

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales



TESIS DE MÁSTER

MODELADO DE UNA OSTEONA DE HUESO CORTICAL
MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS INCORPORANDO
ELEMENTOS COHESIVOS

Presentado por: D. Joseba Atucha Alegria

Dirigido por: Dr. Eugenio Giner Maravilla

Valencia, Julio de 2015

RESUMEN

En la presente tesis de máster se modela mediante elementos finitos una osteona extraída de la imagen por microscopía electrónica y técnica de tinción del hueso cortical de una tibia de una oveja. El modelo consta de todas las partes que componen la estructura de hueso cortical, osteonas a partir de lamelas apiladas, línea cementante y matriz intersticial.

El trabajo describe la técnica para simular osteonas realistas desde el punto de vista geométrico y desde el punto de vista de propiedades de material. Para ello se ha basado en técnicas de generación de malla y procesos de ensamblado para obtener una estructura de elementos finitos adecuada para llevar a cabo las simulaciones.

Además, se han incluido elementos cohesivos y la definición de éstos para poder llevar a cabo simulaciones de procesos de delaminación entre superficies pegadas. El comportamiento del proceso de separación se ha realizado mediante leyes de tracción separación comúnmente usados en materiales compuestos.

Una vez generados los modelos con y sin elementos cohesivos se ha realizado un análisis bajo un caso de carga específico con el fin de comparar resultados y definir las ventajas y desventajas de la simulación con elementos cohesivos.

ABSTRACT

In this Máster Thesis an osteon extracted from an electronic microscope image of a sheep tibia cortical bone is modelled using the finite element method. The model is composed by all the compact bone parts, such as the osteon by stacking lamellas, the cement line and the interstitial matrix.

The aim of the work is to describe the techniques in order to develop osteons in a more realistic way from the geometrical material properties point of view. In order to do this, the work is based in a specifically mesh generation technique and assembly process which generates a structured finite element model which allows the simulations.

In addition, cohesive elements have been included in the model and the procedure to define these elements in order to carry out debonding processes between two surfaces initially closed is described. The behavior of the debonding process has been done using traction separation laws commonly used in composite materials.

Once the models are developed with and without the cohesive zone model, an analysis has been carried out under a specific load case in order to compare the results and define the advantages and disadvantages of the use of cohesive zone models.

RESUM

En la present tesi de màster es modelitza mitjançant elements finits una osteoma extreta de la imatge per microscòpia electrònica de l'os cortical de la tibia d'una ovella. El model consta de totes les parts que componen l'estructura de l'os cortical, osteones a partir de lamel·les apilades, línia cementant i matrius intersticials.

El treball descriu la tècnica per a simular osteones realistes des del punt de vista geomètric i des del punt de vista de propietats de material. Per a tal efecte, s'ha utilitzat tècniques de generació de malla i processos d'assemblat per a obtindre una estructura d'elements finits adequada per a les simulacions.

A més a més, s'han inclòs elements cohesius i la seua pròpia definició, per tal de desenvolupar simulacions dels processos de delaminació entre superfícies pegades. El comportament del procés de separació s'ha realitzat mitjançant lleis de tracció separació, utilitzades habitualment en materials compostos.

Una vegada han estat generats els models amb i sense elements cohesius, s'ha realitzat un anàlisi sota un cas de càrrega específic amb la finalitat de comparar resultats i definir els avantatges i desavantatges de la simulació amb elements cohesius.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Eugenio mi director de Tesis de Máster, la posibilidad de realizar este trabajo con él, por haber estado presente en todo momento a pesar de la distancia que y por haber confiado en mí y animarme hasta el finalizar esta Tesis de Máster. Este proceso me ha permitido desarrollar capacidades en el mundo de la simulación mecánica y ha sido un hito importante en mi carrera profesional.

También quiero acordarme dentro del equipo de investigación de Ana, con quien inicié el proceso de generación de modelos en EF y quien siempre estuvo presente cuando la necesité. Quiero también agradecer profundamente a Camila ya que su aportación ha sido clave en el desarrollo de esta Tesis de Máster. También a Fede por la paciencia que tuvo en todo momento.

Quiero acordarme con especial cariño de mi amigo Joseba Mendiguren, que ha sido un pilar fundamental todos estos años tanto en lo profesional como en lo personal y sin él, el camino andando no hubiera sido tan motivador.

A Victoria, porque siempre me ha apoyado y animado y gracias a ella ha sido posible sacar adelante este proyecto. Cómo no a su familia por haberme acogido y cuidado desde el primer día que llegue. Gracias.

Y por último pero no por ello menos importante, a mi Aita y Ama, a mi hermano y a toda mi familia, sin ellos nunca hubiera podido llevar a cabo las cosas que me he propuesto en la vida. Eskerrikasko guztioi.

INDICE GENERAL

RESUMEN	3
ABSTRACT	5
RESUM	7
AGRADECIMIENTOS	9
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. MOTIVACION	13
1.2. OBJETIVOS TESIS DE MÁSTER	13
1.3. ORGANIZACION DE LA TESIS DE MÁSTER	14
2. ESTRUCTURA HUESO CORTICAL	15
2.1. INTRODUCCION	15
2.2. MORFOLOGIA: ESTRUCTURA MACROSCOPICA Y MICROSCOPICA	16
2.3. UNIDAD ESTRUCTURAL OSEA: OSTEONA Y CANAL DE HAVERS	19
3. PROPIEDADES MECANICAS DE HUESO CORTICAL	23
3.1. INTRODUCCION	23
3.2. CARACTERIZACION DE PROPIEDADES ELASTICAS DEL HUESO CORTICAL	28
3.2.1. <i>Matriz de rigidez basada en modelo de homogeneización para lamelas</i>	28
3.2.2. <i>Matriz intersticial</i>	33
3.2.3. <i>Línea cementante</i>	33
3.3. RESISTENCIA MECANICA DE LAMELAS	34
3.3.1. <i>Resistencia tracción tensión circunferencial</i>	35
3.3.2. <i>Resistencia tracción tensión radial</i>	35
3.3.3. <i>Resistencia a tensión cortante</i>	36
3.4. CRITERIOS DE FALLO EN LAMELAS	36
3.4.1. <i>Modelo de Prendengast y Huiskes</i>	36
3.4.2. <i>Modelo Osteona mediante elementos cohesivos (CZM)</i>	39
4. MODELADO DE UNA OSTEONA MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS EN ABAQUS	41
4.1. INTRODUCCION	41
4.2. GEOMETRIA	42
4.3. CONSTRUCCIÓN DE MALLA EF	44
4.3.1. <i>Mallado de lamelas y línea cementante</i>	45
4.3.2. <i>Mallado de la matriz intersticial</i>	47
4.3.3. <i>Ensamblaje final</i>	49
4.4. DESCRIPCION MODELO EF OSTENA	51
4.5. DEFINICION DE SISTEMA DE COORDENADAS	52
4.6. PROPIEDADES MECÁNICAS	53
4.6.1. <i>Definición de elasticidad anisótropa en Abaqus</i>	53
4.6.2. <i>Orientación de material en lamelas y línea cementante</i>	53
4.6.3. <i>Propiedades de material en lamelas</i>	56
4.6.4. <i>Propiedades de material de la línea cementante</i>	58
4.6.5. <i>Propiedades de material de la matriz intersticial</i>	59
4.6.6. <i>Fichero de entrada formato Abaqus para definir propiedades del material</i>	60
4.7. CONDICIONES DE CONTORNO EN MODELO	61
4.8. POSTPROCESO DE RESULTADOS	63
5. MODELADO DE OSTEONA MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE ELEMENTOS COHESIVOS (MODELOS DE ZONA COHESIVA, CZM)	79
5.1. INTRODUCCION	79
5.1.1. <i>Elementos cohesivos en Abaqus</i>	79
5.1.2. <i>Ensamblado mediante elementos cohesivos</i>	82

5.1.3.	<i>Definición del comportamiento del material en elementos cohesivos</i>	82
5.1.4.	<i>Problemas de convergencia en Abaqus</i>	83
5.1.5.	<i>Definiendo el espesor constitutivo</i>	83
5.2.	ELEMENTOS COHESIVOS: LEY DE TRACCION SEPARACION	86
5.2.1.	<i>Definición de las propiedades elásticas del material: elasticidad en términos de tracción separación para elemento cohesivos</i>	86
5.2.2.	<i>Interpretación de las propiedades de material</i>	88
5.3.	MODELADO DEL DAÑO	90
5.3.1.	<i>Iniciación del daño</i>	91
5.3.2.	<i>Evolución del daño</i>	92
5.3.3.	<i>Máximo daño y criterio de eliminación de elementos</i>	94
5.4.	INCLUSION DE ELEMENTOS COHESIVOS	94
5.5.	POSTPROCESO DE RESULTADOS	98
6.	VALORACIÓN DE VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA INCLUSIÓN DE CZM EN COMPARACIÓN CON EF STANDARD	122
7.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTURO	124
8.	BIBLIOGRAFIA	128



1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACION

Las motivaciones que han impulsado al desarrollo de esta tesis de máster son las siguientes:

- La aplicación de los conocimientos adquiridos durante la obtención del título de postgrado.
- Contribuir al proyecto de investigación “Aplicación del método de elementos finitos extendido y modelos de zona cohesiva al modelado micro estructural del daño en hueso cortical
- Poder desarrollar un proyecto que se basa en el conocimiento del método de los elementos finitos mediante Abaqus.
- Cumplir el último requisito para la obtención del título de Máster en Ingeniería Mecánica y Materiales tras la finalización de los estudios.

Además representa un avance en el estado del arte que pretender ampliar el conocimiento sobre la mecánica de la fractura computacional mediante el uso de modelos cohesivos y de elementos extendidos.

1.2. OBJETIVOS TESIS DE MÁSTER

El objetivo final del trabajo final de máster es el de desarrollar un modelo de EF con las técnicas computacionales de hoy en día que sirva para poder modelar de forma más realista la geometría de osteonas dentro del marco de estudio del daño en el hueso cortical.

Por otro lado, permitir realizar simulaciones que se acerquen más a la realidad de los estados tensionales y de las deformaciones que sufre el tejido óseo cuando es sometido a cargas o esfuerzos basados también en propiedades de material de las partes que componen el hueso cortical.



Por otro lado se pretende implementar dentro de los modelos de elementos finitos, nuevos criterios de fallo y de resistencia de materiales, que permitan calcular zonas iniciadoras de daño y la evolución del daño generado. También fenómenos de delaminación como se estudia en el campo de los materiales compuestos.

Todo ello enfocado también a estandarizar e implementar de forma relativamente simplificada la creación de modelos de elementos finitos para el estudio de una o más osteonas y obtener una visión más general.

1.3. ORGANIZACION DE LA TESIS DE MÁSTER

La estructura de la presente tesis de máster se divide de la siguiente manera. En el capítulo 2 se describe la estructura ósea sobre la cual se va basar los modelos de elementos finitos que se han realizado. Para ello es necesario conocer desde un punto de vista más global el sistema esqueleto e ir desarrollando todas sus partes hasta llegar a la unidad estructural del hueso cortical que se quiere analizar, la osteona.

El tejido óseo es un sistema muy complejo que se compone de distintas partes, que van desde un nivel macroscópico a un nivel microscópico. La suma de estas partes da como resultado las propiedades mecánicas finales del hueso cortical. Por eso, en el capítulo 3 se describen las propiedades elásticas de las partes que componen las osteonas.

En los capítulos 4 y 5 se describen los modelos de elementos finitos generados y se muestran las simulaciones y análisis que se han realizado bajo una serie de hipótesis.

En el capítulo 6 se han identificados las ventajas y desventajas de aplicar modelos con zona cohesiva (CZM) y de donde se han obtenido unas conclusiones que se han resumido en el capítulo 7.

Para finalizar la memoria termina con una lista de referencias bibliográficas Capítulo 8.



2. ESTRUCTURA HUESO CORTICAL

2.1. INTRODUCCION

El sistema esqueleto en biología se conoce como el sistema biológico que proporciona soporte apoyo y protección de los tejidos blandos y músculos de los organismos vivos. Con él, se garantizan las funciones de locomoción, sostener otras partes del cuerpo y la de protección.

En el caso de los vertebrados, estos seres vivos presentan un esqueleto interno o endoesqueleto, que está constituido por huesos unidos entre sí mediante articulaciones.

Este sistema esqueleto, es de vital importancia en la biomecánica del cuerpo y de su metabolismo. El hueso es el principal elemento del sistema esqueleto, y difiere del resto de los tejidos orgánicos por la rigidez y la dureza que los caracteriza.

Estas características del hueso, provienen de las sales minerales inorgánicas que se encuentran en una estructura matriz, y que está compuesta por fibras de colágeno, una gran variedad de proteínas no colágenos y minerales. La rigidez y la dureza de los huesos permite que:

- el esqueleto sea capaz de soportar las cargas del cuerpo y mantener su forma.
- proteger los tejidos más blandos como la cavidad craneal, torácica y cavidades pélvicas.
- sirva como estructura para alojar la médula ósea.
- transmitir y soportar las fuerzas musculares de una parte del cuerpo a otro durante el movimiento.

Los minerales que contienen los huesos también sirven como depósitos de iones, en particular el calcio, que a menudo contribuye en la regularización del compuesto del fluido extracelular como es el calcio ionizado.

Además, el tejido óseo, es una estructura con un sistema de auto reparación, que permite adaptar su masa, forma y el cambio de sus requerimientos mecánicos para evitar daños irreversibles y fracturas debido a la actividad física constante.

2.2. MORFLOGIA: ESTRUCTURA MACROSCÓPICA Y MICROSCÓPICA

Macroestructura

Los huesos denominados "largos", como el humero, fémur y la tibia, se clasifican dentro de las estructuras macroscópicas. Un hueso típico en un adulto consiste en una barra con forma de cilindro o "diáfisis" y dos extremidades con una anchura mayor y una forma más redondeada, la epífisis.

La mayoría de los huesos tiene una forma más redondeada en las extremidades que en su parte central debido a que es ahí donde se encuentran las uniones con otros huesos a través de los tejidos cartilagosos. En estas uniones es donde se transmite la fuerza de un hueso a otro hueso. Para poder soportar la carga que han de transmitir, los tejidos cartilagosos abarcan un área mayor que el hueso.



Figura 1. Partes que componen los huesos del tipo largos.

En la Figura 1 se muestra las partes de un hueso denominado "largo" y que se clasifica dentro de las estructuras macroscópicas.

La diáfisis está compuesta principalmente de hueso cortical, mientras que la metáfisis y la epífisis está compuesta por hueso trabecular como se puede ver en la Figura 2

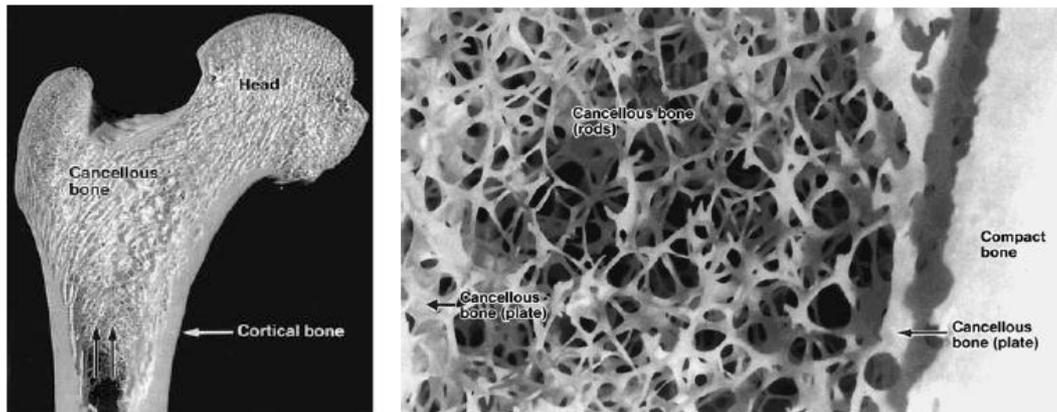


Figura 2. Detalle del corte longitudinal de un hueso largo donde se muestra el hueso cortical y el hueso trabecular.

El hueso cortical es una masa ósea sólida y densa que está compuesta a nivel micro estructural en partes distintos tipos de material. Aproximadamente el 80 % de la masa del esqueleto humano adulto está compuesto por hueso cortical.

El restante 20% está compuesto por hueso trabecular, un entramado de láminas y líneas entrelazadas conocidos como trabéculas que se encuentran en el interior de los huesos.

Micro estructura

Tal y como se ha comentado, el hueso cortical está constituido a nivel micro estructural en por distintas partes. Aquí es donde se encuentra el hueso lamelar, que da lugar a una estructura más organizada que el hueso trabecular.

El hueso lamelar está formado por capas de material apiladas llamadas lamelas. Su morfología se asemeja a la de los anillos concéntricos que se encuentran en el interior de los arboles.

Cada lamela tiene un espesor aproximado de entre 3-7 μm y contienen fibras de colágeno que se distribuyen en la misma dirección que las lamelas. Estas fibras pueden variar hasta en un ángulo de 90° respecto a la dirección orientación de las lamelas.

Las lamelas en el hueso cortical de un adulto dan lugar a una estructura que se puede clasificar en tres partes: anillos circulares apilados de forma concéntrica alrededor de canales vasculares llamados osteonas o sistema Haversiano (1); capas de lamelas que se cruzan a medida que éstas se han ido formando y que dan lugar a lamelas circunferenciales (2); fragmentos de lo que fueron osteonas o lamelas circunferenciales y que dan lugar al llamado matriz intersticial rellenando la matriz formado por las el sistema Havers y las lamelas circunferenciales(3).

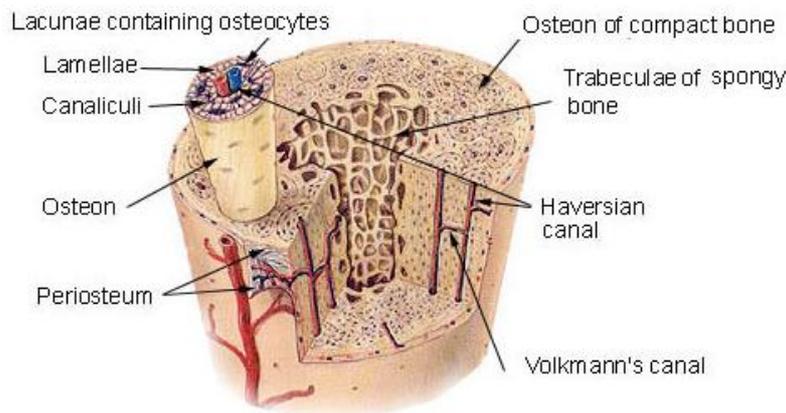


Figura 3. Imagen esquemática de un corte transversal y longitudinal de un hueso. Se muestra en sección el hueso trabecular y el hueso cortical junto a las osteonas, lamelas, Canal de Havers, lagunas, canaliculi y canal de Volkmann.

En la Figura 3 se puede apreciar las tres partes que componen el hueso cortical como se ha mencionado arriba. También se pueden observar pequeñas cavidades que se alojan entre las lamelas. Estas cavidades se denominan lagunas y están conectadas unas a otras mediante canales

llamadas "canaliculi". En las lagunas se alojan las células óseas llamadas osteocitos junto con el proceso citoplásmico que éstas desempeñan. En la Figura 4 se puede apreciar la inclusión de lagunas entre las capas apiladas de lamelas.

La composición del hueso consiste en un 65% de mineral y un 35% de material orgánico, células y agua. El mineral que contiene el hueso se encuentra en forma de pequeños cristales de hidroxiapatita, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, que a su vez forman parte como refuerzo de una matriz de fibrilos de colágeno [Ref 1].

2.3. UNIDAD ESTRUCTURAL OSEA: OSTEONA Y CANAL DE HAVERS

El hueso cortical es un material con una estructura jerárquica, similar a un material compuesto mediante fibras reforzadas que incluye osteonas; matriz intersticial; cement line; poros (el canal de Havers, lagunas y los canales de Volkmann).

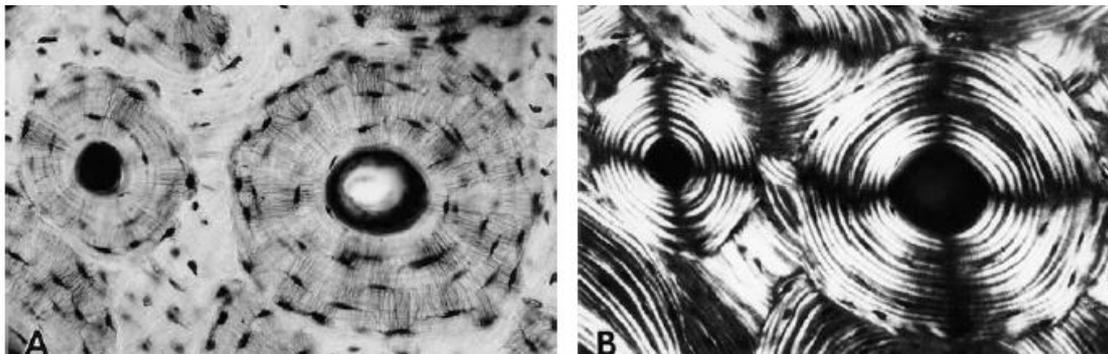


Figura 4. (A) Sección transversal del hueso cortical donde se muestran las osteonas con las lagunas, canaliculi y canal de Havers. También se muestran las lamelas intersticiales entre lamelas. (B) Misma sección con luz polarizada donde se muestran el apilado de lamelas. [Ref 1]

Como se ha comentado, en el hueso cortical la estructura principal es la osteona o canal de Havers (sistema Haversiano) y ésta se orienta longitudinalmente dentro del hueso lamelar. Las osteonas ocupan dos terceras partes del volumen del hueso cortical. El tercio restante lo ocupa la matriz

intersticial que se compone de osteonas más antiguas y lamelas circunferenciales.

El tamaño medio de las osteonas ronda los 200-250µm de diámetro. El canal central de las osteonas se conecta con otras osteonas transversalmente con el canal de Volkmann como se puede apreciar en la Figura 3 [Ref 1].

Una osteona típica está construida por unas 20-30 capas concéntricas de lamelas, y el espesor de la pared puede oscilar entre los 70-100 µm.

A esta escala de la micro estructura es donde se observa que las lamelas están compuestas por fibras de colágeno, que a su vez están compuestas de grupos de fibrilos de colágeno mineralizado, orientados de tal forma que esta varía en cada capa de lamelas [Ref 1].

Los fibrilos de colágeno se componen de moléculas de colágeno que albergan cristales de hidroxipatita. En la Figura 5 se puede observar más en detalle cómo cambia la estructura de hueso cortical a distintas escalas, desde 500 µm hasta 1 nm.

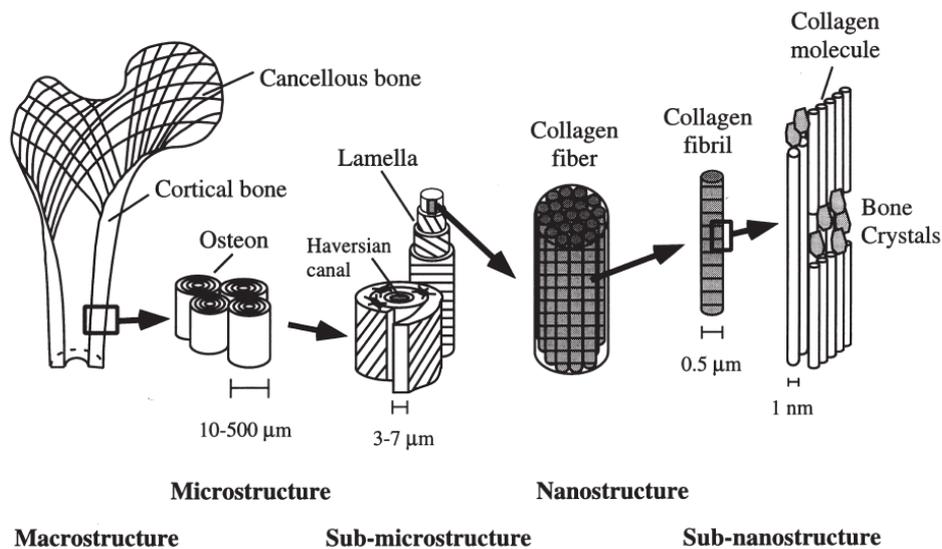


Figura 5 Organización de la Estructura jerárquica del hueso: (a) Hueso trabecular y cortical; (b) osteonas y canal de Havers; (c) lamelas; (d) Fibras de colágeno formadas a partir de fibrilos de colágeno; (e) minerales, moléculas de colágeno y proteínas no colágenas [Ref 2].



Rodeando la última línea de la osteona se sitúa otra capa exterior de un espesor menor entre 1-2 μm . Esta última capa de pequeño espesor se conoce como "cement line" o línea cementante. Se trata de una capa de tejido óseo con una matriz más mineralizada y que contiene una cantidad mucho menor de fibras de colágeno [Ref 1].



3. PROPIEDADES MECANICAS DE HUESO CORTICAL

3.1. INTRODUCCION

Para comprender las propiedades mecánicas de hueso como cualquier otro material de interés, es importante entender las propiedades de material de las distintas partes que compone el hueso y la relación que guardan esta partes entre sí a distintas escalas, desde el punto de vista de una organización estructural jerárquica.

Los niveles estructurales en el hueso cortical son [Ref 2]:

1. macro estructural: el hueso cortical.
2. micro estructural: (desde 10 a 500 μm): sistema Haversiano y osteona;
3. sub-micro estructural:(1-10 μm): lamelas y línea cementante.
4. nano estructural: (desde cientos de nanómetros hasta 1 μm): fibrilos de colágeno y minerales embebidos.
5. sub nano estructural (por debajo de pocos cientos de nanómetros): estructura molecular de elementos constituyentes como son los minerales, colágeno, y proteínas orgánicas no colágenos.

Esta estructura jerárquicamente organizada mostrada en la Figura 5, alcanza una forma irregular, aunque muy optimizada, y con partes de material orientado, haciendo que el material óseo sea heterogéneo y anisótropo.

Se ha podido ver que las propiedades mecánicas del hueso varían a cada nivel estructural.

Por ejemplo, en el caso de especímenes de hueso cortical largos se ha visto como del módulo de Young puede variar en un rango entre 14 y 20 GPa (especimen húmedo, propiedad macro estructural) [Ref 3], mientras que para especímenes sometidos a micro flexión este valor ha sido de 5,4 GPa [Ref 4].

Sin embargo, no está claro si esta discrepancia viene del método empleado en el ensayo o es debido a la influencia de la micro estructura.



En la literatura también se ha obtenido el módulo de Young de una osteona del hueso lamelar por nanoindentación y que ha dado como resultado 22 GPa [Ref 5] (espécimen húmedo, propiedad micro estructural), cercano al valor macro estructural.

El valor del módulo de Young a nivel nano estructural, es un valor que se ha caracterizado en menor medida que el micro estructural. Esto es debido a la complejidad del ensayo, haciendo prácticamente imposible su caracterización de dado el al tamaño de los fibrilos de colágeno y sus cristales embebidos.

Las propiedades mecánicas del hueso cortical dependen en gran medida del nivel de porosidad, el nivel de mineralización y de cómo se organiza la matriz sólida.

Esto hace que sea difícil predecir las micro propiedades mecánicas in vivo mediante técnicas de medición de propiedades mecánicas a nivel macro estructural [Ref 6],[Ref 7].

En general las propiedades mecánicas del hueso a nivel macro estructural varían de un hueso a otro hueso, de igual modo que lo hace en función de que partes se analicen dentro de un mismo hueso.[Ref 8],[Ref 9].

Se han hecho estudios usando técnicas de ultrasonidos para calcular el módulo elástico ortótropo, módulo elástico transversal, coeficiente de Poisson y densidad en función de la posición estudiada para distintos tipos de huesos humanos (fémur, tibia mandíbula, vertebras lumbares, etc...)[Ref 8],[Ref 10].

Las propiedades mecánicas del hueso cortical en la tibia, fémur y el humero varían en función del sujeto estudiado. Sin embargo la densidad no cambia.

El módulo elástico no cambia en dirección longitudinal en el hueso cortical de distintos sujetos, aunque la variabilidad el módulo es mayor a lo largo del hueso que en dirección del radial (la variación del módulo en dirección circunferencial es menor del 10%).

Ascensi junto con otros colaboradores examinaron las propiedades mecánicas de un solo sistema Haversiano en tensión [Ref 11], compresión [Ref 12], flexión [Ref 13] y torsión [Ref 14].



Para los ensayos a tracción, los especímenes fueron extraídos de huesos con un espesor menor de 50 μm , menor que el espesor de una sola osteona (cuyo grosor ronda los 200 μm).

El valor del módulo elástico de las osteonas fue de entre 5.5 y 12 GPa a tracción y una resistencia de entre 102 y 120 MPa (el primer valor está referido a osteonas cuyas lamelas adyacentes tienen una orientación que difieren unas de otras mientras que el segundo valor está referido a especímenes con una orientación de las lamelas mayoritariamente en dirección longitudinal) [Ref 11].

Más tarde, Ascensi y Bonucci [Ref 12] examinaron osteonas a compresión aisladas y observaron que la rigidez fue en torno a la mitad que en tensión 6-7 GPa pero que la resistencia fue en torno del mismo valor que en el ensayo de tracción, entre 110 y 130 MPa.

Posteriormente Ascensi et al [Ref 13], realizaron ensayos a flexión en osteonas, (al igual que antes para osteonas con lamelas orientadas en sentido longitudinal y osteonas con lamelas adyacentes con orientaciones alternadas) dando como resultado una rigidez de entre 2-3 GPa y una resistencia a flexión de 350-390 MPa.

En los ensayos de torsión llevados también por Ascensi et al [Ref 14], obtuvieron una rigidez a torsión de 16-20 GPa y una resistencia a torsión de 160-200 MPa.

La disparidad de los resultados sugiere que la caracterización de la orientación de las lamelas puede ser la clave de conocer las propiedades mecánicas de las osteonas.

Ascensi et al [Ref 11], [Ref 12],[Ref 13],[Ref 14] estaban convencidos de que las osteonas con lamelas orientadas en dirección longitudinal tienen un comportamiento mejor a tensión y a torsión y tal vez más resistencia a flexión, mientras que las osteonas con lamelas adyacentes con orientaciones distintas tienen un mejor comportamiento a compresión.

El resultado de la rigidez del ensayo de torsión dio lugar a un valor mucho mayor que la rigidez macro estructural de un hueso.



Este resultado no se justificó ni se explicó, aunque este efecto se podría explicar usando la elasticidad micro polar de Cosserat, que explica rotaciones locales en la línea cementante y otras localizaciones [Ref 15].

Ascensi y sus colaboradores quisieron contrastar los resultados de los ensayos citados anteriores mediante microscopio, observando la deformación de las lamelas cuando estas comenzaban a fallar.

Así fue como observaron la aparición de fisuras a 30-40° en forma de sombras aunque no guardaba relación con la arquitectura de las lamelas.

Sin embargo en el caso del ensayo a tracción, las lamelas transversales eran las que se dañaban primero y las osteonas permanecían unidas gracias a las lamelas con sus fibras orientadas longitudinalmente.

Otros investigadores intentaron corroborar las conclusiones que Ascensi y sus colaboradores afirmaban, sin embargo el resultado de su trabajo resulta dudoso ya que la estructura de las osteonas que se utilizaron para realizar los estudios no tenían la nitidez que si tenían las osteonas de Ascensi y demás colaboradores.

Katz et al [Ref 16] confirmaron que la orientación de las fibras de las lamelas era mayoritariamente en sentido longitudinal.

Maroti [Ref 17] afirmó que las fibras en general seguían dos patrones de orientación, que se dividían entre lamela gruesa y lamela delgada.

Las lamelas delgadas se definen con una orientación mucho mayor y con una estructura más compacta. Las lamelas gruesas son más diversas y dispares (con inclusiones en forma de micro poros).

En cuanto a la orientación de las fibras en las lamelas, muchos autores coinciden en que las fibras de las lamelas permanecen paralelas a las lamelas, mientras que los fibrilos de colágeno contenidos en las fibras varían su orientación de una lamela a otra. Es sabido que los cristales de hidroxiapatita también varían su orientación.

Esto da como resultado que cada lamela adyacente tiene unas propiedades mecánicas distintas, tanto las lamelas con una orientación de fibras longitudinal como transversal.

La teoría de que no todos los fibrilos poseen la misma orientación en cada lamela se ha demostrado mediante técnicas de micrografía por distintos autores.

En [Ref 18] varios autores exponen su teoría de distintas estructuras para las lamelas.

Así pues, investigadores como Wagner et al [Ref 19], con la teoría en la mano de que la orientación de los fibrilos cambian de una lamela a otra, llegaron a la conclusión mediante técnicas de micrografía de que la estructura lamelar es asimétrica y que está formada por 5 subcapas, y que en cada subcapa los fibrilos cambian de orientación.

Wagner et al, concluyen en su trabajo que las 5 subcapas dentro de la estructura lamela se da distintos mamíferos, incluido el ser humano. Cada subcapa se define como: (1) thin lamella; (2,3) transition zone;(4) thick lamella;(5) back-flip lamella. La thick lamella representa el 56% de la unidad lamelar.

En la Figura 6 se describe de forma esquemática la distribución de las subcapas de la unidad lamelar.

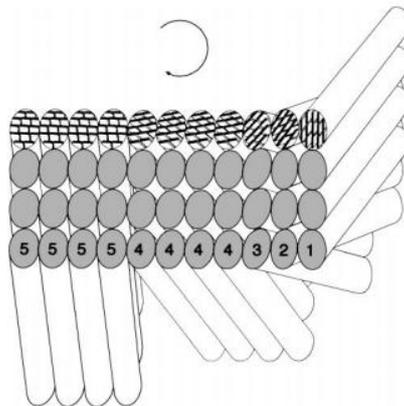


Figura 6. Las 5 subcapas dentro de la estructura lamela se da distintos mamíferos, incluido el ser humano. Cada subcapa se define como: (1) Thin lamella; (2,3) transition zone;(4) thick lamella;(5) back-flip lamella [Ref 19].

Como resultado al modelo de Wagner et al, es razonable evidenciar que las propiedades del hueso lamelar tiene un comportamiento claramente anisótropo.

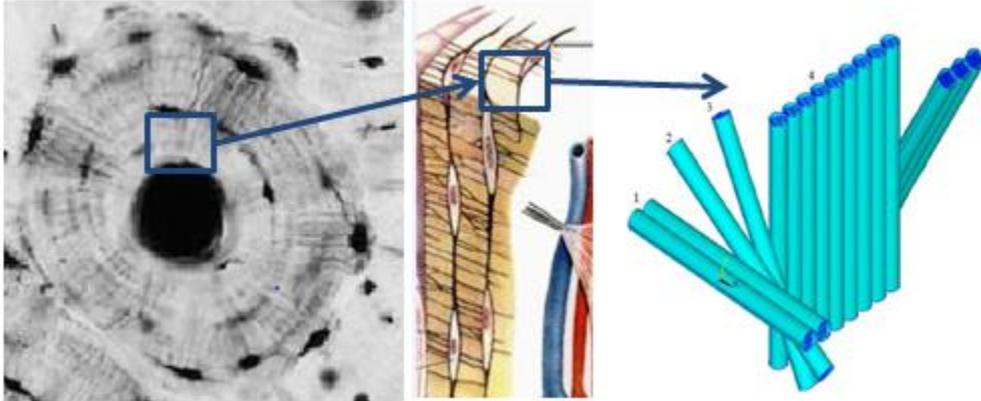


Figura 7. Ilustración esquemática de la orientación de las lamelas [Ref 20]

Como resultados a estas teorías en Vercher et al [Ref 20] han desarrollado mediante elementos finitos modelos para obtener la matriz de rigidez homogeneizada para fibrilos de colágeno mineralizados y hueso lamelar.

En el apartado 3.2 se describen las propiedades mecánicas de las lamelas obtenidas en [Ref 20] y que se aplicará en el modelado de osteonas mediante elementos finitos de este trabajo final de máster.

3.2. CARACTERIZACION DE PROPIEDADES ELASTICAS DEL HUESO CORTICAL

3.2.1. *Matriz de rigidez basada en modelo de homogeneización para lamelas*

Como se ha comentado, Vercher et al [Ref 20] han desarrollado modelos de elementos finitos para obtener la matriz de rigidez de lamelas de distinto espesor mediante la técnica de homogeneización.

Para ello en primer lugar, se ha obtenido la matriz de rigidez de la unidad estructural más básica dentro de las subcapas de las lamelas, los fibrilos de

colágeno. Posteriormente, se ha generado una matriz de rigidez más general para todas las subcapas de lamelas.

Como se ha comentado y se describe en la Figura 8, las subcapas de las lamelas tienen una orientación distinta lo cual implicaría 5 propiedades de material distintas para cada subcapa.

En [Ref 20] Vercher et al, han obtenido la matriz de rigidez homogeneizada numéricamente para fibrilos de colágeno mineralizado basado en la propuesta de Weiner et al [Ref 19] de 5 subcapas como se puede observar en la Figura 9.

