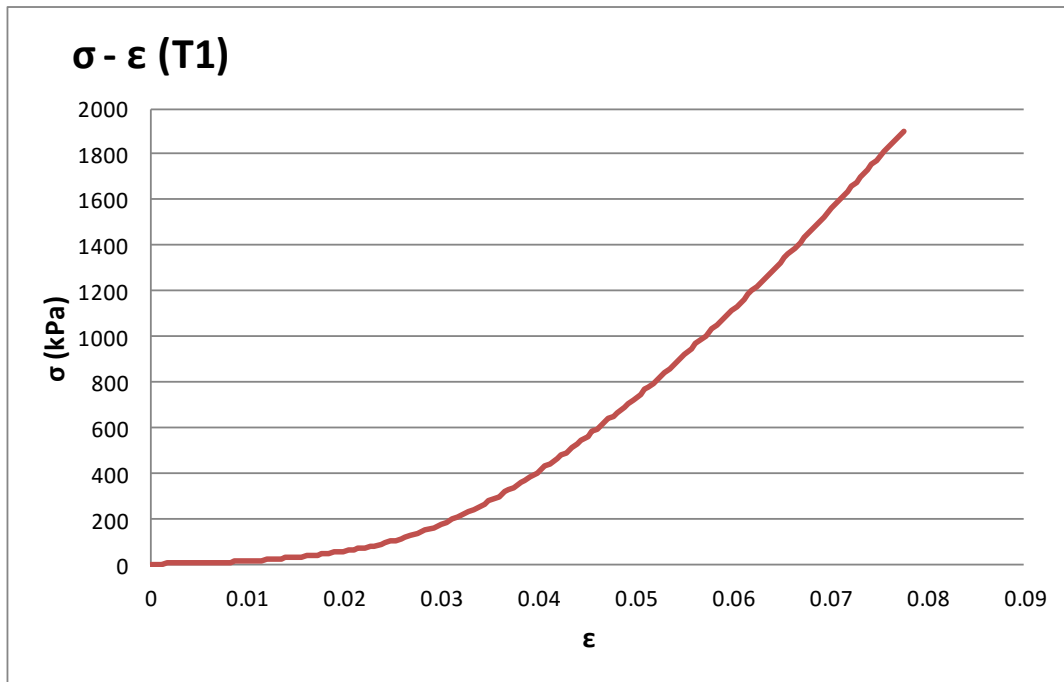


Figura 2.10. Gráfica de la cuarta carga en el ensayo de FA34414_T1 tras haberla ajustado al cero real

Posteriormente se incorporó en el mismo gráfico las curvas tensión-deformación previamente ajustadas de cada tipo de probeta, agrupadas según geometría, dirección principal del ensayo y su clasificación como fascia profunda o fascia superficial. En cada uno de estos gráficos se ha representado también la media todas las curvas representadas y su desviación (Anexo B).

2.5.2 LaVision

Como se ha mencionado previamente, el software DaVis de LaVision permite colocar galgas imaginarias en las imágenes de los ensayos (figura 2.11). De esta manera permitía ver durante su proceso una gráfica deformación-tiempo (figura 2.12) y al finalizar archivaba un documento .txt con los valores longitud, incremento de longitud, deformación y estimaciones de fuerza y tensión para cada imagen de cada instante capturado.

Para aprovechar este software se colocaban galgas imaginarias tanto verticales como horizontales de un tamaño algo mayor de la tercera parte de la dimensión de la probeta en esa dirección.

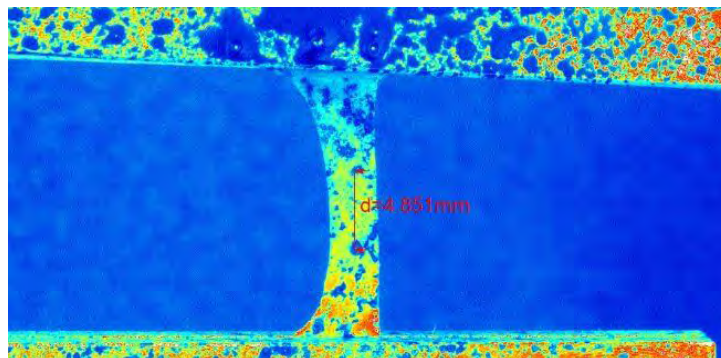


Figura 2.11. Galga colocada en DaVis

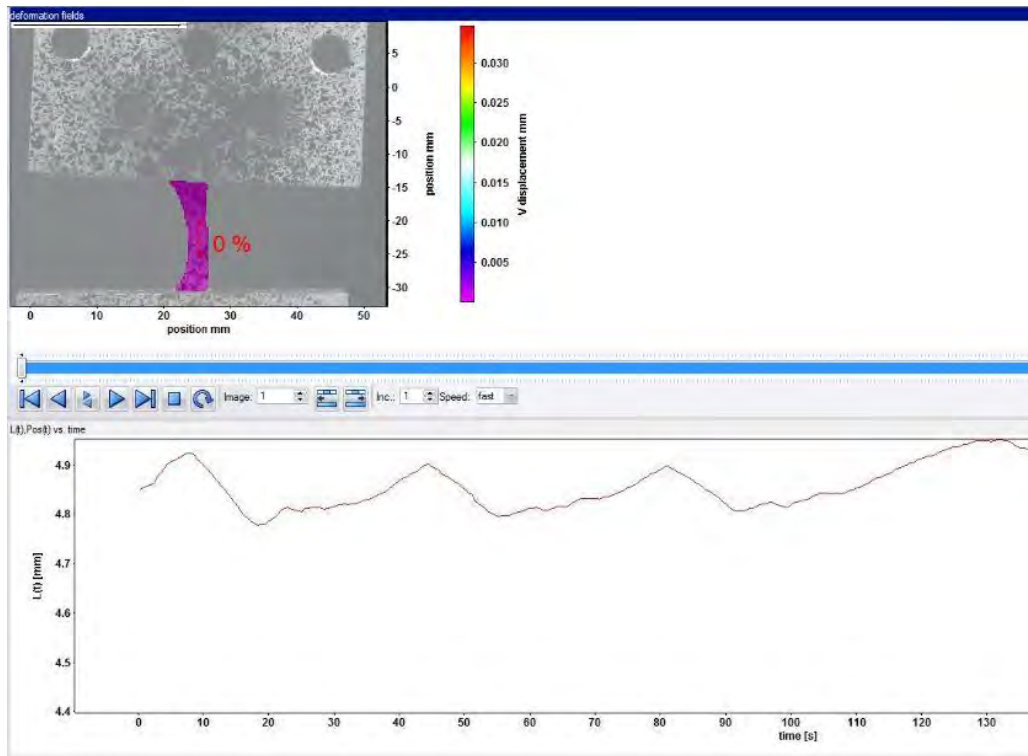


Figura 2.12. Curva mostrada por DaVis durante el seguimiento de una galga

Los datos recogidos de la galga vertical permitían un mejor ajuste, ya que se obtiene una curva deformación-tiempo distinta que se podía combinar con los valores tiempo-tensión obtenidos a través de Instron y de este modo disponer de una segunda curva tensión-deformación.

Los datos recogidos por la galga horizontal simplemente interesaban para enfrentarlos con los sacados por la galga vertical y de esta manera poder aproximar el coeficiente de Poisson.

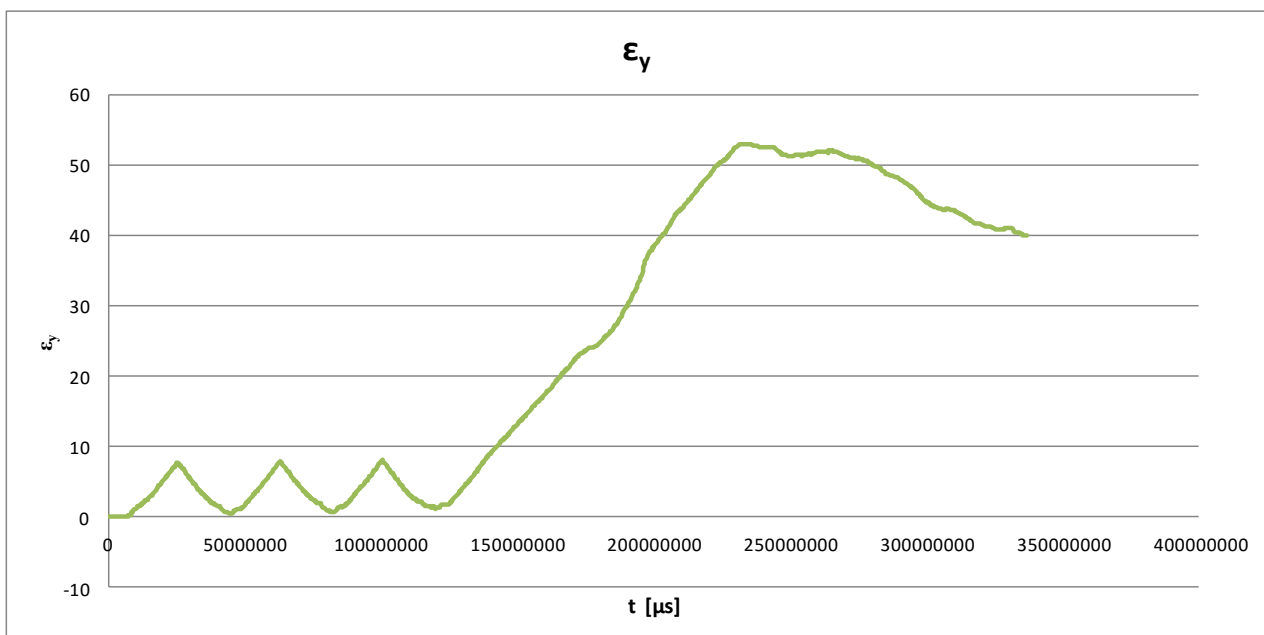


Figura 2.13. Gráfica deformación-tiempo correspondiente a la galga vertical de la probeta FA34414_L1

Además de la posibilidad de la colocación de galgas, DaVis también permitía post-procesar las imágenes generando vídeos del transcurso del ensayo con un mapa de deformaciones en cada momento sobre la probeta (figura 2.14).

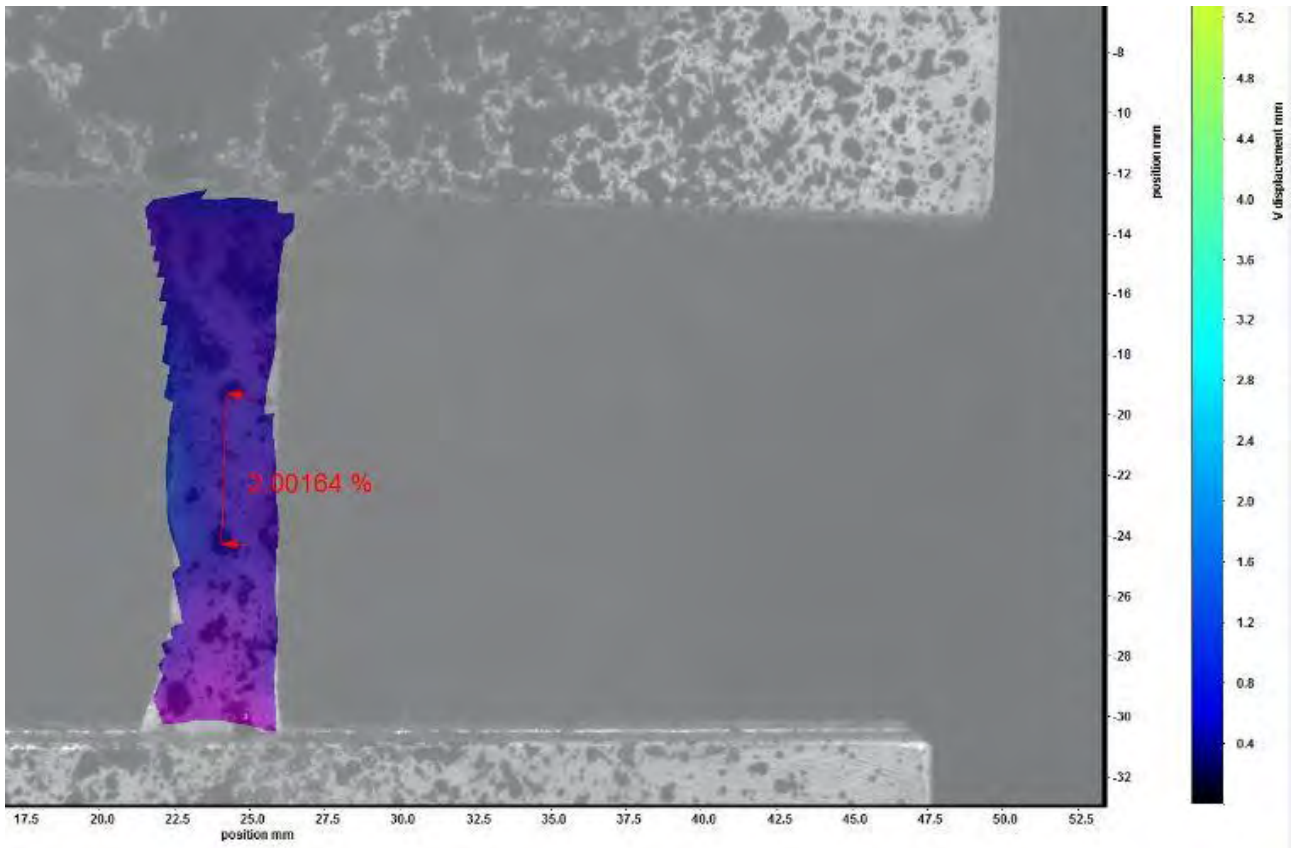


Figura 2.14. Captura del campo de deformaciones en un instante del ensayo de F35814_T1

3 Análisis mediante MEF

3.1 Introducción

Además de la obtención de las propiedades medias de la fascia se ha analizado en profundidad el comportamiento de dos, en concreto para las muestras FA34414 y FA35814. Estos modelos los introduciremos en un programa basado en elementos finitos para poder comprobar su validez.

Existen numerosos programas comerciales basados en el uso de elementos finitos. Para la realización de este proyecto se va a utilizar el programa Abaqus [9].

Para poder importar los contornos exactos de cada probeta se utilizarán dos programas: Inkscape, un editor de gráficos vectoriales de código abierto [10]; y DraftSight, que nos permite crear y modificar distintos archivos de CAD [11].

3.2 Obtención de los contornos reales

Al de tratarse de probetas de un tamaño muy reducido y siendo que la fascia es muy difícil de manejar, cada probeta comenzaba el ensayo con una distancia distinta entre mordazas. También nos encontrábamos con pequeñas variaciones entre los tamaños de las probetas del mismo tipo que no se podían despreciar.

Por este motivo, se consideró que la forma más precisa de introducir la geometría en Abaqus era importando las curvas del contorno exacto de cada probeta.

El primer paso para la obtención de los contornos era identificar las imágenes de los instantes correspondientes al inicio y final de las curvas elásticas ajustadas. Se trata de un paso realmente importante ya que el modelo de comportamiento que se va introducir en Abaqus ha sido elaborado en función de dichas curvas.

Teniendo identificadas las imágenes adecuadas se han importado a Inkscape y se ha realizado una curva Beziér del contorno. Este programa nos permite exportar las curvas como archivos .dxf, por lo que se pudieron abrir con DraftSight y escalarlas para que sus dimensiones correspondiesen con las reales.

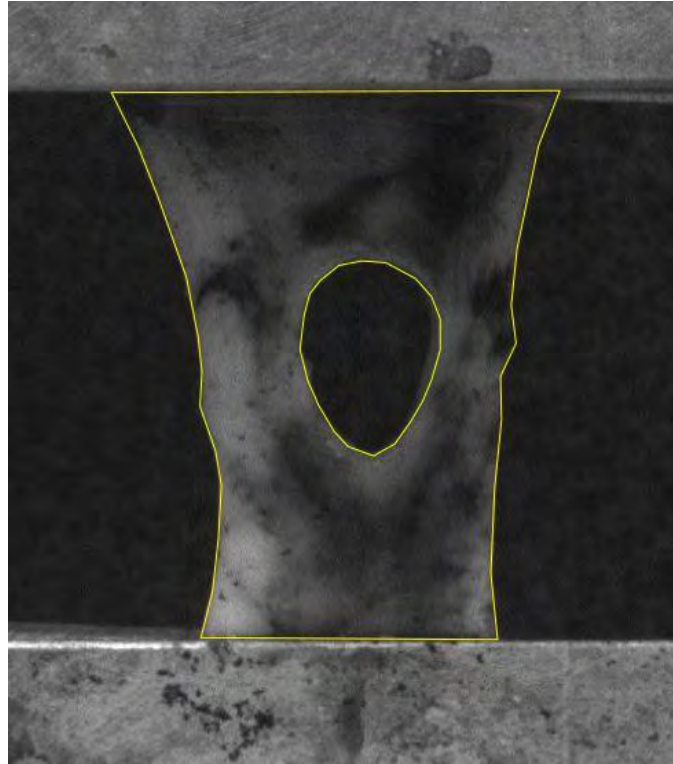


Figura 3.1. Contorno (en tono verde) dibujado para FA34414_L2

3.3 Caracterización de la fascia

Como ya se ha comentado previamente, se ha realizado un modelo de comportamiento para poder simular los ensayos y comparar los resultados obtenidos.

Para reproducir fielmente el comportamiento de la fascia, se ha empleado un comportamiento hiperelástico anisótropo asociado a cada una de las familias de fibras comentadas anteriormente. Para un material hiperelástico su comportamiento se define mediante la función energía de formación (), a partir de la cual se puede obtener la tensión como derivada de esta función con respecto de la deformación.

Para la fascia se propone la siguiente función:

$$= \mu(I_1 - 3) + \sum_{i=l,t} \phi_i \quad i$$

Donde $\mu=2G$ es la constante Neo-Hookeana, I_1 el primer invariante de la deformación, ϕ_i la proporción de fibras en cada una de las direcciones (longitudinal y transversal) tal que $\phi_l + \phi_t = 1$ y i la energía de deformación asociada a las fibras de colágeno y que vendrá dada por una función a trozos

$$\begin{aligned} i &= 0 & \lambda < 1 \\ i &= \frac{C_3}{C_4} (e^{C_4(\lambda-1)} - C_4(\lambda-1)) & \lambda < \lambda^* \\ i &= C_5\lambda + C_6 \ln(\lambda^2) + C_7 & \lambda > \lambda^* \end{aligned}$$

Donde se considera que las fibras no trabajan a compresión, λ^* es el alargamiento a partir del cual la curva es lineal y las constantes C_5 , C_6 y C_7 vienen determinadas para garantizar la continuidad de la energía, la tensión y la rigidez del material.

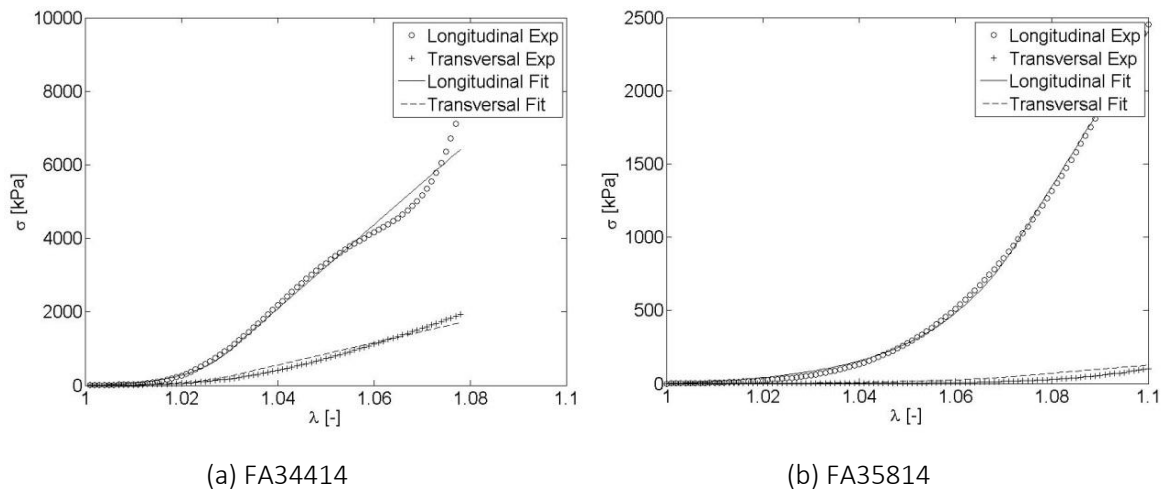


Figura 3.2. Curvas de ajuste de las muestras FA34414 y FA35814 para el modelo de material desarrollado

	FA34414	FA35814
C_1 (kPa)	5	5
C_3 (kPa)	19.3972	12.4689
C_4	55.8489	23.7009
φ_L	0.7901	0.9711
φ_T	0.2099	0.0289

Figura 3.3. Tabla con los valores de las constantes para ambos modelos

3.4 Introducción del modelo en Abaqus

El primer paso para el modelado es la definición de su geometría. Como se ha explicado previamente, en este caso se procederá a la importación de los archivos .dxf con los contornos exactos de cada probeta. Una vez importado, se ha extruido para darle el espesor correspondiente a la muestra.

Al ser la fascia un material no estándar, del que hemos tenido que definir un modelo de comportamiento nuevo, la generación del material no va a ser la habitual. Se ha creado un material de usuario introduciendo las 24 variables que forman parte del modelo desarrollado y se han utilizado subrutinas para programar su comportamiento y lanzar el cálculo. La subrutina ha sido programada por uno de los directores por quedar fuera del alcance del proyecto.

Las condiciones de contorno que se han aplicado para simular el ensayo han sido las siguientes:

- Empotramiento en la superficie inferior de la probeta (mordaza fija)
- Desplazamiento en la superficie superior (mordaza móvil).

- Imposibilidad de movimiento en la parte superior excepto en la dirección vertical, ya que la mordaza superior al ser neumática solo se permitía desplazar y mover en dirección vertical.

