



CENTRO POLITÉCNICO
SUPERIOR

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA



**PROYECTO FIN DE CARRERA
INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**SIMULACIÓN MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS
DEL COMPORTAMIENTO DE UN CLAVO
INTRAMEDULAR PARA FRACTURAS DE TIBIA**

ANEXOS

Realizado por:

Silvia Suñer Moreno

Dirigido por:

Elena Ibarz Montaner

Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Departamento de Ingeniería Mecánica

Febrero 2011

ANEXO I. ESCÁNER 3D Y TRATAMIENTO DE LAS IMÁGENES

El escáner tridimensional “PICZA 3D Laser Scanner” modelo LPX-250 (Fig.A1) se utiliza para obtener la geometría exterior del objeto analizado, en este caso, la tibia cadavérica sana. El escáner proyecta un haz de luz al objeto escaneado y mediante sensores detecta la luz que éste refleja generando una nube de puntos.



Figura A1. Escáner 3D. Modelo LPX-250

El escáner posee dos modos de escaneo diferentes:

- Escaneo plano. Utiliza rayos láser paralelos mientras la mesa y el cabezal del láser giran sincronizadamente. Con este modo se pueden obtener buenos resultados a pesar de la forma que pueda tener el objeto. Se puede utilizar una composición multiplanar de hasta seis superficies de escaneo.
- Escaneo rotatorio. Realiza el escaneo del perímetro exterior del objeto mientras gira la mesa en una dirección. Este método es apropiado para objetos con forma esférica y cilíndrica. Puede reproducir superficies curvadas lisas incluso con pasos grandes en tiempos relativamente cortos. Sin embargo existen más limitaciones en las formas de los objetos que pueden ser escaneados de este modo.

En este caso se ha utilizado el modo de escaneo por seis planos. El paso de escaneo seleccionado es importante ya que es necesario establecer un compromiso entre el grado de detalle que se quiere obtener y el tiempo de ejecución que se necesita para ello. Para realizar el escaneo ha sido necesario posicionar la tibia de manera estable en la mesa del escáner, colocándola del modo que permitiese captar su geometría de la manera más exacta posible.

La Fig. A2 muestra la tibia cadavérica que se ha utilizado en el escaneado.



Figura A2. Tibia cadavérica

Las Figuras A3a y A3b muestran el resultado del escaneo de la tibia y su renderizado.

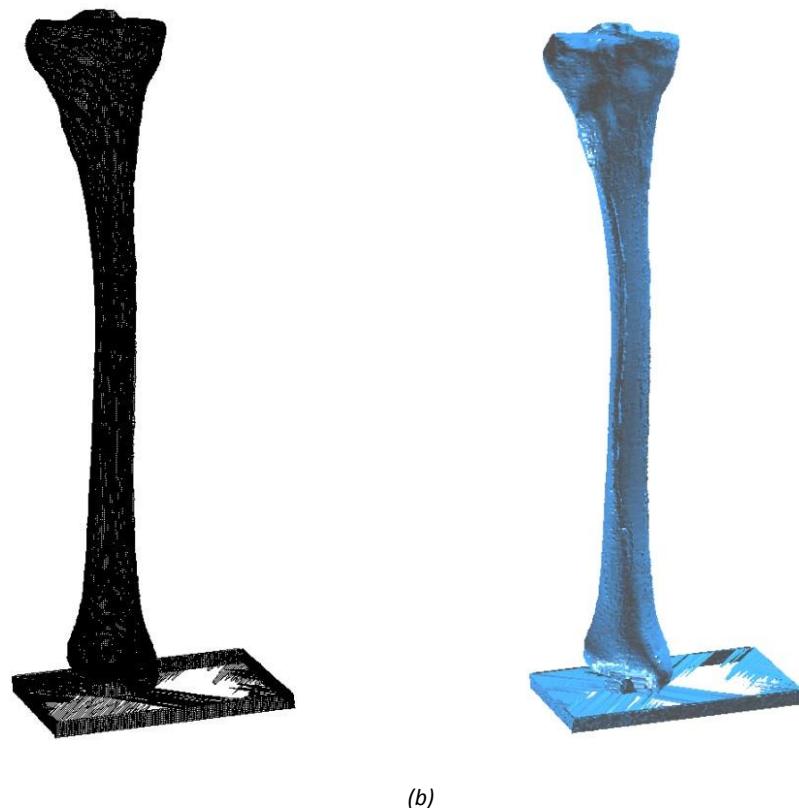


Figura A3. Imágenes escaneadas (a) Resultado del escaneo (b) Renderizado de la tibia

El software Dr. Picza 3 se emplea para tratar la nube de puntos generada en el escáner. Se eliminan las caras anormales y el ruido de los datos de la digitalización y, posteriormente, se realiza un suavizado (Fig.A4).



Figura A4. Resultado del suavizado de la tibia con el software Dr.Picza3

Esta malla es importada al programa Roland Pixform. Con la ayuda de este programa, se ha creado una superficie NURBS compatible con el programa de elementos finitos I-DEAS. Partiendo de la nube de puntos obtenida, el primer paso ha sido eliminar el pedestal que mantenía en posición vertical al modelo real durante el escaneado. A partir de aquí, se ha creado una malla poligonal que aproximaba la geometría y se han eliminado todas las imperfecciones. A continuación se ha aplicado un suavizado y se ha generado una superficie NURBS (Fig. A5).



Figura A5. Superficie NURBS de la tibia

ANEXO II. CORRELACIÓN DE LOS PUNTOS DE APLICACIÓN DE LAS FUERZAS INTERVINIENTES EN EL CASO DE MARCHA Y TORSIÓN

Caso de marcha

Tal y como se ha explicado en la memoria, la fase con mayor actividad muscular y mayor deformación de la tibia es el instante entre elevación de talón y despegue del pie. La elevación del talón ocurre cuando el talón se eleva del suelo, y el despegue del pie ocurre cuando los dedos se elevan del suelo. Este instante refleja, en términos mecánicos, el caso más desfavorable durante el desarrollo del ciclo y corresponde al 45% del ciclo completo de marcha.

El estudio realizado por George N. Duda [8], estima una simplificación del sistema de fuerzas que ejercen músculos, ligamentos y contactos entre uniones intervinientes en este preciso instante, además de obtener las coordenadas de los puntos de aplicación de las mismas. Partiendo de este estudio, se ha realizado una correlación para ajustar los puntos de aplicación a la longitud de nuestro modelo de tibia (391 mm).

La Tabla A1 muestra las componentes de las diferentes fuerzas y las coordenadas de los puntos de aplicación durante la marcha (45% del ciclo). Las fuerzas que muestran magnitud cero en el eje X, Y y Z, son músculos no activados en el instante citado. Se ha tomado como origen de coordenadas el punto central de la zona más distal de la tibia.

Partiendo de las coordenadas de los puntos de aplicación dados en la tabla anterior, se eliminaron los componentes que no intervenían en el instante a analizar y se realizó el ajuste de medidas correspondiente. La Tabla A2 muestra los puntos de aplicación de los componentes intervinientes una vez realizado dicho ajuste.