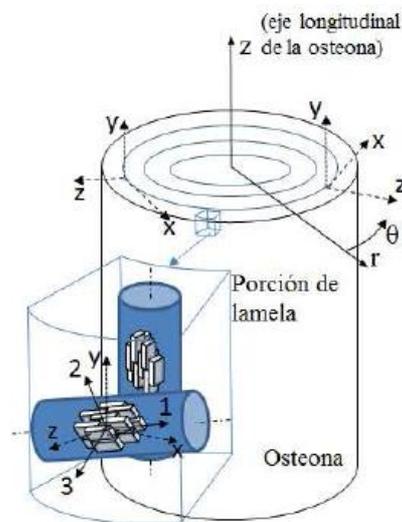


Figura 8 Esquemática de una osteona compuesta por lamelas en las cuales la orientación de los fibrilos de colágeno mineralizado cambia con respecto a la dirección radial de la osteona [Ref 20].

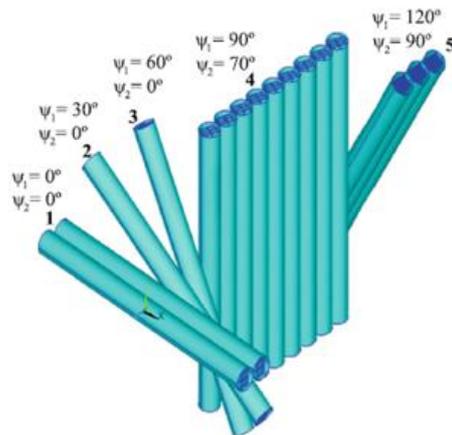


Figura 9. Representación esquemática de las 5 subcapas basada en [Ref 20] para calcular la matriz de rigidez en fibrilos orientados.

Giner et al [Ref 21] en su trabajo de modelado numérico del comportamiento mecánico de osteonas con micro grietas han calculado las propiedades elásticas de las lamelas para su modelo basado en trabajo de Vercher et al [Ref 20]

Para ello Giner et al han optado por agrupar las subcapas de una lamela en dos partes, denominadas lamela delgada y lamela gruesa, con espesores de $0.8 \mu\text{m}$ y $2.4 \mu\text{m}$ respectivamente. En la Figura 10 y Figura 11 se describe el detalle de esta simplificación.

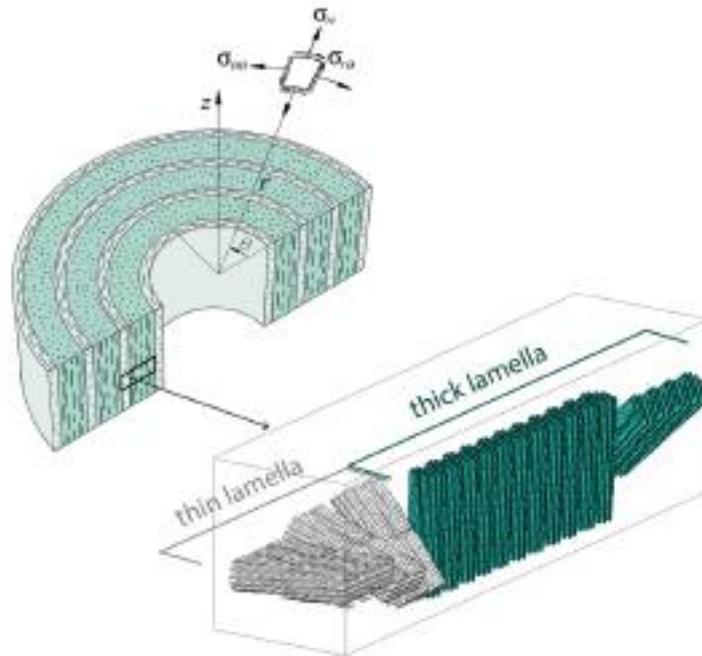


Figura 10 Representación esquemática de la simplificación de las subcapas de lamelas en lamela gruesa y lamela delgada [Ref 21].

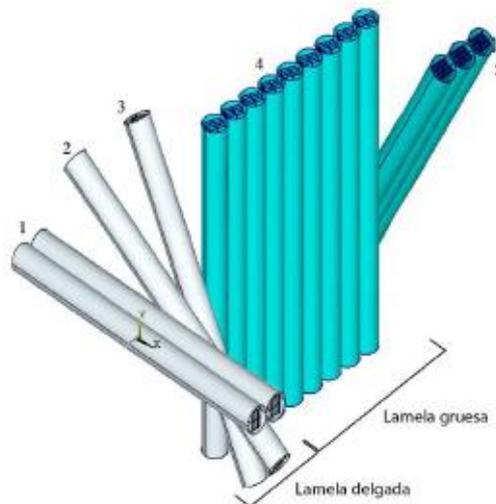


Figura 11. Representación esquemática de la simplificación de las subcapas de lamelas en lamela gruesa y lamela delgada [Ref 21].

Como resultado a esa simplificación, las matrices de rigidez constitutiva para la lamela delgada y lamela gruesa son las siguientes:

$$C_{delg} = \begin{bmatrix} 28.995 & 8.119 & 4.003 & -0.254 & 0.699 & 0.73 \\ & 25.625 & 3.779 & -0.166 & 0.335 & 0.73 \\ & & 9.706 & -0.0004 & 0.001 & 0.097 \\ & & & 2.814 & -0.021 & -0.014 \\ & sim & & & 2.863 & 0.124 \\ & & & & & 8.855 \end{bmatrix} GPa$$

$$C_{delg} = \begin{bmatrix} 12.206 & 5.37 & 5.532 & -0.079 & -1.492 & -0.388 \\ & 30.572 & 6.369 & 0.251 & -1.065 & -0.304 \\ & & 18.804 & 0.27 & -3.682 & 0.363 \\ & & & 6.516 & -0.056 & 1.682 \\ & sim & & & 4.704 & -0.196 \\ & & & & & 4.684 \end{bmatrix} GPa$$

La ecuación constitutiva de Lamé-Hooke está dada por:

$$\sigma = \mathbf{C} \cdot \varepsilon$$

Donde $\sigma = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}, \sigma_{xy})^T$ es la vector de tensiones, \mathbf{C} es la matriz de rigidez y $\varepsilon = (\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{xy})^T$ es el vector de deformaciones impuesto.

Estas matrices están referenciadas al sistema local (x,y,z) de la Figura 10. El orden de los componentes del vector de tensión es $\sigma = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}, \sigma_{xy})^T$. Identificando el sistema de referencia local (x,y,z) con el sistema de referencia cilíndrico global de la osteona, el orden de los componentes del vector de tensiones es $\sigma = (\sigma_{\theta\theta}, \sigma_{zz}, \sigma_{rr}, \sigma_{zr}, \sigma_{r\theta}, \sigma_{\theta z})^T$. De forma análoga obtendríamos los componentes del vector de deformaciones ε .

3.2.2. Matriz intersticial

La matriz intersticial se compone de hueso lamelar y antiguas osteonas que sufrieron procesos de remodelación. Con lo cual se puede afirmar que la matriz intersticial es una estructura menos organizada que las osteonas.

Bajo esta hipótesis Hoogan [Ref 22] definió en su trabajo de modelado de una osteona mediante elementos finitos un módulo elástico de entre 10-15 GPa para la matriz intersticial, por debajo de lo que había definido como módulo elástico para las lamelas.

La definición de módulo elástico para la matriz intersticial de Hoogan iba en la línea de las observaciones de Evans y Vicentelli [Ref 23], donde se cita que las osteonas tienden a reducir la resistencia y módulo elástico del hueso cortical.

Además, Dorlot et al [Ref 24] mediante técnicas de microscopia SEM observaron que la matriz intersticial estaba más mineralizado que la media de las osteonas.

Prendergast y Huiskes [Ref 25] en su trabajo de modelado de una osteona mediante elementos finitos para simular daño, definieron un módulo elástico de entre 17.26 GPa y 21.37 GPa.

En el modelo de elementos finitos que se describe en este trabajo final de máster, la matriz intersticial se ha considerado un material isótropo con un módulo elástico de 10GPa un coeficiente de Poisson de 0.3.

3.2.3. Línea cementante

Las propiedades mecánicas de la línea cementante no son conocidas con exactitud. Sin embargo se sabe que la línea cementante esta menos mineralizada que el material óseo que lo rodea Burr et al [Ref 26]. Por esta razón varios autores han tomado un módulo de Young menor que el tejido mineralizado, como Hoogan [Ref 22].

En el modelo de elementos finitos que se describe en este trabajo final de máster, la matriz intersticial se ha considerado un material isótropo con un módulo elástico de 6 GPa un coeficiente de Poisson de 0.3.

3.3. RESISTENCIA MECÁNICA DE LAMELAS

En la Figura 10 se puede ver cuál es el estado tensional en el seno de las lamelas. La tensión contenida en plano x-y de una sección transversal de una osteona desde un sistema de coordenadas cilíndrico daría un tensor $\sigma_{\theta\theta}$ que denominamos tensión circunferencial o tensión de hoop, σ_{rr} tensión radial y $\sigma_{\theta r}$ o tensión cortante.

La condición de fallo se dará cuando cualquiera de las tensiones anteriores supere el límite de resistencia de la lamela en cada dirección.

Así pues, el fallo en las lamelas se pueden agrupar de dos casos. Un primer caso donde las lamelas sufren un fallo intralamelar producida por la tensión circunferencial $\sigma_{\theta\theta}$.

En un segundo caso las lamelas sufrirían una delaminación llamada interlamelar producida por la tensión radial σ_{rr} y la tensión de cortadura $\sigma_{\theta r}$.

Tal y como Giner et al [Ref 21] predijeron en sus trabajos, es lógico pensar que la lamela gruesa tendrá una resistencia menor al estado tensional mostrado en la Figura 10, debido a que las fibras de colágeno mineralizadas están mayoritariamente alineadas con el eje z longitudinal, fuera del plano de x-y.

Las afirmaciones de Giner et al [Ref 23] van en la línea de las evidencias que Ascensi et al obtuvieron en sus experimentos descritos en [Ref 11],[Ref 12],[Ref 13],[Ref 14].

Como se había comentado en la sección 3.1, Ascensi junto con otros colaboradores examinaron las propiedades mecánicas de un solo sistema Haversiano en tensión [Ref 11], compresión [Ref 12], flexión [Ref 13] y torsión [Ref 14].

Para los ensayos a tracción de una sola osteona la resistencia fue de entre 102 y 120 MPa (el primer valor está referido a osteonas cuyas lamelas adyacentes tienen una orientación que difieren de unas de otras, mientras que el segundo valor está referido a especímenes con una orientación de las lamelas mayoritariamente en dirección longitudinal) [Ref 11].

Los ensayos a compresión llevados a cabo por Ascensi y Bonucci [Ref 12] mostraron resistencia de entre 110 y 130 MPa.

Posteriormente Ascensi et al [Ref 13], en los ensayos a flexión llevados a cabo en osteonas, obtuvieron una resistencia a flexión de 350-390 MPa (al igual que antes para osteonas con lamelas orientadas en sentido longitudinal y osteonas con lamelas adyacentes con orientaciones alternadas).

En los ensayos de torsión llevados también por Ascensi et al [Ref 14], obtuvieron una resistencia a torsión de 160-200 MPa.

3.3.1. Resistencia tracción tensión circunferencial

Giner et al [Ref 21] describen en su trabajo como la resistencia de la lamela delgada es mayor que la resistencia de la lamela gruesa por la orientación de las fibras de colágeno mineralizados.

Por ello, y considerando los resultados tras los ensayos de Ascensi et al, la resistencia a tracción de las lamelas debido a la tensión circunferencial $\sigma_{\theta\theta}$, se ha tomado como :

- $S_{\theta\theta,delg}=120$ MPa
- $S_{\theta\theta,gruesa}=50$ MPa

3.3.2. Resistencia tracción tensión radial

Como se ha comentado la tensión radial se asocia con el modo de fallo interlaminar de las lamelas. Este caso de fallo será simulado más adelante en los modelos de zona Cohesiva (CZM).

Tal y como describen Giner et al [Ref 21], el caso de fallo interlaminar no se ve afectado por las fibras de colágeno mineralizadas en su dirección. Por ello, cabe predecir que el valor de la resistencia mecánica debido a una tensión radial es la misma para la lamela gruesa que para la lamela delgada.

Mischinski y Ural [Ref 27] realizaron un modelo de elementos finitos que incluía modelos con zona cohesiva (CZM). El valor de la resistencia a la tensión radial se ha obtenido a partir del trabajo de Mischinski y Ural [Ref 27] donde este valor es de:

- $S_{rr}=43.5$ MPa

3.3.3. Resistencia a tensión cortante

Giner et al [Ref 21] describen que la resistencia de la lamelas a tensión cortante ha de ser mayor en la lamela delgada en comparación con la lamela gruesa, debido a que la orientación de las fibras de colágeno mineralizadas se ve afectada por la tensión cortante.

Lo descrito arriba se ha de tomar como una aproximación debido a que la variación de los resultados puede estar condicionada por muchos factores como en nivel de calcificación o la humedad de los ensayos.

El valor de la resistencia a tensión cortante se ha tomado por igual y de valor:

- $S_{r\theta} = 43.5 \text{ MPa}$

3.4. CRITERIOS DE FALLO EN LAMELAS

3.4.1. Modelo de Prendengast y Huiskes

Prendengast y Huiskes [Ref 25] en su trabajo de simulación de una osteona bajo cargas mecánicas para predecir daño, consideraron tres criterios de fallo en función del estado tensional al que la sección transversal de la osteona estaba sometida.

El primer mecanismo de fallo se da cuando el colágeno contenido en las fibras del micro estructura se daña. Esto ocurre cuando las fibras de colágeno se separan de los cristales de hidroxiapatita que sirven como soporte de la nano estructura de fibrilos.

Este modo de fallo ha sido simulado mediante la reducción del módulo de Young. Se basa en la hipótesis en el que una zona donde se ha iniciado un daño, su estructura se debilita y no es capaz de soportar más carga, dando lugar a una deformación mayor descrito por Lemaître [Ref 28].

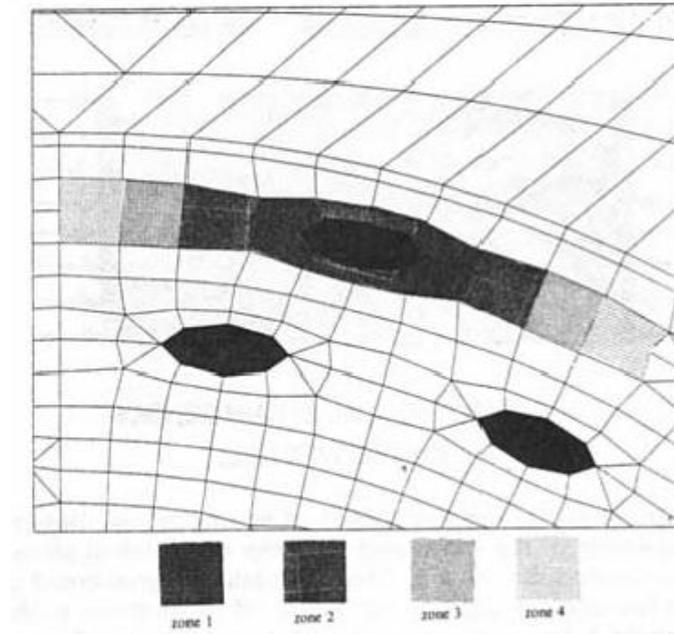


Figura 12. Ilustración que muestra el resultado tras la reducción del módulo de Young de forma fraccional al rededor de una laguna [Ref 25]

La Figura 12 representa la reducción del módulo de Young de forma fraccional al rededor de una laguna.

El segundo mecanismo de fallo investigado por Prendengast y Huiskes [Ref 25] fue la separación interlamelar. Para llevar a cabo este modo de fallo se analizaron cuatro casos como consecuencia del agrietamiento y separación entre dos lamelas en su interface. En la Figura 13 se muestra la el proceso final tras la delaminación.

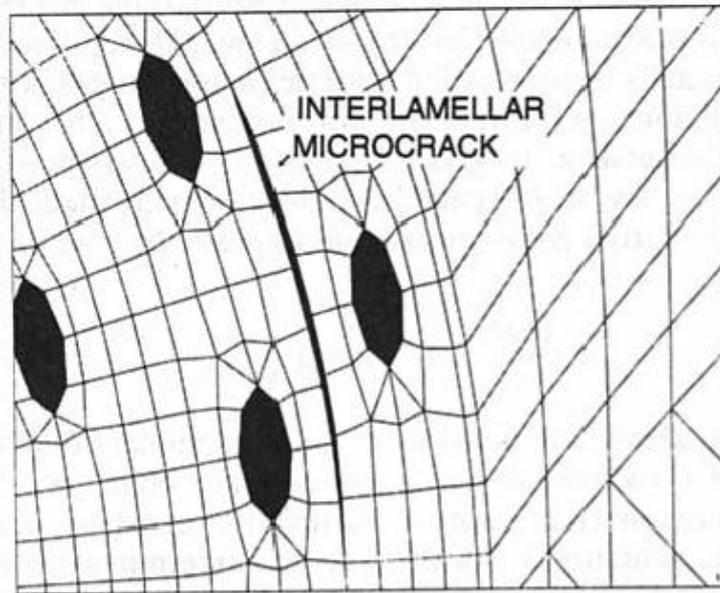


Figura 13. Ilustración que muestra el resultado tras el proceso de delaminación [Ref 25].

El tercer y último modo de fallo es el estudio de la generación de una grieta en el cement line. Este modo de fallo se simuló en 5 pasos, donde al final del análisis, se llevó a cabo la separación de más de una cuarta parte de la osteona en la interface que lo une con la cement line.

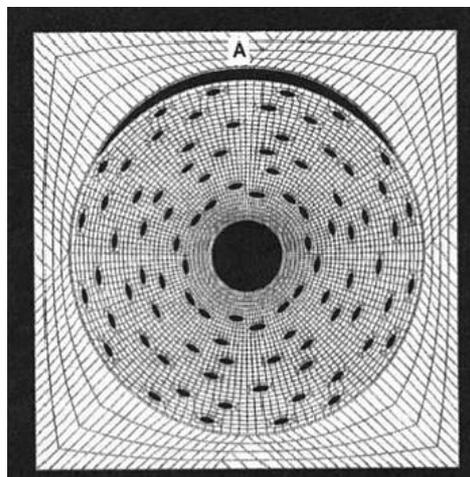


Figura 14. Ilustración que muestra el resultado tras el proceso de separación entre osteona y línea cementante [Ref 25].



Para simular la delaminación interlaminar entre lamelas y la separación entre osteona y cement line utilizaron elementos tipo "gap", que permite que la malla se puede desconectar de los nodos deseados y permitir un deslizamiento entre interfaces sin fricción como respuesta a una tensión de cortadura local e incremento de una tensión tractiva que tendería a abrir una grieta.

3.4.2. Modelo Osteona mediante elementos cohesivos (CZM)

Con el fin de reproducir los mecanismos de fallo entre lamelas y entre osteonas y línea cementante, se ha desarrollado un modelo mediante elementos cohesivos. Los modelos con elementos cohesivos permiten que ante estados de tensión de tracción o de cortadura, se pueda iniciar un daño y simular la separación de capas como ocurre en materiales compuestos estructurales.

En el capítulo 5 se describe el modelo generado mediante elementos cohesivos y su utilización para reproducir los mecanismos de iniciación y evolución de daño descritos en el trabajo de Prendergast y Huiskes [Ref 25] y que son objeto de estudio en este trabajo final de máster.





4. MODELADO DE UNA OSTEONA MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS EN ABAQUS

4.1. INTRODUCCION

En este capítulo se detalla el proceso de generación de un modelo de elementos finitos con Abaqus v13.1 de una única osteona. El modelo se ha generado con técnicas de modelado por elementos finitos, mediante elementos estructurales de uso común.

Para ello se ha partido de una imagen obtenida por microscopio de una sección de una tibia de oveja coloreada con un tinte especial para facilitar la distinción de las osteonas. Hay que resaltar que el modelo es una sección transversal de una tibia, perpendicular a su eje longitudinal. Por ello el modelo de elementos finitos que se ha desarrollado en este trabajo final de máster en un modelo en 2D.

Esta imagen ha sido digitalizada y se ha generado un modelo geométrico que se ha usado para la creación del modelo de elementos finitos con Abaqus v13.1

Por otro lado, para la creación de una malla estructurada en las osteonas apilando capas de lamelas, se ha realizado una malla mediante un programa de Matlab. Posteriormente se ha exportado a Abaqus y se ha ensamblado con el resto del modelo.

4.2. GEOMETRIA

Para la creación de la osteona se ha partido de una imagen obtenida a través de microscopio electrónico de la sección transversal de una tibia de oveja.

De la sección de la tibia se ha identificado la parte correspondiente al hueso cortical, donde se encuentran las osteonas.

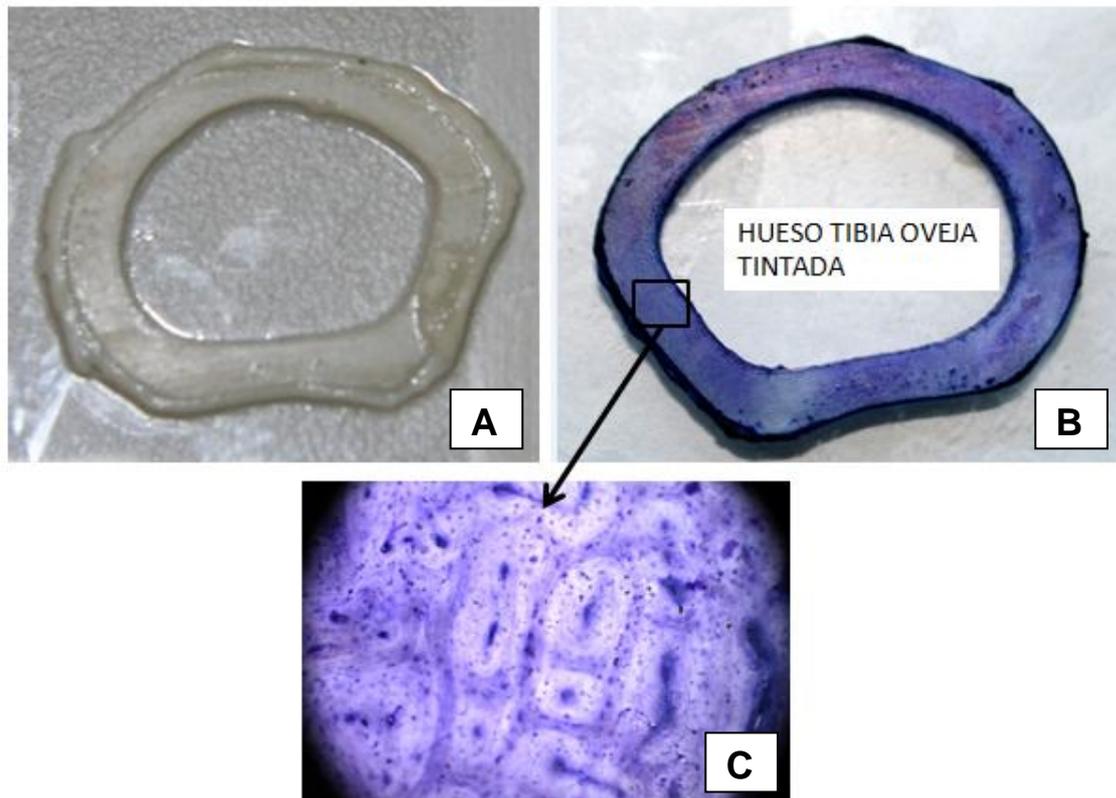


Figura 15. (A) Muestra de en sección de tibia de oveja;(B) Muestra de tibia de oveja tratada mediante técnica de tinción;(C) Imagen obtenida de tibia de oveja mediante microscopio electrónico.

En la Figura 15 se observa en detalle una sección de la tibia de oveja, así como la imagen obtenida del hueso cortical, compuesto de osteonas, lamelas circunferenciales, la matriz intersticial así como las lagunas.

A partir de la imagen digital de la Figura 15, se han identificado las osteonas completas dentro de la matriz intersticial como se puede observar en la Figura 16.

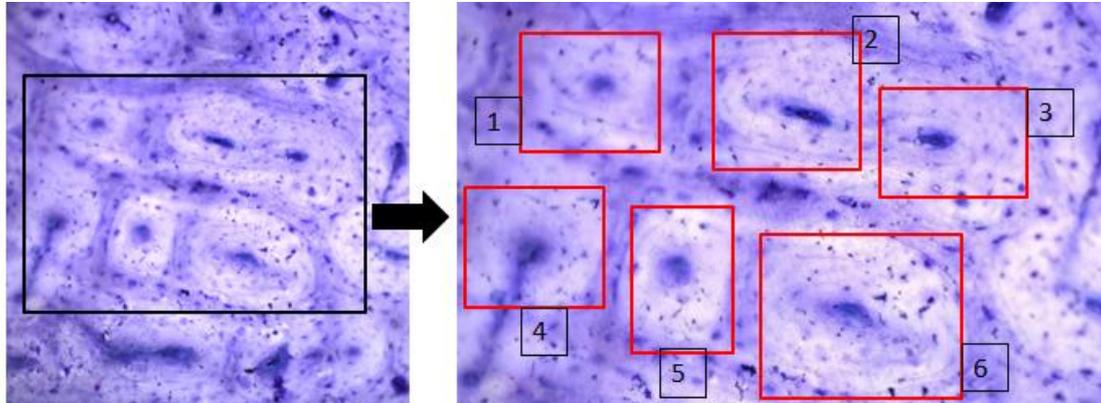


Figura 16. Identificación de osteonas en el hueso cortical de la tibia de oveja.

A partir de identificar y enumerar las osteonas, se ha procedido a construir los modelos de elementos finitos de cada una de las partes que compone el sistema de Havers.

El modelo tiene ciertas limitaciones que hay que resaltar, ya que no incluye la inclusión de lagunas ni la de lamelas circunferenciales. El modelo de elementos finitos si incluye y considera:

- Lamelas apiladas de forma ordenada dando lugar a osteonas
- Matriz intersticial
- Línea cementante o "cement line"

Por otro lado el desarrollo del trabajo se ha realizado simulando una sola osteona de todo el hueso lamelar. Se ha desarrollado un modelo de elementos finitos de la osteona nº 6 de la Figura 16.



4.3. CONSTRUCCIÓN DE MALLA EF

La construcción de la malla se ha realizado con una metodología distinta para cada parte de la osteona.

El mallado de la matriz intersticial se ha supuesto libre tanto con cuadriláteros como con triángulos y carece de ningún patrón estructurado.

El mallado de la osteona y de la línea cementante se ha realizado mediante un mallador externo programado en Matlab, con la intención de controlar el número de capas de lamelas y el espesor de las mismas.

El mallado de las lamelas se ha realizado con elementos cuadriláteros con una numeración de nodos y de elementos controlada.

Tanto el mallado de las osteonas y lamelas, la matriz intersticial y la línea cementante se ha realizado con elementos cuadriláteros y triángulos de orden uno.

Antes de comenzar con el mallado de hueso lamelar, se ha creado una nube de puntos geométricos con coordenadas X-Y en las fronteras de la matriz intersticial, línea cementante y contorno exterior e interior de la osteona. Para ello se ha utilizado un el software Plot Digitizer.

El origen de coordenadas globales seleccionado en el del modelo se puede observar en la Figura 17. Las líneas en color amarillo representan la nube de puntos obtenida a partir de Plot Digitizer.

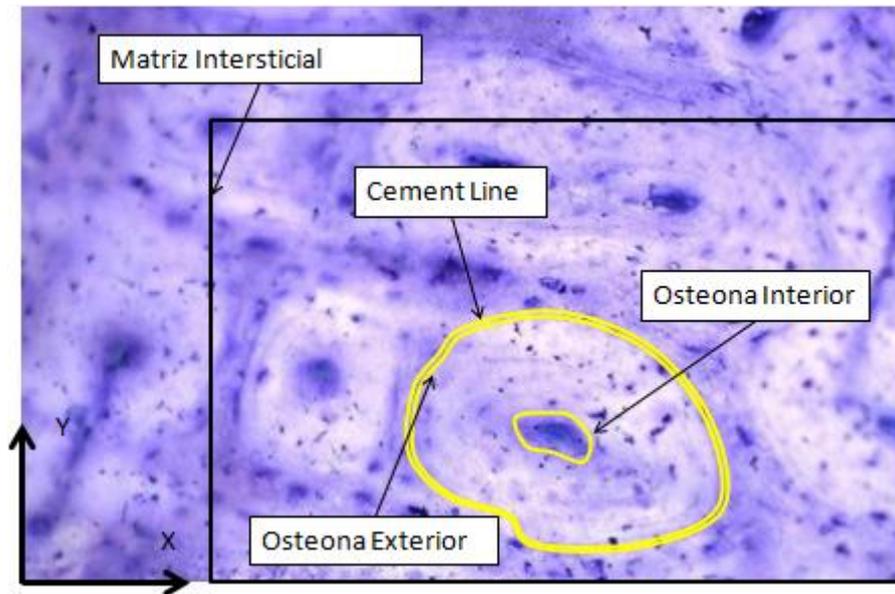


Figura 17. Identificación de fronteras entre osteona, línea cementante y matriz intersticial. También se muestra la deducción del área que abarca la matriz intersticial.

4.3.1. Mallado de lamelas y línea cementante:

Como se ha comentado, el mallado de las osteonas y las lamelas, se ha realizado mediante mallador independiente programado en Matlab exclusivo para mallar osteonas con cualquier geometría.

Los datos de entrada del programa mallador son el contorno exterior (límite con la línea cementante) y contorno interior (canal de Havers). A partir de los contornos exterior e interior, el programa va apilando capas de lamelas siguiendo la orientación del contorno exterior hacia el contorno interior.

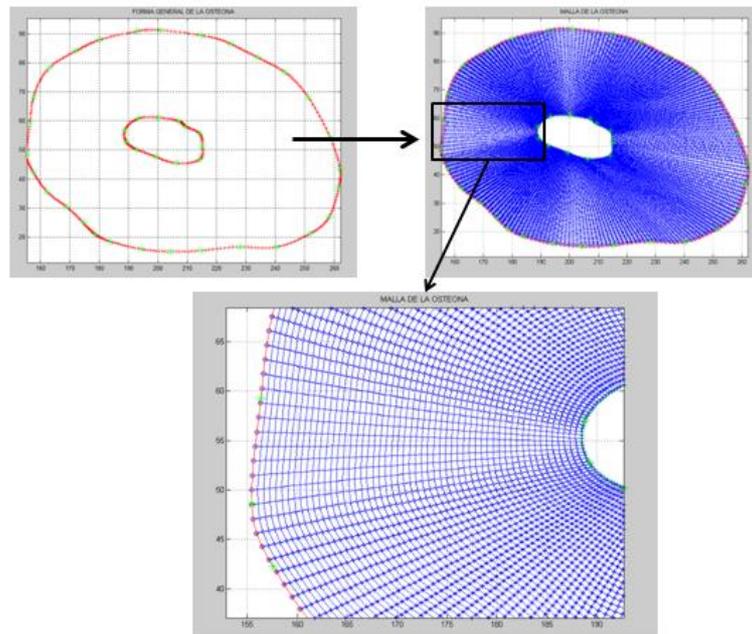


Figura 18. Proceso de mallado de osteonas con mallador automático en Matlab.

El espesor de las lamelas varía de forma alternante, ya que cada capa tendrá unas propiedades de material distintas. Se diferencia entre lamelas delgadas y lamelas gruesas.

El número de capas de elementos para las lamelas denominadas como gruesa es de tres, mientras que el número de capas de elementos para las lamelas delgadas es de uno.

La parte del modelo de elementos finitos que define la osteona y la línea cementante se ha exportado desde el mallador de Matlab a formato de entrada de Abaqus v13.1 para formar el *Part* que será la osteona y la línea cementante.

Se han exportado elementos tipo CPS4R (rectángulos de primer orden) para Abaqus 6.13.1

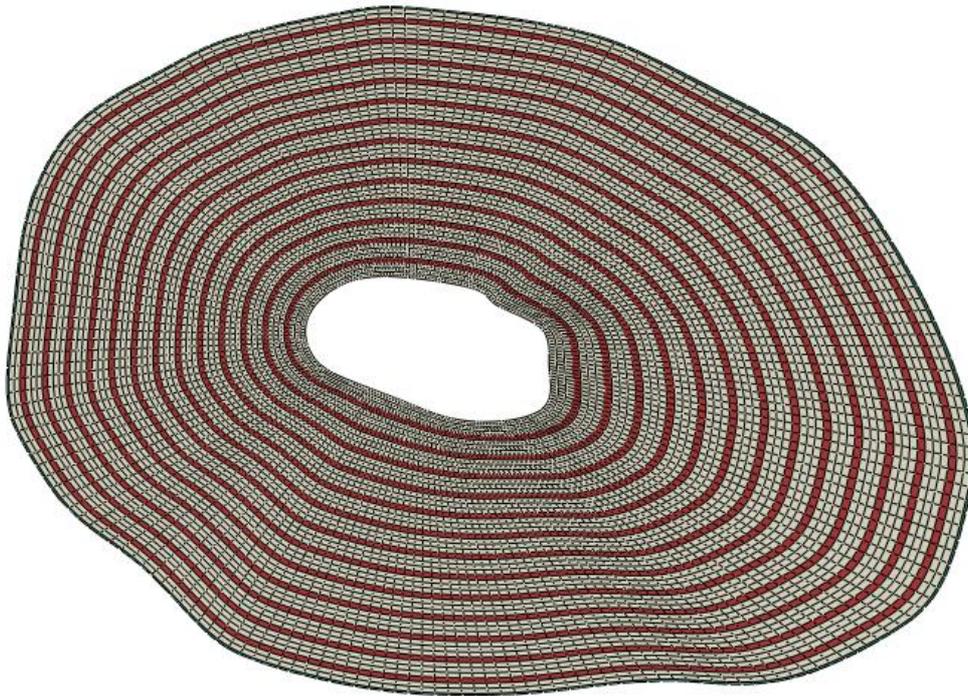


Figura 19. Estado de malla de la osteona una vez exportada a Abaqus con elementos rectangulares tipo CPS4R.

En la Figura 19 se puede apreciar la distribución de lamelas que forman la osteona. En color blanco las lamelas gruesas y en color rojo las lamelas delgadas.

La línea cementante está compuesta por una capa de elementos que rodea el exterior de la última lamela transversal.

La osteona y la matriz intersticial forman un *Part* independiente con el resto del modelo FEM.

4.3.2. Mallado de la matriz intersticial

Para el mallado de la matriz intersticial se ha definido un área que coincide con el contorno de la línea cementante como el que se muestra en la Figura 20.

Esta área lo define el contorno exterior de la línea cementante y el contorno de la matriz intersticial. El contorno está definido con puntos geométricos X-Y a partir del programa Plot Digitizer tal y como se ha comentado. Esta nube de puntos se ha exportado a Abaqus v13.1, en donde se han definidos los contornos mediante líneas rectas y curvas spline.

A partir de las curvas de contorno se ha encerrado en área que define geoméricamente la matriz intersticial.

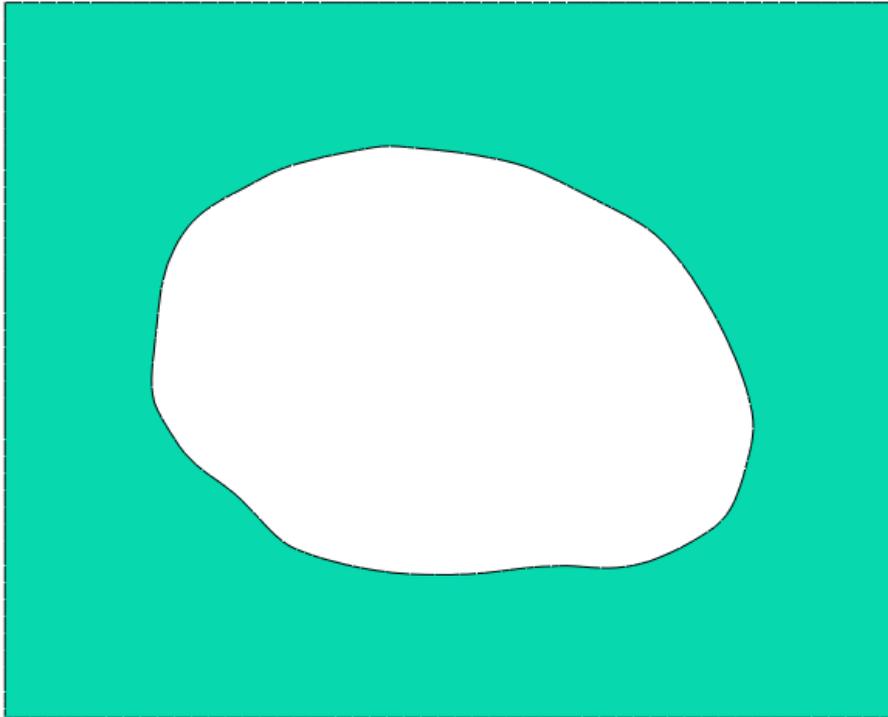


Figura 20. Definición del area que abarca la matriz intersticial en Abaqus.

El área de la Figura 20 se ha mallado en Abaqus v13.1 con elementos tipo CPS4R (rectángulos de orden 1). En la Figura 21 se muestra la malla de la matriz intersticial. La matriz intersticial forma un *Part* independiente con el resto del modelo FEM.