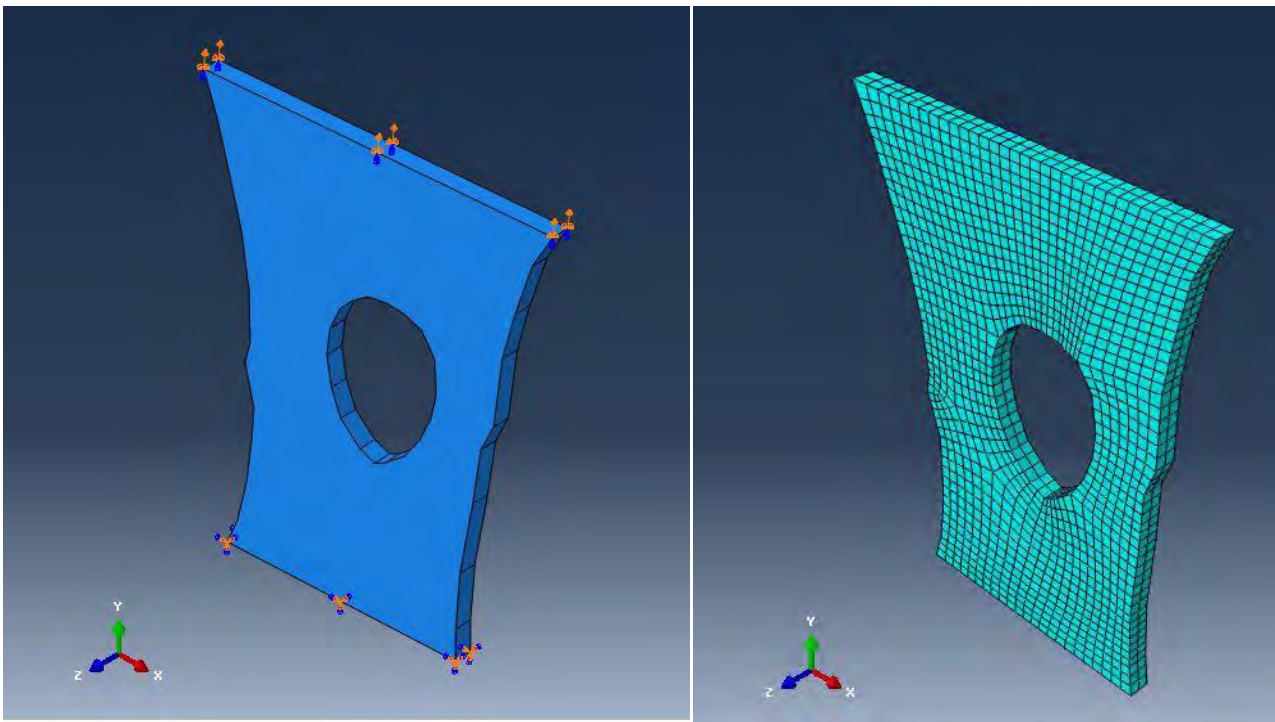


Figura 3.4. Condiciones de contorno y mallado en la probeta FA34414_L2

Para la aplicación de dicho desplazamiento no ha sido necesario introducir la velocidad de desplazamiento de los ensayos, ya que al tratarse de un comportamiento elástico, la velocidad no influye en los resultados finales de tensiones y deformaciones.

Para el mallado se ha utilizado el tipo de elemento C3D8H, correspondiente hexaedros formados por 8 nodos. Se ha cuidado siempre que al menos hubiera dos elementos en el espesor de la probeta y se ha intentado buscar una malla lo más simétrica posible para que el eje central de esta coincidiera con la dirección de la carga.

3.5 Comprobación del ajuste

Para comprobar que los modelos propuestos para las muestras FA34414 y FA35814 (correspondientes a una fascia profunda y una superficial) pueden considerarse válidos se han introducido en Abaqus.

Una vez obtenido el resultado final de la simulación del ensayo se han exportado los valores de carga y extensión en cada instante del tiempo. Con estos valores se ha generado una curva y se ha graficado junto con la obtenida previamente a través de Instron. De esta manera se puede valorar si el ajuste es realmente bueno (figura 3.3).

Se podrían haber comparado valores de tensión y deformación, pero se ha descartado ya que se trata de datos transformados que pueden introducir un error, mientras que los datos del equipo son directamente medidas reales.

Además de la obtención de dichas gráficas también se ha procedido a la superposición de la deformada final de la simulación con la imagen final del ensayo (figura 3.4).

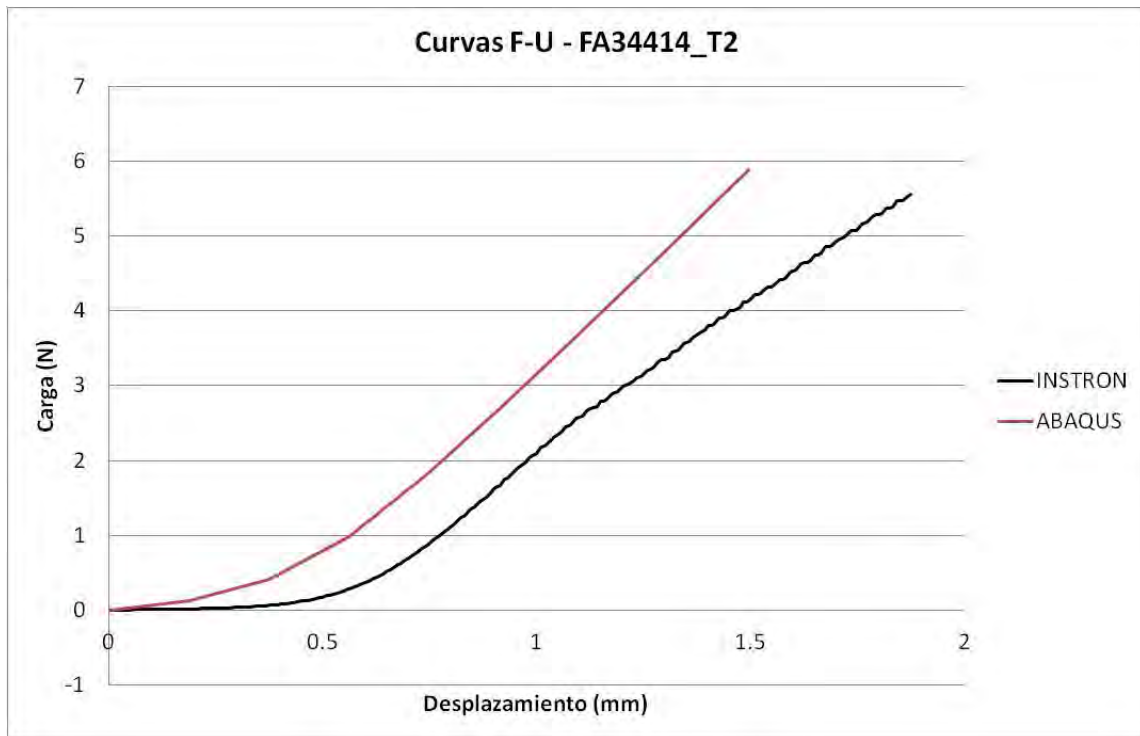


Figura 3.5. Curvas carga-desplazamiento de la probeta T2 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus

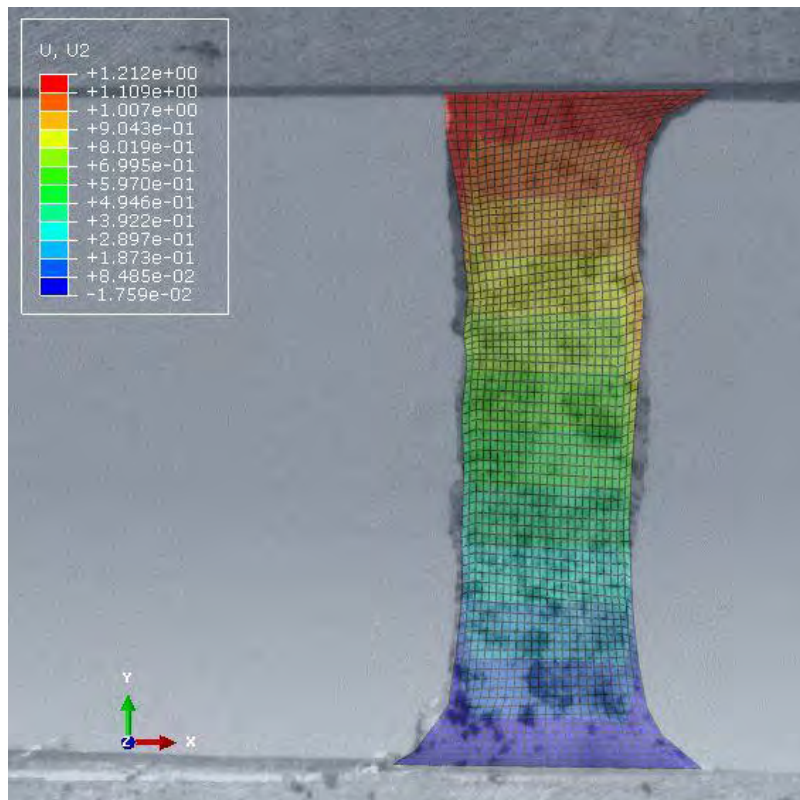


Figura 3.6. Deformada final de Abaqus con desplazamiento en "y" (en mm) sobre imagen final de LaVision

4 Conclusiones y líneas futuras

4.1 Conclusiones

El objetivo inicial del proyecto era ser capaces de elaborar y aplicar una metodología numérico-experimental que determinase las propiedades mecánicas de la fascia.

A pesar de la complejidad de este trabajo y las variaciones que pueden surgir entre distintas muestras y probetas se ha conseguido desarrollar dos modelos de comportamiento, uno para fascia profunda y otro para fascia superficial.

Si valoramos los resultados obtenidos comparando los resultados experimentales con los conseguidos en Abaqus al implementar dichos modelos, podemos observar que el modelo de fascia profunda (muestra FA34414) ajusta ligeramente mejor que el de fascia superficial (muestra FA35814).

El mayor error que se aprecia en la muestra FA35814 se debe a que esta muestra de fascia tenía una diferencia muy grande de fibras en sus direcciones preferentes de anisotropía, siendo aproximadamente de un 97% de estas en la dirección longitudinal y un 3% en la transversal. Esto ha hecho que sea más complicado desarrollar un modelo que ajuste bien los ensayos en ambas direcciones.

Como conclusión final y valorando el conjunto de las probetas de ambas muestras, se puede considerar el modelo como válido, especialmente en la muestra de fascia profunda, la cual tiene un ajuste aceptable. Es por esto que se puede afirmar que se ha cumplido con los objetivos marcados al inicio del trabajo.

4.2 Líneas futuras

Al valorar positivamente los resultados finales del estudio realizado se espera que pueda ser de utilidad para el futuro desarrollo y diseño de mallas protésicas.

Como líneas de continuación se valoran:

- Ajuste y comprobación del resto de muestras
- Completar el experimento hasta alcanzar 5 muestras de cada tipo (fascia profunda y superficial)
- Probar otros modelos de comportamiento para la fascia superficial
- Modelar el daño de la fascia

5 Bibliografía

- [1] P. Martins et al., «Mechanical characterization and constitutive modelling of the damage process in rectus sheath», *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 8, pp. 111-122, 2012
- [2] B. Calvo et al., «On modeling damage process in vaginal tissue», *Journal of Biomechanics*, vol. 42, pp. 642-651, March 2009
- [3] «Biomecánica», [En línea]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/Biomecanica>.
- [4] «Biomateriales e Ingeniería de los tejidos - Equipos de ensayo mecánico,» [En línea]. Available: <http://www.instron.com.es/wa/product/Mechanical-Testing-Equipment-for-Biomaterials-Tissue-Engineering.aspx>.
- [5] «Fascia», [En línea]. Available: <http://es.wikipedia.org/wiki/Fascia>
- [6] F.Q. Panchieri et al., «A constitutive description of the anisotropic response of the fascia lata», *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 30, pp. 306-323, 2014
- [7] Carolyn M. Eng et al., «Directional differences in the biaxial material properties of fascia lata and the implications for fascia functions», *Annals of Biomedical Engineering*, vol.42, pp. 1224-1237, June 2014
- [8] Hai-Qiang Wang et al., «Impact of leg lengthening on viscoelastic properties of deep fascia», *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2009
- [9] Simulia, «Abaqus/CAE User's Manual»
- [10] «Inkscape», [En línea]. Available: <https://inkscape.org/es/acerca-de/de-un-vistazo/>
- [11] Dassault Systemes, «Getting Started with DraftSight»

Anexos

Anexo A Listado de muestras y probetas

A.1 FA30514

- L1: Descartada por error en el ensayo
- T1
- L2
- T2
- SS1

A.2 FA34114

- L1
- T1
- L2
- T2
- SS1: Descartada por error en el ensayo
- SS2: Descartada por error en el ensayo

A.3 FA34414

- L1
- T1
- L2
- T2
- SS1
- SS2
- SS3: mismo tipo de probeta que la SS2

A.4 FA35814

- L1
- T1
- L2
- T2
- SS1
- SS2

A.5 FA36314

- L1
- T1
- L2
- T2
- SS1: Descartada por error en el ensayo
- SS2: Descartada por error en el ensayo

A.6 FA37014

- L1
- T1
- L2
- T2
- SS1
- SS2

Anexo B Resultados de los ensayos experimentales

En los siguientes apartados se va a mostrar la tensión media obtenida versus deformación clasificando según tipo de probeta y tipo de fascia. Dichas gráficas son las que se han utilizado para caracterizar la fascia.

B.1 Fascia profunda

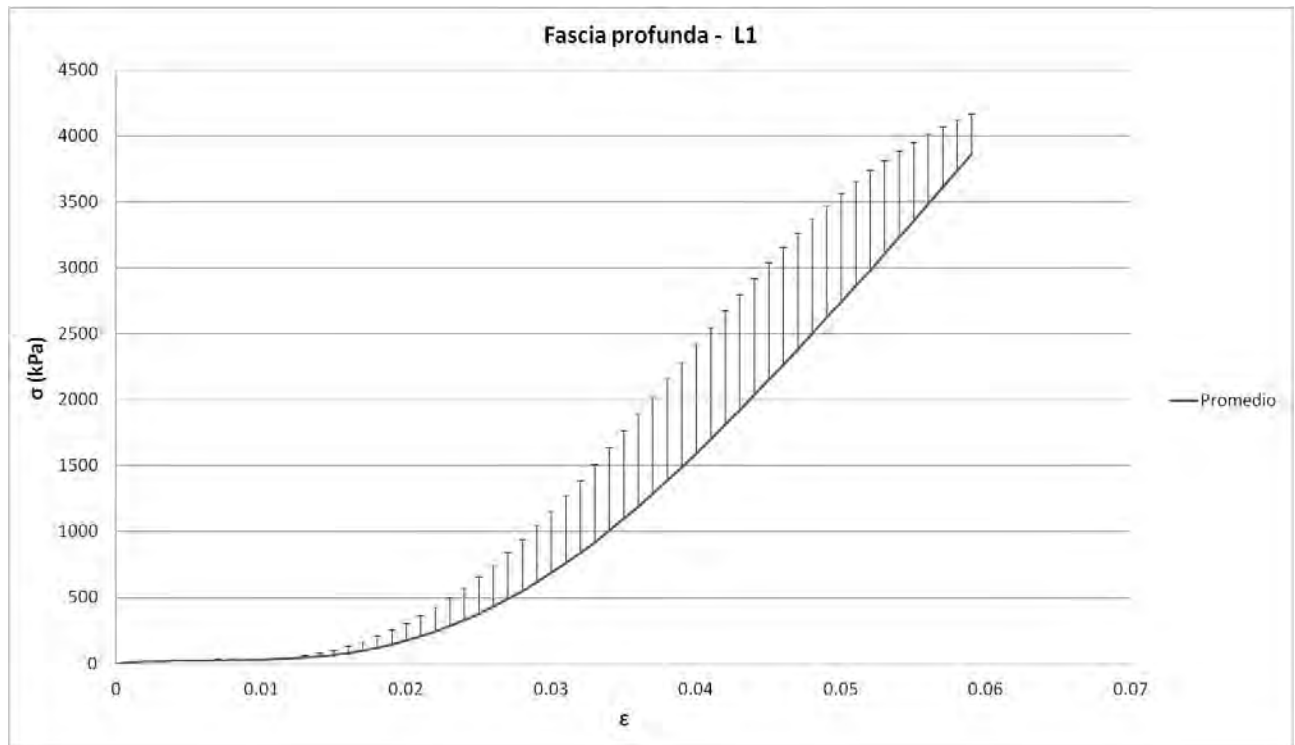


Figura B.1. Media y desviación para todas las probetas tipo L1 de fascia profunda

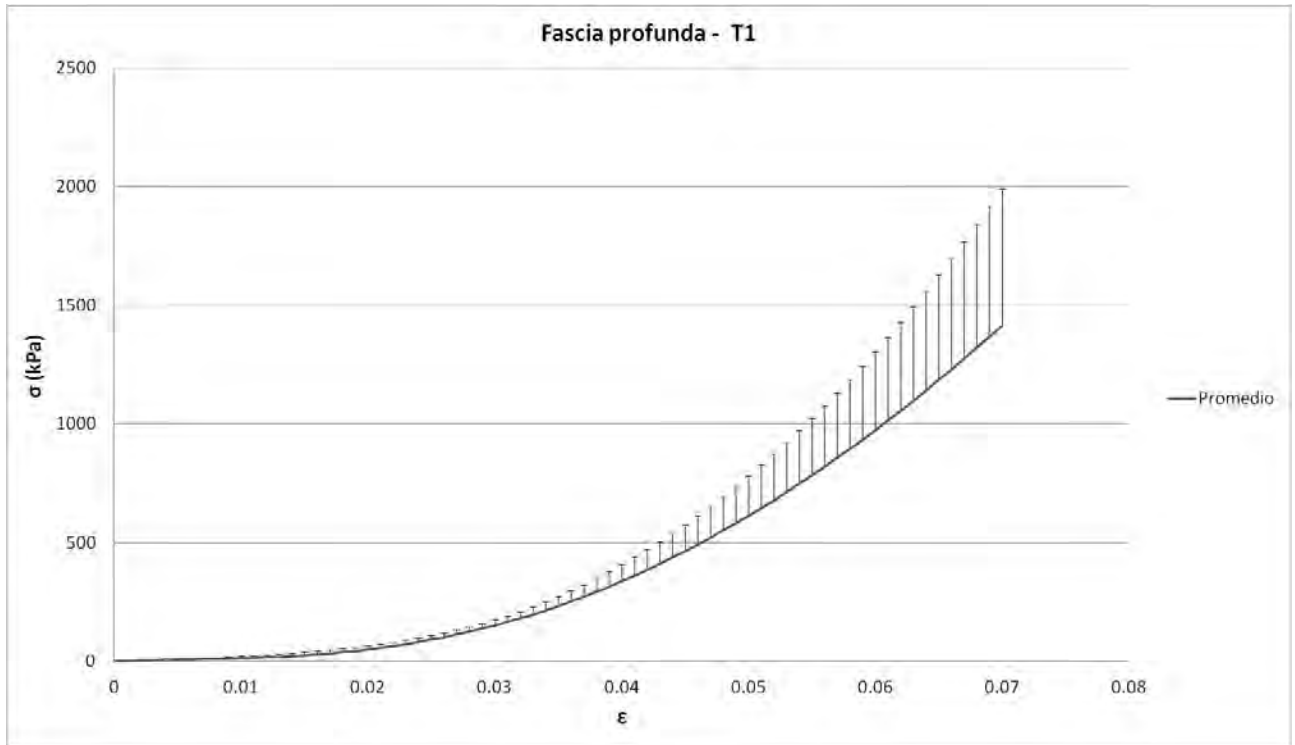


Figura B.1. Media y desviación para todas las probetas tipo T1 de fascia profunda

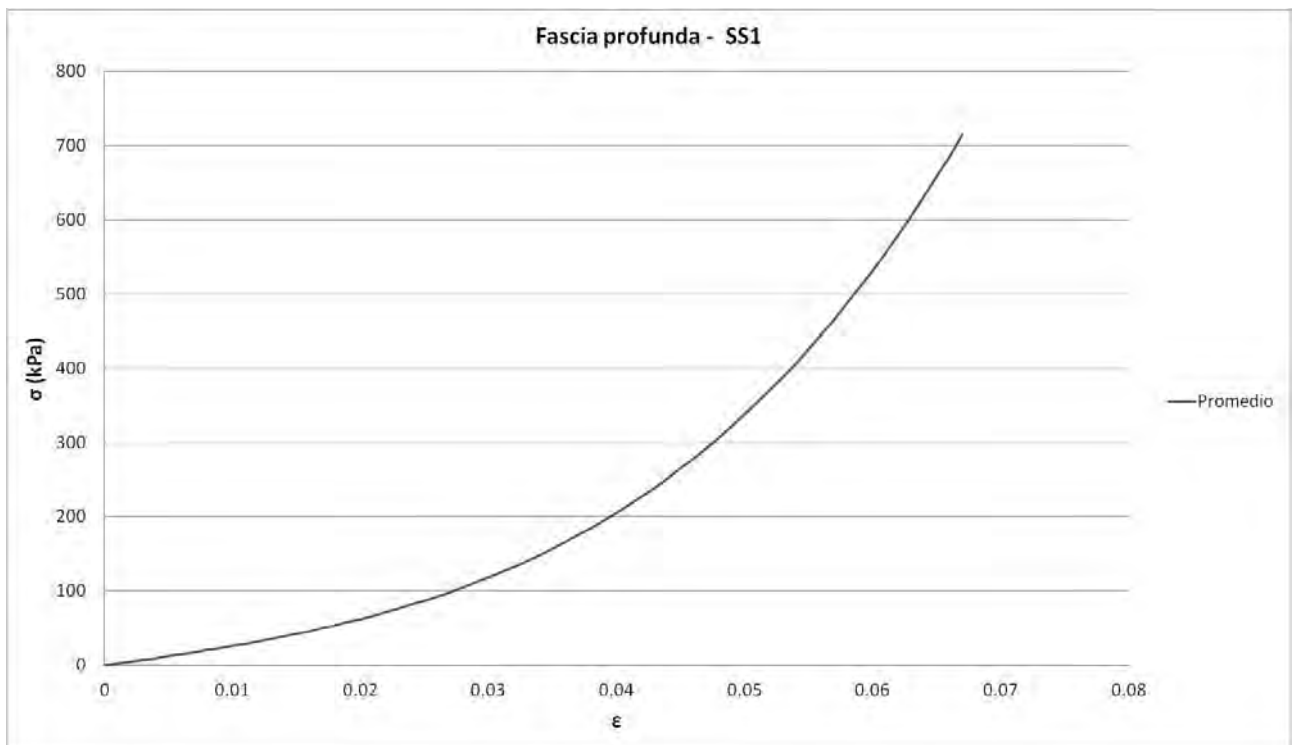


Figura B.2. Media y desviación para todas las probetas tipo SS1 de fascia profunda

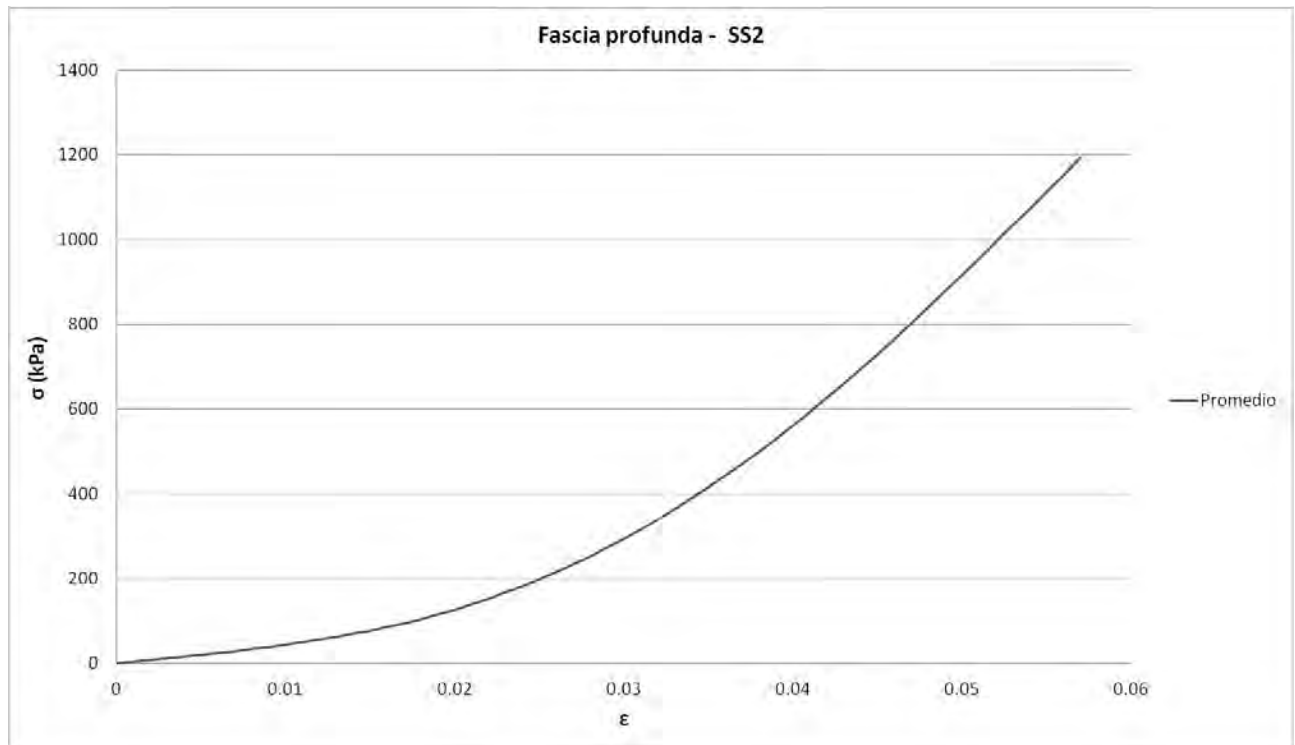


Figura B.3. *Media y desviación para todas las probetas tipo SS2 de fascia profunda*

Lamentablemente para fascia profunda sólo se ha dispuesto finalmente de una muestra tipo SS en cada dirección, ya que como se expone previamente en el Anexo A se tuvieron que descartar las probetas tipo SS de dos muestras por fallos en el ensayo.