Tabla A1. Componentes de fuerzas y puntos de aplicación durante la marcha (45% del ciclo)

Fuerzas	Fuerza (N)			Punto de aplicación (mm)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
<i>Gracilis m.</i>	0,0	0,0	0,0	33	9,8	333,2
<i>Sartorius m.</i>	0,0	0,0	0,0	29,6	9,6	321,5
<i>Semimembranosus m.</i>	0,0	0,0	0,0	-23,8	-19	374,7
<i>Semitendinosus m.</i>	0,0	0,0	0,0	5,3	-38	377,4
<i>Iliotibial tract I</i>	-8,5	-8,8	61,3	-19,8	39,1	369,9
<i>Iliotibial tract II</i>	-97,4	-64,4	291,5	-27,1	28,2	370,5
<i>Quadriceps femoris m.</i>	13,6	-32,8	303,5	34,8	19,3	353,4
<i>Extensor digitorum longus m.</i>	0,0	0,0	0,0	3,1	13,4	107,1
<i>Extensor hallucis longus m.</i>	0,0	0,0	0,0	5,4	15,1	263,6
<i>Flexor digitorum longus m.</i>	0,0	0,0	0,0	-8	3,9	281,2
<i>Tibialis anterior m. I</i>	17,2	38,7	-327,7	-4,9	9,9	251,8
<i>Tibialis anterior m. II</i>	25,9	53,6	-191,8	-7,6	9,9	127,9
<i>Tibialis posterior m.</i>	0,0	0,0	0,0	-3,5	-8,9	251,4
<i>Soleus m.</i>	-63,1	-47,1	-679	-7,4	15	332,2
<i>Ant. tibiofibular lig.</i>	-132,4	-111,2	-56,8	-7,3	11,1	0,9
<i>Ant. cruciate lig.</i>	87,5	101,5	41,1	10,3	-5	390,5
<i>Deltoid lig.</i>	44,9	9,7	15,7	-1,5	-16,5	-0,3
<i>Post. cruciate lig.</i>	0,0	0,0	0,0	-6	6	388,3
<i>Knee</i>	232,3	214,9	-1528,1	1,5	-2	388,2
<i>Ankle</i>	-120	-154,4	2070,4	0,8	0,6	0,4

Tabla A2. Correlación coordenadas de los puntos de aplicación de las fuerzas intervinientes durante la marcha (45% del ciclo)

Fuerzas	Fuerza (N)			Punto de aplicación (mm)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
<i>Tracto Iliobitibial I</i>	-8,5	-8,8	61,3	-19,02	37,56	355,36
<i>Tracto Iliotibial II</i>	-97,4	-64,4	291,5	-26,03	27,09	355,93
<i>Cuadriceps femoral m.</i>	13,6	-32,8	303,5	33,43	18,54	339,51
<i>Tibial anterior m.I</i>	17,2	38,7	-327,7	-4,71	9,51	241,9
<i>Tibial anterior m.II</i>	25,9	53,6	-191,8	-7,3	9,51	122,87
<i>Soleo m.</i>	-63,1	-47,1	-679	-7,11	14,41	319,14
<i>Lig.Ant. Tibiofibular</i>	-132,4	-111,2	-56,8	-7,01	10,66	0,86
<i>Lig. Ant. Cruzado</i>	87,5	101,5	41,1	9,9	-4,8	375,15
<i>Lig. Deltoide</i>	44,9	9,7	15,7	-1,44	-15,85	-0,29
<i>Rodilla</i>	232,3	214,9	-1528,1	1,44	-1,92	372,94
<i>Tobillo</i>	-120	-154,4	2070,4	0,77	0,58	0,38

Estos puntos serán los nodos de referencia donde se introducirán las cargas más significativas.

Se ha considerado en todos los casos que la zona proximal de la tibia se encuentra fija, y que es la zona distal la que sufre un desplazamiento para simular las condiciones reales de movimiento, por lo que los puntos correspondientes a la parte proximal de la tibia no se tendrán en cuenta por estar ya incluidos en el empotramiento.

Como ya se ha comentado, para evitar problemas de concentración de tensiones, se ha optado por introducir la carga repartida en varios nodos concéntricos al nodo de referencia en lugar de aplicar la carga de manera puntual. La Tabla A3 muestra el reparto entre nodos para cada componente a considerar:

Tabla A3. Reparto de fuerzas entre nodos

Fuerzas	Nº nodos	Fuerza/nodo (N/nodo)			Punto de aplicación (mm)		
		X	Y	Z	X	Y	Z
<i>Tibial anterior m.I</i>	8	2,15	4,8375	-40,9625	-4,71	9,51	241,9
<i>Tibial anterior m.II</i>	7	3,7	7,6571	-27,4	-7,3	9,51	122,87
<i>Lig.Ant. Tibiofibular</i>	8	-16,55	-13,9	-7,1	-7,01	10,66	0,86
<i>Lig. Deltoides</i>	7	6,4143	1,3857	2,2429	-1,44	-15,85	-0,29
<i>Tobillo</i>	7	-17,1429	-22,0571	295,7714	0,77	0,58	0,38

Dicho reparto se ha realizado tanto para el modelo de tibia sana como para los tres modelos de tibia fracturada.

Caso de torsión

Para la simulación de este caso, se ha propuesto introducir un giro de 4° en la zona donde se produce la fuerza de reacción debida al tobillo, por ser la de mayor magnitud, y por tanto la más desfavorable. Para calcular el punto de aplicación se ha hallado el nodo promedio entre los nodos donde se encontraba repartida dicha fuerza en el caso anterior.

Se ha procedido de la misma forma tanto para el modelo de tibia sana como para los modelos fracturados. Dado que para éstos últimos el modelo malla es el mismo en los tres casos, sólo ha sido necesario realizar el proceso una vez. Las tablas A4 y A5

indican las coordenadas de los nodos seleccionados y las coordenadas del nodo promedio para el modelo sano y el implantado, respectivamente.

Tabla A4. Coordenadas nodo promedio caso tibia sana

TIBIA SANA			
Nº Nodo	Coordenadas		
4541	-5,99291400E+02	9,92436300E+01	-4,42129000E+00
4543	-6,00112400E+02	1,00530300E+02	-4,14436000E+00
26368	-5,99325000E+02	1,02001400E+02	-3,87282000E+00
26370	-5,98425800E+02	1,00842700E+02	-4,19209000E+00
26372	-5,97748600E+02	1,02263100E+02	-4,01192000E+00
26374	-5,97266800E+02	9,97723100E+01	-4,29000000E+00
26376	-5,96814000E+02	1,01169400E+02	-4,18300000E+00
Suma	-4,18898400E+03	7,05822840E+02	-2,91154800E+01
Promedio	-5,9842629E+02	1,0083183E+02	-4,1593543E+00

Tabla A5. Coordenadas nodo promedio caso tibia implantada

TIBIA IMPLANTADA			
Nº Nodo	Coordenadas		
5271	-7,9929150E+02	1,9924369E+02	-4,4212900E+00
5273	-8,0011240E+02	2,0053020E+02	-4,1443600E+00
41159	-7,9932500E+02	2,0200140E+02	-3,8728200E+00
41161	-7,9842590E+02	2,0084280E+02	-4,1920900E+00
41163	-7,9774860E+02	2,0226310E+02	-4,0119200E+00
41165	-7,9726667E+02	1,9977230E+02	-4,2900000E+00
41167	-7,9681400E+02	2,0116940E+02	4,1830000E+00
Suma	-5,5889841E+03	1,4058229E+03	-2,0749480E+01
Promedio	-7,9842630E+02	2,0083184E+02	-2,9642114E+00

ANEXO III. CONDICIONES DE CÁLCULO EN ABAQUS

El software de cálculo empleado en la realización de este proyecto es “Abaqus v.6.7” [17]. Mediante este programa se calculan los modelos previamente generados en I-DEAS y posteriormente se visualizan los resultados mediante el módulo “Abaqus Viewer”.

