



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Análisis mecánico por elementos finitos de la influencia de la longitud de la placa y el lípido en el diagnóstico de placas de ateroma en crecimiento positivo

Finite element analysis of the influence of plaque and lipid core lengths on vulnerability of positive atheroma plaque morphologies

Autor

Álvaro Tomás Latorre Molins

Directoras

Estefanía Peña Baquedano

Myriam Cilla Hernández

Universidad de Zaragoza

Grado en Ingeniería Mecánica

2018

ANEXO 0: Enfermedades Cardiovasculares

En este Anexo se trata la importancia de las enfermedades cardíacas a nivel estadístico, tanto de forma nacional como internacional. Además se explican las enfermedades cardíacas más recurrentes.

- **A nivel Internacional**

Tal y como informa la OMS (*Organización mundial de la Salud*) en su publicación del 24 de Mayo de 2018, de los 56.9 millones de defunciones ocurridas en el año 2016 el 54% fueron debidas a las 10 causas más frecuentes [27] (entre las que se encuentran enfermedades cardíacas, derrames, problemas pulmonares, infecciones respiratorias, diabetes melitus, accidentes de coche..).

En dicho año, 15.2 millones de muertes fueron causadas por cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares, representando así casi un 27% de las muertes totales. Estas han sido las principales causas de muerte en los últimos 15 años [27].

Se puede observar en los gráficos (*Figuras 38 y 39*) que, pese a estar en las mismas posiciones, tanto los infartos como las enfermedades isquémicas del corazón han aumentado sus cifras significativamente.

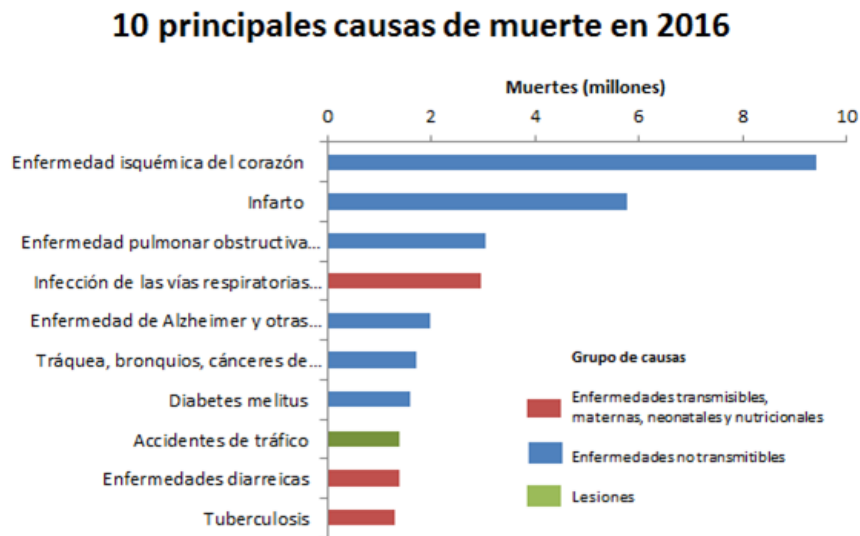


Figura 38: Diez principales causas de muerte en el mundo (datos 2016) [27]

10 principales causas de muerte en 2000

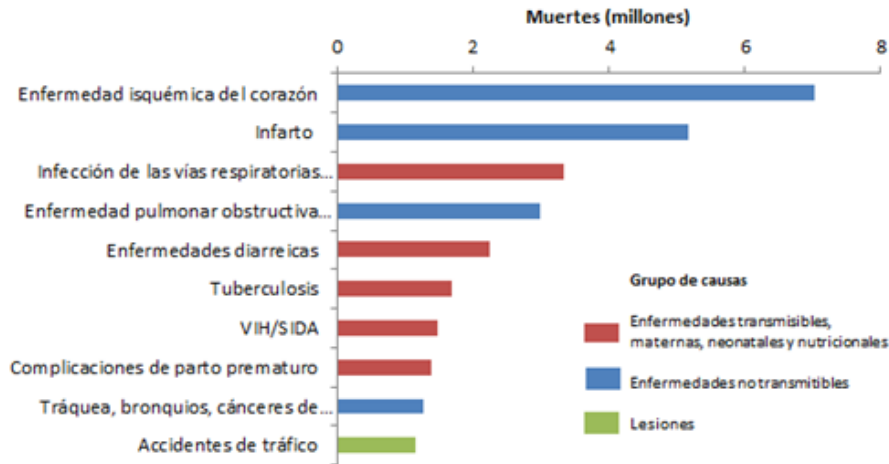


Figura 39: Diez principales causas de muerte en el mundo (datos 2000) [27]

Dependiendo de los ingresos económicos, las causas más frecuentes de mortandad varían. En el año 2016, en países cuyos ingresos son bajos (Figura 40), aproximadamente la mitad de las muertes fueron causadas por enfermedades transmisibles y nutricionales [27]. Estas cifras van bajando considerablemente según aumentan los ingresos medios del país (Figura 41, 42 y 43).

Pese a no ser la primera causa de mortandad, en países de renta baja las enfermedades cardiovasculares siguen siendo la primera causa entre las enfermedades no transmisibles. Dichas enfermedades suponen el 72% de las muertes en todo el mundo, siendo del 88% y del 39% en países de altos y bajos ingresos respectivamente [27].

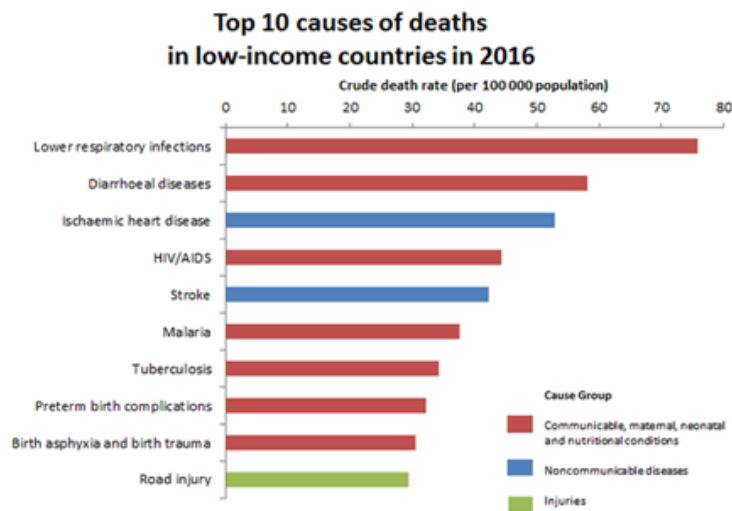


Figura 40: Diez principales causas de muerte en países de baja renta económica (datos 2016) [27]

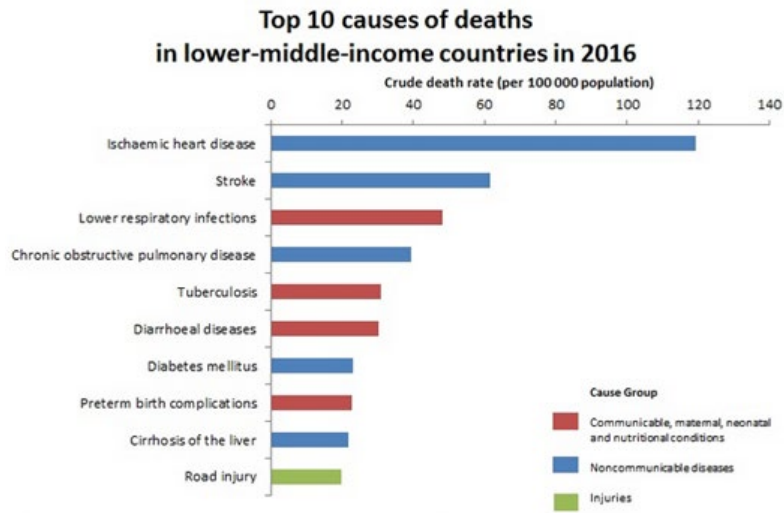


Figura 41: Diez principales causas de muerte en países de media renta económica (datos 2016) [27]

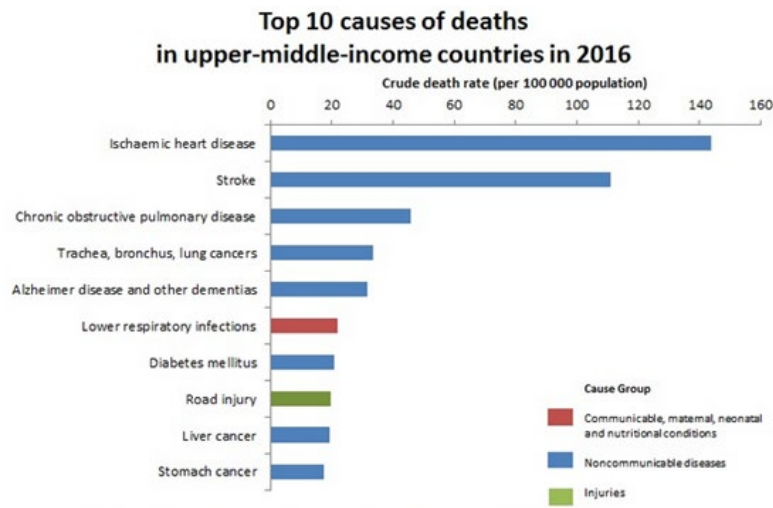


Figura 42: Diez principales causas de muerte países de alta-media renta económica (datos 2016) [27]

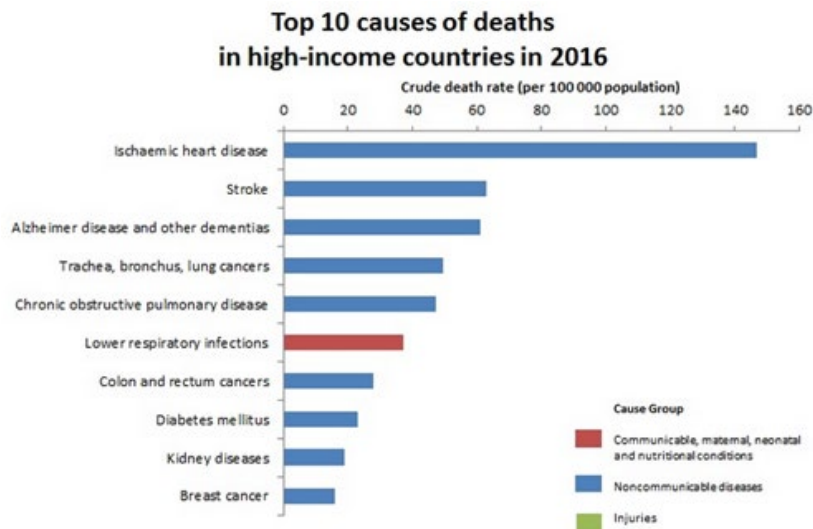


Figura 43: Diez principales causas de muerte en países de alta renta económica (datos 2016) [27]

- **En España**

A nivel nacional, según la nota de prensa publicada por el INE (*Instituto Nacional de Estadística*), las enfermedades del sistema circulatorio representaron el 29'2% de las defunciones ocurridas en 2016. La tasa de mortandad de estas enfermedades es de 257,9 por cada 100.000 habitantes lo que supuso un 3'6% menos que en el año anterior [28].

Las enfermedades del sistema circulatorio fueron la primera causa de mortalidad femenina y la segunda entre los varones, tal y como se muestra en el siguiente gráfico [28]. En la *Figura 44* se puede apreciar las causas de mortandad por cada 100.000 habitantes.

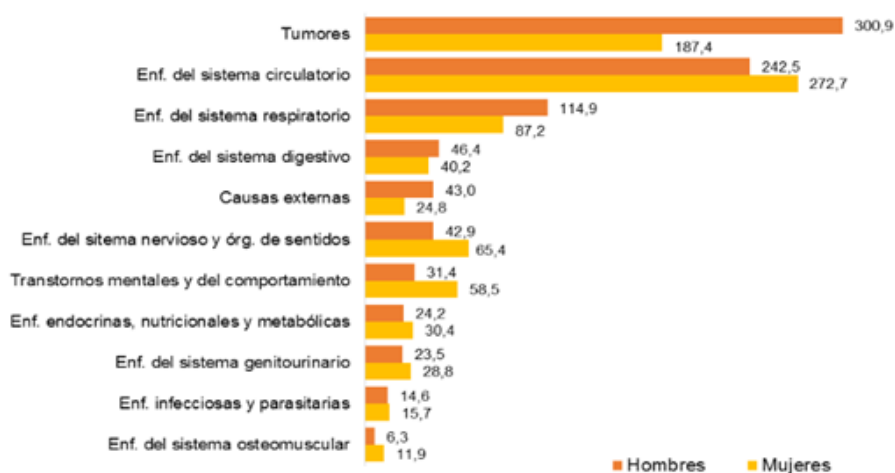


Figura 44: Causas de muerte por cada 100.000 habitantes en España (datos 2016) [28]

Los sucesos mortales relacionados con las enfermedades del sistema circulatorio se acentúan con la edad, alcanzando su valor máximo en edades superiores a los 79 años con un 33,6% [28], tal y como se puede apreciar en la *Figura 45*.

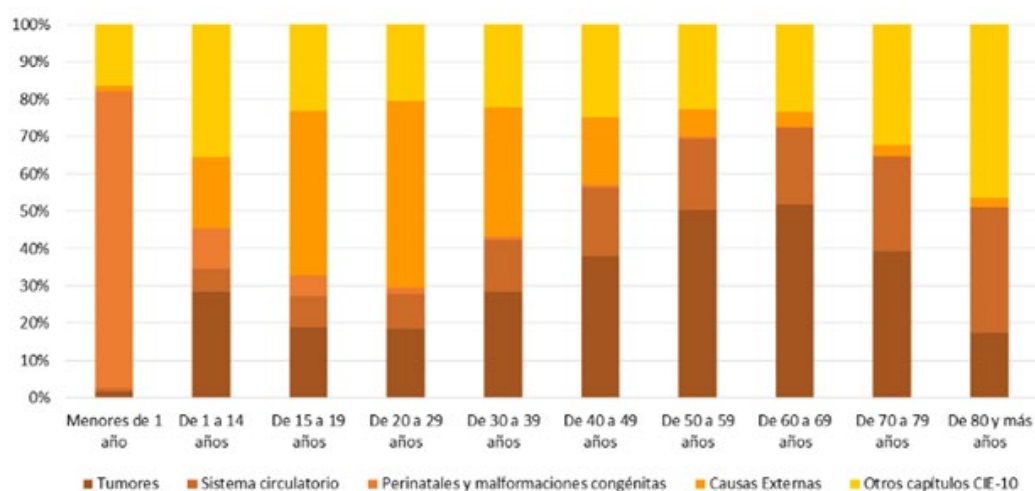


Figura 45: Causas de muerte por edad en España (datos 2016) [28]

Además, dentro de las defunciones de causa múltiples (*Figura 46*) (enfermedad que inicia la cadena de acontecimientos patológicos que conducen a la muerte), las enfermedades isquémicas de corazón contribuyen con un 12,2% siendo la segunda mayor causa de muerte [28].

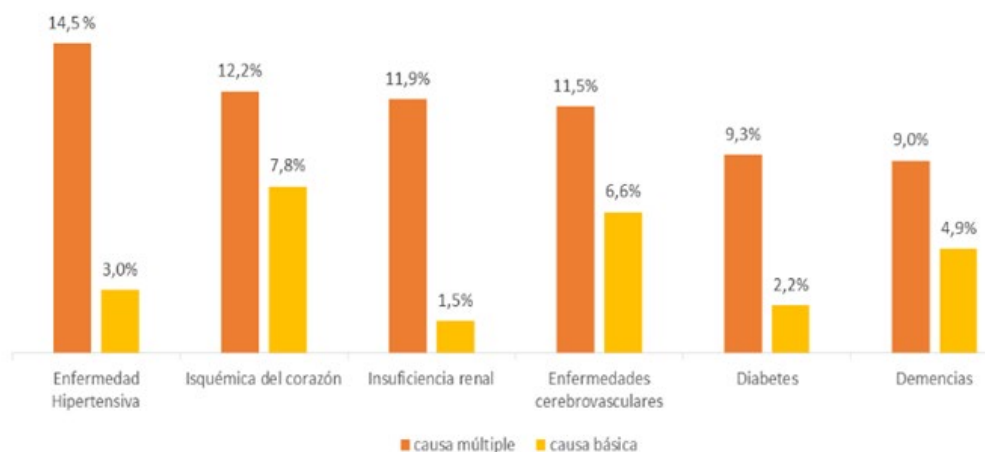


Figura 46: Causas múltiples de muerte más frecuentes en España (datos 2016) [28]

- **Enfermedades Cardiovasculares más importantes**

Las principales enfermedades del sistema circulatorio son la enfermedad isquémica del corazón y las enfermedades cerebrovasculares (ictus). Conjuntamente provocan casi un 60% de toda la mortalidad cardiovascular [2].

En España la enfermedad isquémica del corazón ocasiona mayor mortandad cardiovascular (un 31%) [2], siendo del 39% en hombres y 25% en mujeres. Dentro de esta enfermedad la más frecuente es el infarto agudo de miocardio con un nivel del 61% de ocurrencia. [2].

Las enfermedades cerebrovasculares representan el 28% de la mortalidad cardiovascular, siendo mayor en mujeres (30%) que en hombres (25%) [2]. Dentro de este grupo la hemorrágica supone el 23% y el 14% la oclusiva [2]. La tercera enfermedad cardiovascular más importante es la insuficiencia cardiaca (15% del total de las muertes cardiovasculares) [2], suele ser la vía final de muchas enfermedades de corazón.

En la *Figura 47* se aprecia un diagrama circular en el cuál se reparten proporcionalmente las causas de muerte debidas a enfermedades del sistema circulatorio.

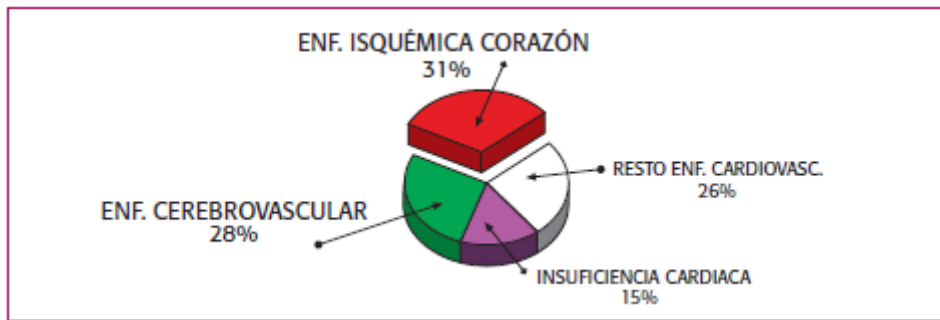


Figura 47: Mortalidad proporcional por las distintas enfermedades del sistema circulatorio en ambos sexos (datos España, 2004) [2]

La obtención de estos datos es muy relevante para las autoridades sanitarias con el fin de afrontar investigaciones referentes a este tema. En vista de los datos sobre enfermedades cardiacas, es esencial intentar conocer y determinar factores de riesgo de enfermedades (en este caso de la Aterosclerosis) para una prematura detección y tratamiento.

ANEXO 1: Tensiones arteriales y Vulnerabilidad

En muchos estudios [19, 29] se considera el punto de máxima tensión circunferencial (PCS) como uno de las mayores causas de ruptura en placas de ateroma, usándose como variable básica para predecir la zona de ruptura.

Además de los factores de riesgo ya definidos, al reducirse el espesor de la capa fibrosa aumenta el PCS de manera exponencial. La cuantía del PCS depende de las propiedades de la placa, tamaño del núcleo, espesor de las capas... [22]. En capas fibrosas menores de **65 micras** [22] se han alcanzado tensiones de riesgo.

Otros estudios [21,22] han demostrado que otros factores geométricos como el espesor del núcleo como un factor a tener en cuenta, mientras que el ángulo del núcleo parece no tener influencia relevante con el valor del PCS.

Mediante análisis de elementos finitos se ha concluido que los mayores niveles de tensión se concentran en los bordes de la capa fibrosa, cerca de la íntima [30]. En armonía con estos resultados otros autores [30] han evaluado las distribuciones y magnitudes de las tensiones circunferenciales en la zona de ruptura encontrándose que son superiores a las demás, no obstante también se ha determinado que la zona de ruptura no siempre es la zona de mayor tensión [29].

ANEXO 2: Técnicas de Imagen

A la hora de detectar enfermedades cardiovasculares tradicionalmente se han usado pruebas de esfuerzo, gammagrafía cardíaca, ecocardiograma, angiografía coronario y arteriografías. Sin embargo, al diagnosticar mediante estos métodos la enfermedad ya está en un estadio avanzado.

Una de las técnicas más utilizadas es la **angiografía**, pero en ocasiones puede no detectar lesiones inestables. Es concurrente que pacientes con angiografías normales sufran episodios coronarios [14]. Esto se debe a que este método tiende a subestimar las lesiones y por ejemplo placas con crecimiento positivo pasan inadvertidas. Otro inconveniente es la falta de información de la estructura de la placa ya que es sólo visible el lumen mediante esta técnica. En la *Figura 48* se puede apreciar una angiografía digital de la aorta.



Figura 48: Angiografía digital de Aorta [5]

Por otra parte la **ecografía intravascular (IVUS)** facilita información de la luz del vaso y de la pared, con el uso de ultrasonidos obtiene imágenes de las paredes arteriales. Al igual que la angiografía es un método invasivo [14]. Una de las grandes y novedosas ventajas que posee es la de poder visualizar las deformaciones en la pared. Se han desarrollado estudios [31] en los que se relacionan las zonas con altos valores de deformación tangencial con áreas propensas a rotura y ulceración. Obteniendo las deformaciones radiales y tangenciales se ha observado [31] que en placas estables, estos valores permanecen bajos. En la *Figura 49* se puede observar un ejemplo de la sección transversal de una arteria tomada por IVUS [22].

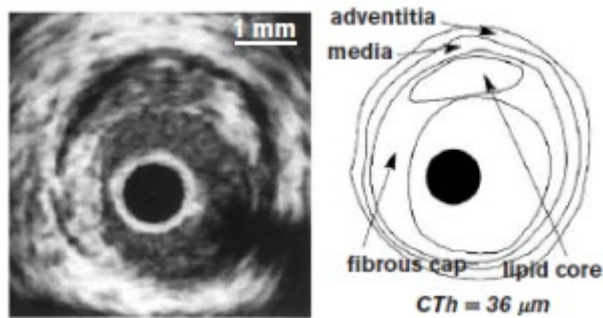


Figura 49: Imagen tomada por IVUS de una placa cuya capa fibrótica es de 36 micras [22]

Recientemente se ha apostado por la **Resonancia Magnética** de forma experimental para el diagnóstico de enfermedades arteriales. Es capaz de distinguir placas vulnerables tratables por medicamentos y quirúrgicamente. Además se puede tener un control evolutivo de la placa [14]. En la *Figura 50* se presenta una imagen del corazón tomada por resonancia magnética.



Figura 50: Resonancia magnética de corazón en reposo y tras un esfuerzo dinámico

A partir de la resonancia magnética aparece la técnica **zHARP** [26] que usa métodos de captura que proporcionan información de la función cardíaca para identificar infartos de miocardio. Obtiene información tridimensional del tensor de deformación y los vectores de desplazamiento en cualquier punto del material mediante el uso de imágenes 2D tomadas por resonancia magnética.

Debido a que el tensor de deformaciones posee demasiada información para visualizar e interpretar, en la práctica es preferible representar los tensores en índices escalares (como el índice de anisotropía, FA) [26]. Estos índices se derivan del tensor de deformación en un sistema de coordenadas con la orientación del miocardio.

En la *Figura 51* se puede ver las imágenes tomadas por este método de una arteria de cerdo con una zona infartada y una zona sana (a) y el índice de anisotropía de la misma sección.

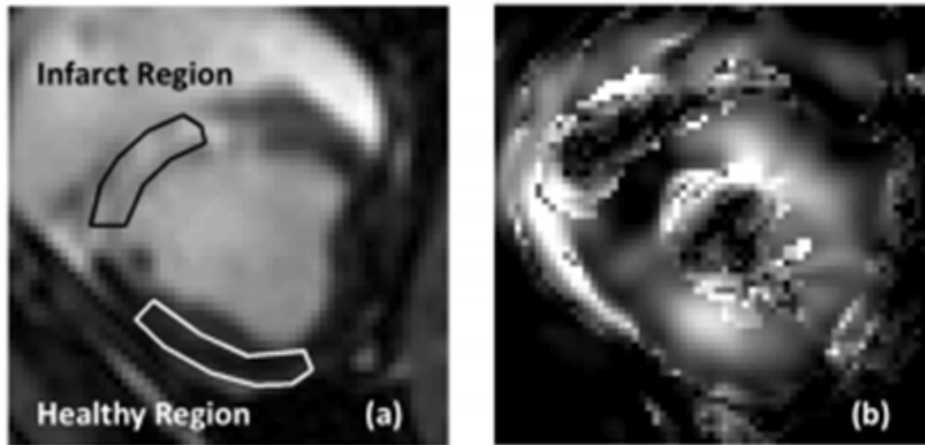


Figura 51: Resonancia (a) Arteria en media diástole, marcando zona infartada y zona sana. (b) Índice de de anisotropía al final de la sístole. [26]

La mayoría de estas herramientas se encuentran con limitaciones como la falta de resolución y no se consigue información muy precisa de espesores.

ANEXO 3: Geometría

Las ecuaciones finales, que se han obtenido para modelar la geometría de la placa siguiendo el modelo de Glagov [16], son las siguientes:

Geometría de 13 mm

R_{13} Lumen (x)

$$= -9,201 \cdot 10^{-15} \cdot x^5 - 5,753 \cdot 10^{-4} \cdot x^4 + 1,496 \cdot 10^{-2} \cdot x^3 - 9,723 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + 2,044 \text{ (Ec. 13)}$$

$$R_{13} \text{ Placa}(x) = -1,114 \cdot 10^{-14} \cdot x^5 + 4,952 \cdot 10^{-4} \cdot x^4 - 1,288 \cdot 10^{-2} \cdot x^3 + 8,369 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + 2,044 \text{ (Ec. 14)}$$

$$R_{13} \text{ Media}(x) = -1,106 \cdot 10^{-14} \cdot x^5 + 4,487 \cdot 10^{-4} \cdot x^4 - 1,167 \cdot 10^{-2} \cdot x^3 + 7,583 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + 2,344 \text{ (Ec. 15)}$$

$$R_{13} \text{ Adv}(x) = -1,099 \cdot 10^{-14} \cdot x^5 + 4,089 \cdot 10^{-4} \cdot x^4 - 1,063 \cdot 10^{-2} \cdot x^3 + 6,911 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + 2,644 \text{ (Ec. 16)}$$

$$\text{Centro}_{13}(x) = -1,099 \cdot 10^{-14} \cdot x^5 + 4,089 \cdot 10^{-4} \cdot x^4 - 1,063 \cdot 10^{-2} \cdot x^3 + 6,911 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 \text{ (Ec. 17)}$$

$\text{Centro}_{213}(x)$

$$= -1,099 \cdot 10^{-14} \cdot x^5 + 4,089 \cdot 10^{-4} \cdot x^4 - 1,063 \cdot 10^{-2} \cdot x^3 + 6,911 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 \text{ (Ec. 18)}$$

Geometría de 15 mm

R_{15} Lumen (x)

$$= -5,539 \cdot 10^{-14} \cdot x^5 - 3,246 \cdot 10^{-4} \cdot x^4 + 9,737 \cdot 10^{-2} \cdot x^3 - 7,303 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + 2,044 \text{ (Ec. 19)}$$

$$R_{15} \text{ Placa}(x) = -6,169 \cdot 10^{-14} \cdot x^5 + 2,794 \cdot 10^{-4} \cdot x^4 - 8,382 \cdot 10^{-3} \cdot x^3 + 6,286 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + 2,044 \text{ (Ec. 20)}$$

$$R_{15} \text{ Media}(x) = -6,141 \cdot 10^{-14} \cdot x^5 + 2,532 \cdot 10^{-4} \cdot x^4 - 7,595 \cdot 10^{-3} \cdot x^3 + 5,696 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + 2,344 \text{ (Ec. 21)}$$

$$R_{15} \text{ Adv}(x) = -6,118 \cdot 10^{-14} \cdot x^5 + 2,307 \cdot 10^{-4} \cdot x^4 - 6,921 \cdot 10^{-3} \cdot x^3 + 5,191 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + 2,644 \text{ (Ec. 22)}$$

$$\text{Centro}_{15}(x) = -6,118 \cdot 10^{-14} \cdot x^5 + 2,307 \cdot 10^{-4} \cdot x^4 - 6,921 \cdot 10^{-3} \cdot x^3 + 5,191 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 \text{ (Ec. 23)}$$

$\text{Centro}_{215}(x)$

$$= -5,488 \cdot 10^{-14} \cdot x^5 - 3,733 \cdot 10^{-4} \cdot x^4 + 1,1198 \cdot 10^{-2} \cdot x^3 - 8,398 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 \text{ (Ec. 24)}$$

Geometría de 20 mm

R_{20} Lumen (x)

$$= 3,778 \cdot 10^{-13} \cdot x^5 - 1,027 \cdot 10^{-4} \cdot x^4 + 4,108 \cdot 10^{-3} \cdot x^3 - 4,108 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + 2,044 \text{ (Ec. 25)}$$

$$R_{20} \text{ Placa}(x) = 3,706 \cdot 10^{-13} \cdot x^5 + 8,84 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 - 3,536 \cdot 10^{-3} \cdot x^3 + 3,536 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + 2,044 \text{ (Ec. 26)}$$

$$R_{20} \text{ Media}(x) = 3,709 \cdot 10^{-13} \cdot x^5 + 8,01 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 - 3,204 \cdot 10^{-3} \cdot x^3 + 3,204 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + 2,344 \text{ (Ec. 27)}$$

$$R_{20} \text{ Adv}(x) = 3,712 \cdot 10^{-13} \cdot x^5 + 7,3 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 - 2,92 \cdot 10^{-3} \cdot x^3 + 2,92 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + 2,644 \text{ (Ec. 28)}$$

$$\text{Centro}_{20}(x) = 3,712 \cdot 10^{-13} \cdot x^5 + 7,3 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 - 2,92 \cdot 10^{-3} \cdot x^3 + 2,92 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 \text{ (Ec. 29)}$$

Centro_{20} (x)

$$= 3,784 \cdot 10^{-13} \cdot x^5 - 1,181 \cdot 10^{-4} \cdot x^4 + 4,724 \cdot 10^{-3} \cdot x^3 - 4,727 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 \text{ (Ec. 30)}$$

ANEXO 4: Modelos Geométricos

En este Anexo se muestran todos los modelos realizados y ensamblados en SolidWorks, además del modelo mallado. A continuación, se distinguen las diferentes geometrías dividiéndolas por longitud de núcleo lipídico. Sólo se ha modelado un cuarto de la geometría, hecho que se ha de tener en cuenta al visualizar las cotas.