Por otro lado, se observa que las probetas L1 y T1 han tenido muy poca desviación, se ha obtenido resultados muy similares para todas ellas.

También es evidente la mayor rigidez de las probetas que tienen las fibras longitudinales orientadas en la dirección del ensayo frente a las que las tienen en la dirección transversal. Es decir, como era de esperar, se obtiene mayor rigidez en las probetas L1 y SS2 frente a las T1 y SS1 respectivamente.

B.2 Fascia superficial

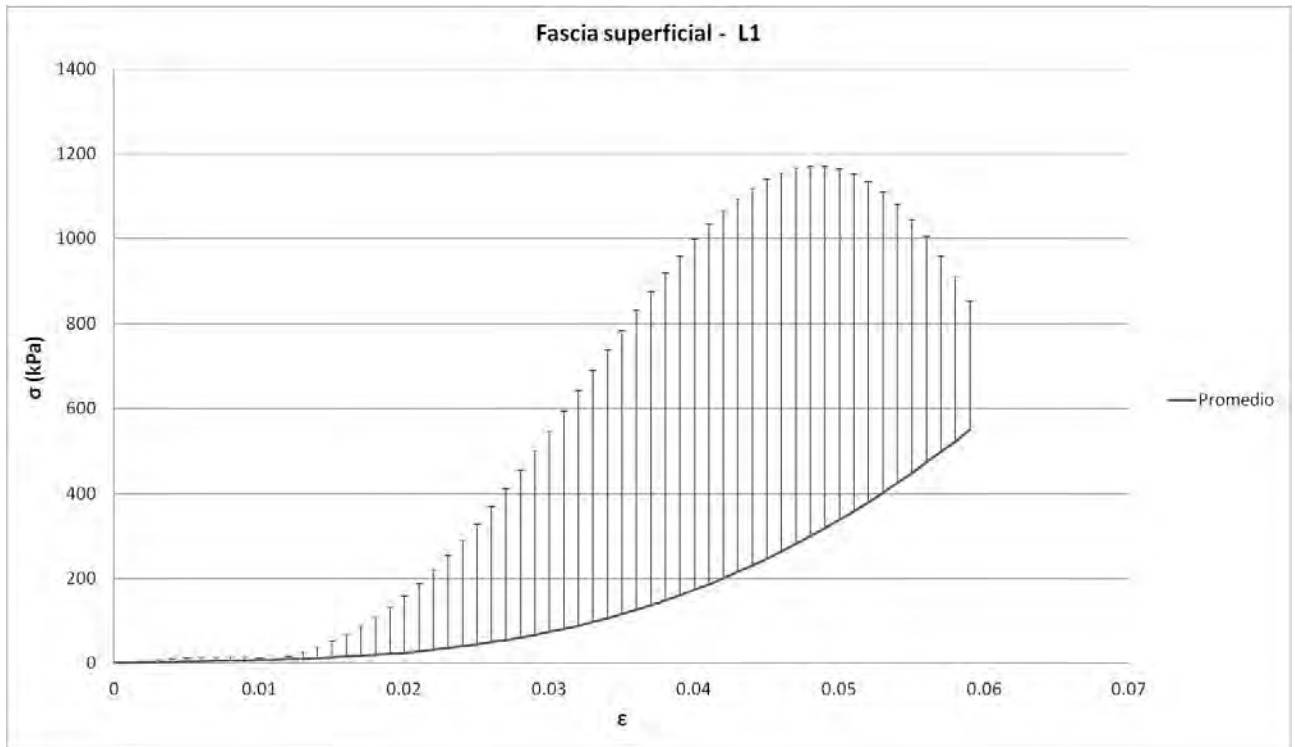


Figura B.4. Media y desviación para todas las probetas tipo L1 de fascia superficial

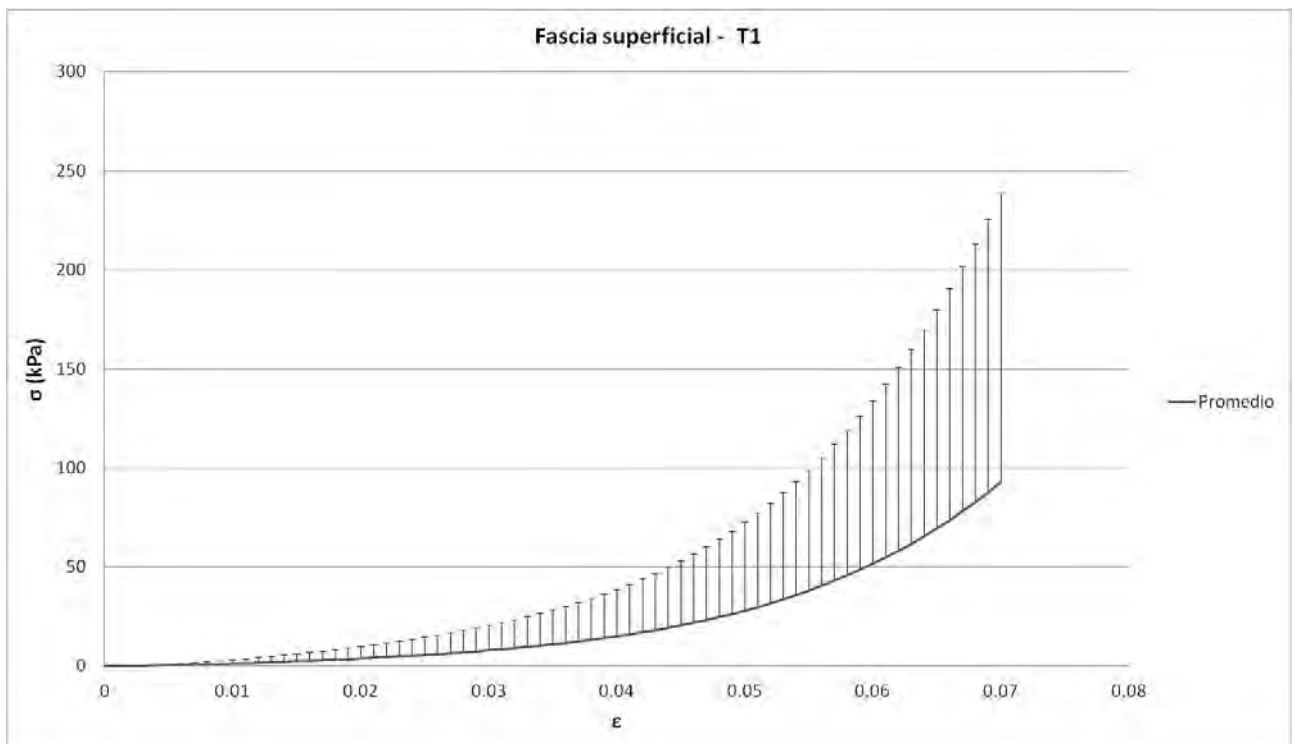


Figura B.5. Media y desviación para todas las probetas tipo T1 de fascia superficial

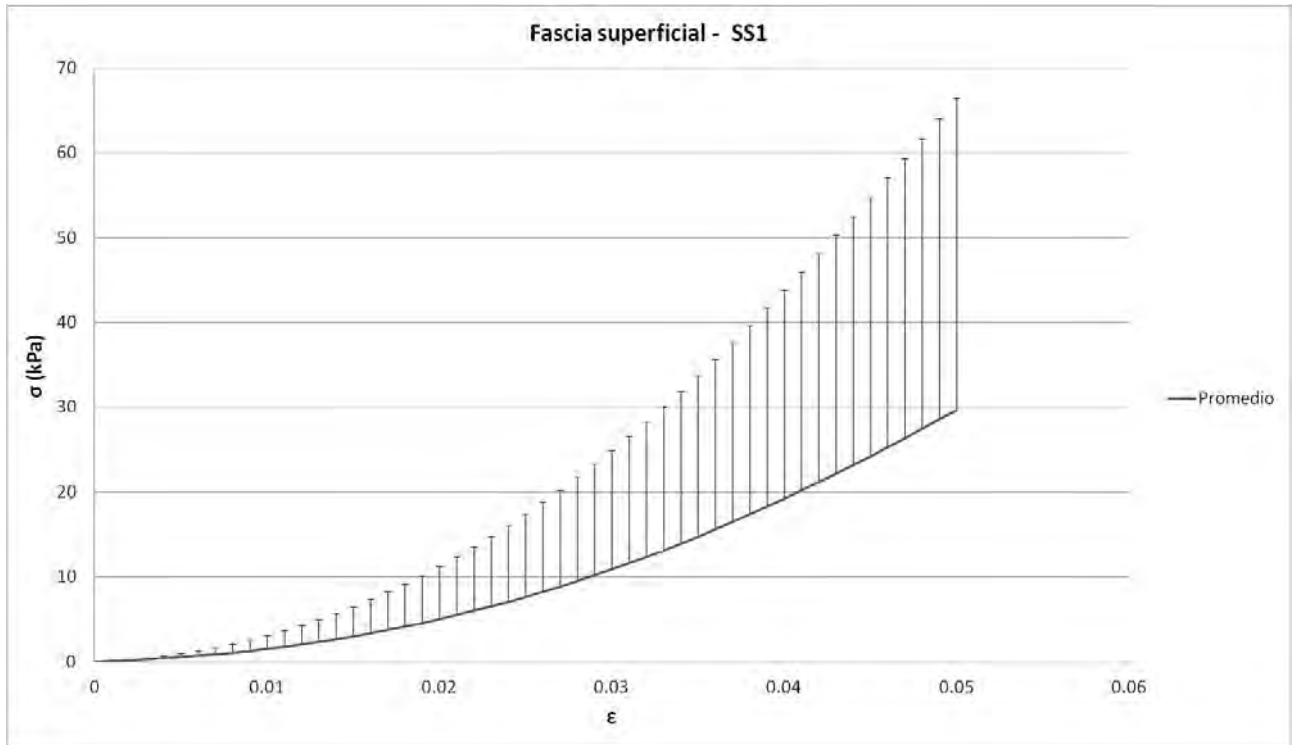


Figura B.6. Media y desviación para todas las probetas tipo SS1 de fascia superficial

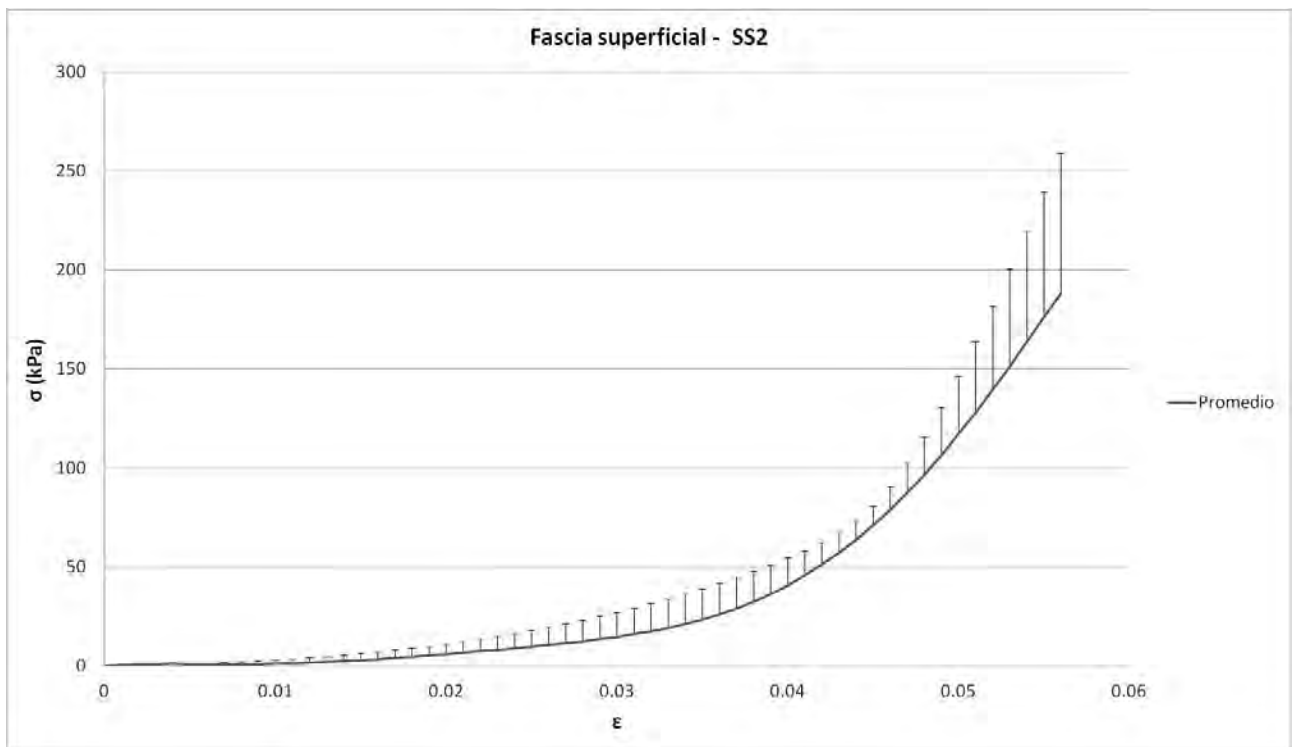


Figura B.7. Media y desviación para todas las probetas tipo SS2 de fascia superficial

Para las muestras de fascia superficial las desviaciones obtenidas han sido un poco mayores. Si se observa gran diferencia para la probeta T1 en la que es notablemente mayor. Por otro lado, en el caso de la probeta SS2 sí se han obtenido resultados muy similares en todas las probetas.

Como en el caso de las fascia profunda, podemos ver claramente como las probetas que tienen las fibras longitudinales orientadas en la dirección del ensayo muestran mayor rigidez que las otras.

Si se comparan los resultados medios obtenidos para ambos tipos de fascia muscular se confirma que, como era de esperar, la fascia profunda presenta mucha mayor rigidez en todas las probetas y direcciones de ensayo.

Anexo C Comprobación del modelo de comportamiento

En este anexo se van a recoger todas las figuras correspondientes las gráficas de curvas carga-desplazamiento de todas las probetas. Como se ha explicado previamente estas curvas se han obtenido por dos medios diferentes: simulación en Abaqus y a través de los datos recogidos por Instron.

También se van a incluir en este anexo todas las deformadas finales de la simulación por Abaqus superpuestas con las imágenes finales de los ensayos reales. Como se ha expuesto anteriormente, las cámaras de LaVision nos permiten disponer de las imágenes en cada momento del ensayo, por lo que una vez identificada la imagen correspondiente al final de la zona de la curva estudiada podemos compararla con la de Abaqus.

C.1 Muestra FA34414 (fascia profunda)

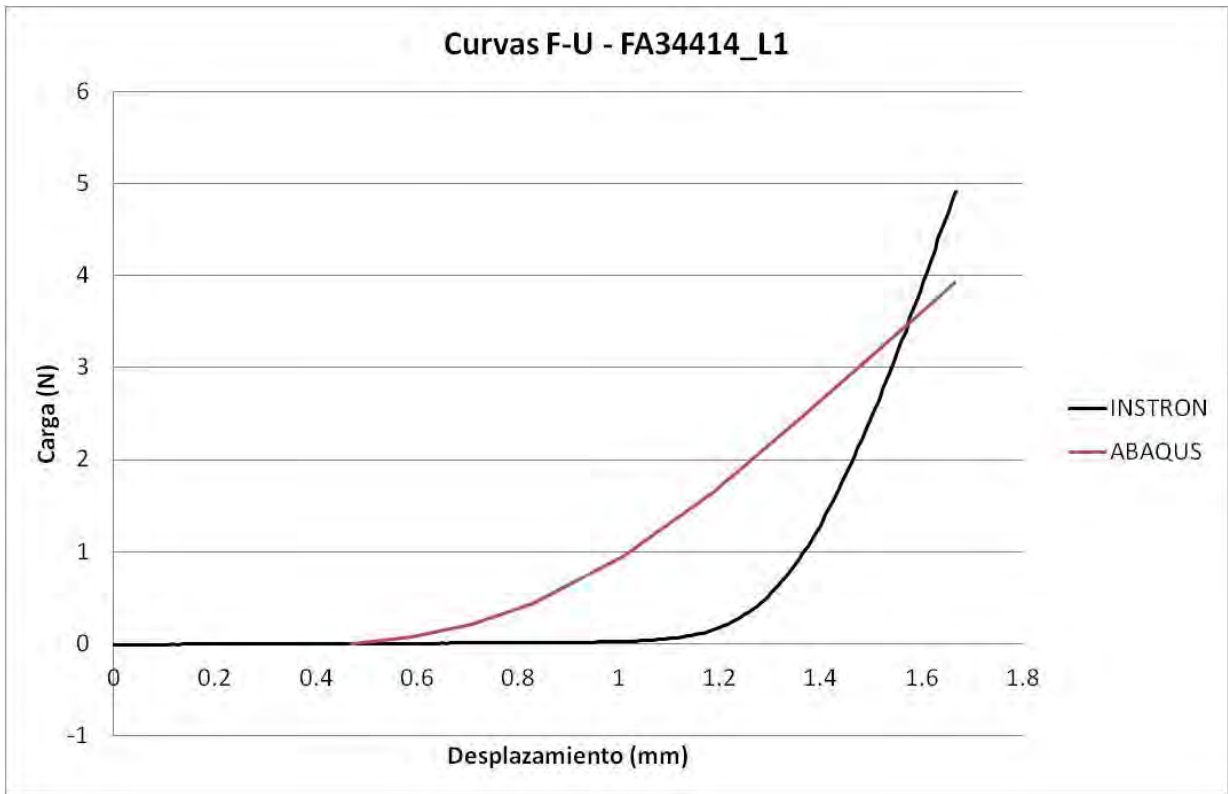


Figura C.1. Curvas carga-desplazamiento de la probeta L1 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus

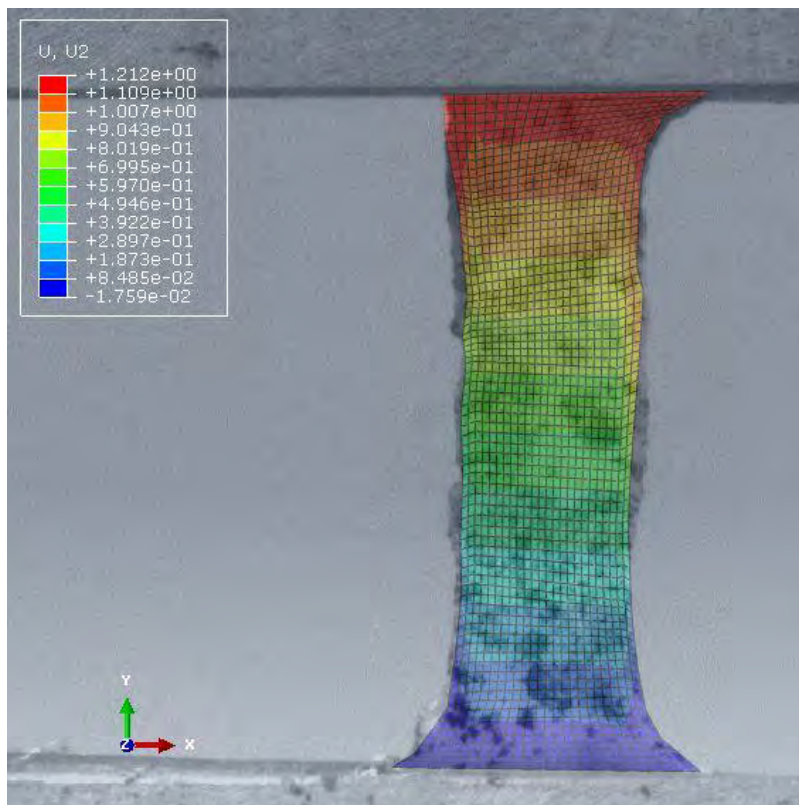


Figura C.2. Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA34414_L1)

