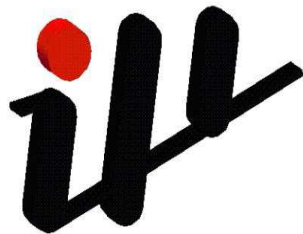


PROYECTO FIN DE CARRERA

# CÁLCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE DETENCIÓN DEL SLED POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS



*Ingeniería Técnica Industrial especialidad Mecánica*  
*Departamento de Ingeniería Mecánica*  
*Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Zaragoza*  
*Universidad de Zaragoza*  
*Autor: Ignacio Fraca Zornoza*  
*Director: Juan José Alba*  
*Co-Director: Ramón Miralbés Buil*  
*Febrero 2011*



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
1.1	TÍTULO DEL PROYECTO	4
1.2	DEFINICIÓN Y ALCANCE DEL PROYECTO	4
1.3	OBJETIVOS	7
1.3.1	OBJETIVO DE LAS FASES DEL PROYECTO	7
1.3.2	OBJETIVO DEL PROYECTO	8
<b>2</b>	<b>ENSAYO REAL</b>	<b>9</b>
2.1	PROBETA	9
2.1.1	Máquina de ensayos mecánicos. INSTRON	9
2.1.2	ENSAYO	10
2.1.3	GEOMETRÍA	15
2.1.4	RESULTADOS EXPERIMENTALES	16
2.2	TUBO	20
2.2.1	GEOMETRÍA	20
2.2.2	ENSAYOS	21
2.2.3	RESULTADOS EXPERIMENTALES	23
<b>3</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL</b>	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>ENSAYO CON SIMULACIÓN NUMÉRICA</b>	<b>31</b>
4.1	PROBETA	31
4.1.1	GEOMETRÍA	31
4.1.2	DISCRETIZACIÓN	32
4.1.3	CARGA Y CONDICIONES DE CONTORNO	34
4.1.4	MATERIALES	36
4.1.5	RESULTADOS	37
4.2	TUBOS	39
4.2.1	GEOMETRÍA	39
4.2.2	DISCRETIZACIÓN	40
4.2.3	CARGA Y CONDICIONES DE CONTORNO	42
4.2.4	MATERIALES	44
4.1.5	RESULTADOS	44
<b>5</b>	<b>CORRELACIÓN ENSAYOS</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>50</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>53</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>54</b>
	CONSULTAS WEB	54
	AGRADECIMIENTOS	54



<b>ANEXO A: SLED</b> .....	<b>56</b>
A1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA .....	56
A1.1. SUBSISTEMA DE PROPULSIÓN.....	57
A1.1.1.GOMAS ELÁSTICAS.....	57
A1.1.2. SOPORTES DE LAS GOMAS .....	58
A1.2. SUBSISTEMA DE GUIADO .....	58
A1.3. CARRO PORTA-ESPECÍMENES (CARRO PRINCIPAL).....	59
A1.4. CARRO AUXILIAR.....	62
A1.5. SUBSISTEMA DE FRENADO .....	64
A1.5.1. BARRERA DE IMPACTO .....	64
A1.5.2.SISTEMAS DE DECELERARIÓN.....	66
A1.6. SUBSISTEMA DE CONTROL .....	68
<b>ANEXO B: EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS</b> .....	<b>69</b>
B1.-INTRODUCCIÓN .....	69
B.2.LA TEORÍA DE LOS ELEMENTOS FINITOS .....	69
B2.1. INTRODUCCIÓN.....	69
B2.2. NASTRAN: PROGRAMA ELEMENTOS FINITOS.....	72
B2.3.- SOLID WORKS .....	73
B2.4.- PATRAN / NASTRAN .....	75
B2.5.- ABAQUS.....	79
<b>ANEXO C: RESULTADOS</b> .....	<b>80</b>

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 TÍTULO DEL PROYECTO

CÁLCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE DETENCIÓN DEL SLED POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.

## 1.2 DEFINICIÓN Y ALCANCE DEL PROYECTO

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño de unos tubos de acero que servirán como sistema de absorción de impactos en el proceso de frenado de una máquina de simulación de accidentes conocida como SLED.

El SLED es una máquina que se utiliza en ingeniería para simular impactos de vehículos con el fin de estudiar el comportamiento tanto del propio vehículo como de sus ocupantes en casos reales de accidentes. De esta manera se puede avanzar en materia de seguridad en los automóviles del futuro, investigando acerca de cómo minimizar los daños en este tipo de colisiones.

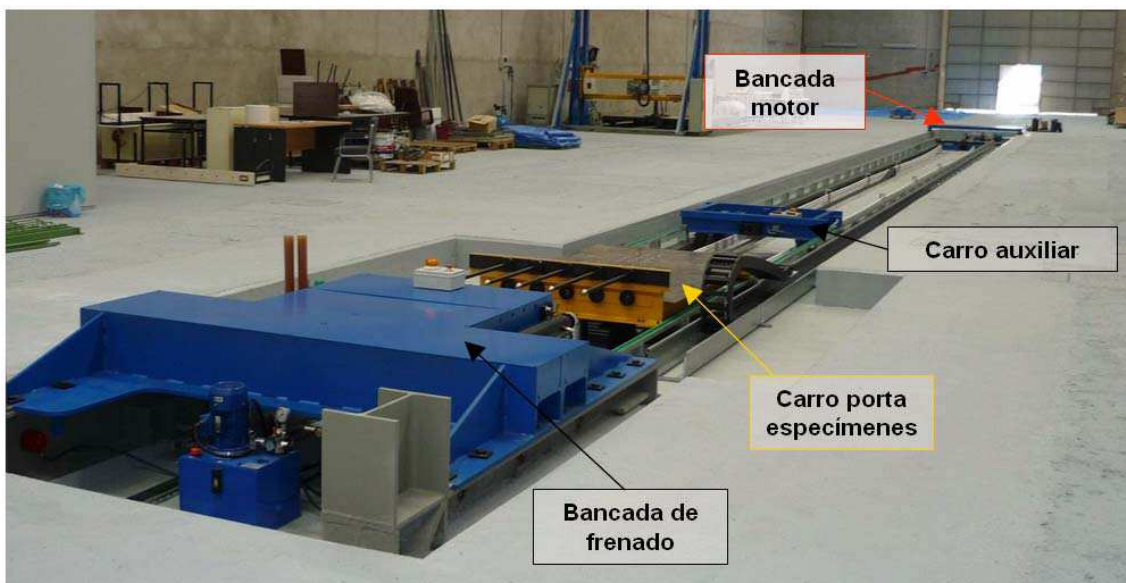
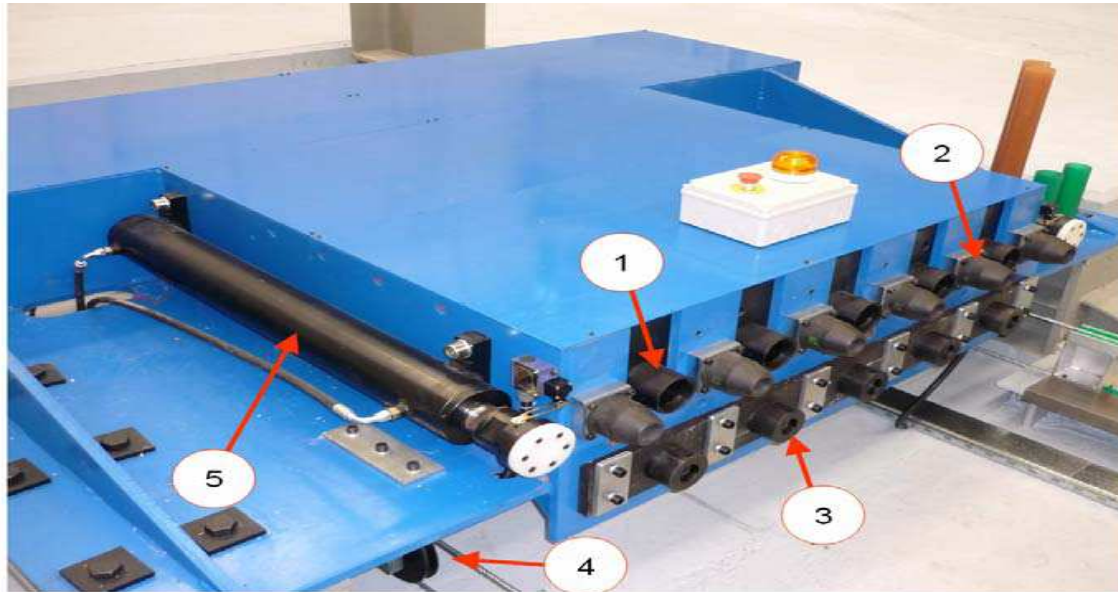


Imagen 1.1 Máquina de simulación de impactos ó SLED

El objeto del proyecto será la obtención de unos tubos que se situarán dentro del sistema de frenado del carro en el SLED. Éstos actuarán como absorbentes del impacto del carro principal haciendo que se detenga dentro de unas condiciones normalizadas que pretenden simular lo más fielmente posible el comportamiento en las colisiones reales.



*Imagen 1.2 Barrera de impacto del SLED*

En la foto se observa la barrera de impacto del SLED, donde irán montados los tubos sobre los que colisionara el carro principal.

El proyecto consiste en diseñar esos tubos según unas características en cuanto a materiales y dimensiones tales que cumplan las condiciones impuestas en el reglamento número 44 de la UNECE.

El estudio de los diferentes tubos se realizará con programas informáticos de simulación numérica mediante elementos finitos.

Las herramientas de diseño en ingeniería usadas para el desarrollo de nuevos productos han experimentado recientemente una evolución muy positiva, obteniendo estructuras nuevas óptimas en comparación a las obtenidas por medios tradicionales. Los resultados obtenidos por simulación numérica, según una serie de casos de carga y condiciones de contorno, junto con la realización de ensayos es un método de diseño efectivo que puede ser aplicado al diseño de nuevos productos.

Para la realización del proyecto se dispone de tres probetas y un tubo de dos tipos de acero distintos y de unas dimensiones determinadas, que servirán de base para poder estudiar posteriormente distintas geometrías y dimensiones cuyo comportamiento se adecue más a lo estipulado por la normativa.

La realización del proyecto se divide en cinco fases que se comentan a continuación:

1º- Durante la primera fase del proyecto se caracterizan los dos tipos de materiales que se van a utilizar en los ensayos con los tubos, con el fin de poder estudiar sus reacciones mediante simulación numérica. Para poder caracterizar los materiales se diseñan físicamente una serie de probetas, tres por cada material en concreto, con la misma forma y tamaño, que viene regulado por la norma ISO 6892.

Con las probetas se realiza un ensayo de tracción en el laboratorio del departamento de mecánica de la EUITIZ con una máquina de ensayos mecánicos marca Instron homologada para este tipo de ensayos y siguiendo las normas de la ISO 6892, que regula el ensayo de tracción de materiales metálicos a temperatura ambiente. Con este ensayo se obtienen datos acerca de cada material que nos permitirán caracterizarlo.