- **Placa de 20 mm con núcleo de 17.5 mm (7/8):**

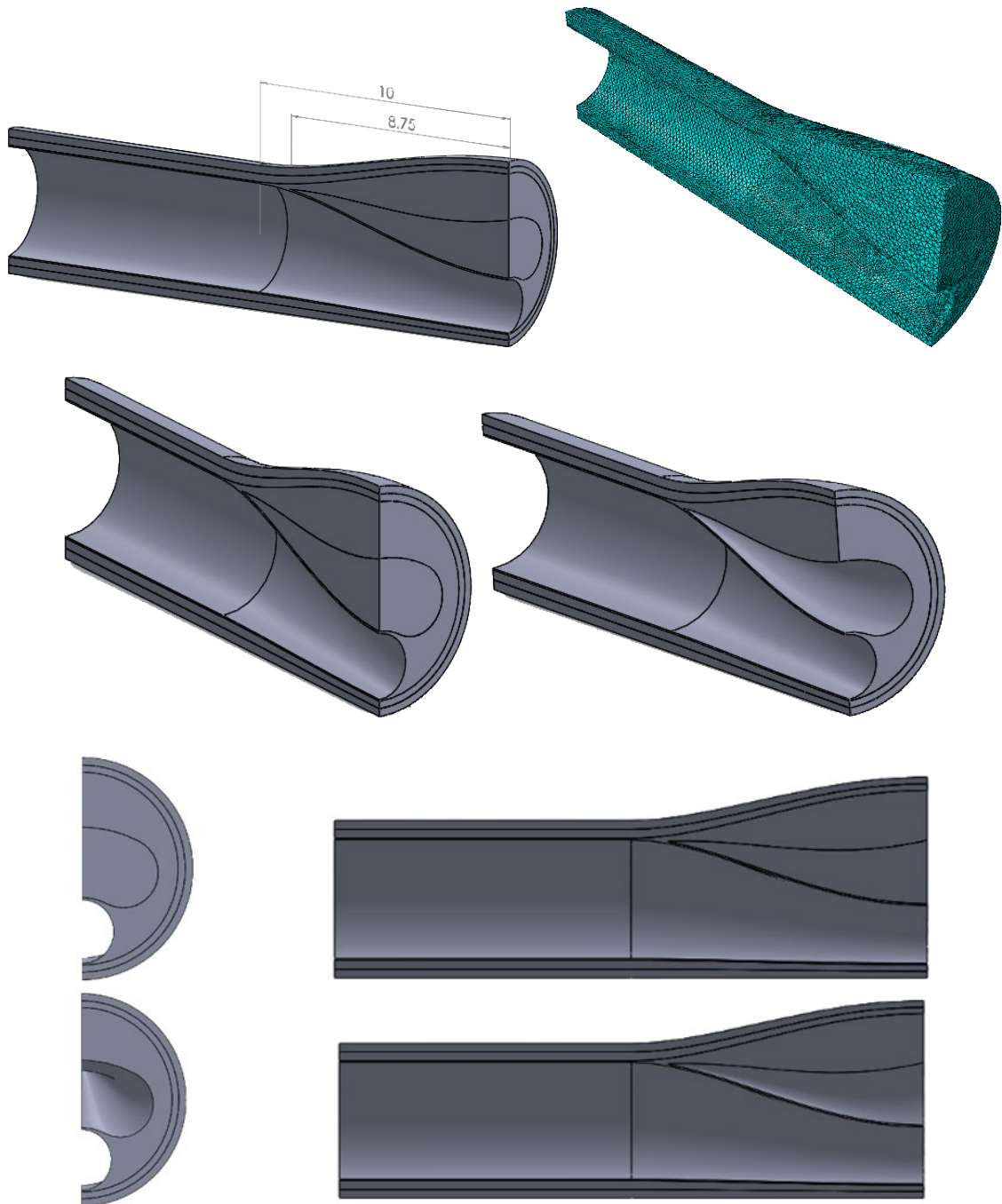


Figura 52: Vistas del Modelo de placa 20 mm con núcleo de 17.5 mm

- Placa de 20 mm con núcleo de 15 mm (3/4):

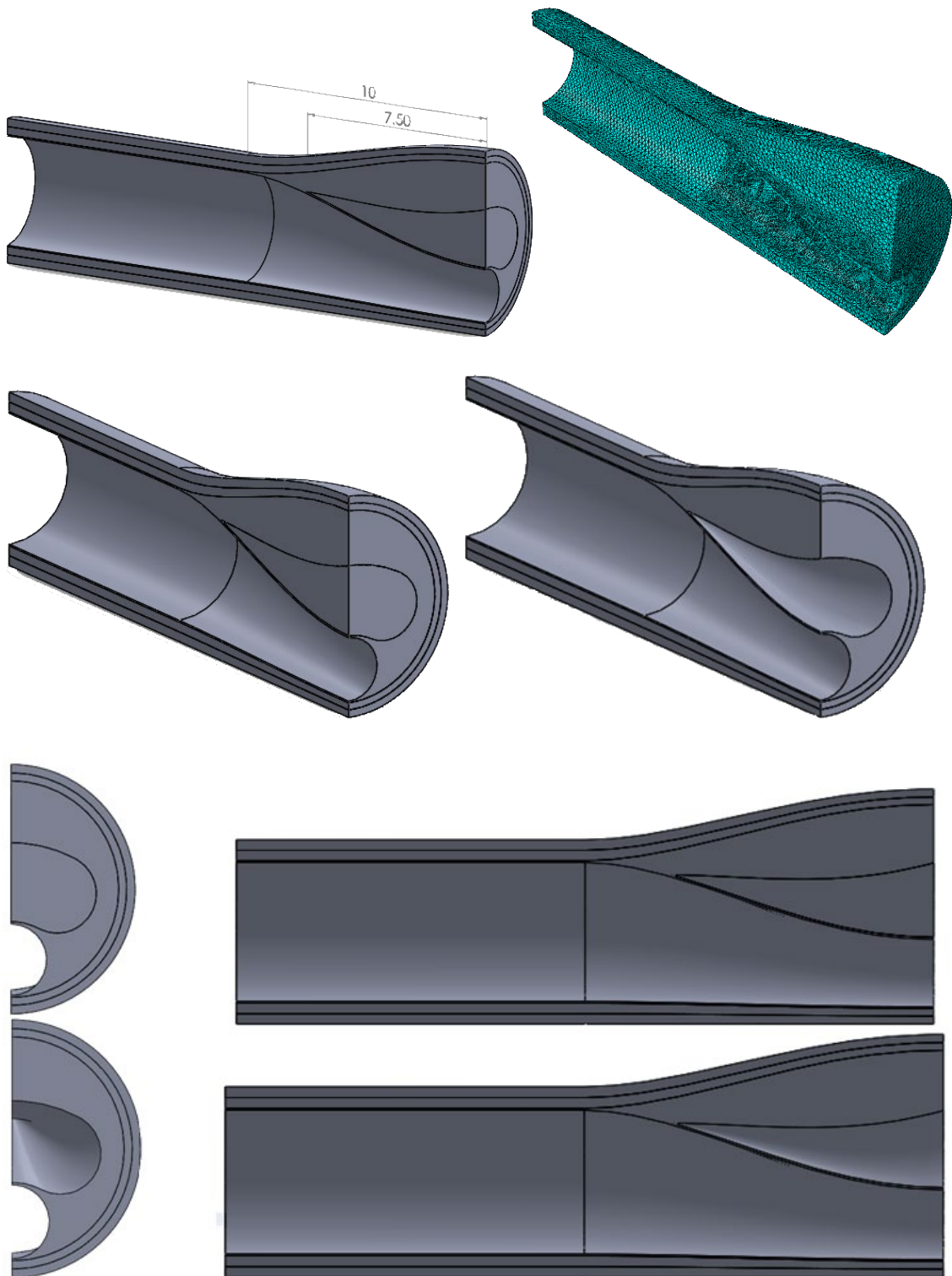


Figura 53: Vistas del Modelo de placa 20 mm con núcleo de 15 mm

- Placa de 20 mm con núcleo de 10 mm (1/2):

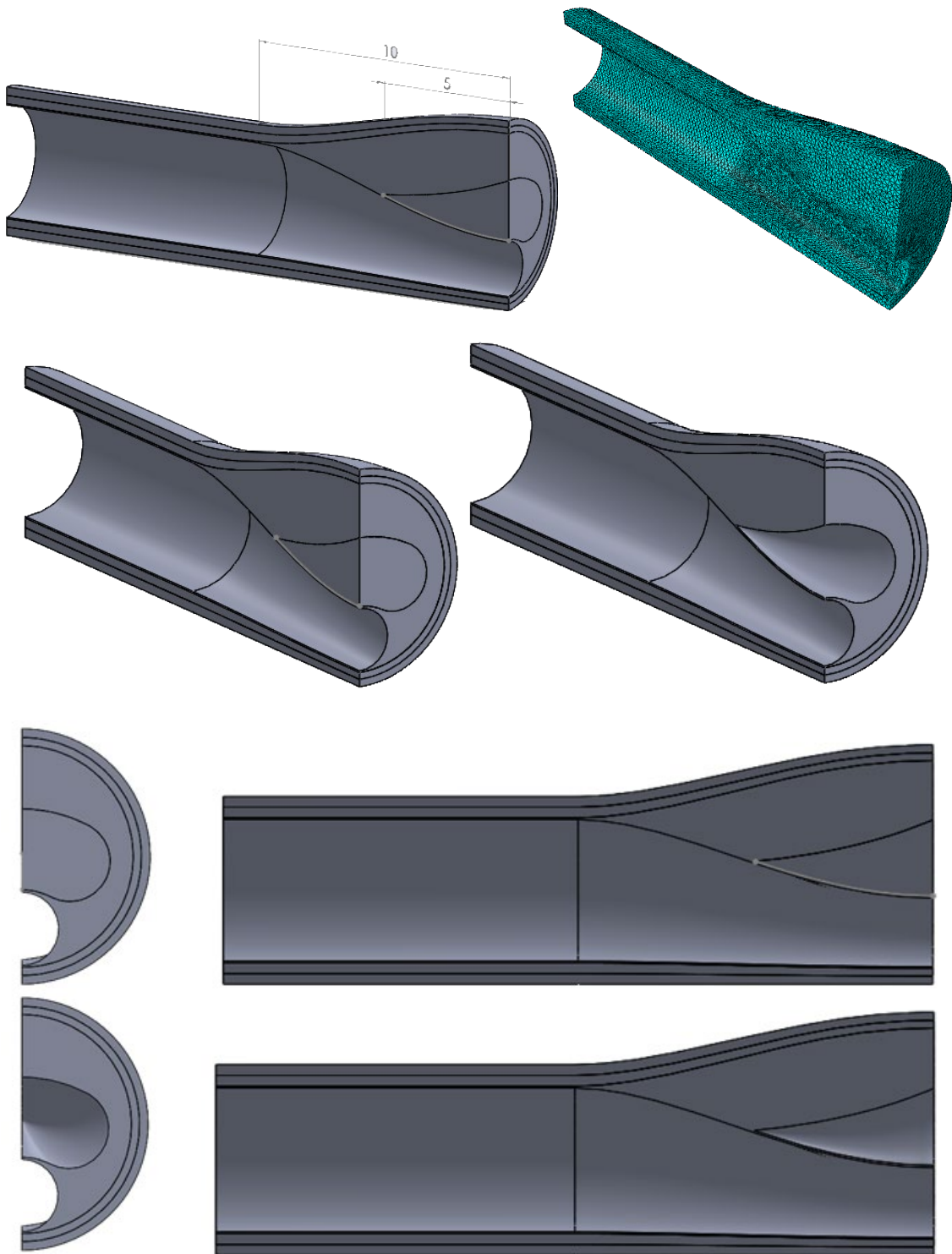


Figura 54: Vistas del Modelo de placa 20 mm con núcleo de 10 mm

- **Placa de 15 mm con núcleo de 13.125 mm (7/8):**

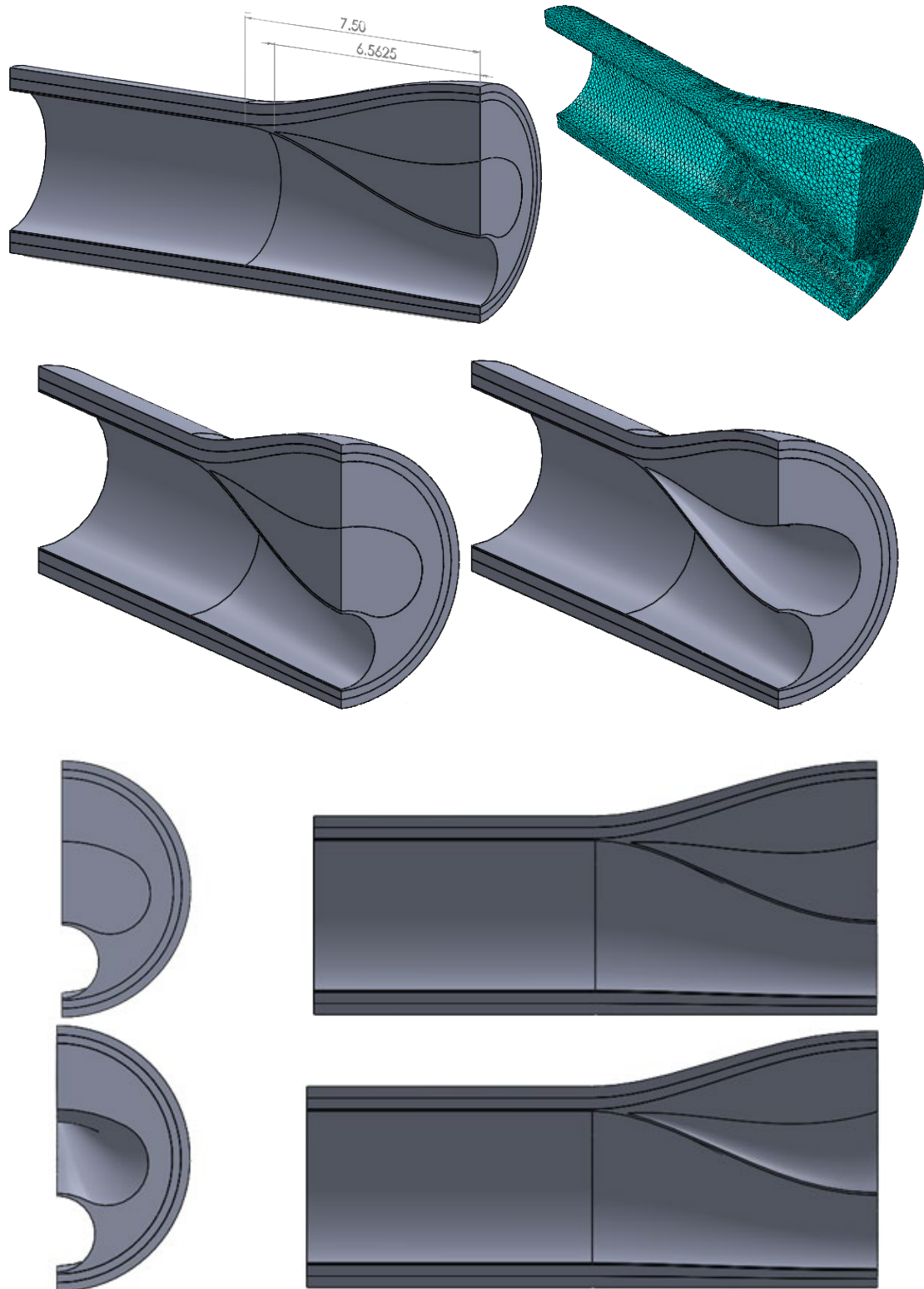


Figura 55: Vistas del Modelo de placa 15 mm con núcleo de 13.125 mm

- Placa de 15 mm con núcleo de 11.25 mm (3/4):

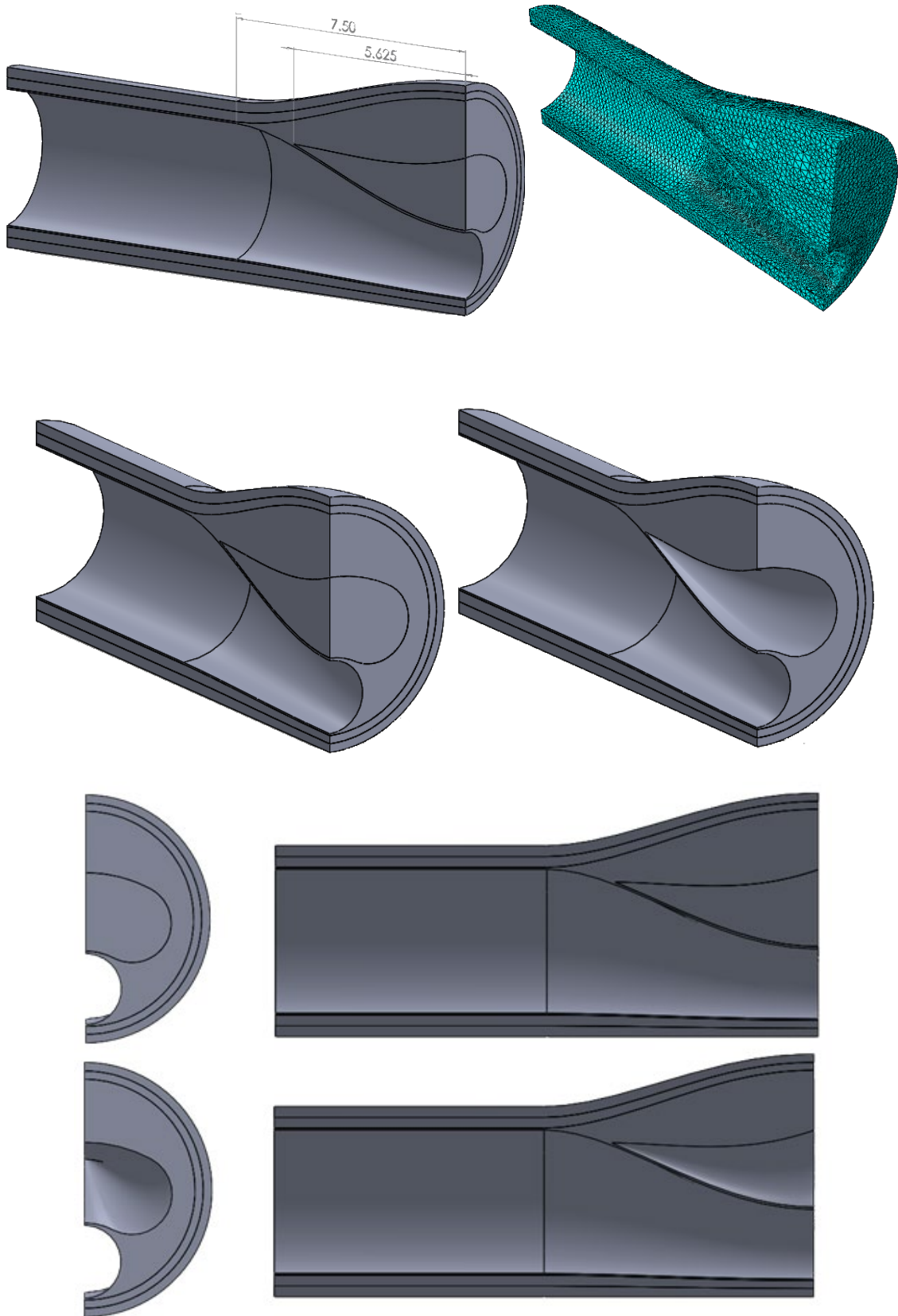


Figura 56: Vistas del Modelo de placa 15 mm con núcleo de 11.25 mm

- Placa de 15 mm con núcleo de 7.5 mm (1/2):

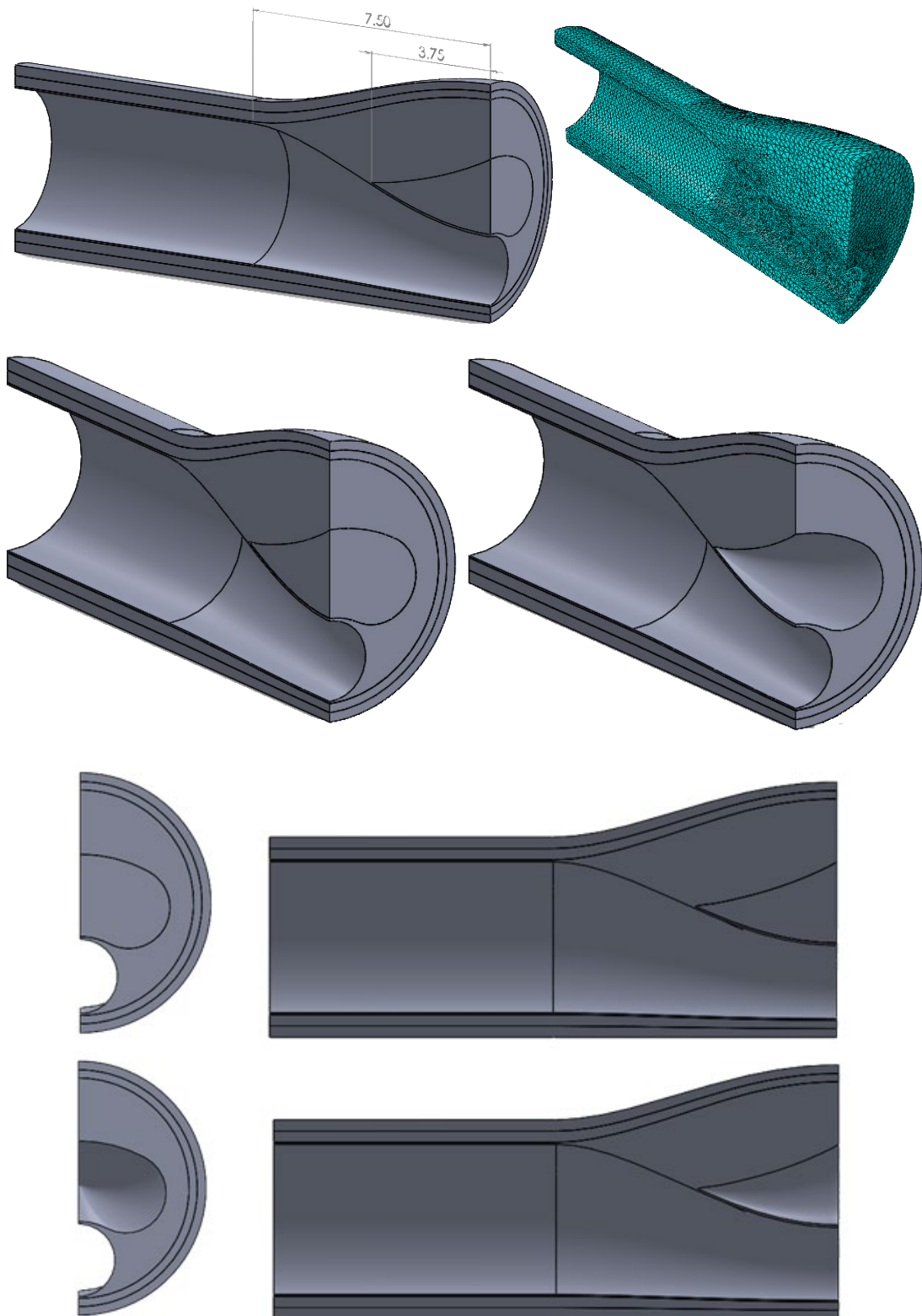


Figura 57: Vistas del Modelo de placa 15 mm con núcleo de 7.5 mm

- Placa de 13 mm con núcleo de 11.375 mm (7/8):

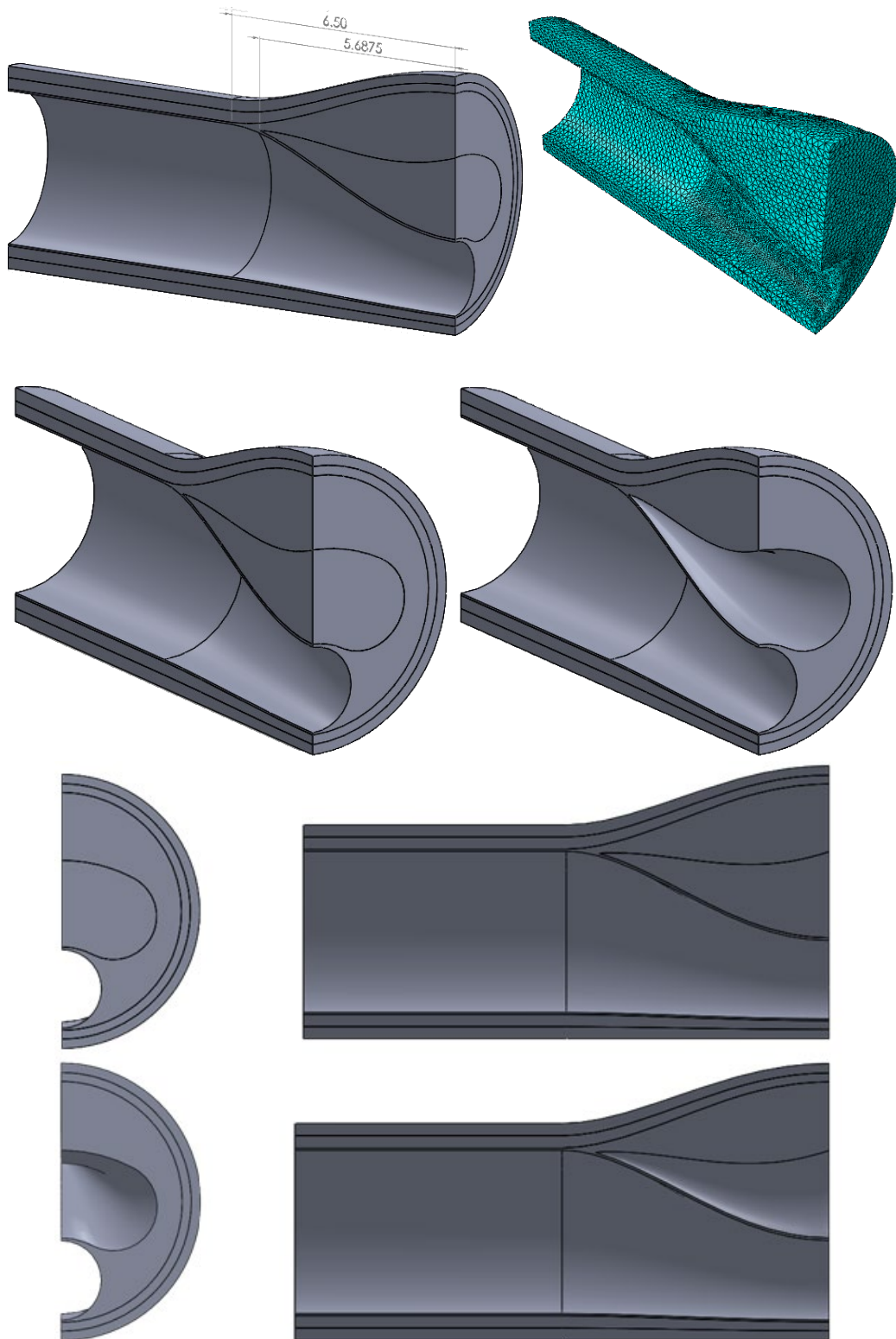


Figura 58: Vistas del Modelo de placa 13 mm con núcleo de 11.375 mm

- **Placa de 13 mm con núcleo de 9.75 mm (3/4):**

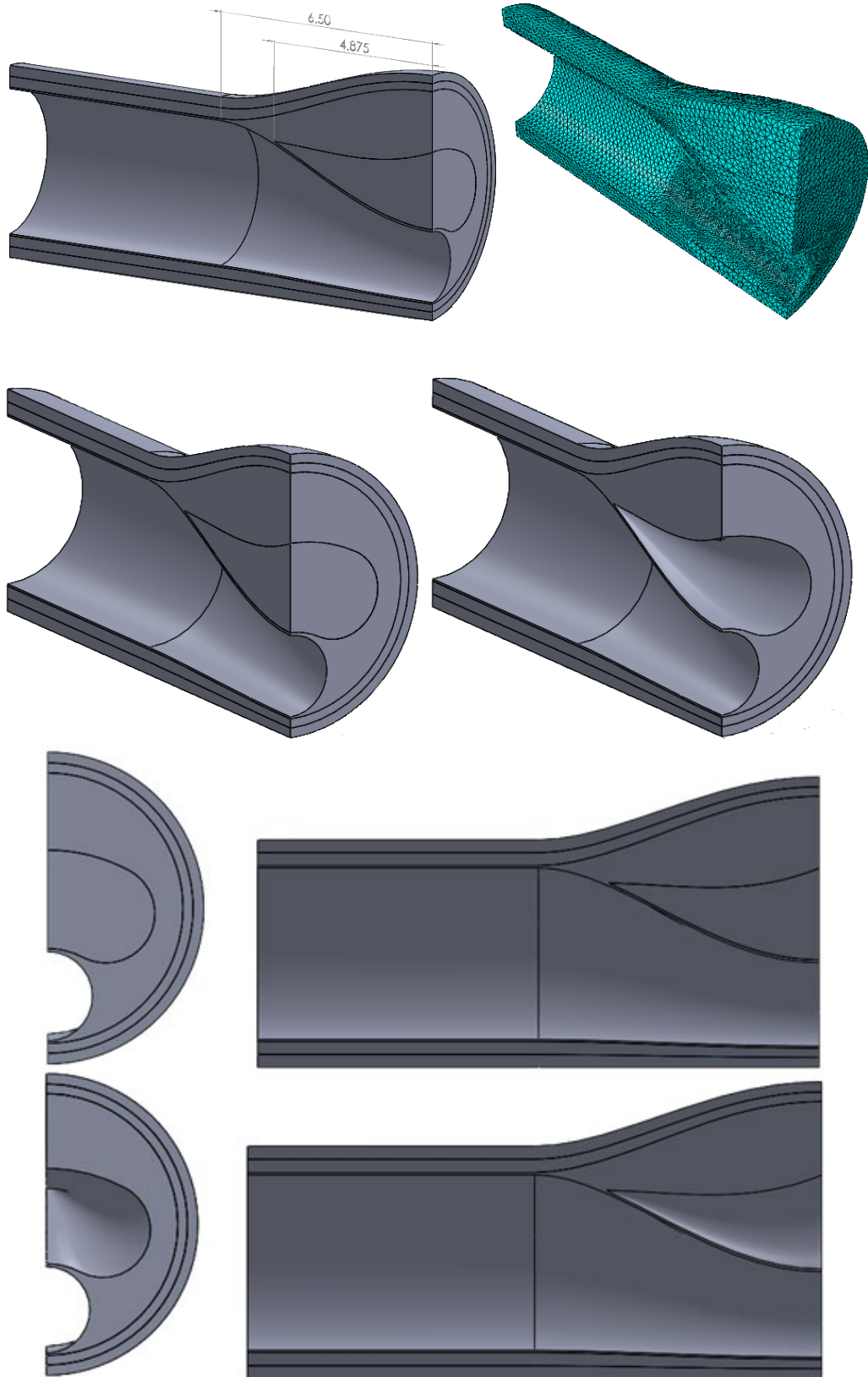


Figura 59: Vistas del Modelo de placa 13 mm con núcleo de 9.75 mm

- Placa de 13 mm con núcleo de 6.5 mm (1/2):