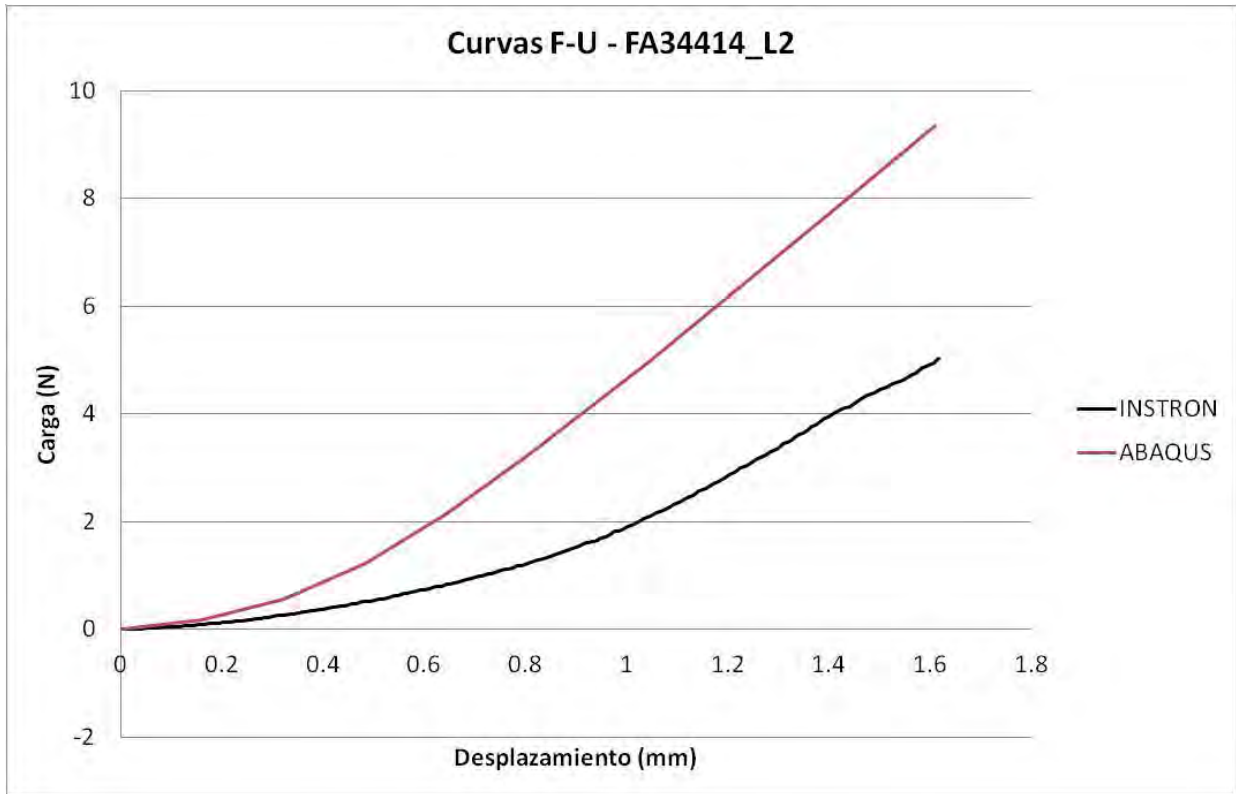


Figura C.3. Curvas carga-desplazamiento de la probeta L2 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus

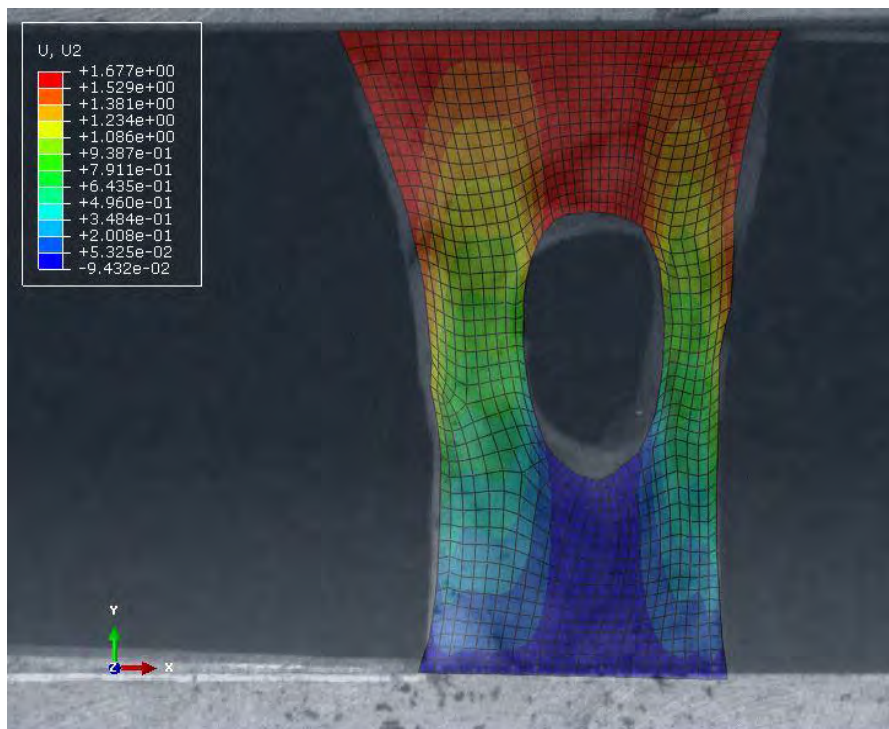


Figura C.4. Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA34414_T1)

Como se puede observar en las curvas carga-desplazamiento el ajuste obtenido para las probetas L1 y L2 de esta muestra no es tan bueno como el que se verá a continuación para las probetas SS1, SS2, SS3, T1 y T2.

Por otro lado, la imagen que muestra la comparación de las deformadas finales de ambas probetas sí que evidencia que el comportamiento en la dirección transversal se ajusta muy bien al que se ha visto en el ensayo real.

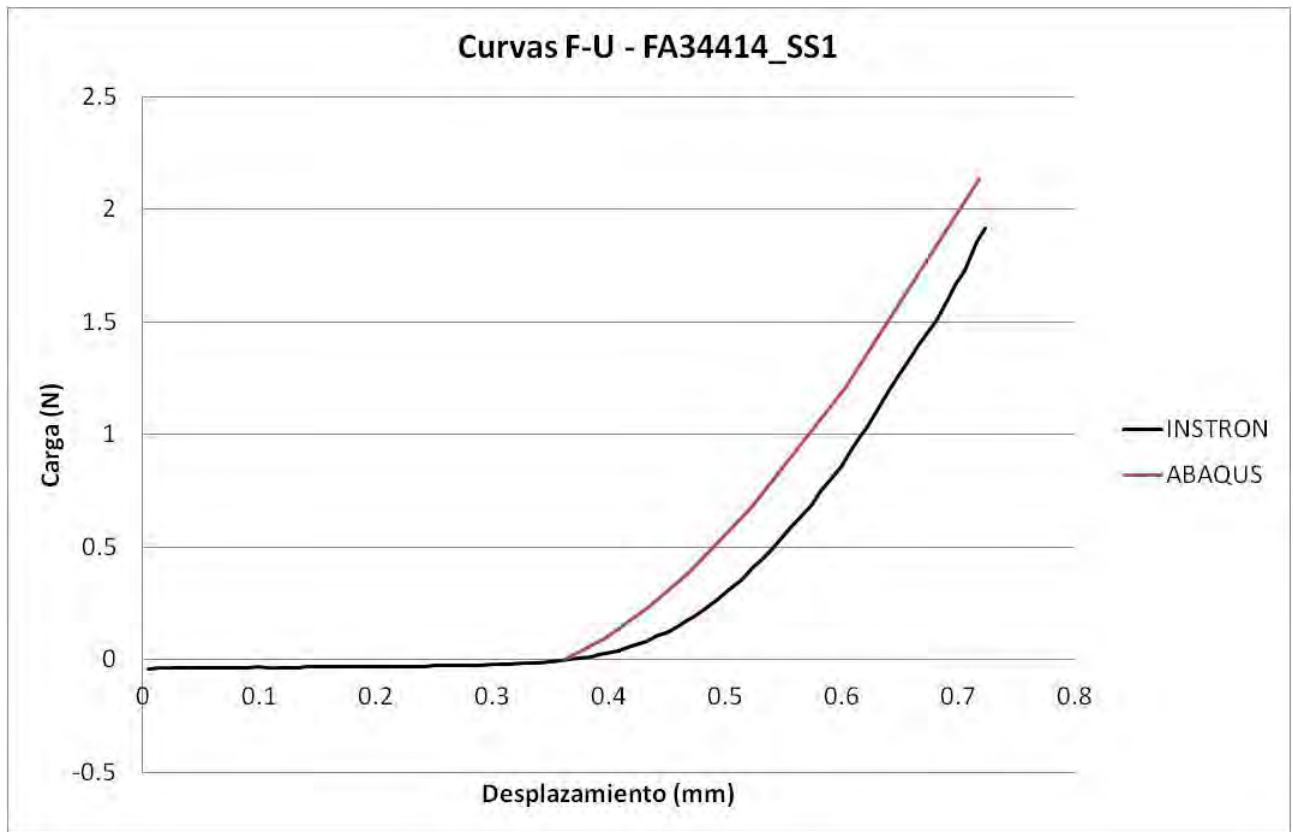


Figura C.5. Curvas carga-desplazamiento de la probeta SS1 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus

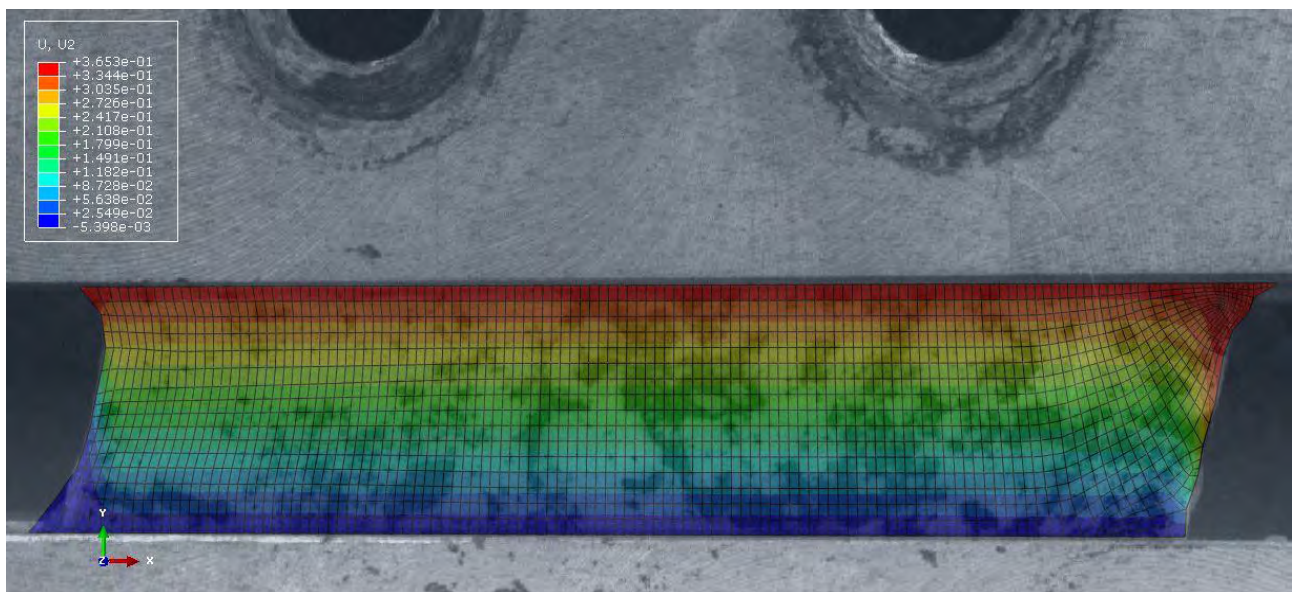


Figura C.6. Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA34414_SS1)

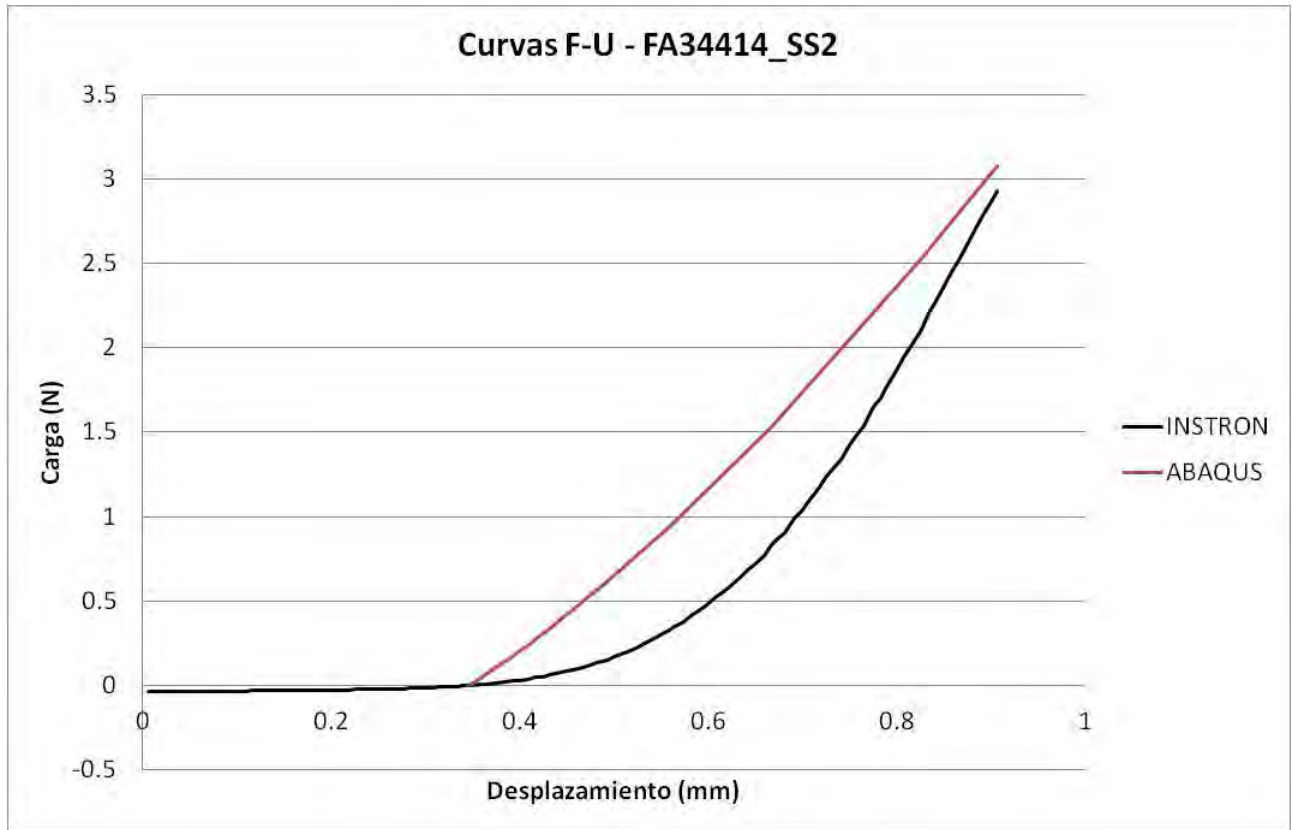


Figura C.7. Curvas carga-desplazamiento de la probeta SS2 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus

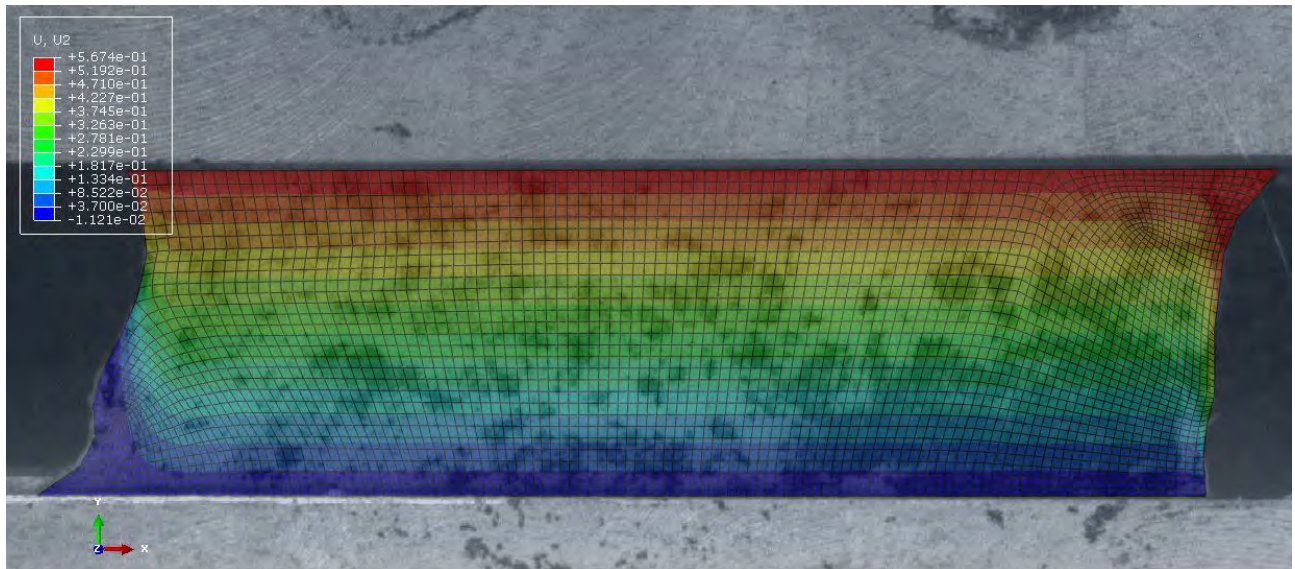


Figura C.8. Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA34414_SS2)

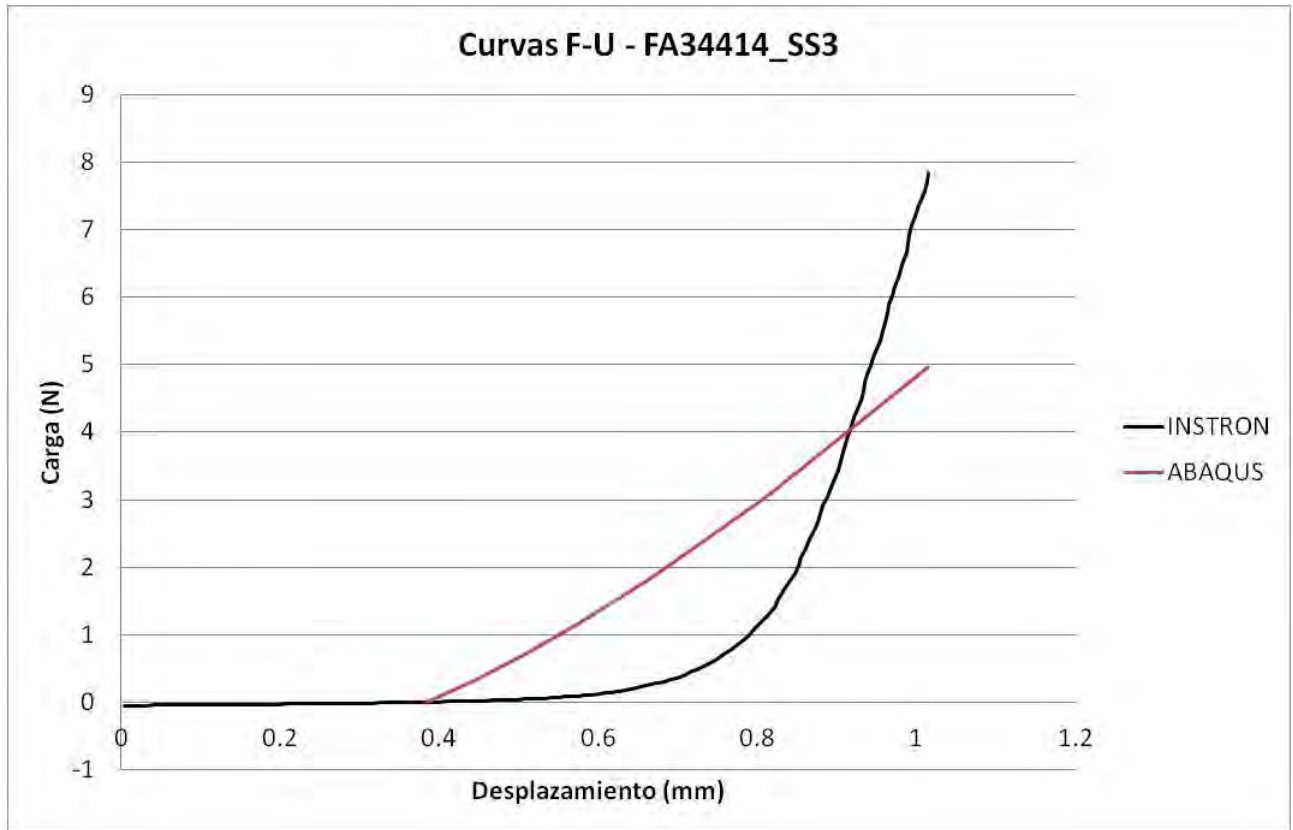


Figura C.9. Curvas carga-desplazamiento de la probeta SS3 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus

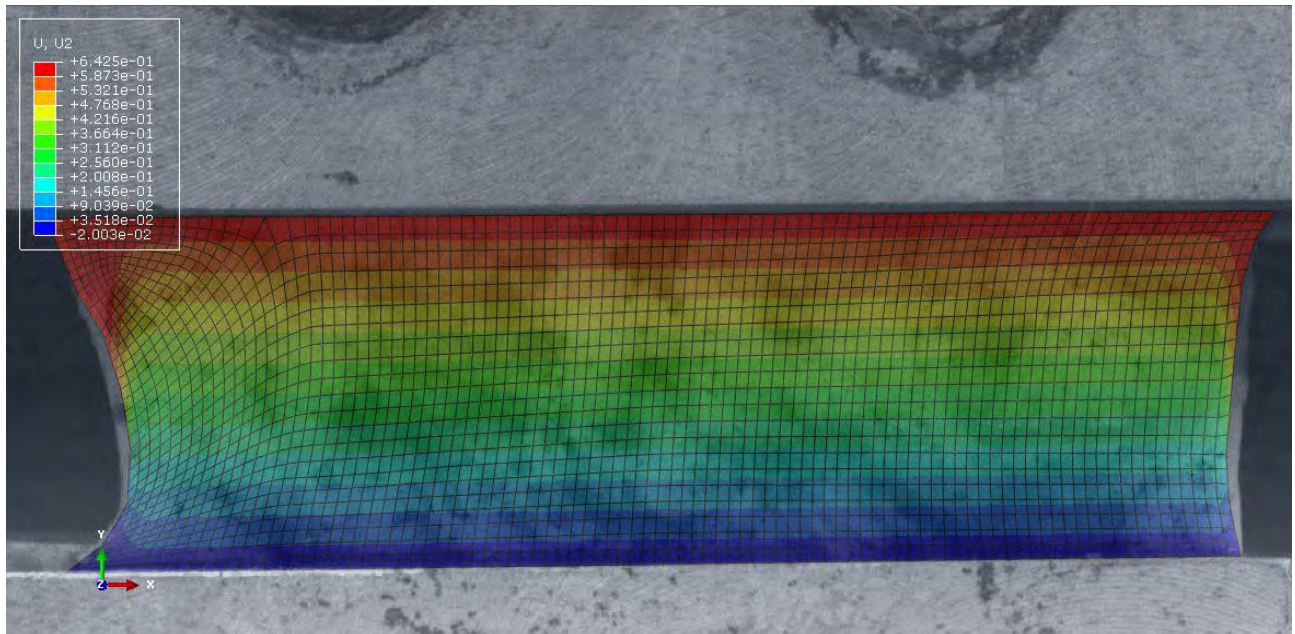


Figura C.10. Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA34414_SS3)

En el conjunto de las curvas SS se obtiene una aproximación muy buena en ambas comprobaciones, lo que refuerza la valoración del modelo como válido. La única de las 3 probetas que muestra un error un poco mayor es la SS3, probeta del mismo tipo que la SS2. También se puede destacar la alta precisión en la probeta SS1.