Una vez caracterizados los materiales, se diseñan las probetas mediante programas de CAD y posteriormente se trasladan a otro programa que se encarga de discretizar los modelos, imponerle las condiciones de contorno y los diferentes casos de cargas.

2º- En la segunda fase se vuelve a exportar el modelo ya discretizado al programa de simulación numérica (basado en el Método de los Elementos Finitos) que nos permite obtener los niveles de rigidez y de resistencia a los que está sometido el modelo, así como la curva esfuerzo-deformación de los mismos, que debe ser similar a la obtenida con el ensayo físico en el laboratorio. De esta manera se comprueba que el ensayo físico nos reporta la misma información que la simulación numérica, por lo que la caracterización del material habrá sido correcta.

En esta fase del proyecto se analiza informáticamente la caracterización de los materiales realizada en la fase anterior comparando los resultados obtenidos por ambos métodos.

3º- En la tercera fase del proyecto se realiza un ensayo de compresión con los tubos de cada material en el laboratorio del departamento de mecánica de la EUITIZ con la máquina de ensayos de tracción marca Instron anteriormente utilizada para los ensayos en las probetas. Este ensayo de compresión nos reportarán unas curvas esfuerzo-deformación características de cada uno de los dos materiales.

En esta misma fase también se utilizarán los tubos de uno de los materiales para realizar un ensayo real en el SLED, obtendremos también los datos de la gráfica aceleración-tiempo de este ensayo, aunque se aplazará su estudio a posteriores investigaciones quedando fuera del objetivo de este proyecto.

4º- En la cuarta fase del proyecto se diseñan los tubos igual que se había realizado antes con las probetas y se realiza una simulación numérica que nos



reportará unas gráficas esfuerzo-deformación que tendremos que comparar con las obtenidas en los ensayos físicos del laboratorio. La finalidad de esta fase es comprobar que las gráficas resultan ser similares mediante los dos métodos para poder dar por válido el ensayo mediante la simulación numérica.

5º- En la quinta y última fase, una vez comprobado que el método mediante simulación numérica es válido, se comprueba mediante este mismo método diferentes modelos de tubos con diferentes dimensiones para obtener el modelo de tubo óptimo para su posterior instalación en el SLED.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO DE LAS FASES DEL PROYECTO**

#### FASE 1

Caracterizar los dos materiales utilizados en los tubos del proyecto, obteniendo las gráficas de esfuerzo-deformación de cada uno de ellos así como diseñar mediante programas de CAD los modelos de las probetas para posteriormente discretizarlos con otro programa informático mediante la metodología de los elementos finitos.

#### FASE 2

Análisis comparativo numérico-experimental de los resultados obtenidos al lanzar el estudio mediante programas de simulación numérica con los obtenidos en el ensayo físico del laboratorio. El fruto de esta comparación será el de dar por válida la caracterización realizada en la fase anterior.

#### FASE 3

Obtener las gráficas esfuerzo-deformación de los tubos tras realizar un ensayo de compresión en el laboratorio.

Obtener las gráficas aceleración-tiempo de los tubos tras realizar un ensayo real en el SLED.

### FASE 4

Análisis comparativo numérico-experimental de los datos obtenidos mediante la simulación numérica de los tubos con los obtenidos de los ensayos físicos.

### FASE 5

Encontrar las óptimas dimensiones y características de los tubos para que al instalarlos en el SLED nos ofrezcan los mejores resultados.

## 1.3.2 OBJETIVO DEL PROYECTO

Diseñar unos tubos de acero con unas dimensiones y características tales que optimicen su función en SLED.

La función de los tubos dentro del SLED será la de detener y absorber el impacto del carro, con lo que se debe conseguir unos tubos con unas características en su deformación que simulen lo más fielmente posible un accidente de un vehículo con impacto en la realidad, para poder estudiar las consecuencias de este tipo de accidentes así como intentar mejorar en materia de seguridad ante estos posibles impactos.

Dichas características son las que están reflejadas en el reglamento número 44 de la UNECE.



*Imagen 1.3 Tubos tras el ensayo en la Instron*



## 2 ENSAYO REAL

### 2.1 PROBETA

Realizamos una serie de ensayos de resistencia a tracción según los parámetros que marca la norma ISO 6892 con cada una de las probetas cuya geometría y características detalla también la norma, con el fin de caracterizar el material del que se componen los tubos.

#### 2.1.1 Máquina de ensayos mecánicos. INSTRON

El ensayo de tracción se realiza con una máquina de ensayos mecánicos de la marca Instron en el laboratorio del área de mecánica de la EUITIZ.

El equipo aplica fuerzas o desplazamientos a la muestra de ensayo con objeto de medir la resistencia del material, rigidez y demás parámetros que definen su comportamiento mecánico.

Sus características técnicas son:

- Carga máxima: 100 kN.
- Células de carga: de 100 N a 100 kN.

Sus aplicaciones son las siguientes:

- Determinación de las propiedades mecánicas del material: módulo de elasticidad, resistencia a rotura, deformación a rotura, coeficientes de Poison, etc.
- Aplicación de esfuerzos de tracción, compresión, flexión, cortadura, fluencia, etc.
- Aplicación de esfuerzos o deformaciones a una pieza o componente para simular su comportamiento en servicio.

La máquina aplica sobre la muestra, objeto del ensayo, una deformación con velocidad constante mientras una célula de carga mide la fuerza ejercida en cada momento. De esta forma se obtienen las curvas de comportamiento mecánico del material (curvas tensión-deformación).

A partir de dichas curvas se obtienen los parámetros característicos del comportamiento mecánico: tensión de rotura, fluencia, módulos elásticos, etc.



Con objeto de medir la deformación de la probeta con mayor precisión se pueden acoplar a la probeta extensómetros de contacto o de vídeo.



*Imagen 2.1 Máquina de ensayos mecánicos Instron*

### 2.1.2 ENSAYO

El ensayo de tracción permite obtener información sobre la capacidad de un material para soportar la acción de cargas estáticas o de cargas que varían lentamente a temperatura constante. Como los componentes metálicos se proyectan en la mayoría de las ocasiones para trabajar en estas condiciones, probablemente éste es el más popular entre los ensayos que permiten caracterizar el comportamiento mecánico de un material metálico.

El ensayo se realiza traccionando una probeta de geometría normalizada, por la norma ISO 6892 en este caso, con una longitud inicial  $L_0$ , que se ha amarrado entre las mordazas de una máquina, según se muestra en la fotografía. Una de las mordazas de la máquina esta unida al cabezal móvil y se desplaza respecto a la otra con velocidad constante durante la realización del ensayo. Las máquinas de ensayo disponen de sistemas de medida, células de carga y extensómetros, que permiten registrar la fuerza aplicada y la deformación producida mientras las mordazas se están separando.

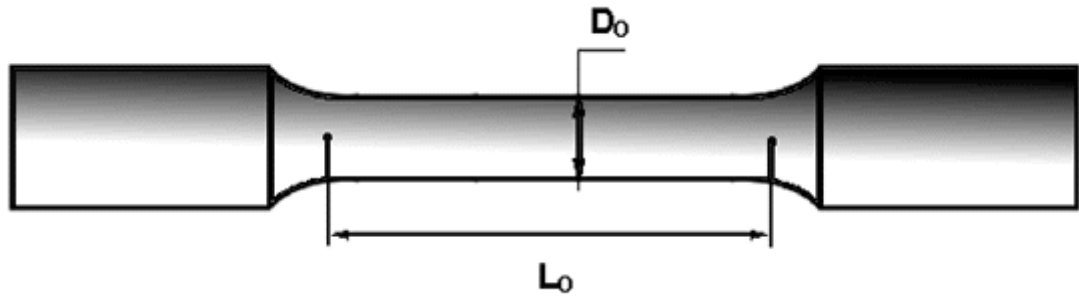


*Imagen 2.2 Ensayo de la probeta en la Instron*

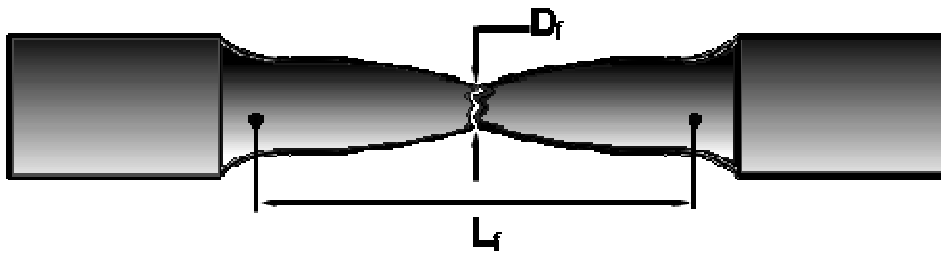
Procedimiento:

Han de tomarse mediciones de alargamiento, por lo tanto lo primero que hacemos es marcar el tramo de calibración ( $L_0$ ) rayando el material, estas marcas han de ser ligeras para no dañarlo. También es importante medir antes del ensayo la sección ( $S_0$ ) de la zona calibrada.

$$S_0 = d_0 \times \text{espesor}$$



Se coloca la probeta en los dispositivos de sujeción, y se comprueba su correcta sujeción y posicionamiento. La velocidad del ensayo nos la marca la norma ISO 6892.



Una vez que la probeta ha fallado, se retira esta de la máquina de ensayo y se toman las mediciones de los valores de alargamiento. Los extremos rotos de la probeta se juntan, y se mide la distancia entre los puntos de referencia. También se mide el diámetro de la sección más pequeña.



*Imagen 2.3 Fallo de la probeta*



Una vez tomados estos datos, ya estamos en condiciones de realizar la curva tensión-deformación resultante del ensayo, la cual se construye representando la tensión frente al alargamiento de la probeta.

$$\sigma = F_o/S_o$$

F<sub>o</sub> = Fuerza aplicada

S<sub>o</sub> = Sección inicial del material

$$(L-L_o)/L_o \times 100$$

L = Longitud de la probeta tras el ensayo

L<sub>o</sub> = Longitud inicial de la probeta

Las propiedades más importantes que se pueden medir en la curva tensión deformación son:

- Modulo elástico o modulo de Young, E.

Es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico. El tramo inicial de la curva, que generalmente es recto, nos informa del comportamiento elástico del material, es decir son las deformaciones en las que el material puede recuperar su forma inicial. El módulo de Young en ese tramo es constante y es la pendiente de la curva o lo que es lo mismo, la relación entre la tensión y la deformación que sufre la probeta.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

- El límite elástico.

Es la tensión mínima que hay que aplicar para que aparezcan deformaciones permanentes en el material. Se define el límite elástico convencional, R<sub>p</sub>, como el esfuerzo necesario para provocar una deformación plástica predefinida. En la gráfica, se trata del punto de la curva donde la misma deja de ser recta y pasa a curvarse.