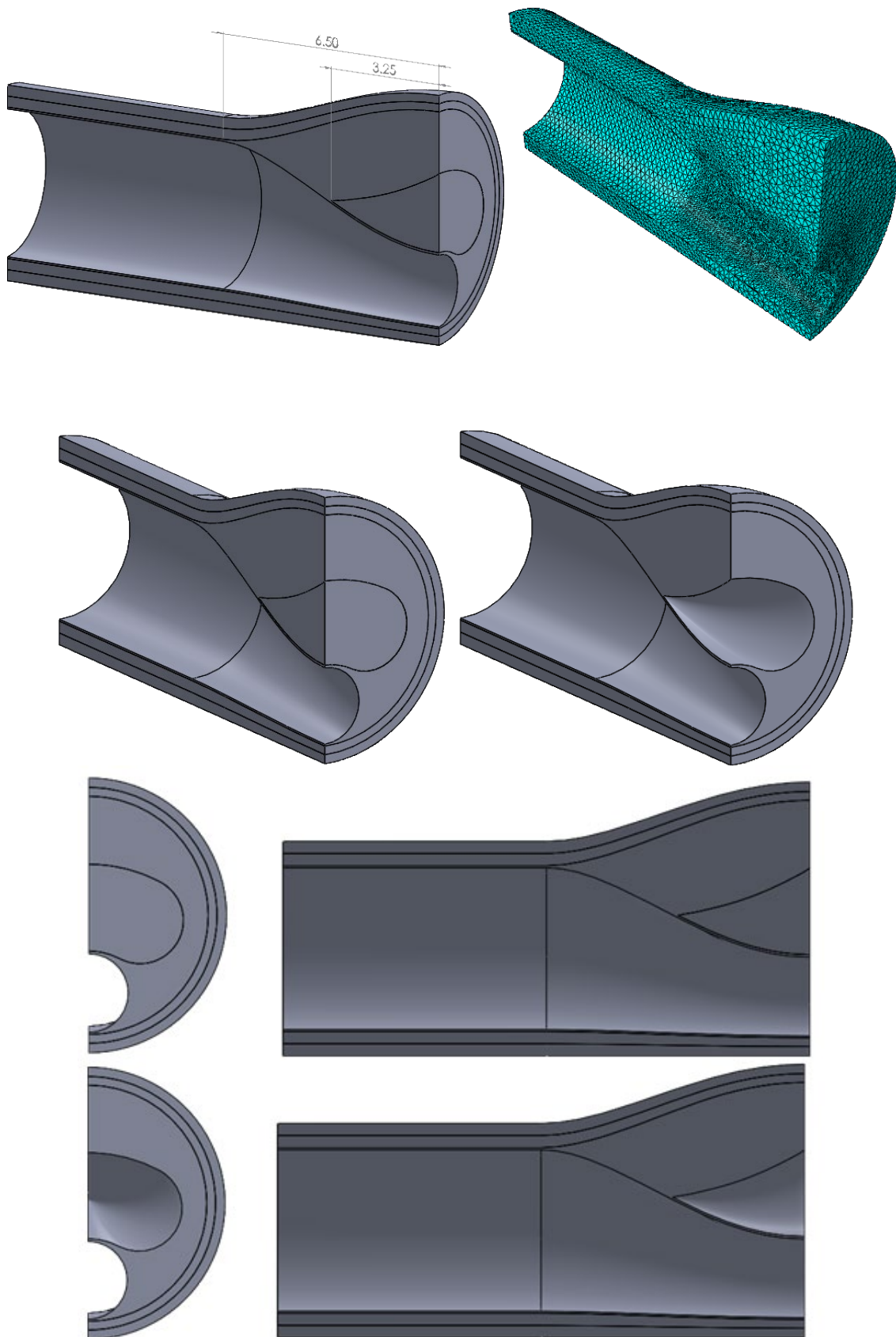


Figura 60: Vistas del Modelo de placa 13 mm con núcleo de 6.5 mm

ANEXO 5: De SolidWorks a Abaqus CAE

Para poder pasar el modelo de SolidWorks al programa Abaqus primeramente se ha de tener el modelo perfectamente ensamblado en SolidWorks y sin ninguna interferencia entre las diferentes partes.

Una vez el ensamblaje esté completamente definido (sin movimientos relativos ente las diferentes partes) se guarda como formato ".x_t". El siguiente paso es importar el ensamblaje desde Abaqus.

Tras ser importado aparecen todas las partes por separado (adventicia, media, placa y núcleo), para unirlas y formar una única parte procedemos a usar la herramienta *Merge/Cut* [1] tal y como se muestra a continuación.

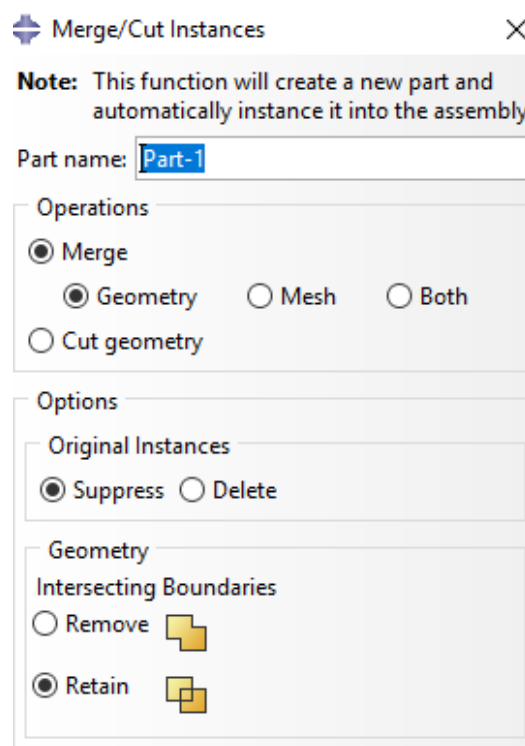


Figura 61: Merge/Cut

Tras esta operación ya es posible introducir los materiales e introducir condiciones de contorno y cargas.

ANEXO 6: Modelo Hiperelástico en Abaqus

Todos los tejidos han sido modelados como no lineales, hiperelásticos e incompresibles [24]. Tanto el núcleo lipídico como la placa aterosclerótica han sido consideradas como materiales isótropos. Por otro lado la adventicia y la media son anisótropos, con dos familias de fibras simétricas orientadas a $\pm 61,8^\circ$ y $\pm 28,35^\circ$, respecto a la dirección circunferencial, respectivamente. En la *Figura 62* se puede observar la imposición de orientación de las fibras de la adventicia.

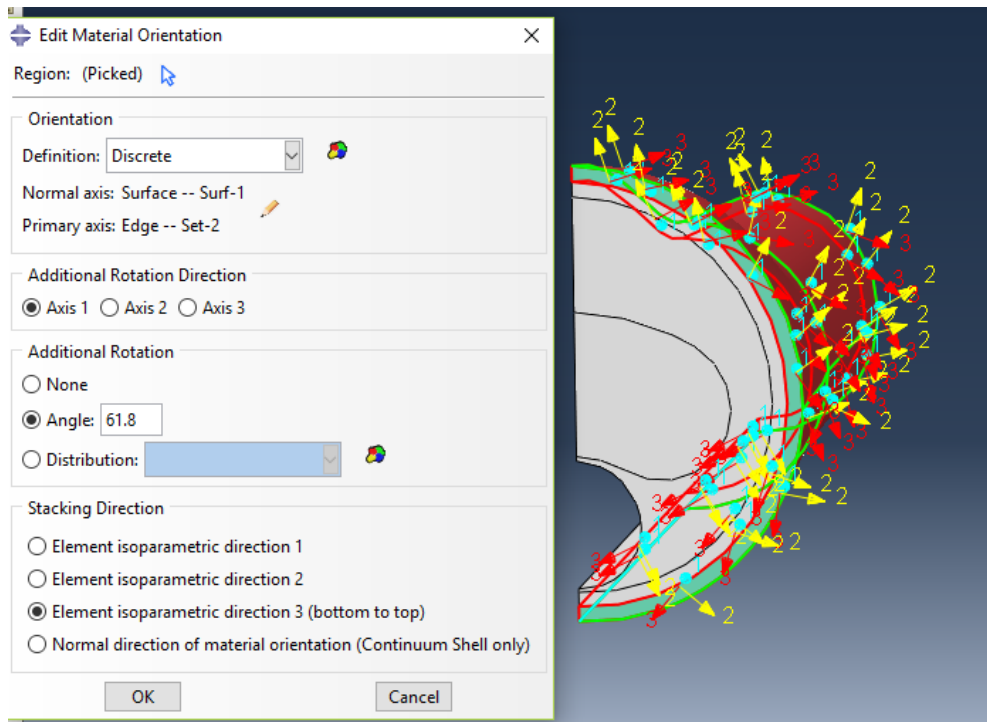


Figura 62: Orientación de fibras para la adventicia

El comportamiento de estos tejidos es definido por la función de energía de deformación de Gasser [1, 24].

$$\psi = \mu[I_1 - 3] + \frac{k_1}{2k_2} \left[\left[\exp \left(k_2 [\kappa[I_1 - 3] + [1 - 3\kappa][I_4 - 1]]^2 \right) - 1 \right] + \left[\exp \left(k_2 [\kappa[I_1 - 3] + [1 - 3\kappa][I_6 - 1]]^2 \right) - 1 \right] \right] \quad (\text{Ec. 31})$$

Donde $\mu > 0$, k_1 y $k_2 > 0$ son parámetros de tensión, $0 < \kappa < \frac{1}{3}$ es un parámetro adimensional, indica la dispersión de las fibras, si su valor es $\frac{1}{3}$ el material es isótropo [23] y si $k=0$ significa que no hay dispersión.

Por otro lado I_1 es el primer invariante del tensor de deformación, I_4 e I_6 son invariantes que dependen de la dirección de las familias de fibras del material [23].

Los materiales se introducen en Abaqus CAE tal y como se observa en la siguiente figura:

Material Behaviors

Hyperelastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Hyperelastic

Material type: Isotropic Anisotropic

Strain energy potential: Holzapfel

Number of field variables: 0

Number of local directions: 2

Moduli: Long term

Use temperature-dependent coefficient

	C10	D	k1	k2	kappa
1	8.44	0	547.67	538.01	0.26

Figura 63: Introducción de parámetros de los materiales para la adventicia

ANEXO 7: Comparativa entre sistemas de coordenadas

Las tensiones tangenciales se han calculado con un sistema de referencia rectangular, que aparece por defecto al importar la geometría de SolidWorks. Sin embargo las deformaciones tangenciales se han calculado en referencia a un sistema cilíndrico que ha tomado como origen el centro de lumen de la zona de mayor estenosis, tal y como se indica en la siguiente figura.

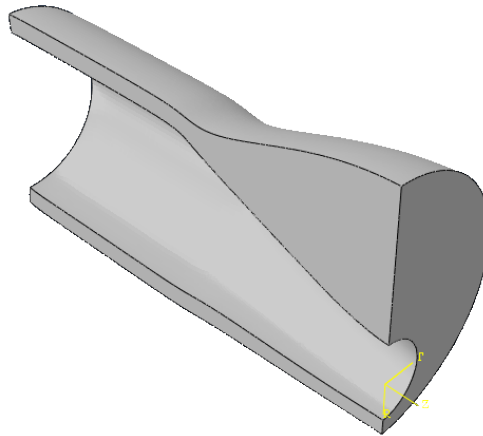


Figura 64: Sistema de referencia cilíndrico en una placa de 15 mm de longitud.

A continuación se muestran unas comparativas entre tensiones y deformaciones en los dos sistemas de coordenadas.

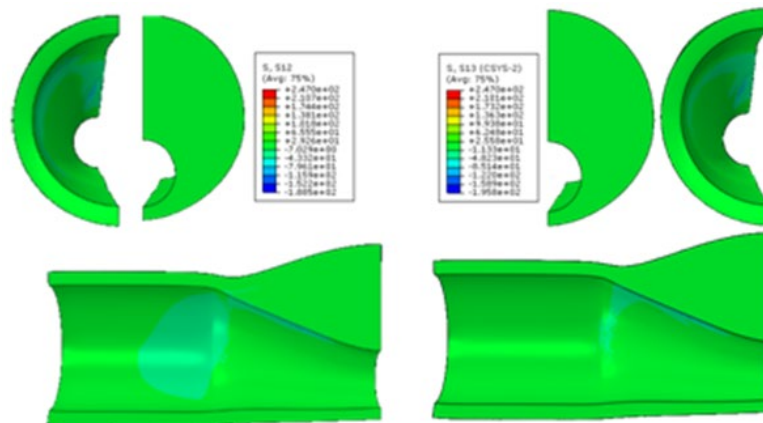


Figura 65: Tensiones XY (izquierda) y Tensiones RZ (derecha). Placa de 15 mm de longitud con núcleo de 11,25 mm

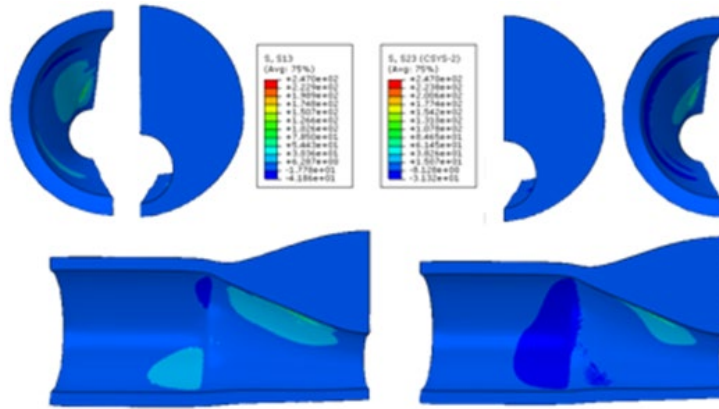


Figura 66: Tensiones YZ (izquierda) y Tensiones θZ (derecha). Placa de 15 mm de longitud con núcleo de 11,25 mm

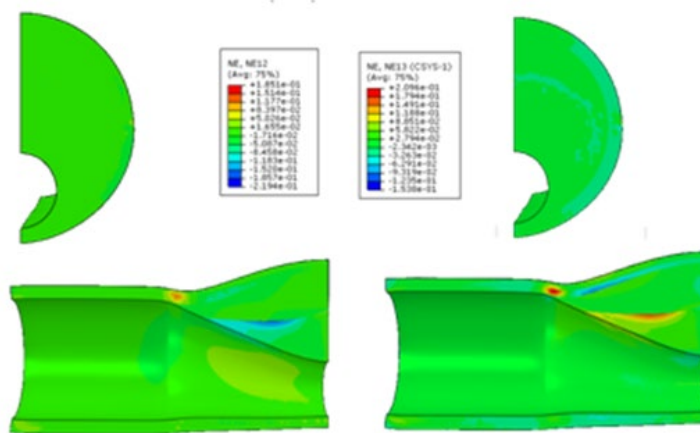


Figura 67: Deformaciones XY (izquierda) y Deformaciones RZ (derecha). Placa de 15 mm de longitud con núcleo de 11,25 mm

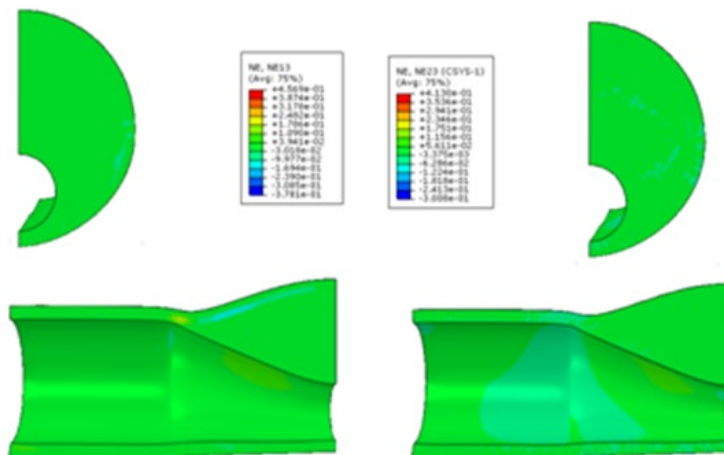


Figura 68: Deformaciones XZ (izquierda) y Tensiones θZ (derecha). Placa de 15 mm de longitud con núcleo de 11,25 mm

Tras observar las figuras anteriores se ha decidido representar las tensiones en el sistema rectangular porque su origen es próximo al sistema cilíndrico y la diferencia de representar en un sistema u otro era muy pequeña. Sin embargo, en

las deformaciones la diferencia entre sistemas de coordenadas era mayor y se ha optado por usar el sistema cilíndrico.

Además era más conveniente tener las deformaciones en cilíndricas ya que el IVUS suele obtener imágenes de las deformaciones en ese sistema de referencia, ya que en la sección central resulta más intuitivo.

ANEXO 8: Resultados

En las siguientes figuras se observan los resultados obtenidos tanto en campos de tensiones como en deformaciones. Todos los valores de las tensiones están expresados en kPa. En los mapas de deformaciones tangenciales hay límites con el fin de la mejor visualización de la segmentación.

- Placa de 20 mm y núcleo de 17,5 mm.

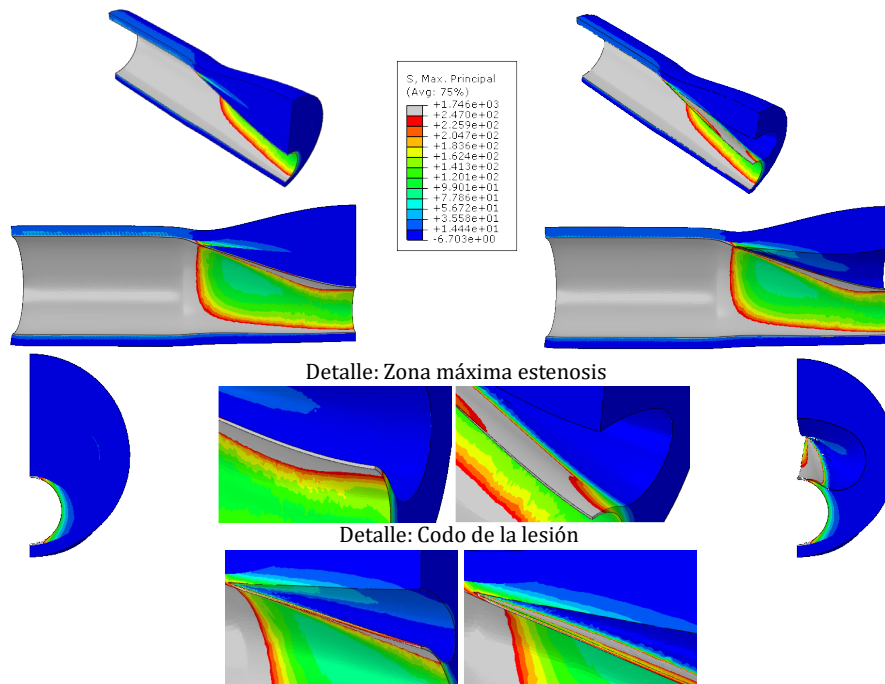


Figura 69: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 17,5 mm- Tensiones Principales Máximas

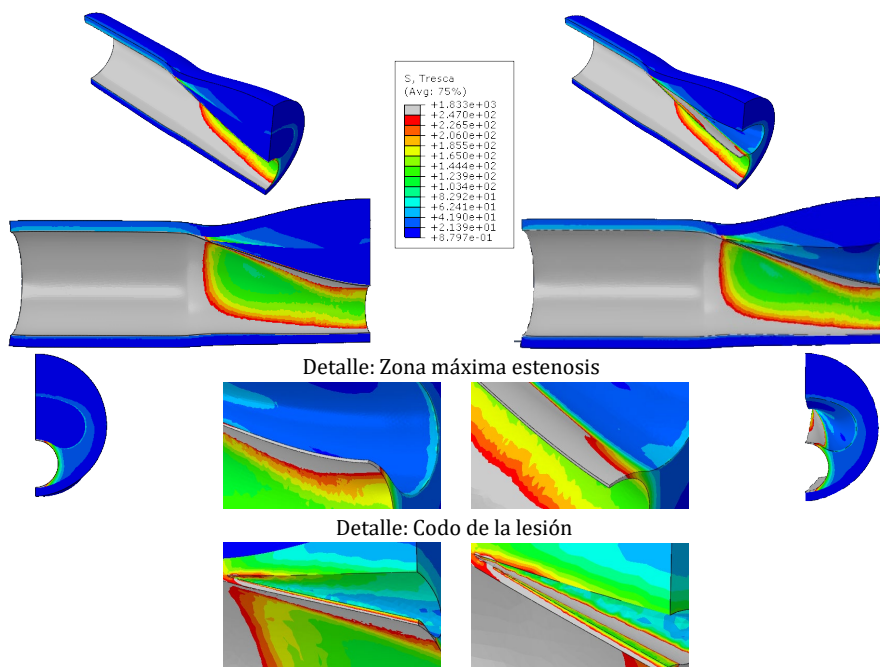


Figura 70: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 17,5 mm- Tensiones de Tresca

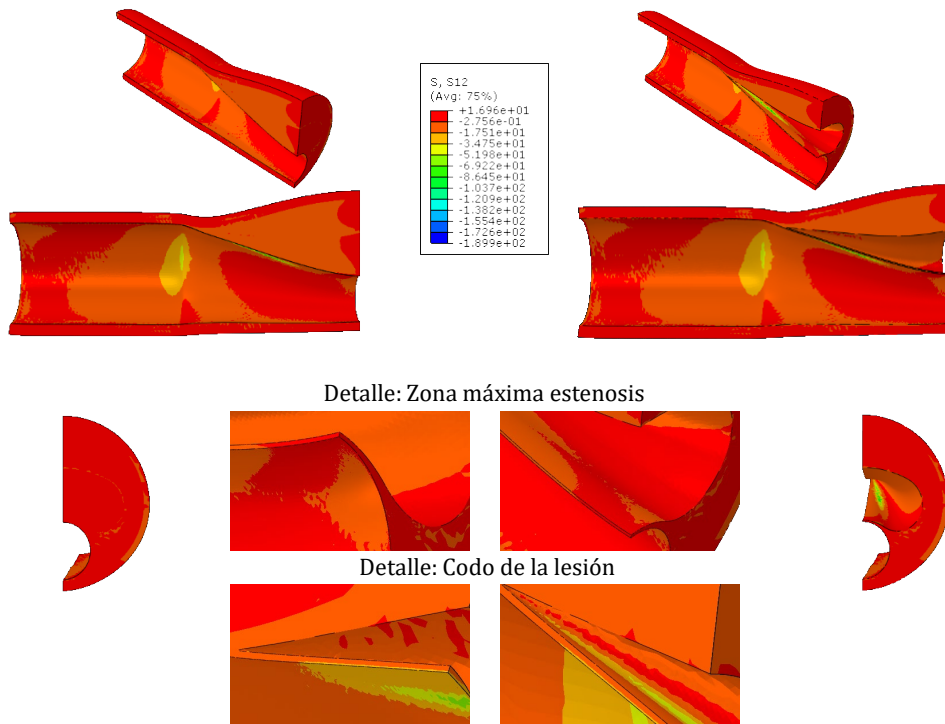


Figura 71: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 17,5 mm- Tensiones Tangenciales XY

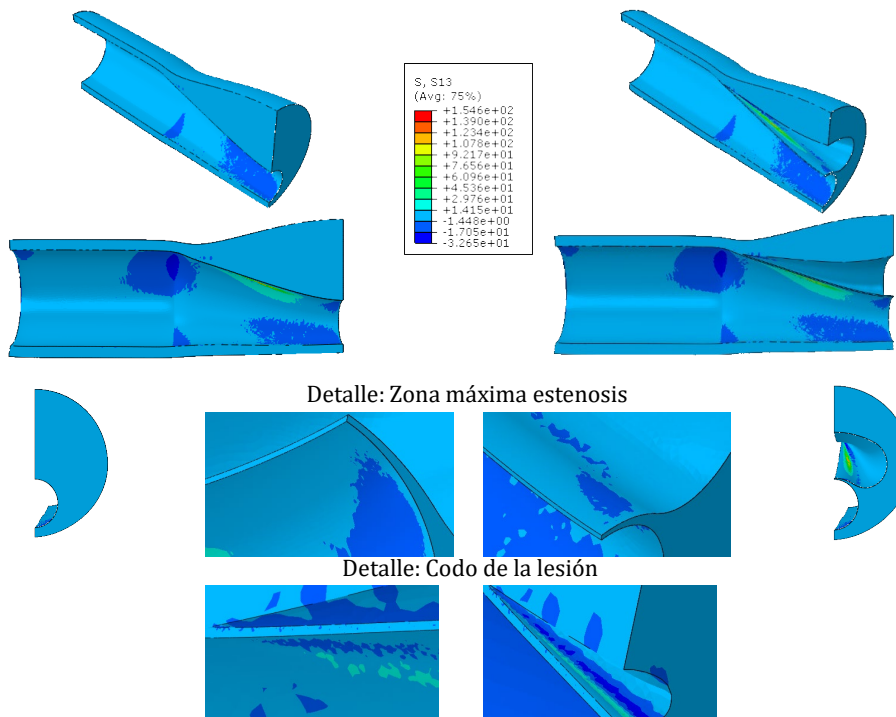


Figura 72: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 17,5 mm- Tensiones Tangenciales XZ

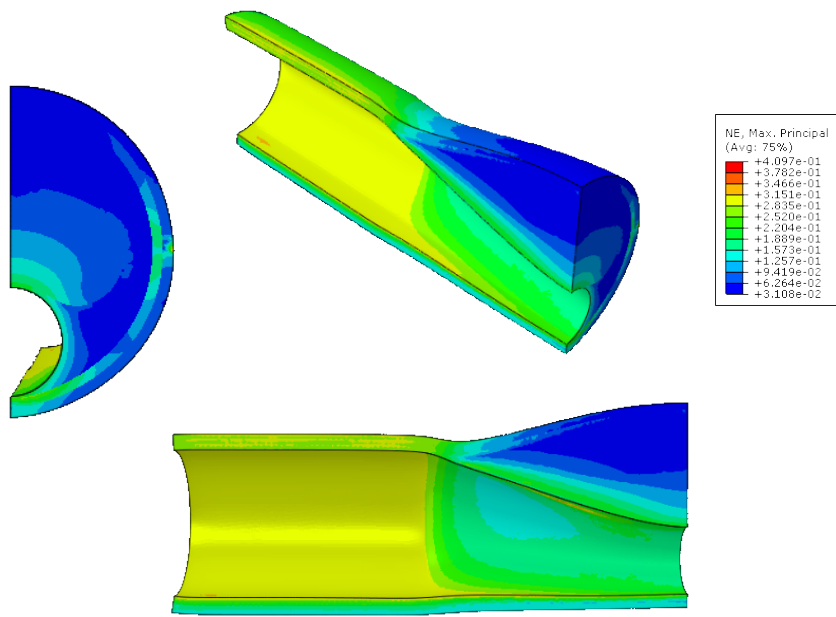


Figura 73: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 17,5 mm- Deformaciones Principales

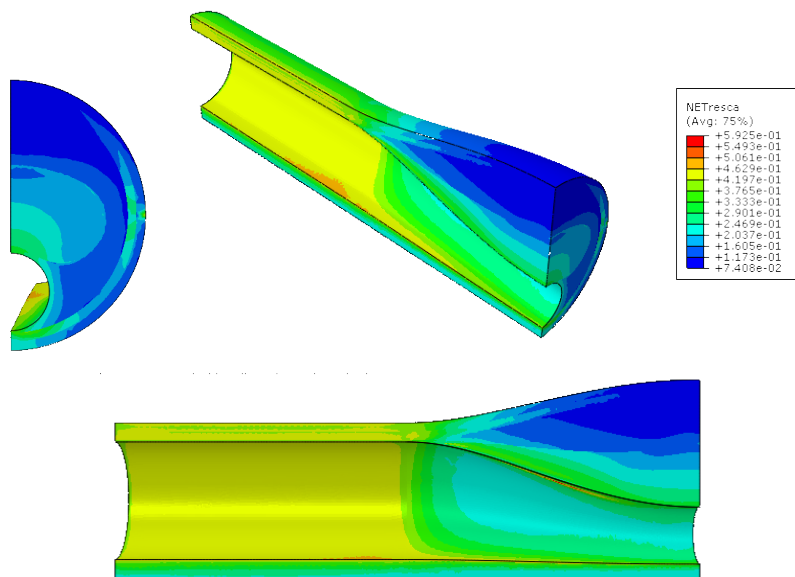


Figura 74: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 17,5 mm- Deformaciones criterio de Tresca