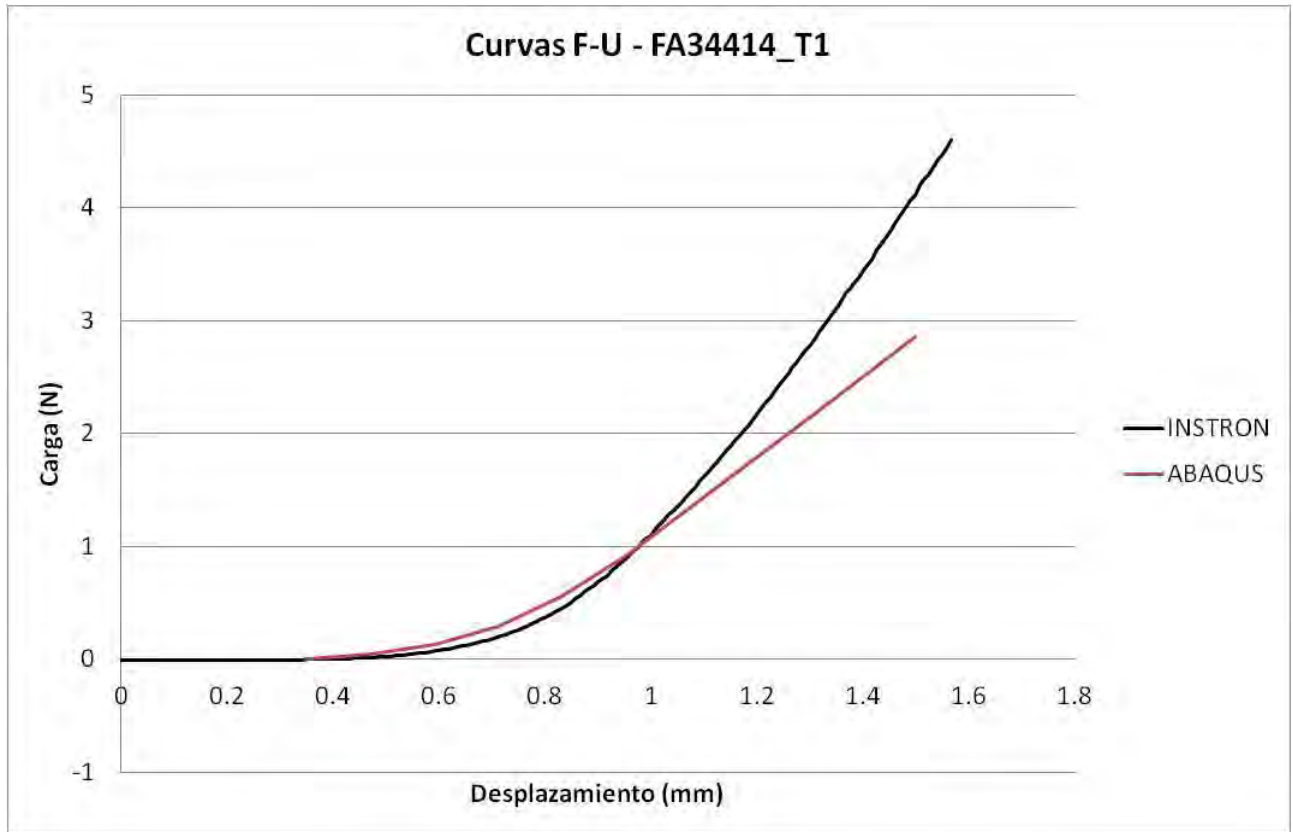


Figura C.11. Curvas carga-desplazamiento de la probeta T1 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus

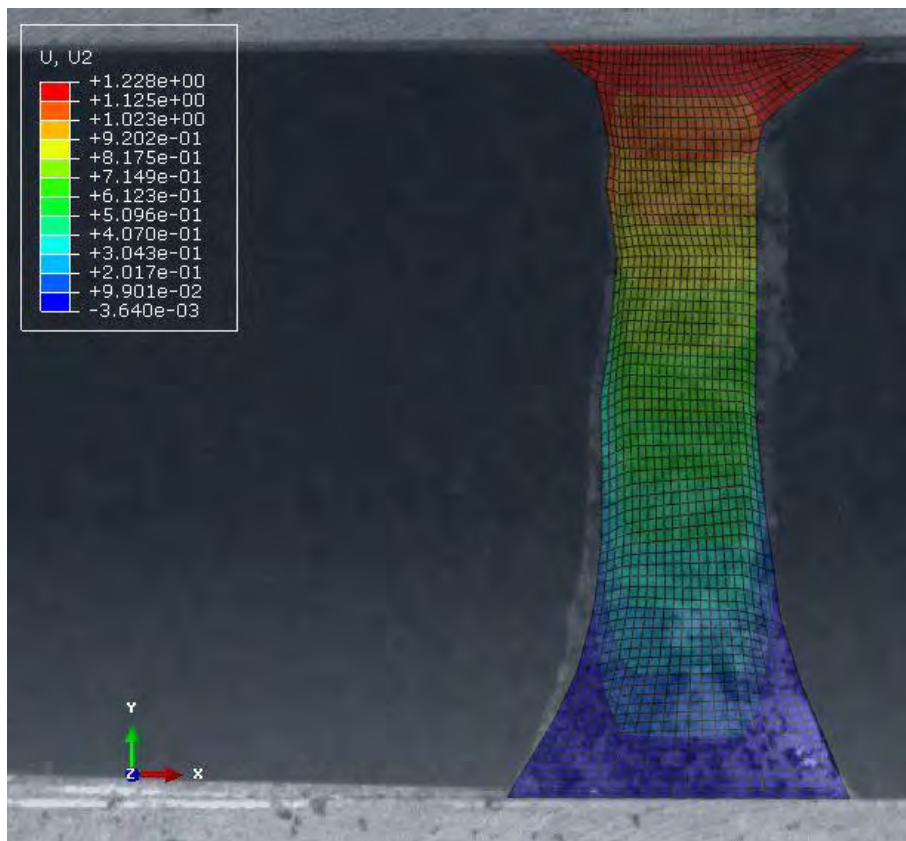


Figura C.12. Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA34414_T1)

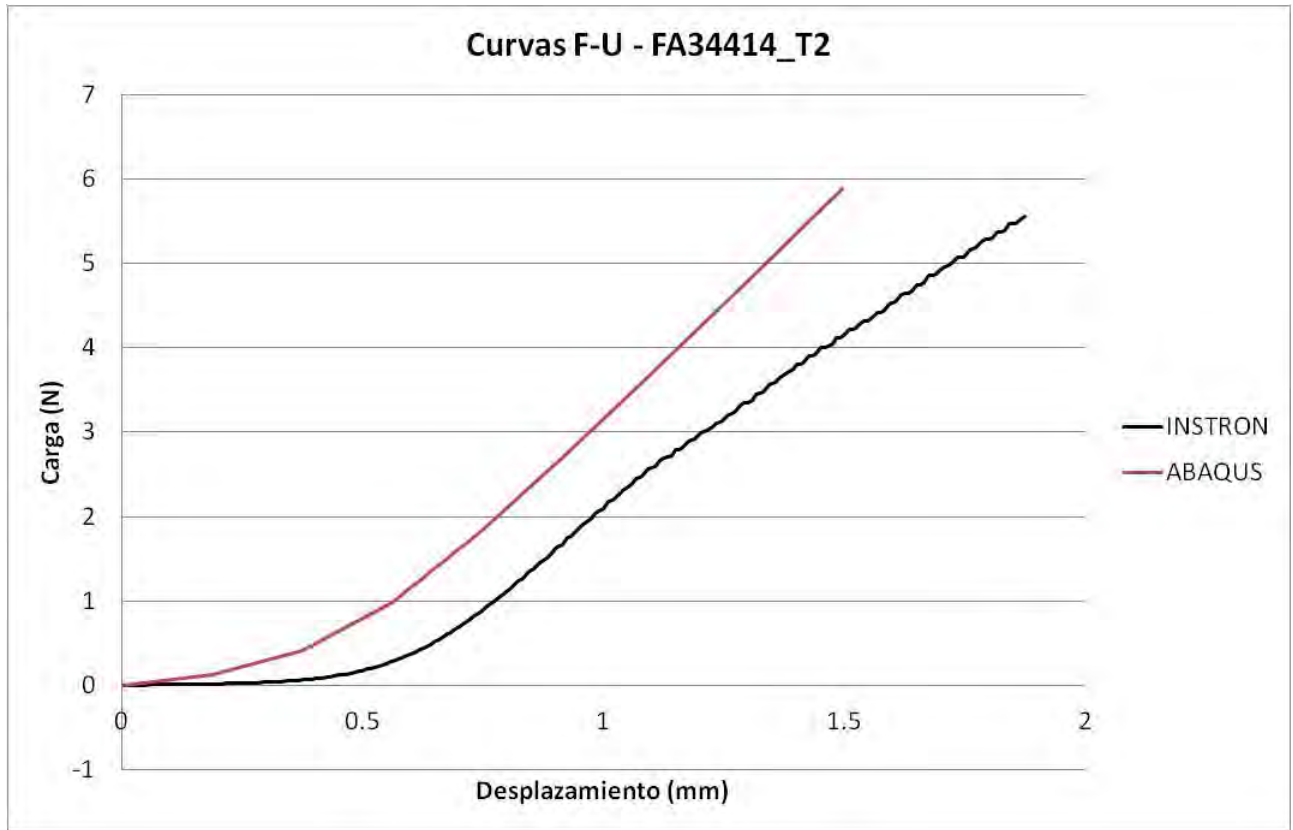


Figura C.13. Curvas carga-desplazamiento de la probeta T2 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus

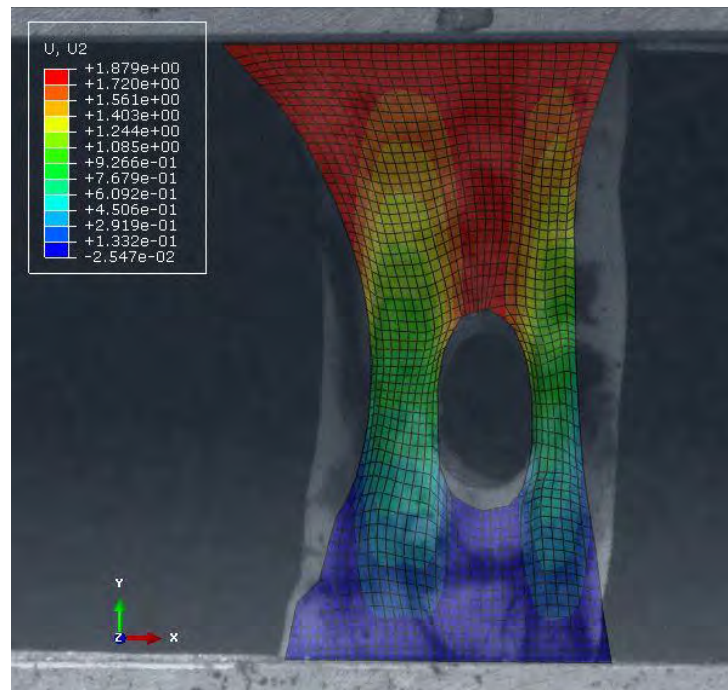


Figura C.14. Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA34414_T2)

Por último, en las probetas T1 y T2 se puede afirmar que el ajuste de las curvas es muy aproximado, tienen muy poco error. Por el contrario, si se observan las deformadas finales se comprueba que el comportamiento en la dirección transversal no se aproxima tanto.

C.2 Muestra FA35814 (fascia superficial)

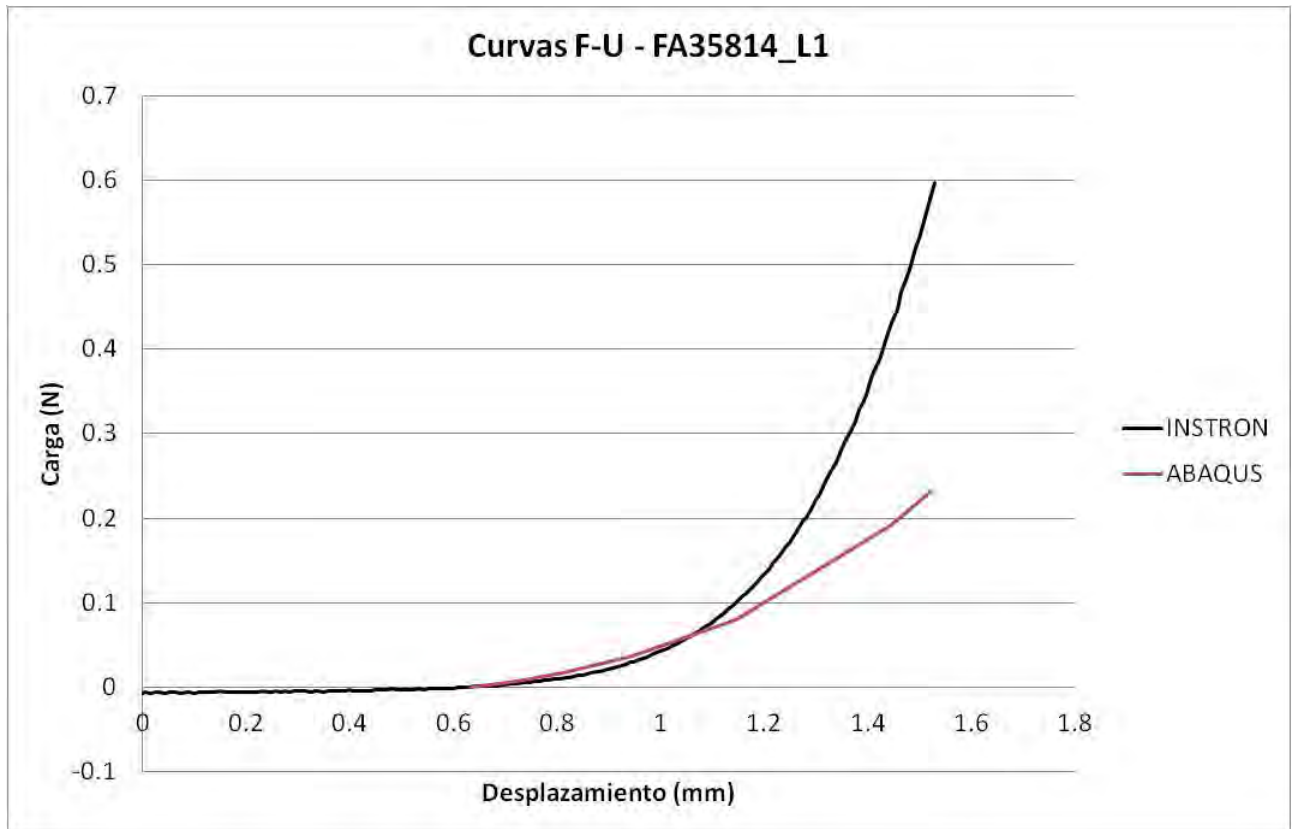


Figura C.15. Curvas carga-desplazamiento de la probeta L1 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus

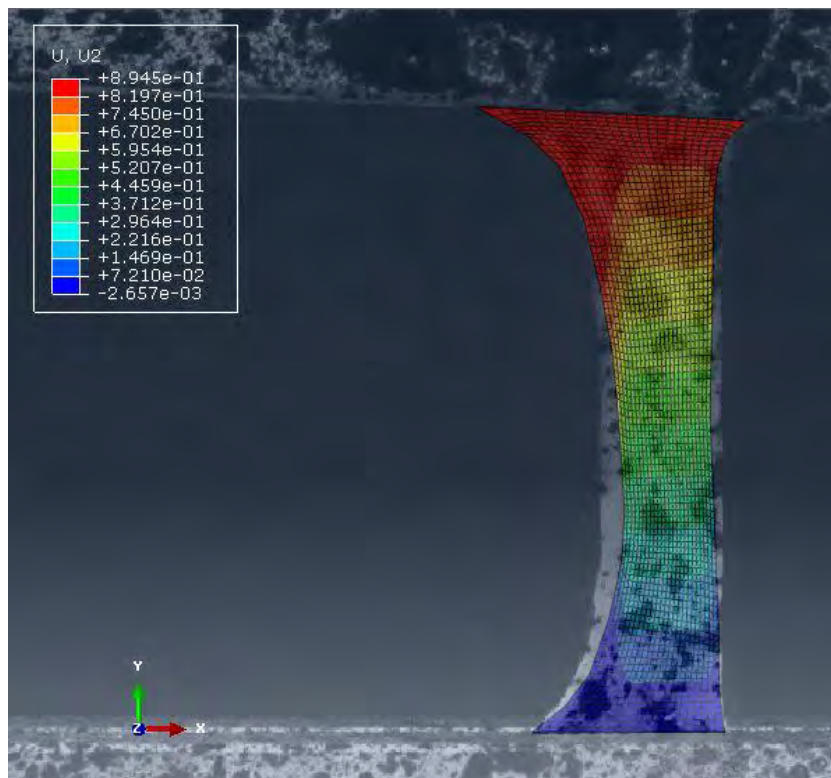


Figura C.16. Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA35814_L1)

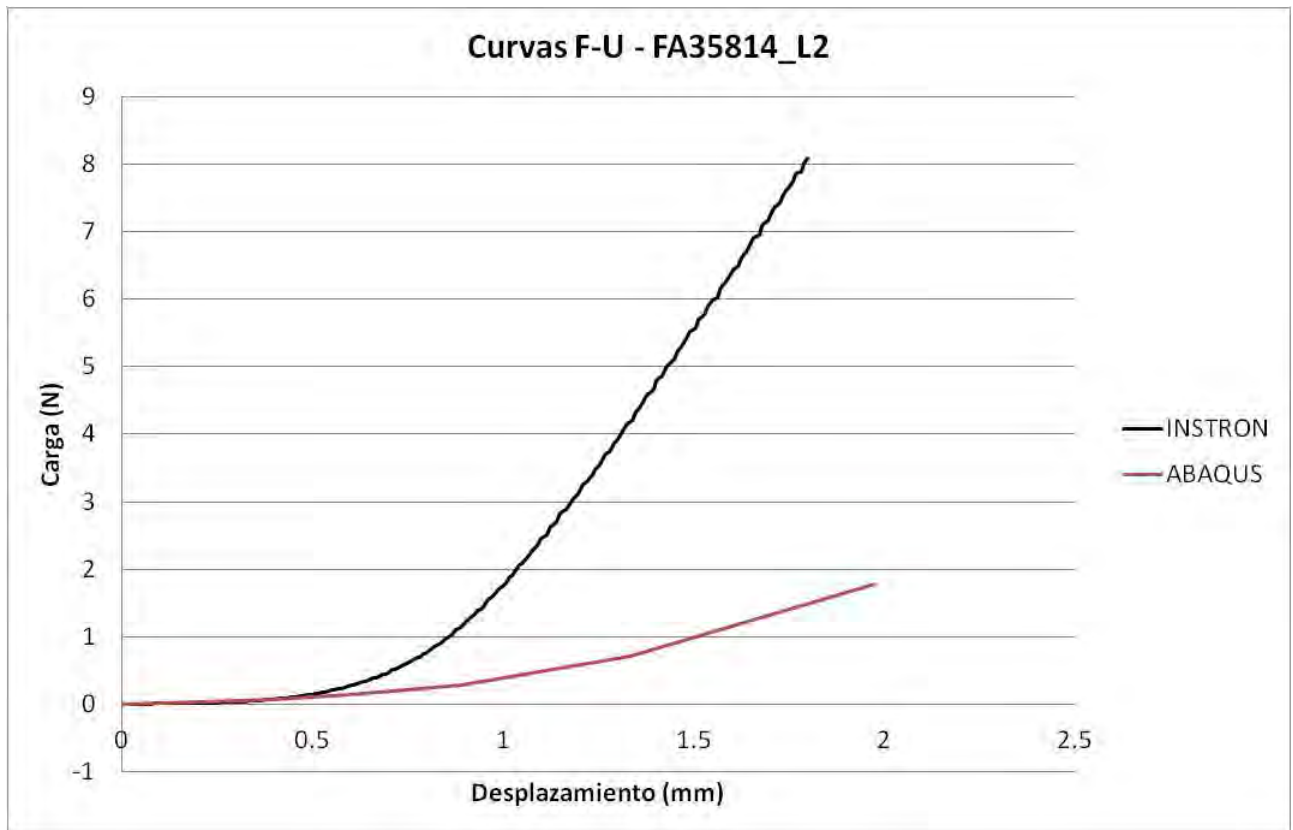


Figura C.17. Curvas carga-desplazamiento de la probeta L2 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus

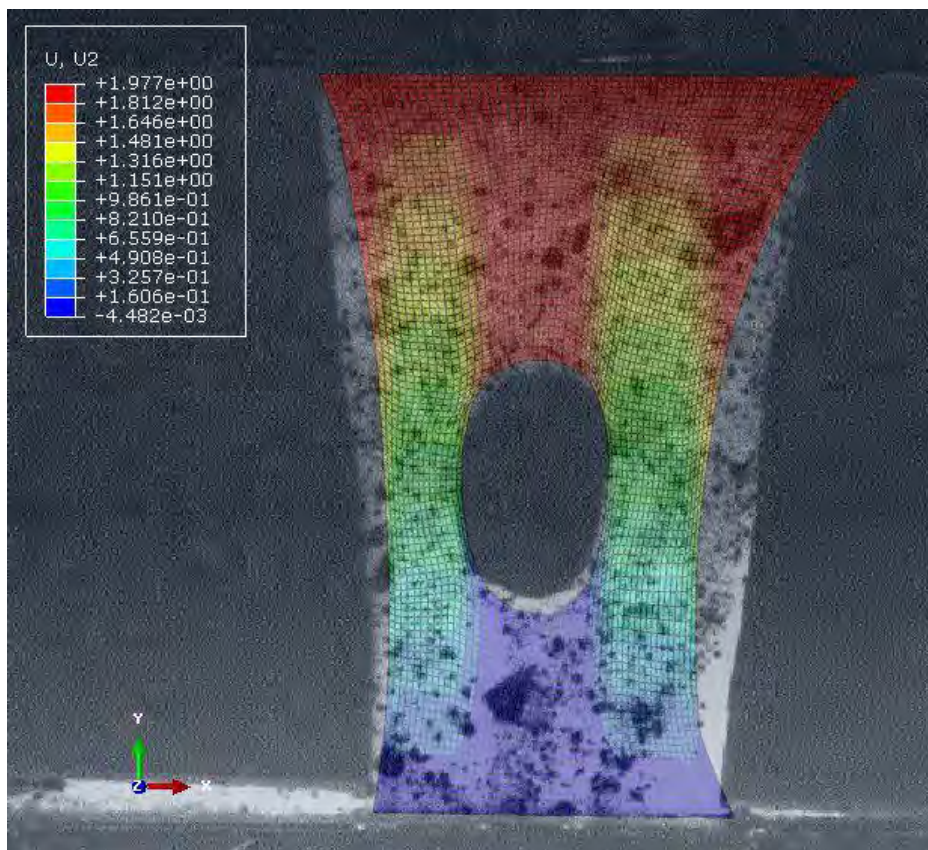


Figura C.18. Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA35814_L2)