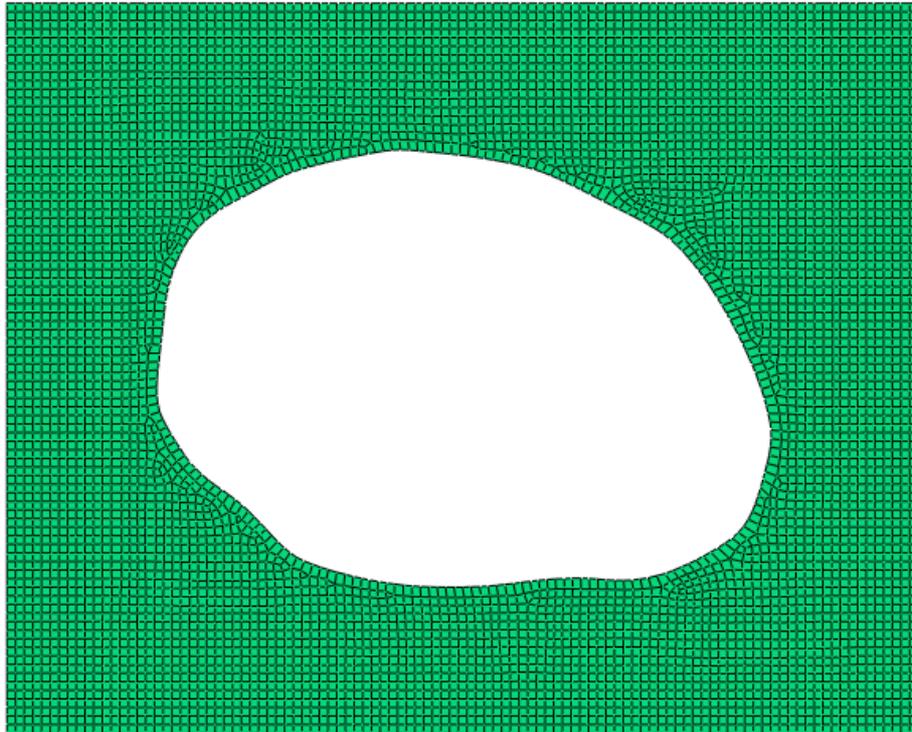


Figura 21. Estado de la malla de la matriz intersticial tras el mallado en Abaqus.

4.3.3. Ensamblaje final

En el ensamblaje final se introducen el *Part* de la osteona y la línea cementante y el *Part* de la matriz intersticial. Dado que se ha tenido en cuenta la posición de los nodos que hacen frontera en ambos *Part*, se puede hacer un *Merge* de ambas partes para obtener una única malla continua.

En la Figura 22 y Figura 23 se muestra el mallado final de una osteona a partir de la imagen de una sección transversal del hueso cortical de una tibia de oveja.

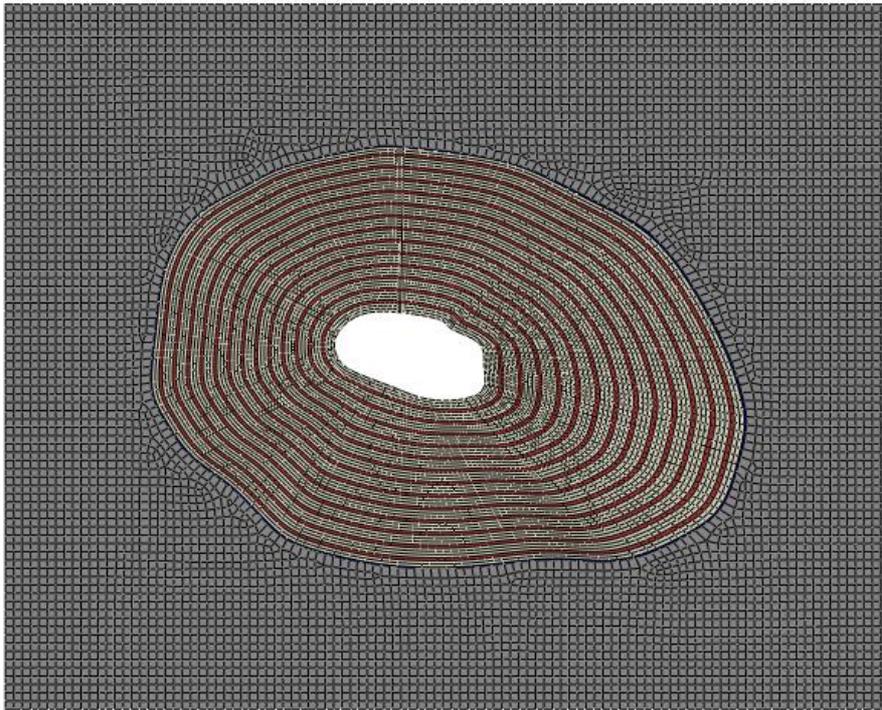


Figura 22. Estado del modelo de elementos finitos tras el ensamblado de osteona, línea cementante y matriz intersticial.

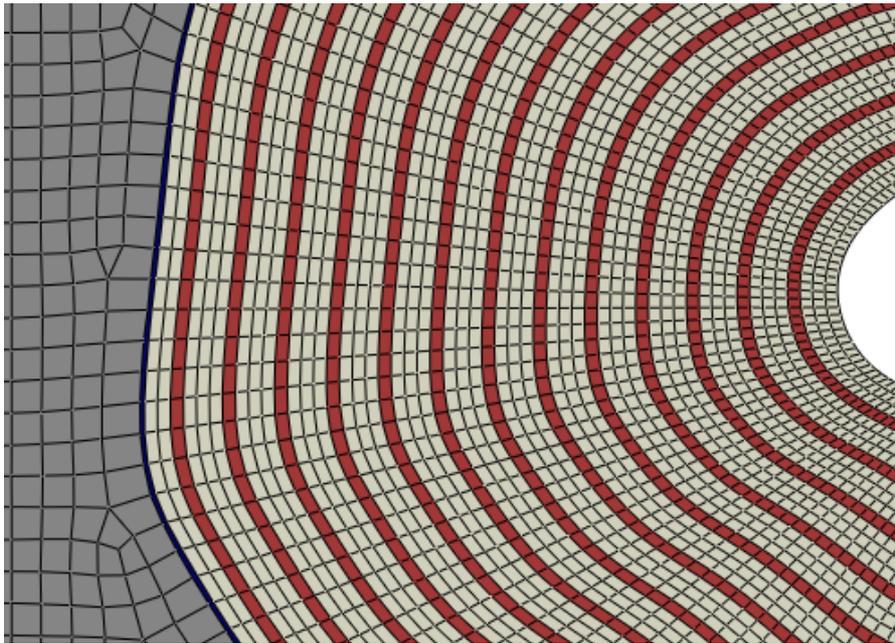


Figura 23. Detalle de del modelo de elementos finitos compuesta por la osteona, línea cementante y matriz intersticial.

4.4. DESCRIPCION MODELO EF OSTENA

La construcción del modelo de EF se ha realizado con elementos rectangulares de 4 nodos en deformación plana. El modelo contiene un total de 17365 nodos y 17080 elementos. Las características geométricas del modelo se definen así:

- Osteona 42.6 μm (espesor)
- Canal de Havers 27 μm (diámetro)
- Lamela delgada 0.8 μm (espesor)
- Lamela gruesa 2.4 μm (espesor)
- Línea cementante 0.5 μm (espesor)

La osteona que se muestra en la figura de arriba está compuesta por 26 lamelas, 13 lamelas delgadas y 13 lamelas gruesas

Aunque sea un modelo en dos dimensiones, el tipo de elemento se ha utilizado es un elemento que permite deformación plana. De esta manera se tiene en cuenta la tensión en dirección al eje longitudinal z . Plane Strain

4.5. DEFINICION DE SISTEMA DE COORDENADAS

El modelo global se sitúa en un sistema de coordenadas globales cartesianas con la dirección x como eje horizontal y la dirección y como eje vertical. En la Figura 24 se muestra el origen del sistema de coordenadas global.

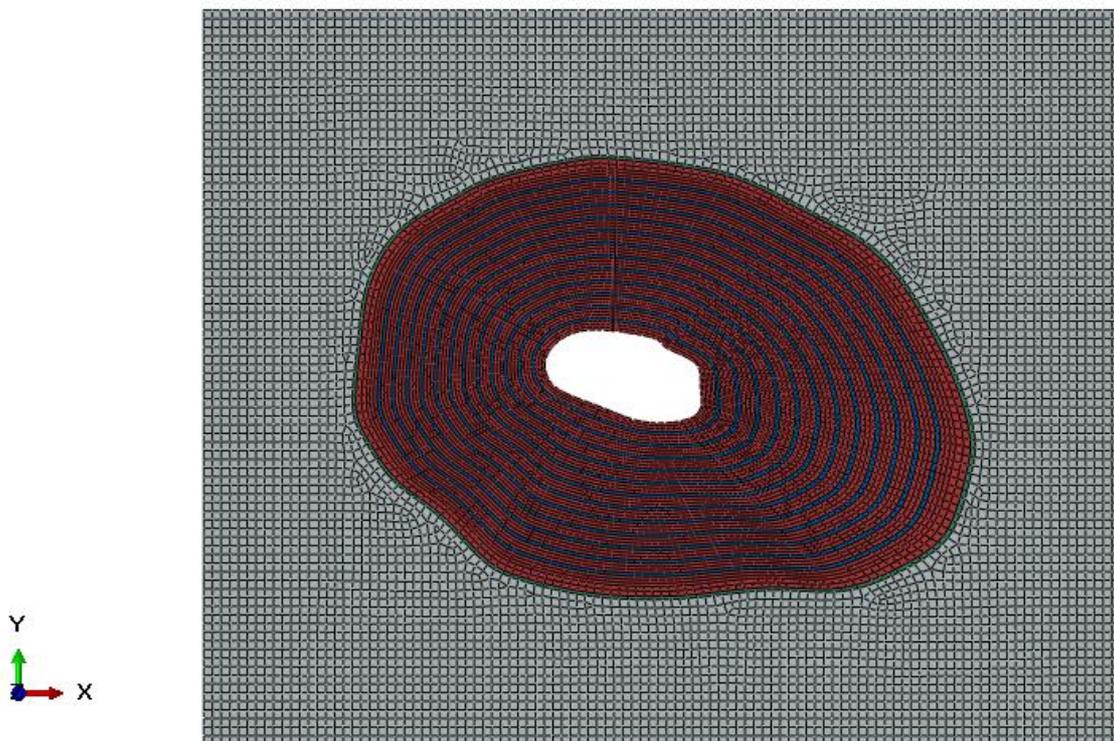


Figura 24. Definición del sistema de coordenadas globales en el cual se ha creado el modelo de elementos finitos.

4.6. PROPIEDADES MECÁNICAS

4.6.1. Definición de elasticidad anisótropa en Abaqus

Se va a definir un comportamiento elástico puramente anisótropo en las lamelas. Para ello son necesarios los 21 parámetros independientes de la matriz de constitutiva. En este caso, la definición de tensión deformación en Abaqus se describe como se muestra a continuación:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11111} & D_{1122} & D_{1133} & D_{1112} & D_{1113} & D_{1123} \\ D_{1122} & D_{2222} & D_{2233} & D_{2212} & D_{2213} & D_{2223} \\ D_{1133} & D_{2233} & D_{3333} & D_{3312} & D_{3313} & D_{3323} \\ D_{1112} & D_{2212} & D_{3312} & D_{1212} & D_{1213} & D_{1223} \\ D_{1113} & D_{2213} & D_{3313} & D_{1213} & D_{1313} & D_{1323} \\ D_{1123} & D_{2223} & D_{3323} & D_{1223} & D_{1323} & D_{2323} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = [D^{el}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix}$$

Cuando los parámetros de la matriz de rigidez (D_{ijkl}) se definen directamente como se muestra arriba, Abaqus impone la restricción de $\sigma_{33}=0$ en el caso de que se defina el problema de tensión plana para reducir las dimensiones de la matriz de rigidez al requerido.

4.6.2. Orientación de material en lamelas y línea cementante

En el caso de las osteonas, la definición propiedad elástico lineal de un material anisótropo es fundamental debido a la configuración de las capas de material a partir de las lamelas.

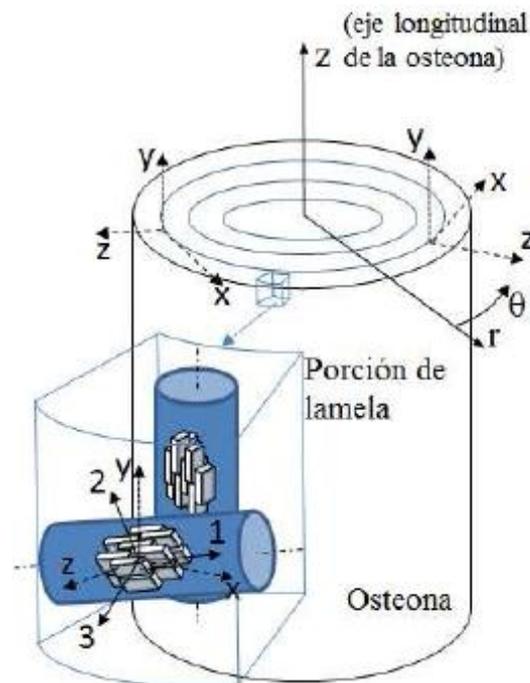


Figura 25. Sistema de coordenadas local en el elemento (x,y,z) y $(1,2,3)$ en el cual se han definido las propiedades de material del elemento.

Si se observa la Figura 25, y se toma como referencia un sistema de coordenadas local (x,y,z) y $(1,2,3)$ situado en los elementos de las lamelas con el cual se quiere definir las propiedades de material, los vectores de dirección del sistema de coordenadas local se orientaría de la siguiente manera:

- Dirección x: define la propiedad de las lamelas en la dirección tangencial o circunferencia
- Dirección y: define la propiedad de las lamelas en dirección axial o longitudinal
- Dirección z: define la propiedad de la lamela en dirección radial.

De forma análoga se definen las propiedades de material de la línea cementante orientadas en un sistema de coordenadas local en el elemento.

Para poder llevar a cabo esta orientación de las propiedades del material, es necesario definir las propiedades de material en un sistema de coordenadas locales sobre el propio elemento.

Abaqus permite definir la orientación de las propiedades de material en la dirección que el usuario desee mediante el comando ***Orientation**.

La definición del comando y los parámetros de entrada del comando ***Orientation** son:

***Orientation, name, Definition**

En la Figura 26 se muestra la numeración de los nodos de elemento en el sistema de coordenadas rectangular en Abaqus para un caso general.

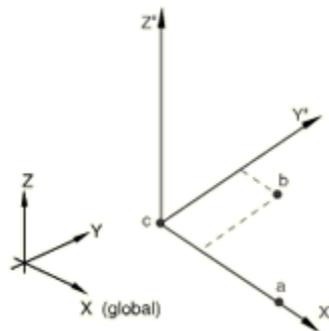


Figura 26. Numeración de nodos en un sistema de coordenadas rectangular en Abaqus Ref 30.

En el caso particular de elementos 2D de las lamelas, se han creado con una numeración de nodos específica en el mallador de Matlab y todos los nodos de las lamelas tienen una numeración como se muestra a continuación:

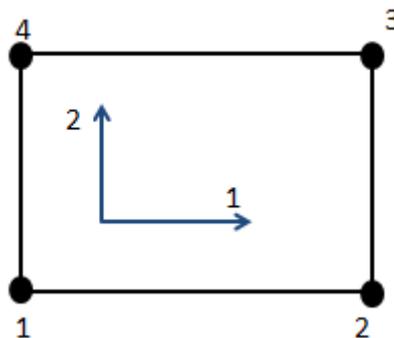


Figura 27. Sistema de coordenadas de elemento.



Al seleccionar como parámetro Definition=Offset to nodes, se define un sistema de coordenadas local en el elemento. La orientación de este sistema de coordenadas se define mediante la numeración de los nodos del elemento a(2 en el caso de la Figura 27 b(4 en el caso de la Figura 27) y c(origen y número de nodo 1 en caso de la Figura 27).

Las propiedades de material en el elemento de la Figura 27 se han orientado en dirección 1 (dirección tangencial o circunferencial) y 2 en dirección radial. La propiedad en dirección longitudinal lo define 3, el tercer componente del triedro.

El comando *Orientation consta de tres líneas si se define como OFFSET TO NODES como se puede ver a continuación:

```
*Orientation, NAME=Orientacion, DEFINITION=OFFSET TO NODES  
2,4,1  
2,0  
1,0,0
```

La primera línea define la dirección del sistema de coordenadas local desde con el origen en nodo 1 hacia el nodo 2 y hacia el nodo 4.

La segunda línea define el nodo a partir del cual se desea una rotación adicional α .

La tercera línea define los componentes X, Y y Z de la dirección del primer material orientado respecto al sistema ortonormal en el punto del material.

4.6.3. Propiedades de material en lamelas

En la Figura 28 se muestra la orientación de las propiedades de material en los elementos de las lamelas mediante el comando *Orient.

La componente 1 (1-axis) define la propiedad en la dirección circunferencial mientras que la componente 2 (2-axis) define la propiedad en la dirección radial.

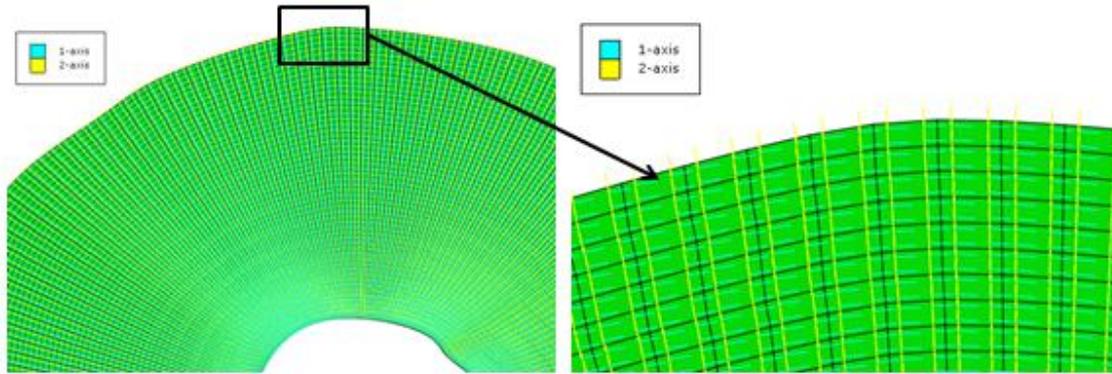


Figura 28. Ilustración de la orientación de los elementos de las lamelas que componen la osteonas en Abaqus.

En la Tabla 1 se muestran el módulo elástico, coeficiente de Poisson y módulo de cizalladura para las para cada una de las 3 direcciones y planos de la definición de orientación del material de lamela delgada y lamela gruesa.

	Lamela delgada	Lamela gruesa
E1	25.39 GPa	10.06 GPa
E2	8.84 GPa	13.79 GPa
E3	22.54 GPa	27.2 GPa
ν_{12}	0.267	0.122
ν_{23}	0.107	0.32
ν_{31}	0.291	0.257
G12	8.82 GPa	4.22 GPa
G23	2.84 GPa	3.96 GPa
G31	2.81 GPa	5.91 GPa

Tabla 1. Definición de las propiedades de material en la lamela delgada y lamela gruesa.

El subíndice 1 indica la dirección circunferencial, subíndice 2 la dirección radial y subíndice 3 la dirección longitudinal (perpendicular al plano 1-2).

4.6.4. Propiedades de material de la línea cementante

En la Figura 29 y Figura 30 se muestra la orientación de las propiedades de material en los elementos de la línea cementante mediante el comando *Orient.

La componente 1 (1-axis) define la propiedad en la dirección circunferencial mientras que la componente 2 (2-axis) define la propiedad en la dirección radial.

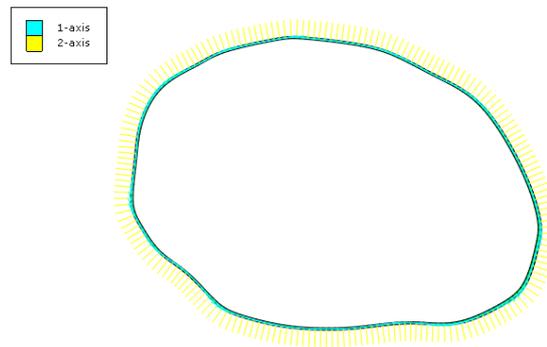


Figura 29. Ilustración de la orientación de los elementos de la línea cementante en Abaqus.

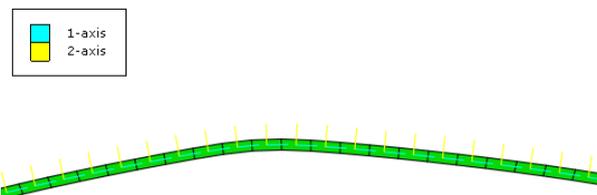


Figura 30. Detalle de la orientación de los elementos de la línea cementante en Abaqus.

Se ha considerado propiedades de material isotrópicas con un módulo de Young de 6 GPa y un coeficiente de Poisson de 0.25.

4.6.5. Propiedades de material de la matriz intersticial

En el caso de la matriz intersticial las propiedades de material están orientadas según el sistema de coordenadas global x-y tal y como se muestra en la Figura 31.

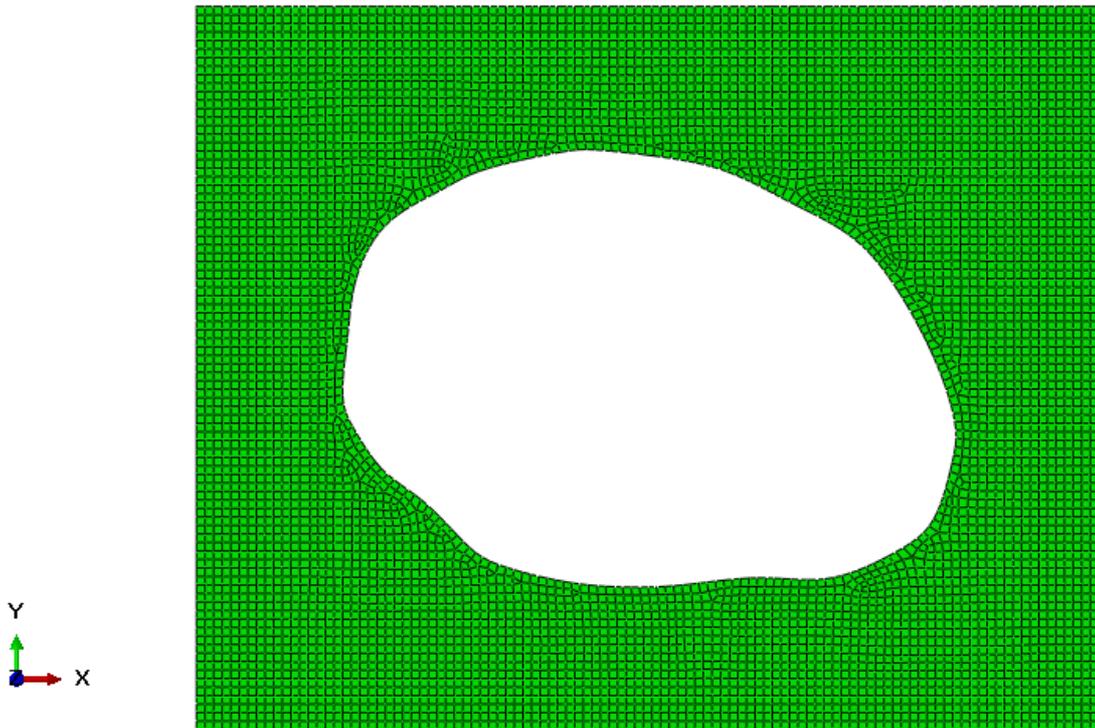


Figura 31. Ilustración de la orientación de los elementos de la matriz intersticial. El material definido es isótropo y orientado en el sistema de coordenadas global.

Se ha considerado propiedades de material isótropas con un módulo de Young de 10 GPa y un coeficiente de Poisson de 0.3.



4.6.6. Fichero de entrada formato Abaqus para definir propiedades del material

```
*****  
** MATERIALS**  
*****  
**  
*Material, name=CEMENT_LINE  
*Elastic  
6000., 0.25  
**  
*Material, name=LAMELLA1  
*Elastic, type=ANISOTROPIC  
12206., 5370.,30572., 5532., 6369.,18804., -79., 251.  
270., 6516.,-1492.,-1065.,-3682., -56., 4704., -388.  
-304., 363., 1682., -196., 4684.  
**  
*Material, name=LAMELLA2  
*Elastic, type=ANISOTROPIC  
28995., 8199.,25625., 4003., 3779., 9779., -254., -166.  
-4., 6516.,-1492.,-1065.,-3682., -56., 4704., -388.  
-354., 97., -14., 124., 8855.  
**  
*Material, name=MATRIZ_INTERSTICIAL  
*Elastic  
10000., 0.3  
**  
*****
```



4.7. CONDICIONES DE CONTORNO EN MODELO

En el trabajo de Prendergast y Huiskes [Ref 25] se definen las condiciones en las cuales se simula la osteona. Este trabajo final de máster ha tomado como referencia las condiciones de Prendergast y Huiskes para definir las condiciones de contorno y los casos de carga que permitan generar una tensión en el plano de la sección transversal del hueso cortical.

Los huesos están sometidos a distintos estados de carga debido al movimiento del cuerpo o por las acciones de contraer y estirar los músculos.

Según las investigaciones llevadas a cabo por Jacob y Huggler [Ref 29], se sabe que la tensión media que se da en una sección transversal del hueso cortical en un la zona de la diáfisis de los huesos largos de un adulto es de 10MPa como valor medio. Esta tensión se considera una tensión hoop o tensión circunferencial y está contenida en el plano x-y.

Las condiciones de contorno del modelo para simular este estado de tensión, ha sido la de restringir el desplazamiento de los nodos de la frontera de manera que se mantengan rectas y perpendiculares a la superficie, teniendo en cuenta así la continuidad con el resto de los volúmenes adyacentes.

En la Figura 32 se detalla la restricción aplicada al modelo de elementos finitos y la dirección de la aplicación de la carga.

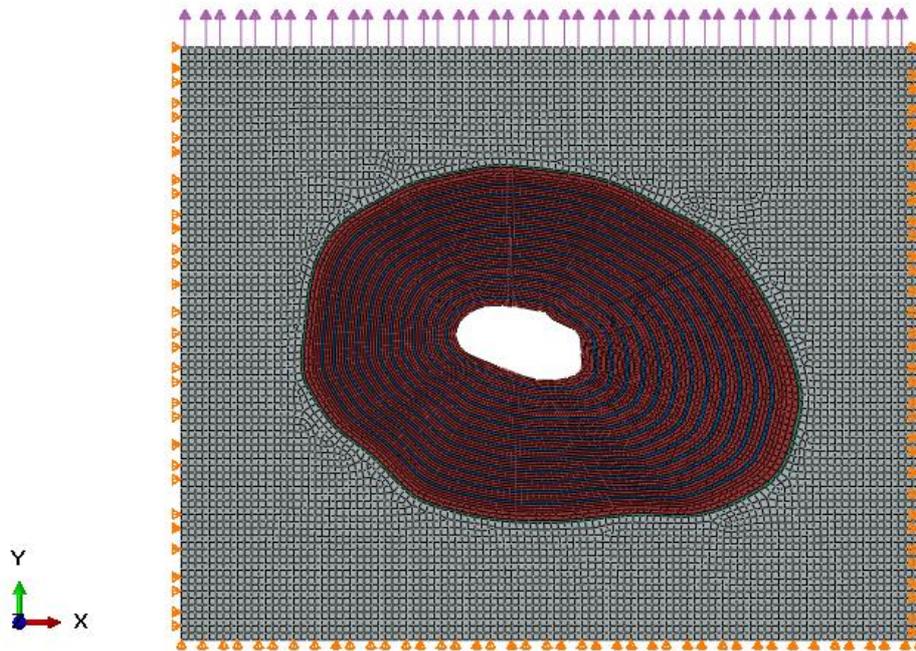


Figura 32. Definición de condiciones de contorno y orientación de la aplicación de la carga $p=10$ MPa.



4.8. POSTPROCESO DE RESULTADOS

Se ha llevado a cabo un análisis elástico lineal del modelo descrito anteriormente. El objetivo es ver cuál es la distribución de tensiones entre las capas de lamela gruesa y lamela delgada y el efecto de las propiedades de material orientadas en el sistema de coordenadas local del elemento.

Por otro lado también se quiere observar el estado de tensión y deformaciones al que se ve sometido la línea cementante cuando se aplica la carga de 10 MPa. El tiempo de cálculo transcurrido hasta finalizar el análisis ha sido aproximadamente de 2 sg.

Debido a la definición de la orientación de las propiedades de material de las lamelas, se va describir los resultados como:

- Dirección 1: respuesta en dirección circunferencial
- Dirección 2: respuesta en dirección radial

En la Figura 33 se puede apreciar el campo de tensiones en la dirección 1 de la lamela delgada y lamela gruesa bajo una carga de 10 MPa.

El resultado muestra como la máxima tensión se da en la lamela delgada con un valor de 50.59 MPa. La tensión en la lamela delgada es mayor que la lamela gruesa, debido a las propiedades de material y dada la orientación de fibrilos de colágeno mineralizado en este sentido.

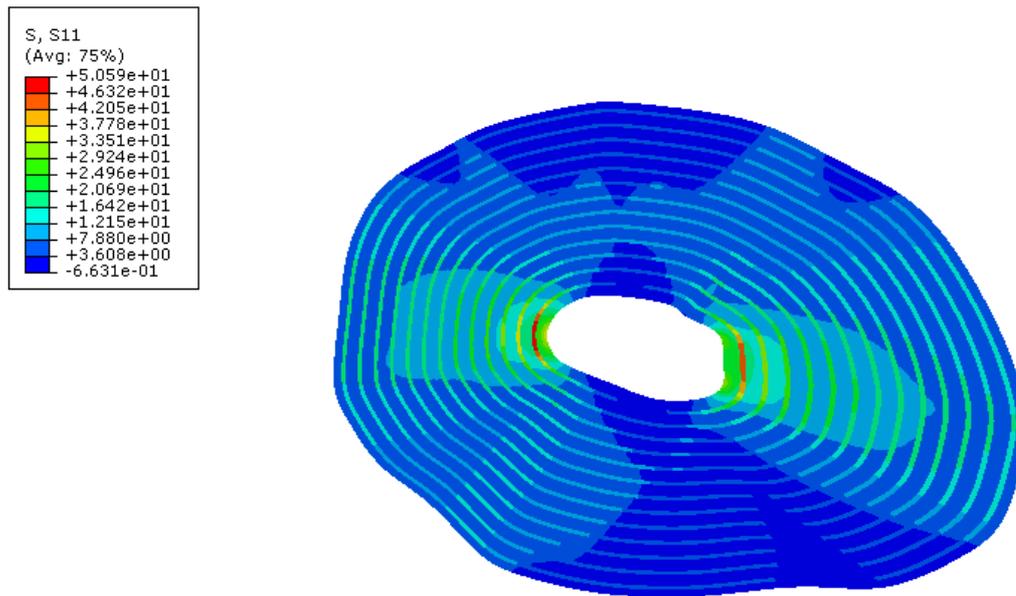


Figura 33. Resultado del análisis en el campo de tensiones en las lamelas en el sistema de coordenadas local en dirección (1) del elemento de las lamelas.

El valor de la tensión en la lamela gruesa en la dirección 1 se sitúa en 36.43 como se puede observar en la Figura 34.

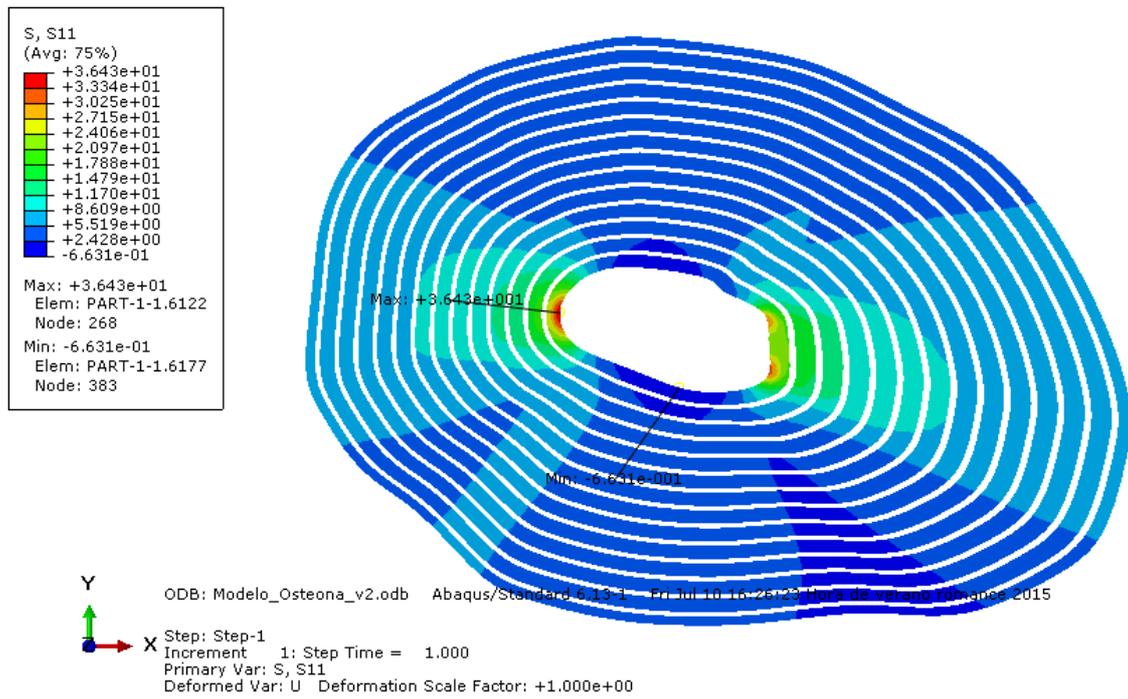


Figura 34. Resultado del análisis en el campo de tensiones en la lamela gruesa en el sistema de coordenadas local en dirección (1) del elemento de las lamelas.

El resultado del campo de tensiones en la dirección 2 en las lamelas gruesa y delgada, muestra un campo de tensiones más uniforme entre la lamela gruesa y la lamela delgada como se puede ver en la Figura 35.

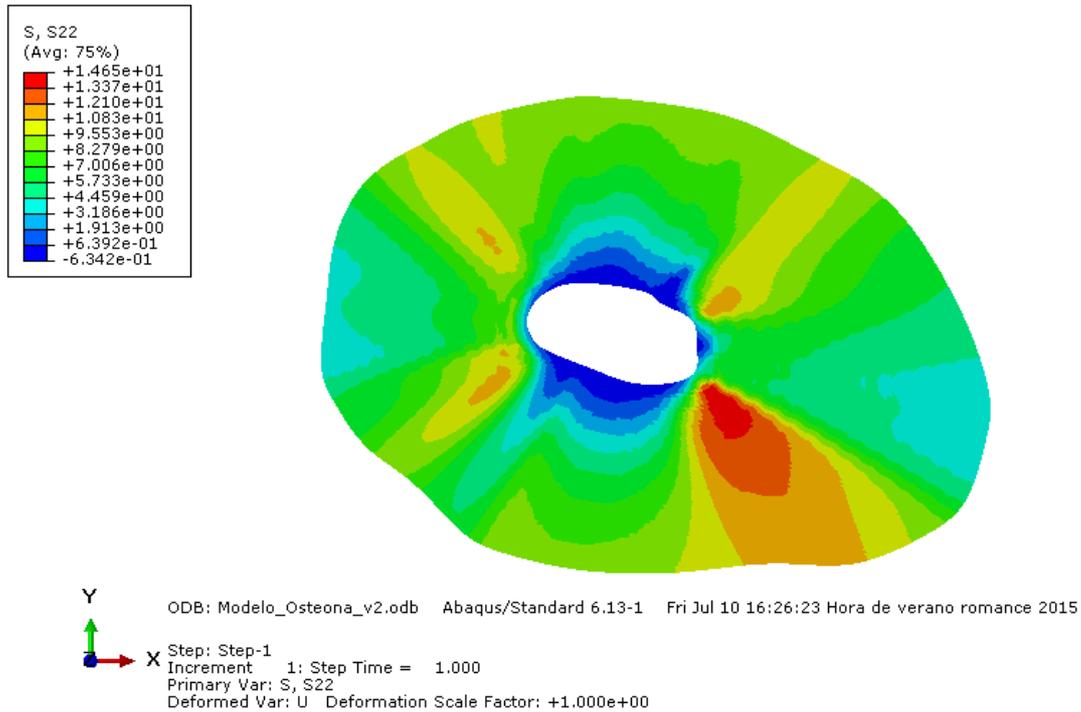


Figura 35. Resultado del análisis en el campo de tensiones en las lamelas en el sistema de coordenadas local en dirección (2) del elemento de las lamelas.

Es decir, no se aprecia un salto en las tensiones de forma tan evidente en la interface entre las lamelas gruesa y delgada como en la dirección 1. El valor de la rigidez del material la dirección 2 son parecidas en la lamela gruesa y lamela delgada. En la Figura 36 se muestra un detalle de la zona de mayor tensión.