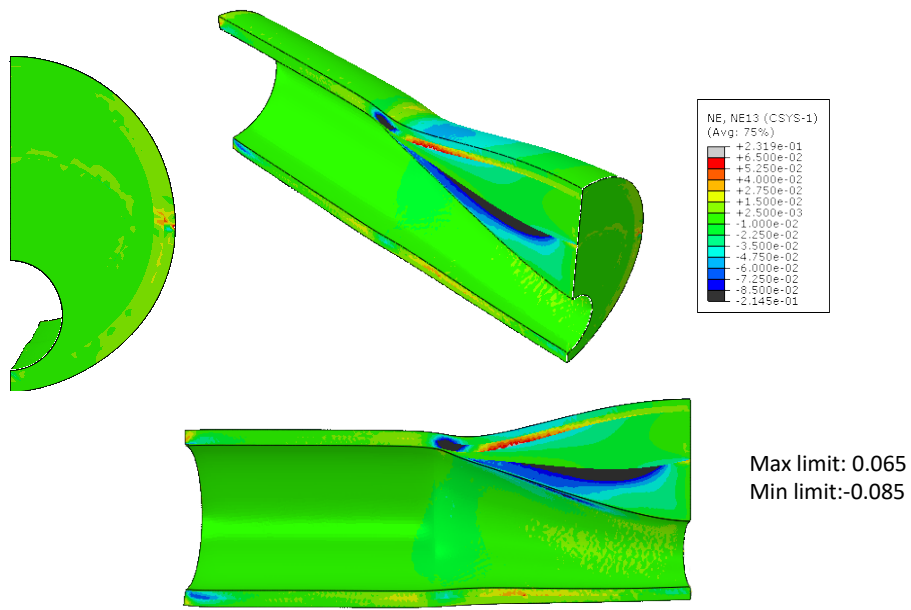


Figura 75: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 17,5 mm- Deformaciones tangenciales RZ

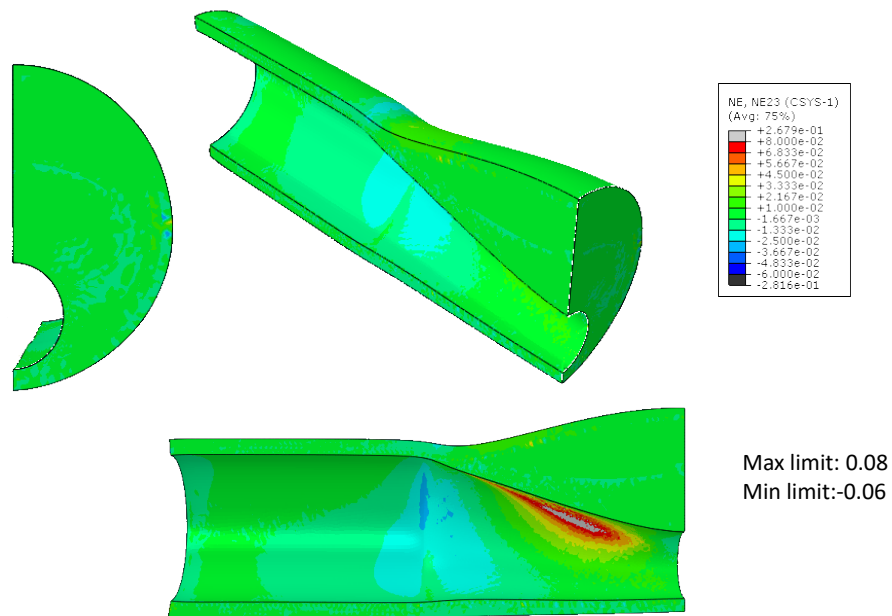


Figura 76: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 17,5 mm- Deformaciones tangenciales ΘZ

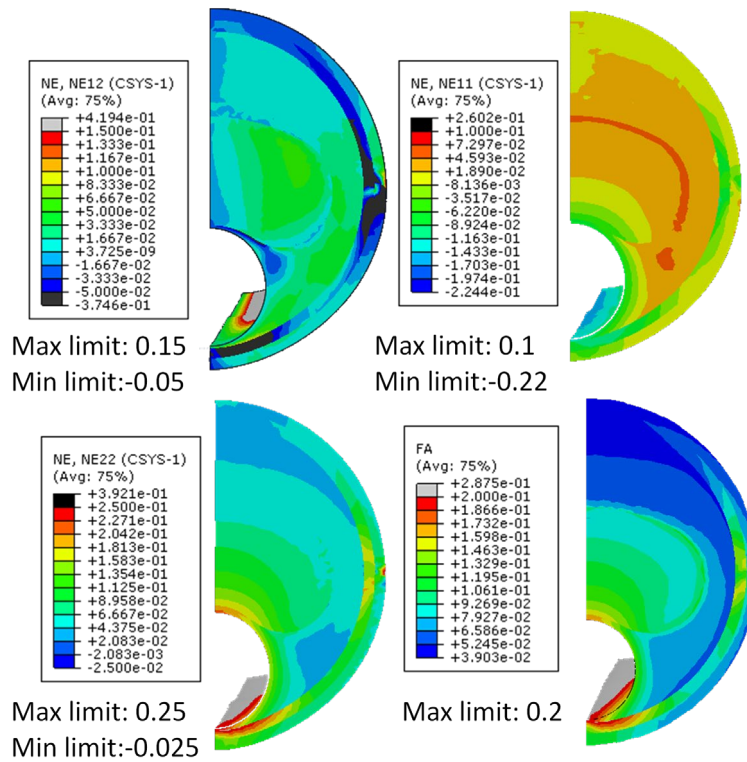


Figura 77: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 17,5 mm- Deformaciones tangenciales $R\theta$ / Deformaciones Tangenciales R / Deformaciones Tangenciales en θ / Índice de anisotropía

- Placa de 20 mm y núcleo de 15 mm.

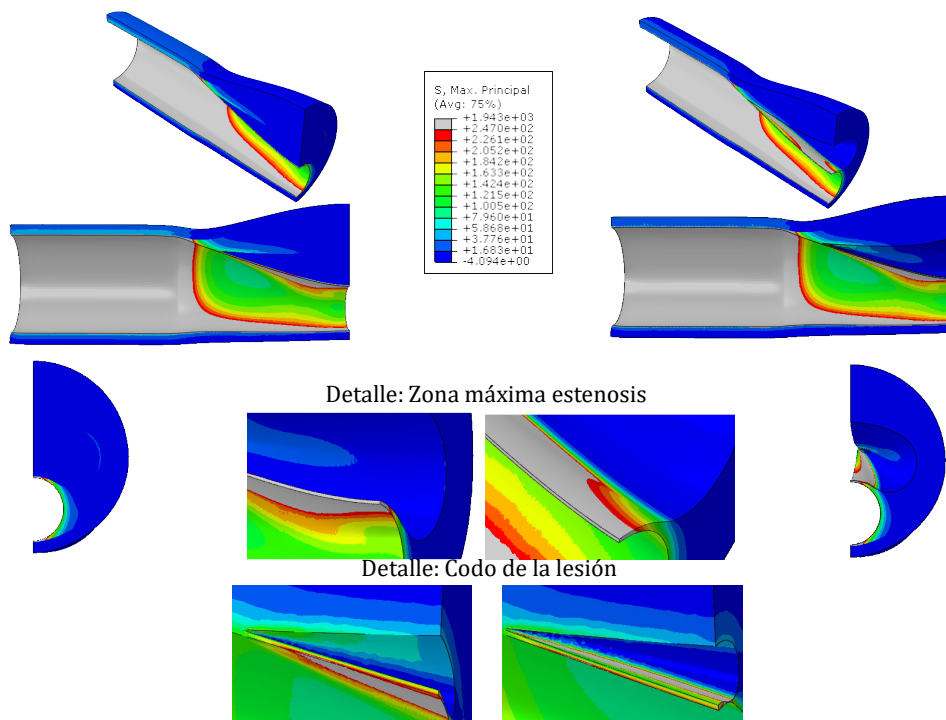


Figura 78: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 15 mm- Tensiones Principales Máximas

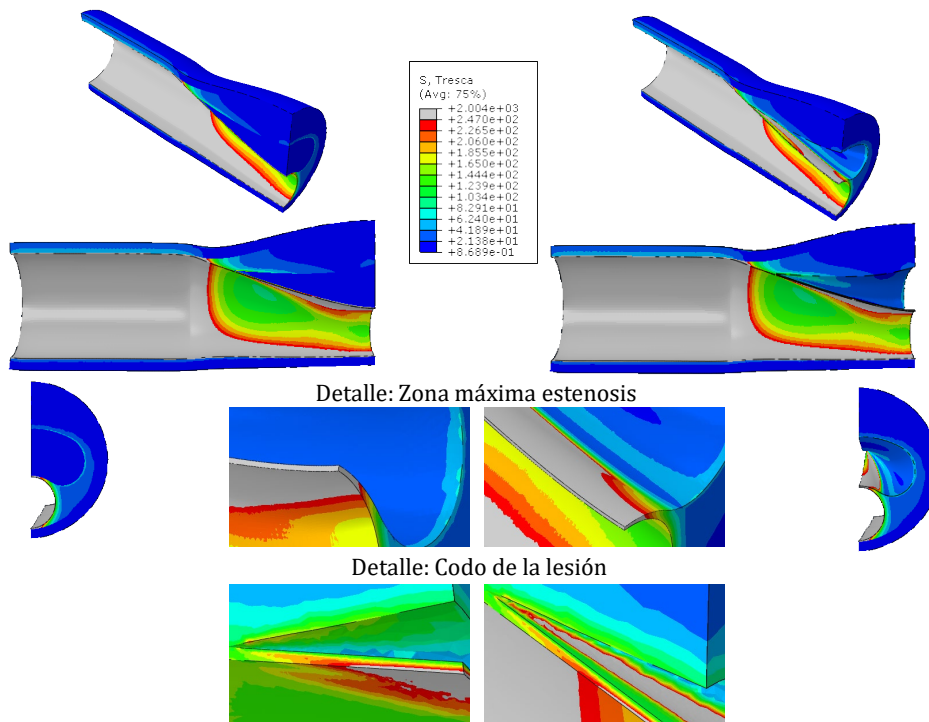


Figura 79: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 15 mm- Tensiones criterio de Tresca

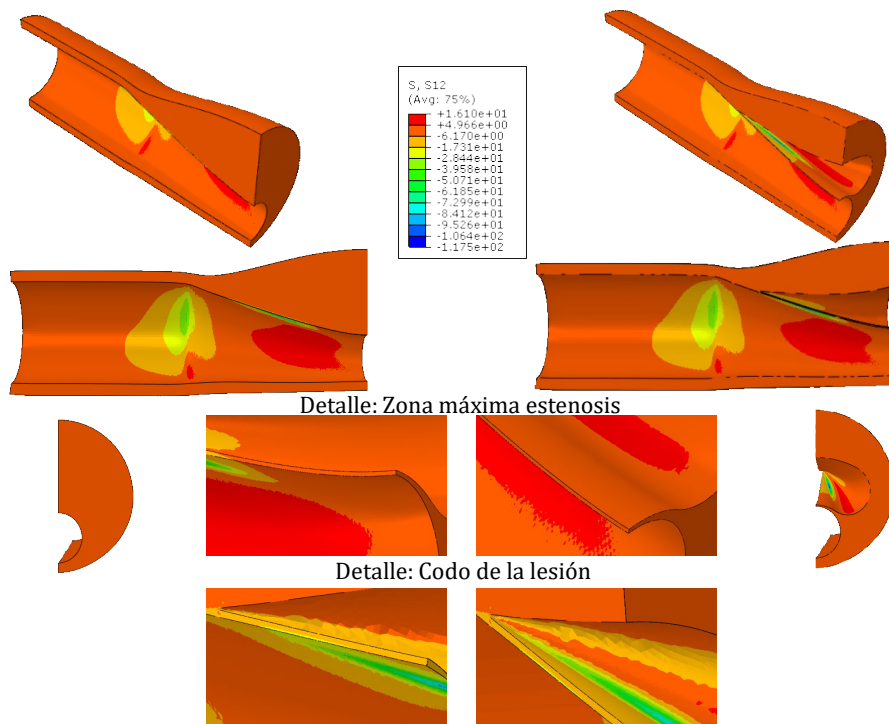


Figura 80: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 15 mm- Tensiones Tangenciales XY

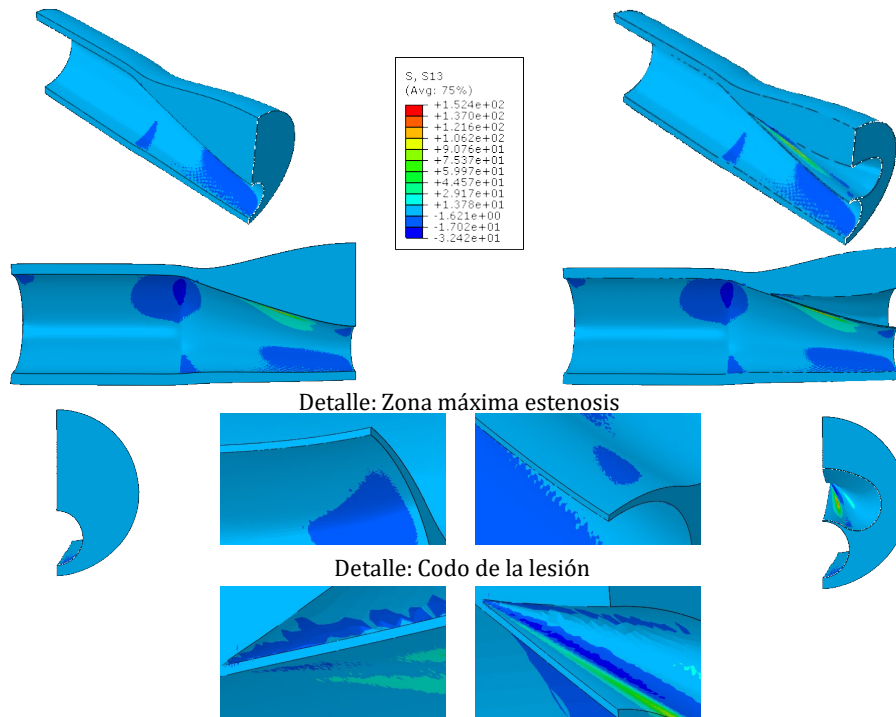


Figura 81: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 15 mm- Tensiones Tangenciales XZ

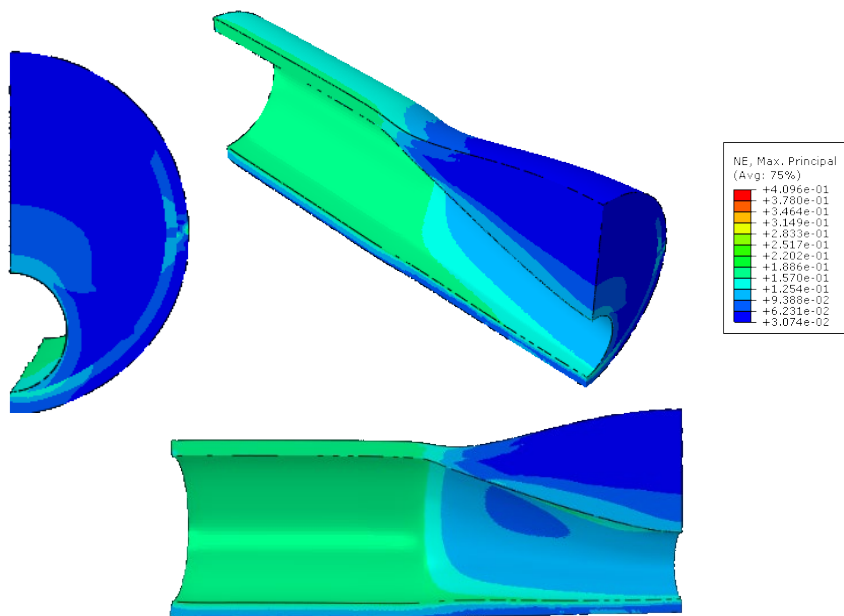


Figura 82: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 15 mm- Deformaciones Principales

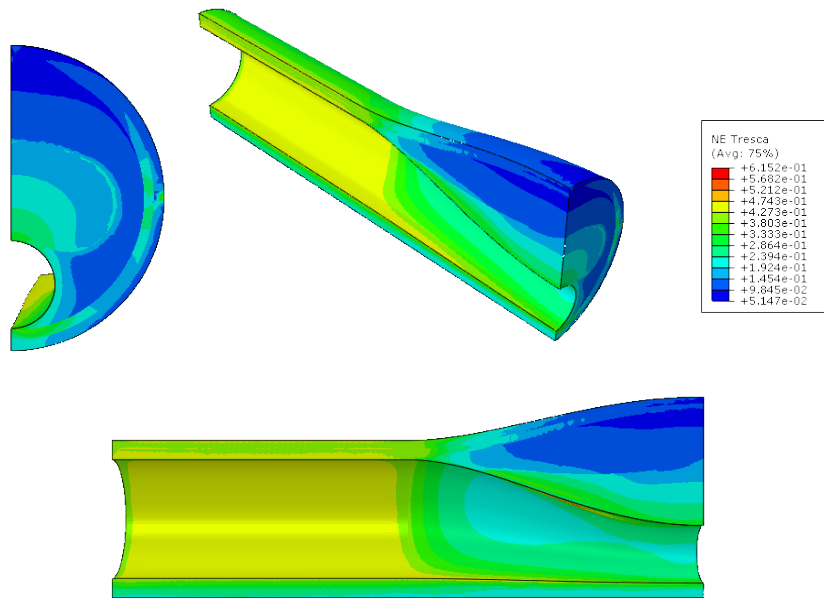


Figura 83: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 15 mm- Deformaciones criterio de Tresca

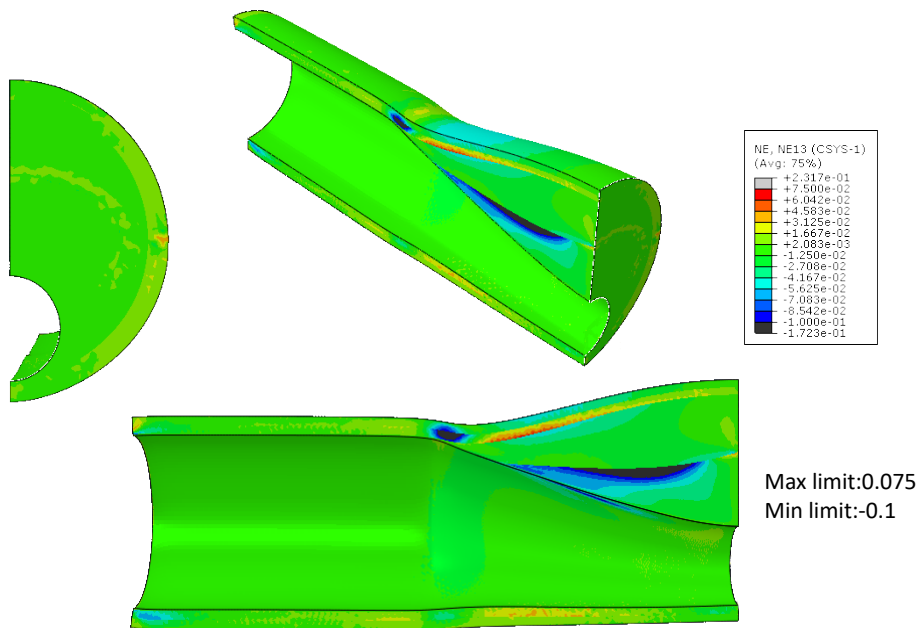


Figura 84: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 15 mm- Deformaciones Tangenciales RZ

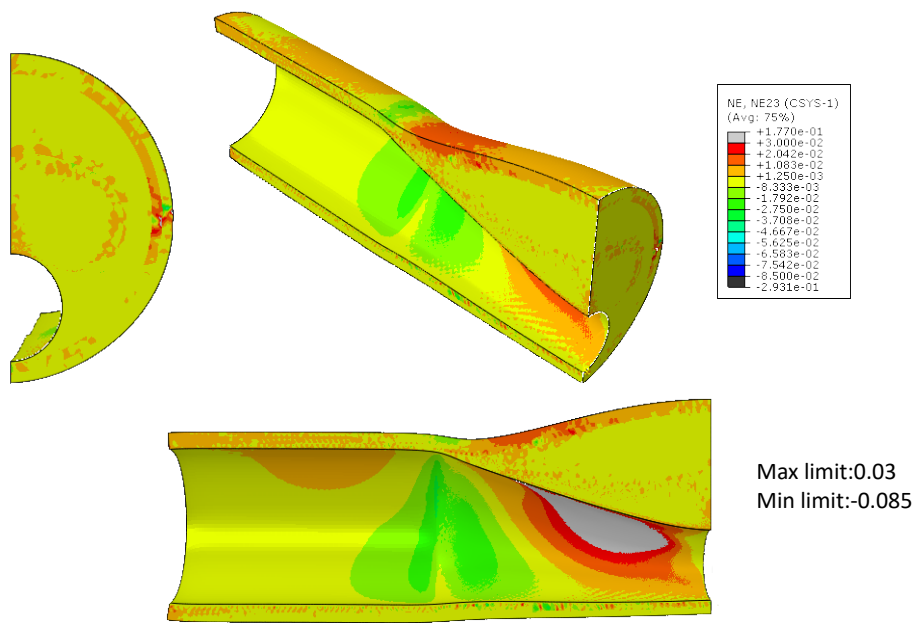


Figura 85: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 15 mm- Deformaciones Tangenciales ΘZ

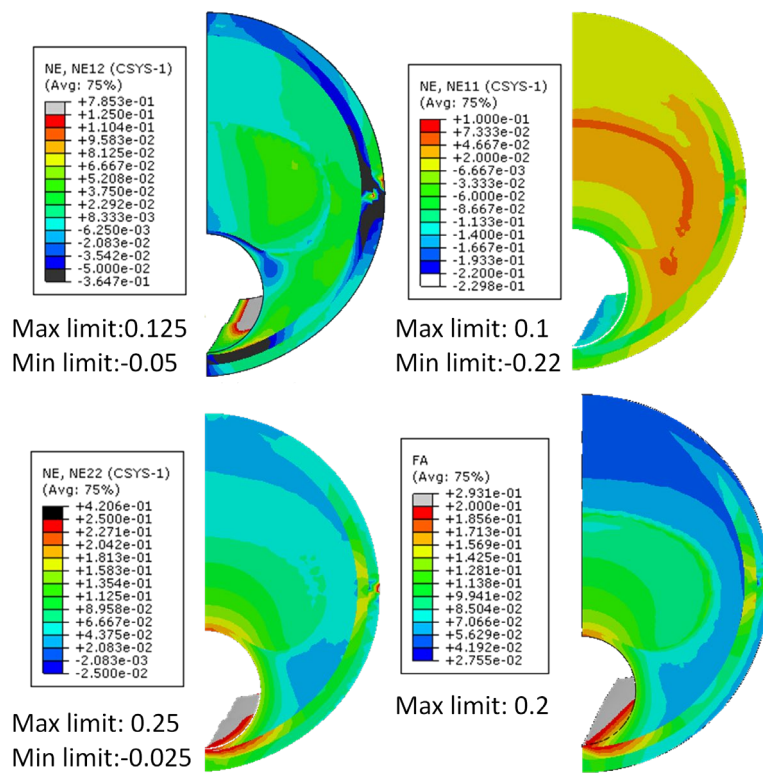


Figura 86: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 15 mm- Deformaciones Tangenciales ΘR / Deformaciones tangenciales en R / Deformaciones tangenciales en Θ / Índice de anisotropía

- Placa de 20 mm y núcleo de 10 mm.

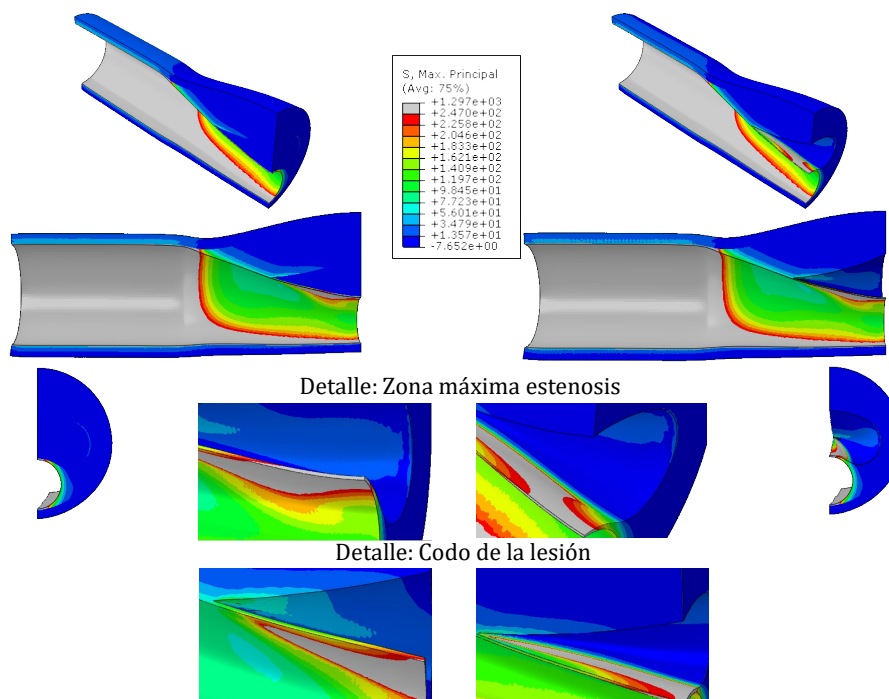


Figura 87: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 10 mm- Tensiones Principales Máximas

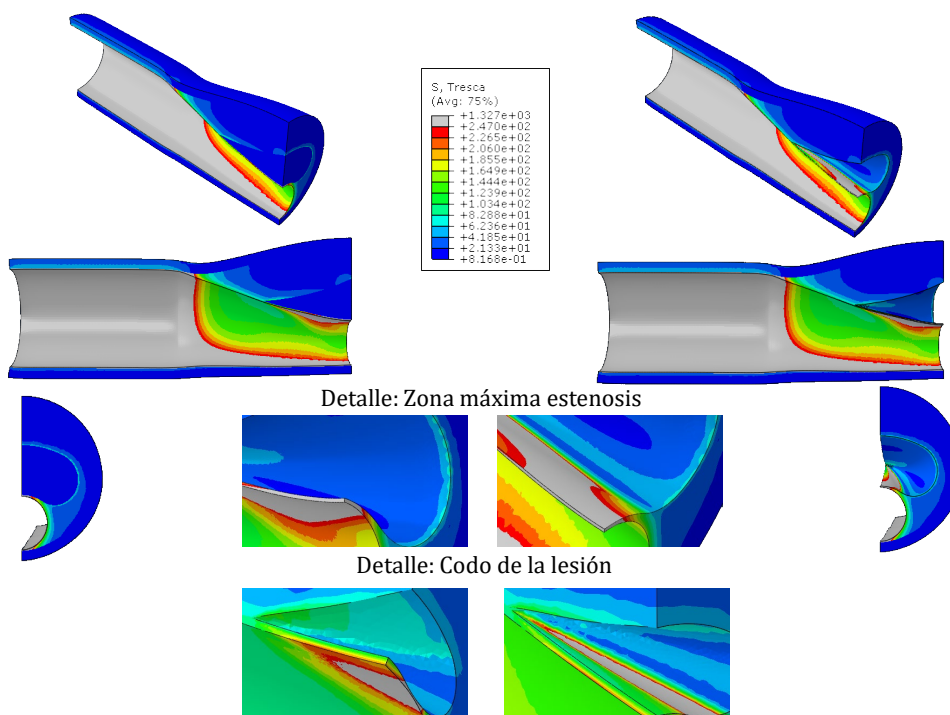


Figura 88: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 10 mm- Tensiones criterio de Tresca

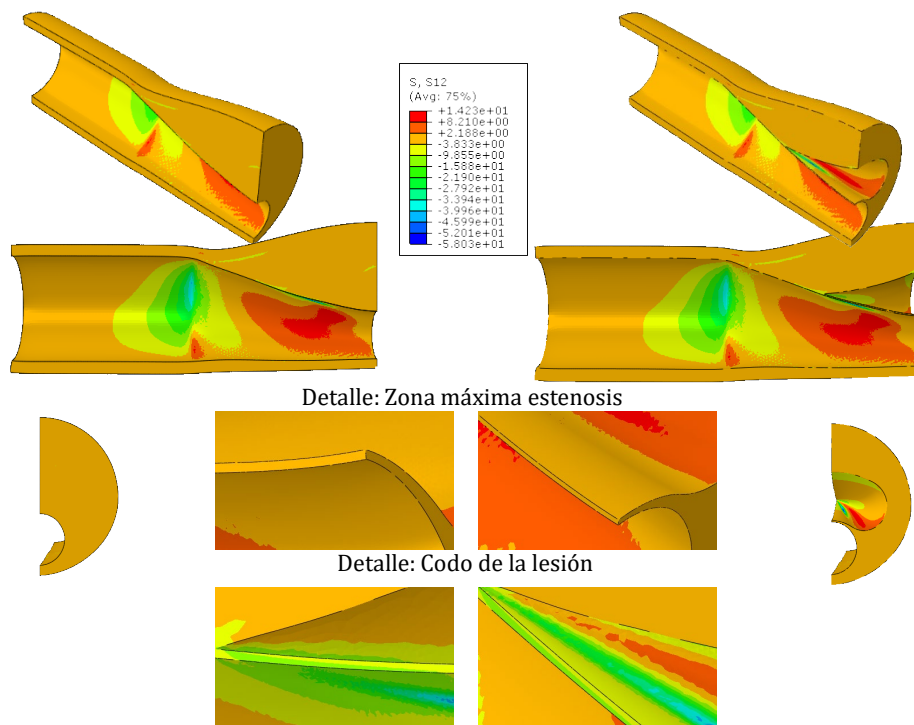


Figura 89: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 10 mm- Tensiones Tangenciales XY