Como ya se ha explicado en la memoria, en el caso del modelo de tibia sana, no es necesario realizar ninguna simulación de contacto, por tanto las órdenes introducidas en el fichero .inp son más sencillas que en los casos posteriores de los modelos implantados. En este fichero se definen las propiedades de cada uno de los materiales que componen el modelo, los cuales se han considerado elástico lineales, y se realiza un análisis estático. A continuación se detallan las órdenes más relevantes empleadas en cada uno de los modelos.

Modelo de Tibia Sana

Caso de Marcha

En este caso, al no existir contacto, las únicas órdenes que cabe resaltar son las relativas a la definición del material y sus propiedades, condiciones de carga y desplazamiento, y tipo de análisis.

***SOLID SECTION, ELSET=_____ , MATERIAL=_____**

Esta opción se utiliza para definir propiedades de elementos sólidos. Es necesario especificar los parámetros:

- “ELSET” que se iguala al nombre del grupo de elementos que contienen los elementos para los cuales el comportamiento del material está siendo definido.
- “MATERIAL” que especifica el nombre del material que se utilizará con estos elementos.

***MATERIAL, NAME=_____**

Se emplea esta opción para indicar el comienzo de una definición de material. Como parámetro indispensable se requiere:

- “NAME” que se iguala al nombre del material a definir.

***ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC**

Esta opción se utiliza para definir un módulo elástico lineal. Como parámetro opcional se ha incorporado:

- “TYPE” que se considera isotrópico por defecto. En este caso se define un comportamiento isotrópico.
- Las líneas necesarias para definir correctamente el comportamiento isotrópico requieren el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (v).

***STEP, NLGEOM, INC=100**

Se utiliza esta opción para comenzar la definición de cada paso. Como parámetros opcionales se han utilizado:

- El parámetro “NLGEOM” especifica que se deben tener en cuenta posibles no linealidades geométricas durante el paso.
- El parámetro “INC” indica el máximo número de incrementos en un paso.

***STATIC**

Esta opción se utiliza para indicar que el step debería ser analizado como un paso de carga estática. En la primera y única línea se debe indicar el incremento de tiempo inicial y el periodo de tiempo del paso.

***BOUNDARY, OP=NEW**

Se usa para especificar condiciones de contorno en nodos. Como parámetro opcional se emplea:

- **OP= NEW** si todas las condiciones de contorno que existen actualmente deberían ser eliminadas.

En la siguiente línea de datos se coloca el nombre del nodo o grupo de nodos donde se aplica la condición de contorno, y el primer y último grado de libertad restringido, seguido del valor actual de la variable.

***CLOAD, OP=NEW**

Se utiliza esta opción para fuerzas y momentos concentrados en cualquier nodo del modelo. Como parámetro opcional se utiliza **OP= NEW** que al igual que en caso anterior de condiciones de contorno sirve para eliminar las cargas existentes y definir unas nuevas. En la línea posterior se especificará el nodo o grupo de nodos donde se aplica la carga correspondiente, el grado de libertad y la magnitud de la carga a aplicar.

Caso de Torsión

Se utilizan todas las órdenes citadas anteriormente, exceptuando la última, ***CLOAD, OP=NEW**, ya que en este caso, en lugar de aplicar fuerzas, se ha aplicado un giro en el nodo promedio calculado como se ha explicado en la memoria. Se ha introducido en Abaqus de la siguiente forma:

```
*COUPLING, CONSTRAINT NAME=TORSION,  
REF NODE=NODOT,  
SURFACE=TORSION  
*KINEMATIC  
1,2,3
```

Modelo de Tibia Implantada

Caso de Marcha

En estos modelos, además de las órdenes ya explicadas en el caso anterior de modelo de tibia sano, relativas a la definición del material y sus propiedades, condiciones de carga y desplazamiento, etc., son especialmente relevantes las órdenes que se citan a continuación.

Al igual que en al caso anterior, se detalla el porqué de su utilización y el modo en que han sido aplicadas:

- Órdenes pertenecientes a la definición de uniones:

1. *SURFACE, NAME=CLAVOTIBIA, TYPE=ELEMENT

Esta opción es empleada para definir las superficies que intervienen en simulaciones, tanto de unión como de contacto. En este caso, para poder definir posteriormente las uniones, se ha proporcionado nombre a cada una de las superficies de los cinco tornillos, así como a la superficie del clavo y a la de la tibia. Entre los parámetros opcionales se ha utilizado:

- El parámetro “**TYPE**” que especifica la composición de la superficie, ya sea de elementos, nodos, segmentos, cilindro, revolución o usuario. En este caso, elementos.

2. *TIE,NAME=T1-CLAVO,TYPE=SURFACE TO SURFACE, POSITION TOLERANCE=0.1

Esta opción es empleada para definir las uniones entre las superficies que se han establecido en la orden anterior. Se han definido uniones para cada uno de los tornillos con el clavo y la tibia. Así mismo, ha sido necesario indicar qué superficie corresponde a la superficie maestra y esclava, respectivamente, ambas de tipo elemento.

- Órdenes pertenecientes a la definición de contactos:

1. *SURFACE, NAME=CLAVO, TYPE=ELEMENT

Al igual que en el caso de definición de uniones, esta opción es empleada para definir las superficies que intervienen en simulaciones, en este caso, contactos. Para poder definir posteriormente el contacto, se ha proporcionado nombre a la superficie central del clavo, así como a la parte superior e inferior de la tibia, separadas por el foco de fractura.

Entre los parámetros opcionales se ha utilizado:

- El parámetro “**TYPE**” que especifica la composición de la superficie, ya sea de elementos, nodos, segmentos, cilindro, revolución o usuario. En este caso, elementos.

2. *CONTACT PAIR, INTERACTION=CLAVO-TIBIAS, ADJUST=0.4

Esta opción se utiliza para definir parejas de superficies o parejas formadas por una superficie y un grupo de nodos que entran en contacto o interactúan durante el análisis. Es necesario proporcionar un nombre a dicho contacto mediante el parámetro “**INTERACTION**”. Se han definido contactos tanto para la parte superior como para la parte inferior de la tibia con el clavo.