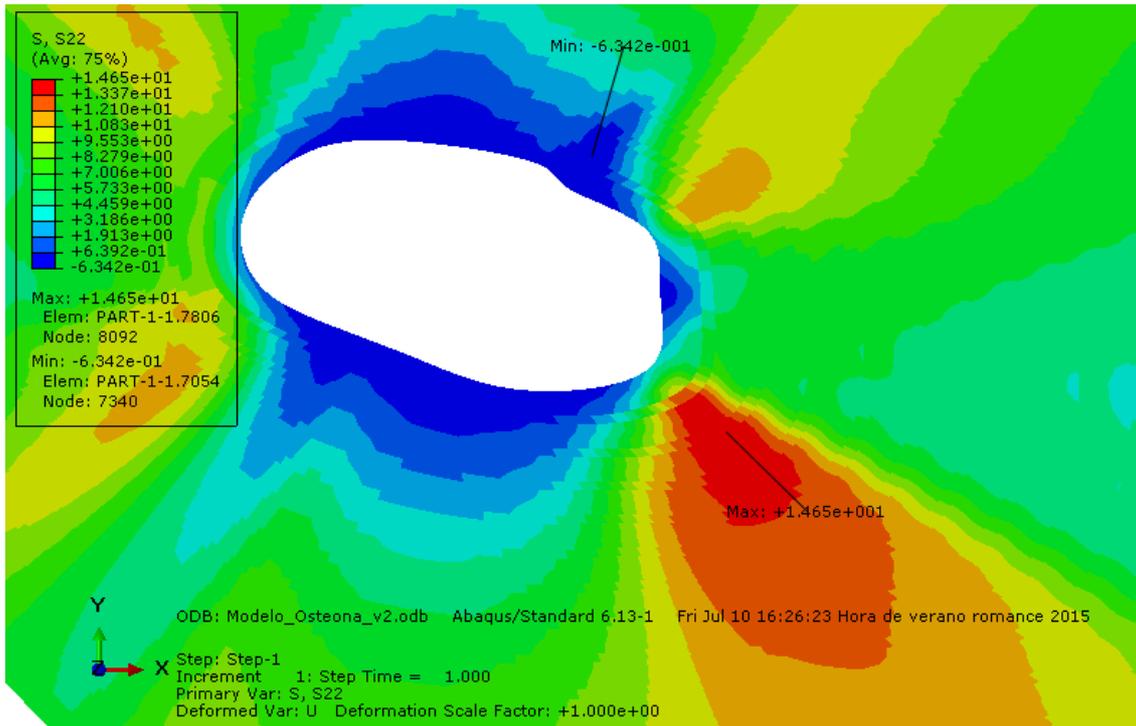


Figura 36. Detalle del resultado del análisis en el campo de tensiones en las lamelas en el sistema de coordenadas local en dirección (2) del elemento de las lamelas.

En la Figura 37 se muestra el campo de deformaciones en la dirección 2 en elementos de las lamelas.

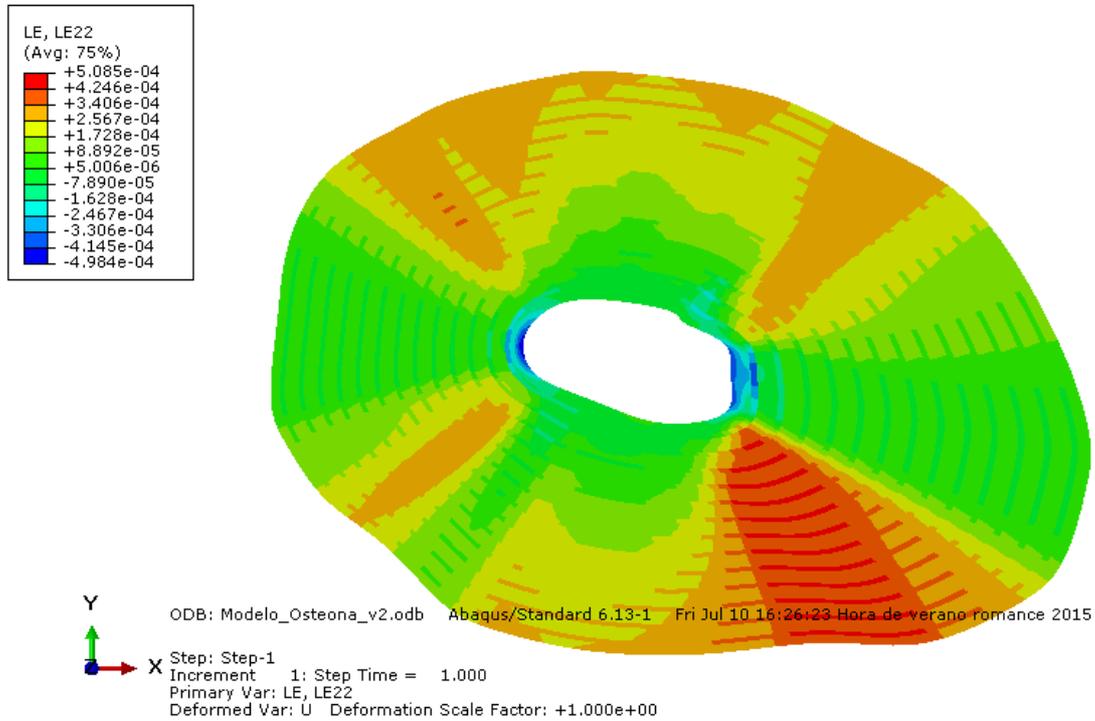


Figura 37. Resultado del análisis en el campo de deformaciones en las lamelas en el sistema de coordenadas local en dirección (2) del elemento de las lamelas.

Respecto la tensión de cortadura en las lamelas, en la Figura 38 se observa que el máximo valor se da en la lamela delgada con un valor de 8.385 MPa.

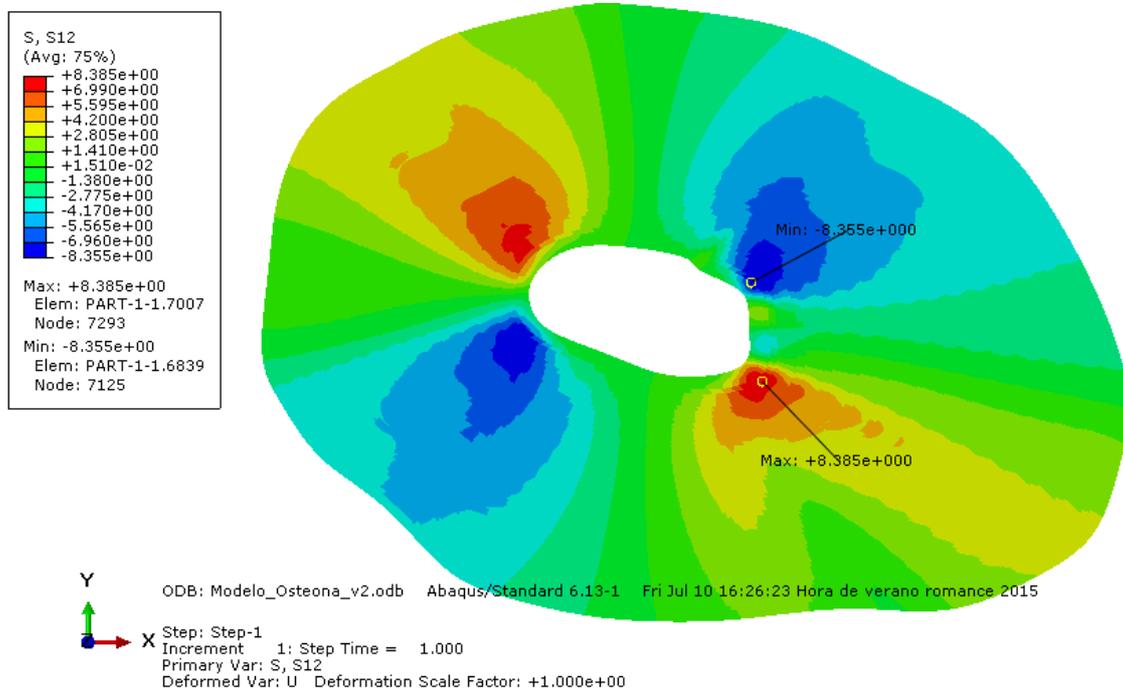


Figura 38. Resultado del análisis en el campo de tensiones en las lamelas en el sistema de coordenadas local en dirección 1-2 del elemento de las lamelas.

El valor de la tensión circunferencial es de 5.29 MPa como se muestra en la Figura 39.

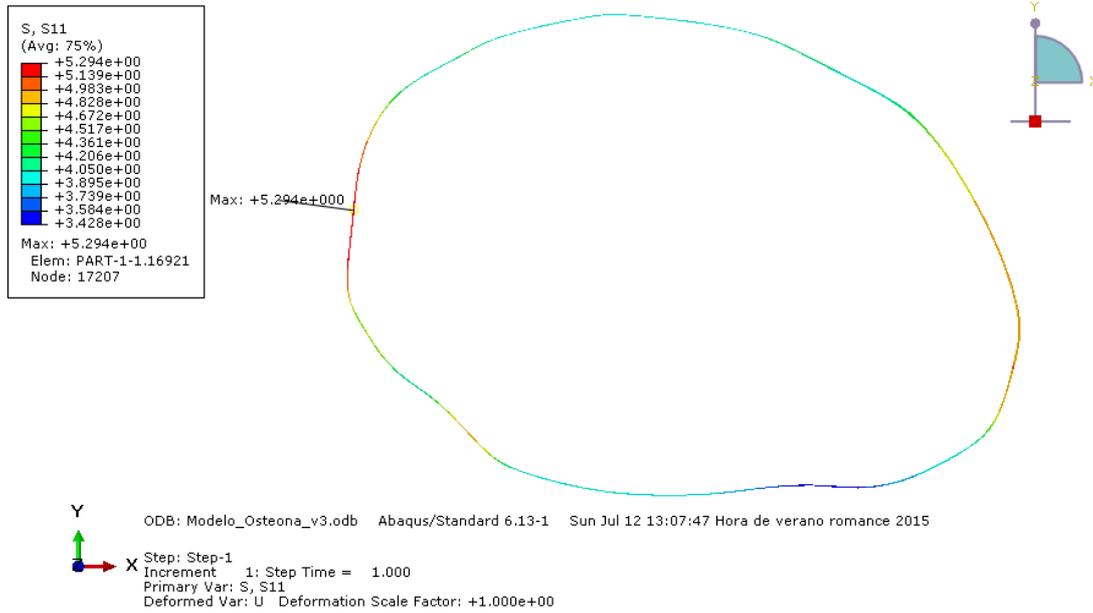


Figura 39. Resultado del análisis en el campo de tensiones en la línea cementante en el sistema de coordenadas local en dirección 1 del elemento de la línea cementante.

El valor de la tensión radial es de 11.31 MPa como se muestra en la Figura 40.

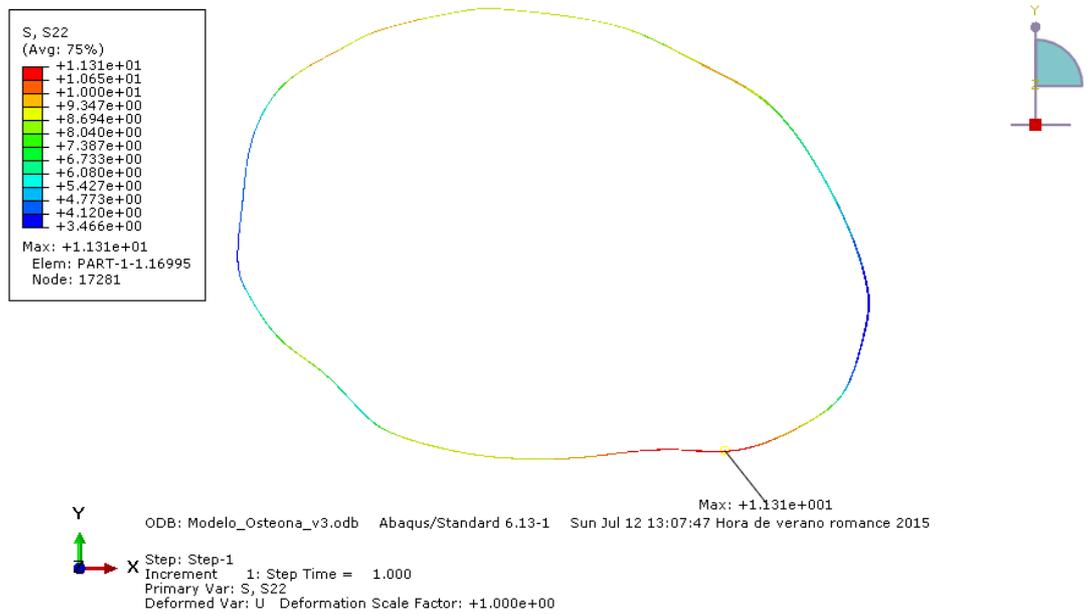


Figura 40. Resultado del análisis en el campo de tensiones en la línea cementante en el sistema de coordenadas local en dirección 2 del elemento de la línea cementante.

Si se observa con más detalle el campo de tensiones en la línea cementante mediante flechas, se observa que la tensión radial y la máxima tensión principal son semejantes. Es decir, la tensión que predomina en la línea cementante es la tensión radial.

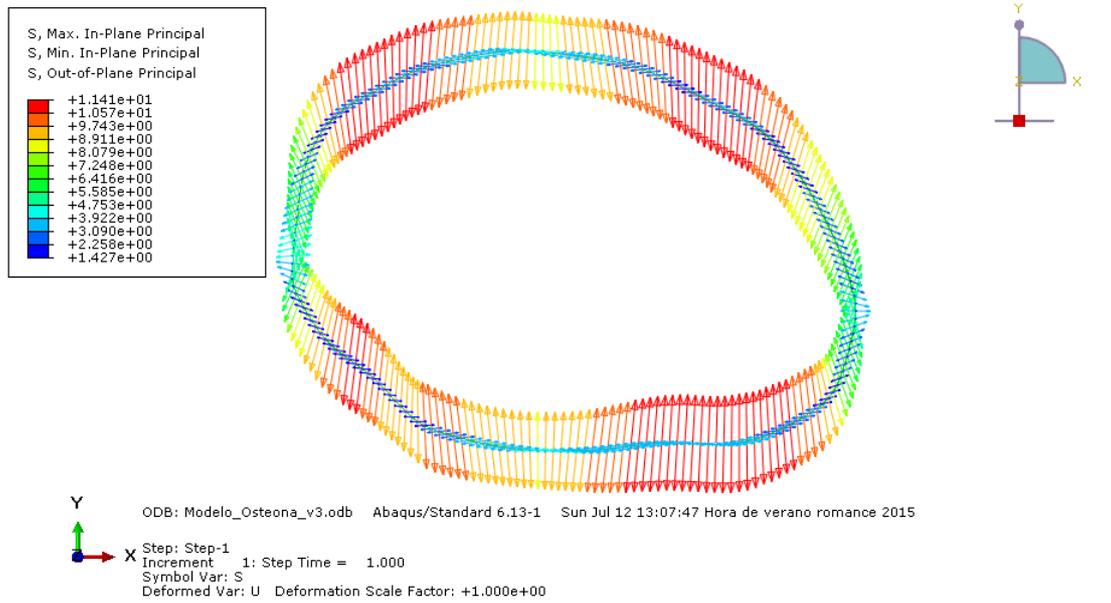


Figura 41. Resultado del análisis mediante flechas para tensiones principales en la línea cementante.

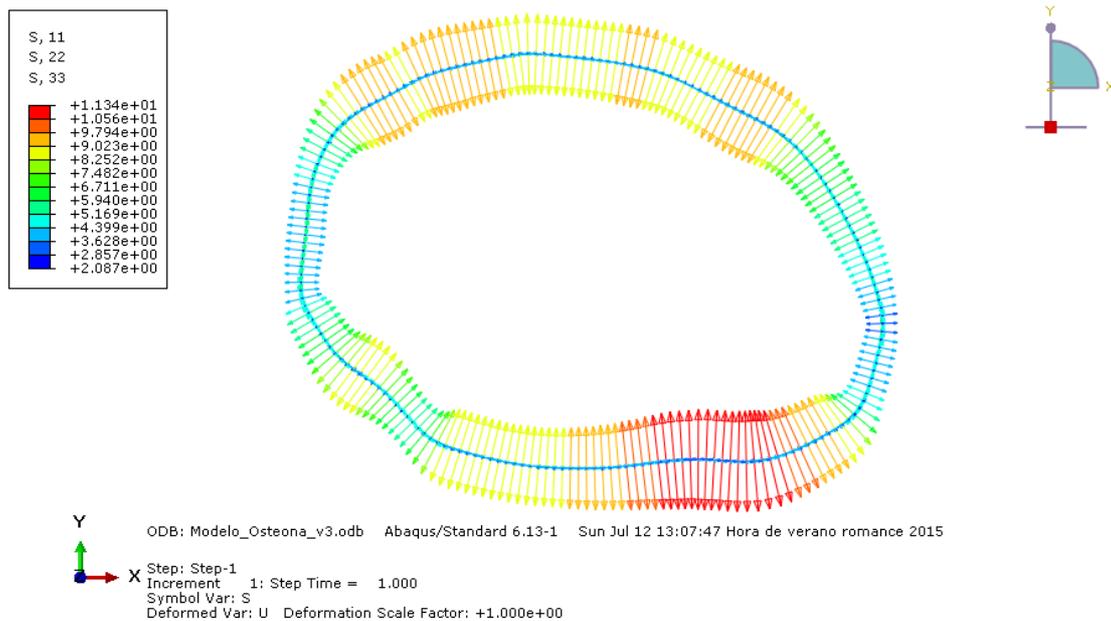


Figura 42. Resultado del análisis mediante flechas para tensiones el sistema de coordenadas local en dirección 2 del elemento de la línea cementante.

Figura 44 se muestra la evolución de la tensión circunferencial en función de la distancia radial. Se puede observar como la tensión tiene un máximo en un radio cercano al canal de Havers como y como va disminuyendo a medida que incrementa el radio. También se aprecia un salto en la tensión al pasar de lamela delgada a lamela gruesa, siendo la tensión mayor en la lamela delgada. La tensión disminuye a un valor mínimo al entrar en la zona de la línea cementante.

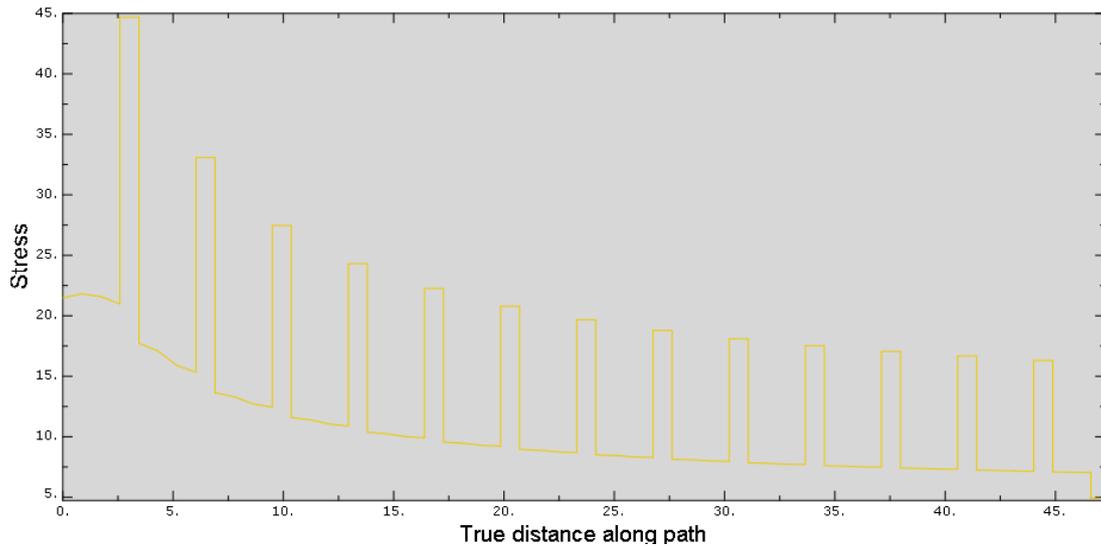


Figura 44. Ilustración que muestra la relación de tensión circunferencial en función de la distancia radial de la osteona.

De igual modo se han extraído los valores de la tensión radial en función de la distancia radial de la osteona. En la Figura 45 se muestra el camino donde se han extraído los valores de la tensión.

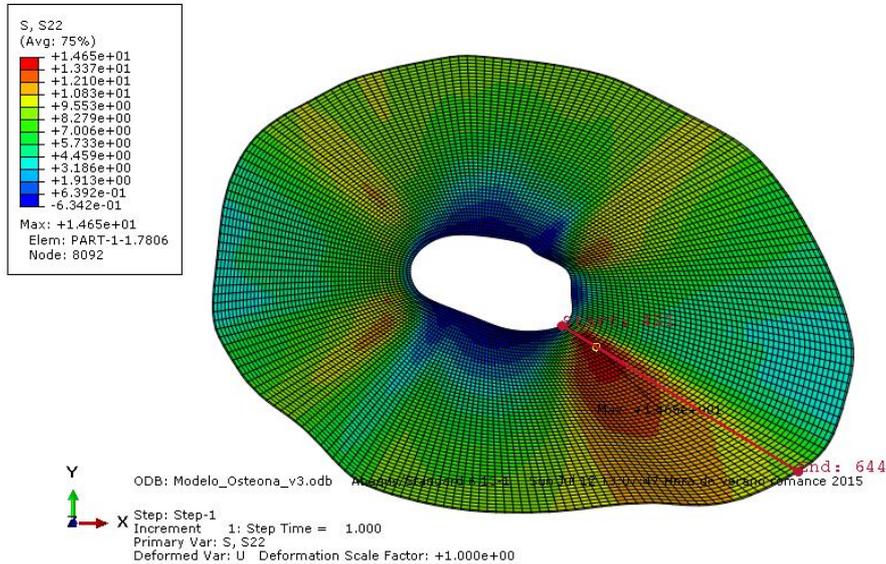


Figura 45. Definición del camino entre nodo inicial y nodo final donde se obtiene la tensión radial en la osteona.

En la Figura 46 se muestra el valor de la tensión radial en función de la distancia radial. Se puede observar como la tensión muestra un pico de tensión al comienzo del radio cercano al canal de Havers y esta tensión disminuye

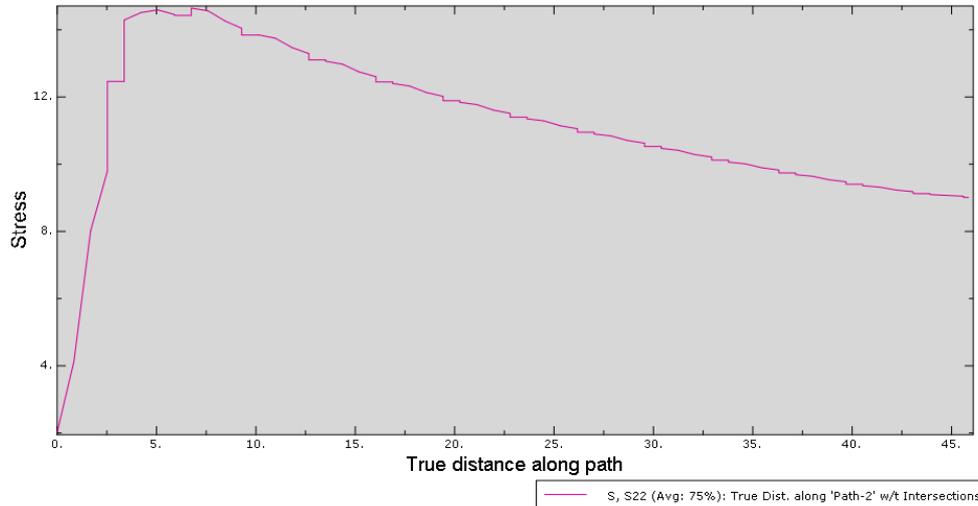


Figura 46. Ilustración que muestra la relación de tensión radial en función de la distancia radial de la osteona.

Respecto a la tensión de cortadura, en la Figura 47 se muestra el camino donde se han extraído los valores de la tensión.

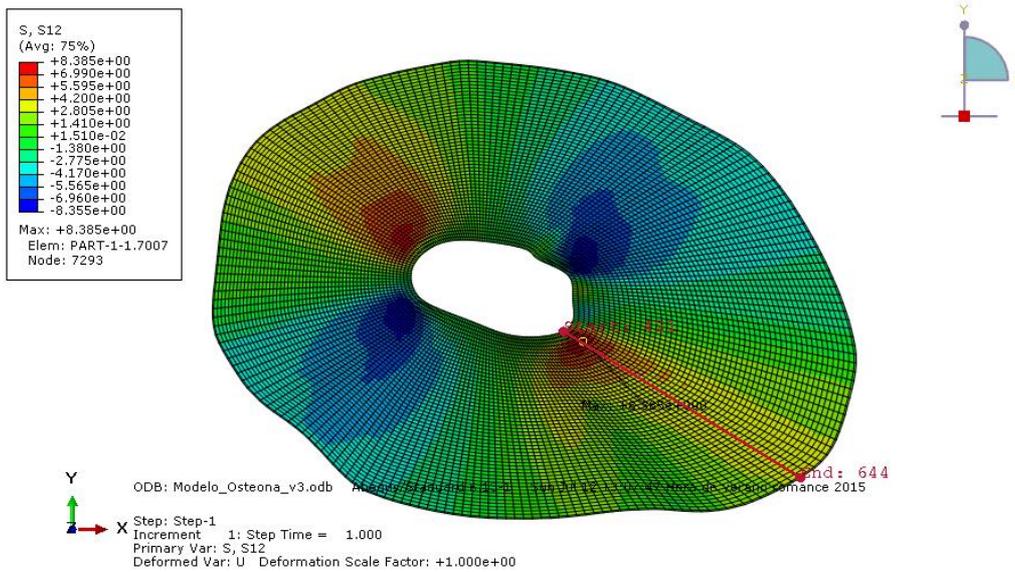


Figura 47. Definición del camino entre nodo inicial y nodo final donde se obtiene la tensión de cortadura en la osteona.

En la tensión de cortadura también se aprecia un pico de tensión al comienzo del radio cercano al canal de Havers y esta tensión disminuye a medida que crece la distancia radial.

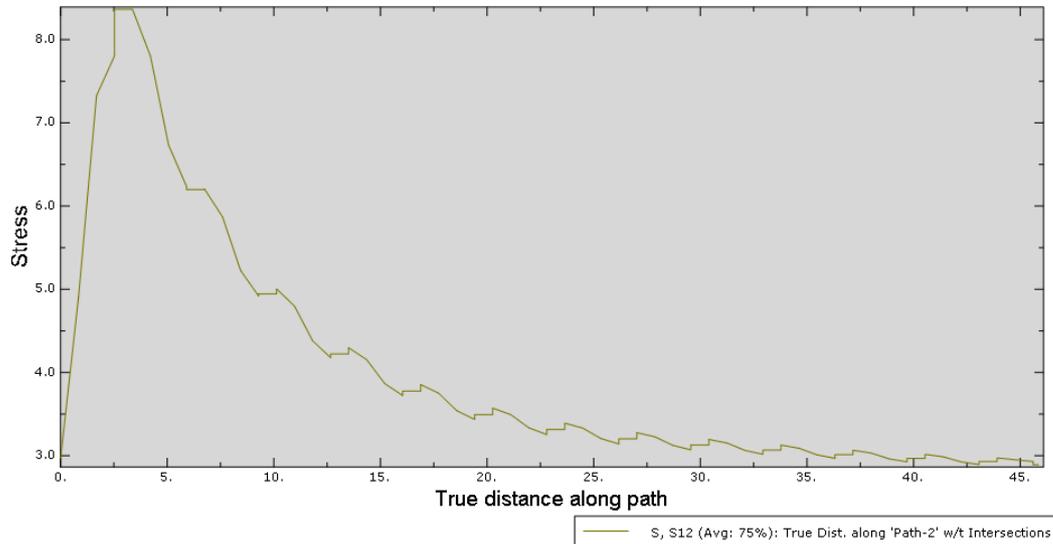


Figura 48. Ilustración que muestra la relación de tensión de cortadura en función de la distancia radial de la osteona.





5. MODELADO DE OSTEONA MEDIANTE LA INCLUSIÓN DE ELEMENTOS COHESIVOS (MODELOS DE ZONA COHESIVA, CZM)

5.1. INTRODUCCION

En este capítulo se ha desarrollado un modelo de elementos finitos mediante la inclusión de elementos cohesivos basado en el modelo del capítulo 4. Además se muestra la simulación del proceso de separación entre dos superficies, el contorno exterior de la osteona y el contorno interior de la línea cementante mediante la inclusión de elemento cohesivos.

5.1.1. Elementos cohesivos en Abaqus

Los elementos cohesivos son capaces de reproducir, entre otros, el comportamiento no lineal como es el proceso de delaminación de dos superficies en contacto sometidos a un estado tensional de tracción o de esfuerzos cortantes.

Los modelos cohesivos representan el proceso físico en los alrededores de la propagación de una grieta o en el proceso de delaminación mediante la relación de la tracción-desplazamiento como veremos más adelante.

Abaqus ofrece en su librería de elementos, elementos cohesivos que permiten reproducir el comportamiento en la interface de dos superficies en contacto como la de un material compuesto, en este caso la osteona.

El comportamiento mecánico de los elementos cohesivos se ha definido mediante un modelo constitutivo específico en término de leyes de tracción separación.

Los modelos basados en leyes de tracción-separación, se usan en el modelado de interfaces en materiales compuestos, cuando el material que los une se quiere simular con un espesor que tiende a cero, como si estuvieran pegados mediante unión adhesiva.

En este caso, las propiedades macroscópicas del material no son muy relevantes, y el análisis se debe de abordar con conceptos derivados de la mecánica de la fractura, como es la cantidad de energía requerida para crear superficies nuevas.

Los elementos cohesivos simulan bajo una carga inicial, el inicio el daño y la propagación del daño hasta que un eventual fallo ocurre en la unión de la interface.

Los elementos cohesivos se deben usar en áreas donde se espera o pretende simular la aparición de una grieta. Sin embargo, no es necesario tener a priori una grieta caracterizada. De hecho, la localización del inicio de la grieta debido a un daño y la evolución de esta grieta son parte de la solución del problema.

Por otro, la grieta generada y la propagación de la grieta están restringidas a propagarse a través del medio definido con elementos cohesivos, con lo cual no habrá una desviación de grieta hacia el material circundante.

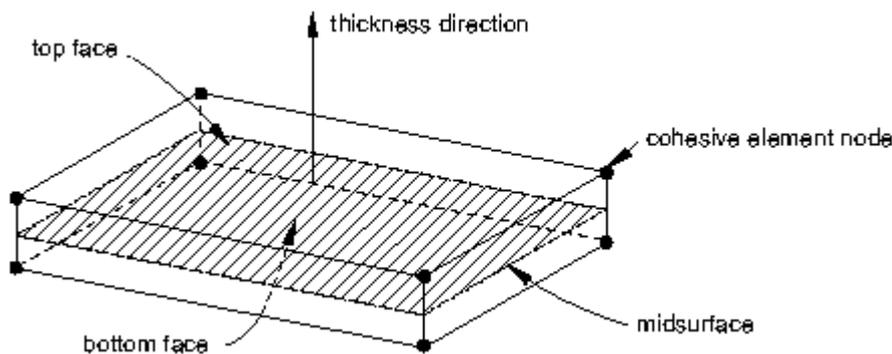


Figura 49. Definición del elemento cohesivo en Abaqus. La ilustración muestra las caras del elemento y la dirección del espesor [Ref 30].

La Figura 49 representa un elemento cohesivo en tres dimensiones. La conectividad mediante elementos cohesivos es como otro elemento continuo, aunque es apropiado pensar en que está formado por dos superficies separadas por un espesor. En dos dimensiones estaría representado por dos líneas separadas por un espesor, donde una línea sería la capa superior y la otra línea sería la capa inferior.

El movimiento relativo entre las capas superiores e inferiores en la dirección del espesor del elemento, representa la apertura o el cierre de la interface. El cambio de posición relativo de la capa interior y la capa superior medido en un plano perpendicular a la dirección del espesor, cuantifica el comportamiento transversal a cortante en el elemento cohesivo.

El estiramiento y la cizalladura de la superficie media del elemento están asociados con las deformaciones de tipo membrana en el elemento cohesivo, sin embargo se asume que los elementos cohesivos no generan tensiones a una respuesta puramente de tipo membrana. En la Figura 50 se muestran las posibles deformaciones que puede tener un elemento cohesivo.

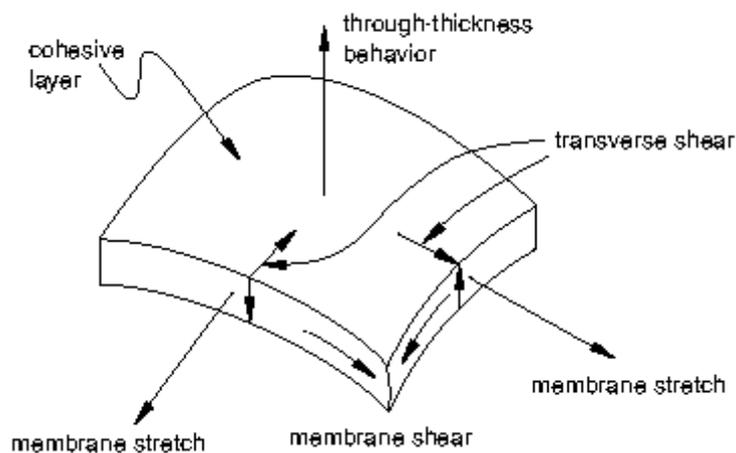


Figura 50. Estados de tensión deformación del elemento cohesivo [Ref 30].

Los elementos cohesivos representan una capa delgada infinitesimal de un adhesivo en la unión de una interface. Lo más común es definir la respuesta de la interface directamente en términos de la tracción que se produce en la interface en función del desplazamiento relativo entre las interfaces.

5.1.2. Ensamblado mediante elementos cohesivos

Cuando los elementos cohesivos y el resto de las partes del modelo tienen mallas coincidentes, como es el caso que desarrollaremos en este trabajo, lo más acertado es conectar ambas mallas en una sola fusionando los nodos.

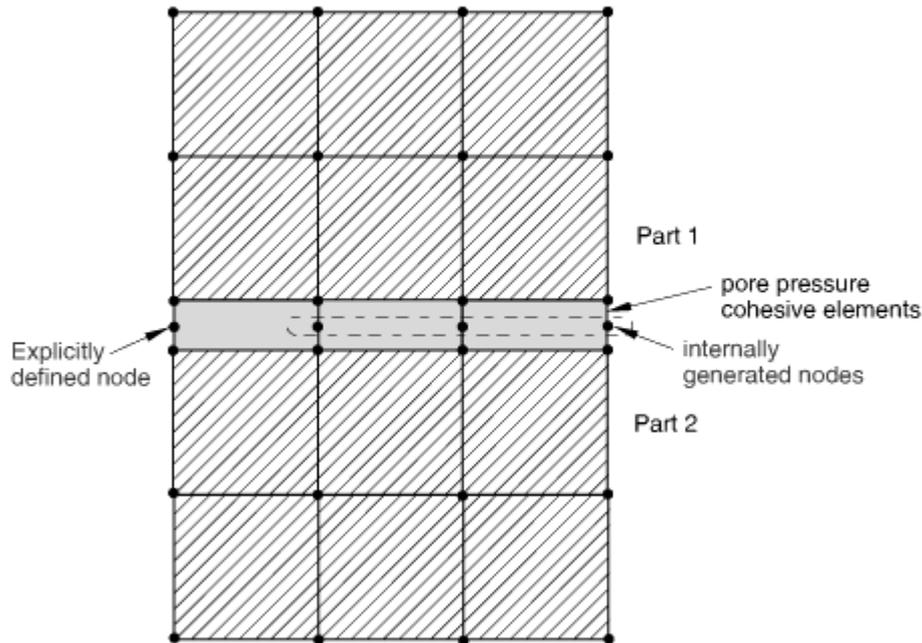


Figura 51. Unión de la capa de elementos cohesivos con el resto del modelo mediante en una malla coincidente [Ref 30].

En la Figura 51 se muestra de forma esquemática la unión que se ha generado entre los elementos cohesivos y el resto de elementos del modelo.

5.1.3. Definición del comportamiento del material en elementos cohesivos

Es necesario asignar propiedades de material a un grupo de elementos cohesivos. El comportamiento del grupo de elementos por las propiedades de material estará completamente definido por el espesor que se haya definido en la capa de cohesiva.



Para aplicaciones donde el comportamiento de los elementos cohesivos está definido directamente en términos de tracción-separación, la respuesta solo puede ser definida mediante el comportamiento elástico lineal entre la tracción y la separación junto con la progresión del daño.

5.1.4. Problemas de convergencia en Abaqus

El modelado del daño generado implica una relajación en la respuesta del material y su rigidez, lo cual genera dificultades de convergencia en la solución de los análisis.

Los problemas de convergencia suceden durante la propagación de grietas inestables, cuando la energía disponible es mayor que la tenacidad a la fractura del material.