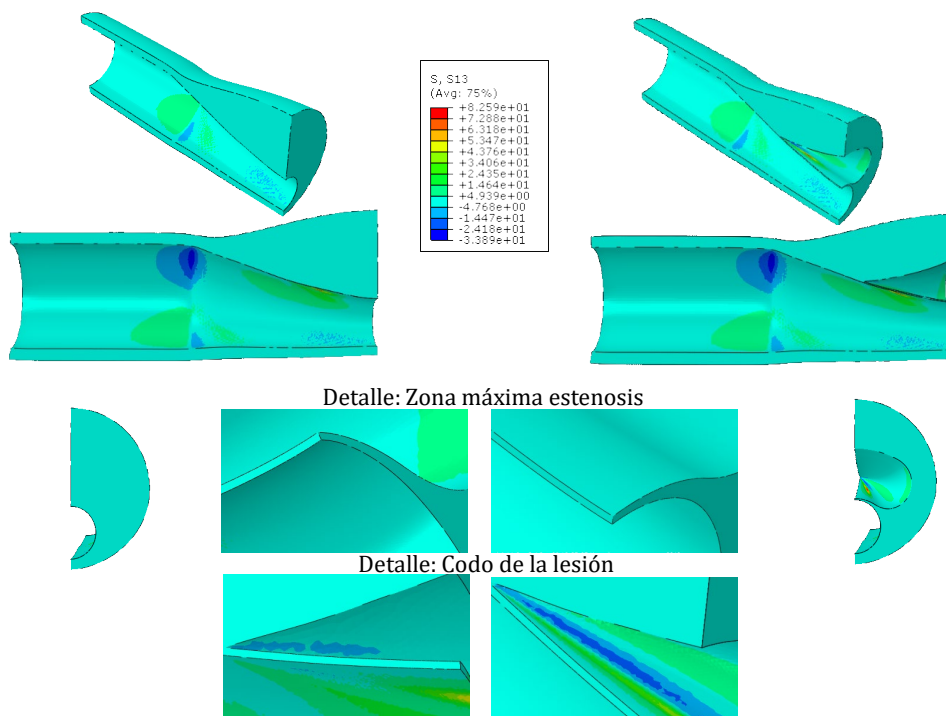


Figura 90: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 10 mm- Tensiones Tangenciales XZ

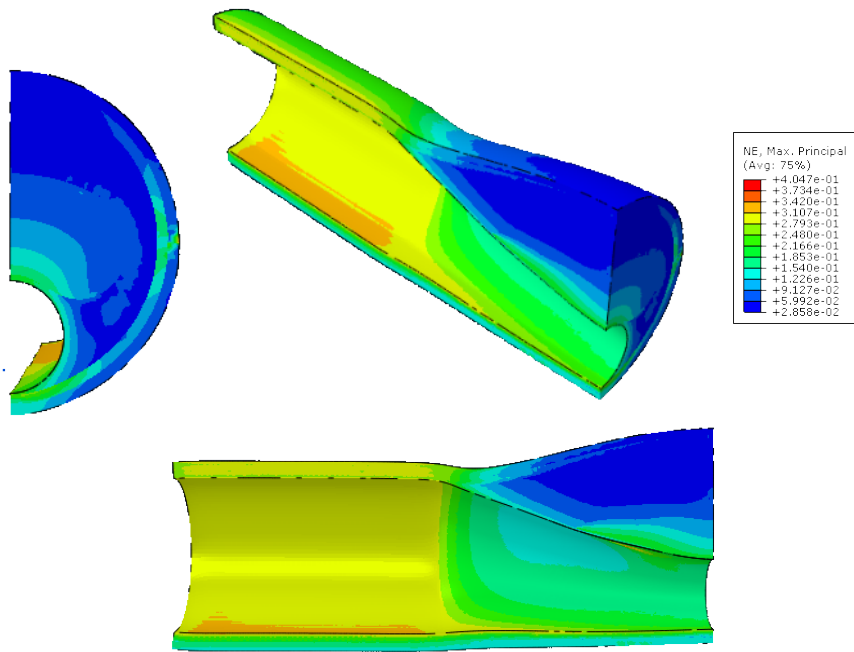


Figura 91: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 10 mm- Deformaciones Principales

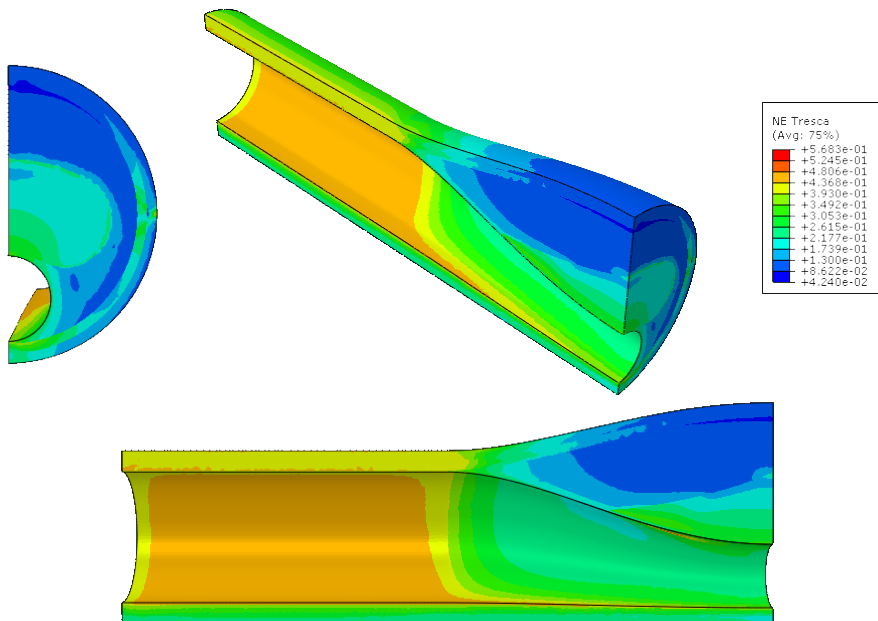


Figura 92: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 10 mm- Deformaciones criterioTresca

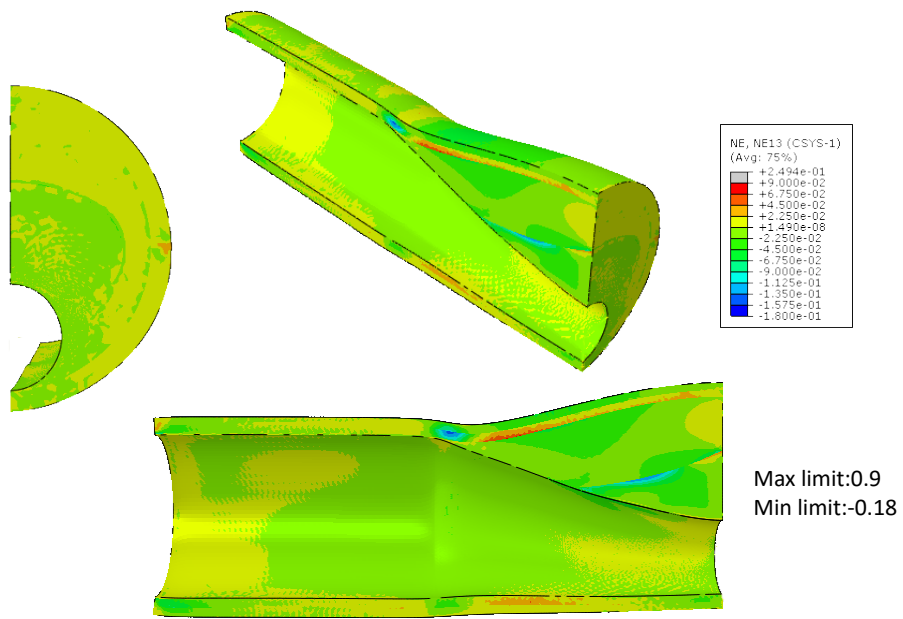


Figura 93: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 10 mm- Deformaciones Tangenciales RZ

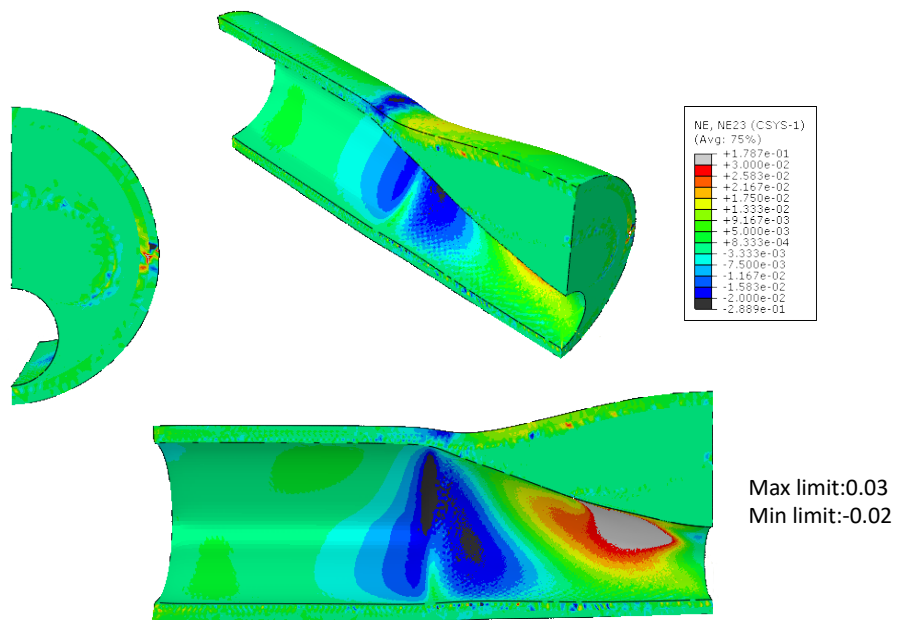


Figura 94: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 10 mm- Deformaciones Tangenciales ΘZ

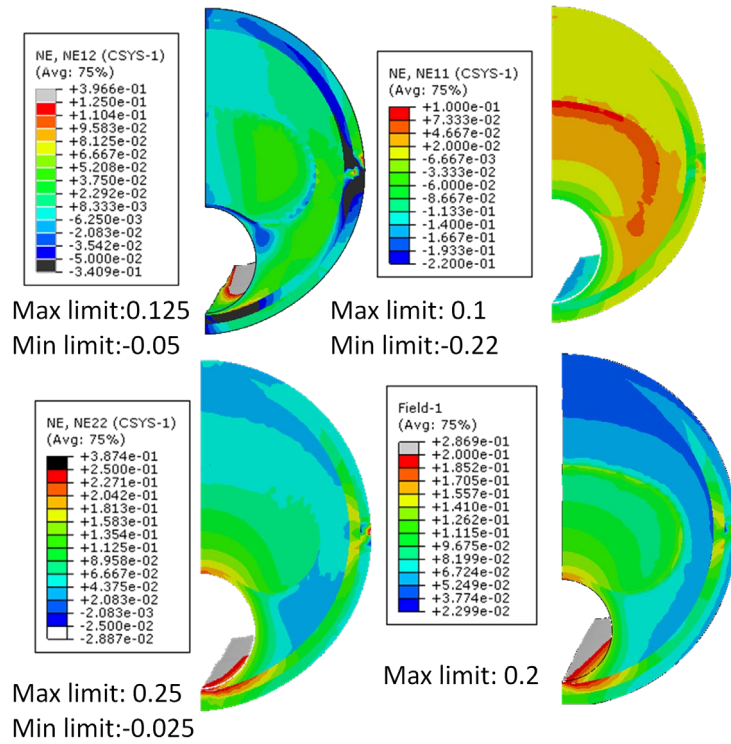


Figura 95: Placa de 20 mm con núcleo lipídico de 10 mm- Deformaciones Tangenciales ΘR / Deformaciones Tangenciales R / Deformaciones Tangenciales Θ / Índice de anisotropía

- Placa de 15 mm y núcleo de 13,125 mm.

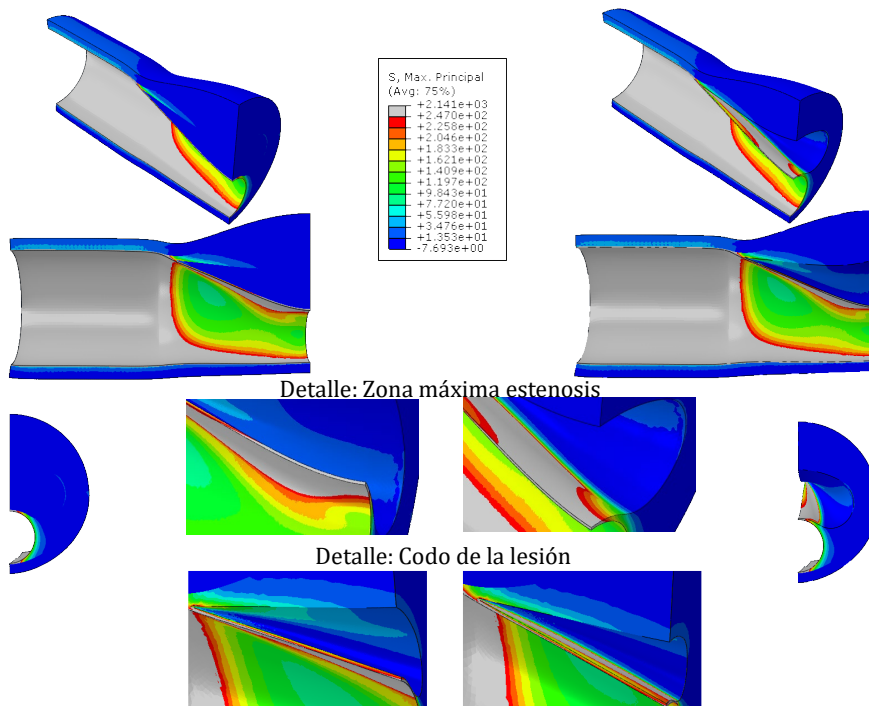


Figura 96: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 13,125 mm- Tensiones Principales Máximas

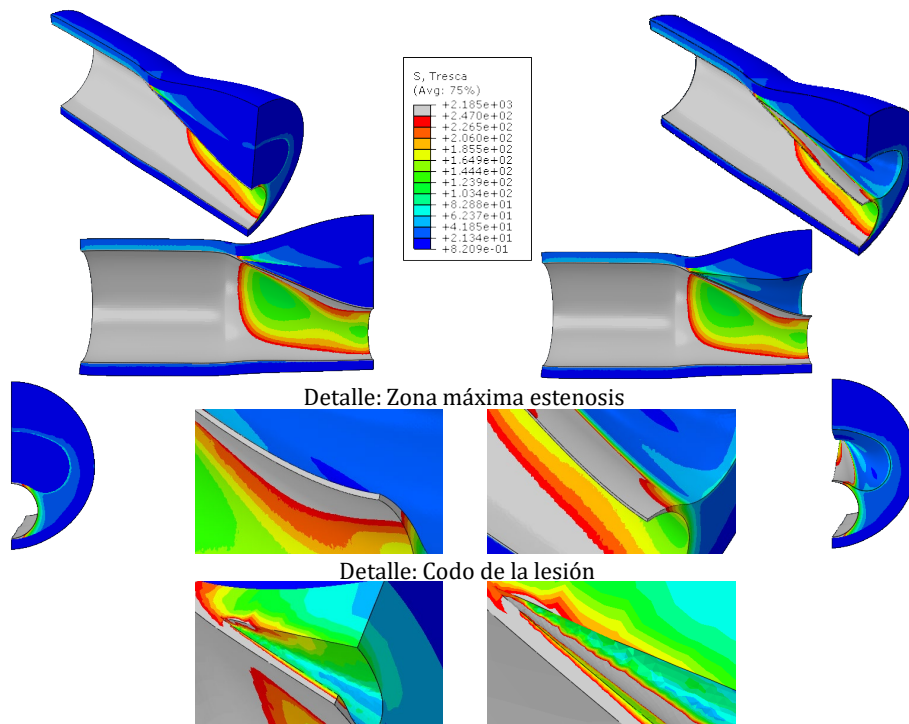


Figura 97: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 13,125 mm- Tensiones criterio Tresca

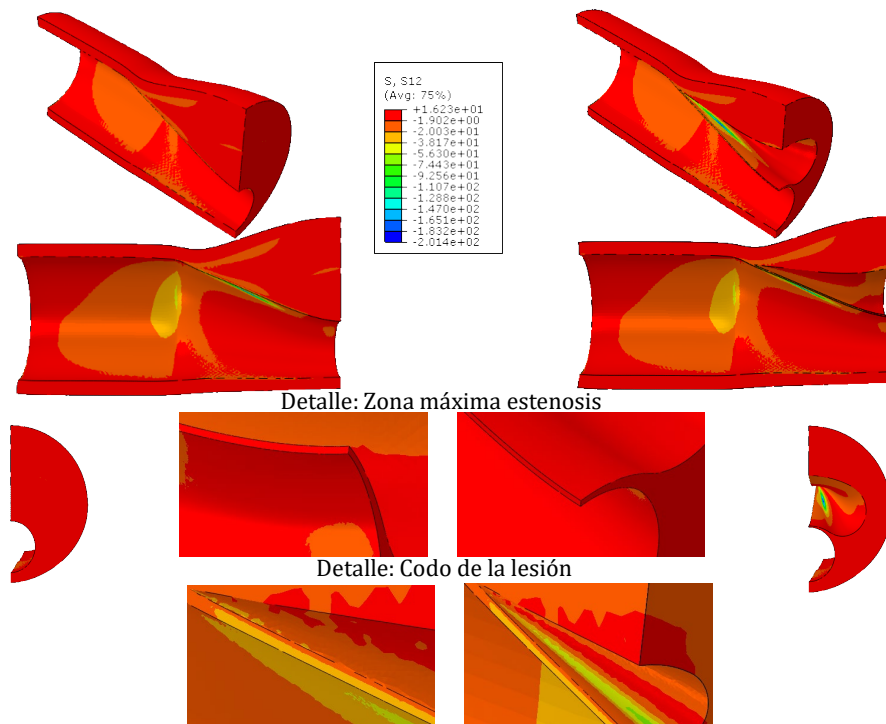


Figura 98: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 13,125 mm- Tensiones Tangenciales XY

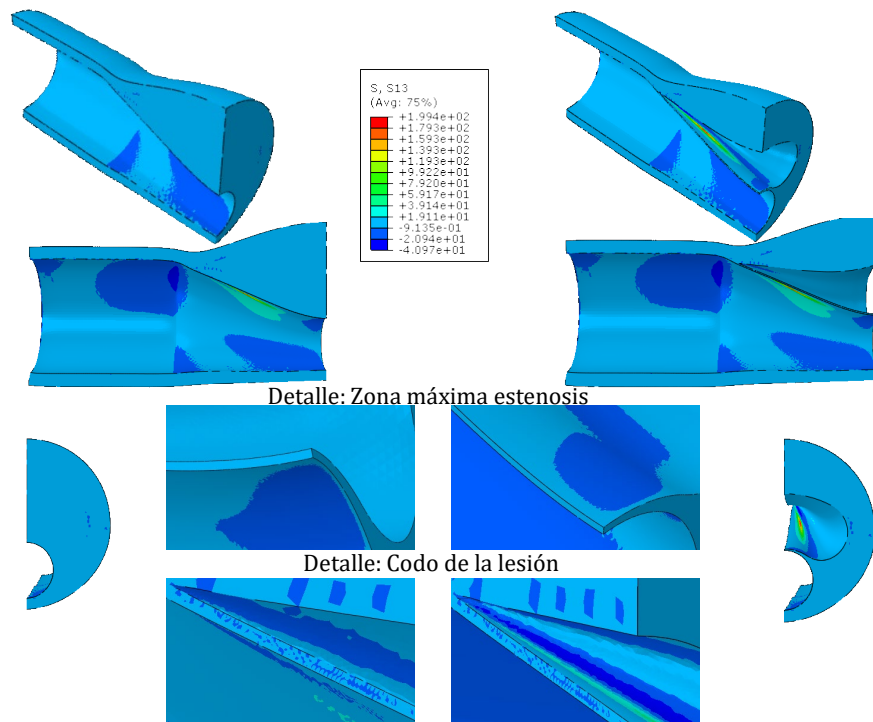


Figura 99: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 13,125 mm- Tensiones Tangenciales XZ

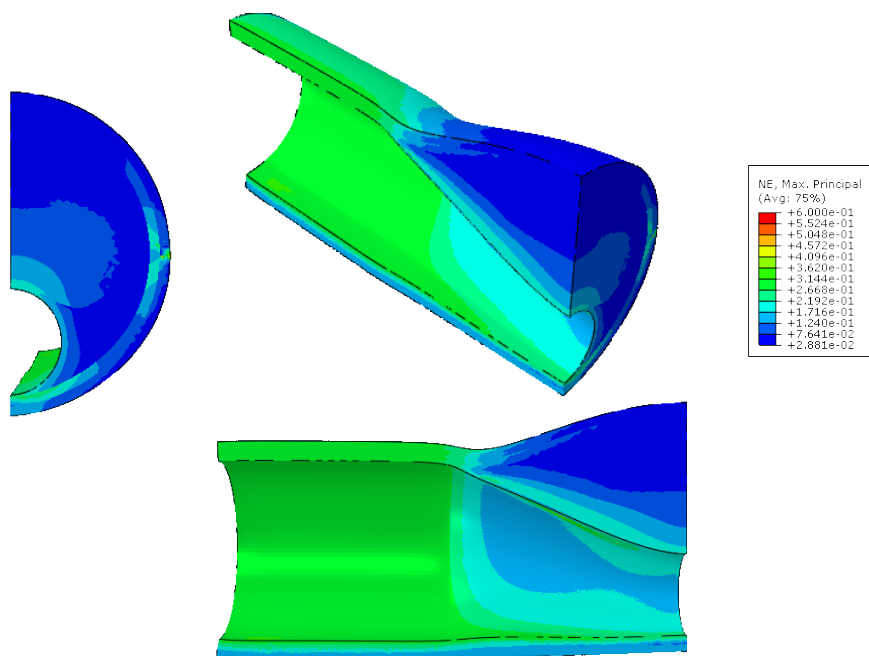


Figura 100: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 13,125 mm- Deformaciones Principales

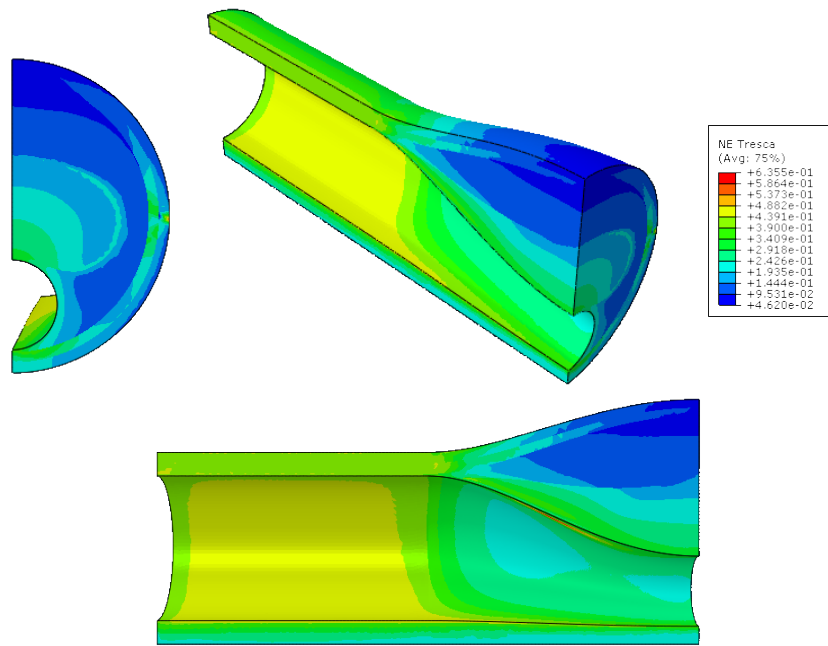


Figura 101: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 13,125 mm- Deformaciones criterio Tresca

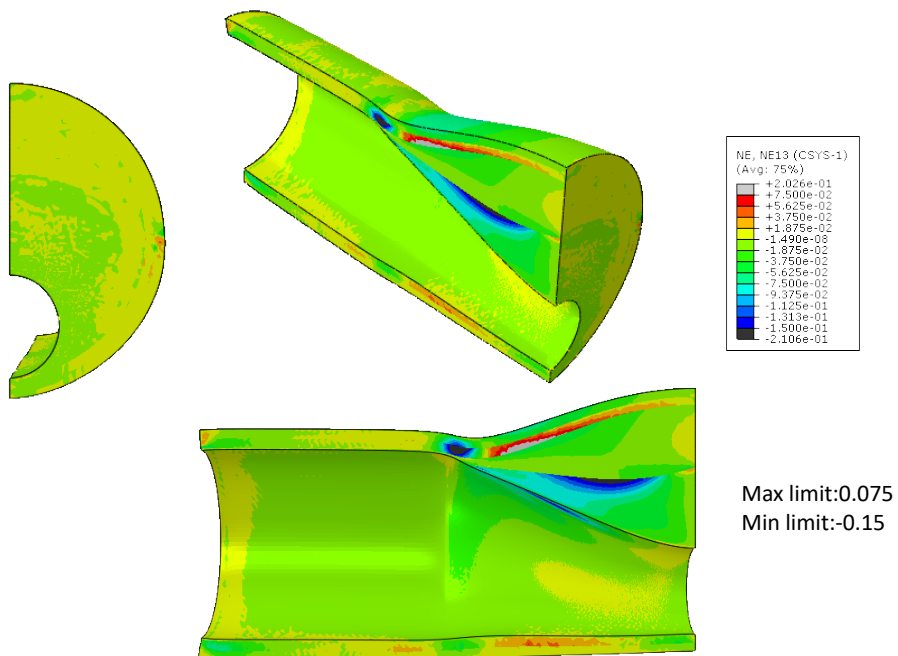


Figura 102: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 13,125 mm- Deformaciones Tangenciales RZ

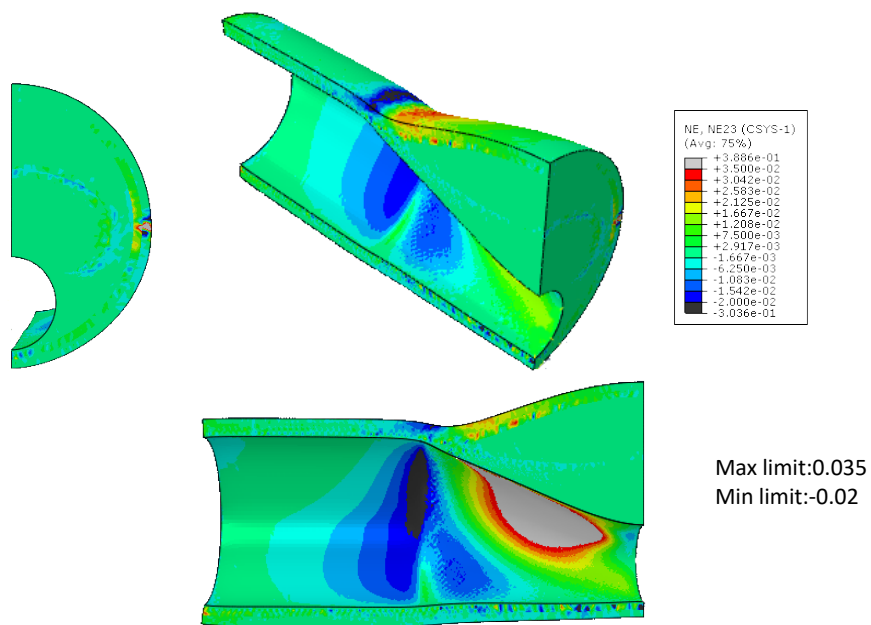


Figura 103: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 13,125 mm- Deformaciones Tangenciales ΘZ

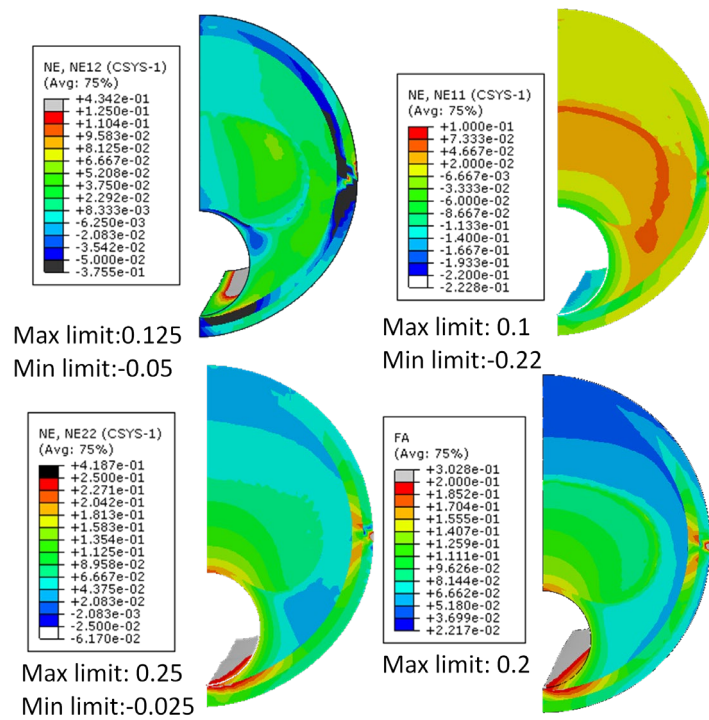


Figura 104: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 13,125 mm- Deformaciones Tangenciales ΘR / Deformaciones Tangenciales R/Deformaciones Tangenciales Θ / Índice de anisotropía

- Placa de 15 mm y núcleo de 11,25 mm.