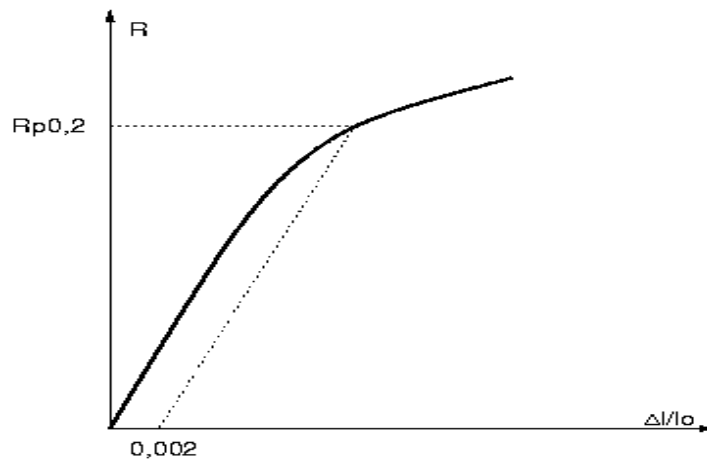


Imagen 2.4 Punto del límite elástico

- La resistencia a la tracción,  $R_m$ .

Coincide con el valor máximo del esfuerzo y es la tensión que hay que aplicar para que se produzca la rotura de la probeta en las condiciones del ensayo. Mientras la tensión aplicada es menor a  $R_m$ , la deformación es uniforme, pero al alcanzar esta tensión comienza a desarrollarse un cuello en la probeta. La reducción localizada de sección hace que la tensión que actúa en esa sección crezca localmente lo que provoca un nuevo aumento del alargamiento en la zona del cuello con la consiguiente caída de la tensión nominal. Este proceso continúa hasta que la sección no es capaz de seguir deformándose y se produce la fractura.

- El alargamiento a la rotura,  $A_t$ .

Es la extensión que presenta la probeta tras el fallo. Esta propiedad es una medida indirecta de la ductilidad del material. Un alargamiento a la rotura elevado es una propiedad deseable porque los materiales con esta propiedad admiten deformaciones plásticas importantes, cuya observación, en muchas ocasiones, permite adoptar medidas correctoras con anterioridad a la fractura.

- La estricción,  $Z$ .

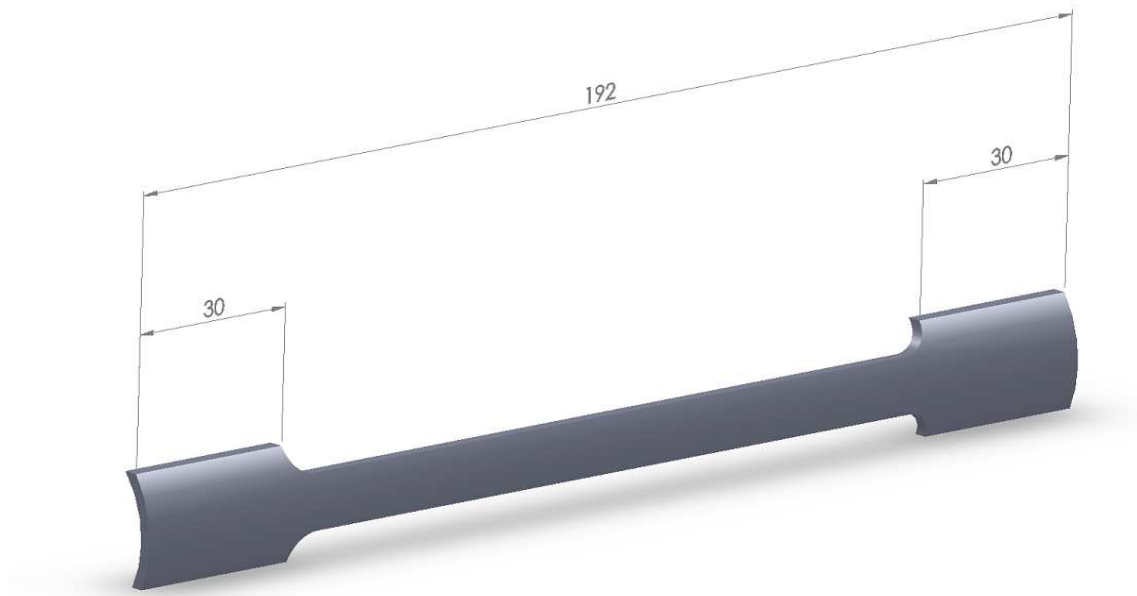
Es la relación entre las áreas de las secciones rectas de rotura e inicial. La estricción está relacionada con el alargamiento a la rotura de modo que cuando este crece, aquella aumenta.





### 2.1.3 GEOMETRÍA

La geometría de las probetas está normalizada en su forma según la norma UNE EN ISO 6892-1 de 2010 donde quedan reflejadas las características de las mismas así como las dimensiones que se han de medir para realizar el estudio de su caracterización.



*Imagen 2.5 Geometría probeta.*



*Imagen 2.6 Geometría probeta.*

La medida del nervio interior más estrecho es la zona principal de estudio de las características y es la que se debe medir tanto antes como después del ensayo para localizar las deformaciones, es la zona por la que se va a fracturar el material. La zona de los extremos, más gruesa, es la que servirá para amarrar la pieza a la máquina de ensayo.



*Imagen 2.7 Geometría probeta.*

El grosor de los tubos es de 2 milímetros.

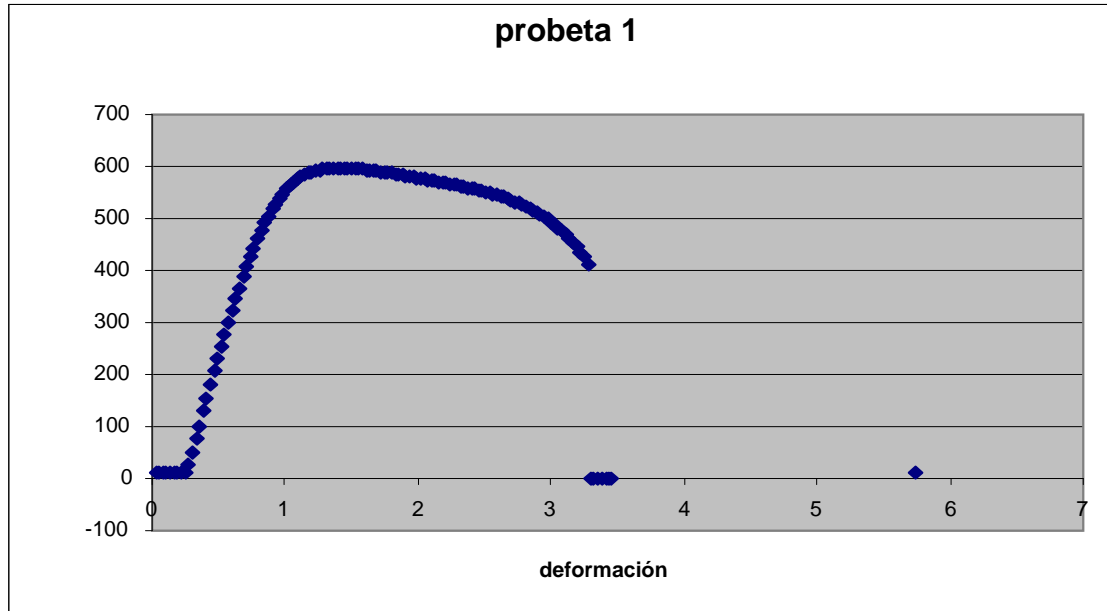
#### **2.1.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES**

A continuación se muestran las curvas tensión-deformación obtenidas mediante el ensayo en la Instron en el laboratorio, de ambos materiales:

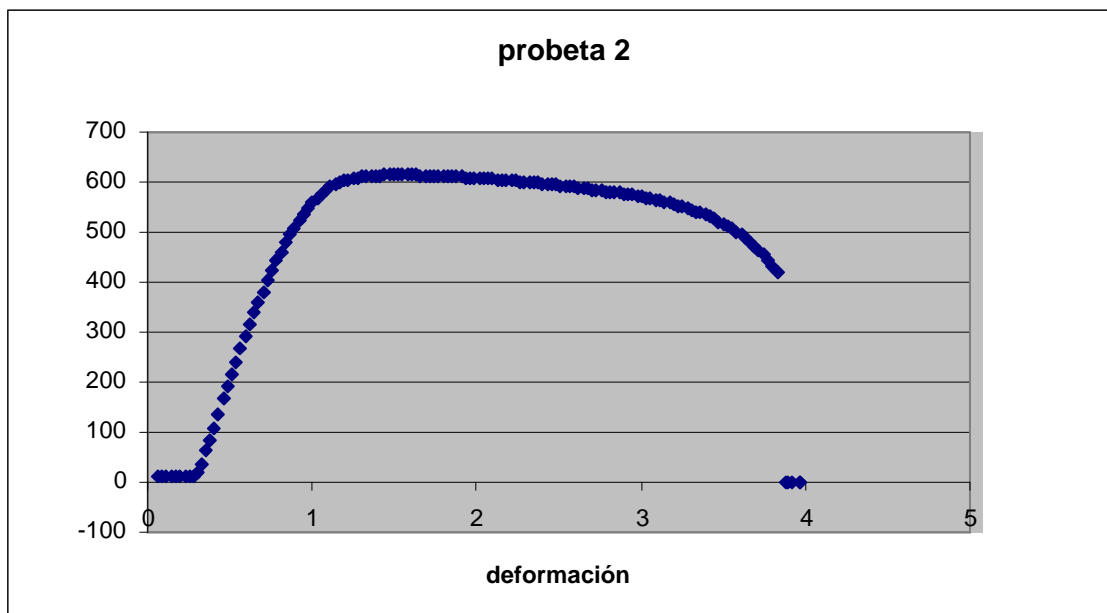
Las unidades utilizadas en estas gráficas son Megapascales para la tensión y milímetros para las deformaciones.