5.1.5. Definiendo el espesor constitutivo

En Abaqus se definen dos espesores en los elementos cohesivos. El primero es el espesor constitutivo y el segundo es el espesor geométrico. El espesor constitutivo es el que Abaqus utilizará con las correspondientes leyes de respuesta la deformación (desplazamiento y deformaciones) de los elementos cohesivos bajo la aplicación de cargas. El espesor geométrico se usa para mostrar en pantalla el modelo.

Hay un tercer valor del espesor que es necesario definir. En el caso de elementos 2D, ha de definir el espesor fuera del plano. Por defecto se toma este valor como 1.0.

Respecto al espesor constitutivo, la longitud característica del elemento es igual a su espesor constitutivo. Cuando la respuesta de los elementos cohesivos está basada en leyes de tracción-separación, Abaqus asume por defecto que el espesor constitutivo es igual a valor 1.0. Este valor tomado por defecto está motivado por el hecho de que el espesor geométrico de los elementos cohesivos es cero o casi cero para el tipo de aplicaciones donde se busca la respuesta de tracción-separación. Este valor por defecto asegura que las deformaciones nominales son iguales a los desplazamientos por separación relativa.

Es de vital importancia definir adecuadamente la orientación de los elementos cohesivos, ya que el comportamiento de los elementos es diferente en la dirección del espesor que en el resto de planos. La Figura 52 y Figura 53 se muestra la definición de la cara superior y la cara inferior de los elementos cohesivos, tanto para tres dimensiones como en dos dimensiones.

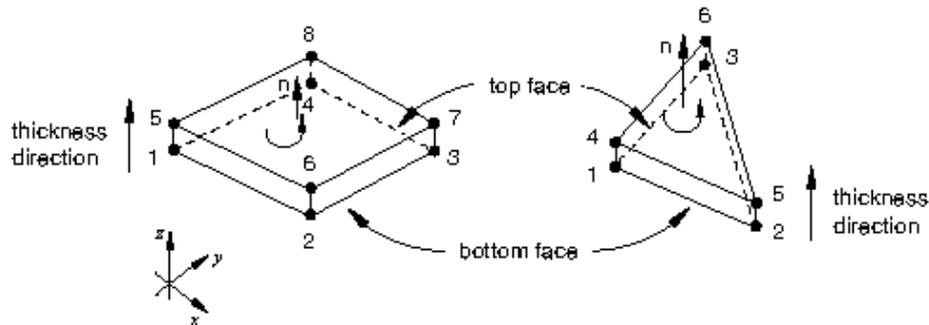


Figura 52. Definición de cara superior, cara inferior y dirección de espesor en el elemento cohesivo de tres dimensiones [Ref 30].

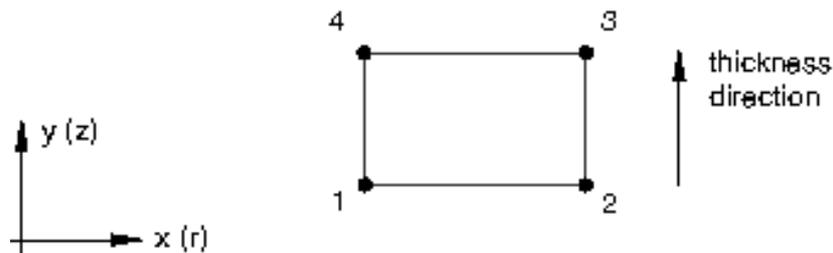


Figura 53. Definición de cara superior, cara inferior y dirección de espesor en el elemento cohesivo de dos dimensiones [Ref 30].

En el caso de los elementos cohesivos en dos dimensiones, Abaqus crea un plano medio en los elementos a partir de las coordenadas de los nodos en oposición de la cara superior y de la cara inferior. Este plano medio atraviesa los puntos de integración del elemento como se muestra en la Figura 54.

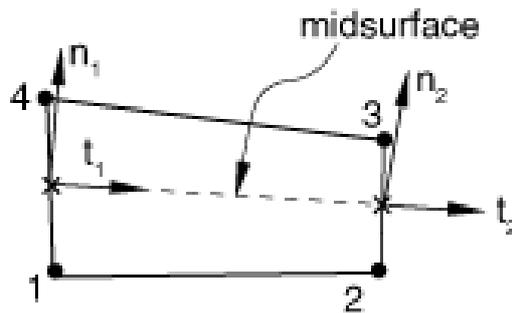


Figura 54. Definición de plano medio en el elemento cohesivo [Ref 30].

Para cada punto de integración, Abaqus calcula la línea tangente cuya dirección viene definida por la secuencia de los nodos de la superficie superior e inferior. La dirección del espesor se obtiene a partir del producto de las direcciones fuera de plano y tangente.

Abaqus calcula por defecto los sistemas de coordenadas locales en cada punto de integración. A partir de estas direcciones locales se calculan todas las salidas como respuesta al estado de las deformaciones de los elementos cohesivos. En la Figura 55 se muestran las direcciones locales en los puntos de integración para elementos en dos dimensiones.

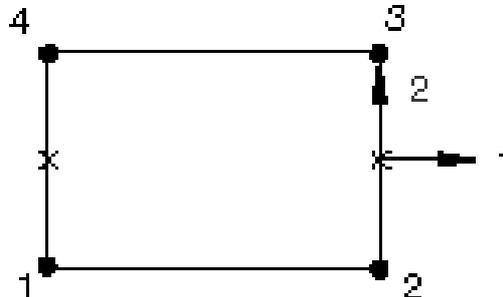


Figura 55. Definición de sistema de referencia local en el elemento cohesivo [Ref 30].



5.2. ELEMENTOS COHESIVOS: LEY DE TRACCION SEPARACION

Como se ha comentado, el comportamiento de los elementos como respuesta a leyes de tracción-separación está ligado a la simulación de superficies unidas mediante una interface con un espesor despreciable.

A continuación se definen ciertas aplicaciones de los elementos cohesivos en términos de leyes de tracción-separación:

- Puede ser usado para modelar la delaminación de interfaces en materiales compuestos directamente en términos de tracción vs separación.
- Permite la definición de propiedades de material como la energía de la fractura como función del ratio de la deformación normal y cortante en la interface.
- Permite reproducir el fallo de los elementos caracterizado por la degradación progresiva de la rigidez del material, el cual guía el proceso del daño.
- Permite utilizar múltiples mecanismos de daño.
- Permite usar subrutinas definidas por el usuario para definir leyes de tracción-separación.

En este apartado se va a definir el comportamiento de los elementos cohesivos bajo las leyes de tracción separación para el caso de los elementos cohesivos en dos dimensiones, usado en el modelado de este trabajo final de máster. En la literatura de Abaqus [Ref 30] se pueden encontrar todas las opciones en la definición de elementos cohesivos bajo leyes de tracción separación.

5.2.1. Definición de las propiedades elásticas del material: elasticidad en términos de tracción separación para elemento cohesivos

La modelado en Abaqus del comportamiento de los elementos cohesivos mediante la ley de tracción-separación asume inicialmente un comportamiento elástico lineal seguido de la iniciación del daño y la evolución del daño.

El comportamiento elástico se describe en términos de una matriz constitutiva elástica que relaciona la tensión nominal y la deformación nominal a lo largo de una interface.

Las tensiones nominales son los componentes del vector fuerza dividida por el área original en cada punto de integración, mientras que la deformación nominal es la separación dividida por el espesor original en cada punto de integración.

Como se ha comentado, Abaqus toma como valor de referencia para el espesor constitutivo 1.0 si se define una respuesta de tracción separación. Este valor garantiza que la deformación nominal es igual a la separación. Cuando se usa la respuesta de tracción separación el valor del espesor constitutivo normalmente es diferente al espesor geométrico que típicamente suele tener un valor igual a cero.

Para elementos cohesivos que se usan en la simulación de interfaces pegadas, Abaqus permite la definición de una matriz de elasticidad que relaciona directamente la tracción nominal y la deformación nominal. Ambos términos pueden estar acoplados o desacoplados mediante la definición de la matriz elástica. En el caso de comportamiento desacoplado cada componente de la tracción depende solamente de su valor nominal de deformaciones, mientras que en el comportamiento acoplado la respuesta es más general.

En el sistema de referencia local del elemento, la relación tensión deformación para el comportamiento desacoplado es:

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{nn} & 0 \\ 0 & E_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix}$$

El valor de t_n y t_s representa la tracción nominal en la dirección normal y en la dirección de cortadura del elemento; mientras que el valor de ε_n y ε_s representa la deformación nominal que corresponda.

Para el comportamiento acoplado de la tracción y la deformación la relación de tensión-deformación viene dada por la expresión:

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{nn} & E_{ns} \\ E_{ns} & E_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix}$$

El criterio de estabilidad para el comportamiento donde tracción y deformación están desacoplados es que $E_{nn} > 0$ y $E_{ss} > 0$.

Para garantizar la estabilidad del comportamiento acoplado el criterio de estabilidad es

$$E_{nn} > 0 \quad E_{ss} > 0$$

$$E_{ns} < \sqrt{E_{nn} \cdot E_{ss}}$$

$$\det \begin{bmatrix} E_{nn} & E_{ns} \\ E_{ns} & E_{ss} \end{bmatrix} > 0$$

El vector de tensión nominal tractivo \mathbf{t} , está compuesto por dos componentes t_n y t_s (el primero representa la tracción normal y el segundo la tracción a cortadura en las dos direcciones del plano x-y).

De igual manera, el vector que define la separación δ está compuesto por los componentes δ_n y δ_s . Si se define T_0 como el espesor original de los elementos cohesivo, las deformaciones nominales pueden describirse como:

$$\varepsilon_n = \frac{\delta_n}{T_0}, \quad \varepsilon_s = \frac{\delta_s}{T_0}$$

La expresión general del comportamiento elástico se define como:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_{sn} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{nn} & E_{ns} \\ E_{ns} & E_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{E} \boldsymbol{\varepsilon}$$

Tal y como se ha comentado la matriz elástica \mathbf{E} relaciona completamente mediante comportamiento acoplado entre todos los componentes del vector tracción y separación. Si se desea desacoplar el comportamiento de los componentes normal y cortante, los términos fuera de la diagonal de la matriz elástica han de sustituirse por cero.

5.2.2. Interpretación de las propiedades de material

Los parámetros que definen la propiedad de material como es el parámetro de la rigidez elástica para los modelos basados en leyes de tracción separación, se puede comprender de manera más fácil si se estudia las ecuación de desplazamiento de una viga de longitud L, rigidez E y área A sometido a una carga axial P.



$$\delta = \frac{PL}{AE}$$

Esta ecuación se puede reescribir como:

$$\delta = \frac{S}{K'}$$

donde $S=P/A$ es la tensión nominal y $K=E/L$ es la rigidez que relación la tensión nominal y el desplazamiento. Además, la masa total de la viga, asumiendo una densidad ρ sería:

$$M = \rho AL = \rho' A$$

Las ecuaciones de arriba sugieren que la longitud real L sea sustituida por 1.0 (para asegurar que la deformación es igual que el desplazamiento) si la rigidez y la densidad se reinterpretan correctamente. En particular, la rigidez se describiría como $K=(E/L)$ y la densidad $\rho'=(\rho L)$, donde la longitud verdadera de la viga si que se usa en estas ecuaciones.

La densidad representa la masa por unidad de área en vez de masa por unidad de volumen.

Estas ideas se pueden extrapolar a capa con propiedades cohesivas de un espesor inicial T_c . Si el material del adhesivo tiene una rigidez E_a y una densidad ρ_c , la rigidez de la interface (que relaciona la tracción nominal y la deformación nominal) quedaría como $E_c=(E_a/ T_c) T_o$ y la densidad de la capa cohesiva sería $\rho'_c=(\rho_c T_c)$.

Como se ha comentado previamente, por defecto la elección del espesor constitutivo T_o para modelar la respuesta en términos de tracción separación es 1.0 a pesar del espesor de la de la capa cohesiva.

Con este escenario, la deformación nominal es igual a la correspondiente separación. Cuando el espesor constitutivo de la capa de cohesivo se define con el valor 1.0, se debe especificar E_c y ρ'_c (en caso necesario) como la rigidez del material y la densidad, como el calculado con el espesor verdadero de la capa de cohesivo.



Las formulas descritas arriba son herramientas para estimar los parámetros requeridos en la modelado de elementos con comportamiento en base a leyes de tracción separación de la interface en términos de propiedades de material.

Cuando el espesor de la capa en la interface tiene a valor cero (o casi cero), las ecuaciones descritas arriba implican que la rigidez E_c tiende a infinito y la densidad ρ_c' tiende a cero. Esta rigidez es usada a menudo como un parámetro variable ya que una rigidez elevada es perjudicial para el cálculo.

5.3. MODELADO DEL DAÑO

Abaqus permite modelar el daño generado y el posterior fallo en superficies cohesivas cuya respuesta se haya definido en términos de tracción separación. En un escenario más complejo, Abaqus permite la combinación de varios mecanismos de daño que actúen simultáneamente en el mismo material cada tipo de fallo.

En cualquier caso, cada criterio de fallo se basa en tres pilares: el criterio de iniciación del daño, una ley de evolución del daño y la selección de qué elementos se eliminan una vez que se haya producido completamente el fallo.

A continuación se describen los detalles en los que se basa el modelado de daño como respuesta a una respuesta de tracción separación.

La respuesta inicial de los elementos cohesiva se asume que ha de ser lineal como se ha comentado anteriormente, Sin embargo, una vez que el criterio de iniciación de daño se haya alcanzado, el daño en el material puede ser simulado por cualquier otra ley definida por el usuario, si no de desea una respuesta lineal.

La Figura 56 muestra una respuesta típica de tracción separación en el modelado de mecanismos de fallo.

Puede que se especifique un criterio de iniciación de daño sin su correspondiente evolución del daño. En este caso Abaqus evaluará el criterio de iniciación de daño sin que haya ninguna respuesta de los elementos cohesivos.

Cabe mencionar que Abaqus no evalúa el daño en capas de cohesivos que estén sometidos a una compresión pura.

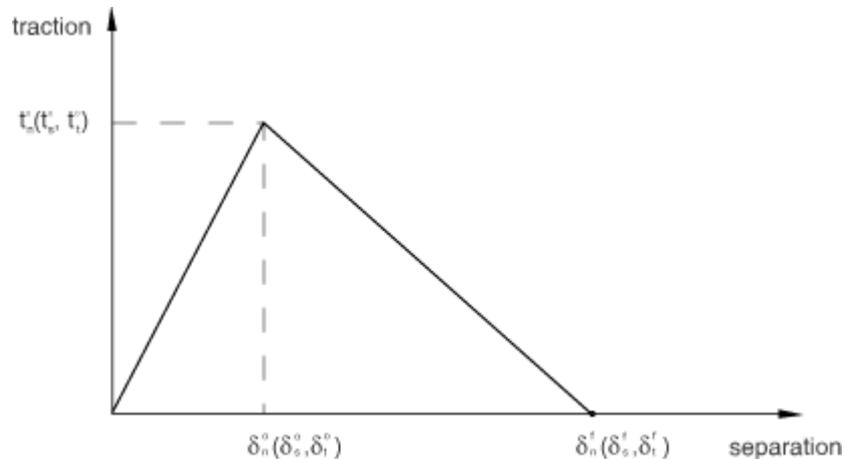


Figura 56. Ley de comportamiento en términos de tensión de tracción desplazamiento [Ref 30].

5.3.1. Iniciación del daño

La iniciación de daño se refiere al comienzo de la degradación del material en un punto. El proceso de degradación comienza cuando la tensión y/o la deformación alcanzan el umbral de iniciación de daño que se haya especificado.

Los criterios para a iniciación de daño en cada caso pueden ser distintos, sin embargo cada criterio conlleva una variable de salida que indica si el criterio se ha alcanzado o no.

Cuando el valor de la variable es 1 o mayor que 1, quiere decir que el valor del umbral de iniciación de daño se ha alcanzado en ese instante de tiempo.

Si definimos t_n^o y t_s^o , estos representan los valores pico de la tensión nominal cuando la deformación es puramente normal en la interface de la capa de cohesivos o es puramente en la dirección cortante. De igual manera ε_n^o y ε_s^o , representan los valores pico de la tensión deformación cuando la deformación es puramente normal a la interface de la capa de cohesivos o es puramente cortante.

Si se define el espesor constitutivo inicial $T_0=1$, las componentes de la deformación nominal serán iguales a las componentes del desplazamiento relativo, δ_n^o y δ_s^o , entre la capa superior y la capa inferior de la capa de cohesivos.

Se utiliza el símbolo $\langle \rangle$ para indicar que una deformación o un estado de tensión puramente compresiva no contribuyen a la iniciación de daño.

Criterio de máxima tensión

Se asumirá que el daño se inicia cuando el ratio de la máxima tensión nominal alcanza el valor 1. La siguiente expresión representa el criterio de máxima tensión.

$$\max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^o}, \frac{t_s}{t_s^o} \right\} = 1$$

5.3.2. Evolución del daño

El proceso de evolución de daño describe como el ratio al cual la rigidez del material se degrada una vez el correspondiente criterio de iniciación de daño es alcanzado.

El concepto es similar a la idea que se aplica para describir el modelo de daño en elementos cohesivos como respuesta en términos de tracción separación, pero con algunos detalles diferentes.

Si definimos como la variable daño el parámetro escalar D , este representa el daño general en el material y contendrá los efectos de combinar todos los mecanismos de daño que se hayan definido.

Su valor inicial es 0. Si se tiene en cuenta la evolución del daño en la simulación, el parámetro escalar D tenderá al valor 1 a medida que aumente la carga tras el inicio del daño. Las componentes de la tensión del modelo de tracción separación se ven afectados por el valor del daño de acuerdo a:

$$t_n = \begin{cases} (1 - D)t'_n, & t'_n \geq 0 \\ t'_n & \end{cases}$$

$$t_s = (1 - D)t'_s$$

donde t'_n y t'_s son las componentes de la tensión que predice el comportamiento elástico de tracción separación para la deformación actual sin daño.

Para describir la evolución del daño bajo la combinación de la deformación normal y la deformación cortante a través de la interface, se utiliza la expresión del desplazamiento efectivo, Camanho y Davila [Ref 31]:

$$\delta_m = \sqrt{(\delta_n)^2 + \delta_s^2}$$

Evolución de daño basado en desplazamiento efectivo

Para definir la evolución del daño basado en el desplazamiento efectivo que sufre un punto durante el proceso de deformación, se necesita especificar el valor de $\delta_m^f - \delta_m^o$, donde el primer término es el desplazamiento efectivo hasta que ocurre el fallo y el segundo término es el desplazamiento efectivo al inicio del daño.

Otro aspecto a definir es el comportamiento que describe la evolución del daño como puede ser una relajación lineal o exponencial que defina la evolución detallada (entre iniciación y fallo) de la variable de daño D como una función de desplazamiento más allá de la iniciación del daño.

Evolución lineal del daño

Para el caso de la relajación lineal, Abaqus utiliza para el cálculo de del daño D la siguiente expresión:

$$D = \frac{\delta_m^f (\delta_m^{max} - \delta_m^o)}{\delta_m^{max} (\delta_m^f - \delta_m^o)}$$

En la expresión descrita arriba δ_m^{max} hace referencia al máximo valor del desplazamiento efectivo que se ha alcanzado durante todo el periodo de cargas.

5.3.3. Máximo daño y criterio de eliminación de elementos

Es posible tener el control de como Abaqus trata los elementos cohesivos con un valor de daño determinado. Por defecto, el valor máximo que la variable daño puede tomar es $D_{max}=1$.

Una vez el valor del daño haya alcanzado el valor de D_{max} , en todos los puntos del material donde ninguno de los puntos del material está en estado de tensión a compresión, los elementos cohesivos, son eliminados.

La aproximación de eliminar elementos en el modelo suele ser interesante en el modelado de fracturas completas a través de un contorno y en la separación de componentes.

Por otro lado puede interesar la no eliminación de los elementos. En este caso Abaqus permite mantener los elementos en el modelo tras haber alcanzado el valor de la variable de daño D_{max} . En este caso la rigidez del elemento tanto a tensión de tracción como a la tensión cortante permanece con un valor constante (degradado por el factor $1 - D_{max}$ respecto a la rigidez inicial previo al daño).

5.4. INCLUSION DE ELEMENTOS COHESIVOS

Como ya se vio en el capítulo 4, el modelo de elementos finitos consta de una osteona completa con lamelas delgada y gruesa, línea cementante y matriz intersticial.

Para simular la delaminación entre osteona y línea cementante, se ha desarrollado a partir de este modelo otro modelo más complejo que incluye la inclusión elementos cohesivos.

Como el objetivo de la simulación es representar un proceso de separación entre dos superficies inicialmente unidas, estos elementos cohesivos se han configurado para obtener una respuesta a un estado de carga mediante el comportamiento en términos de leyes de tracción separación.

El modelo usado es el mismo que el descrito en el capitulo 4, respecto a:

- Geometría

- Proceso de generación de la malla
- Definición de las propiedades de material de lamelas, línea cementante y matriz intersticial
- Condiciones de contorno

Para llevar a cabo la inclusión de elementos cohesivos, se ha introducido una nueva capa de elementos en entre la línea cementante y la última de capas de lamelas de la osteona. En la Figura 57 se muestra la capa de elementos cohesivos entre osteona y línea cementante mediante una línea roja.

El tipo de elemento cohesivo que se ha introducido es un elemento rectángulo en dos dimensiones de cuatro nodos tipo COH2D4.

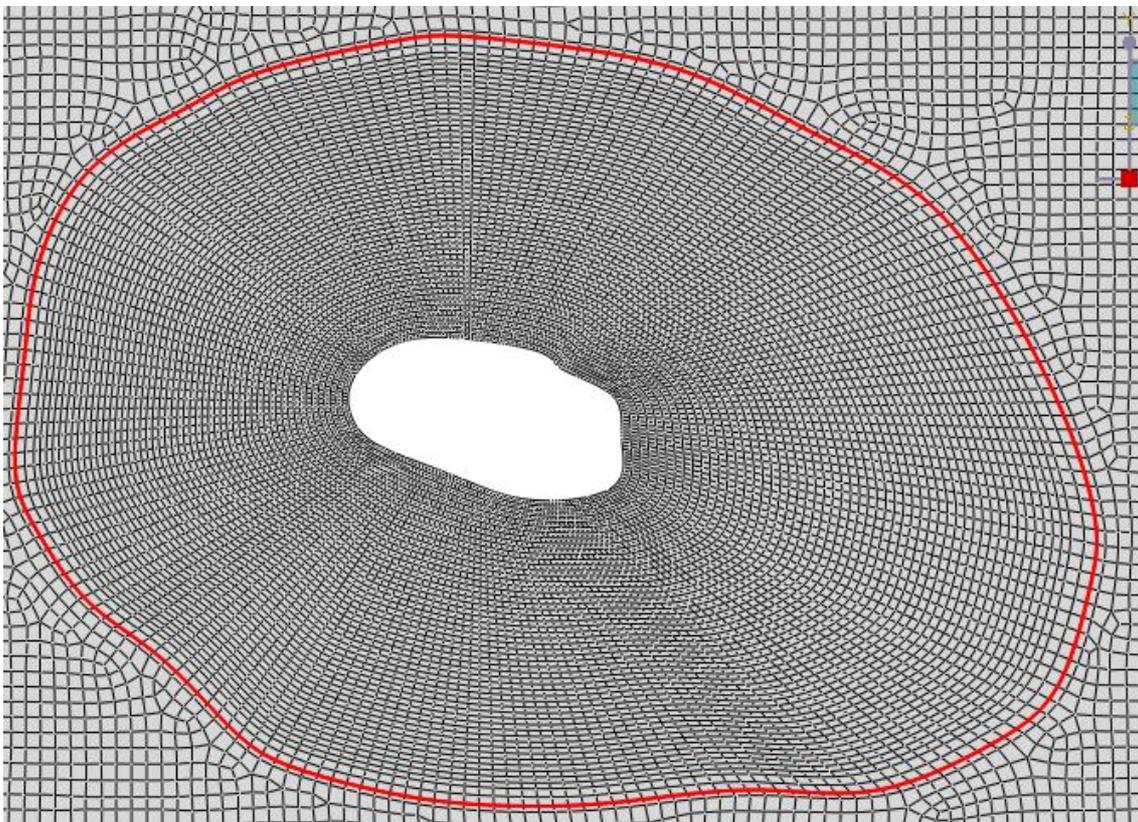


Figura 57. En color rojo se muestra los elementos cohesivos en el modelo de elementos finitos.

El espesor de la capa de cohesivos es 0. Para obtener una capa de cohesivos de espesor cero, se ha deformado la malla de forma que se ha impuesto a que los nodos 1- 4 y 2-3.

Los elementos cohesivos se han definido con una propiedad de material que permita simular la respuesta a un comportamiento basado las leyes de tracción separación.

Para ello su matriz de rigidez se ha definido de manera que la respuesta a la tracción separación sea del tipo desacoplado.

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{nn} & 0 \\ 0 & E_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix}$$

Donde las componentes de la matriz de rigidez son:

- $E_{nn}=6$ GPa
- $E_{ss}=6$ GPa

Los valores de rigidez en dirección al espesor del elemento cohesivo y a la dirección transversal se han mantenido con el mínimo definido por las capas que rodean la capa de cohesivos, la lamela gruesa y la línea cementante. En este caso la línea cementante.

Para llevar a cabo la simulación de separación entre las capas de la línea cementante y lamela, se ha definido un criterio de iniciación del daño en los puntos de los elementos cohesivos y un criterio de evolución del daño hasta que se produzca el fallo.

El criterio de iniciación de daño se ha definido mediante el criterio de máxima tensión

$$\max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0} \right\} = 1$$

Donde

- $t_n^0=43.5$ MPa
- $t_s^0=68$ MPa

El valor de la resistencia del elemento cohesivo se ha obtenido del trabajo llevado a cabo por Mischinski y Ural[29] en la simulación de grietas en lamelas mediante la inclusión de elementos cohesivos.

Los elementos cohesivos poseen un sistema de coordenadas local que define la orientación de las propiedades mecánicas del elemento.

Este sistema de coordenadas está orientado de tal forma que la componente normal o componente tracción del elemento, se define en la dirección 2 en el post proceso en Abaqus.

La componente a cortante o transversal se define en la dirección 1-2 en el post proceso de Abaqus.

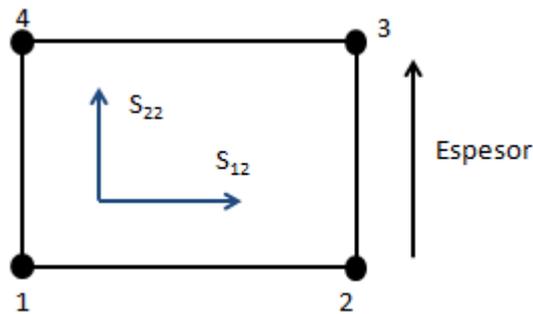


Figura 58. Dirección de los resultados de tensión en los elementos cohesivos en Abaqus.

La evolución del daño se ha definido basando en el desplazamiento efectivo que alcanza el punto del elemento en el momento de la deformación. Se ha definido un desplazamiento efectivo de 1.1, instante en el que se supone que el elemento entra en modo de fallo para el valor de daño correspondiente.

La evolución del daño se supone lineal en todo momento.



5.5. POSTPROCESO DE RESULTADOS

Antes de continuar con el post proceso, es necesario entender cuál es el objetivo de la simulación y como considerar las tensiones que se han obtenido en las lamelas.

En un principio el valor de las tensiones en las lamelas se tomarán como un valor cualitativo y no de forma cuantitativa.

El objetivo de la simulación no es obtener en detalle el comportamiento de las lamelas bajo la aplicación de una carga dada y comprobar el su límite de resistencia, dado que no se han incluido las lagunas entre capas de lamelas.

Es conocido que las lagunas son una fuente de concentración de tensiones y de iniciadores de grietas, lo cual generaría estados de tensiones mayores en el seno de la osteona.

La inclusión de las lagunas cambiaría el estado tensional de la osteona (lamelas delgada y lamela gruesa) bajo una carga dada y por consiguiente las interpretaciones de los resultados.

Por ello, aunque el valor de las tensiones en las lamelas esté por encima de los límites de resistencia el post proceso de los resultados se va a centrar en cómo afecta el comportamiento de los elementos cohesivos en el resto del modelo de la osteona.

La carga p se ha introducido linealmente en incrementos de tiempo de entre $1E-05$ y 0 hasta el valor de carga de 10 MPa en dirección Y.

El valor del incremento es el mismo necesario para garantizar la convergencia del modelo.

El número total de incrementos necesarios han sido 39 y el valor de la carga máxima hasta que el modelo ha convergido ha sido de 92.77 MPa.

Incremento	time step	Incremento	time step
1	0.1	21	0.925079
2	0.2	22	0.927304
3	0.35	23	0.927443
4	0.575	24	0.927547
5	0.63125	25	0.927652
6	0.673437	26	0.927653
7	0.705078	27	0.927655
8	0.736719	28	0.927656
9	0.768359	29	0.927657
10	0.8	30	0.927658
11	0.831641	31	0.927659
12	0.863281	32	0.92766
13	0.879102	33	0.92766
14	0.885034	34	0.927661
15	0.890967	35	0.927661
16	0.896899	36	0.927662
17	0.902832	37	0.927662
18	0.908765	38	0.927662
19	0.914697	39	0.927662
20	0.92063	-	-

Tabla 2. Numero de incremento e instante de tiempo durante la solución del análisis.

El tiempo transcurrido hasta finalizar el análisis ha sido aproximadamente de 108.7 sg.

En Figura 59 se muestra el modelo de la osteona en el instante 0. En color gris se muestra la matriz intersticial, en color verde la línea cementante, en color rojo las capas de lamela gruesa y en color azul las capas de lamela delgada.

La capa de elementos cohesivos no se muestra debido a que el espesor inicial es 0.

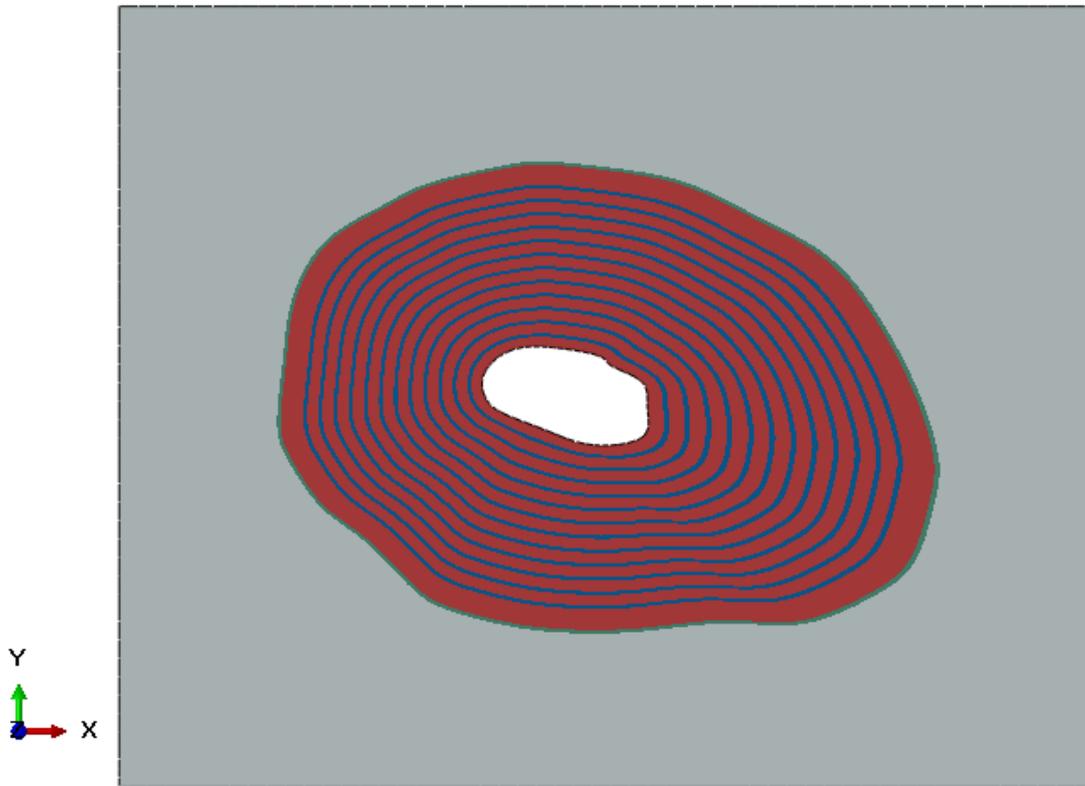


Figura 59. Modelo de elementos finitos (CZM) en el incremento 0.

En el incremento 0, como se puede ver en la Figura 60, la capa de cohesivo se encuentra cerrada. La capa de cohesivos se encuentra entre la capa verde (línea cementante) y la capa roja (lamela gruesa) y se muestra mediante una línea continua de color rojo.

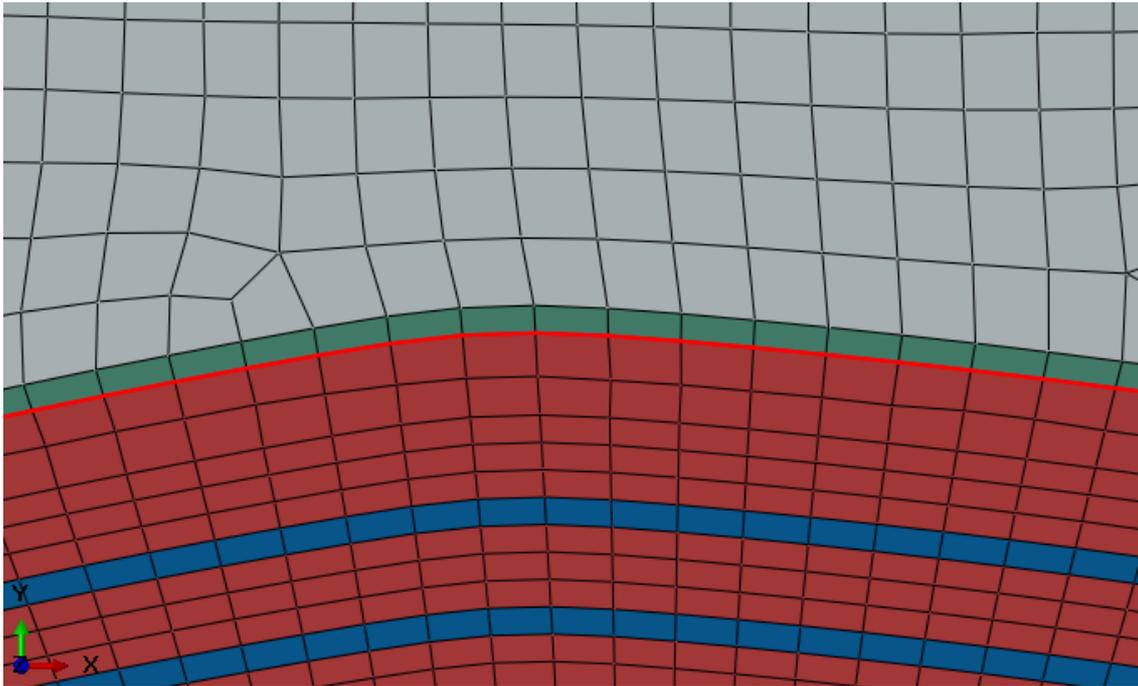


Figura 60. Estado de los elementos cohesivos (línea de color rojo) en el incremento cero.

El post proceso se va a realizar para distintas etapas del estado de carga, comenzando desde $p=0$ MPa e incrementando el valor hasta $p=100$ MPa.

En cada etapa de carga se analizarán los resultados del estado tensional de las lamelas y el estado de las variables de salida que muestran el estado de los elementos cohesivos en su respuesta al comportamiento de tracción separación. Estas variables de salida son:

- MAXCRIT: valor del criterio de iniciación de daño
- SDEG: Valor de la evolución del daño una vez alcanzado el criterio de iniciación de daño
- STATUS: El estado de los elementos cohesivos en el sentido de si se ha producido fallo o no.

La variable de salida MAXCRT contiene el valor máximo del criterio de iniciación de daño.

$$\max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0} \right\} = 1$$

Si se observa el valor de MAXCRIT en todos los incrementos de carga de la simulación, se observa que este alcanza el umbral 1 en el incremento 4 cuando el valor de la carga $p=57.5\text{MPa}$ correspondiente al instante de tiempo 0.575.

Con lo cual no hay ningún elemento cohesivo hasta éste que haya alcanzado un valor de tensión que se cumpla la condición para el inicio del daño.

Es decir, la integridad de los elementos no se ha visto modificada y que su parámetro de elasticidad no se ha modificado. Con lo cual la rigidez global del modelo de elementos finitos no ha cambiado.

Si observamos la evolución de las tensiones en las diferentes partes que compone la osteona, lamela delgada, lamela gruesa y línea cementante vemos que el comportamiento es lineal hasta el caso de caso de carga $p=57.5\text{MPa}$.