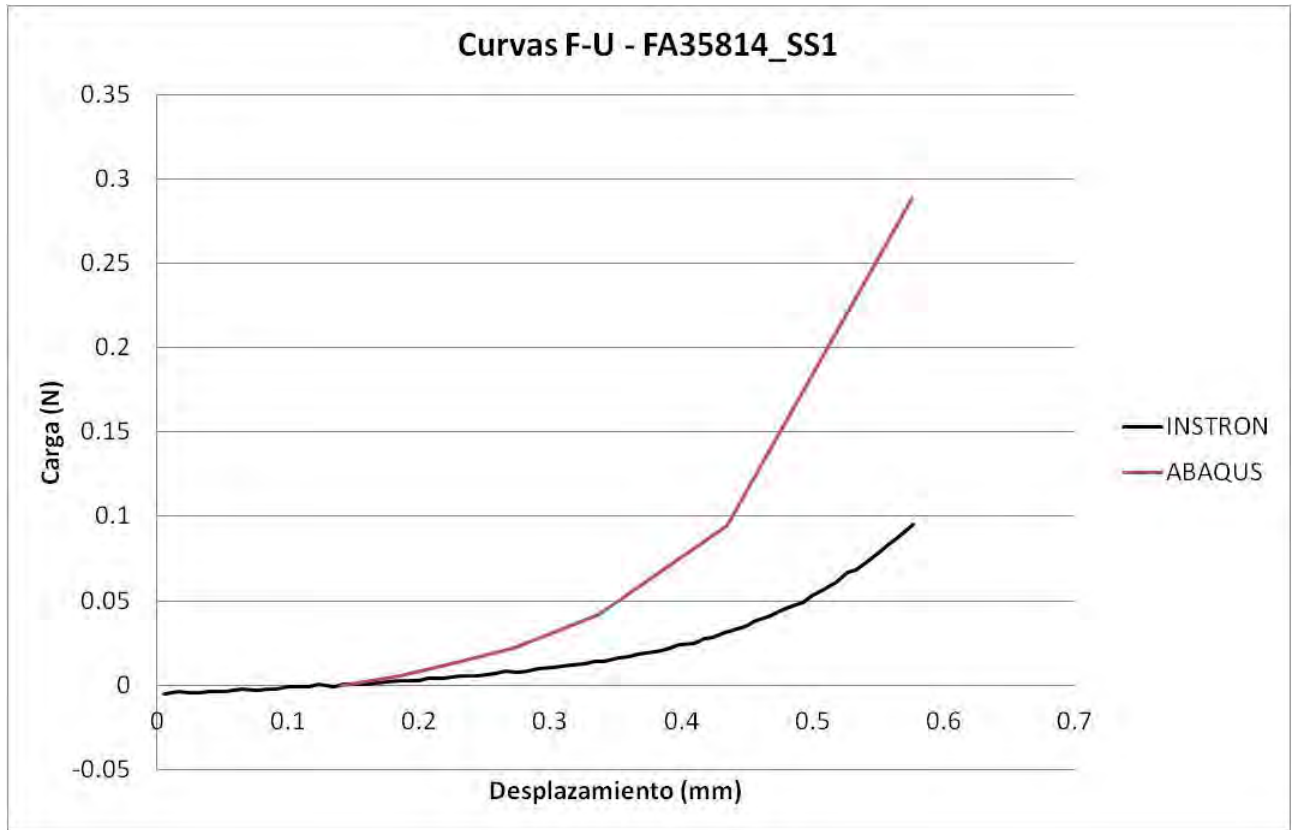


Figura C.19. Curvas carga-desplazamiento de la probeta SS1 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus

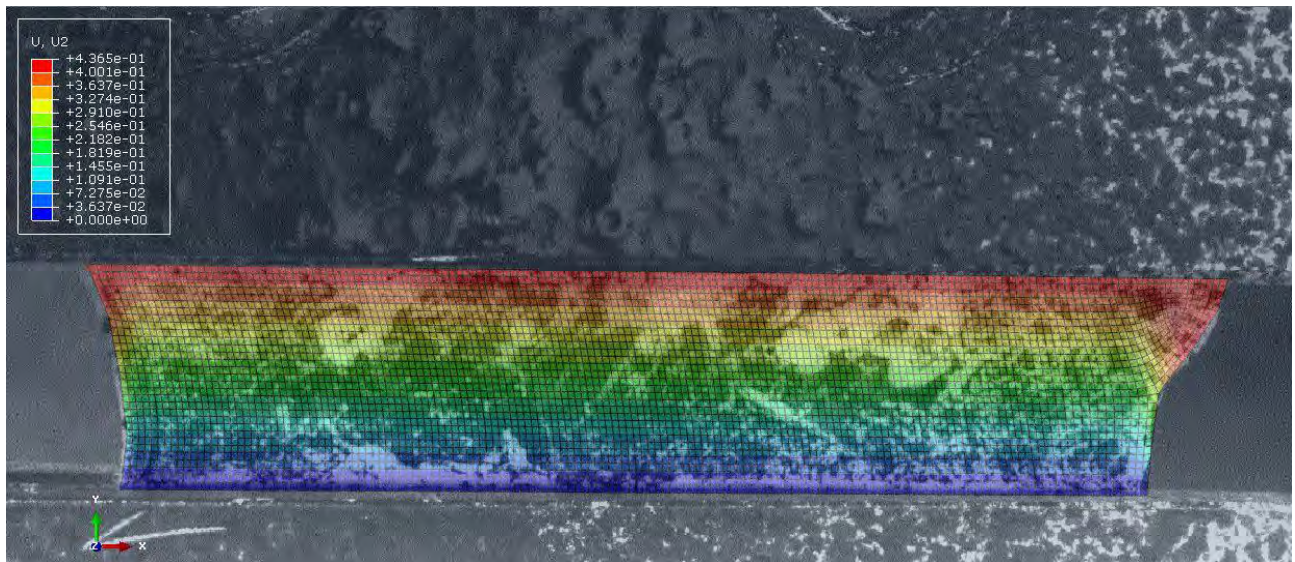


Figura C.20. Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA35814_SS1)

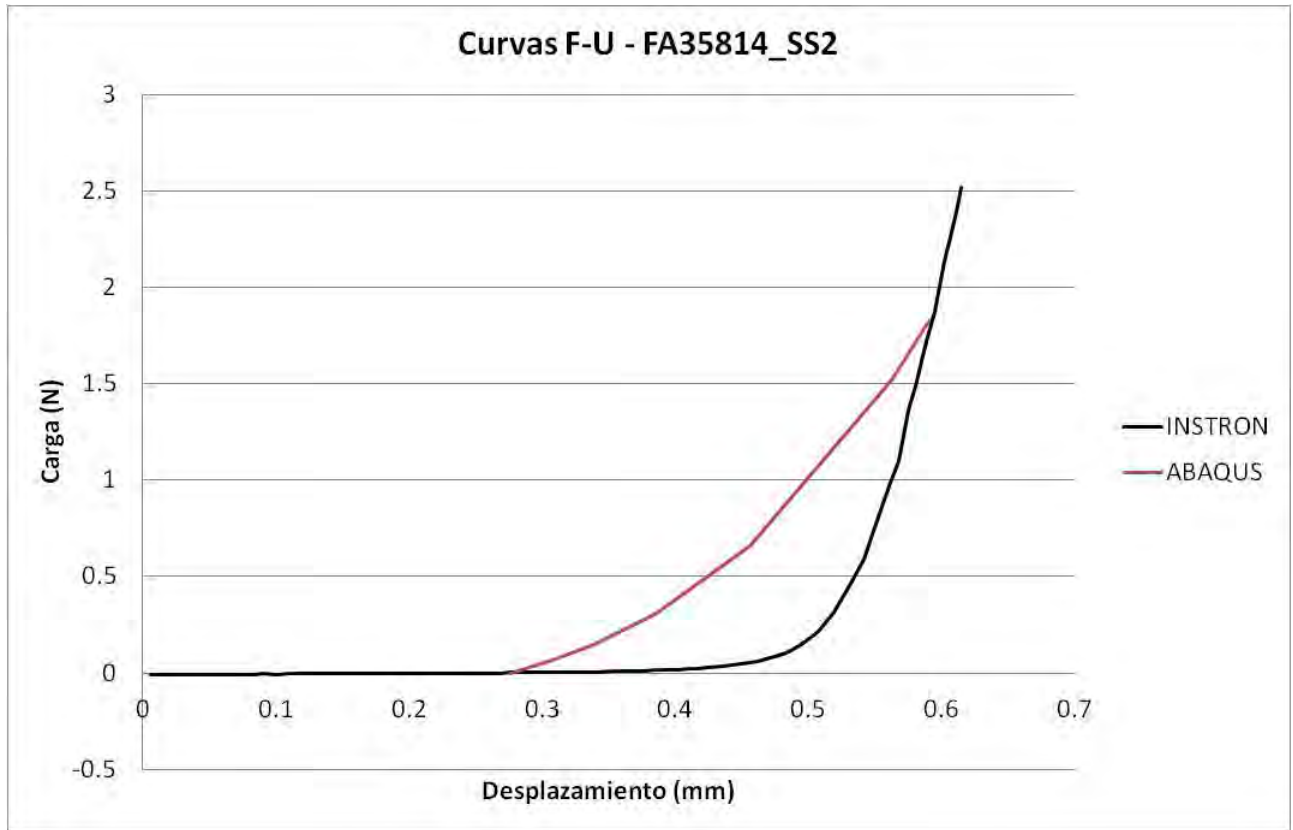


Figura C.21. Curvas carga-desplazamiento de la probeta SS2 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus

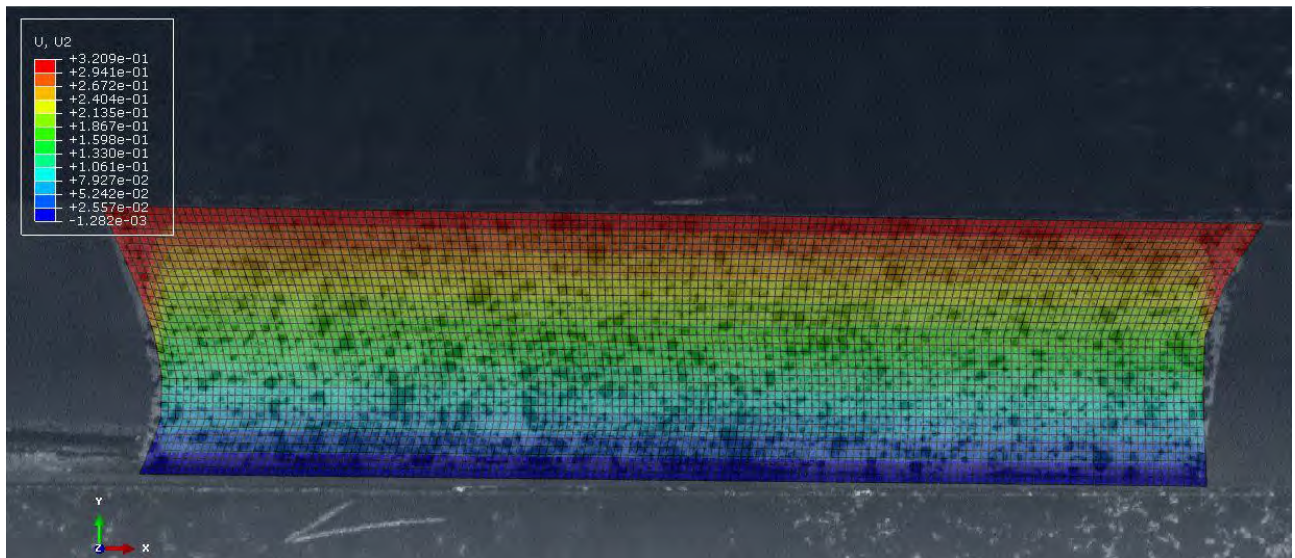


Figura C.22. Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA35814_SS2)

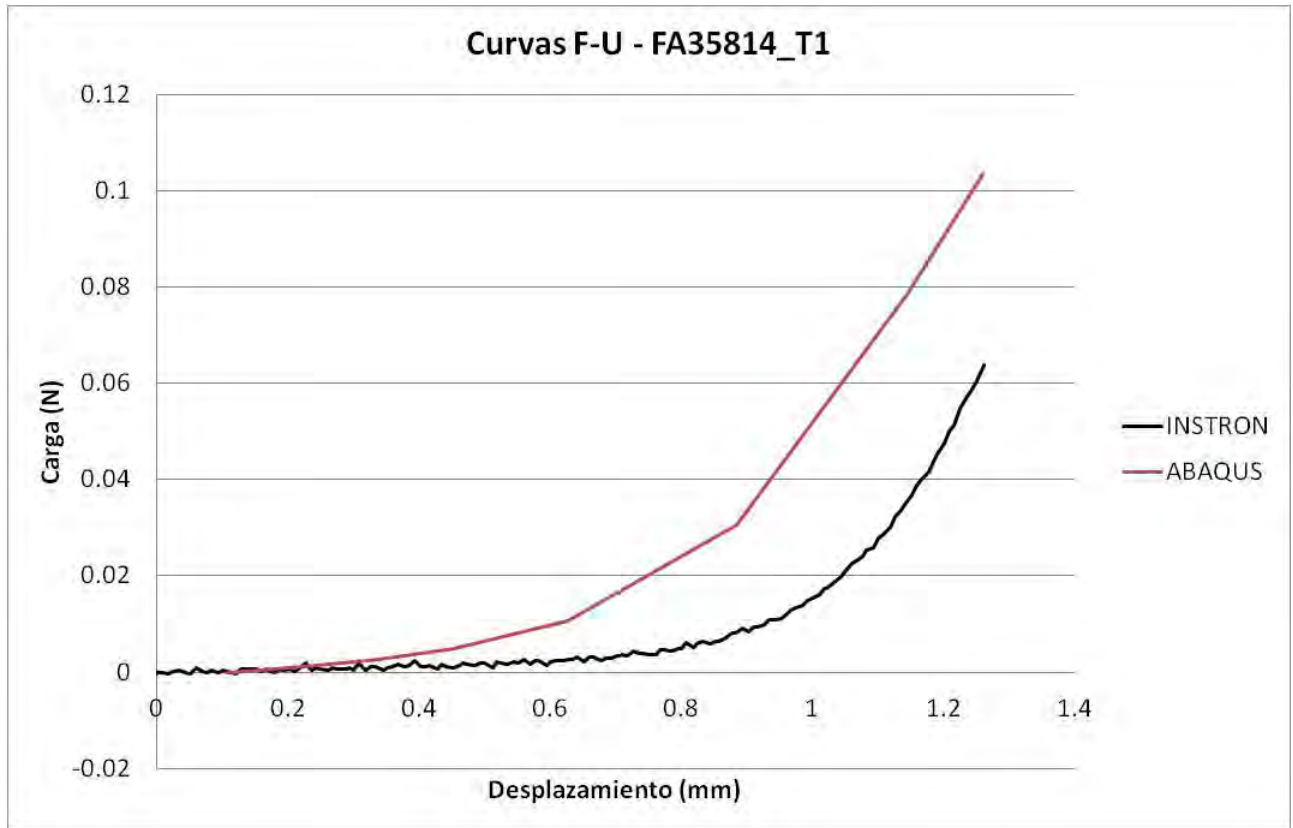


Figura C.23. Curvas carga-desplazamiento de la probeta T1 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus

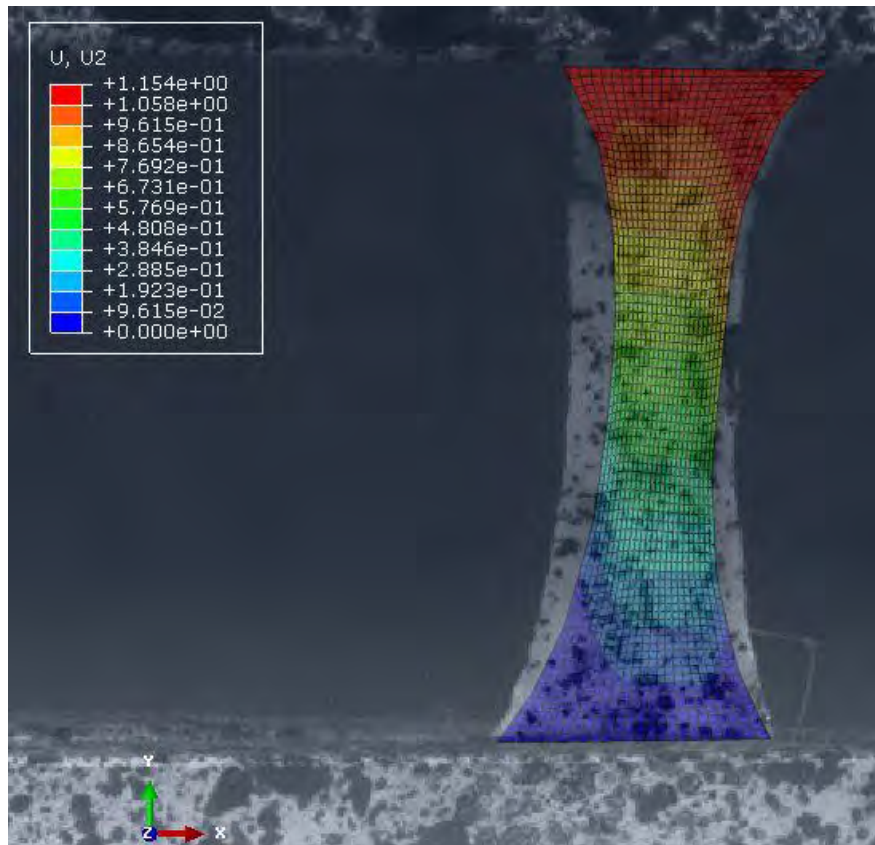


Figura C.24. Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA35814_T1)

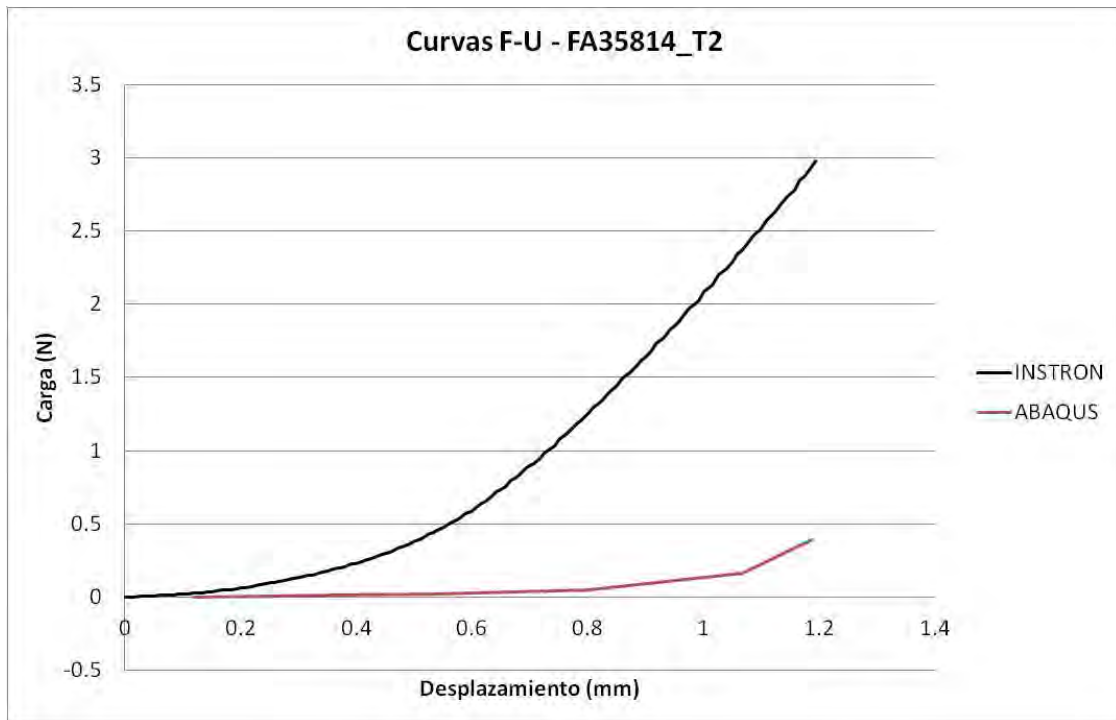


Figura C.25. Curvas carga-desplazamiento de la probeta T2 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus

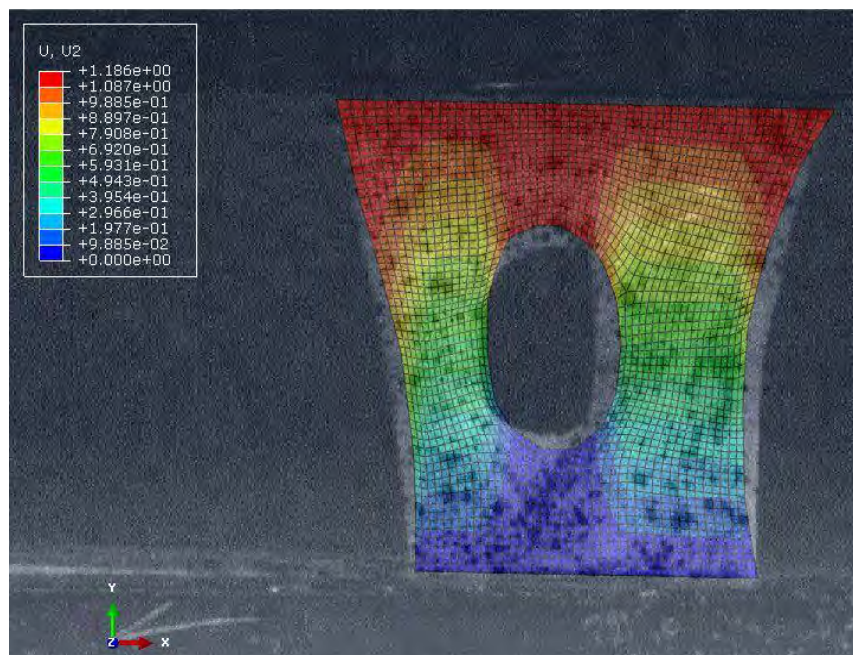


Figura C.26. Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA35814_T1)

En el caso de la muestra FA35814 el comportamiento y ajuste de todas las probetas ha sido muy parecido, ha sido peor que en la muestra FA34414. El ajuste de las gráficas es menos aproximado y en la comparación de las deformadas finales se aprecia que el comportamiento en la dirección transversal se aleja algo más del real que en las probetas de la otra muestra. Se considera que esto se debe a la gran diferencia en la cantidad de fibras entre las dos direcciones preferentes de anisotropía.

Anexo D Campos de tensiones

A continuación se mostrarán los mapas de tensiones obtenidos para todas las probetas. Recordar que todas las probetas se han ensayado como tensión uniaxial excepto las tipo SS, que se han ensayado como tensión plana.