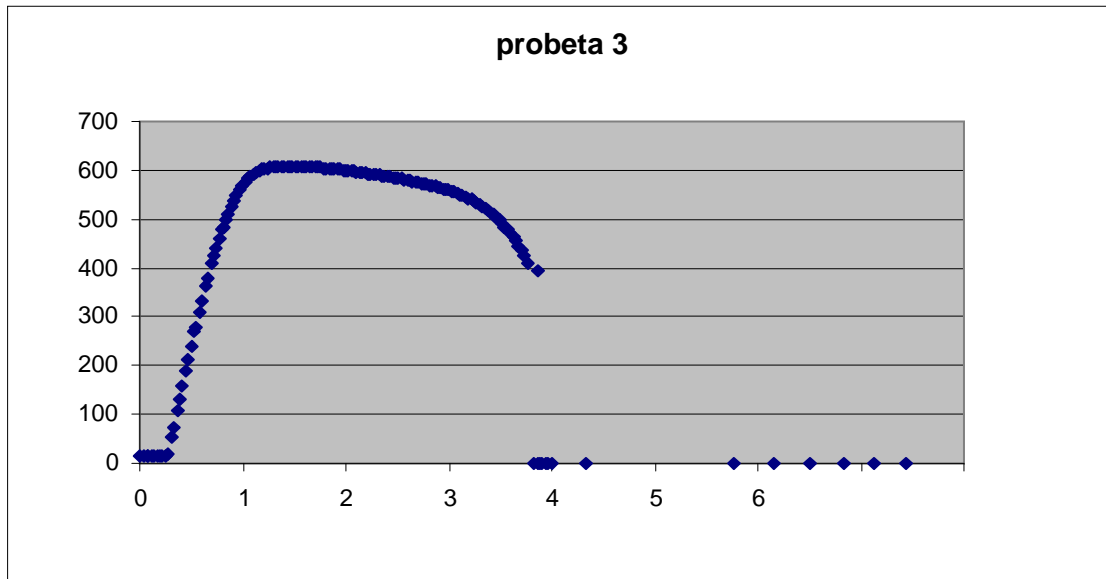
## MATERIAL 1



Gráfica 2.1 Gráfica tensión-deformación probeta 1.



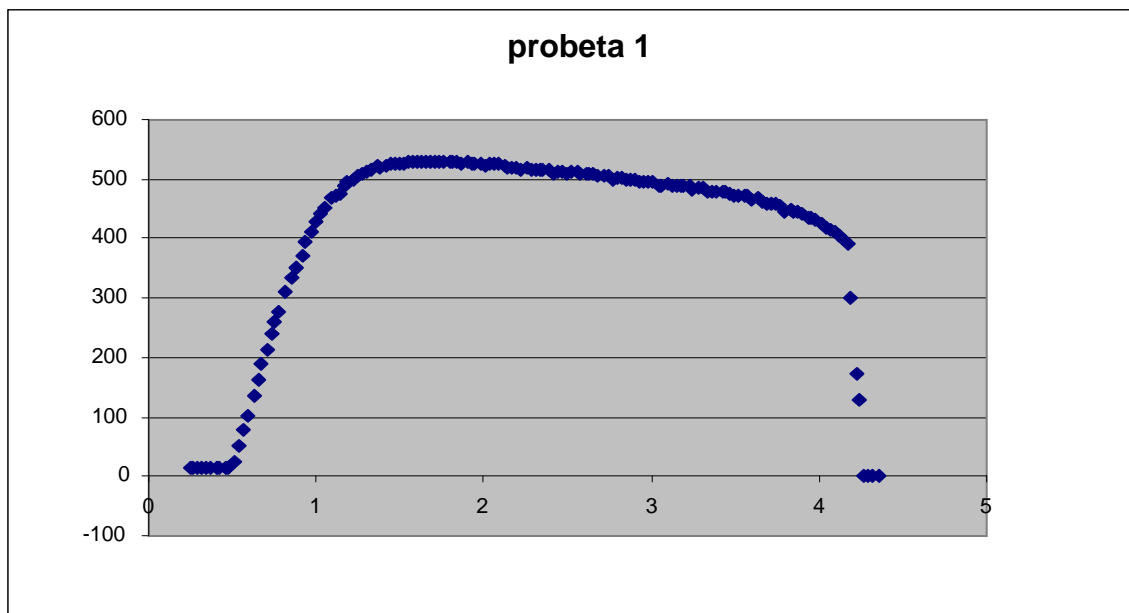
Gráfica 2.2 Gráfica tensión-deformación probeta 2.



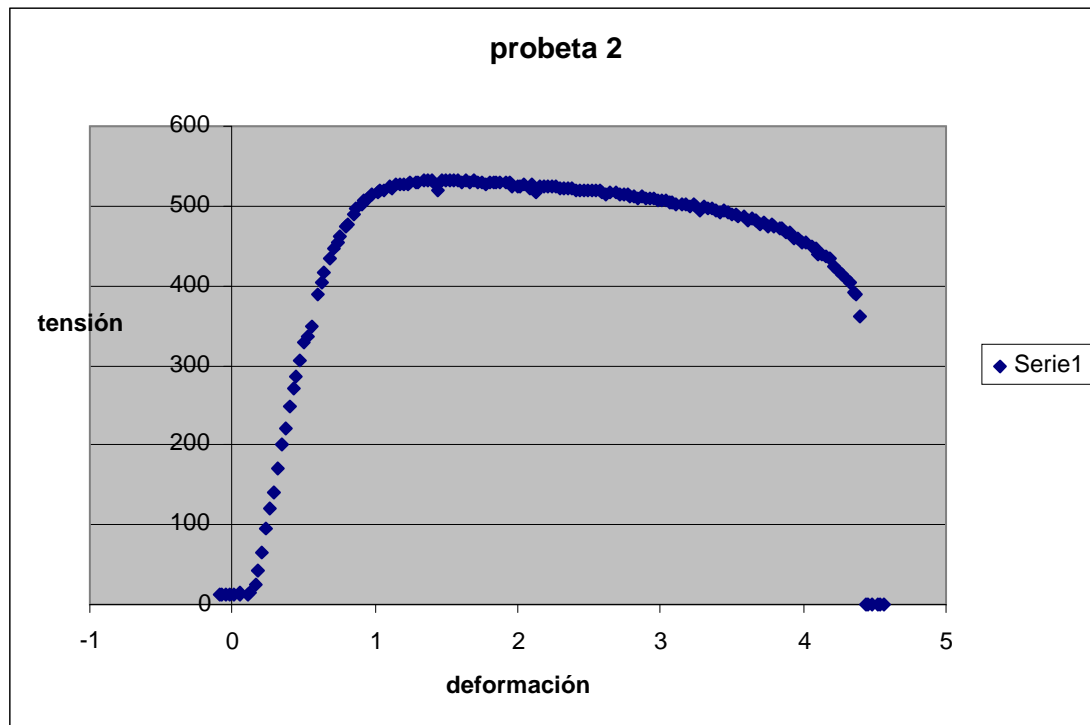
Gráfica 2.3 Gráfica tensión-deformación probeta 3.

Al tratarse del mismo material, los valores obtenidos en las curvas con las tres probetas resultan bastante similares como cabía esperar.

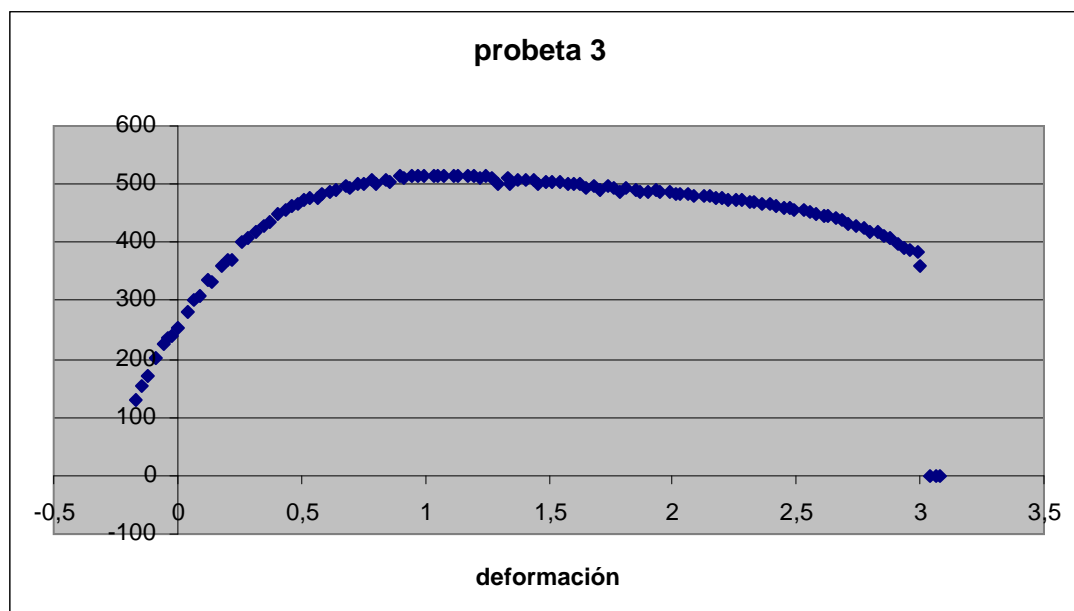
## MATERIAL 2



Gráfica 2.4 Gráfica tensión-deformación probeta 1.



Gráfica 2.5 Gráfica tensión-deformación probeta 2.



Gráfica 2.6 Gráfica tensión-deformación probeta 3.

En este segundo material también se obtienen unos valores similares en las tres probetas.

## 2.2 TUBO

### 2.2.1 GEOMETRÍA

Para realizar el ensayo real en el laboratorio de los tubos disponemos de dos muestras de idénticas dimensiones pero de distinto material.

Las dimensiones que caracterizan las muestras son las siguientes:

- Diámetro exterior del tubo = 80mm.
- Diámetro interior del tubo = 78mm.
- Longitud del tubo = 500mm.
- Espesor = 2mm



*Imagen 2.8 Geometría del tubo.*

Los tubos tienen cuatro orificios pasantes que atraviesan el material transversalmente de forma simétrica con respecto a los ejes de coordenadas.



Dichos orificios se sitúan a 150mm de uno de los extremos del tubo y tienen una dimensión de 10mm de diámetro cada uno de ellos.

## 2.2.2 ENSAYOS

Se realizan dos tipos de ensayos con los tubos de los que se disponen.

El primero de ellos corresponde a un ensayo de compresión en la máquina de marca Instron, anteriormente utilizada para la realización de los ensayos de tracción de las probetas.

El segundo ensayo se realiza en el SLED, máquina para la que se van diseñar los tubos, las cargas y condiciones que se dan en este ensayo son las que soportarán los tubos una vez diseñados.

### 2.2.2.1 ENSAYO EN LA INSTRON

Como ya se ha comentado anteriormente, la Instron es una máquina diseñada para realizar ensayos de tracción-compresión homologada a todos los efectos para realizar este tipo de ensayos.

Se trata de un ensayo técnico que determina la resistencia de un material o su deformación ante un esfuerzo de compresión.

Este ensayo se realiza en el laboratorio del área de mecánica de la EUITIZ.