En la Tabla 3 se muestra el valor de la tensión circunferencial para la lamela delgada, lamela gruesa y línea cementante entre los instantes de tiempo 0.1 y 0.575

	Caso de carga	
	$p=10\text{ MPa}$	$p=57.5\text{ MPa}$
Lamela delgada	39.3 MPa	228.6 MPa
Lamela gruesa	28.3 MPa	164.6 MPa
Línea cementante	4.6 MPa	26.65 MPa

Tabla 3. Resultado de la tensión circunferencial máxima en la lamela delgada, lamela gruesa y línea cementante para $p=10\text{ MPa}$ y $p=57.5\text{ MPa}$.

En las Figura 61 a Figura 64 se muestran los valores de la tensión circunferencial para la lamela delgada, lamela gruesa y línea cementante entre los instantes de tiempo 0.1 y 0.575.

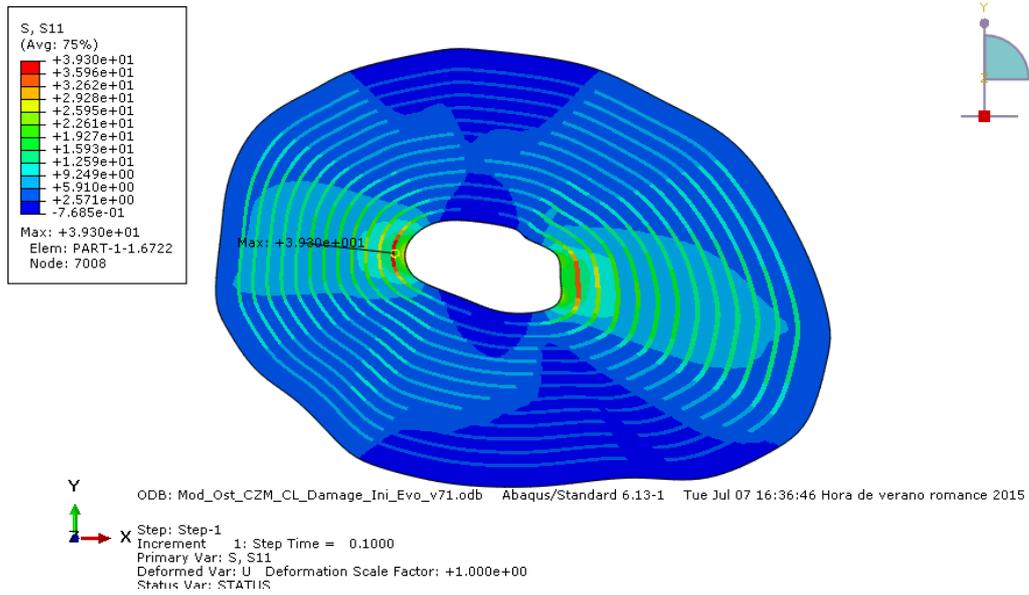


Figura 61. Resultado del análisis en el campo de tensión circunferencial en las lamelas. Resultado en el sistema de coordenadas local en dirección (1) del elemento de las lamelas en el incremento 1.



Figura 62. Resultado del análisis en el campo de tensión circunferencial en la línea cementante. Resultado en el sistema de coordenadas local en dirección (1) del elemento de la línea cementante en el incremento 1.

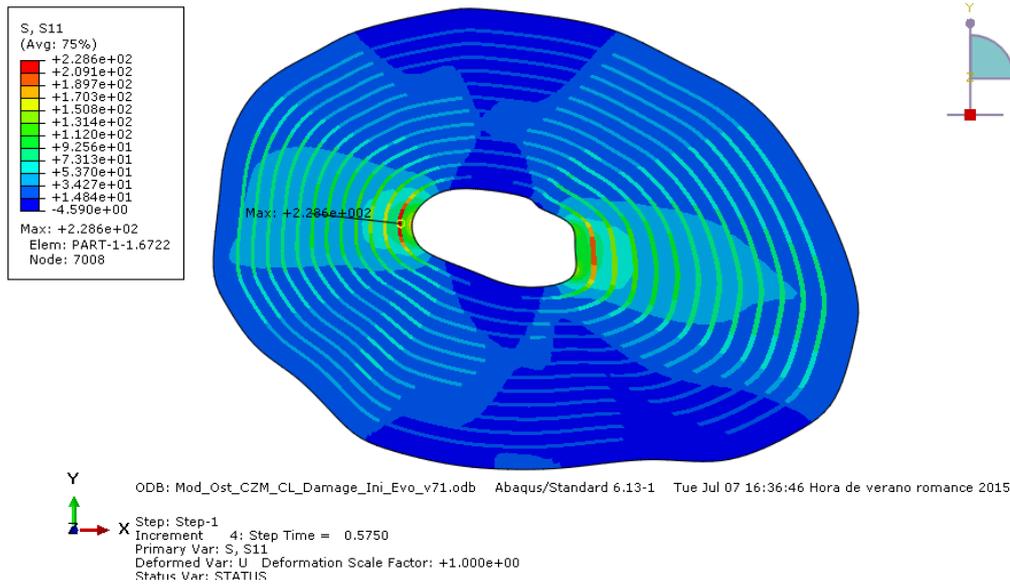


Figura 63. Resultado del análisis en el campo de tensión circunferencial en las lamelas. Resultado en el sistema de coordenadas local en dirección (1) del elemento de las lamelas en el incremento 4.



Figura 64. Resultado del análisis en el campo de tensión circunferencial en la línea cementante. Resultado en el sistema de coordenadas local en dirección (1) del elemento de la línea cementante en el incremento 4.

El valor de la tensión circunferencial para el valor de carga $p=10\text{MPa}$ en el caso de modelo estándar fue de 50.59 MPa. Esta diferencia para el mismo estado de carga es debido a la menor rigidez global que ha introducido los elementos cohesivos en el modelo.

En la Tabla 4 se muestra el valor de la tensión radial para la lamela delgada, lamela gruesa y línea cementante entre los instantes de tiempo 0.1 y 0.575

	Caso de carga	
	$p=10\text{ MPa}$	$p=57.5\text{ MPa}$
Lamela delgada	11.48 MPa	63.01 MPa
Lamela gruesa	11.65 MPa	64.18 MPa
Línea cementante	9.21 MPa	43.8 MPa

Tabla 4. Resultado de la tensión radial máxima en la lamela delgada, lamela gruesa y línea cementante para $p=10\text{ MPa}$ y $p=57.5\text{ MPa}$.

En las Figura 65 a Figura 68 se muestran los valores de la tensión circunferencial para la lamela delgada, lamela gruesa y línea cementante entre los instantes de tiempo 0.1 y 0.575

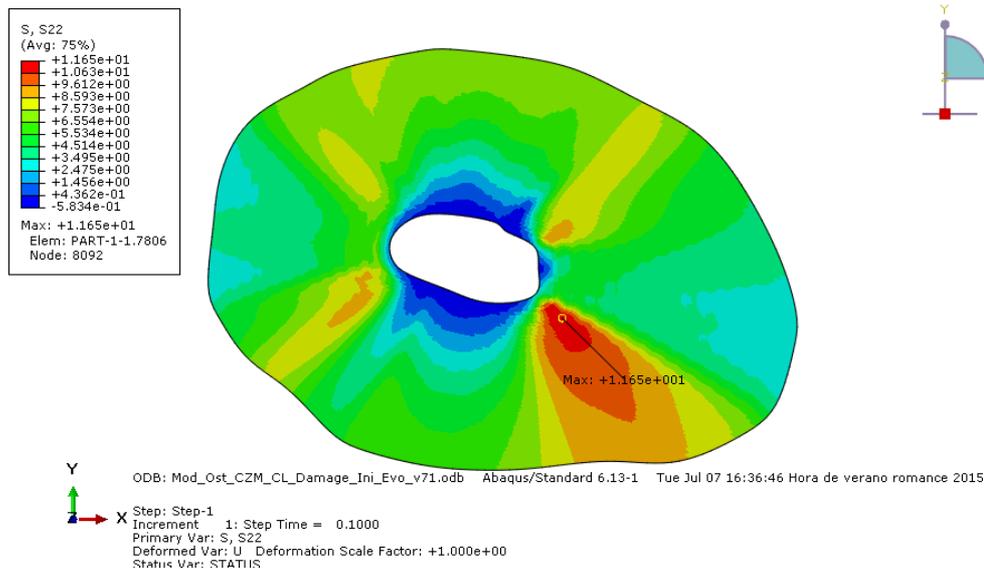


Figura 65. Resultado del análisis en el campo de tensión radial en las lamelas. Resultado en el sistema de coordenadas local en dirección (2) del elemento de las lamelas en el incremento 1.

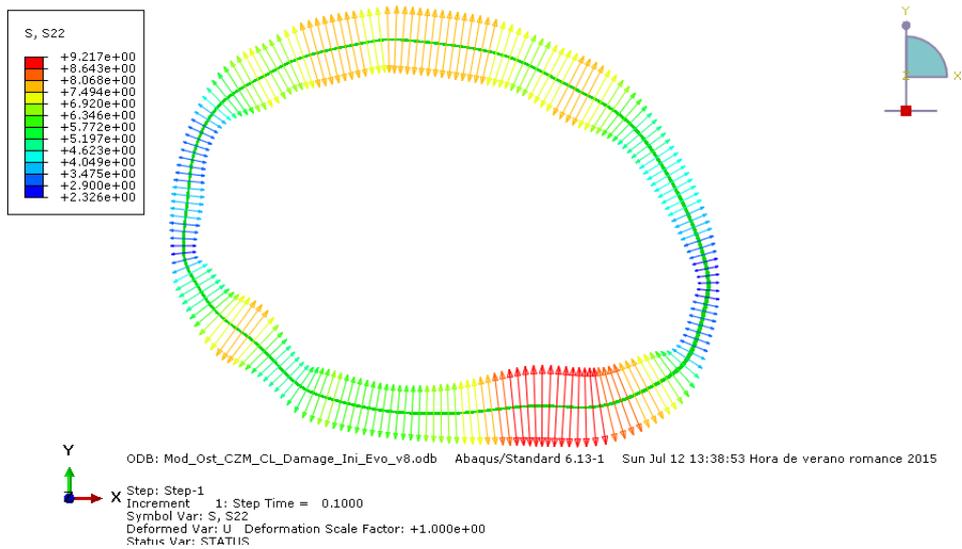


Figura 66. Resultado del análisis en el campo de tensión radial en la línea cementante. Resultado en el sistema de coordenadas local en dirección (2) del elemento de la línea cementante en el incremento 1.

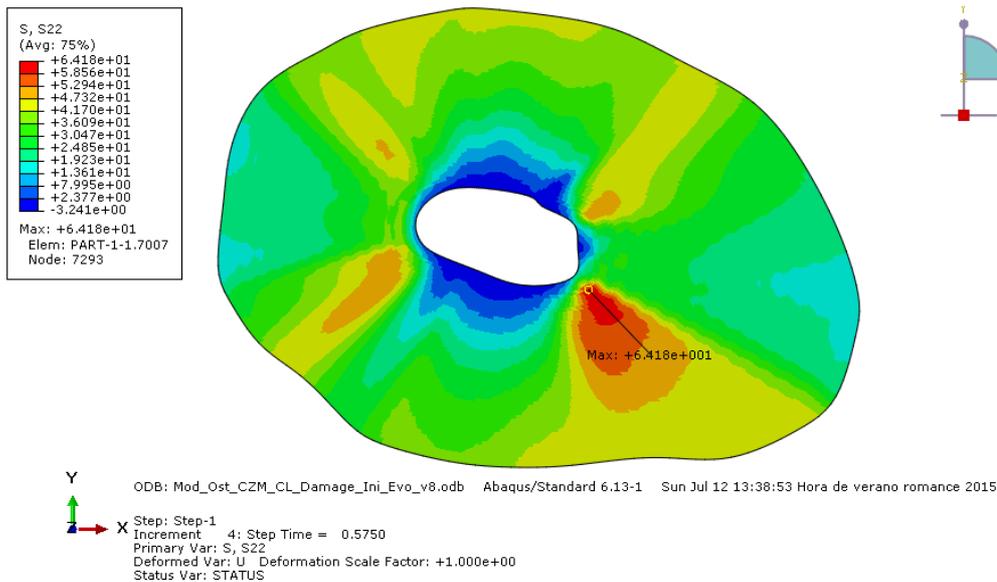


Figura 67. Resultado del análisis en el campo de tensión radial en las lamelas. Resultado en el sistema de coordenadas local en dirección (2) del elemento de las lamelas en el incremento 4.

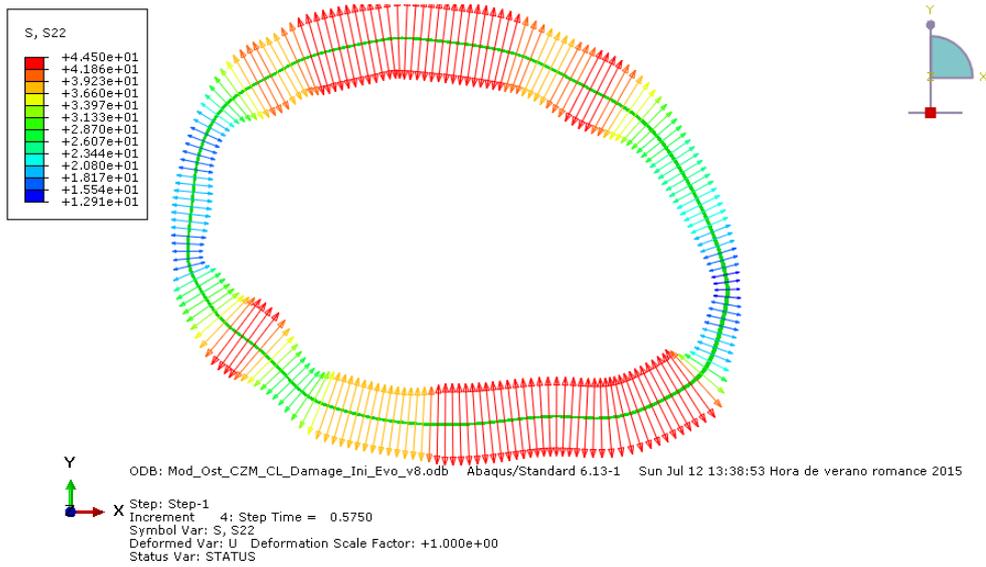


Figura 68. Resultado del análisis en el campo de tensión radial en la línea cementante. Resultado en el sistema de coordenadas local en dirección (2) del elemento de la línea cementante en el incremento 4.

En la Tabla 5 se muestra el valor de la tensión de cortadura para la lamela delgada, lamela gruesa y línea cementante entre los instantes de tiempo 0.1 y 0.575

	Caso de carga	
	$p=10$ MPa	$p=57.5$ MPa
Lamela delgada	6.47 MPa	37.5MPa
Lamela gruesa	6.52 MPa	37.2 MPa
Línea cementante	3.41 MPa	19.97 MPa

Tabla 5. Resultado de la tensión de cortadura máxima en la lamela delgada, lamela gruesa y línea cementante para $p=10$ MPa y $p=57.5$ MPa.

En las Figura 69 a Figura 72 se muestran los valores de la tensión de cortadura para la lamela delgada, lamela gruesa y línea cementante entre los instantes de tiempo 0.1 y 0.575

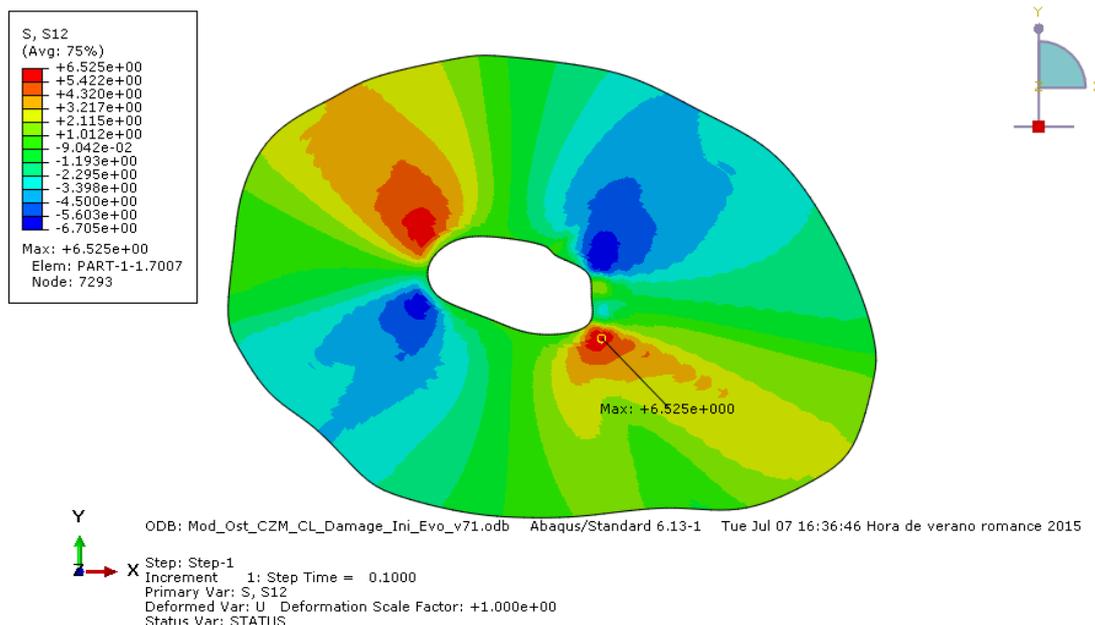


Figura 69. Resultado del análisis en el campo de tensiones a cortadura en las lamelas. Resultado en el sistema de coordenadas local en dirección (1-2) del elemento de las lamelas en el incremento 1.

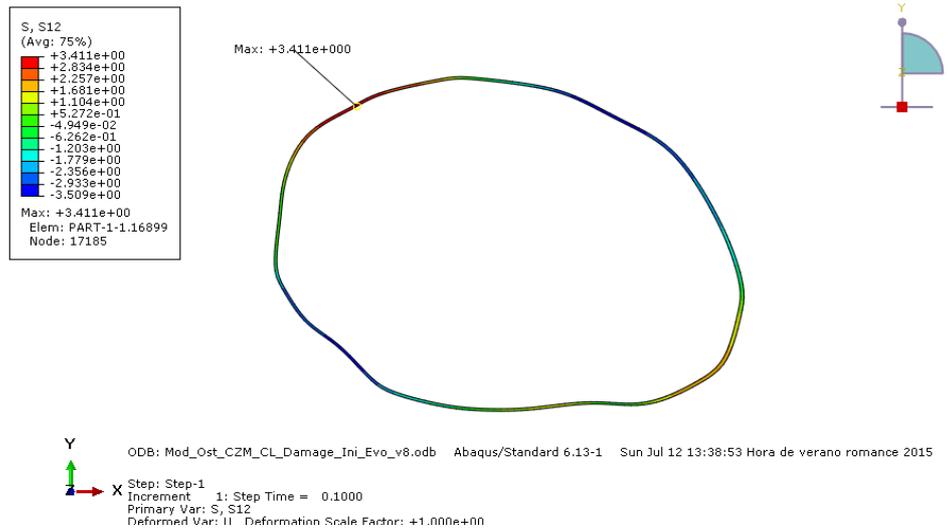


Figura 70. Resultado del análisis en el campo de tensiones a cortadura en la línea cementante. Resultado en el sistema de coordenadas local en dirección (1-2) del elemento de las lamelas en el incremento 1.

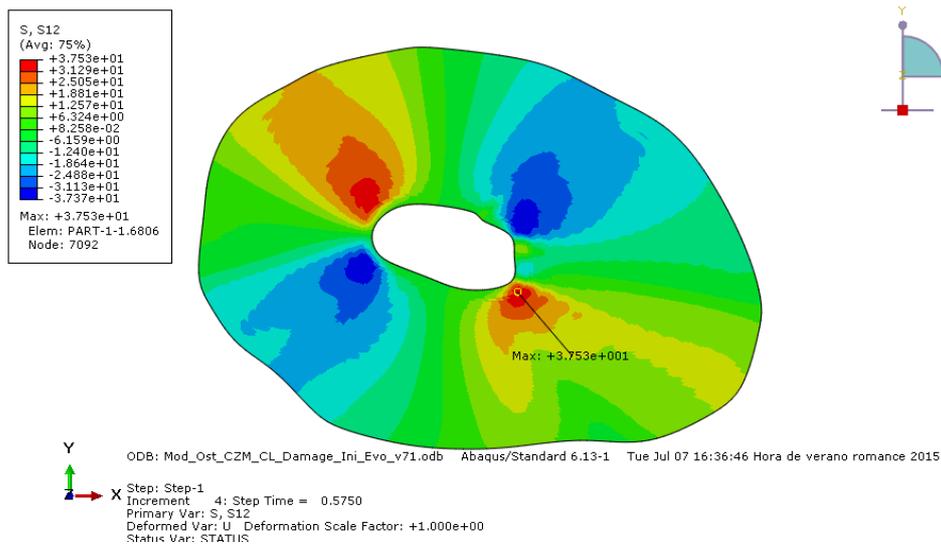


Figura 71. Resultado del análisis en el campo de tensiones a cortadura en las lamelas. Resultado en el sistema de coordenadas local en dirección (1-2) del elemento de las lamelas en el incremento 4.

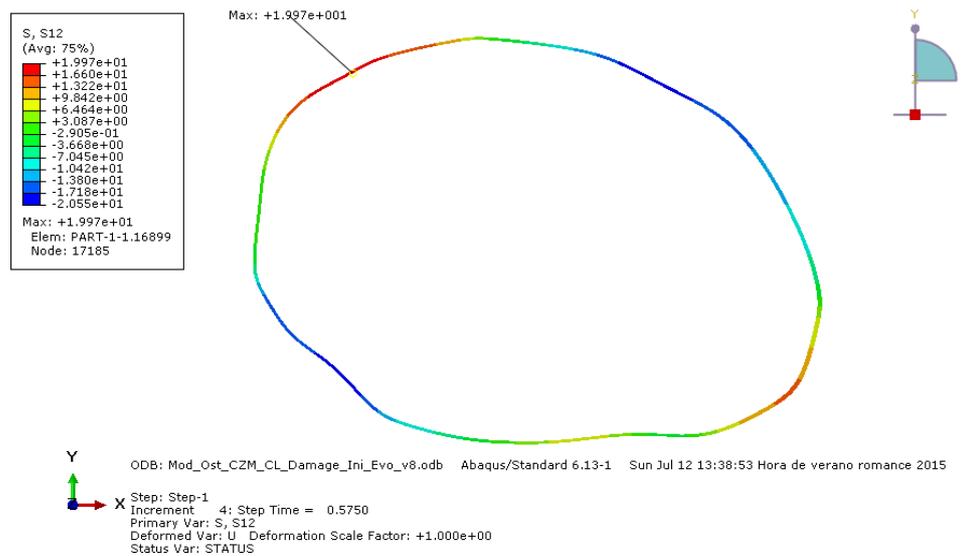


Figura 72. Resultado del análisis en el campo de tensiones a cortadura en la línea cementante. Resultado en el sistema de coordenadas local en dirección (1-2) del elemento de las lamelas en el incremento 4.

Como se ha comentado las lamelas y la línea cementante están siguiendo un comportamiento elástico lineal que relaciona el estado de las tensiones corresponde a su estado de deformación.

Esto se debe a la definición de sus propiedades de materiales y porque el camino de carga no ha sufrido variaciones. Es decir la rigidez global del modelo no ha variado a lo largo del tiempo.

Este efecto se espera que cambie a partir del instante de carga $p=57.5$ MPa, ya que los elementos cohesivos han entrado en un estado que es gobernado por la evolución de daño, lo que hace que se disminuye la rigidez de los elementos afectados por este comportamiento.

Como se puede observar en la Figura 73, el valor que contrala el parámetro de iniciación de daño MAXCRT, alcanza el valor de 1.0 en el instante de tiempo de 0.575, $p=57.5\text{MPa}$ (incremento 4).

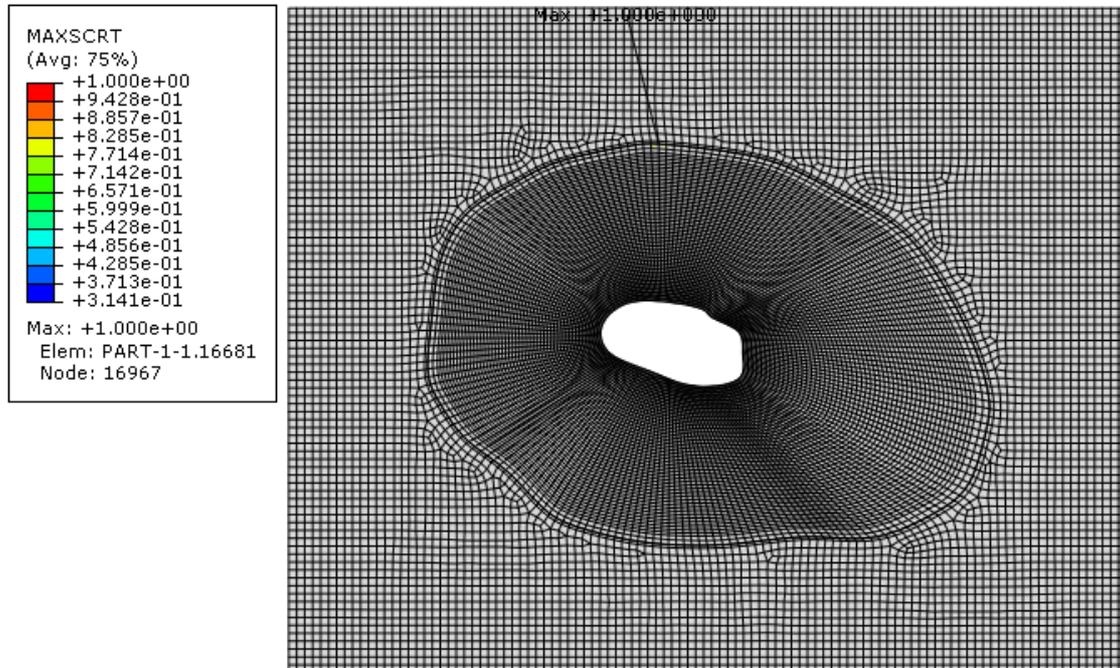


Figura 73. Valor del daño en el elemento cohesivo para la iniciación del daño en el incremento 4.

Es en este momento cuando el valor de MAXCRT alcanza el umbral definido por el criterio de iniciación de daño. Estos elementos están en una zona donde la capa de elementos cohesivos es perpendicular a la línea de aplicación de carga (dirección Y).

Estos elementos cohesivos están sometidos a un estado de carga donde predomina la componente a tracción. Es decir la componente normal o en la dirección del espesor constitutivo del elemento. Tal como se ha visto la resistencia en dirección normal del elemento o en dirección de la definición del espesor es menor que en la dirección transversal.

En la Figura 74 se muestra como la capa de elementos cohesivos (color rojo) ha comenzado deformarse en dirección al espesor del elemento. Es decir la interfase entre la línea cementante y la lamela gruesa ha comenzado a separarse.

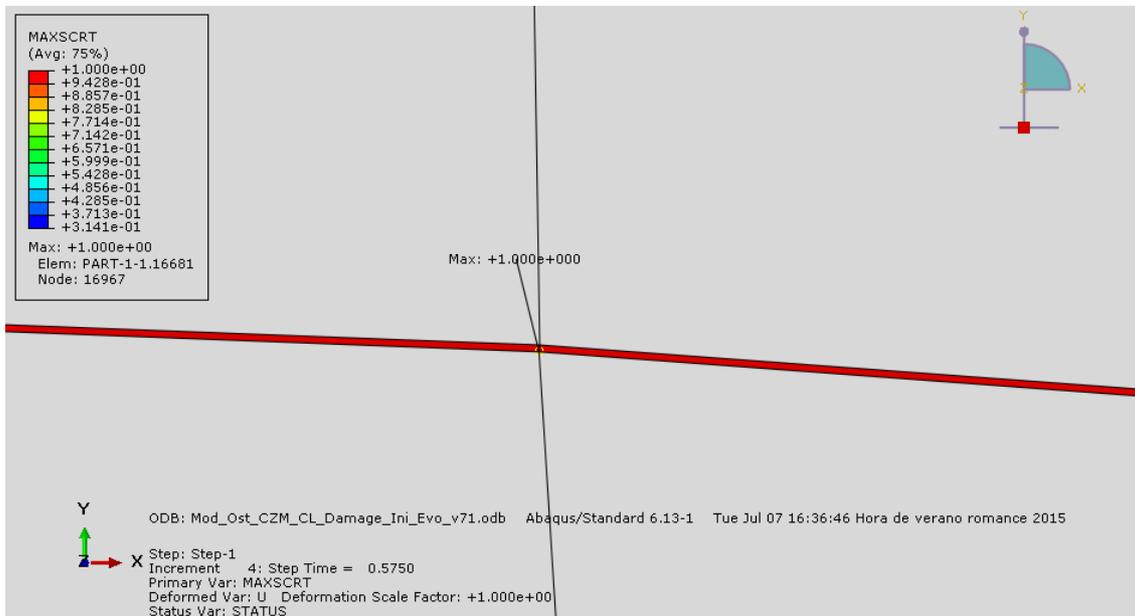


Figura 74. Deformación del elemento cohesivo y el valor del umbral para la iniciación del daño en el incremento 4.

En la Figura 75 se muestra el valor máximo de la tensión en dirección 2 (dirección del espesor) del elemento cohesivo. Este valor es de 43.5 MPa. Lo cual era de esperar ya que el límite de resistencia del elemento en esa dirección es de 43.5 MPa y en este instante se cumple la condición del criterio de máxima tensión:

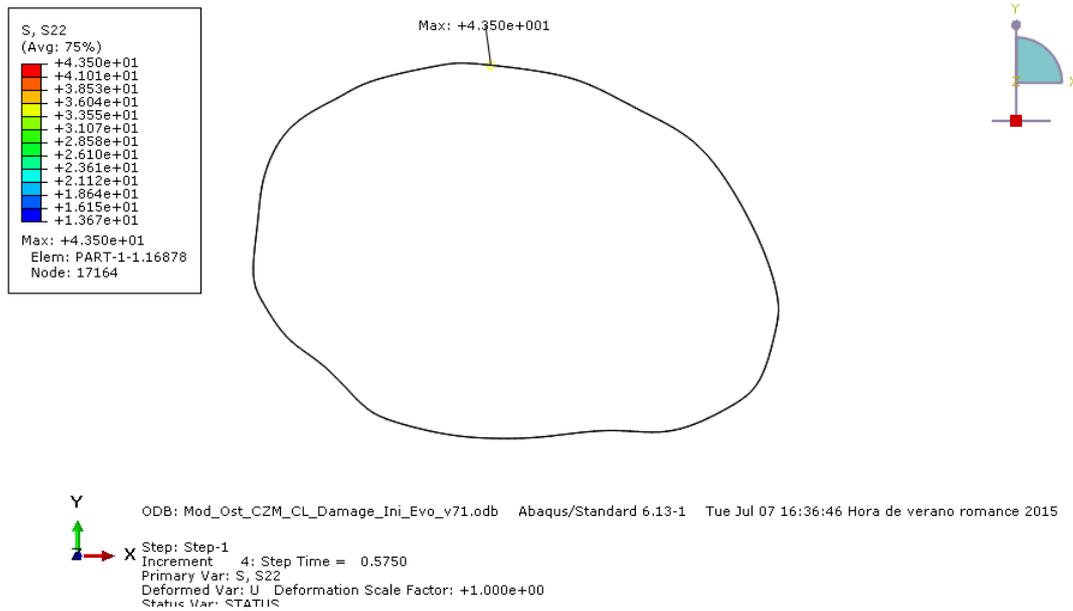


Figura 75. Tensión de tracción en el elemento cohesivo para el incremento 4.

Con respecto a la tensión cortante en los elementos cohesivos para el instante de tiempo 0.575 es de 20.01 MPa, como se muestra en la Figura 76. El límite de resistencia a cortadura se ha definido en 68 MPa. En este caso no se alcanza la condición del criterio de iniciación de daño ya que este valor se es de 0.29.

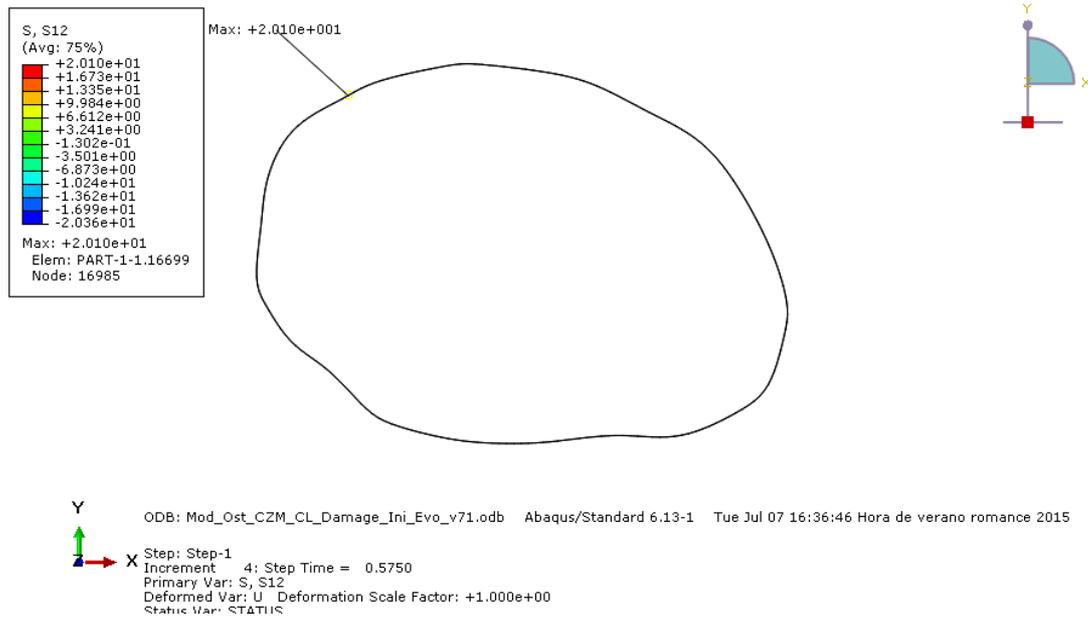


Figura 76. Tensión de cortadura en el elemento cohesivo para el incremento 4.

Una vez se ha alcanzado el criterio de iniciación del daño en los elementos cohesivos, estos elementos seguirán la ley de evolución de daño basado en el desplazamiento efectivo. Con lo cual la rigidez del elemento irá disminuyendo siguiendo el modelo descrito.

Como se ha visto el cumplimiento de la condición $MAXCRIT = 1$ se ha dado en una serie de elementos en el instante de tiempo 0.575. El resto de elementos el valor del $MAXCRIT$ no alcanza el valor 1. Sin embargo cabe esperar que a medida que se incrementa la carga, estos elementos alcancen el valor de iniciación de daño y continúen su deformación bajo la ley de evolución de daño.

El máximo valor que alcanza la variable escalar que define el daño D , es de 0.824 para el instante de tiempo 0.575 como muestra la Figura 77.

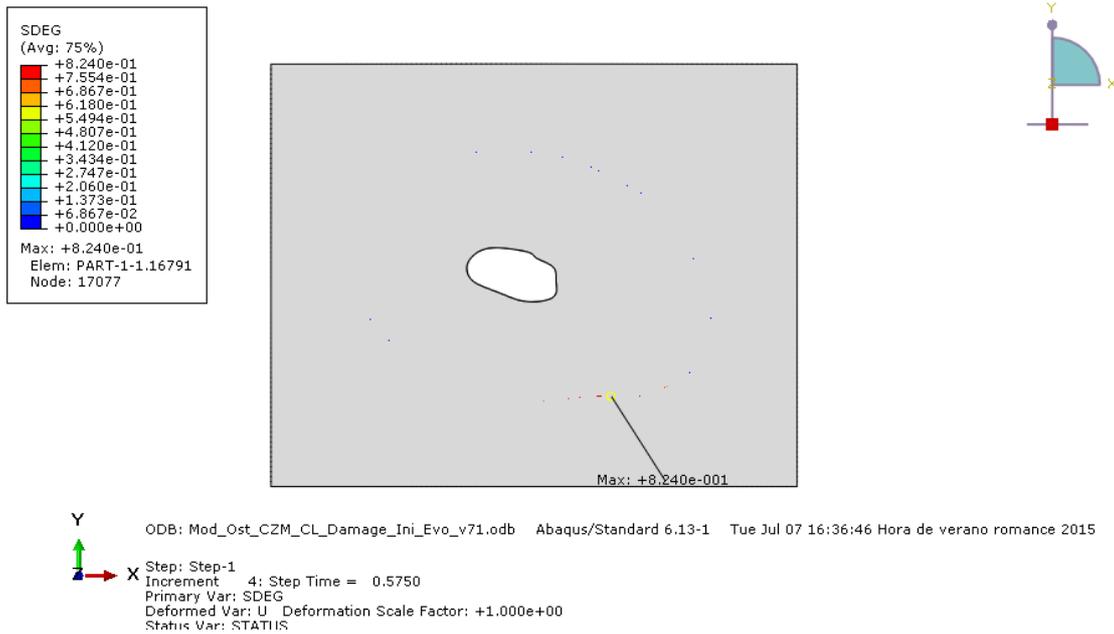


Figura 77. Valor del daño en el elemento cohesivo para el incremento 4.

En el incremento 18, caso de carga $p=90.88$ MPa, los elementos cohesivos que han seguido una la evolución de daño basado en el desplazamiento efectivo, han ido incrementando su valor del daño D progresivamente. En este instante de carga la variable D alcanza su máximo valor 1 como muestra la Figura 78.