D.1 Muestra FA34414 (fascia profunda)

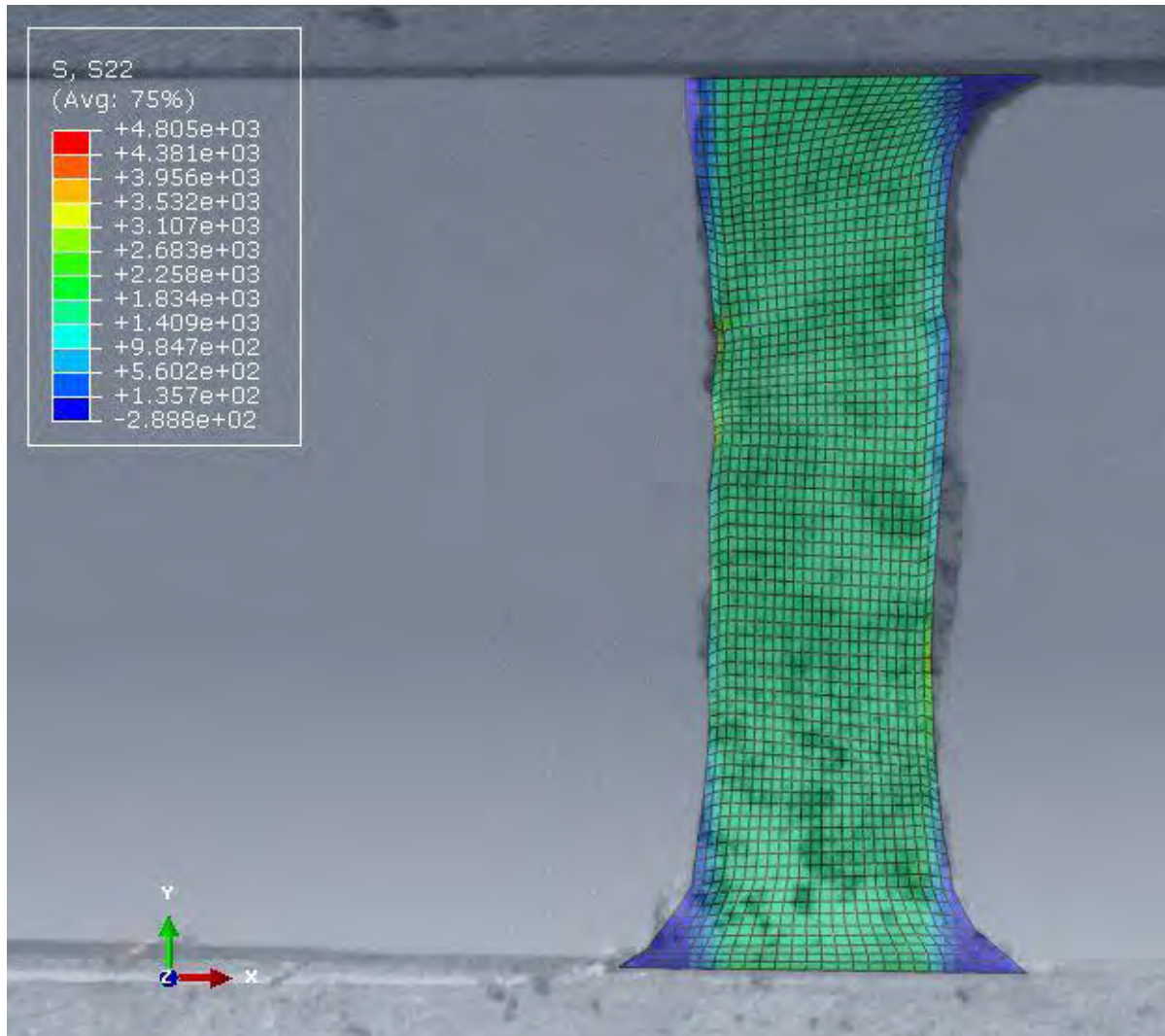


Figura D.1. Campo de tensiones σ_y para la probeta L1 (kPa)

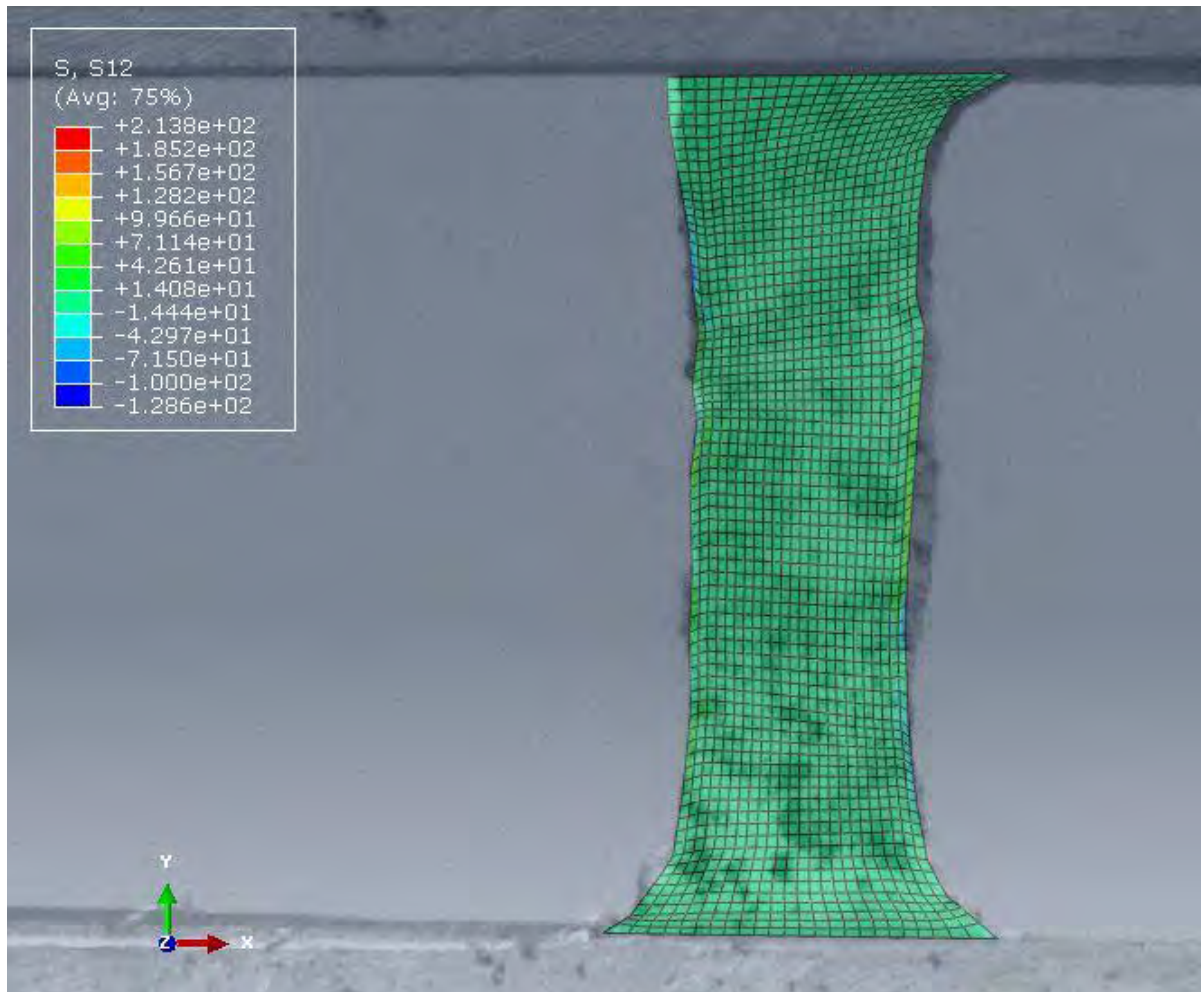


Figura D.2. Campo de tensiones τ_{xy} para la probeta T1 (kPa)

De las imágenes observadas para la probeta T1 también se pueden sacar conclusiones positivas.

De la figura D.1 se deduce que se cumplen las hipótesis de tracción uniaxial uniforme en el centro de la probeta. Además en la figura D.2 se refleja que la tensión tangencial en la probeta es constante y prácticamente nula, lo que refuerza la validez del modelo de comportamiento.

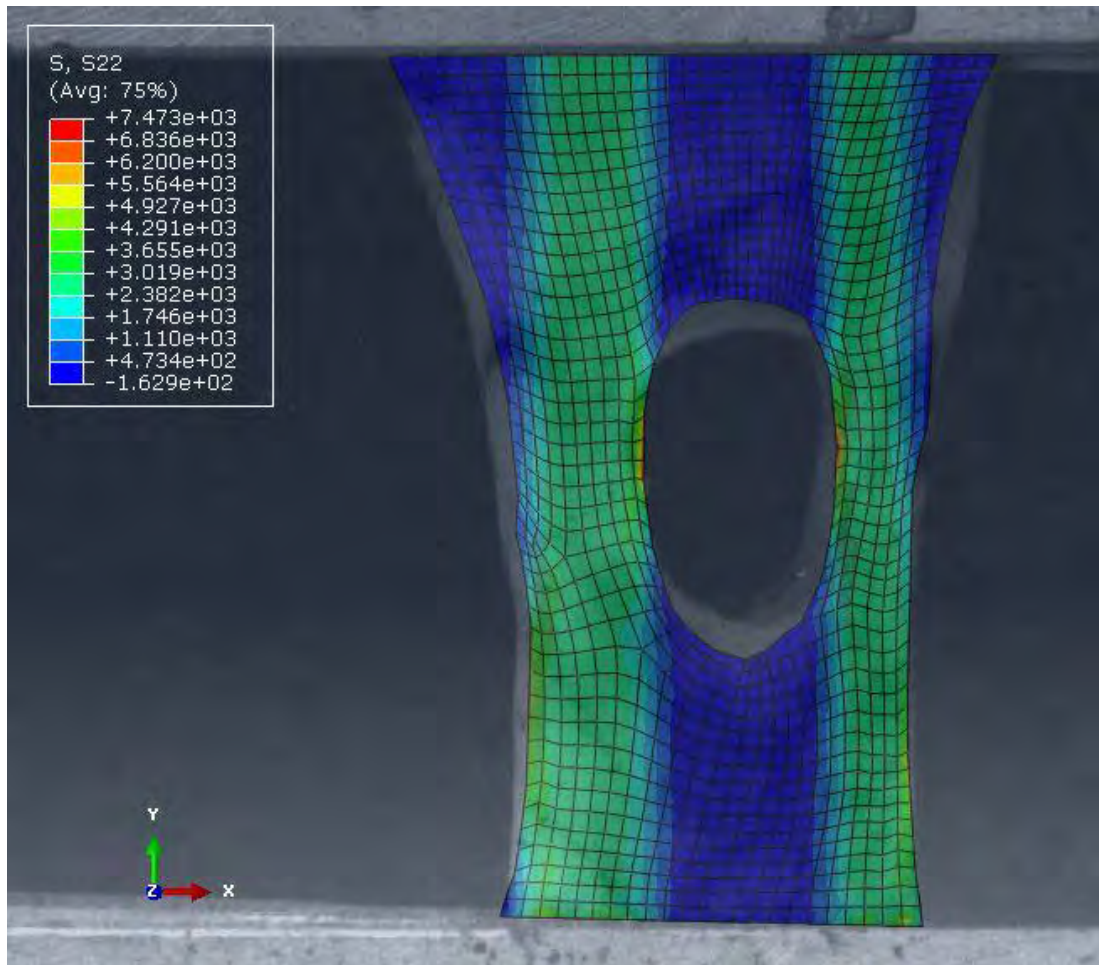


Figura D.3. Campo de tensiones σ_y para la probeta L2 (kPa)

En el agujero de la probeta L2 (figura D.3) se aprecian dos puntos de concentración de tensiones que corresponden con los lugares donde la probeta comenzará a romperse.

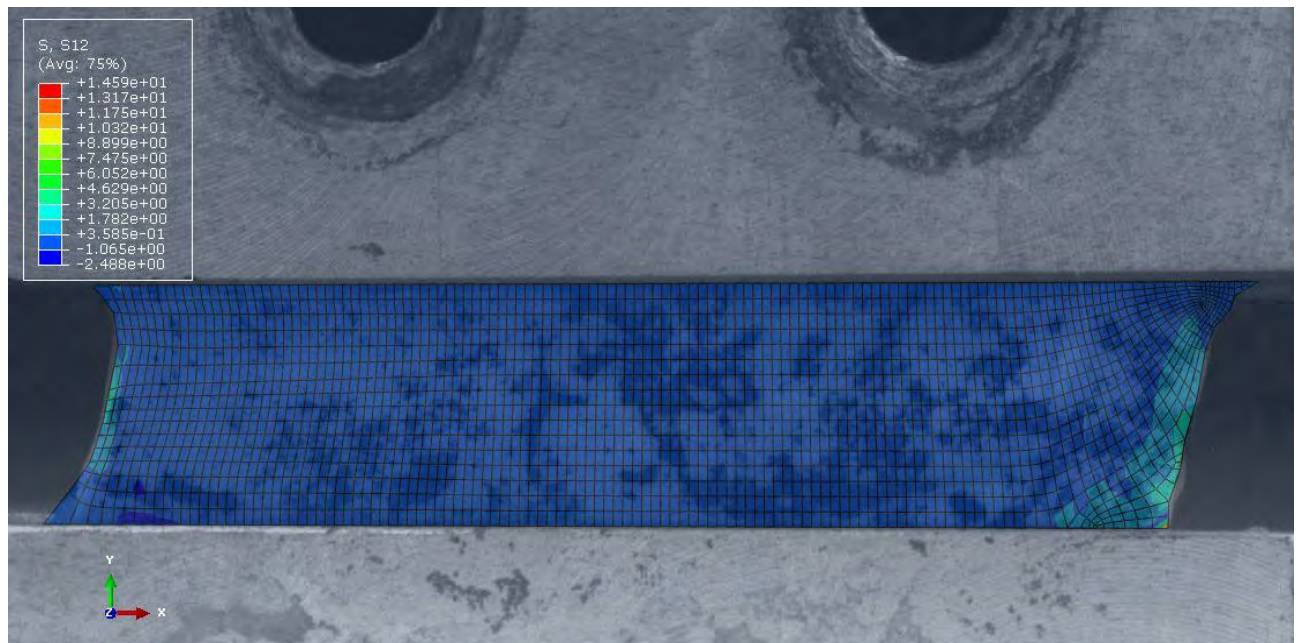


Figura D.4. Campo de tensiones τ_{xy} para la probeta SS1 (kPa)

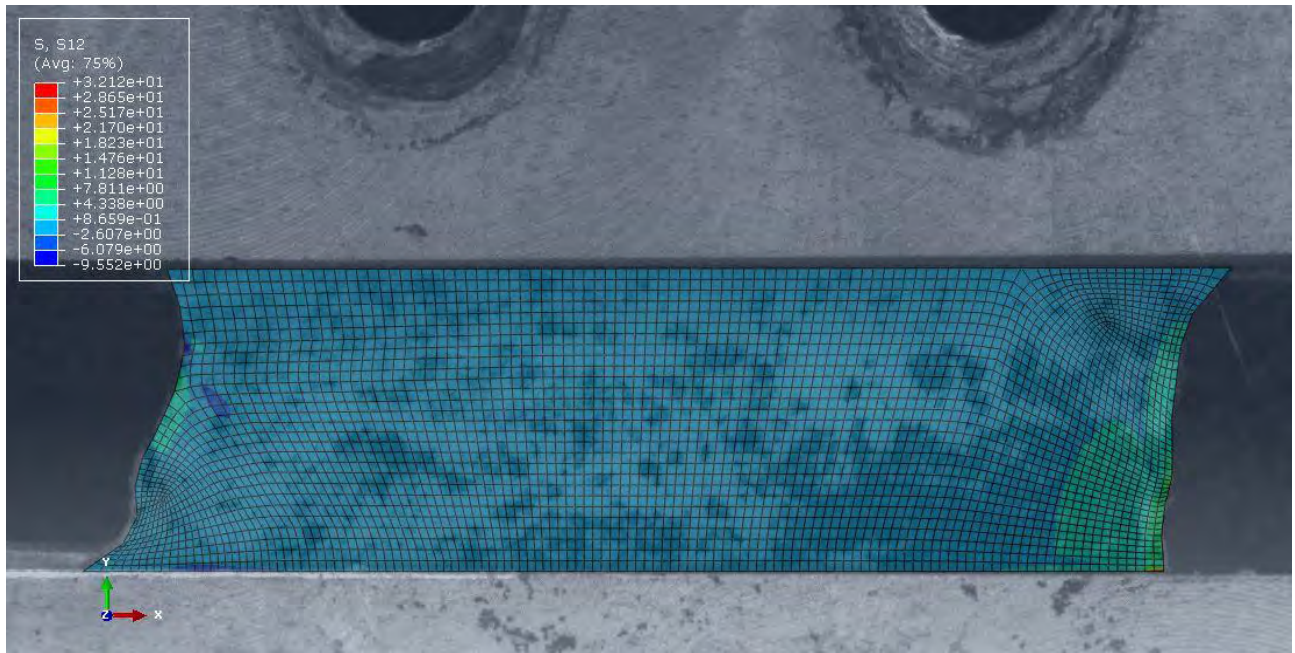


Figura D.5. Campo de tensiones τ_{xy} para la probeta SS2 (kPa)

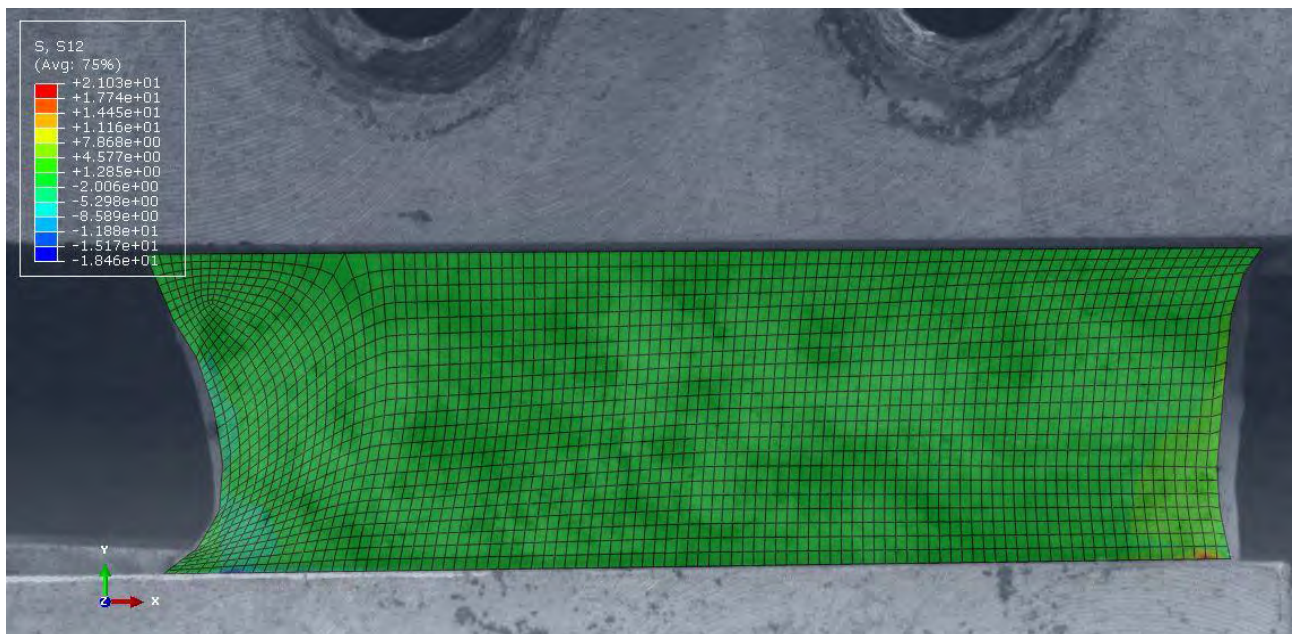


Figura D.6. Campo de tensiones τ_{xy} para la probeta SS3 (kPa)

Como se esperaba, en las muestras tipo SS se ha obtenido tensión tangencial uniforme en el dentro de la muestra. La tensión tangencial obtenida en las zonas laterales de la probeta varía más y no es tan fácil de deducir, ya que se ven considerablemente afectadas por la geometría.

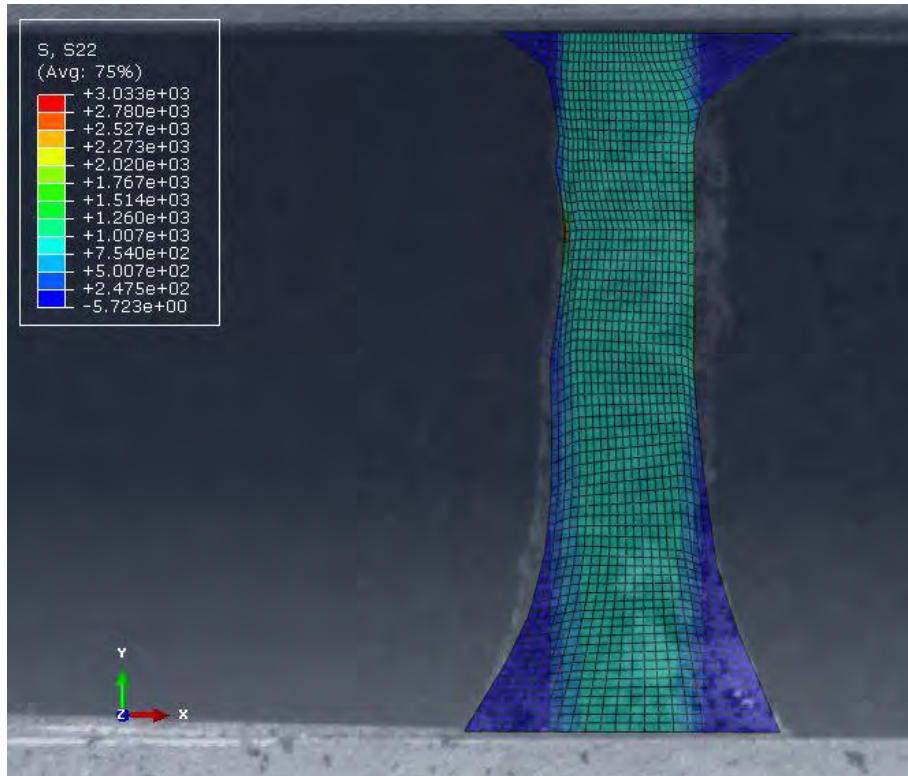


Figura D.7. Campo de tensiones σ_y para la probeta T1 (kPa)

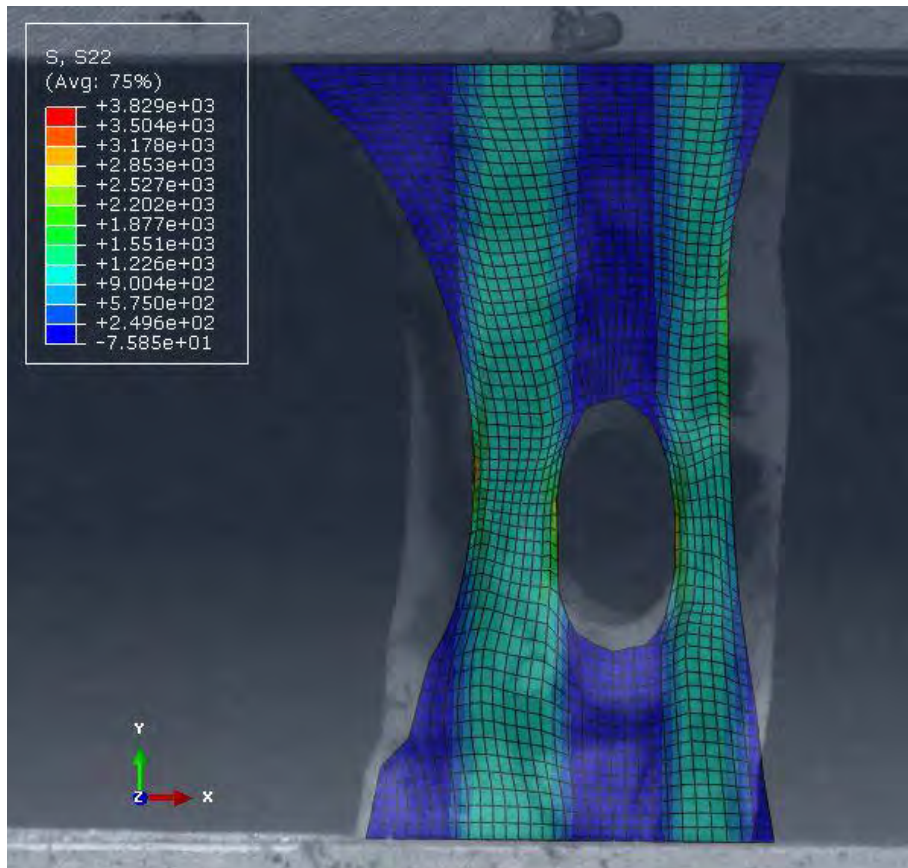


Figura D.8. Campo de tensiones σ_y para la probeta T2 (kPa)