Como parámetro opcional se utiliza únicamente:

- “**ADJUST**”, que debe igualarse a un grupo de nodos o a un valor para ajustar las posiciones iniciales de las superficies especificadas. Este ajuste se realiza al comienzo del análisis y no genera deformación. En la línea siguiente deben especificarse los nombres de la superficie esclava y maestra, en ese orden.

3. *SURFACE INTERACTION, NAME=CLAVO-TIBIAS

Esta opción se utiliza para crear una superficie de interacción y definir sus posibles propiedades. Es necesario proveer de un nombre a dicha superficie de interacción.

4. *FRICTION

Esta opción es empleada para introducir propiedades de fricción en la interacción de las superficies de contacto. En el modelo de tibia implantada se ha establecido a dicho coeficiente un valor de 0.3 para simular las condiciones reales del contacto.

- Órdenes pertenecientes a los archivos de salida

1. *NODE PRINT, NSET=NODOS_FRACTURA_SUPERIOR, FREQUENCY=1

Esta opción se emplea para obtener en los archivos de salida tablas con variables de contacto para parejas de superficies de contacto.

Como parámetros opcionales se utilizan:

- **FREQUENCY**, que especifica la frecuencia de salida, en incrementos.

Caso de Torsión

Se utilizan todas las órdenes citadas anteriormente, exceptuando la última, ***CLOAD, OP=NEW**, ya que en este caso, en lugar de aplicar fuerzas, se ha aplicado un giro en el nodo promedio calculado como se ha explicado en la memoria. Se ha introducido en Abaqus de la misma forma que en el modelo sano.

ANEXO IV. PLANO DEL CLAVO INTRAMEDULAR

Partiendo del modelo de clavo intramedular 7163-3434 TRIGEN, de la casa Smith-Nephew, se han tomado las medidas necesarias, con la ayuda de un escalímetro y un calibre, para generar el modelo de elementos finitos y a continuación se han plasmado en un plano (Fig. A6) utilizando el programa de dibujo técnico AutoCAD.

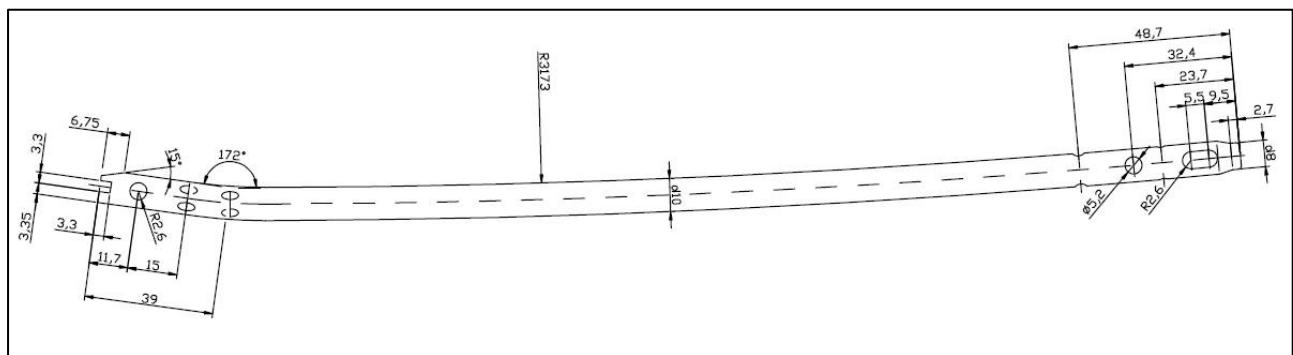


Figura A6. Plano del clavo intramedular

ANEXO V. ENSAYO DE CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A FLEXIÓN DEL CLAVO INTRAMEDULAR

El ensayo se ha realizado con una máquina de ensayos INSTRON 5565. Esta máquina tiene la posibilidad de aplicar la carga siguiendo una predeterminada función variable en el tiempo o manteniéndola constante. La transmisión de la carga a la probeta se realiza a través de un utilaje que se encuentra unido a la máquina por medio de uniones atornilladas. La adquisición de datos se obtiene por medio de una tarjeta que comunica la consola con un ordenador tipo PC.

La información que se obtiene de los ensayos se realiza por medio de diferentes transductores:

- LVDT: transductor de la posición del actuador
- Célula de carga (100 kN)
- Extensómetro (20%)

La Fig. A7 muestra la máquina de ensayos utilizada.



Figura A7. Máquina de ensayos

En el ensayo que se ha realizado han sido necesarios el transductor de posición y la célula de carga, de los que se han obtenido la posición de los extremos de la probeta y el valor de la carga aplicada en cada instante.

El ensayo ha evolucionado hasta provocar un desplazamiento vertical de 0.45 mm. Durante la realización del mismo se controlaron dos variables: fuerza (N), y desplazamiento (mm). El ensayo se ha realizado con control en posición a una velocidad de 1 mm/min.

Ensayo de flexión a tres puntos

El método de ensayo consiste en aplicar, a una velocidad dada, una fuerza por medio de un dispositivo de carga en una dirección axial a las caras de una probeta de ensayo, que se sitúa sobre dos cabezales de apoyo. La fuerza se aplica a la probeta de ensayo en una posición central entre los apoyos (Fig. A8).

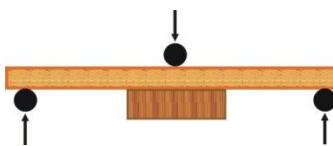


Figura A8. Esquema ensayo a flexión tres puntos

Los cabezales de apoyo de las probetas de ensayo están formados por apoyos ajustables paralelos entre sí, y situados en el mismo plano horizontal. La luz de ensayo, es decir, la distancia entre los centros de los cabezales ha sido 150 mm. Debe indicarse que la luz de 150 mm no cumple la normativa UNE-EN 12089, pero el ensayo se ha realizado extrapolando las directrices que marca la normativa UNE-EN 12089, para la probeta ensayada (Fig. A9).

El dispositivo de carga tiene las mismas dimensiones que los cabezales de apoyo. Se ha localizado entre los cabezales y es paralelo a los mismos. No se ha considerado el uso de placas de acero para la distribución de carga al no producirse un aplastamiento de la probeta por la carga aplicada.



Figura A9. Ensayo a flexión de tres puntos

En la Fig. A10 se muestran los resultados del ensayo a flexión de tres puntos de la probeta.