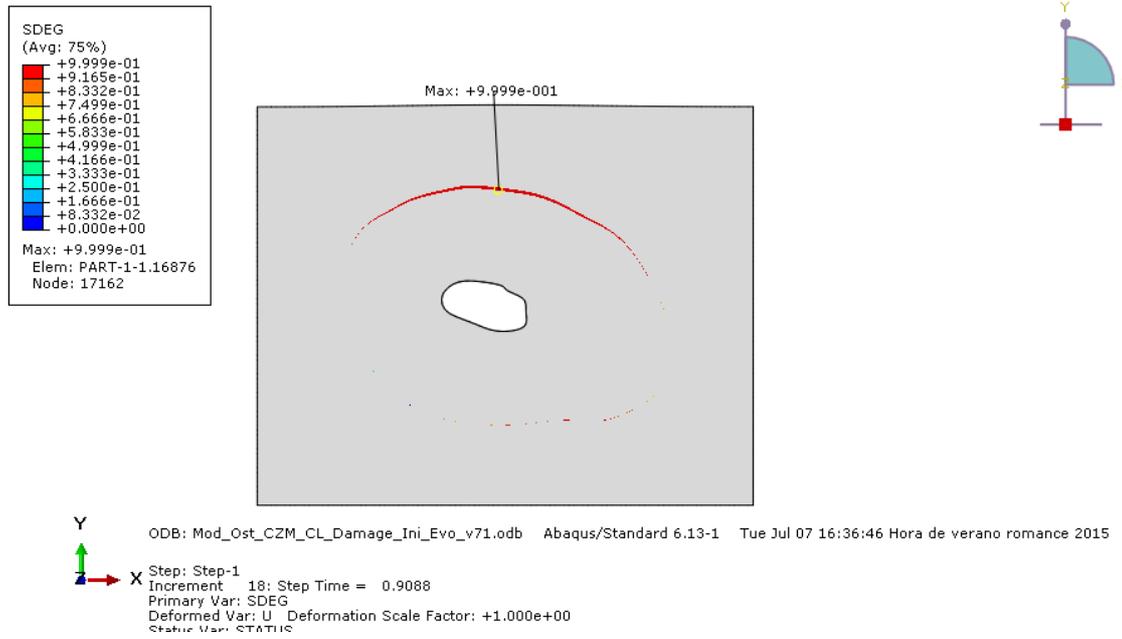


Figura 78. Máximo valor del daño en el elemento cohesivo para el incremento 18.

Con lo cual, el desplazamiento efectivo en estén instante de carga casi habrá alcanzado el umbral 1.1 como muestra la Figura 79.

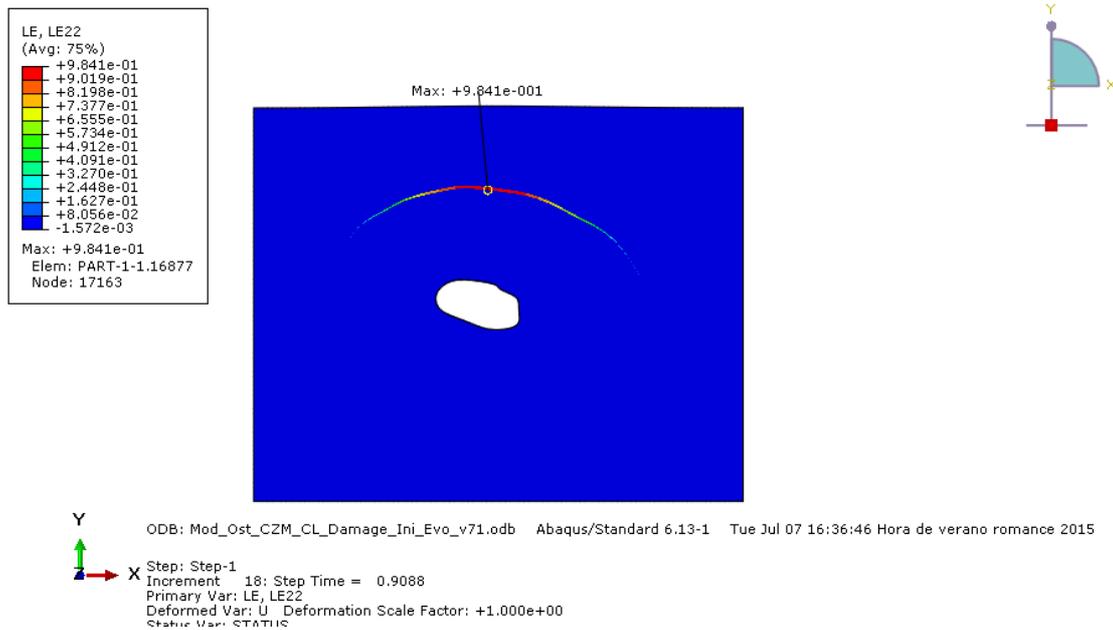


Figura 79. Desplazamiento en dirección de la tensión de tracción del elemento cohesivo para el incremento 18.

A partir del caso de carga $p=90.88$ MPa, todos los elementos cohesivos que sigan la ley de evolución del daño, una vez alcancen el umbral del desplazamiento efectivo entrarán en modo fallo y estos elementos serán eliminados del modelo. En la Figura 80 se muestra el comienzo de eliminación de estos elementos.

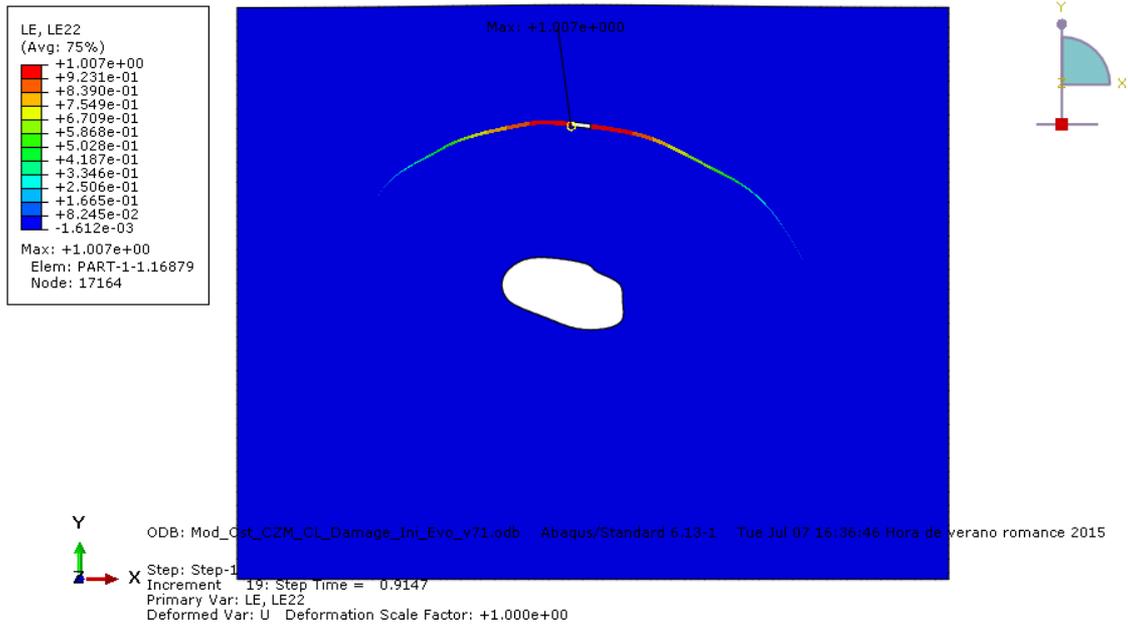
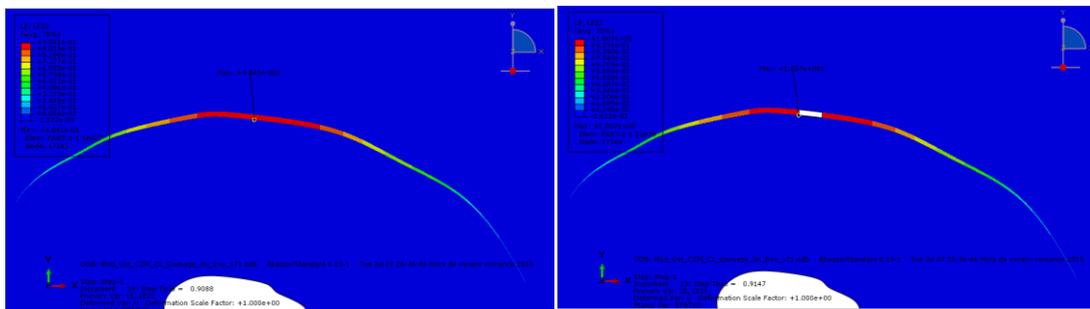


Figura 80. Desplazamiento en dirección de la tensión de tracción del elemento cohesivo para el incremento 19.

En la siguientes figuras se muestra el proceso de eliminación de elementos una vez se ha alcanzado el umbral de desplazamiento efectivo.



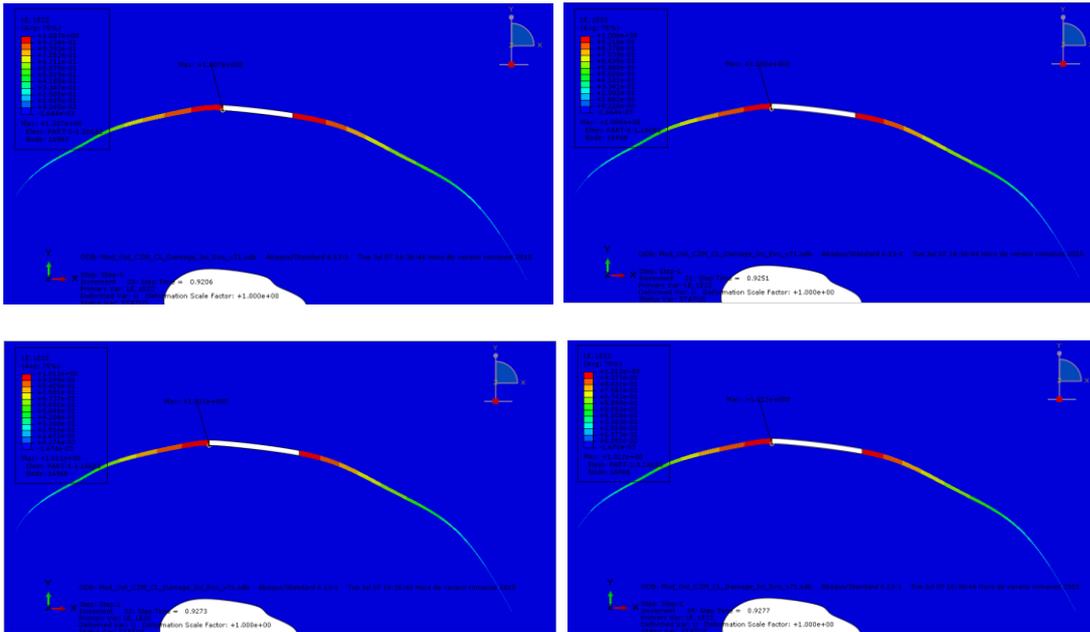


Figura 81. Eliminación de elementos cohesivos una vez han alcanzado el criterio del desplazamiento efectivo.

Este modelo ha convergido hasta un incremento de carga donde $p=92.77$ MPa, incremento 39

Como se ha comentado, el valor de la tensión en las lamelas se ha incrementado de forma lineal hasta el valor de carga de $p=57.5$ MPa (incremento 4). Además, el valor de la tensión ha ido incrementándose hasta el instante de carga $p=63.13$ MPa (incremento 5).

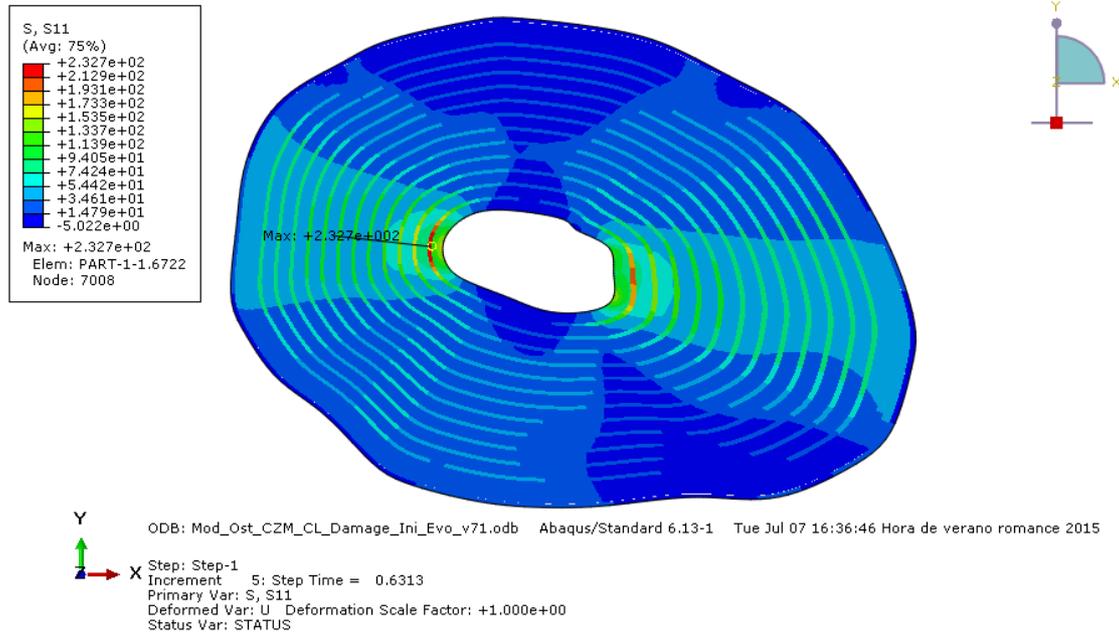


Figura 82. Resultado del análisis en el campo de tensión circunferencial en las lamelas. Resultado en el sistema de coordenadas local en dirección (1) del elemento de las lamelas en el incremento 5.

En este momento hay un cambio en el estado tensional de las lamelas, no muestran un comportamiento lineal a un incremento de carga. A partir de este valor de carga la tensión circunferencial y radial en las lamelas ha disminuido hasta alcanzar su valor mínimo en el instante de carga $p=92.77$ MPa (incremento 39)

A medida que la deformación de los elementos cohesivos aumenta, su rigidez disminuye. Como se ha comentado, la rigidez de los elementos cohesivos disminuye en proporción al valor de D , que varía según la ley de evolución del daño.

Por otro lado, se aprecia como el pico de tensión circunferencial y radial máximas en las lamelas, que se da en una zona que es más o menos constante, varía de posición. A medida que se incrementa la separación entre



la lamela y la línea cementante el pico de tensión máxima varía desde las lamelas que se encuentran cerca del canal de Havers hacia la última capa de lamelas en contacto con la línea cementante.

La tensión de cortadura no ha disminuido su valor, al contrario a incrementa el valor a medida que se incrementaba el valor de carga p .

Sin embargo, la matriz intersticial ha incrementado el valor de la tensión de forma progresiva, desde el primer valor de carga $p=10\text{MPa}$ hasta el último valor de carga $p=92.77$ (incremento 39).

Una explicación a este fenómeno puede ser debido a que los elementos cohesivos han variado la rigidez global del modelo, con lo cual el camino de carga ha cambiado.

Cuando comienza el proceso de separación entre las capas de lamela y línea cementante, la rigidez de los elementos cohesivos empieza a degradarse por el daño que se produce en esta interface.

La osteona se desacopla del resto del modelo. Esto hace que las lamelas no puedan soportar más carga y esta carga se deriva a través de la matriz intersticial.

En el Anexo de la memoria se ilustra el estado tensional de la osteona, línea cementante y matriz intersticial para incrementos de carga entre $p=0\text{ MPa}$ y $p=92.77\text{ MPa}$.

6. VALORACIÓN DE VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA INCLUSIÓN DE CZM EN COMPARACIÓN CON EF STANDARD

A continuación se describen las ventajas e inconvenientes en el uso y no uso de los elementos cohesivos en la simulación de osteonas.

Con respecto a no usar elementos cohesivos se pueden detallar las siguientes ventajas:

- Menor coste computacional ya que es un análisis lineal.
- No hay problemas de convergencia
- Permite definir donde se va a dar el fallo mediante el uso de criterios de fallo por tensión o deformación.
- Modelado de mediante materiales compuestos y propiedades anisotrópicas

Desventajas de no usar elementos cohesivos:

- No permite la propagación del daño una vez alcanzado un umbral de daño y la propagación de este hasta alcanzar el daño.
- No tiene en cuenta la influencia de la regeneración de daño y propagación de grietas y el impacto en otras zonas del modelo. No permite reproducir el cambio del camino de carga en el modelo.

Ventajas de usar elementos cohesivos:

- Permite generar modelos donde reproducir el daño basado en la propia deformación de los elementos sin necesidad de tener que cambiar las propiedades de material para reducir la rigidez.
- Permite la propagación del daño una vez alcanzado un umbral de daño y la propagación de este hasta alcanzar el daño.
- Tiene en cuenta la influencia de la regeneración de daño y propagación de grietas y el impacto en otras zonas del modelo. permite reproducir el cambio del camino de carga en el modelo.
- Permite estudiar problemas de delaminación entre interfaces como es la delaminación intralamelar, interlamelar y la desadhesión de osteonas y cement line.

Desventajas de usar elementos cohesivos:



- La simulación de generación de grietas o procesos de delaminación entre interfaces se reduce a la definición previa de la enterase. No permite la deflexión de la grieta a otras zonas, a no ser que se utilicen otros planteamientos como los basados en la combinación de los modelos de zona cohesiva con el método extendido de los elementos finitos (XFEM).
- Problemas de convergencia.



7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTURO

Se ha generado un modelo de elementos finitos de una osteona completa extraída de una imagen obtenida por microscopio electrónico a partir de un hueso de oveja. La osteona se compone de las lamelas delgada y gruesa, línea cementante y matriz intersticial.

El procedimiento de generación de osteonas ha permitido crear osteonas y simular osteonas o un conjunto de osteonas a partir de una imagen real, lo que ha permitido reproducir el contorno real de las osteonas con sus particulares formas geométricas, lo cual permite acercarse más al problema real.

Dada la configuración de las lamelas y de la definición de las propiedades de material, es necesario crear modelos de elementos finitos con una numeración de nodos y elementos tal, que permita definir las propiedades de material de forma orientada basado en sistemas de coordenadas locales en los elementos.

Este procedimiento permite crear osteonas y aplicar propiedades de material orientadas más allá de osteonas con formas circunferenciales de forma simplificada.

Además, la inclusión de elementos cohesivos ha permitido generar un modelo de una osteona mediante elementos finitos y simular el proceso de separación de la osteona de la línea cementante bajo un estado de carga contenido en el plano x-y.

A partir de las dos simulaciones, estándar y modelo con elementos cohesivos (CZM) se ha podido comparar el resultado de:

- Un análisis estándar basado en comportamientos elásticos lineales donde la simulación de fallo se realiza por definición de fallo por tensión o deformación.
- Un análisis basado en un comportamiento no lineal que permite reproducir procesos de delaminación entre superficies mediante la pérdida de la rigidez de material.

El modelo de elementos cohesivos resulta interesante en la simulación de procesos de delaminación intralaminar e interlaminar, pero también para la simulación de iniciadores de grietas y la propagación de grietas.

Sin embargo la simulación se reduce a la interface de zona cohesiva simulada por el usuario, y no permite la deflexión de la grietas a otras zonas por donde el frente de grieta pudiera avanzar (a no ser que se utilice en combinación con el método XFEM).

Como trabajos futuros en el campo de la inclusión de elementos cohesivos en modelos de elementos finitos de osteonas un siguiente paso sería la inclusión de las lagunas entre lamelas para obtener unos modelos más realistas aun.

Por otro lado se puede llevar a cabo también el mallado de las lamelas circunferenciales contenidas en la matriz intersticial y la definición de las propiedades de material orientadas de estas.

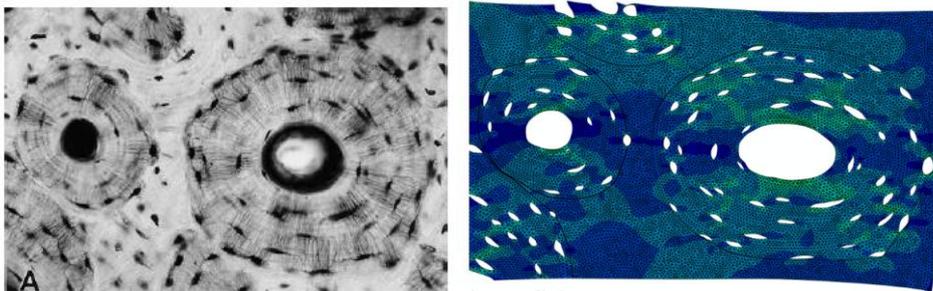


Figura 83. Modelado de hueso cortical mediante elementos finitos con lagunas

También se ha trabajado con modelos de elementos finitos desde un punto más macroscópico que contienen más de una osteona y las interfaces entre las distintas partes que componen el hueso cortical.

Por eso sería interesante estudiar la influencia de más osteonas dentro de la estructura de hueso cortical utilizando las técnicas de modelado descritas en este trabajo.

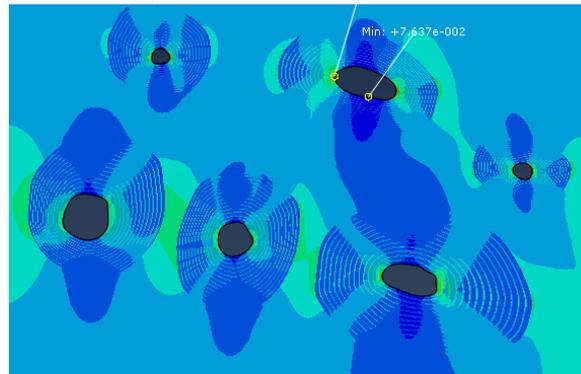


Figura 84 Modelado de de hueso cortical mediante elementos finitos con más de una osteona.

Un trabajo paralelo al cálculo estructural en osteonas por EF sería llevar a cabo ensayos en laboratorio para caracterizar en detalles el proceso de separación de lamelas y de generación y propagación de grietas que permita simular con más detalles estos procesos mediante los elementos finitos y la definición de estos últimos.





8. BIBLIOGRAFIA

- Ref 1 Cowin SC, ed. *Bone Mechanics Handbook*. CRC Press. Boca Ratón, Florida, 2001.
- Ref 2 Mechanical properties and the hierarchical structure of bone Jae-Young Rho , Liisa Kuhn-Spearing , Peter Zioupos
- Ref 3 Reilly DT, Burstein AH, Frankel VH. The elastic modulus of bone. *J Biomech* 1974;7:271–5.
- Ref 4 Choi K, Kuhn JL, Ciarelli MJ, Goldstein SA. The elastic moduli of human subchondral trabecular, and cortical bone tissue and the size-dependency of cortical bone modulus. *J Biomech* 1990;23:1103–13.
- Ref 5 Bundy KJ. Composite material models for bone. In: Cowin SC, editor. *Bone mechanics*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1989:197–210.
- Ref 6 Juist J. In vivo determination of the elastic response of bone 2. Ulnar resonant frequency in osteoporotic, diabetic and normal subjects. *Phys Med Biol* 1970;15:427–34.
- Ref 7 Christensen A, Ammitzboll F, Dyrbye C, Corniessen M, Corniessen P, Van Der Perre G. Assessment of tibial stiffness by vibration testing in situ: I. Identification of mode shapes in different supporting conditions. *J Biomech* 1986;19:53–60.
- Ref 8 Rho JY, Hobatho MC, Ashman RB. Relations of density and CT numbers to mechanical properties for human cortical and cancellous bone. *Med Eng Phys* 1995;17:347–55.
- Ref 9 Goldstein S. The mechanical properties of trabecular bone: dependence on anatomic location and function. *J Biomech* 1987;20:1055–61.
- Ref 10 Rho JY. Mechanical properties of human cortical and cancellous bone. PhD Dissertation, The University of Texas Southwestern Medical Center at Dallas, Dallas, TX, 1991.
- Ref 11 Ascenzi A, Bonucci E. The tensile properties of single osteons. *Anat Rec* 1967;158:375–86.
- Ref 12 Ascenzi A, Bonucci E. The compressive properties of single osteons. *Anat Rec* 1968;161:377–92
- Ref 13 Ascenzi A, Baschieri P, Benvenuti A. The bending properties of single osteons. *J Biomech* 1990;23:763–71



- Ref 14 Ascenzi A, Baschieri P, Benvenuti A. The torsional properties of single selected osteons. *J Biomech* 1994;27:875–84.
- Ref 15 Lakes R. On the torsional properties of single osteons [letter]. *J Biomech* 1995;28:1409–10.
- Ref 16 Katz LJ. Mechanical properties of bone. *ASME* 1981; AMD vol 45:171–184.
- Ref 17 Marotti G. A new theory of bone lamellation. *Calcif Tissue Int* 1993;53(suppl 1):S47–56.
- Ref 18 Reisinger AG, Pahr DH, Zysset PK. Sensitivity analysis and parametric study of elastic properties of an unidirectional mineralized bone fibril array using mean field methods. *Biomech. Mod. Mechanobiol.*, 10:67–77, 2011.
- Ref 19 Weiner S, Traub W, Wagner HD. Lamellar Bone: Structure-Function Relations. *J. Struct. Biology*, 126:241–255, 1999.
- Ref 20 Vercher A, Giner E, Arango C, Tarancón JE, Fuenmayor FJ. Homogenized stiffness matrices for mineralized collagen fibrils and lamellar bone using unit cell finite element models with periodic boundary conditions. *Biomech. Mod. Mechanobiol.*, DOI 10.1007/s10237-013-0507-y, 2013.
- Ref 21 Numerical modelling of the mechanical behaviour of an osteon with micro cracks Eugenio Giner, Camila Arango, Ana Vercher, F. Javier Fuenmayor
- Ref 22 Micromechanics modeling of haversian cortical bone properties H.A. Hogan
- Ref 23 Evans, F. G. and Vincentelli, R. (1974) Relations of the compressive properties of human cortical bone to histological structure and calcification. *J. Biomechanics* 7, 1-10.
- Ref 24 Dorlot, J.-M., L'Esperance, G. and Meunier, A. (1986) Characterization of single osteons: microhardness and mineral content. *Trans. 32nd orthop. Res. Soc.* 11, 330.
- Ref 25 P.J. Prendergast R. Huiskes Microdamage and Osteocyte- Lacuna Strain in Bone: A Microstructural Finite Element Analysis
- Ref 26 Burr, D. B., Schaffler, M. B., and Frederickson, R. G., 1988, "Composition of the Cement Line and Its Possible Mechanical Role as a Local Interface in Human Compact Bone," *J. Biomechanics*, Vol. 21, pp. 939-945.

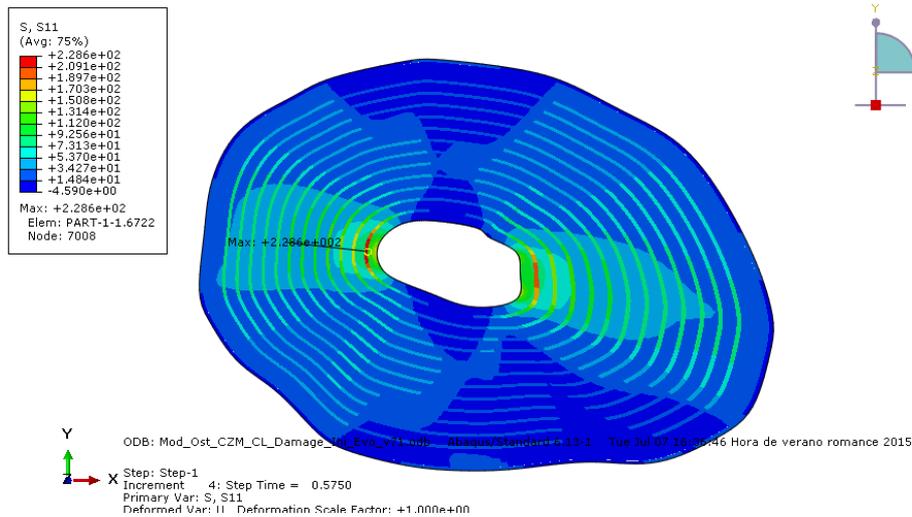
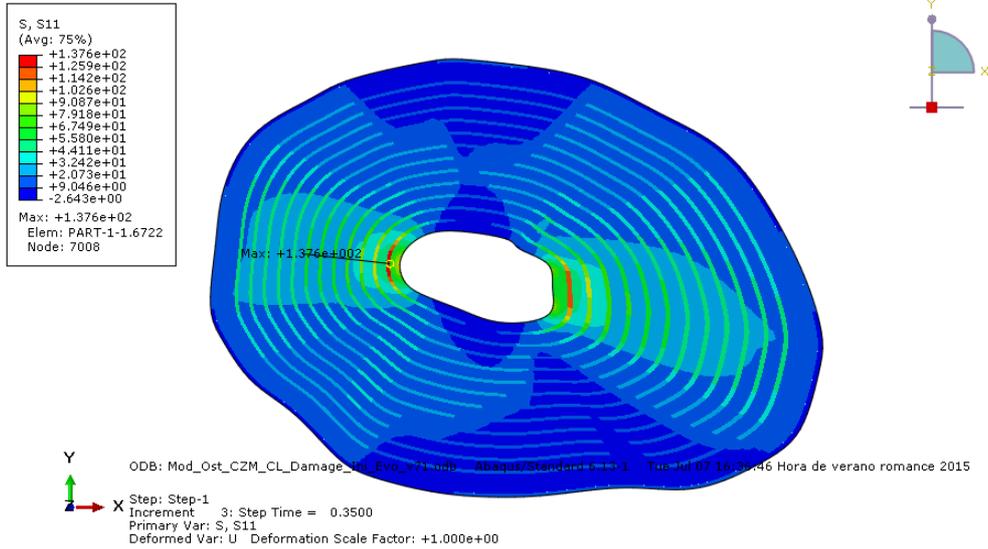


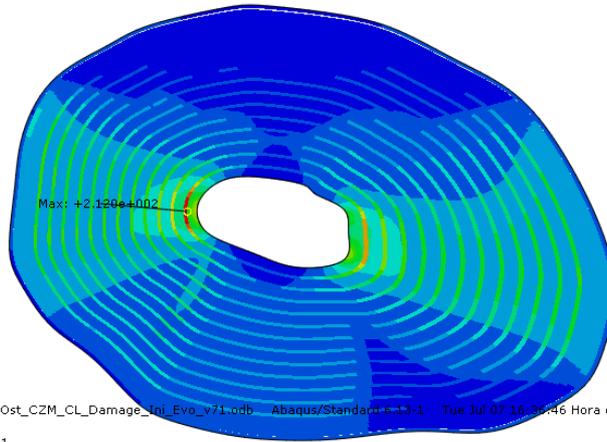
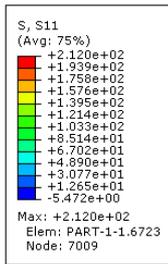
- Ref 27 Susan Michinski, Ani Ural "Finite Element Modelong of Micricrack Growth in Cortical Bone"
- Ref 28 Lemaitre, J., 1984, "How to Use Damage Mechanics," *Nuclear Engineering Design*, Vol. 80, pp. 233-245
- Ref 29 Jacob, H. A. C , and Huggler, A. H., 1980, "An Investigation Into the Biomechanical Causes of Prosthesis Stem Loosening within the Proximal End of the Human Femur," / *Biomechanics*, 13, 159-173
- Ref 30 ABAQUS/Standard User's Manual, v. 6.13.1, Simulia, Providence, Rhode Island, 2010.
- Ref 31 Camanho, P. P., and C. G. Davila, "Mixed-Mode Decohesion Finite Elements for the Simulation of Delamination in Composite Materials," NASA/TM-2002-211737, pp. 1-37, 2002.



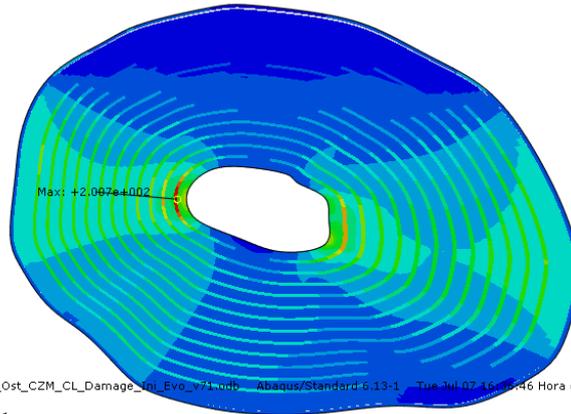
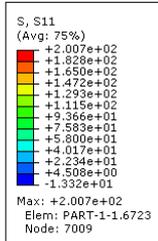
ANEXOS

En la serie de figuras que de muestra a continuación, se puede observar como varia el valor de la tensión circunferencial en las lamelas.