*Imagen 2.9 Resultado de los ensayos en la Instron*

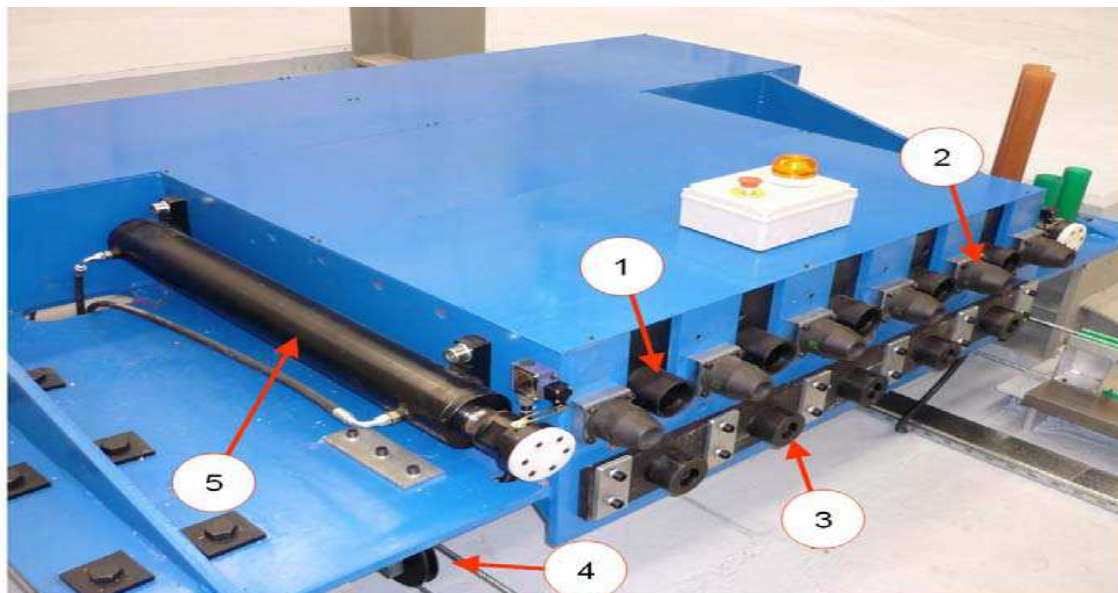
La finalidad de este ensayo es la de obtener la curva fuerza-desplazamiento de cada uno de los dos materiales sometidos a fuerzas de compresión, puesto que es a compresión como trabajarán una vez instalados en el SLED.

Conocida la curva fuerza-desplazamiento de ambos materiales, se puede generar un modelo mediante programas de simulación numérica de tal manera que se ajusten a los datos que nos ofrecen los ensayos físicos reales.

### 2.2.2.2 ENSAYO EN EL SLED

Para la realización de este ensayo se utilizan tubos con la geometría anteriormente comentada de uno de los materiales estudiados, el material 1, por no tener disponibilidad de tubos suficientes del otro material.

Los tubos se sitúan en la barrera de impacto del carro principal del SLED, absorbiendo toda la energía del impacto convirtiéndola en energía de deformación. Este es el sistema que utiliza el SLED para detener el carro en unas condiciones que simulan una colisión de un vehículo en la realidad. Estas condiciones están reguladas en el reglamento número 44 de la UNECE .



*Imagen 2.10 Barrera de impacto*

Para realizar correctamente este ensayo se deben colocar los tubos en la barrera de impacto, pieza que se observa en la foto, para recibir el impacto del carro principal que viene según la dirección longitudinal de los tubos.

El impacto comprimirá los tubos deformándolos según unas condiciones que se deberán estudiar. La finalidad de este ensayo será obtener la curva

aceleración-tiempo de la deformación de los tubos según las condiciones a las que trabajan en el SLED. En este ensayo se le da más importancia a la aceleración de la deformación en el tiempo porque será equivalente a la deceleración del carro principal, y este parámetro está definido en el reglamento número 44 de la UNECE.

Los datos obtenidos en este ensayo son orientativos acerca de cómo se van a comportar los tubos en situaciones reales y si están dentro del rango marcado por la normativa, su estudio detallado está fuera de los objetivos marcados en este proyecto.

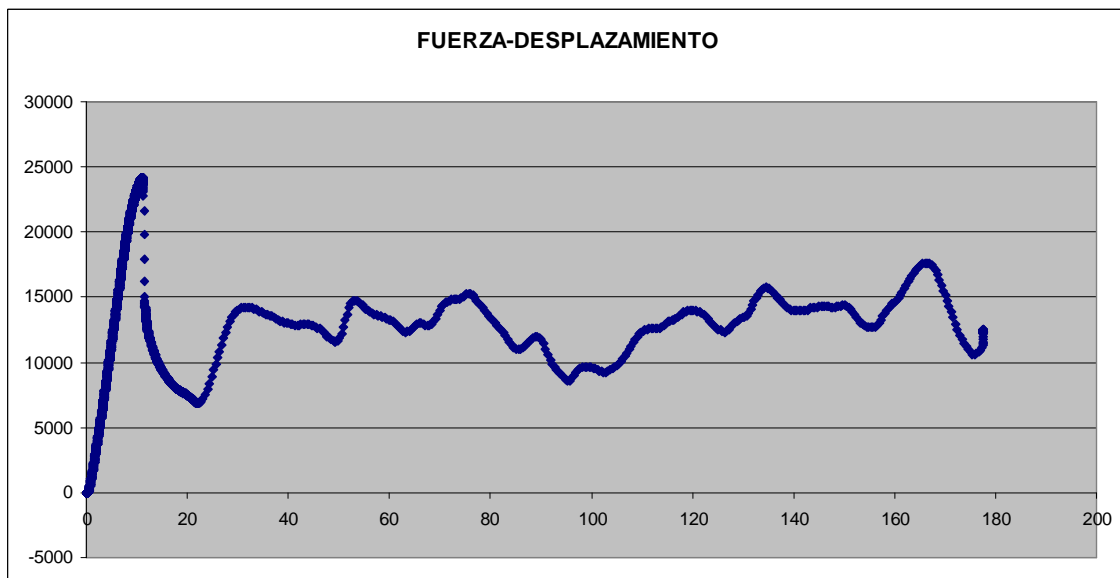
## 2.2.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este punto se pueden observar los resultados obtenidos tras los ensayos experimentales ya sea en el laboratorio con la Instron o en el SLED.

### 2.2.3.1 TUBO DEL PRIMER MATERIAL

Tras el ensayo con la Instron se obtiene la siguiente gráfica con la curva fuerza-desplazamiento del material:

Las unidades son Newton-Milímetros.

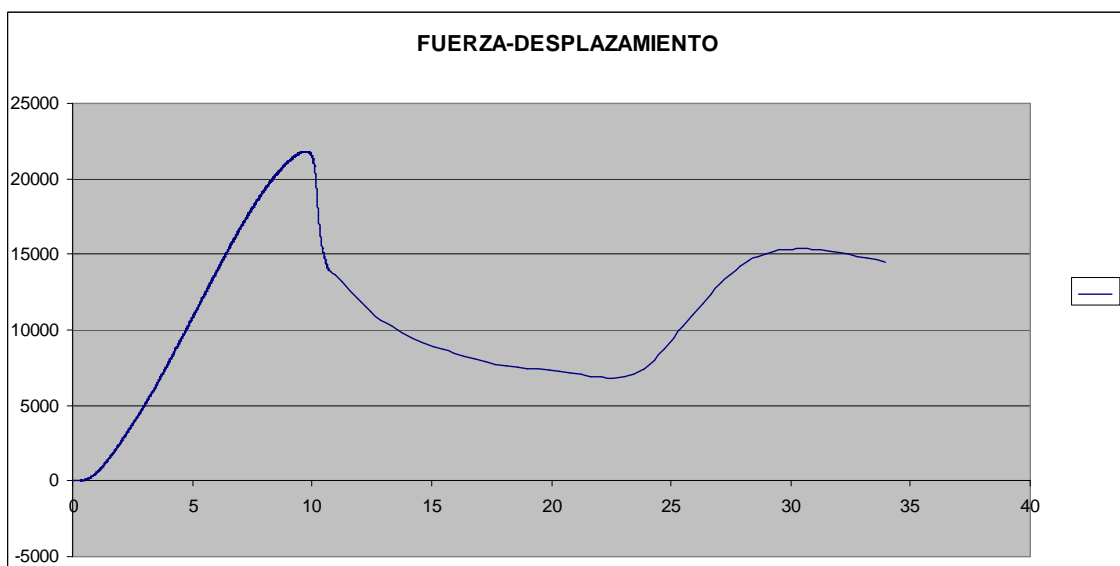


Gráfica 2.7 Gráfica fuerza-desplazamiento del tubo 1.

### 2.2.3.2 TUBO DEL SEGUNDO MATERIAL

Tras el ensayo con la Instron se obtiene la siguiente gráfica con la curva fuerza-desplazamiento del material:

Las unidades son Newton-milímetros



Gráfica 2.8 Gráfica fuerza-desplazamiento del tubo 2.

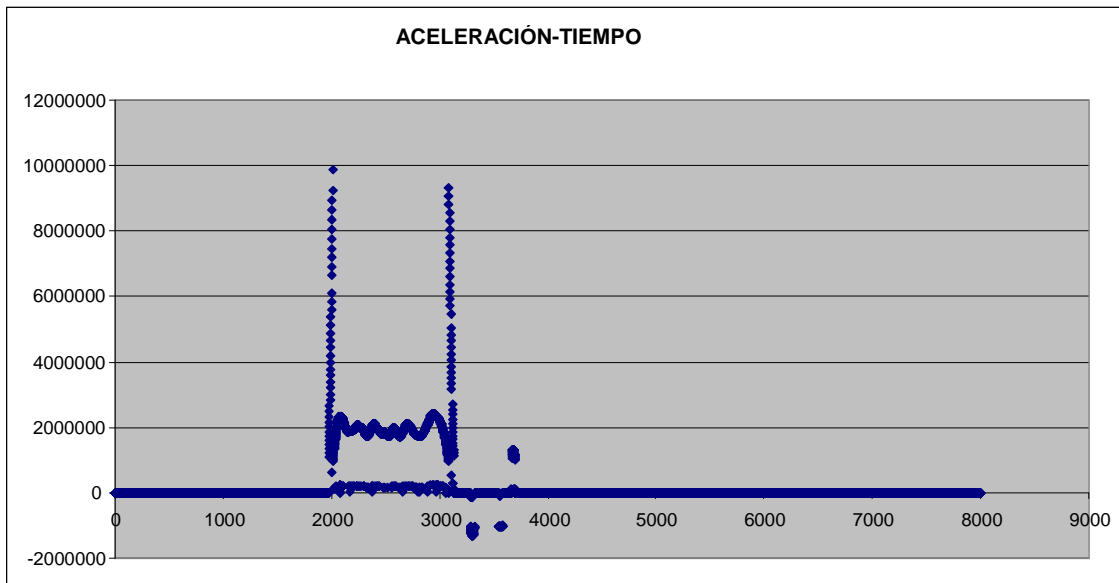
Estos resultados tendrán que ser comparados con los obtenidos mediante la simulación informática según se ha explicado en la fase cuatro del proyecto.

Tras esa comparación se deberá ser capaz de dar validez o desestimar los resultados obtenidos mediante el método de los elementos finitos, para utilizar este método en las posteriores investigaciones.