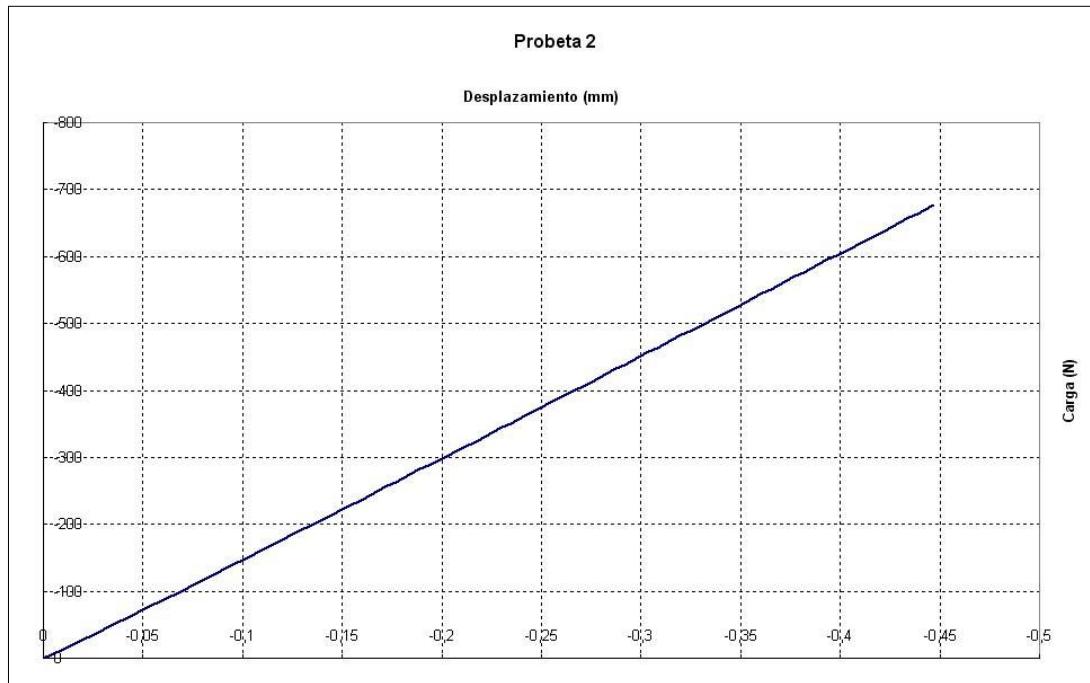


Figura A10. Curva carga-desplazamiento de la probeta

La carga máxima para la probeta es **676,36 N** para un desplazamiento máximo de **0,447mm**. Considerando el comportamiento de la probeta y la fuerza máxima soportada y su desplazamiento máximo a flexión podemos obtener la rigidez (E.I) a flexión de la probeta:

$$E.I = 1.065 \text{ e}8 \text{ N.mm}^2$$

Partiendo de estos datos, se ha realizado una correlación para adaptar los datos a nuestra geometría y se han comparado los resultados obtenidos en ambos casos. Para simular el comportamiento a flexión de nuestro modelo, se han reproducido las condiciones en las que se había realizado el ensayo real y se ha simulado en I-DEAS.

A continuación, se muestran los cálculos para adaptar los resultados a nuestra geometría.

La Tabla A6 muestra los datos extraídos del estudio realizado a un clavo intramedular de las mismas características pero de distinta geometría.

Tabla A6. Resultados del ensayo

Resultados ensayo	
Carga (P)	676,360 N
Desplazamiento (d)	0,447 mm
Rigidez (P/d)	1513,110 N/mm
Rigidez (EI)	106500000,00 N.mm ²

La Tabla A7 muestra la geometría de nuestro modelo de clavo comercial.

Tabla A7. Geometría del modelo de clavo intramedular

Datos geométricos	
Diámetro	10,00 mm
Espesor	2,30 mm
Inercia	318,32 mm ⁴
Luz	150,00 mm
Material	
Módulo E	105530,00 MPa

La Tabla A8 muestra los resultados del desplazamiento obtenido en el cálculo teórico.

Tabla 8. Resultado desplazamiento teórico

Cálculo teórico	
Carga (P)	676,360 N
Desplazamiento (δ)	0,960 mm
Rigidez (P/ δ)	704,885 N/mm
Rigidez (EI)	33591968,28 N.mm ²

Teóricamente, obtenemos una flecha máxima en el clavo de 0.96 mm. Para validar este resultado, se han reproducido las condiciones en las que se había realizado el ensayo real y se ha simulado en I-DEAS, tal y como se ha explicado en la Memoria.

A continuación se muestra una gráfica comparativa entre el cálculo teórico adaptado a nuestra geometría y el resultado obtenido para la geometría en el ensayo (Fig. A11).

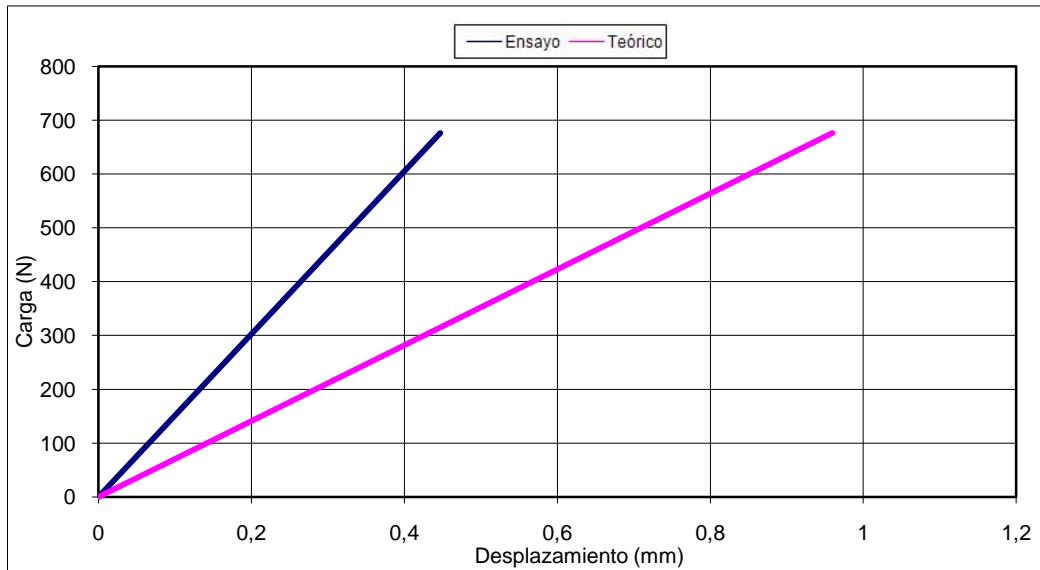


Figura A11. Comparativa entre los dos clavos intramedulares

ANEXO VI. RESULTADOS DE DESPLAZAMIENTO EN EL FOCO DE LA FRACTURA.