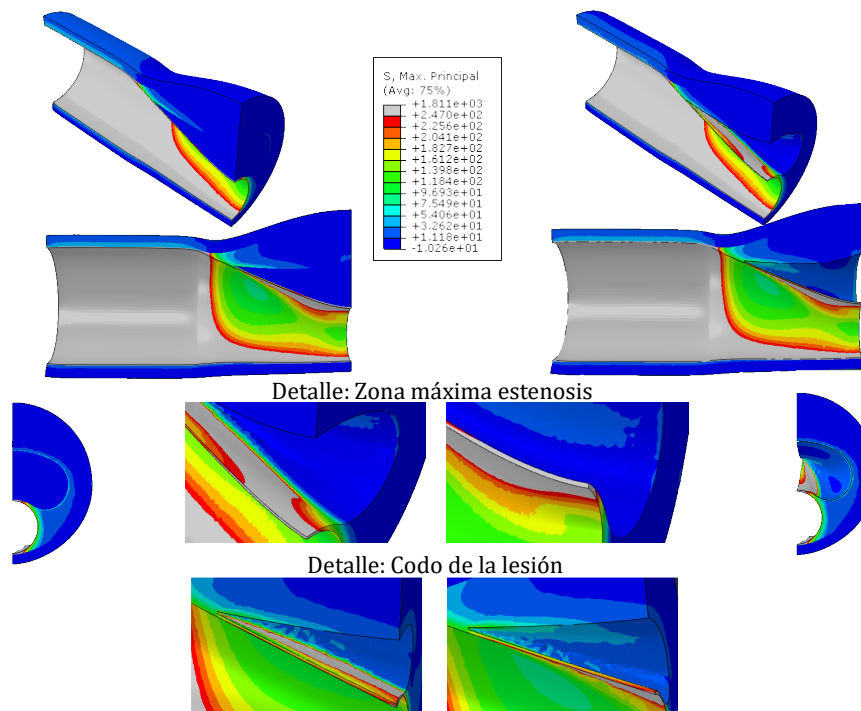


Figura 105: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 11,25 mm- Tensiones Principales Máximas

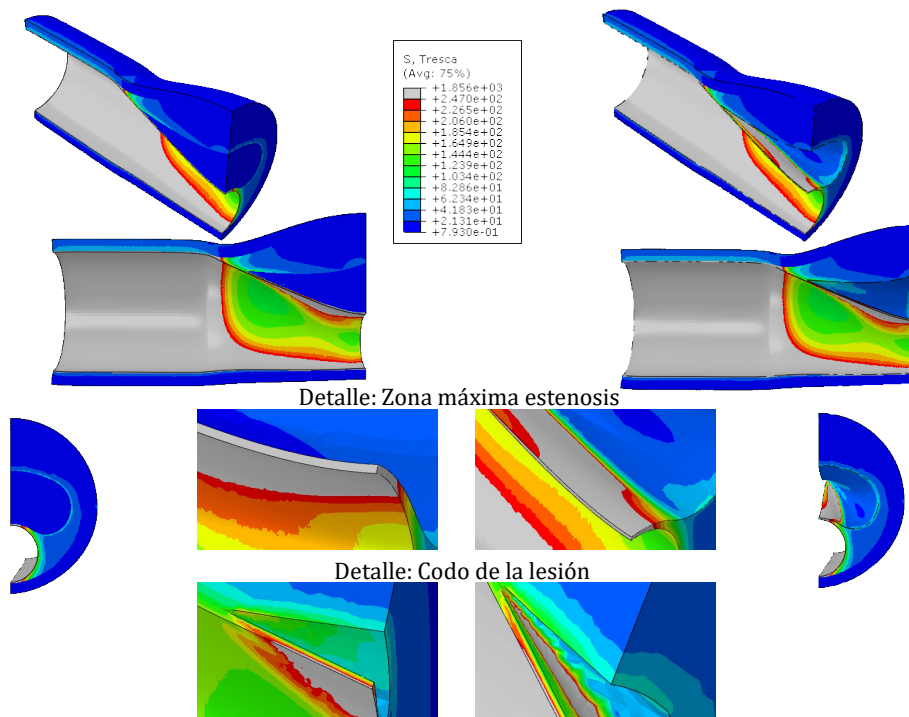


Figura 106: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 11,25 mm- Tensiones criterio Tresca

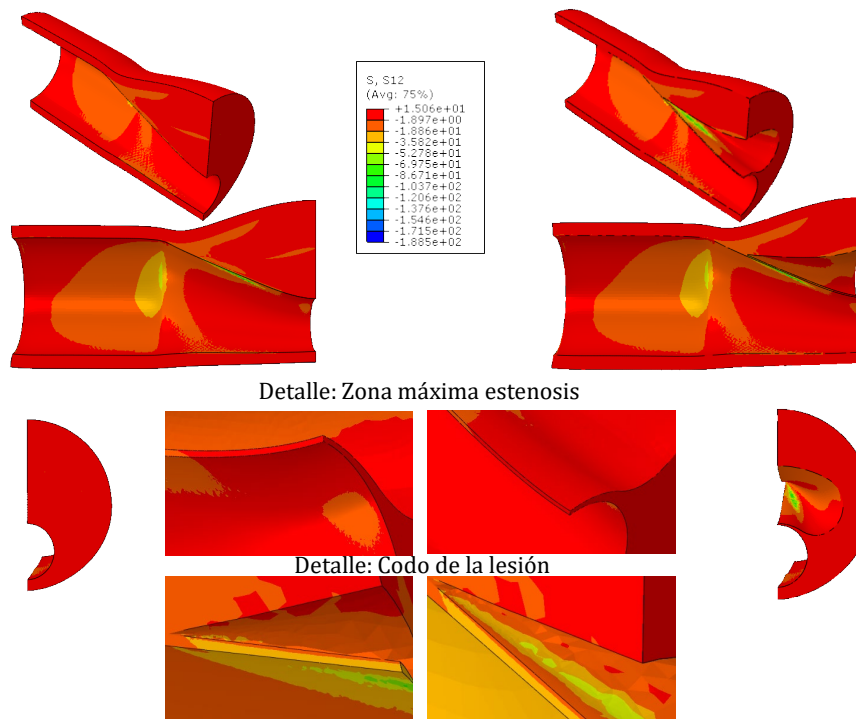


Figura 107: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 11,25 mm- Tensiones Tangenciales XY

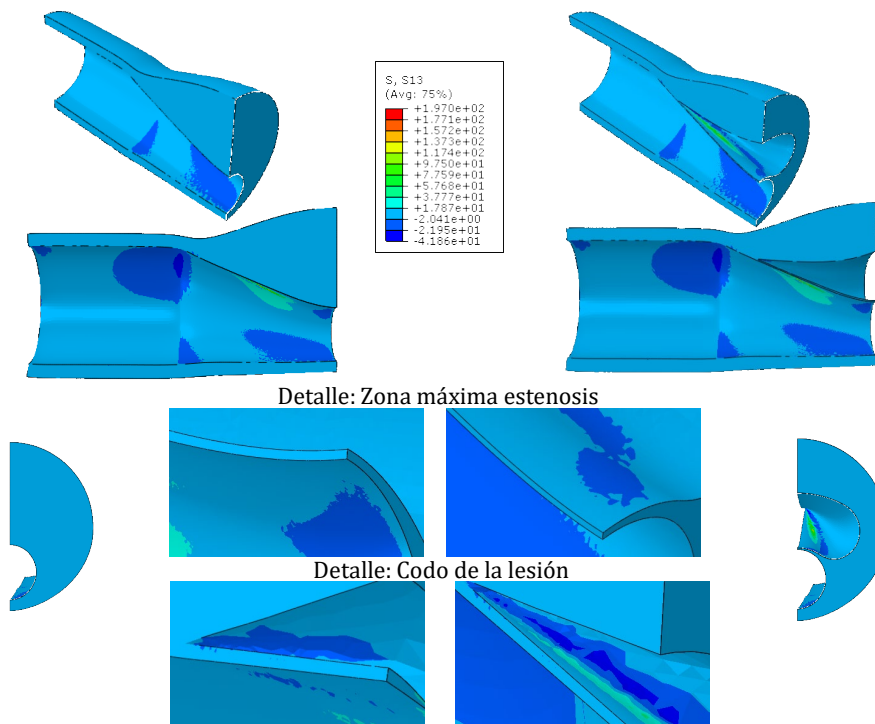


Figura 108: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 11,25 mm- Tensiones Tangenciales XZ

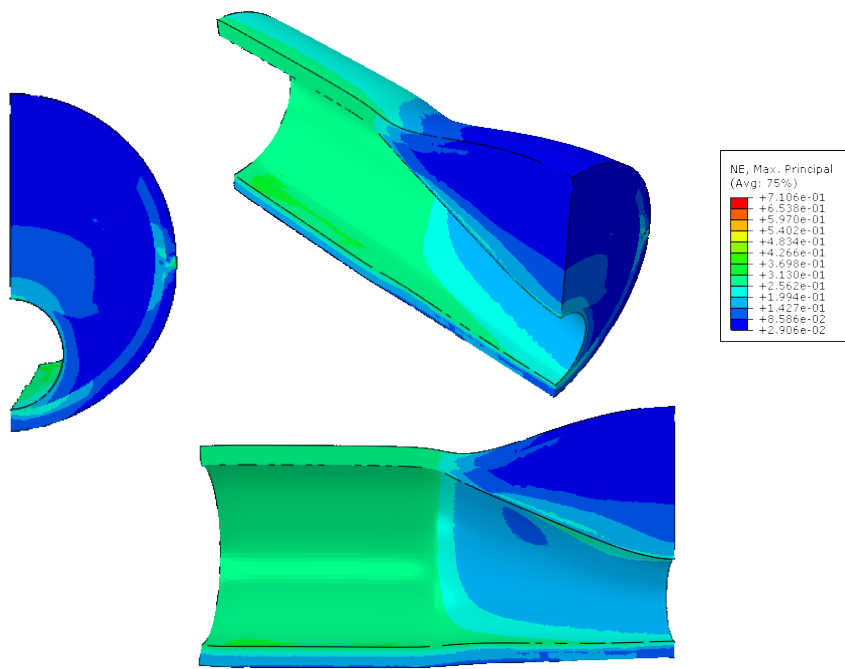


Figura 109: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 11,25 mm- Deformaciones Principales

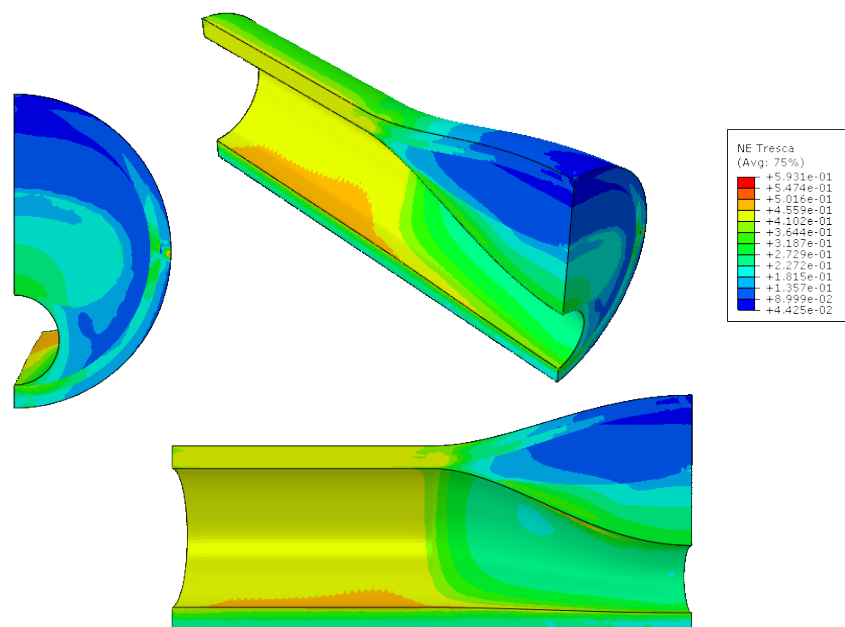


Figura 110: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 11,25 mm- Deformaciones criterio Tresca

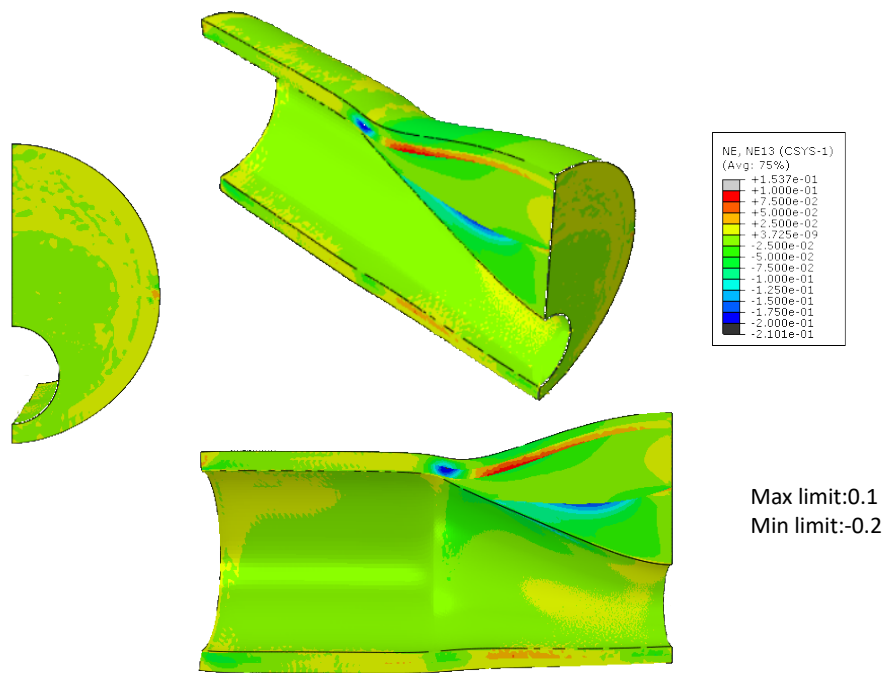


Figura 111: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 11,25 mm- Deformaciones Tangenciales RZ

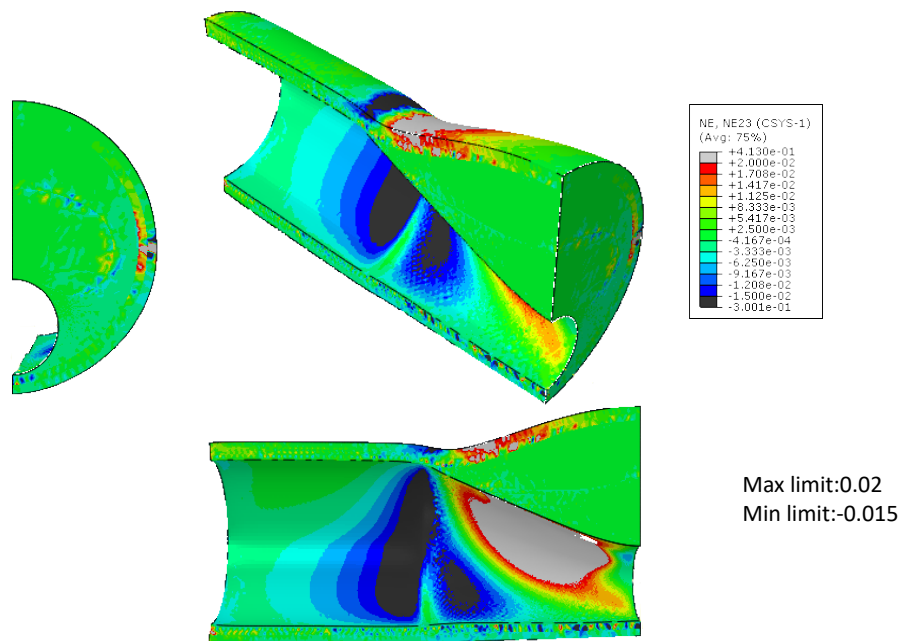


Figura 112: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 11,25 mm- Deformaciones Tangenciales ΘZ

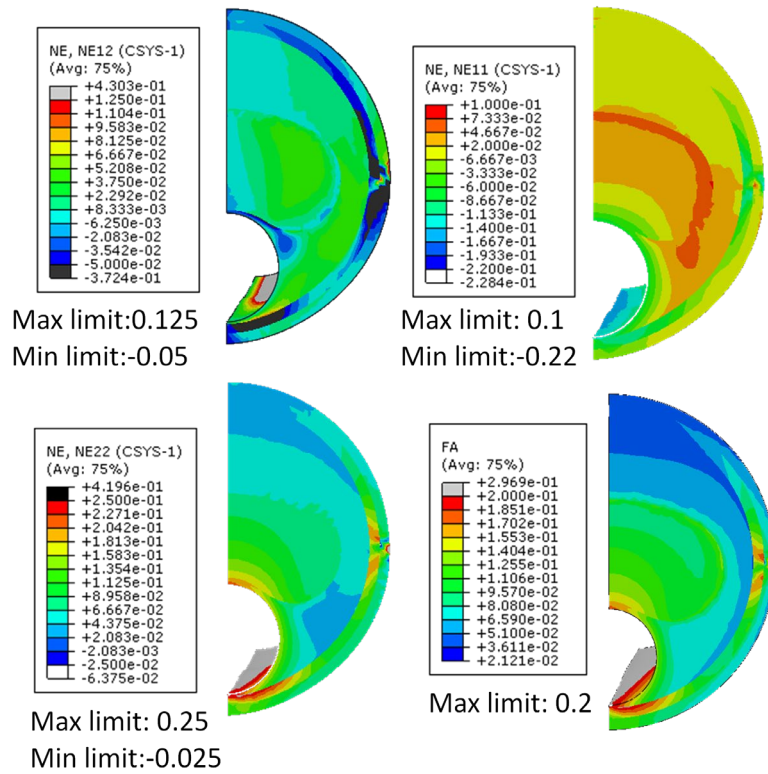


Figura 113: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 11,25 mm- Deformaciones Tangenciales ΘR / Deformaciones Tangenciales R/ Deformaciones Tangenciales Θ / Índice de anisotropía

- Placa de 15 mm y núcleo de 7,5 mm.

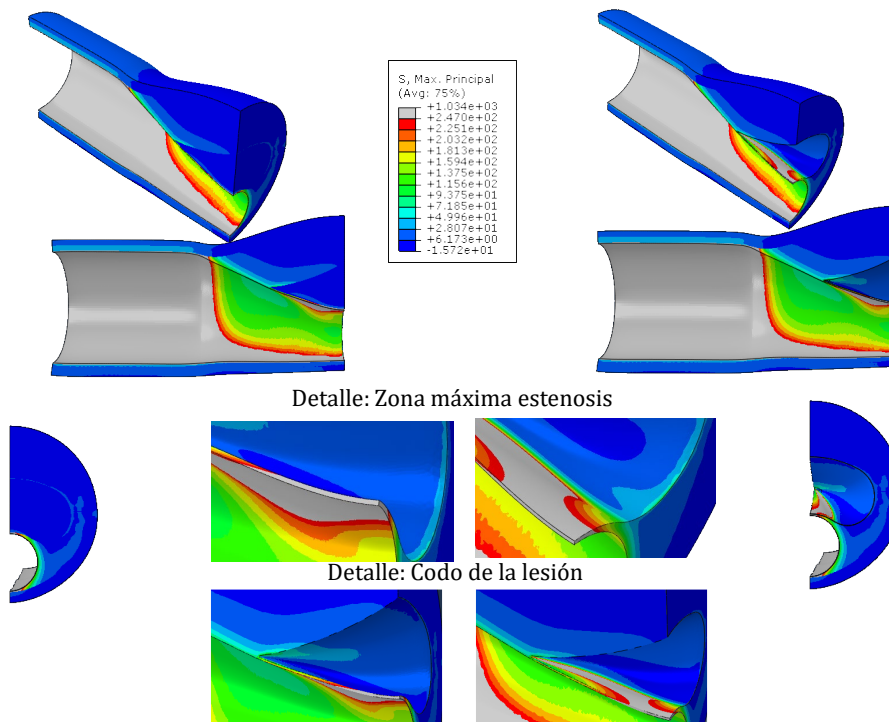


Figura 114: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 7,5 mm- Tensiones Principales Máximas

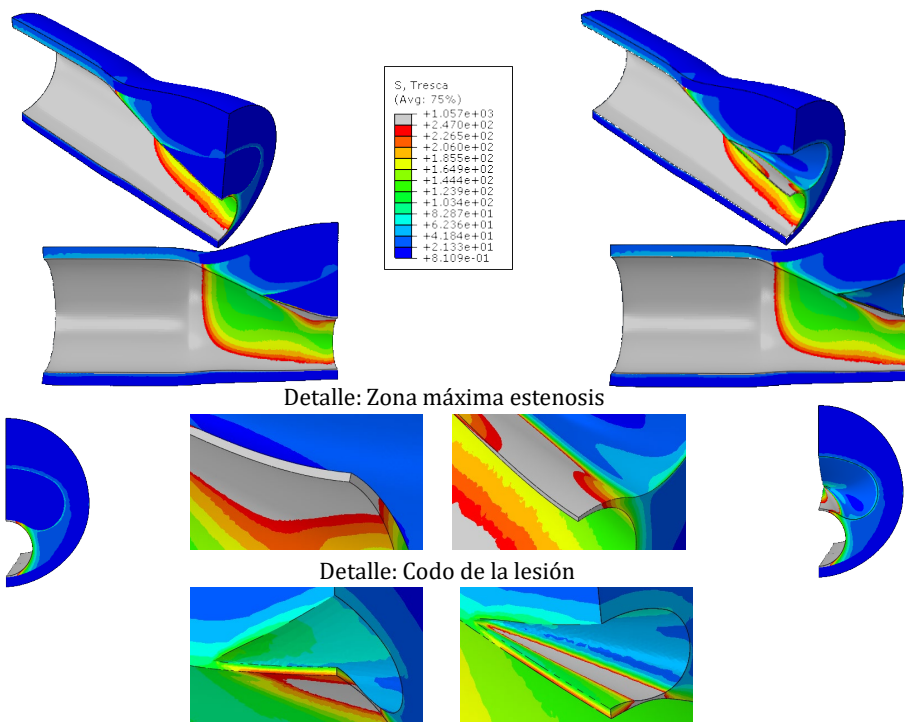


Figura 115: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 7,5 mm- Tensiones Criterio Tresca

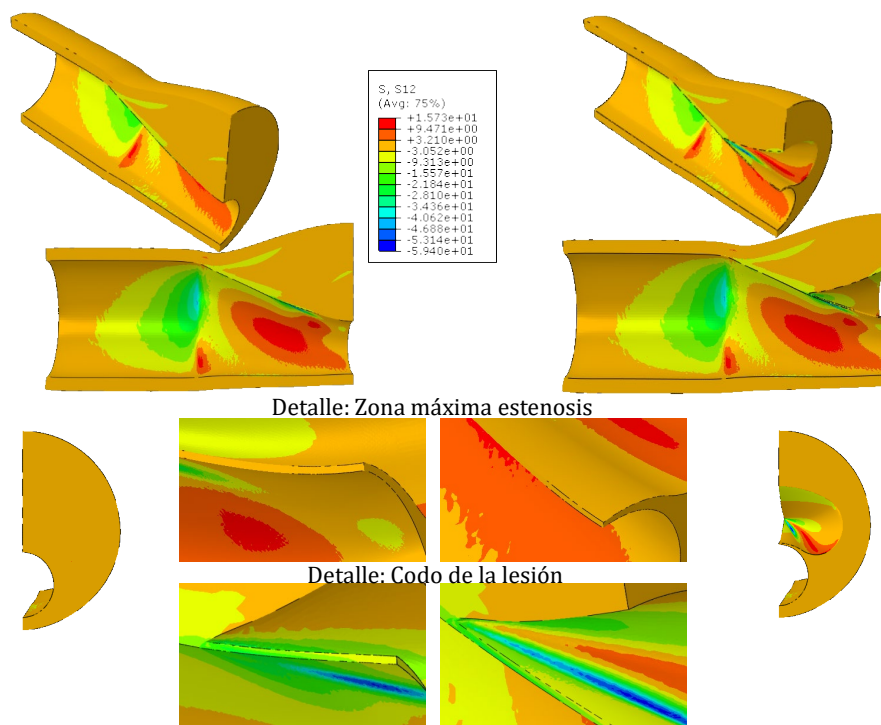


Figura 116: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 7,5 mm- Tensiones Tangenciales XY

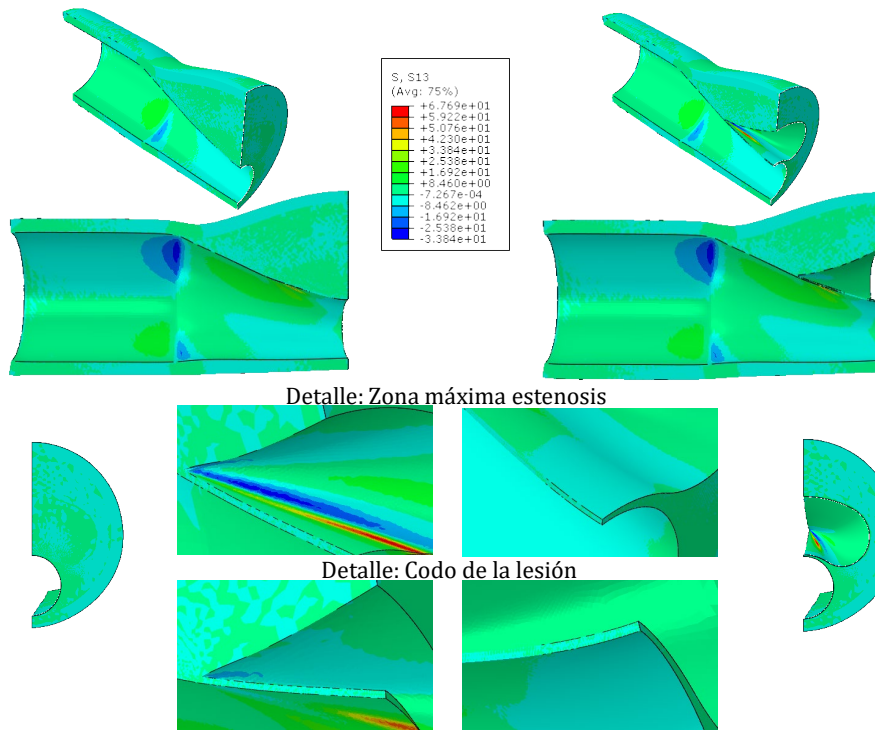


Figura 117: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 7,5 mm- Tensiones Tangenciales XZ

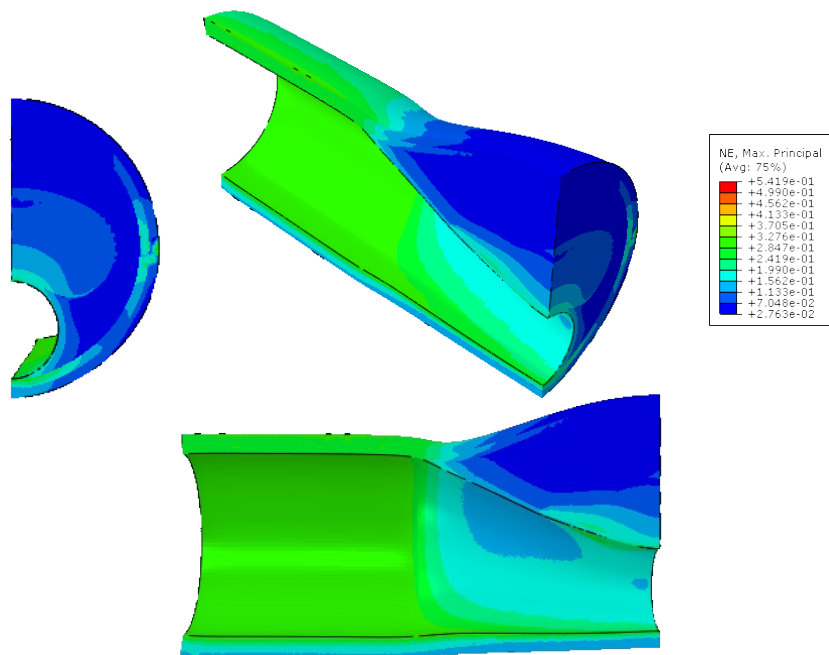


Figura 118: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 7,5 mm- Deformaciones Principales

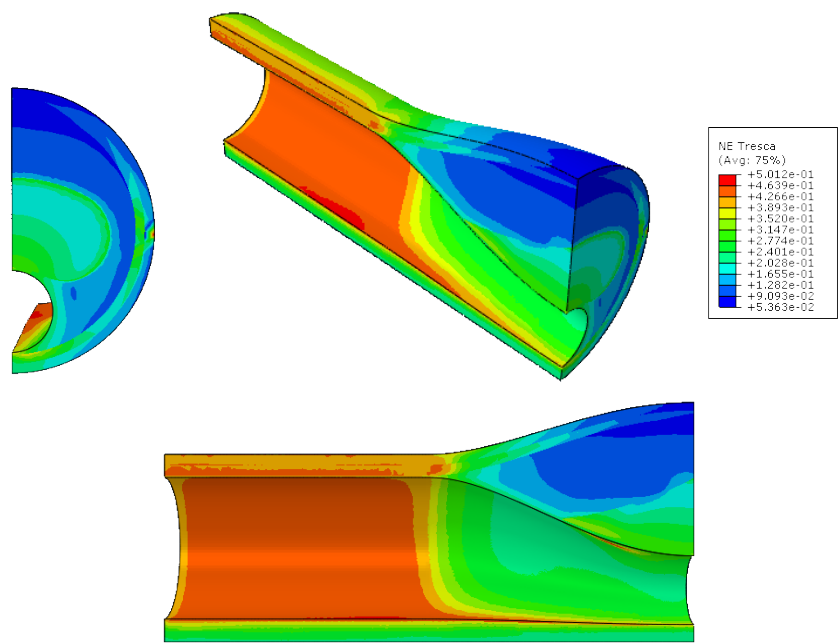


Figura 119: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 7,5 mm- Deformaciones Criterio Tresca