D.2 Muestra FA35814 (fascia superficial)

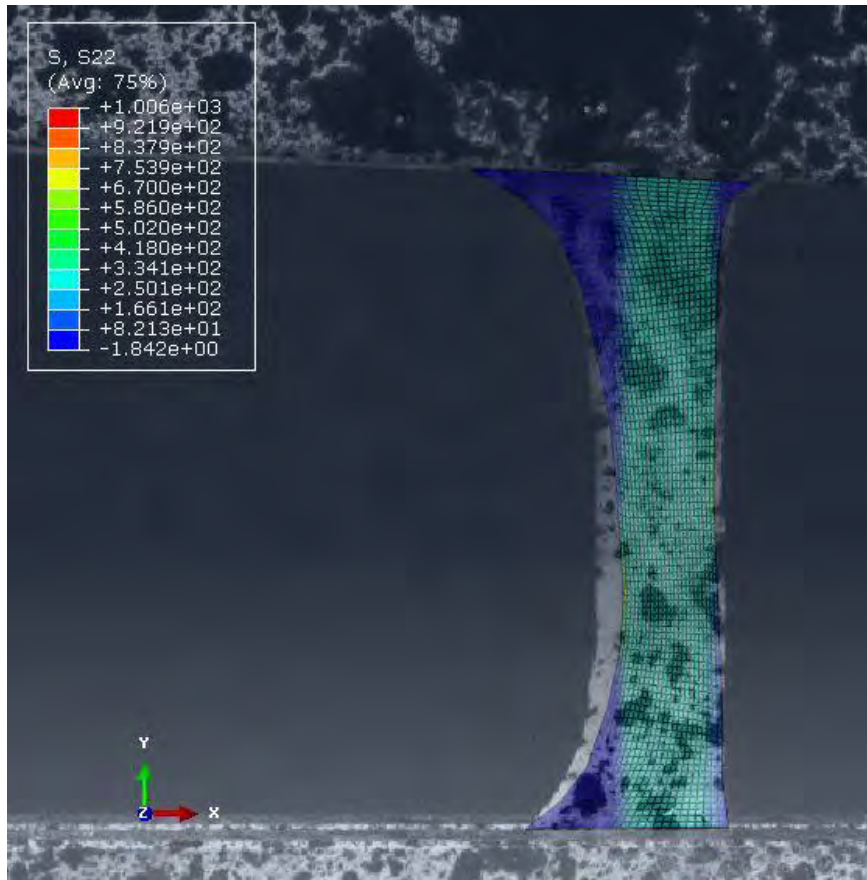


Figura D.9. Campo de tensiones σ_y para la probeta L1 (kPa)

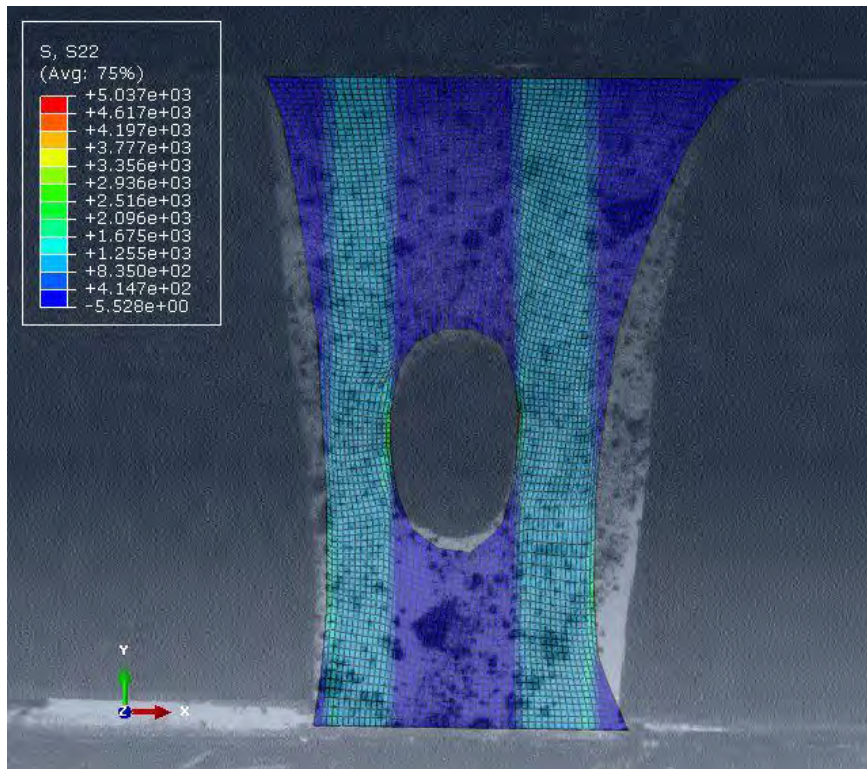


Figura D.10. Campo de tensiones σ_y para la probeta L2 (kPa)

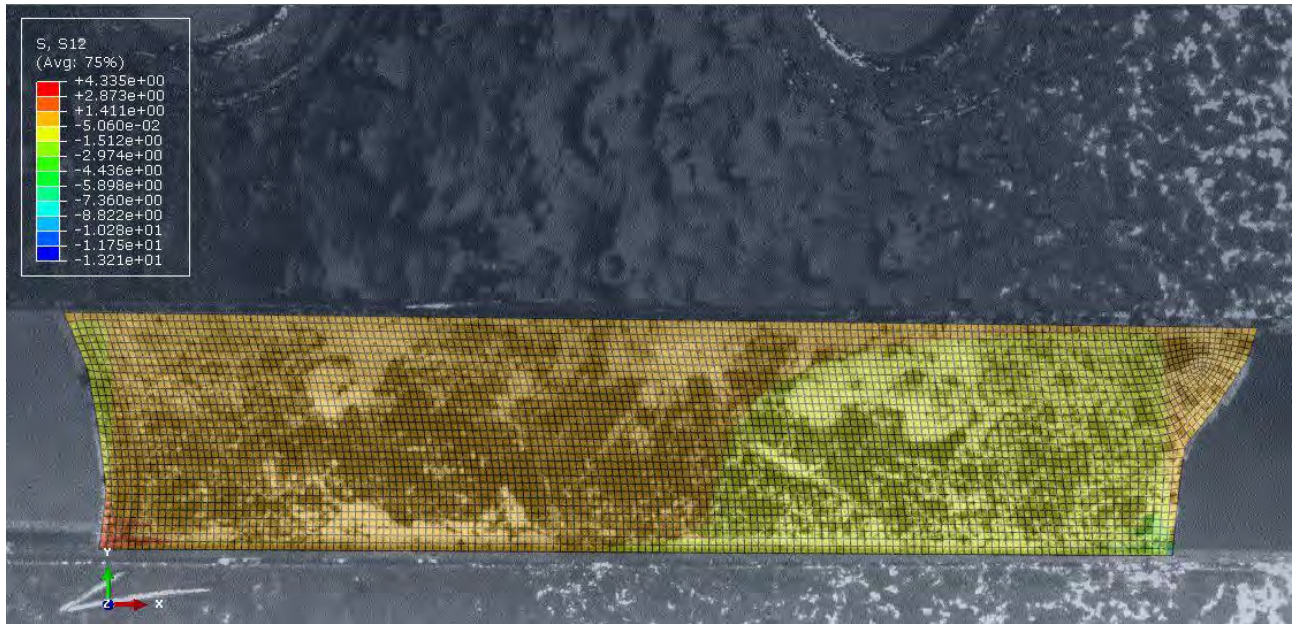


Figura D.11. Campo de tensiones τ_{xy} para la probeta SS1 (kPa)

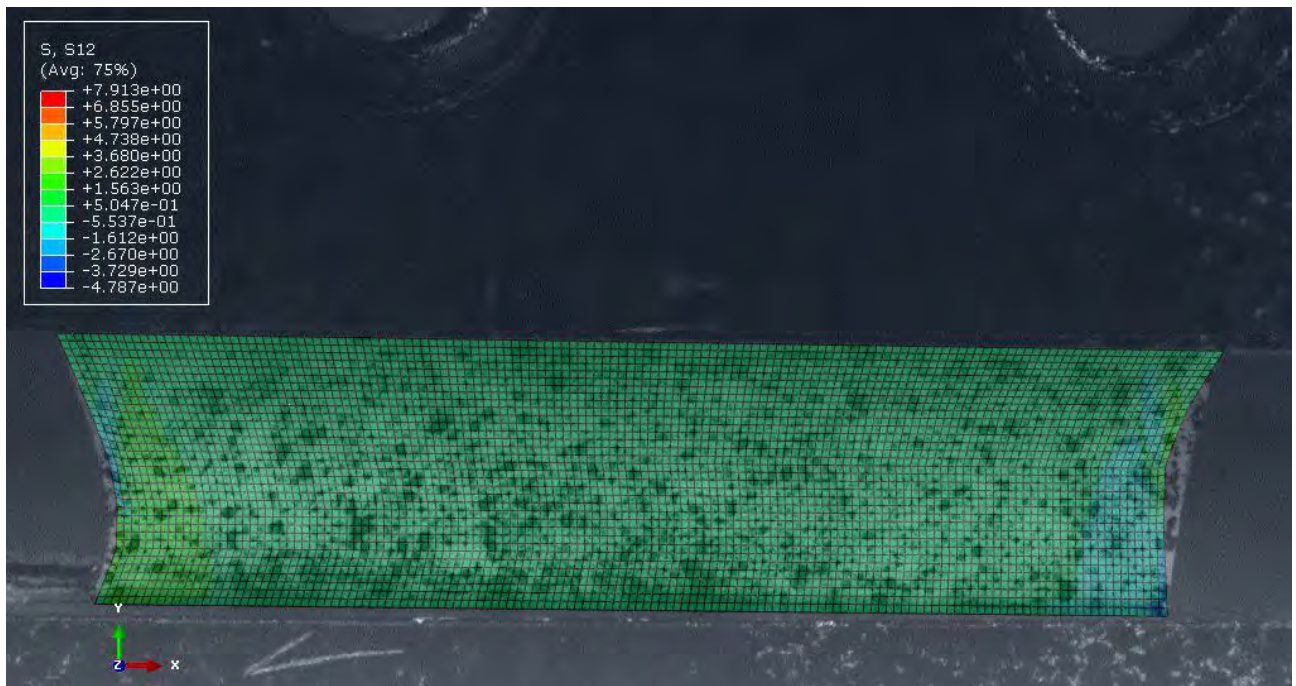


Figura D.12. Campo de tensiones τ_{xy} para la probeta SS2 (kPa)

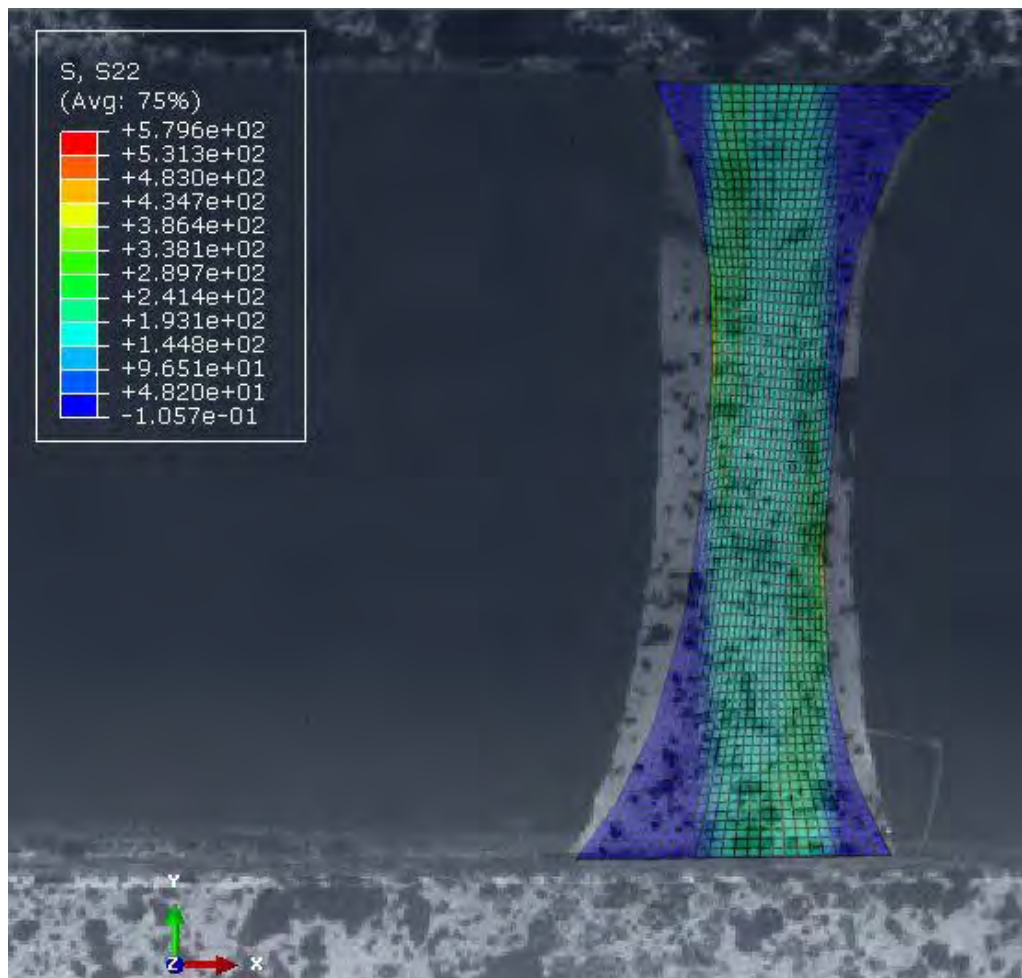


Figura D.13. Campo de tensiones σ_y para la probeta T1 (kPa)

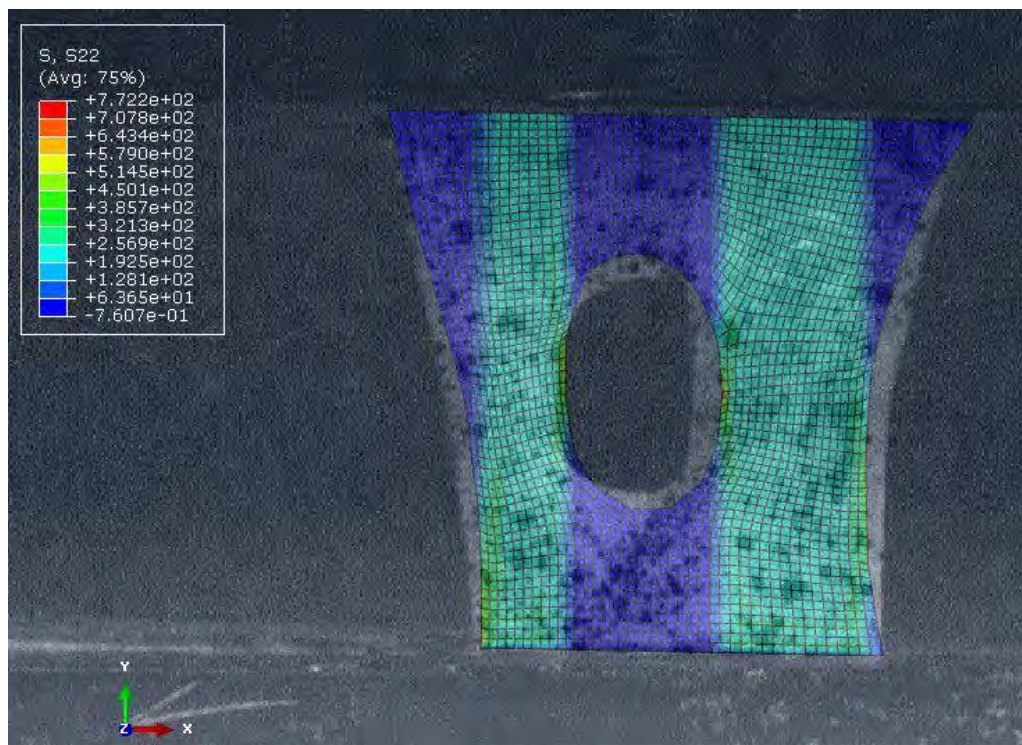


Figura D.14. Campo de tensiones σ_y para la probeta T2 (kPa)

Tabla de ilustraciones

2. Ensayos experimentales

Figura 2.1:	Instron 5548 MicroTester	4
Figura 2.2:	Equipo de cámaras de LaVision	4
Figura 2.3:	Fascia FA30514 antes y después de su limpieza	5
Figura 2.4:	Lupa 3D de Vision Engineering	5
Figura 2.5:	Geometrías iniciales para las probetas	6
Figura 2.6:	Tipos de probetas representando las fibras longitudinales de la fascia	7
Figura 2.7:	Ejemplos de probetas reales tras ser cortadas de la muestra FA30514.....	7
Figura 2.8:	Gráfica de las probetas tipo T1 hasta su rotura	10
Figura 2.9:	Preciclado y cuarta carga hasta 10 de la probeta FA34414_T1.....	10
Figura 2.10:	Gráfica de la cuarta carga en el ensayo de FA34414_T1 tras haberla ajustado al cero real	11
Figura 2.11:	Galga colocada en DaVis.....	11
Figura 2.12:	Curva mostrada por DaVis durante el seguimiento de una galga	12
Figura 2.13:	Gráfica deformación-tiempo correspondiente a la galga vertical de la probeta FA34414_L1	12
Figura 2.14:	Captura del campo de deformaciones en un instante del ensayo de F35814_T113	

3. Análisis mediante MEF

Figura 3.1:	Contorno (en tono verde) dibujado para FA34414_L2	16
Figura 3.2:	Curvas de ajuste de las muestras FA34414 y FA35814 para el modelo de material desarrollado	17
Figura 3.3:	Tabla con los valores de las constantes para ambos modelos	17
Figura 3.4:	Condiciones de contorno y mallado en la probeta FA34414_L2	18
Figura 3.5:	Curvas carga-desplazamiento de la probeta T2 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus	19
Figura 3.6:	Deformada final de Abaqus con desplazamiento en "y" (en mm) sobre imagen final de LaVision	19

Anexo B. Resultados de los ensayos experimentales

Figura B.1:	Media y desviación para todas las probetas tipo L1 de fascia profunda.....	29
Figura B.2:	Media y desviación para todas las probetas tipo T1 de fascia profunda.....	30
Figura B.3:	Media y desviación para todas las probetas tipo SS1 de fascia profunda.....	30
Figura B.4:	Media y desviación para todas las probetas tipo SS2 de fascia profunda.....	31

Figura B.5: Media y desviación para todas las probetas tipo L1 de fascia superficial 32

Figura B.6: Media y desviación para todas las probetas tipo T1 de fascia superficial 32

Figura B.7: Media y desviación para todas las probetas tipo SS1 de fascia superficial 33

Figura B.8: Media y desviación para todas las probetas tipo SS2 de fascia superficial 33

Anexo C. Comprobación del modelo de comportamiento

Figura C.1: Curvas carga-desplazamiento de la probeta L1 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus 36

Figura C.2: Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA34414_L1)..... 36

Figura C.3: Curvas carga-desplazamiento de la probeta L2 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus 37

Figura C.4: Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA34414_T1)..... 37

Figura C.5: Curvas carga-desplazamiento de la probeta SS1 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus 38

Figura C.6: Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA34414_SS1)..... 38

Figura C.7: Curvas carga-desplazamiento de la probeta SS2 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus 39

Figura C.8: Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA34414_SS2)..... 39

Figura C.9: Curvas carga-desplazamiento de la probeta SS3 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus 40

Figura C.10: Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA34414_SS3)..... 40

Figura C.11: Curvas carga-desplazamiento de la probeta T1 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus 41

Figura C.12: Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA34414_T1)..... 41

Figura C.13: Curvas carga-desplazamiento de la probeta T2 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus 42

Figura C.14: Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA34414_T2)..... 42

Figura C.15: Curvas carga-desplazamiento de la probeta L1 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus 43

Figura C.16: Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA35814_L1)..... 43

Figura C.17:	Curvas carga-desplazamiento de la probeta L2 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus	44
Figura C.18:	Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA35814_L2).....	44
Figura C.19:	Curvas carga-desplazamiento de la probeta SS1 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus	45
Figura C.20:	Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA35814_SS1).....	45
Figura C.21:	Curvas carga-desplazamiento de la probeta SS2 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus	46
Figura C.22:	Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA35814_SS2).....	46
Figura C.23:	Curvas carga-desplazamiento de la probeta T1 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus	47
Figura C.24:	Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA35814_T1).....	47
Figura C.25:	Curvas carga-desplazamiento de la probeta T2 obtenidas en los ensayos de Instron y Abaqus	48
Figura C.26:	Deformada final con desplazamiento en y (mm) superpuesta con la real (FA35814_T1).....	48

Anexo D. Campos de tensiones

Figura D.1:	Campo de tensiones σ_y para la probeta L1 (kPa)	49
Figura D.2:	Campo de tensiones τ_{xy} para la probeta T1 (kPa)	50
Figura D.3:	Campo de tensiones σ_y para la probeta L2 (kPa)	51
Figura D.4:	Campo de tensiones τ_{xy} para la probeta SS1 (kPa)	51
Figura D.5:	Campo de tensiones τ_{xy} para la probeta SS2 (kPa)	52
Figura D.6:	Campo de tensiones τ_{xy} para la probeta SS3 (kPa)	52
Figura D.7:	Campo de tensiones σ_y para la probeta T1 (kPa)	53
Figura D.8:	Campo de tensiones σ_y para la probeta T2 (kPa)	53
Figura D.9:	Campo de tensiones σ_y para la probeta L1 (kPa)	54
Figura D.10:	Campo de tensiones σ_y para la probeta L2 (kPa)	54
Figura D.11:	Campo de tensiones τ_{xy} para la probeta SS1 (kPa)	55
Figura D.12:	Campo de tensiones τ_{xy} para la probeta SS2 (kPa)	55
Figura D.13:	Campo de tensiones σ_y para la probeta T1 (kPa)	56
Figura D.14:	Campo de tensiones σ_y para la probeta T2 (kPa)	56