### 2.2.3.3 TUBO EN EL SLED

Ésta es la gráfica obtenida tras el ensayo con el SLED, en este ensayo se pretende estudiar la aceleración de la deformación de los tubos.

Las unidades utilizadas en la gráfica son fuerza g-miliseundos



Gráfica 2.9 Gráfica aceleración-tiempo del tubo 1.

Con esta gráfica se pueden estudiar las aceleraciones a las que se somete el carro durante la colisión con la barrera de impacto, puesto que es igual a la que están sometidos los tubos.

### 3 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

En el caso de este proyecto, se necesita caracterizar dos tipos diferentes de materiales que son con los que vamos a trabajar y los que vamos a estudiar su comportamiento.

Se han estudiado tres probetas con las mismas dimensiones y características para cada uno de los dos materiales que se van a ensayar.

Como se ha comentado antes, se han sometido las seis probetas a un ensayo de tracción en máquina Instron. Para realizar el ensayo correctamente se ha utilizado la norma ISO 6892 que indica el método de ensayo de tracción a temperatura ambiente en materiales metálicos.

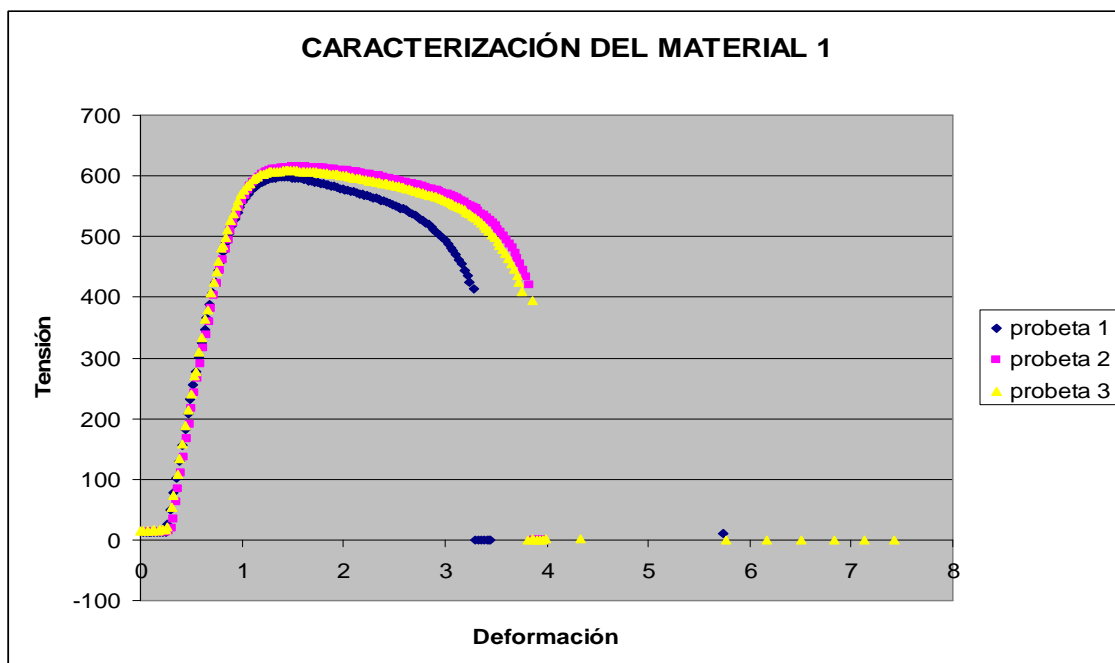
Con este experimento se ha obtenido la curva esfuerzo-deformación de cada una de las probetas, las de las tres primeras corresponden al material 1 y las de las tres finales corresponden al material 2.

El objetivo de utilizar tres probetas por cada material es para asegurarse que el resultado es correcto y evitar un posible ensayo error.

El resultado de la caracterización de los materiales será, como se observa a continuación, el valor promedio de la superposición de las tres gráficas. De este modo se afina más en el resultado obtenido.

Las unidades están en Megapascuales-milímetros

#### MATERIAL 1

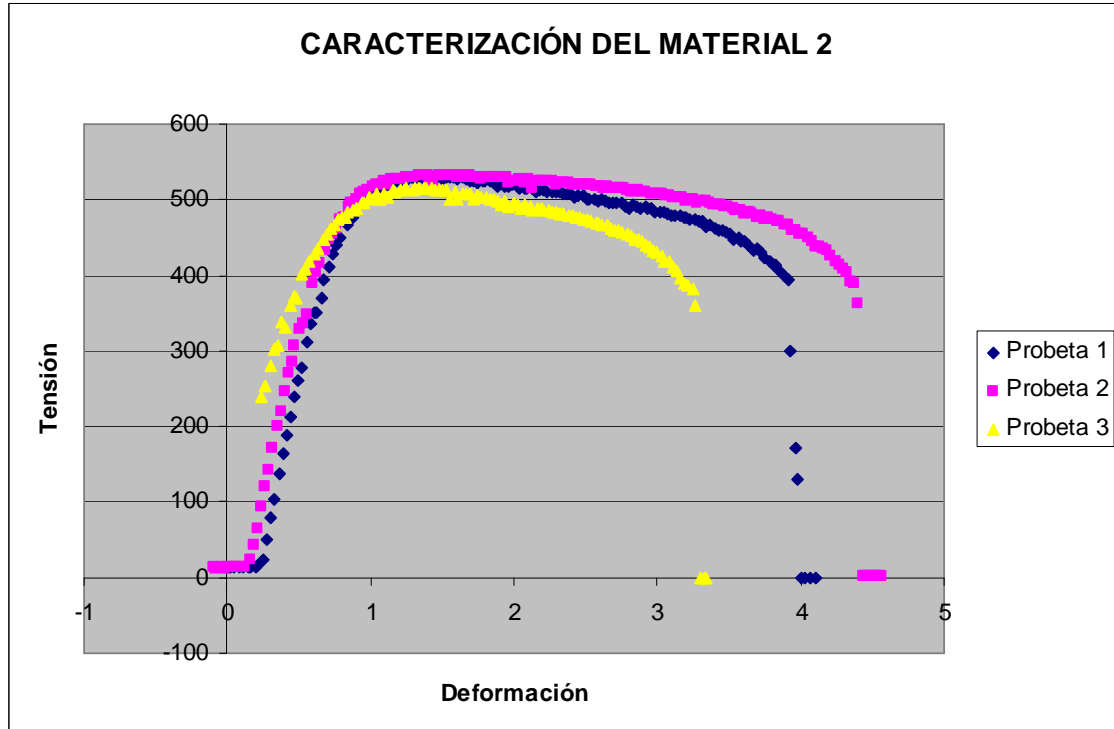


Gráfica 3.1 Caracterización del material 1





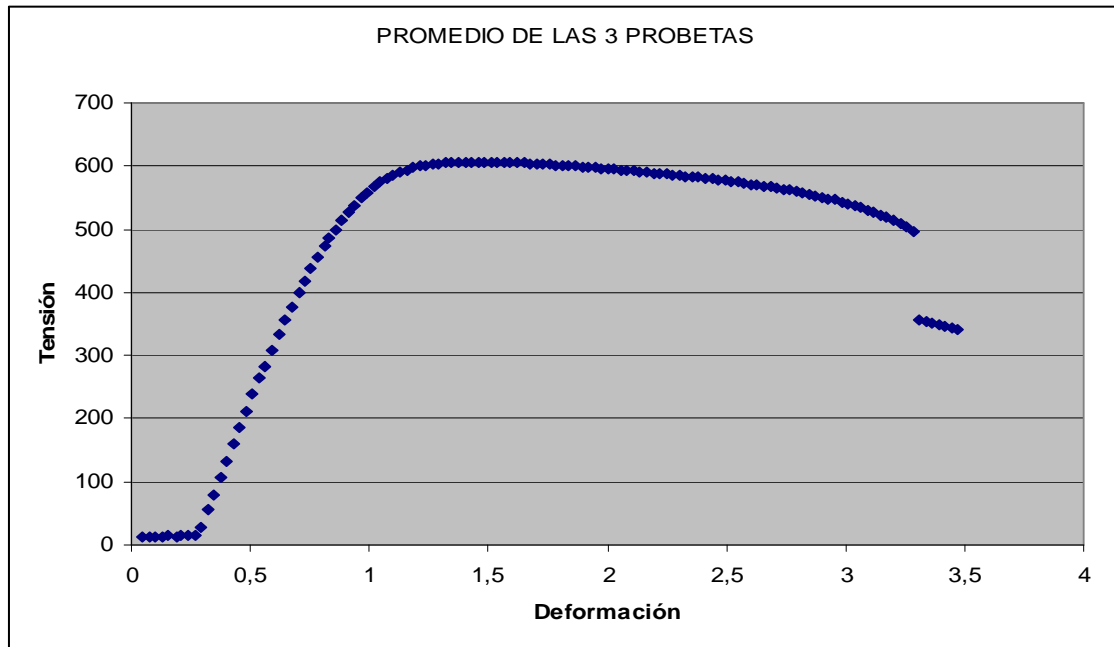
## MATERIAL 2



Gráfica 3.2 Caracterización del material 2.

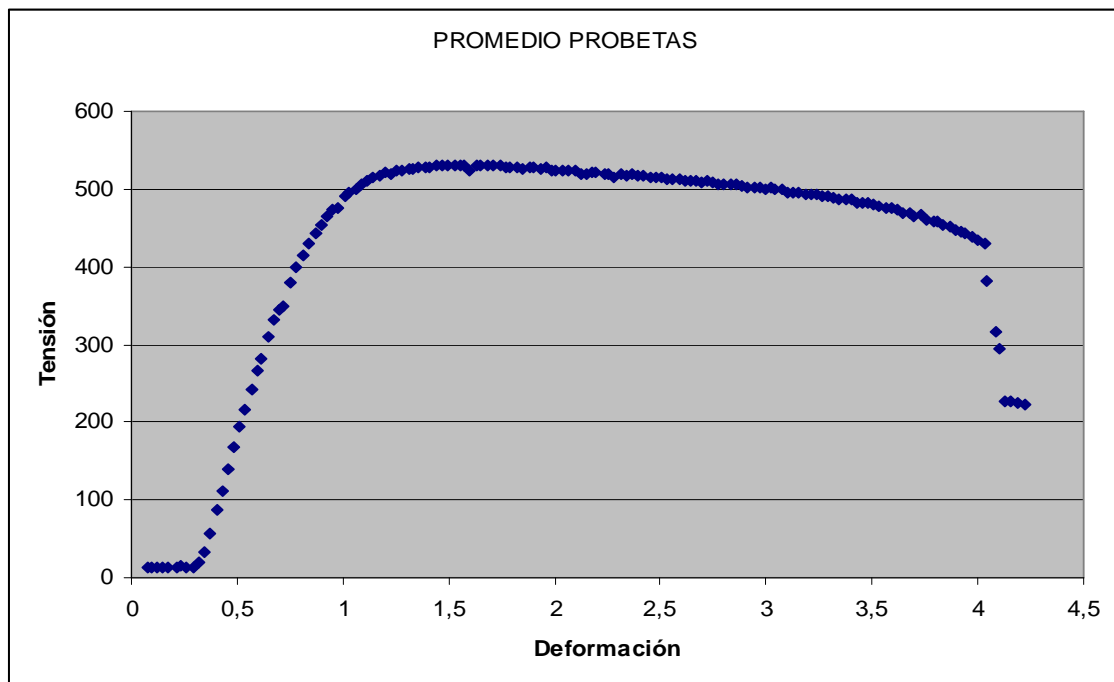
Combinando las tres curvas esfuerzo-deformación de cada material obtenemos una única curva correspondiente a cada uno de los materiales, y con esta curva trabajaremos en la caracterización de los mismos.