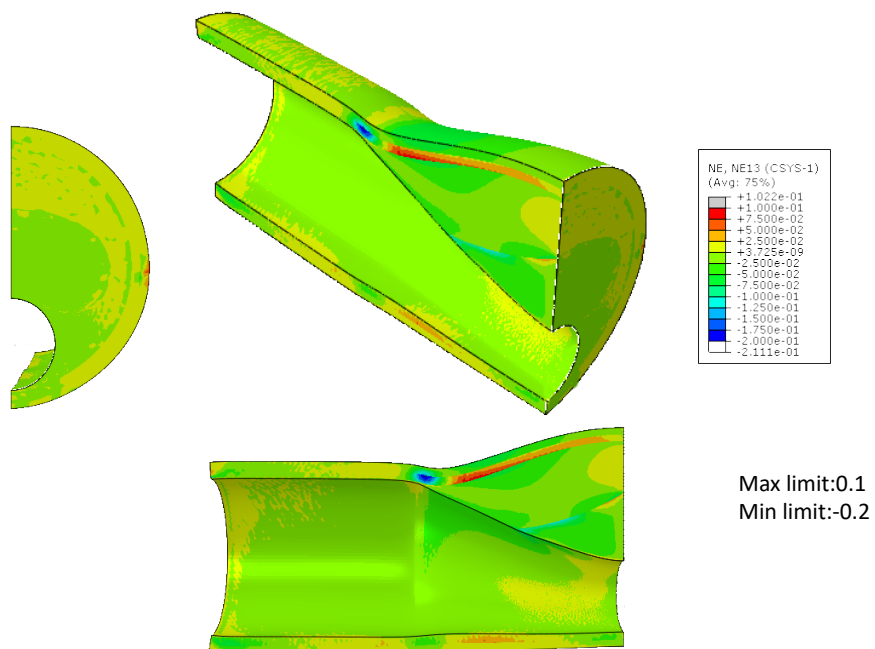


Figura 120: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 7,5 mm- Deformaciones Tangenciales RZ

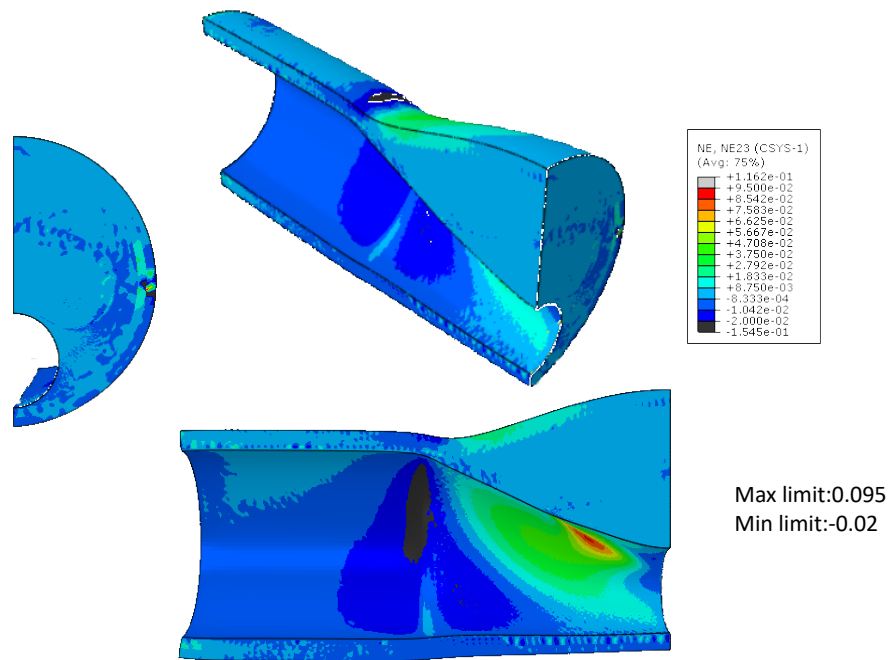


Figura 121: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 7,5 mm- Deformaciones Tangenciales ΘZ

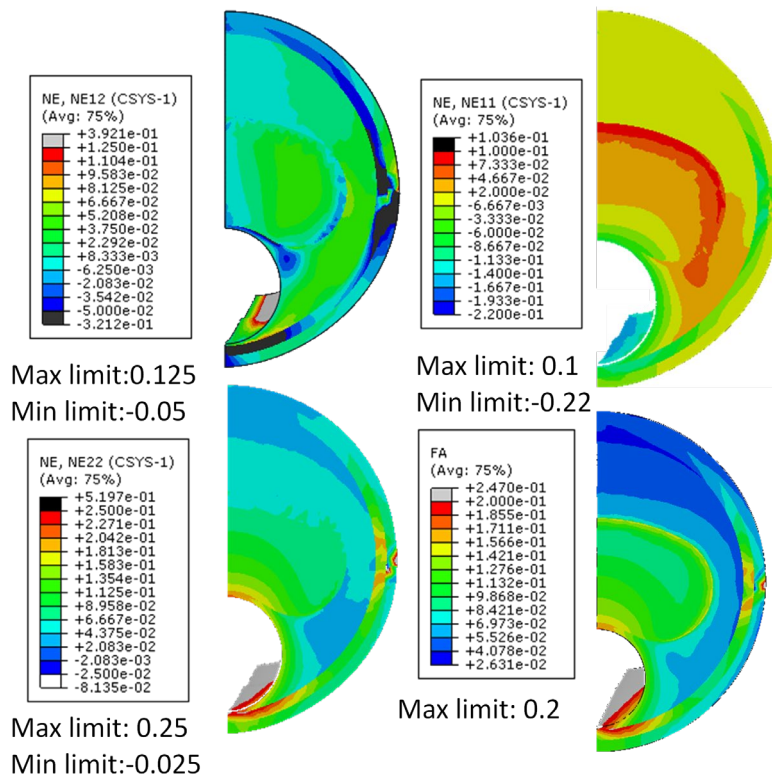


Figura 122: Placa de 15 mm con núcleo lipídico de 7,5 mm- Deformaciones Tangenciales ΘR / Deformaciones Tangenciales R/Deformaciones Tangenciales Θ / Índice de anisotropía

- Placa de 13 mm y núcleo de 11,375 mm.

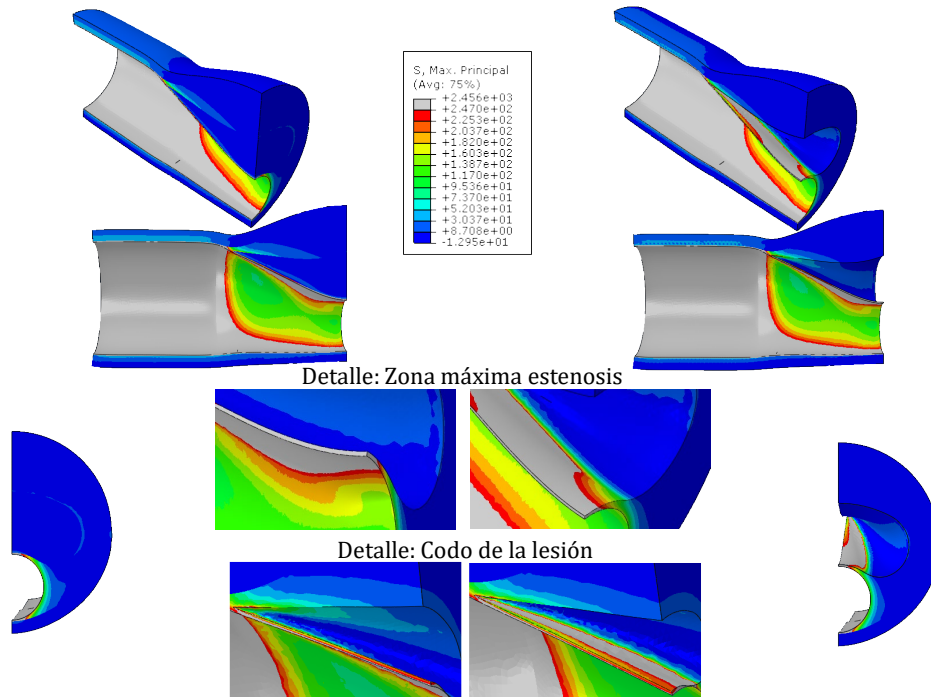


Figura 123: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 11,375 mm- Tensiones Principales Máximas

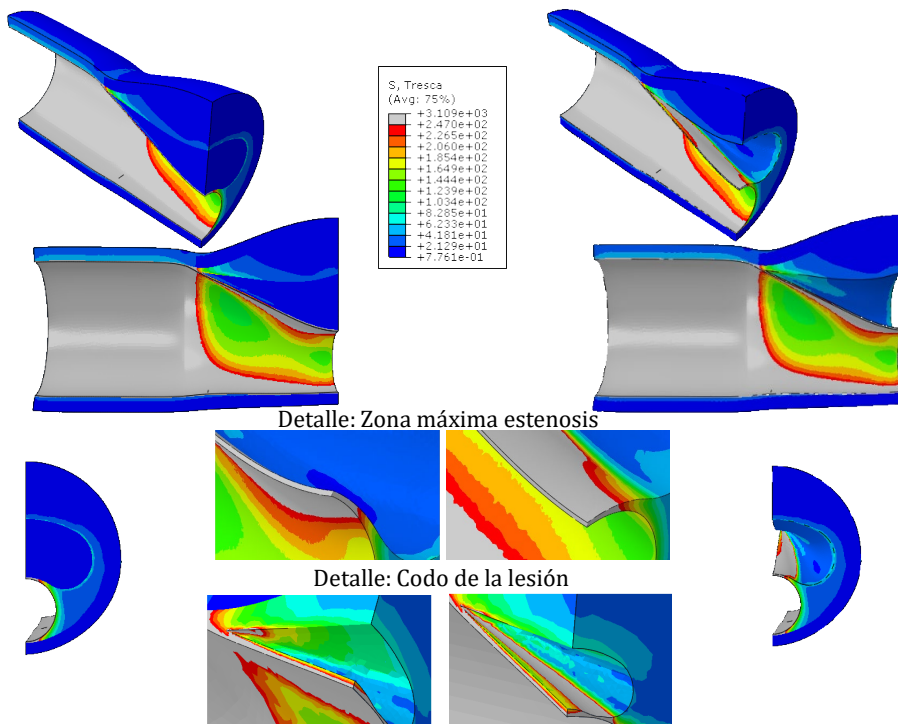


Figura 124: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 11,375 mm- Tensiones criterio Tresca

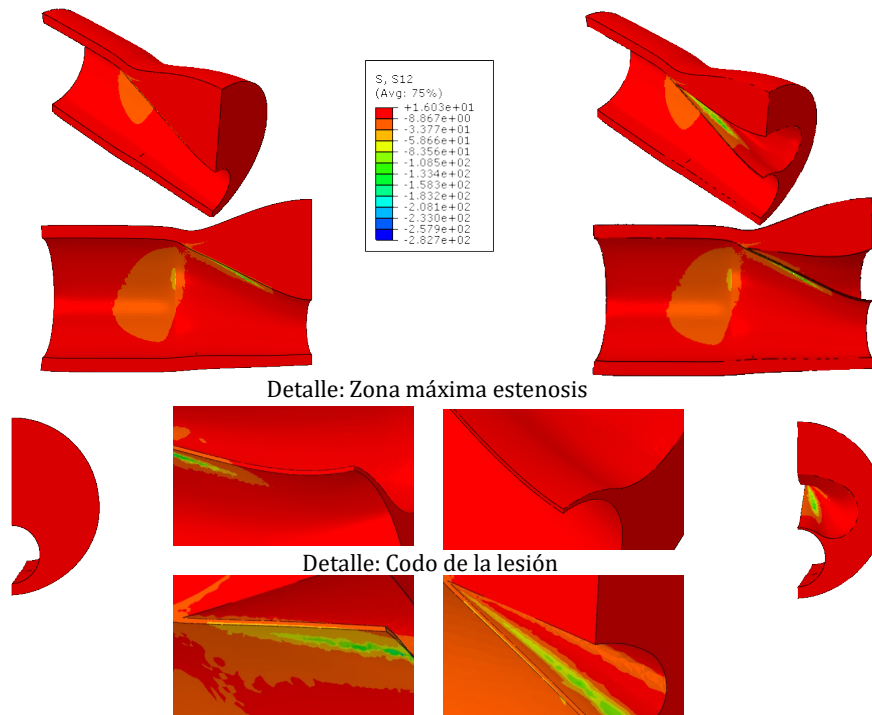


Figura 125: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 11,375 mm- Tensiones Tangenciales XY

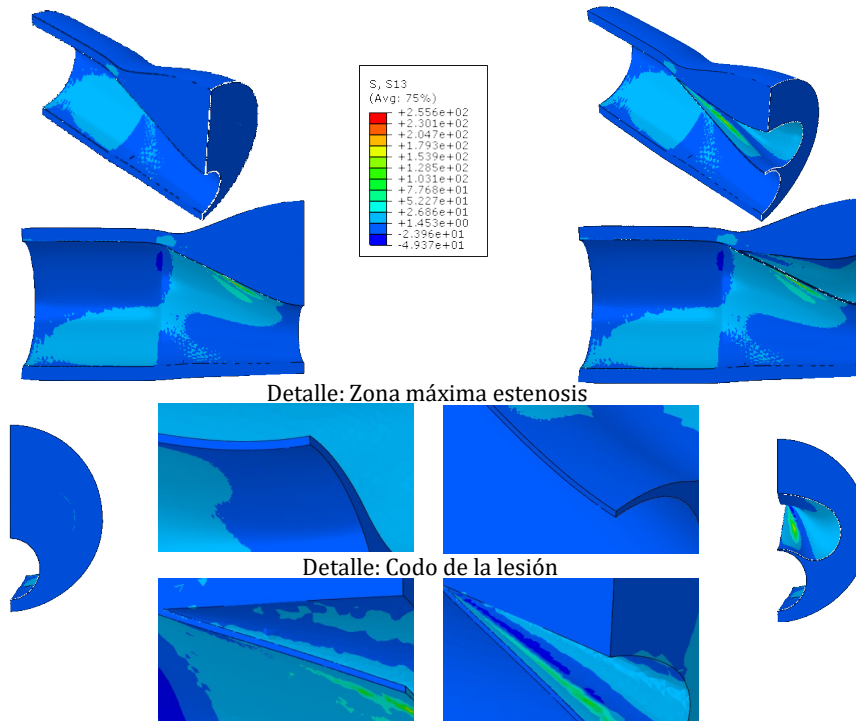


Figura 126: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 11,375 mm- Tensiones Tangenciales XZ

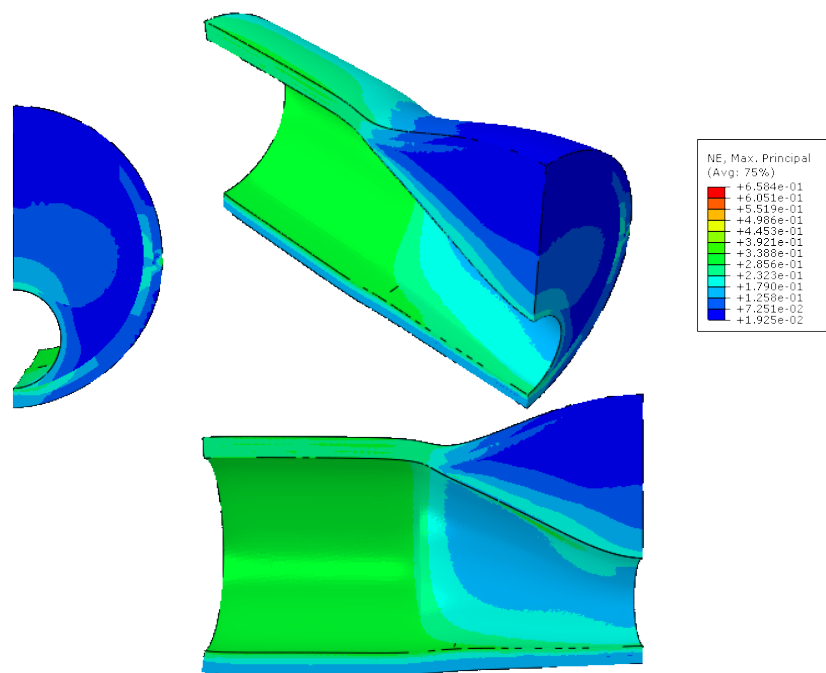


Figura 127: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 11,375 mm- Deformaciones Principales

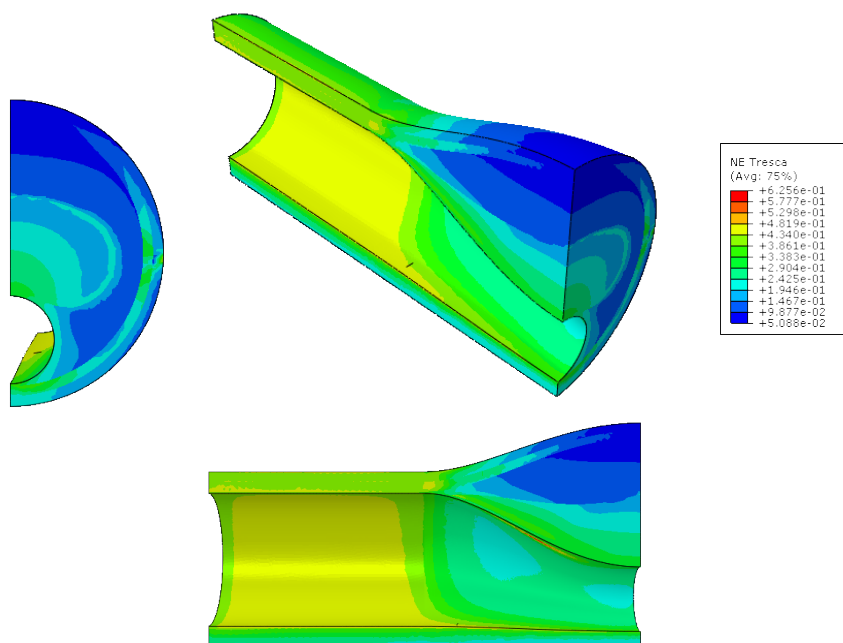


Figura 128: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 11,375 mm- Deformaciones criterio Tresca

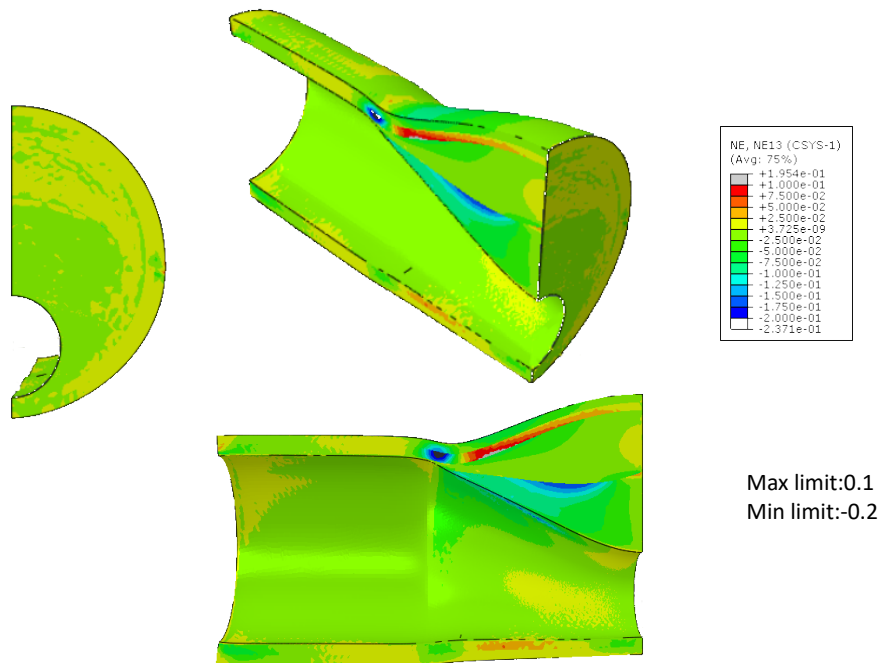


Figura 129: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 11,375 mm- Deformaciones Tangenciales RZ

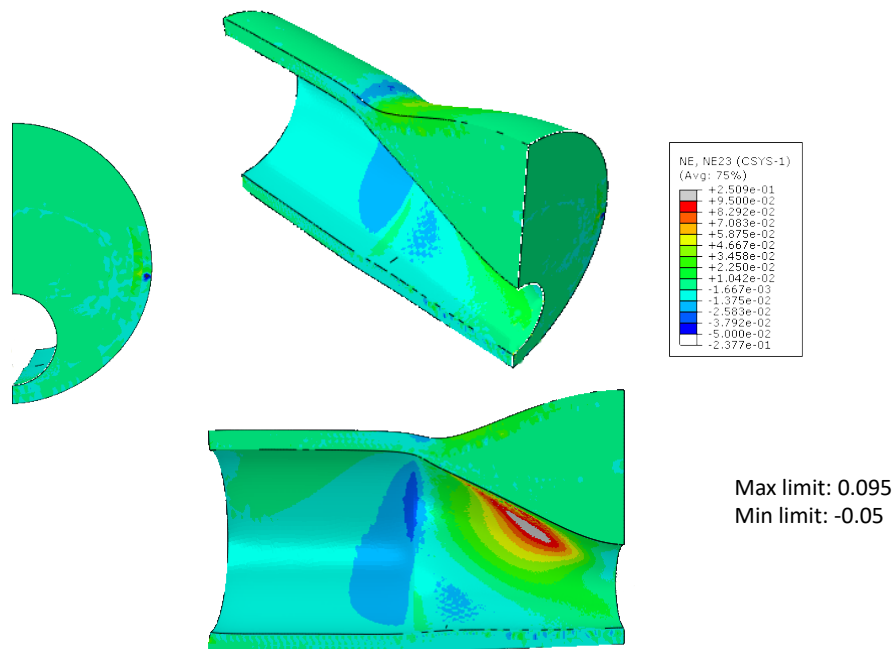


Figura 130: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 11,375 mm- Deformaciones Tangenciales ΘZ

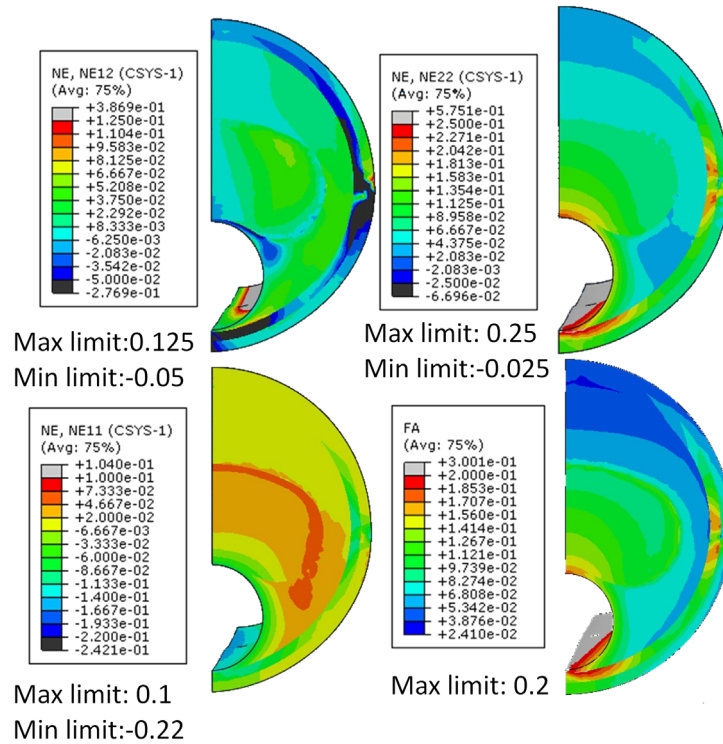


Figura 131: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 11,375 mm- Deformaciones Tangenciales ΘR / Deformaciones Tangenciales R /Deformaciones Tangenciales θ / Índice de anisotropía

- Placa de 13 mm y núcleo de 9,75 mm.

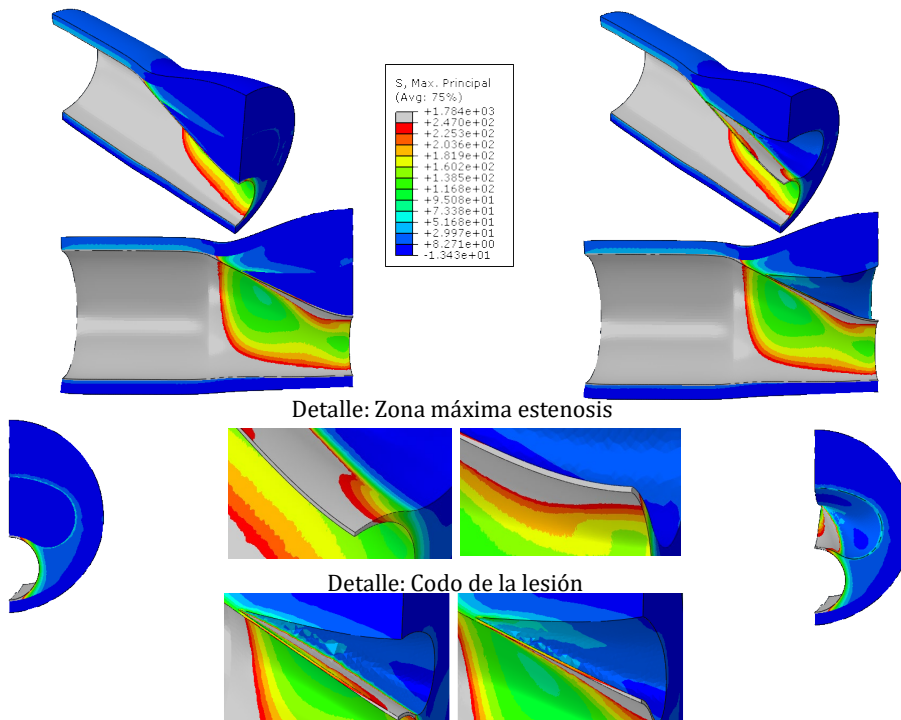


Figura 132: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 9,75 mm- Tensiones Principales Máximas

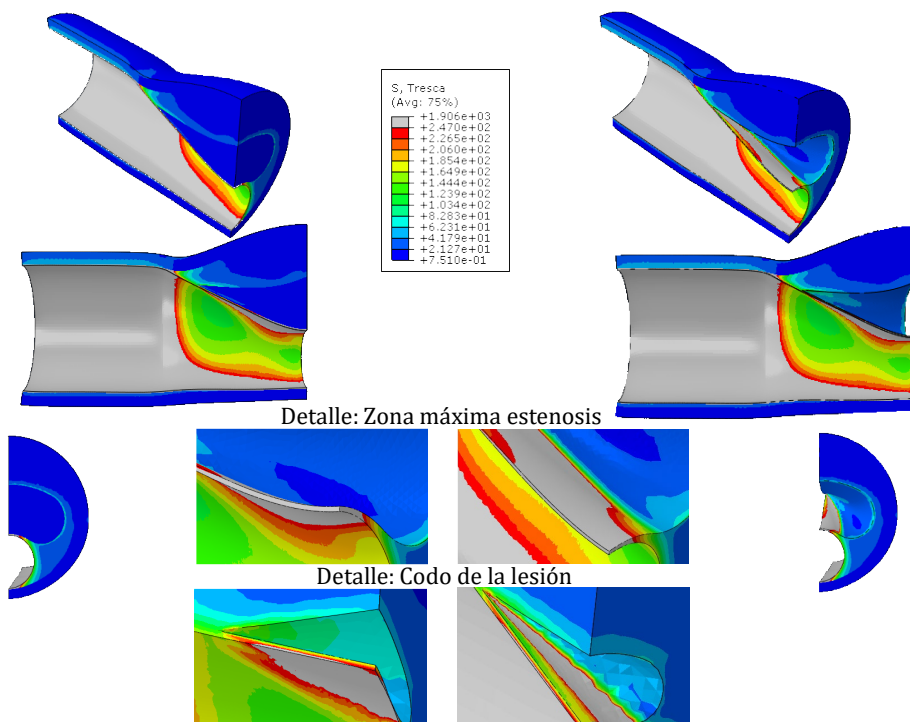


Figura 133: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 9,75 mm- Tensiones criterio Tresca

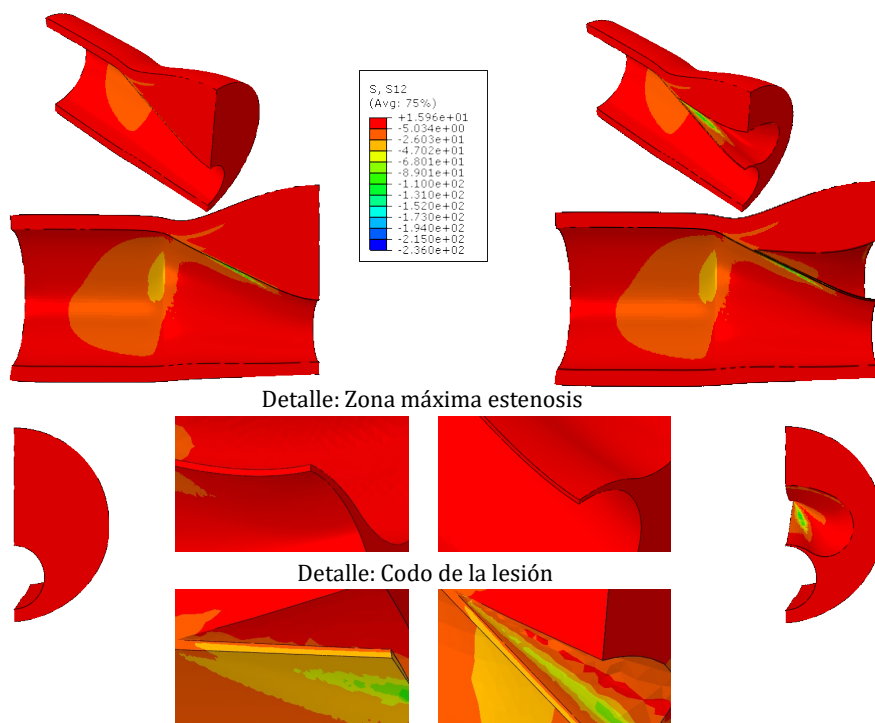


Figura 134: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 9,75 mm- Tensiones Tangenciales XY