Tabla A9. Resultados de desplazamientos para la fractura Tipo I. CASO DE MARCHA

Incremento 1		Carga	0,1						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	3,56E+00	-1,44E+01	9,02E-01	Suma	9,79E+00	-41,587217	1,6690454		
Promedio	0,0225	-0,0912	0,0057	Promedio	0,0644	-0,2736	0,0110		
Diferencia	0,0419	-0,1824	0,0053						
Desplazamiento	0,187								
Incremento 2		Carga	0,2						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	6,11E+00	-2,46E+01	1,45E+00	Suma	17,15731	-70,121388	1,6867114		
Promedio	0,0387	-0,1554	0,0092	Promedio	0,1129	-0,4613	0,0111		
Diferencia	0,0742	-0,3059	0,0019						
Desplazamiento	0,315								
Incremento 3		Carga	0,35						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	8,63E+00	-3,53E+01	1,83E+00	Suma	24,89244	-95,976394	-0,161284		
Promedio	0,0546	-0,2232	0,0116	Promedio	0,1638	-0,6314	-0,0011		
Diferencia	0,1091	-0,4082	-0,0126						
Desplazamiento	0,423								
Incremento 4		Carga	0,575						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	1,40E+01	-5,80E+01	2,48E+00	Suma	28,08724	-89,819161	-6,680251		
Promedio	0,0887	-0,3669	0,0157	Promedio	0,1848	-0,5909	-0,0439		
Diferencia	0,0960	-0,2240	-0,0596						
Desplazamiento	0,251								
Incremento 5		Carga	0,913						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	1,98E+01	-7,85E+01	2,73E+00	Suma	32,90833	-75,904256	-18,20181		
Promedio	0,1256	-0,4965	0,0173	Promedio	0,2165	-0,4994	-0,1197		
Diferencia	0,0909	-0,0028	-0,1371						
Desplazamiento	0,164								
Incremento 6		Carga	1						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	2,09E+01	-8,20E+01	2,69E+00	Suma	34,10264	-71,683783	-21,35049		
Promedio	0,1326	-0,5189	0,0170	Promedio	0,2244	-0,4716	-0,1405		
Diferencia	0,0918	0,0473	-0,1575						
Desplazamiento	0,188								

Tabla A10. Resultados de desplazamientos para la fractura Tipo II. CASO DE MARCHA

Incremento 1		Carga	0,1						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	2,24E+01	-8,19E+01	1,85E+00	Suma	30,7498	-119,0215	1,068347		
Promedio	0,1580	-0,5770	0,0130	Promedio	0,2421	-0,9372	0,0084		
Diferencia	0,0841	-0,3602	-0,0046						
Desplazamiento	0,370								
Incremento 2		Carga	0,2						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	4,12E+01	-1,51E+02	3,57E+00	Suma	56,0805	-219,037	2,4608824		
Promedio	0,2901	-1,0611	0,0252	Promedio	0,4416	-1,7247	0,0194		
Diferencia	0,1515	-0,6636	-0,0058						
Desplazamiento	0,681								
Incremento 3		Carga	0,35						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	6,37E+01	-2,35E+02	5,82E+00	Suma	86,4423	-342,116	4,6918304		
Promedio	0,4485	-1,6524	0,0410	Promedio	0,6806	-2,6938	0,0369		
Diferencia	0,2322	-1,0414	-0,0040						
Desplazamiento	1,067								
Incremento 4		Carga	0,575						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	8,80E+01	-3,29E+02	8,35E+00	Suma	119,4861	-483,388	7,6681929		
Promedio	0,6196	-2,3197	0,0588	Promedio	0,9408	-3,8062	0,0604		
Diferencia	0,3212	-1,4865	0,0016						
Desplazamiento	1,521								
Incremento 5		Carga	0,913						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	1,10E+02	-4,26E+02	1,05E+01	Suma	150,8302	-632,362	10,560843		
Promedio	0,7781	-2,9980	0,0741	Promedio	1,1876	-4,9792	0,0832		
Diferencia	0,4095	-1,9812	0,0090						
Desplazamiento	2,023								
Incremento 6		Carga	1						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	1,15E+02	-4,45E+02	1,10E+01	Suma	156,9395	-662,367	10,800922		
Promedio	0,8101	-3,1342	0,0773	Promedio	1,2357	-5,2155	0,0850		
Diferencia	0,4256	-2,0813	0,0077						
Desplazamiento	2,124								

Tabla A11. Resultados de desplazamientos para la fractura Tipo III. CASO DE MARCHA

Incremento 1		Carga	0,1						
Nudos superiores						Nudos inferiores			
Suma	-2,45E-02	-8,36E-01	-2,18E-01	Suma	1,09E+01	-2,24E+01	-1,52E+01		
Promedio	-0,0001	-0,0044	-0,0012	Promedio	0,0609	-0,1251	-0,0851		
Diferencia	0,0611	-0,1206	-0,0839						
Desplazamiento	0,159								
Incremento 2		Carga	0,2						
Nudos superiores						Nudos inferiores			
Suma	-1,03E-01	-1,27E+00	-4,63E-01	Suma	2,01E+01	-3,51E+01	-2,69E+01		
Promedio	-0,0006	-0,0068	-0,0025	Promedio	0,1123	-0,1960	-0,1501		
Diferencia	0,1129	-0,1893	-0,1477						
Desplazamiento	0,265								
Incremento 3		Carga	0,35						
Nudos superiores						Nudos inferiores			
Suma	-2,80E-01	-1,53E+00	-8,59E-01	Suma	31,63059	-4,42E+01	-40,75303		
Promedio	-0,0015	-0,0081	-0,0046	Promedio	0,1767	-0,2469	-0,2277		
Diferencia	0,1782	-0,2388	-0,2231						
Desplazamiento	0,372								
Incremento 4		Carga	0,575						
Nudos superiores						Nudos inferiores			
Suma	-6,17E-01	-1,42E+00	-1,49E+00	Suma	46,44462	-45,661018	-56,96788		
Promedio	-0,0033	-0,0076	-0,0079	Promedio	0,2595	-0,2551	-0,3183		
Diferencia	0,2627	-0,2475	-0,3103						
Desplazamiento	0,476								
Incremento 5		Carga	0,913						
Nudos superiores						Nudos inferiores			
Suma	-1,21E+00	-8,07E-01	-2,46E+00	Suma	66,78539	-36,464213	-78,08997		
Promedio	-0,0076	-0,0051	-0,0156	Promedio	0,3731	-0,2037	-0,4363		
Diferencia	0,3807	-0,1986	-0,4207						
Desplazamiento	0,601								
Incremento 6		Carga	1						
Nudos superiores						Nudos inferiores			
Suma	-1,37E+00	-6,02E-01	-2,72E+00	Suma	71,86086	-32,950713	-83,24467		
Promedio	-0,0073	-0,0032	-0,0144	Promedio	0,4015	-0,1841	-0,4651		
Diferencia	0,4087	-0,1809	-0,4506						
Desplazamiento	0,635								

Tabla A12. Resultados de desplazamientos para la fractura Tipo I. CASO DE TORSIÓN