## MATERIAL 1



Gráfica 3.3 Caracterización del material 1.

## MATERIAL 2



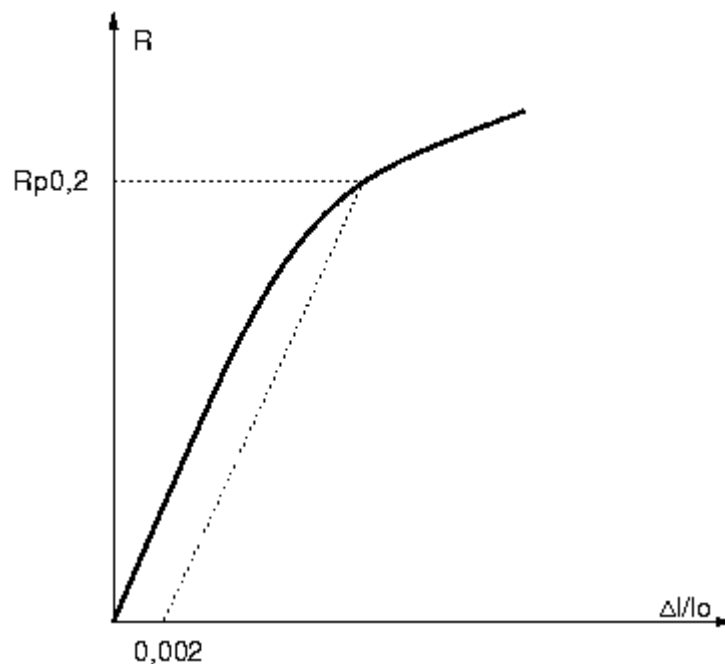
Gráfica 3.4 Caracterización del material 2.

Para caracterizar los materiales necesitareé extraer de la gráfica los valores del límite elástico convencional y la resistencia máxima a tracción o límite de fluencia.

- Límite elástico convencional:

Es la tensión máxima que un material elástico puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes.

En la gráfica esfuerzo-deformación, es el punto donde la curva deja de ascender con pendiente constante. Debido a la dificultad para localizar el punto con exactitud, ya que en los gráficos experimentales la recta es difícil de determinar, en ingeniería se adopta un criterio convencional y se considera como límite elástico la tensión a la cual el material tiene una deformación plástica del 0.2%. Este dato queda reflejado en la norma ISO 6892.



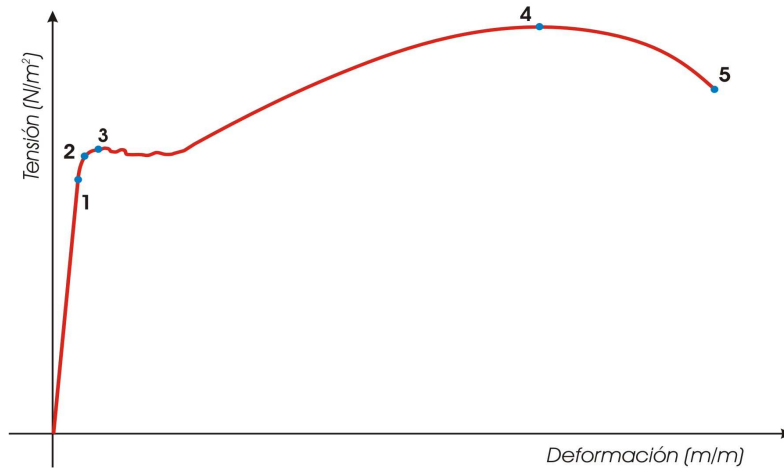
Gráfica 3.5 Limite elástico.

- Resistencia máxima a tracción o límite de fluencia:

Es el punto a partir del cual el material se deforma plásticamente. Hasta esa tensión el material se comporta elásticamente, siguiendo la ley de Hooke, y por tanto se puede definir el módulo de Young.



En la gráfica esfuerzo-deformación es el punto donde la curva alcanza su punto más alto y comienza a descender.



Gráfica 3.6 Limite de fluencia

Por lo tanto y según las gráficas los resultados que hemos alcanzado son los siguientes:

• MATERIAL 1

Límite elástico convencional: 428 Mpas

Límite de fluencia: 608,08 Mpas

• MATERIAL 2

Límite elástico convencional: 440 Mpas

Límite de fluencia: 554,66 Mpas

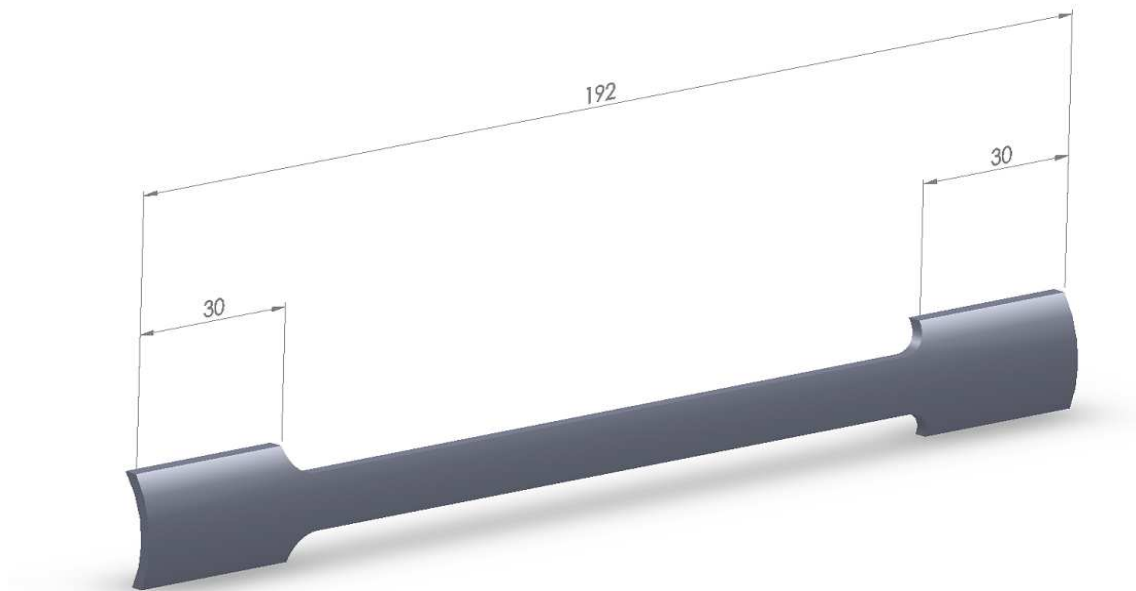
## 4 ENSAYO CON SIMULACIÓN NUMÉRICA

### 4.1 PROBETA

#### 4.1.1 GEOMETRÍA

La geometría de la probeta se diseña mediante un programa de CAD denominado Solid Works con el cual se representa de manera idéntica la probeta real. Las dimensiones de la misma son idénticas a las que he comentado anteriormente cuando se hacía referencia a la geometría de la probeta en el modelo físico, puesto que el estudio es exactamente el mismo.

A continuación se ven las imágenes detalladas de la geometría de la probeta:



*Imagen 4.1 Geometría probeta*



*Imagen 4.2 Geometría probeta*



*Imagen 4.3 Geometría probeta*

### 4.1.2 DISCRETIZACIÓN

En este apartado se muestran los detalles referentes al estudio mediante el método de los elementos finitos. Es el paso más importante del proyecto puesto que nos permitirá afinar más o menos el resultado que se quiere obtener.

Consiste en hacer que el modelo pase a estar formado por cubos o celdas (shells) para que así el motor de cálculo de Patran sea capaz de sacar resultados lo mas próximos posibles a la realidad gracias al método de los elementos finitos.

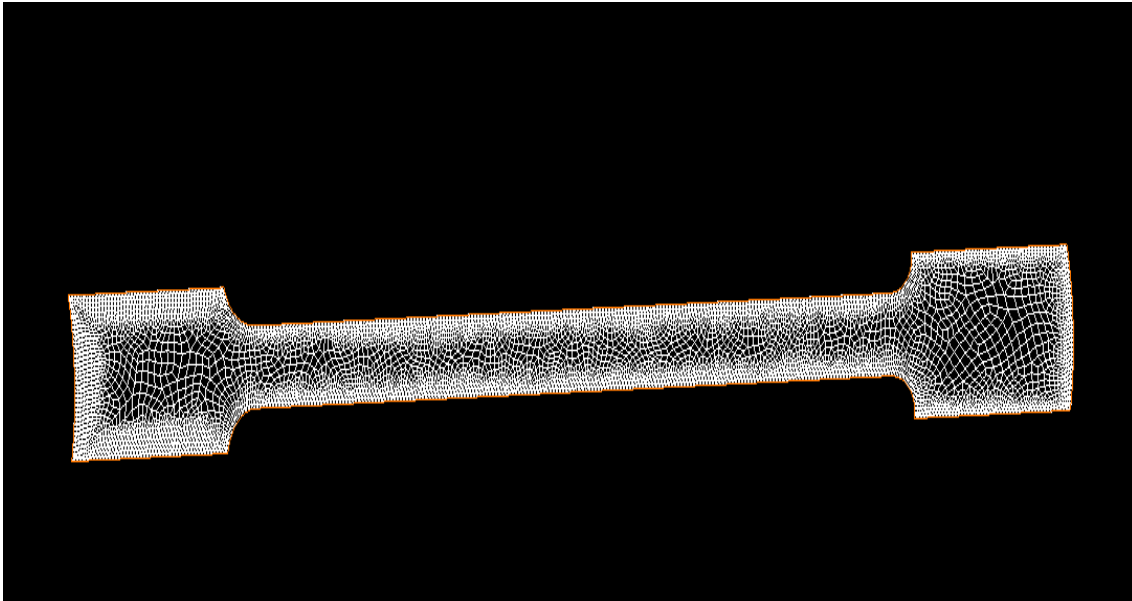
Este proceso de mallado se realiza con el programa de pre-proceso Patran, una vez importado el modelo de Solid Works y creada la geometría con Patran.

En primer lugar puesto que el modelo a analizar es simétrico se parte por el eje de simetría para agilizar el mallado.