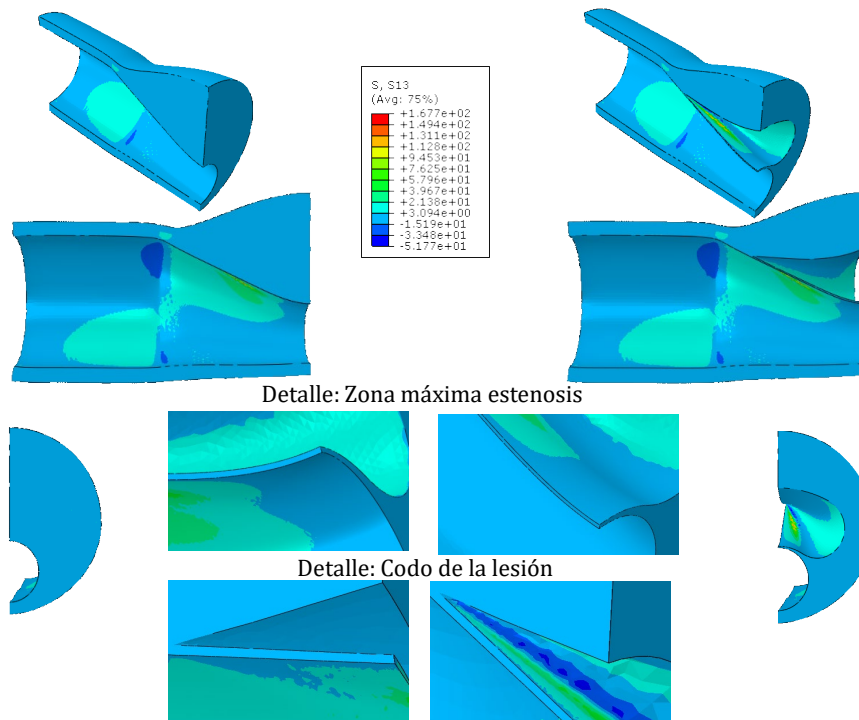


Figura 135: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 9,75 mm- Tensiones Tangenciales XZ

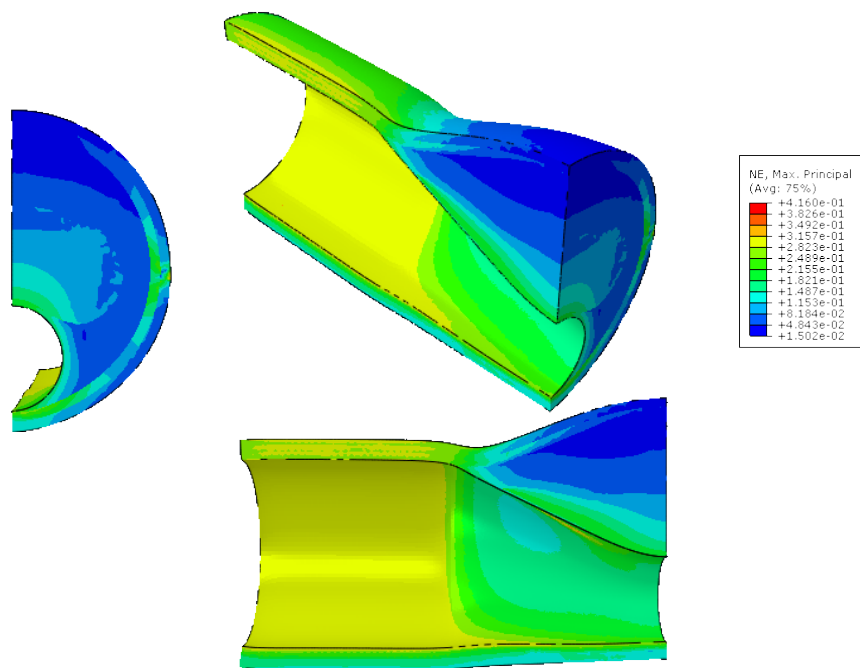


Figura 136: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 9,75 mm- Deformaciones Principales

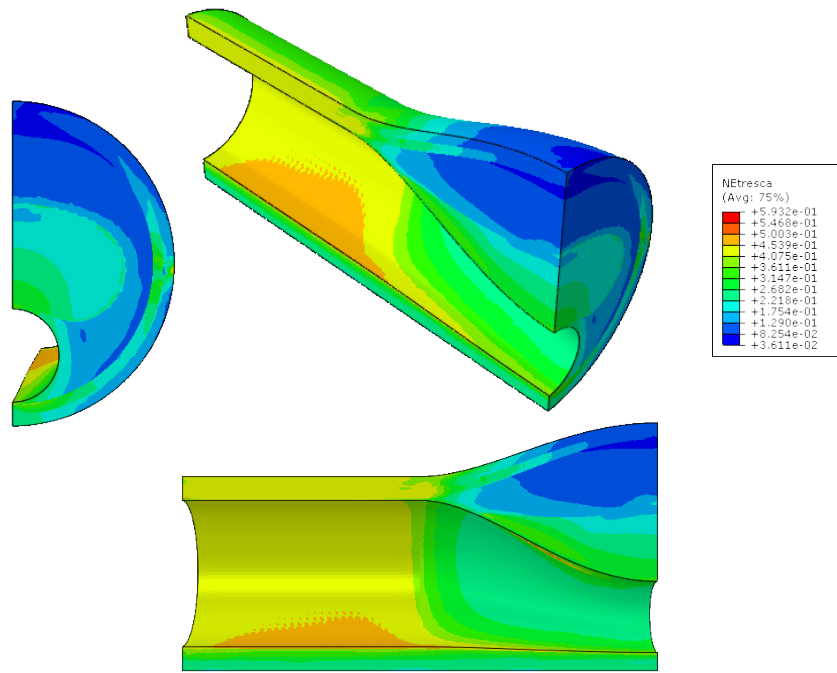


Figura 137: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 9,75 mm- Deformaciones criterio Tresca

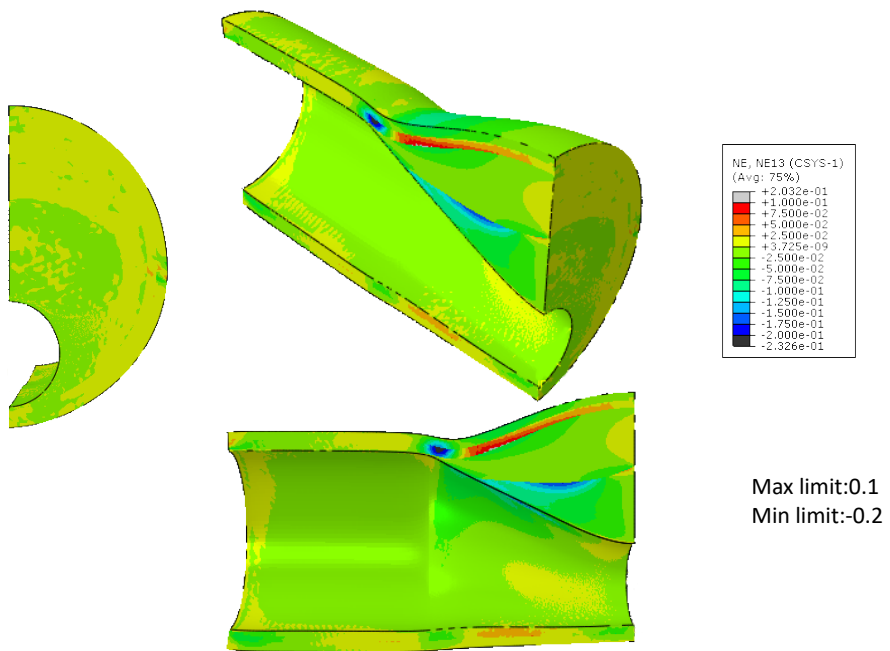


Figura 138: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 9,75 mm- Deformaciones Tangenciales RZ

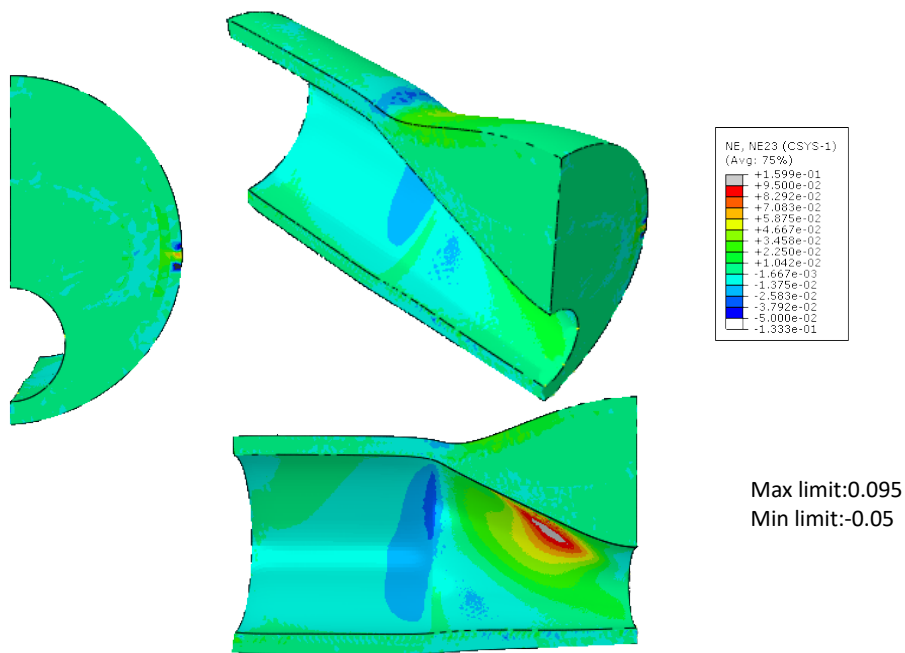


Figura 139: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 9,75 mm- Deformaciones Tangenciales ΘZ

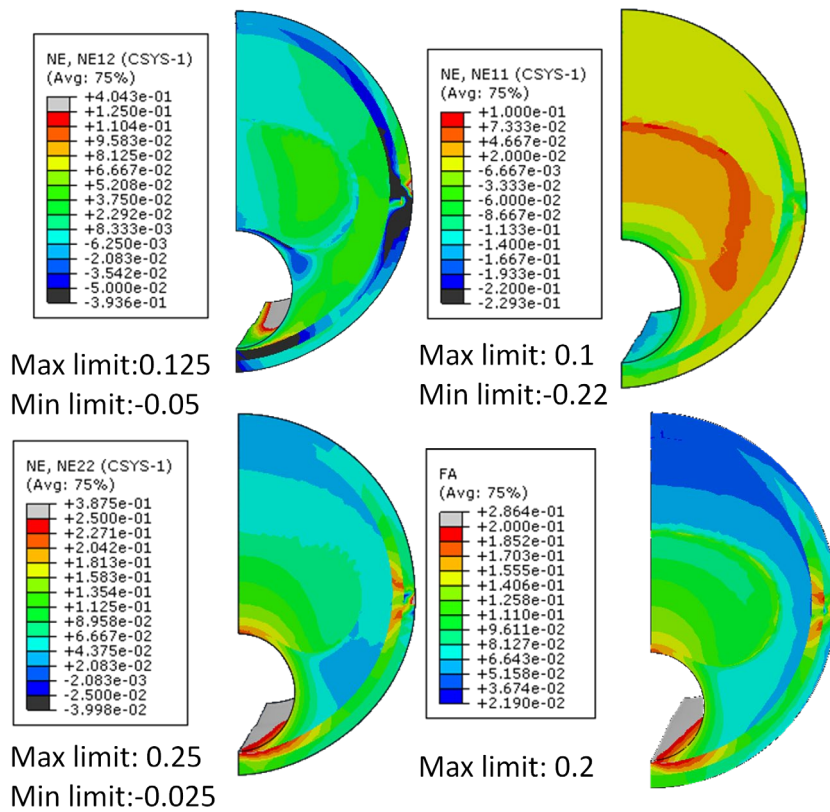


Figura 140: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 9,75 mm- Deformaciones Tangenciales ΘR / Deformaciones Tangenciales R / Deformaciones Tangenciales Θ / Índice de anisotropía

- Placa de 13 mm y núcleo de 6,5 mm.

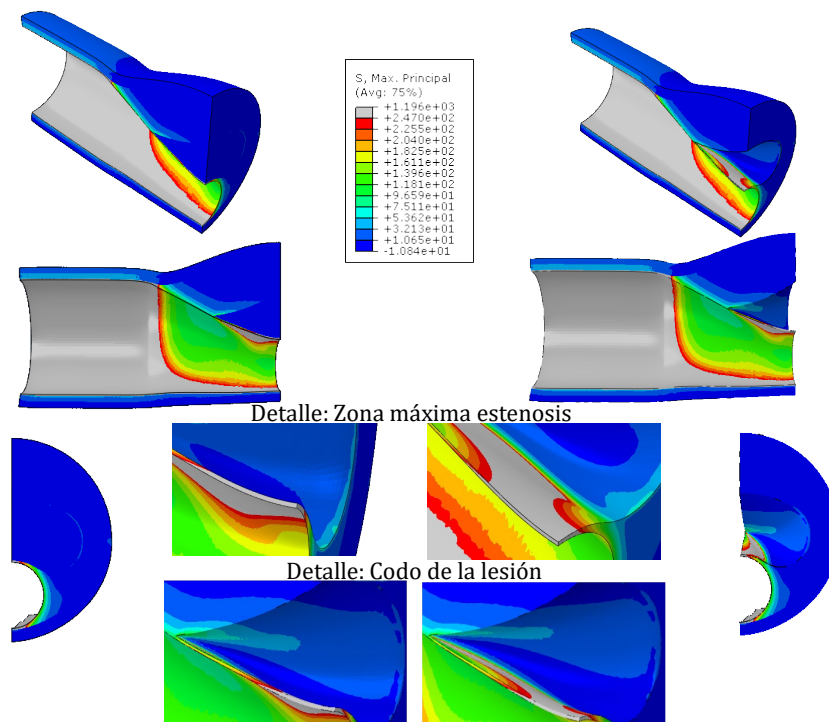


Figura 141: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 6,5 mm- Tensiones Principales Máximas

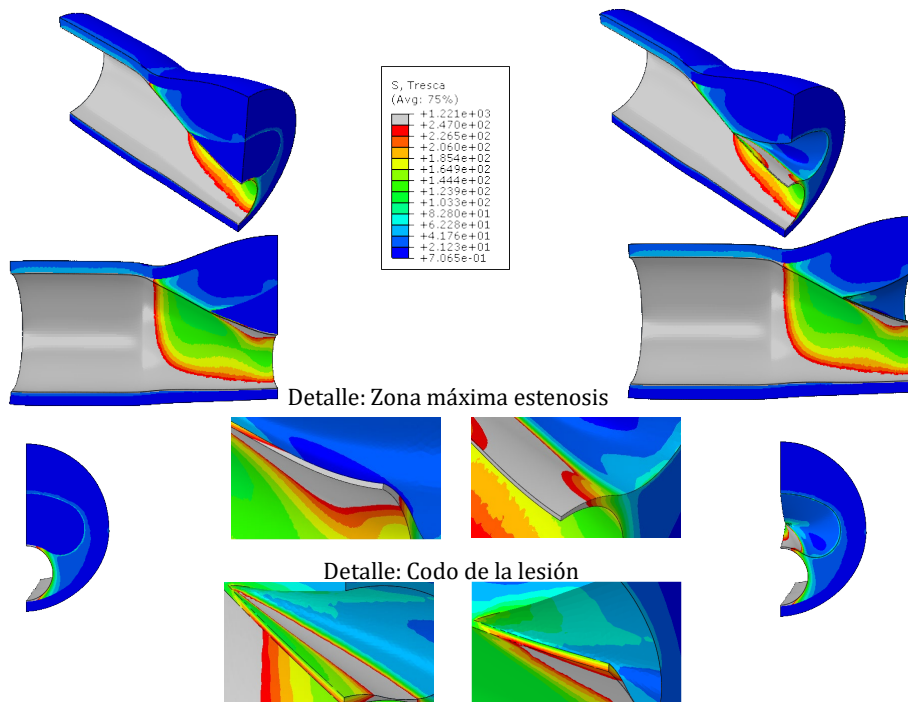


Figura 142: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 6,5 mm- Tensiones criterio Tresca

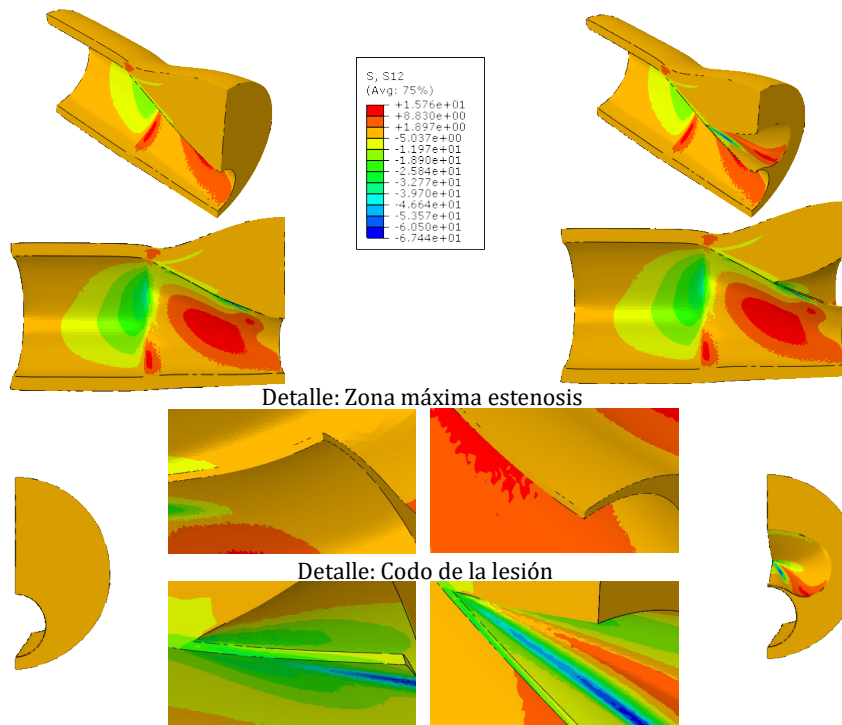


Figura 143: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 6,5 mm- Tensiones Tangenciales XY

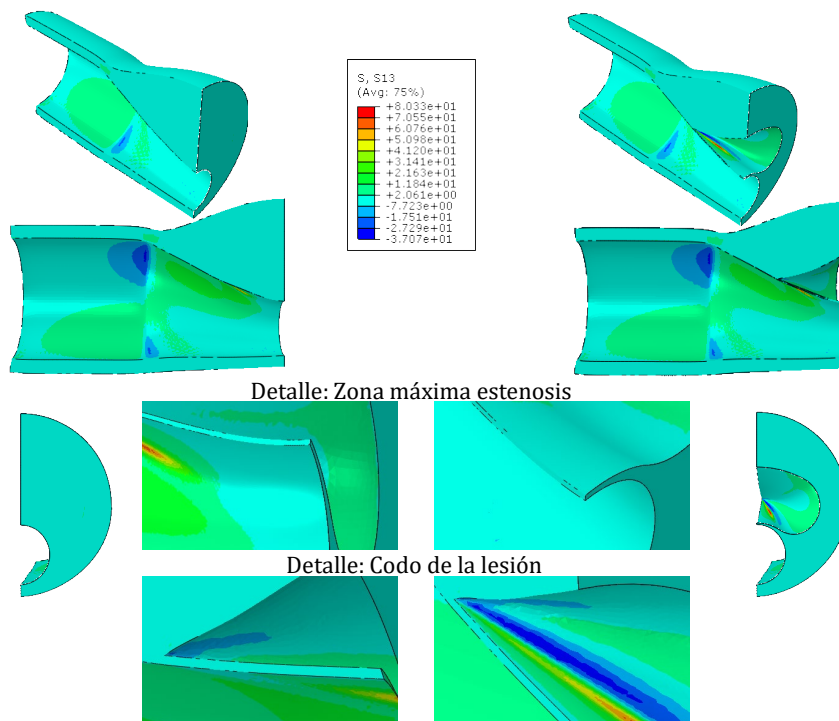


Figura 144: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 6,5 mm- Tensiones Tangenciales XZ

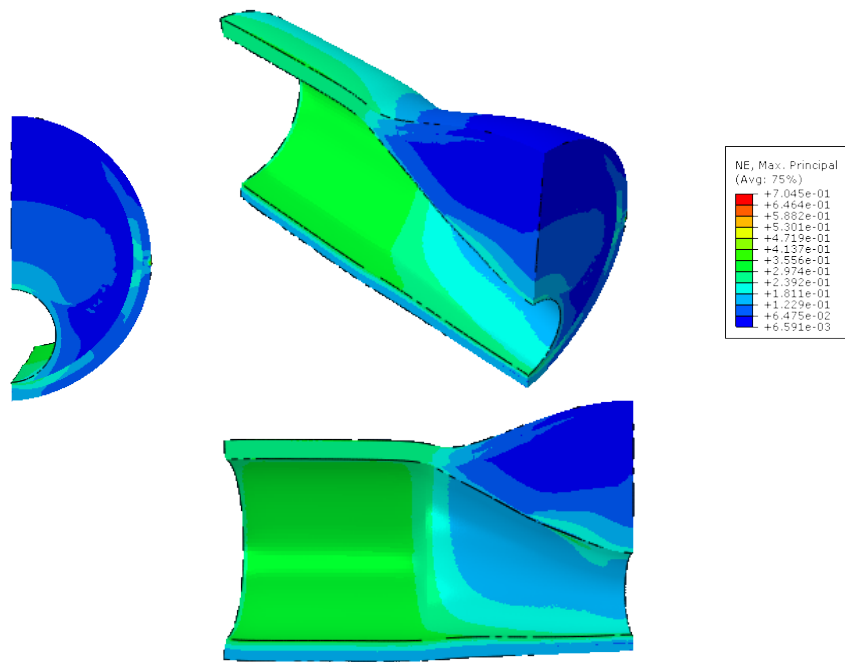


Figura 145: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 6,5 mm- Deformaciones Principales

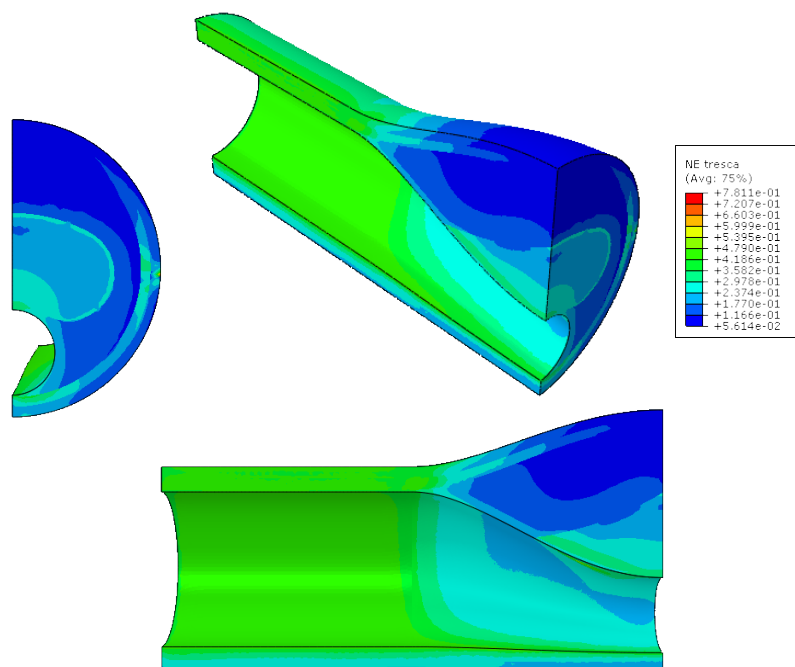


Figura 146: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 6,5 mm- Deformaciones criterio Tresca

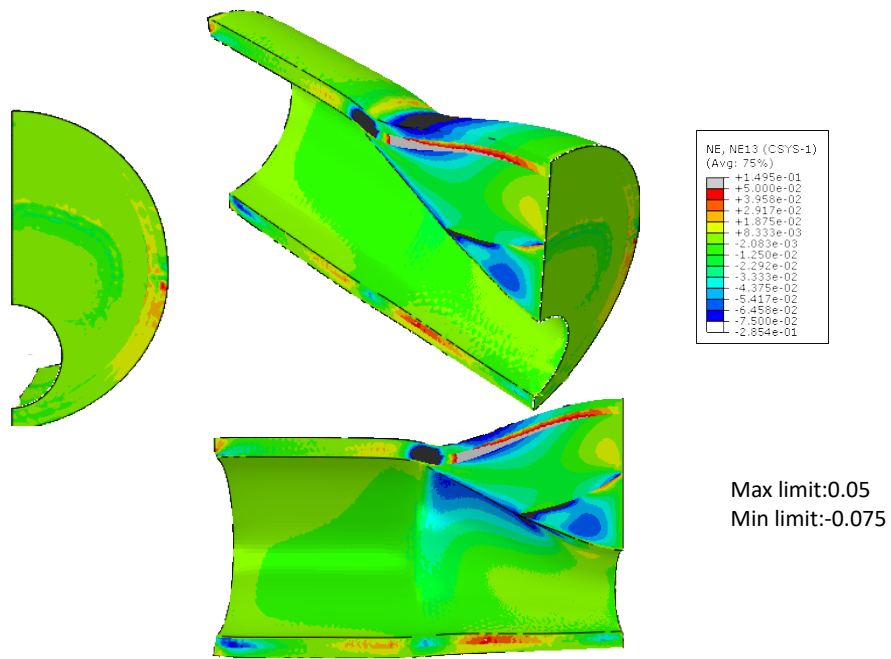


Figura 147: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 6,5 mm- Deformaciones Tangenciales RZ

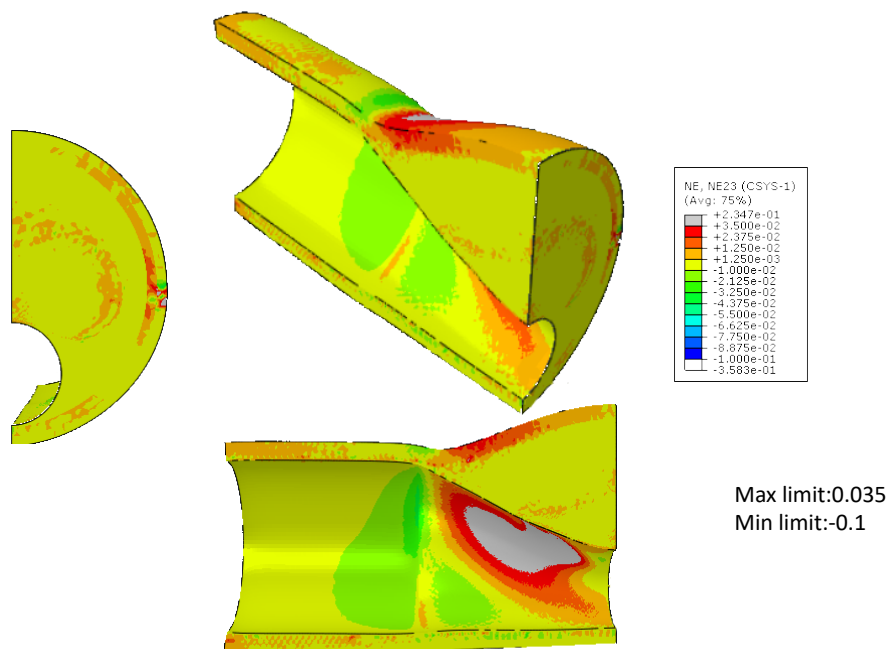


Figura 148: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 6,5 mm- Deformaciones Tangenciales OZ

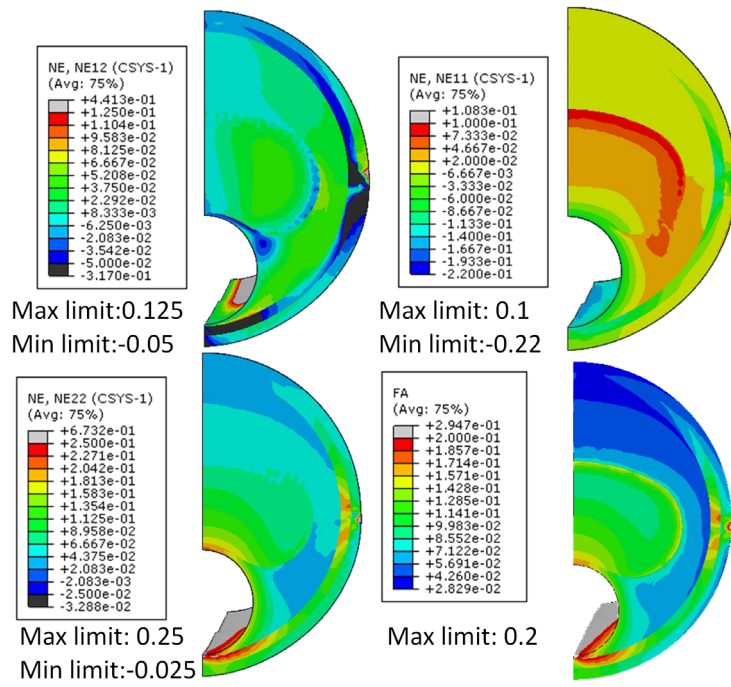


Figura 149: Placa de 13 mm con núcleo lipídico de 6,5 mm- Deformaciones Tangenciales ΘR / Deformaciones Tangenciales R/Deformaciones Tangenciales θ / Índice de anisotropía