Incremento 1		Carga	0,1	Nudos inferiores				
Nudos superiores				Nudos inferiores				
Suma	3,45E-02	-1,69E-01	1,52E-02	Suma	1,57E+00	-2,92E+00	-6,53E-02	
Promedio	0,0002	-0,0011	0,0001	Promedio	0,0104	-0,0192	-0,0004	
Diferencia	0,0101	-0,0181	-0,0005					
Desplazamiento	0,021							
Incremento 2		Carga	0,2	Nudos inferiores				
Nudos superiores				Nudos inferiores				
Suma	6,90E-02	-3,37E-01	3,04E-02	Suma	3,19E+00	-5,82E+00	-1,32E-01	
Promedio	0,0004	-0,0021	0,0002	Promedio	0,0210	-0,0383	-0,0009	
Diferencia	0,0205	-0,0362	-0,0011					
Desplazamiento	0,042							
Incremento 3		Carga	0,3	Nudos inferiores				
Nudos superiores				Nudos inferiores				
Suma	1,03E-01	-5,04E-01	4,54E-02	Suma	4,85278091	-8,71E+00	-0,20002675	
Promedio	0,0006	-0,0032	0,0003	Promedio	0,0319	-0,0573	-0,0013	
Diferencia	0,0313	-0,0541	-0,0016					
Desplazamiento	0,063							
Incremento 4		Carga	0,4	Nudos inferiores				
Nudos superiores				Nudos inferiores				
Suma	1,36E-01	-6,72E-01	6,05E-02	Suma	6,557089	-11,5936155	-0,26931813	
Promedio	0,0009	-0,0043	0,0004	Promedio	0,0431	-0,0763	-0,0018	
Diferencia	0,0423	-0,0720	-0,0022					
Desplazamiento	0,084							
Incremento 5		Carga	0,5	Nudos inferiores				
Nudos superiores				Nudos inferiores				
Suma	1,70E-01	-8,39E-01	7,56E-02	Suma	8,3036901	-14,4606801	-0,33971106	
Promedio	0,0011	-0,0053	0,0005	Promedio	0,0546	-0,0951	-0,0022	
Diferencia	0,0536	-0,0898	-0,0027					
Desplazamiento	0,105							
Incremento 6		Carga	0,6	Nudos inferiores				
Nudos superiores				Nudos inferiores				
Suma	2,04E-01	-1,01E+00	9,06E-02	Suma	10,0893982	-17,3151166	-0,4112195	
Promedio	0,0013	-0,0064	0,0006	Promedio	0,0664	-0,1139	-0,0027	
Diferencia	0,0651	-0,1075	-0,0033					
Desplazamiento	0,126							

Incremento 7				Carga 0,7			
Nudos superiores				Nudos inferiores			
Suma	2,37E-01	-1,17E+00	1,06E-01	Suma	11,9171732	-20,1570826	-0,48384143
Promedio	0,0015	-0,0074	0,0007	Promedio	0,0784	-0,1326	-0,0032
Diferencia	0,0769	-0,1252	-0,0039				
Desplazamiento	0,147						

Incremento 8				Carga 0,8			
Nudos superiores				Nudos inferiores			
Suma	2,71E-01	-1,34E+00	1,21E-01	Suma	13,7851222	-22,9851954	-0,55758115
Promedio	0,0017	-0,0085	0,0008	Promedio	0,0907	-0,1512	-0,0037
Diferencia	0,0890	-0,1427	-0,0044				
Desplazamiento	0,168						

Incremento 9				Carga 0,9			
Nudos superiores				Nudos inferiores			
Suma	3,05E-01	-1,51E+00	1,36E-01	Suma	15,6923096	-25,798843	-0,63244579
Promedio	0,0019	-0,0095	0,0009	Promedio	0,1032	-0,1697	-0,0042
Diferencia	0,1013	-0,1602	-0,0050				
Desplazamiento	0,190						

Incremento 10				Carga 1			
Nudos superiores				Nudos inferiores			
Suma	3,39E-01	-1,67E+00	1,51E-01	Suma	17,6407313	-28,5969457	-0,70842367
Promedio	0,0021	-0,0106	0,0010	Promedio	0,1161	-0,1881	-0,0047
Diferencia	0,1139	-0,1776	-0,0056				
Desplazamiento	0,211						

Tabla A13. Resultados de desplazamientos para la fractura Tipo II. CASO DE TORSIÓN

Incremento 1		Carga	0,1								
Nudos superiores		Nudos inferiores									
Suma	9,75E-02	-4,62E-01	1,80E-02	Suma	0,50364971	1,2239228	-0,05426632				
Promedio	0,0007	-0,0033	0,0001	Promedio	0,0040	0,0096	-0,0004				
Diferencia	0,0033	0,0129	-0,0006								
Desplazamiento	0,013										
Incremento 2		Carga	0,175								
Nudos superiores		Nudos inferiores									
Suma	1,70E-01	-8,07E-01	3,15E-02	Suma	0,8731317	2,1326931	-0,09431433				
Promedio	0,0012	-0,0057	0,0002	Promedio	0,0069	0,0168	-0,0007				
Diferencia	0,0057	0,0225	-0,0010								
Desplazamiento	0,023										
Incremento 3		Carga	0,25								
Nudos superiores		Nudos inferiores									
Suma	2,42E-01	-1,15E+00	4,49E-02	Suma	1,2395189	3,0334925	-0,1340559				
Promedio	0,0017	-0,0081	0,0003	Promedio	0,0098	0,0239	-0,0011				
Diferencia	0,0081	0,0320	-0,0014								
Desplazamiento	0,033										
Incremento 4		Carga	0,325								
Nudos superiores		Nudos inferiores									
Suma	3,13E-01	-1,49E+00	5,83E-02	Suma	1,5934759	3,9259825	-0,17291464				
Promedio	0,0022	-0,0105	0,0004	Promedio	0,0125	0,0309	-0,0014				
Diferencia	0,0103	0,0414	-0,0018								
Desplazamiento	0,043										
Incremento 5		Carga	0,4								
Nudos superiores		Nudos inferiores									
Suma	3,84E-01	-1,83E+00	7,17E-02	Suma	1,9401358	4,8111632	-0,21119742				
Promedio	0,0027	-0,0129	0,0005	Promedio	0,0153	0,0379	-0,0017				
Diferencia	0,0126	0,0508	-0,0022								
Desplazamiento	0,052										
Incremento 6		Carga	0,475								
Nudos superiores		Nudos inferiores									
Suma	4,54E-01	-2,17E+00	8,50E-02	Suma	2,2787109	5,687622	-0,24891115				
Promedio	0,0032	-0,0152	0,0006	Promedio	0,0179	0,0448	-0,0020				
Diferencia	0,0147	0,0600	-0,0026								
Desplazamiento	0,062										

Incremento 7		Carga	0,55						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	5,25E-01	-2,50E+00	9,83E-02	Suma	2,609714	6,556131	-0,28605337		
Promedio	0,0037	-0,0176	0,0007	Promedio	0,0205	0,0516	-0,0023		
Diferencia	0,0169		0,0692		-0,0029				
Desplazamiento	0,071								
Incremento 8		Carga	0,625						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	5,95E-01	-2,84E+00	1,11E-01	Suma	2,934063	7,416289	-0,3225935		
Promedio	0,0042	-0,0200	0,0008	Promedio	0,0231	0,0584	-0,0025		
Diferencia	0,0189		0,0784		-0,0033				
Desplazamiento	0,081								
Incremento 9		Carga	0,7						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	6,65E-01	-3,17E+00	1,25E-01	Suma	3,249581	8,266197	-0,35852483		
Promedio	0,0047	-0,0223	0,0009	Promedio	0,0256	0,0651	-0,0028		
Diferencia	0,0209		0,0874		-0,0037				
Desplazamiento	0,090								
Incremento 10		Carga	0,775						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	7,34E-01	-3,50E+00	1,38E-01	Suma	3,559113	9,108839	-0,39387558		
Promedio	0,0052	-0,0246	0,0010	Promedio	0,0280	0,0717	-0,0031		
Diferencia	0,0229		0,0964		-0,0041				
Desplazamiento	0,099								
Incremento 11		Carga	0,85						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	8,03E-01	-3,83E+00	1,51E-01	Suma	3,859401	9,942819	-0,42862888		
Promedio	0,0057	-0,0270	0,0011	Promedio	0,0304	0,0783	-0,0034		
Diferencia	0,0247		0,1052		-0,0044				
Desplazamiento	0,108								
Incremento 12		Carga	0,925						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	8,72E-01	-4,16E+00	1,64E-01	Suma	4,153455	10,76818	-0,46280712		
Promedio	0,0061	-0,0293	0,0012	Promedio	0,0327	0,0848	-0,0036		
Diferencia	0,0266		0,1141		-0,0048				
Desplazamiento	0,117								