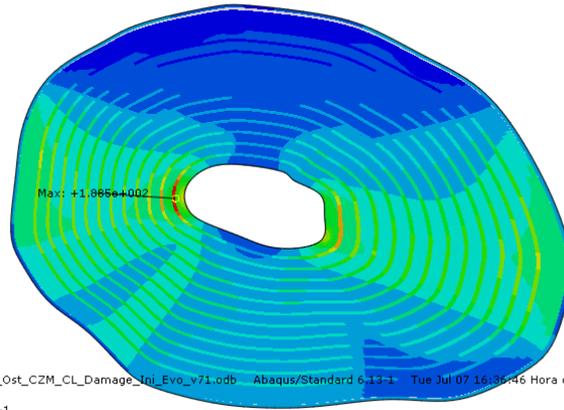
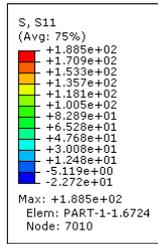




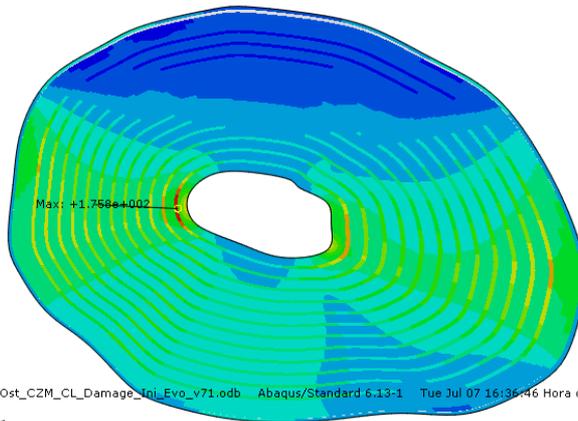
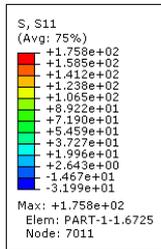
Y
X
ODB: Mod_Ost_CZM_CL_Damage_Inj_Evo_v71.odb Abaqus/Standard 6.13-1 Tue Jul 07 16:35:46 Hora de verano romance 2015
Step: Step-1
Increment 7: Step Time = 0.7051
Primary Var: S, S11
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



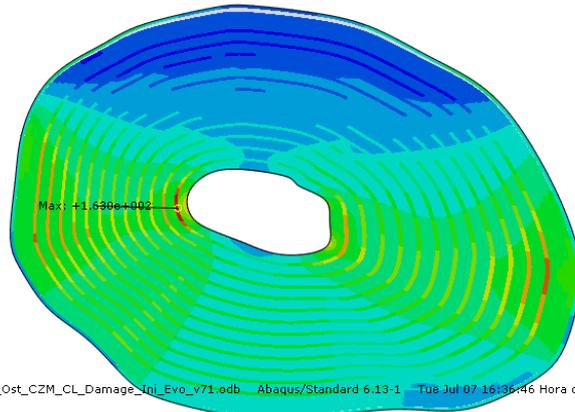
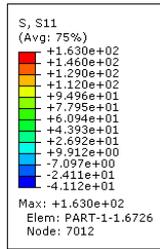
Y
X
ODB: Mod_Ost_CZM_CL_Damage_Inj_Evo_v71.odb Abaqus/Standard 6.13-1 Tue Jul 07 16:35:46 Hora de verano romance 2015
Step: Step-1
Increment 8: Step Time = 0.7367
Primary Var: S, S11
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



Y ODB: Mod_Ost_CZM_CL_Damage_Ini_Evo_v71.odb Abaqus/Standard 6.13-1 Tue Jul 07 16:35:46 Hora de verano romance 2015
X Step: Step-1
Increment 9; Step Time = 0.7684
Primary Var: S, S11
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

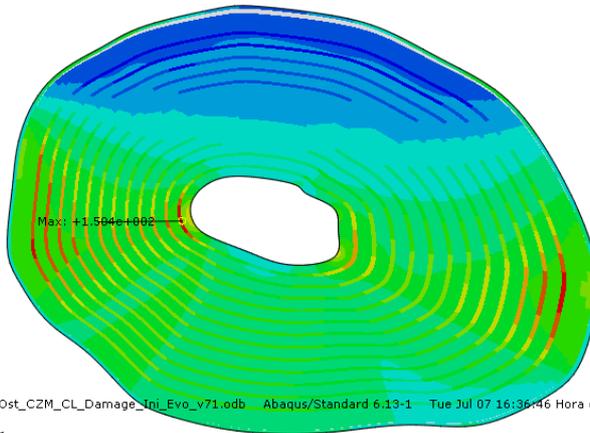
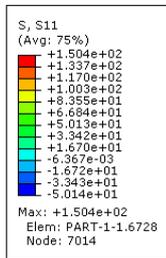


Y ODB: Mod_Ost_CZM_CL_Damage_Ini_Evo_v71.odb Abaqus/Standard 6.13-1 Tue Jul 07 16:35:46 Hora de verano romance 2015
X Step: Step-1
Increment 10; Step Time = 0.8000
Primary Var: S, S11
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



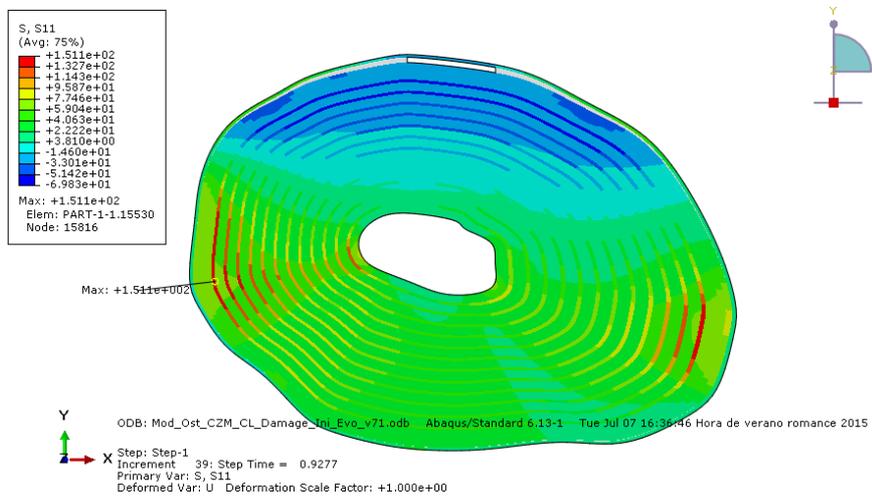
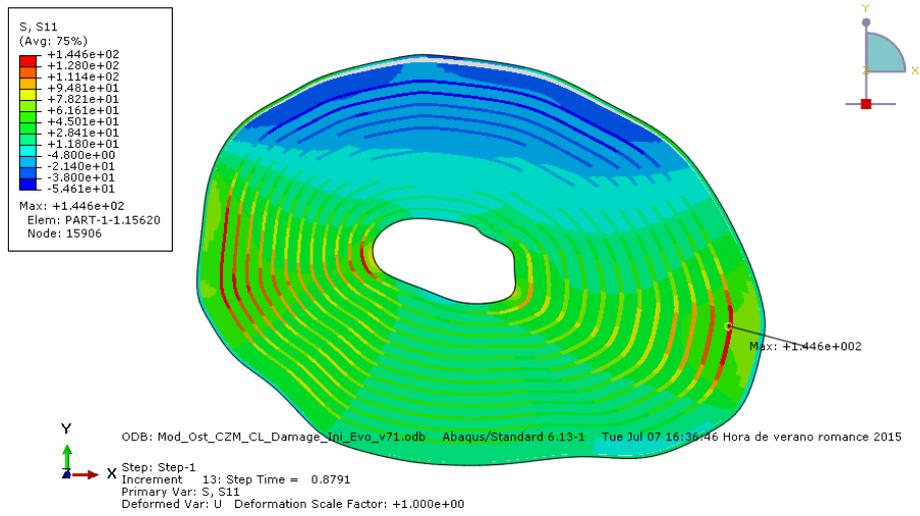
ODB: Mod_Ost_CZM_CL_Damage_Ini_Evo_v71.odb Abaqus/Standard 6.13-1 Tue Jul 07 16:36:46 Hora de verano romance 2015

Step: Step-1
Increment 11: Step Time = 0.8316
Primary Var: S, S11
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

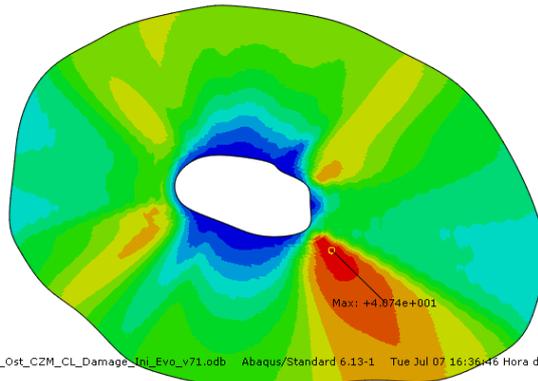
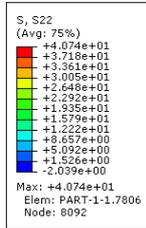


ODB: Mod_Ost_CZM_CL_Damage_Ini_Evo_v71.odb Abaqus/Standard 6.13-1 Tue Jul 07 16:36:46 Hora de verano romance 2015

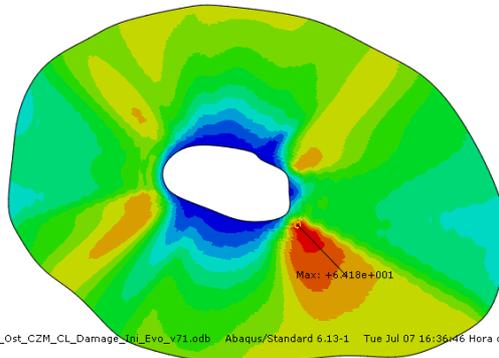
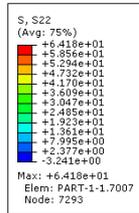
Step: Step-1
Increment 12: Step Time = 0.8633
Primary Var: S, S11
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



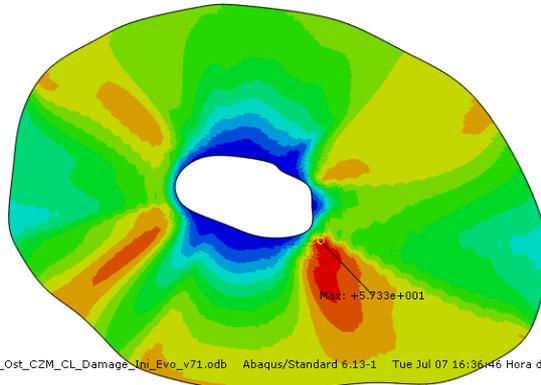
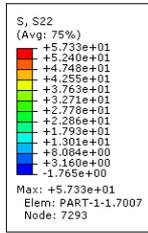
De igual manera, en esta serie de figuras se muestra la variación de la tensión radial en las lamelas.



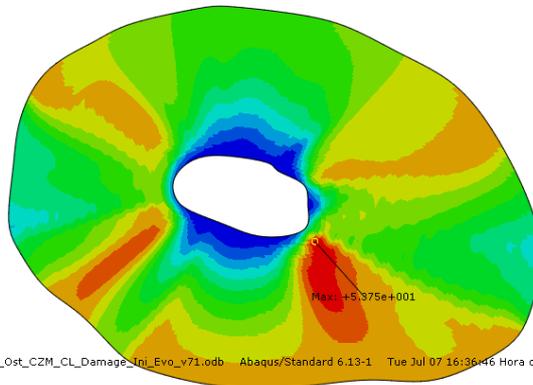
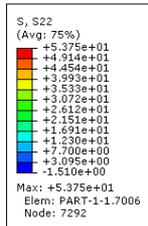
ODB: Mod_Ost_CZM_CL_Damage_Ini_Evo_v71.odb Abaqus/Standard 6.13-1 Tue Jul 07 16:36:46 Hora de verano romance 2015
Step: Step-1
Increment 3: Step Time = 0.3500
Primary Var: S_y S22
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



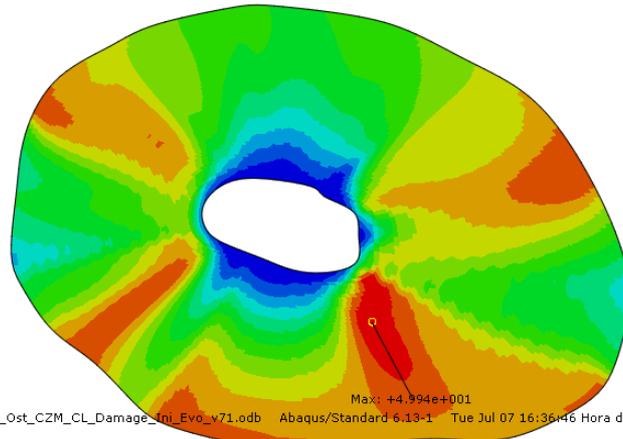
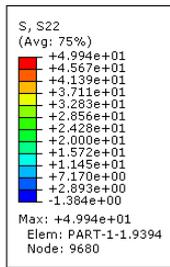
ODB: Mod_Ost_CZM_CL_Damage_Ini_Evo_v71.odb Abaqus/Standard 6.13-1 Tue Jul 07 16:36:46 Hora de verano romance 2015
Step: Step-1
Increment 4: Step Time = 0.5750
Primary Var: S_y S22
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



Y ODB: Mod_Ost_CZM_CL_Damage_Ini_Evo_v71.odb Abaqus/Standard 6.13-1 Tue Jul 07 16:36:46 Hora de verano romance 2015
X Step: Step-1
Increment 7: Step Time = 0.7051
Primary Var: S, S22
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



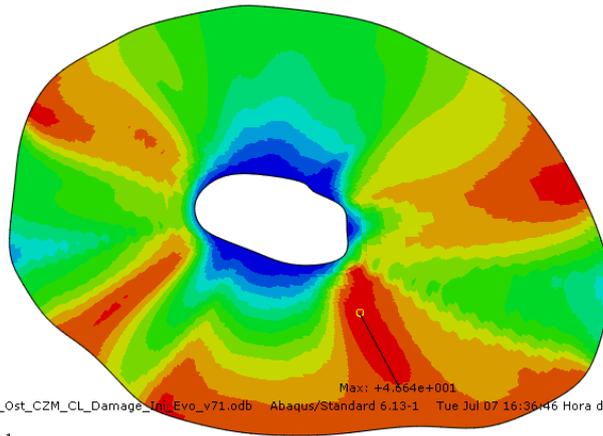
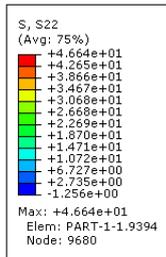
Y ODB: Mod_Ost_CZM_CL_Damage_Ini_Evo_v71.odb Abaqus/Standard 6.13-1 Tue Jul 07 16:36:46 Hora de verano romance 2015
X Step: Step-1
Increment 8: Step Time = 0.7367
Primary Var: S, S22
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



Y
 X
 Z

ODB: Mod_Ost_CZM_CL_Damage_Ini_Evo_v71.odb Abaqus/Standard 6.13-1 Tue Jul 07 16:36:46 Hora de verano romance 2015

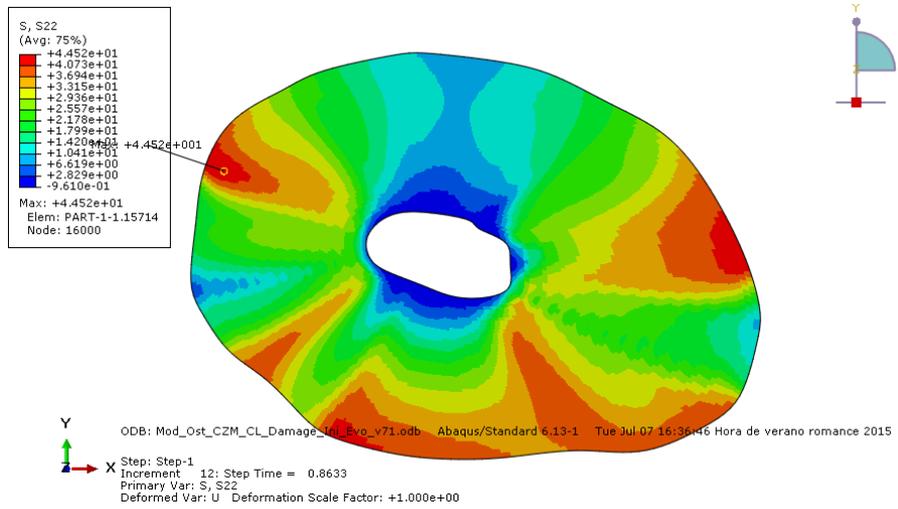
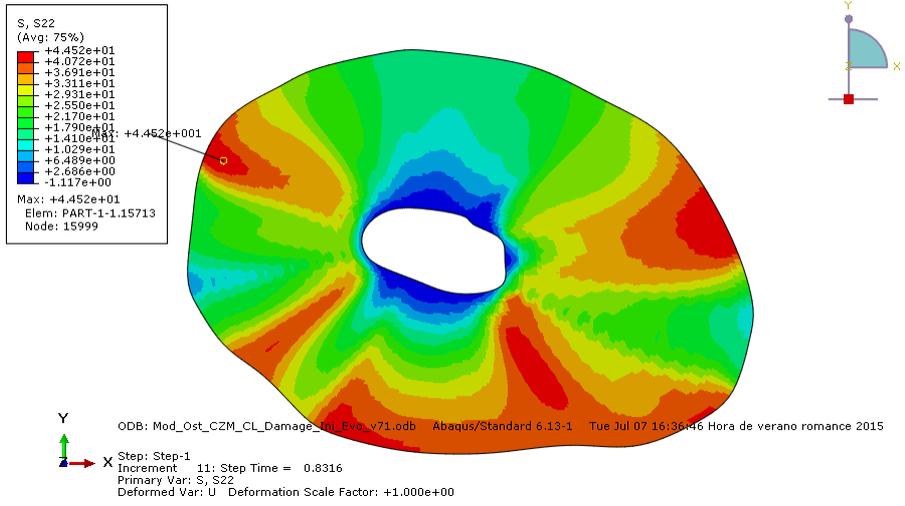
Step: Step-1
 Increment 9; Step Time = 0.7684
 Primary Var: S, S22
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

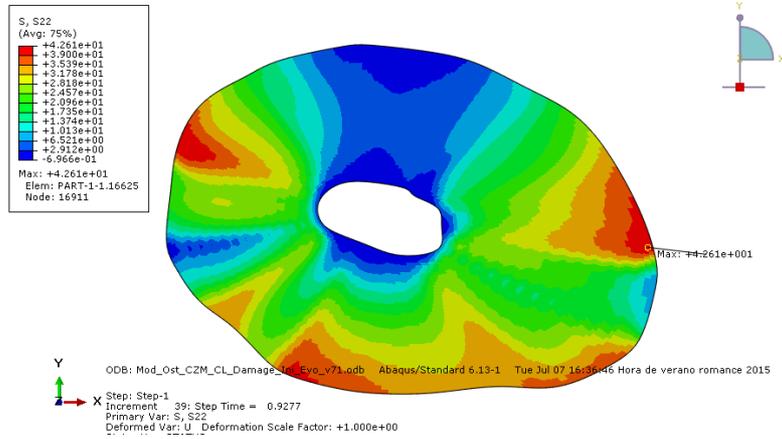
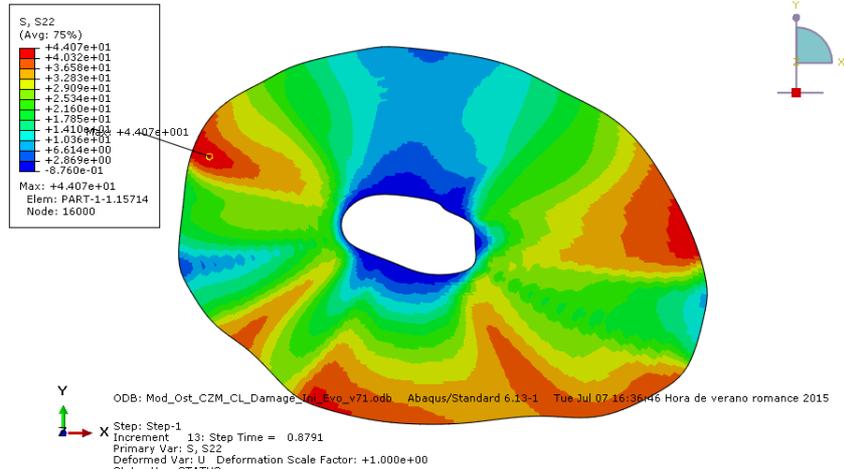


Y
 X
 Z

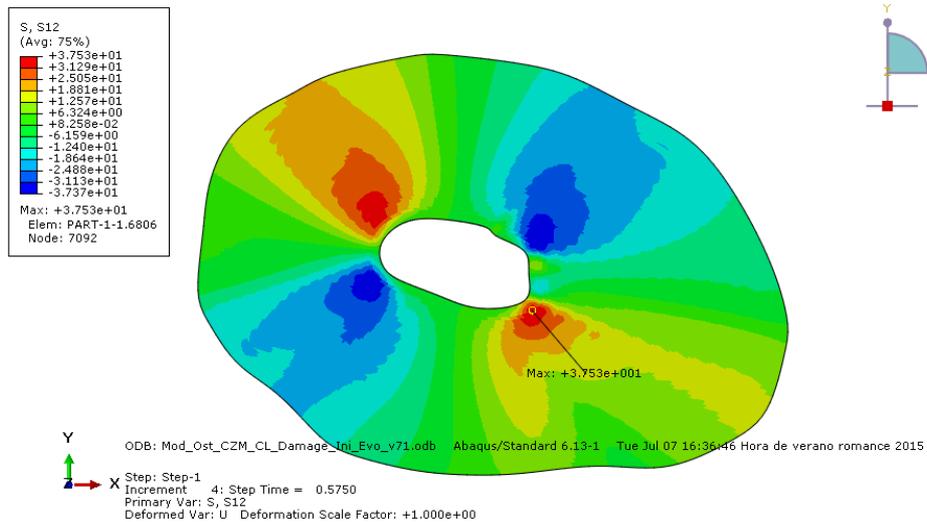
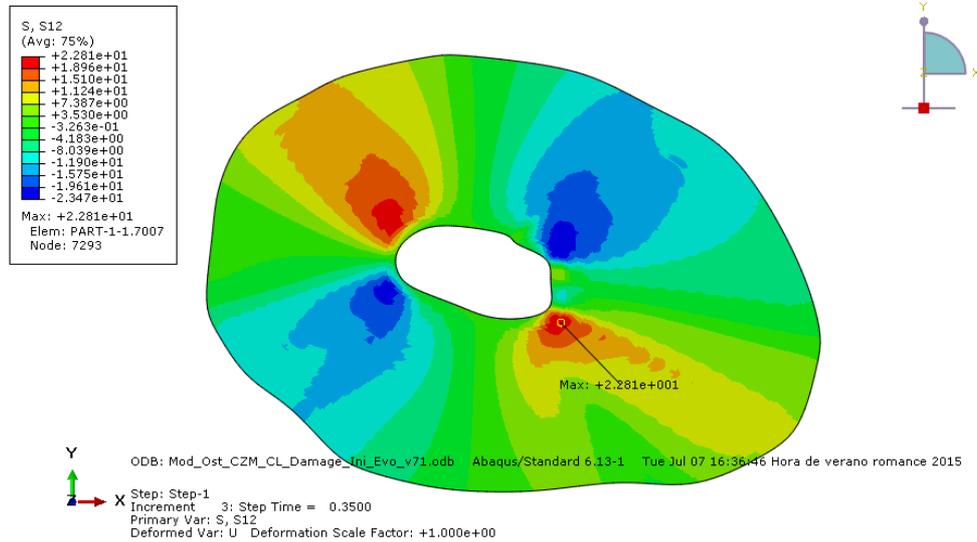
ODB: Mod_Ost_CZM_CL_Damage_Ini_Evo_v71.odb Abaqus/Standard 6.13-1 Tue Jul 07 16:36:46 Hora de verano romance 2015

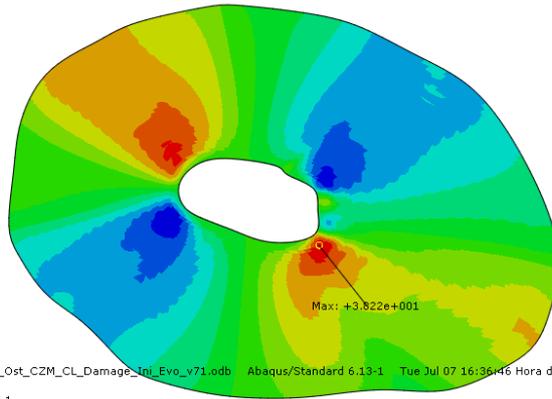
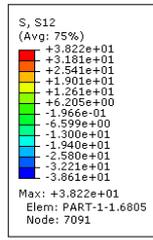
Step: Step-1
 Increment 10; Step Time = 0.8000
 Primary Var: S, S22
 Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00



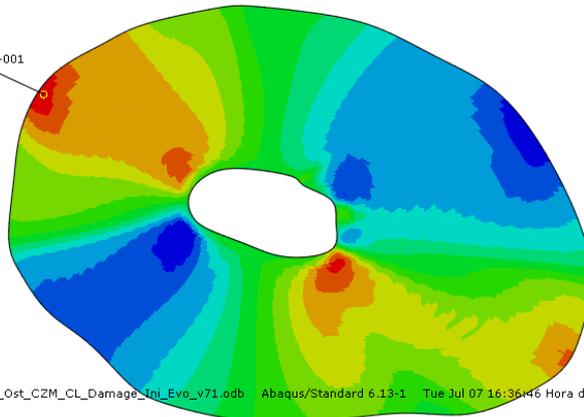
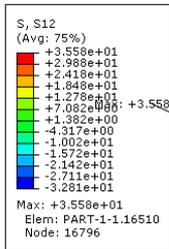


Tensión de cortadura en las lamelas. Se observa como varía de posición desde el interior de la osteona (lamelas cercanas al canal de Havers) hacia el exterior de la osteona (lamelas cercanas a la línea cementante). También se puede observar como la tensión de cortadura incrementa en todo momento a medida que se incrementa el valor de carga p .

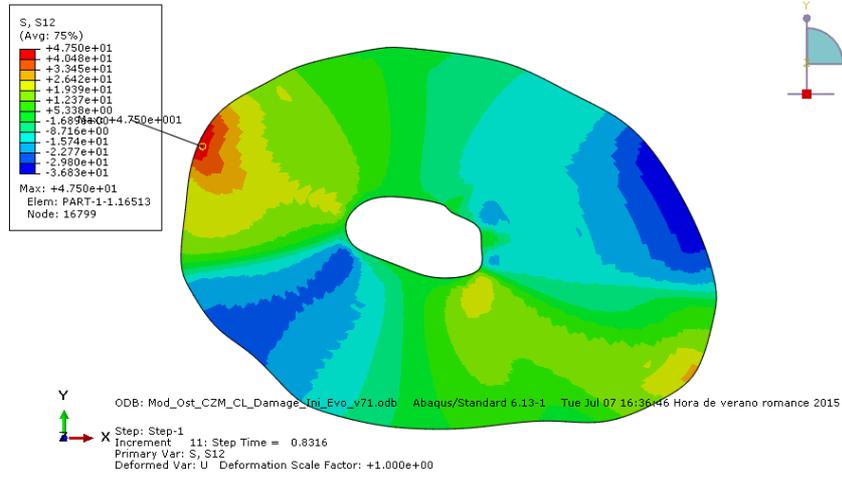
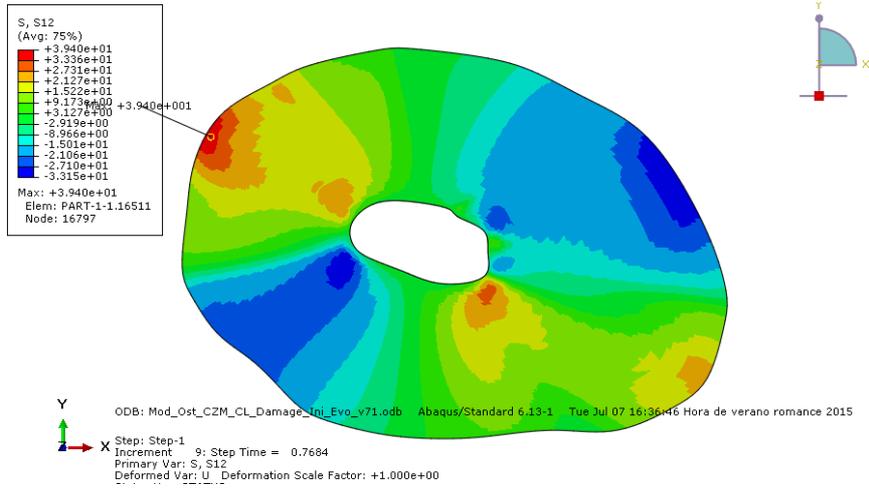


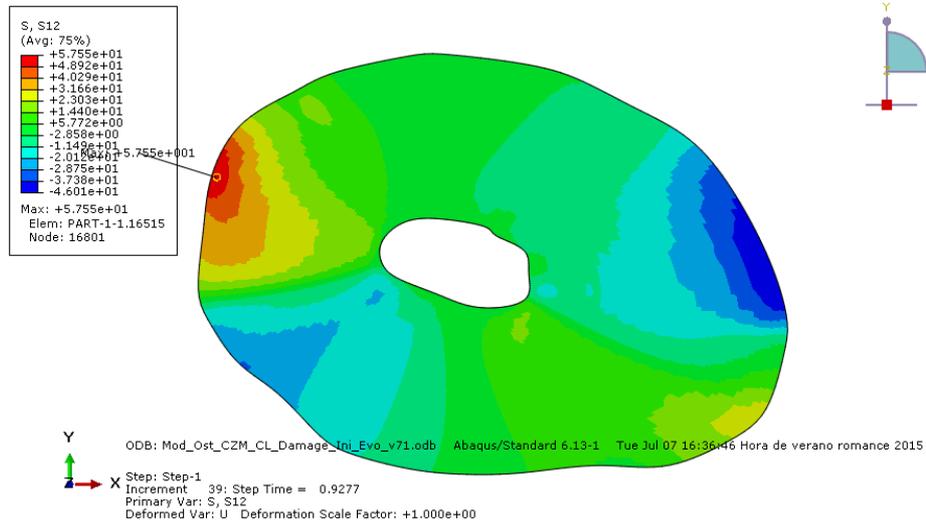
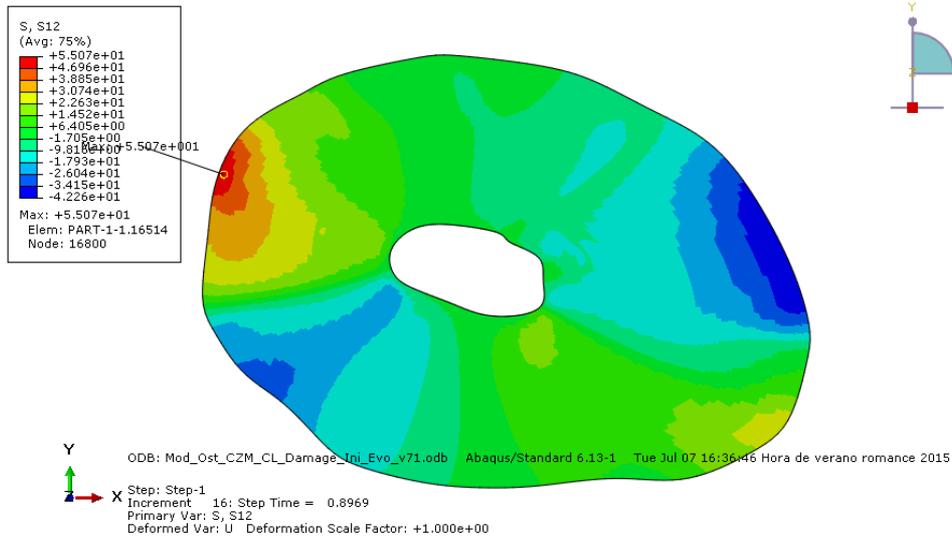


ODB: Mod_Ost_CZM_CL_Damage_Ini_Evo_v71.odb Abaqus/Standard 6.13-1 Tue Jul 07 16:36:46 Hora de verano romance 2015
Step: Step-1
Increment 5: Step Time = 0.6313
Primary Var: S, S12
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

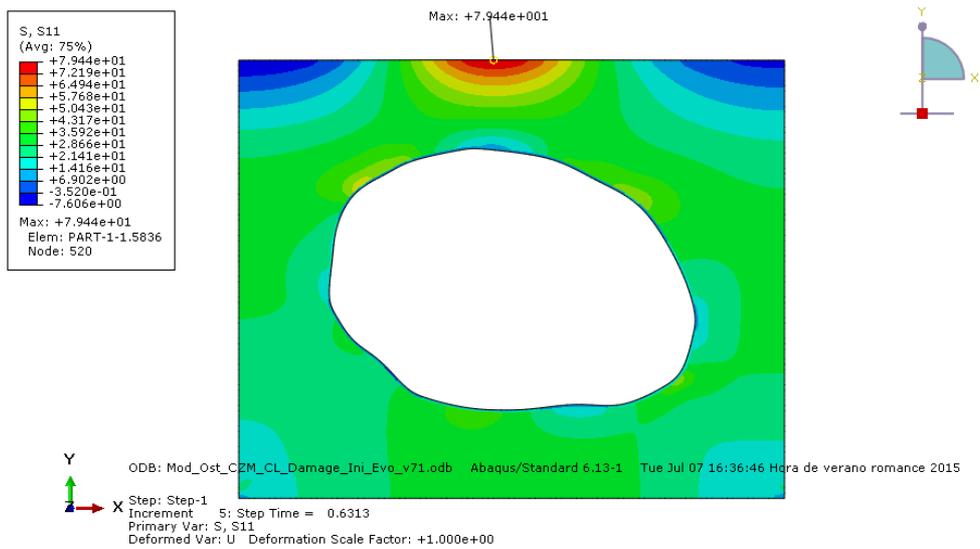
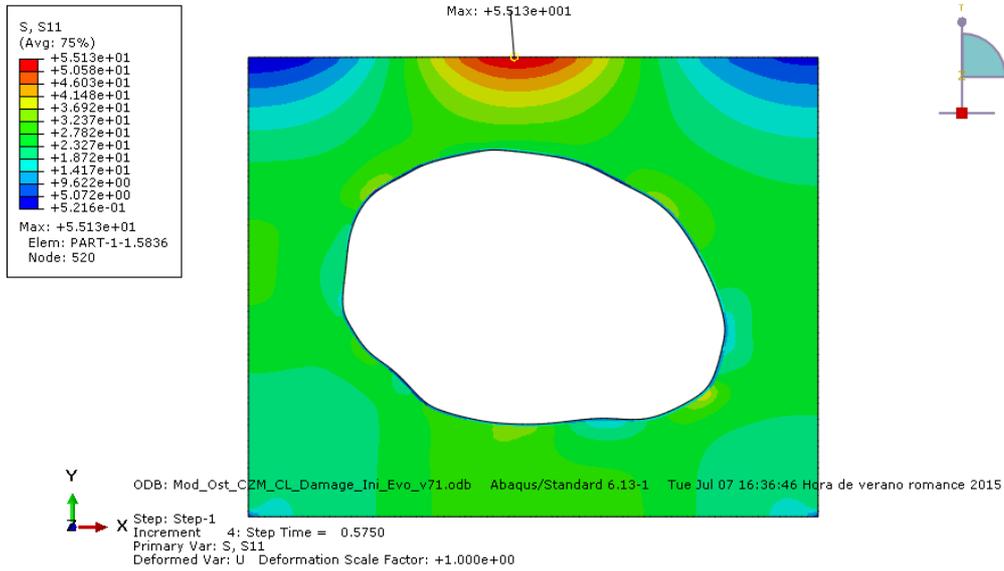


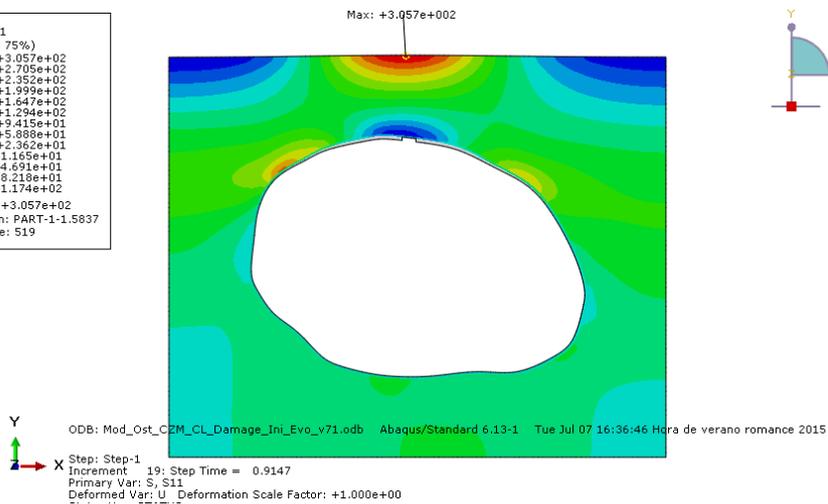
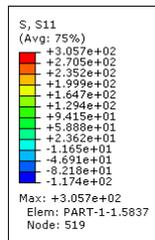
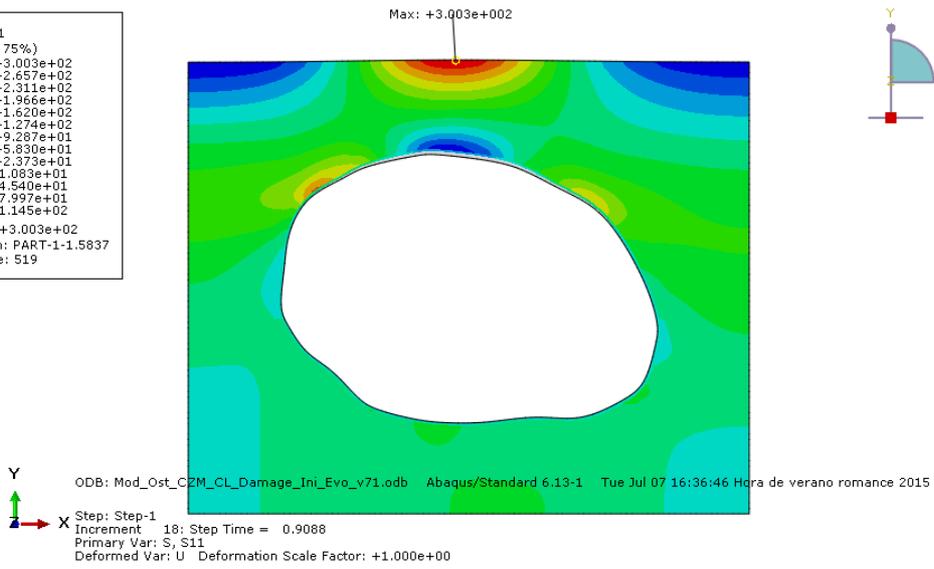
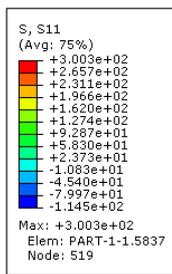
ODB: Mod_Ost_CZM_CL_Damage_Ini_Evo_v71.odb Abaqus/Standard 6.13-1 Tue Jul 07 16:36:46 Hora de verano romance 2015
Step: Step-1
Increment 8: Step Time = 0.7367
Primary Var: S, S12
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

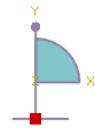
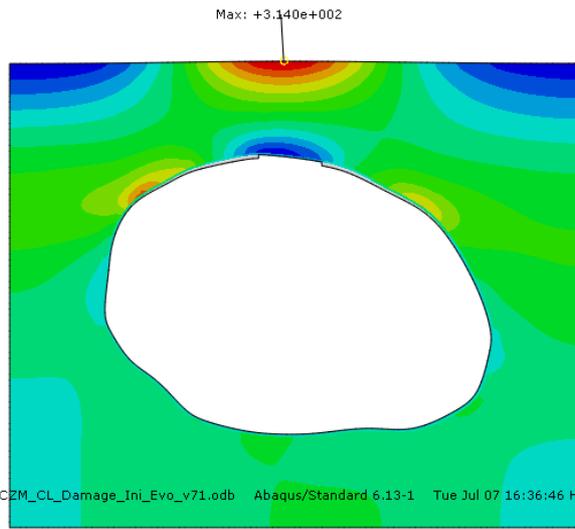
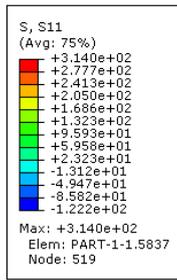




De igual modo, en esta serie de figuras que se muestran como el valor de la tensión máxima principal en la matriz intersticial incrementa en todo momento a medida que se incrementa el valor de p







Y
X
ODB: Mod_Ost_CZM_CL_Damage_Ini_Evo_v71.odb Abaqus/Standard 6.13-1 Tue Jul 07 16:36:46 Hora de verano romance 2015
Step: Step-1
Increment 39: Step Time = 0.9277
Primary Var: S, S11
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

La línea cementante sigue un proceso de carga igual que la matriz intersticial, el valor de la máxima tensión principal va incrementando a medida que se incrementa el valor de p .