Incremento 13	Carga	1	Nudos inferiores					
Nudos superiores								
Suma	9,41E-01	-4,48E+00	1,77E-01	Suma	4,438132	11,5856085	-0,49639429	
Promedio	0,0066	-0,0316	0,0012	Promedio	0,0349	0,0912	-0,0039	
Diferencia	0,0283		0,1228	-0,0052				
Desplazamiento	0,126							

Tabla A14. Resultados de desplazamientos para la fractura Tipo III. CASO DE TORSIÓN

Incremento 1		Carga	0,1						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	-6,00E-03	-2,47E-03	2,33E-03	Suma	-5,46E+00	-1,13E+01	5,51E-01		
Promedio	0,0000	0,0000	0,0000	Promedio	-0,0305	-0,0631	0,0031		
Diferencia	-0,0305	-0,0631	0,0031						
Desplazamiento	0,070								
Incremento 2		Carga	0,2						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	-1,20E-02	-4,95E-03	4,67E-03	Suma	-1,08E+01	-2,26E+01	1,10E+00		
Promedio	-0,0001	0,0000	0,0000	Promedio	-0,0605	-0,1264	0,0061		
Diferencia	-0,0605	-0,1264	0,0061						
Desplazamiento	0,140								
Incremento 3		Carga	0,3						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	-1,80E-02	-7,42E-03	7,00E-03	Suma	-16,1178306	-3,40E+01	1,64163966		
Promedio	-0,0001	0,0000	0,0000	Promedio	-0,0900	-0,1899	0,0092		
Diferencia	-0,0899	-0,1899	0,0091						
Desplazamiento	0,210								
Incremento 4		Carga	0,4						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	-2,39E-02	-9,88E-03	9,33E-03	Suma	-21,3158483	-45,3892269	2,18185746		
Promedio	-0,0001	-0,0001	0,0000	Promedio	-0,1191	-0,2536	0,0122		
Diferencia	-0,1190	-0,2535	0,0121						
Desplazamiento	0,280								
Incremento 5		Carga	0,5						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	-2,99E-02	-1,24E-02	1,17E-02	Suma	-26,4246956	-56,820397	2,71858135		
Promedio	-0,0002	-0,0001	0,0001	Promedio	-0,1476	-0,3174	0,0152		
Diferencia	-0,1474	-0,3174	0,0151						
Desplazamiento	0,350								
Incremento 6		Carga	0,6						
Nudos superiores				Nudos inferiores					
Suma	-3,59E-02	-1,48E-02	1,40E-02	Suma	-31,4457612	-68,288271	3,25182369		
Promedio	-0,0002	-0,0001	0,0001	Promedio	-0,1757	-0,3815	0,0182		
Diferencia	-0,1755	-0,3814	0,0181						
Desplazamiento	0,420								

Incremento 7				Carga	0,7				
Nodos superiores				Nodos inferiores					
Suma	-4,18E-02	-1,73E-02	1,63E-02	Suma	-36,3786154	-79,78274	3,78157544		
Promedio	-0,0002	-0,0001	0,0001	Promedio	-0,2032	-0,4457	0,0211		
Diferencia	-0,2030	-0,4456	0,0210						
Desplazamiento	0,490								
Incremento 8				Carga	0,8				
Nodos superiores				Nodos inferiores					
Suma	-4,77E-02	-1,97E-02	1,86E-02	Suma	-41,2223996	-91,31091	4,30785945		
Promedio	-0,0003	-0,0001	0,0001	Promedio	-0,2303	-0,5101	0,0241		
Diferencia	-0,2300	-0,5100	0,0240						
Desplazamiento	0,560								
Incremento 9				Carga	0,9				
Nodos superiores				Nodos inferiores					
Suma	-5,37E-02	-2,22E-02	2,09E-02	Suma	-45,9792813	-102,863524	4,83067259		
Promedio	-0,0003	-0,0001	0,0001	Promedio	-0,2569	-0,5747	0,0270		
Diferencia	-0,2566	-0,5745	0,0269						
Desplazamiento	0,630								
Incremento 10				Carga	1				
Nodos superiores				Nodos inferiores					
Suma	-5,96E-02	-2,46E-02	2,33E-02	Suma	-50,643365	-114,452994	5,35004348		
Promedio	-0,0003	-0,0001	0,0001	Promedio	-0,2829	-0,6394	0,0299		
Diferencia	-0,2826	-0,6393	0,0298						
Desplazamiento	0,700								

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG.	TÍTULO	PÁG.	REF.
A1	Escáner 3D. Modelo LPX-250	62	
A2	Tibia cadavérica	63	
A3a	Resultado del escaneo	64	
A3b	Renderizado de la tibia	64	
A4	Resultado del suavizado de la tibia con el software Dr.Picza3	64	
A5	Superficie NURBS de la tibia	65	
A6	Plano del clavo intramedular	76	
A7	Máquina de ensayos	77	[21]
A8	Esquema ensayo a flexión tres puntos	78	[21]
A9	Ensayo a flexión de tres puntos	79	[21]
A10	Curva carga-desplazamiento de la probeta	79	[21]
A11	Comparativa entre los dos clavos intramedulares	81	

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	TÍTULO	PÁG.	REF.
A1	Componentes de fuerzas y puntos de aplicación durante la marcha (45% del ciclo)	67	[11]
A2	Correlación coordenadas de los puntos de aplicación de las fuerzas intervinientes durante la marcha (45% del ciclo)	67	
A3	Reparto de fuerzas entre nodos	68	
A4	Coordenadas nodo promedio caso tibia sana	69	
A5	Coordenadas nodo promedio caso tibia implantada	69	
A6	Resultados del ensayo	80	[7]
A7	Geometría del modelo de clavo intramedular	80	
A8	Resultado desplazamiento teórico	80	
A9	Resultados de desplazamientos para la fractura Tipo I. CASO DE MARCHA	82	
A10	Resultados de desplazamientos para la fractura Tipo II. CASO DE MARCHA	83	
A11	Resultados de desplazamientos para la fractura Tipo III. CASO DE MARCHA	84	
A12	Resultados de desplazamientos para la fractura Tipo I. CASO DE TORSIÓN	85-86	
A13	Resultados de desplazamientos para la fractura Tipo II. CASO DE TORSIÓN	87-89	
A14	Resultados de desplazamientos para la fractura Tipo III. CASO DE TORSIÓN	90-91	