*Imagen 4.4 Simetría de la probeta*

Como se trata de un modelo con irregularidades, ya que en sí mismo es un fragmento de un tubo y por lo tanto es una superficie curvilínea, lo que se hace es utilizar la herramienta "MESH SEED", que sirve para homogeneizar la malla en 2 dimensiones. En este caso la creación de la malla se hará con la función "PAVER" para que al extruir la malla quede compacta, y se crearán celdas separadas entre sí 0,3 milímetros.



*Imagen 4.5 Probeta discretizada*

El modelo completo de la probeta tiene aproximadamente 2.516 elementos y 2.940 nodos. Son todos de tipo lámina con cuatro nodos y doble curvatura, también denominados S4R. En el Anexo B se explica con detalle los elementos del modelo así como su situación.

### **4.1.3 CARGA Y CONDICIONES DE CONTORNO**

#### **4.1.3.1 CONDICIONES DE CONTORNO**

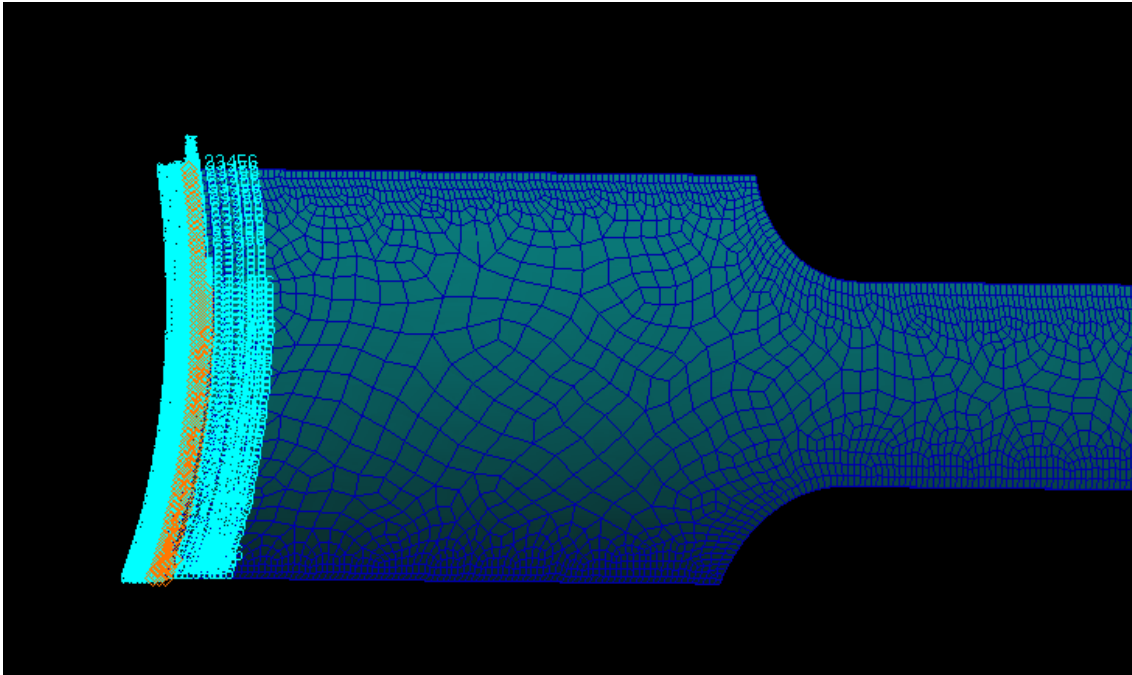
En este apartado se mostrará las partes del modelo a las que se les impone alguna restricción en el movimiento. Al asignar tanto las condiciones de contorno como las solicitaciones de carga se busca la máxima realidad del comportamiento del modelo en la realidad.

En este modelo, lo que se simula es un ensayo de tracción en el cual dos mordazas sujetan la probeta por ambos extremos. Una de las mordazas impide el movimiento del extremo de la probeta en los tres grados de libertad mientras que la otra impide el desplazamiento en el eje perpendicular a la cara de la probeta y el giro, pero permite el desplazamiento en el eje longitudinal de la probeta.





Todo esto queda reflejado en la siguiente imagen:

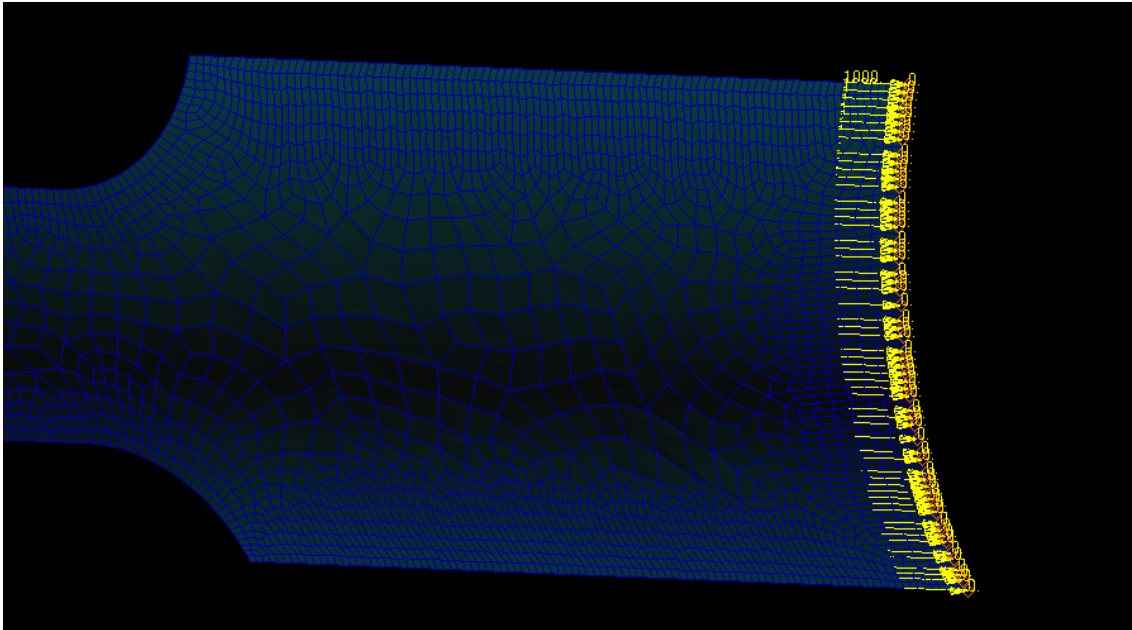


*Imagen 4.6 Grados de libertad probeta*

Estas imposiciones se aplican en la pestaña “LOAD BC’S” del programa de pre-proceso PATRAN seleccionando los nodos que se quieran impedir de alguna manera.

#### 4.1.3.2 CARGA Y ACCIÓN DE LAS FUERZAS

Una vez han quedado impuestas las condiciones de contorno es necesario ver las caras concretas del modelo sobre las que las fuerzas van a actuar.



*Imagen 4.7 Cargas probeta*

Como se aprecia en la imagen, al tratarse de la simulación de un ensayo de tracción, las fuerzas actúan en la cara del extremo en el que no está restringido su movimiento longitudinal, de esta forma se produce una deformación en el mismo sentido del movimiento hasta conseguir la fractura total de la probeta.

#### **4.1.4 MATERIALES**

Para la realización de este proyecto disponemos de dos tipos de acero diferentes. Precisamente para su caracterización se realiza este ensayo de tracción con diversas probetas de ambos materiales.

A continuación, en las siguientes tablas se muestran sus propiedades más relevantes, y las que por lo tanto serán introducidas en el apartado de materiales de nuestro pre-proceso.

Las propiedades se han calculado anteriormente en el apartado de “caracterización del material”.

## MATERIAL 1

PROPIEDADES		UNIDADES	
E	Módulo elástico	210000	MPa
v	Coeficiente de Poissón	0,3	Adimensional
$\rho$	Densidad	7800	Kg/m <sup>3</sup>
Rp	Límite elástico	428	Mpa
Rm	Límite de fluencia	608,08	Mpa

## MATERIAL 2

PROPIEDADES		UNIDADES	
E	Módulo elástico	210000	MPa
v	Coeficiente de Poissón	0,3	Adimensional
$\rho$	Densidad	7800	Kg/m <sup>3</sup>
Rp	Límite elástico	440	Mpa
Rm	Límite de fluencia	554,66	Mpa

### 4.1.5 RESULTADOS

Una vez ya lanzado el modelo mediante el programa de cálculo por elementos finitos "Abaqus", ya se pueden estudiar los resultados que más interesantes resulten para la resolución del proyecto. El objetivo de este ensayo es comprobar que el modelo informático se comporta de la misma forma que el físico al introducir los mismos parámetros y características en cada uno de los materiales.

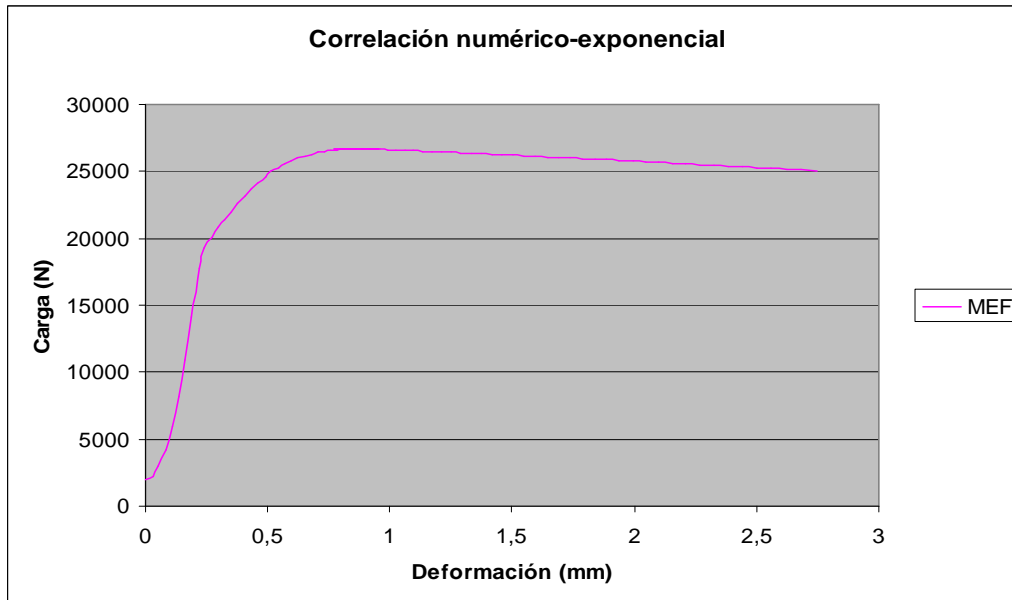
Para poder comparar los modelos se necesita extraer la curva tensión-deformación de cada uno de los materiales, puesto que esa curva ya se ha obtenido en el ensayo del laboratorio. Más adelante será necesario comprobar que las gráficas reales e informáticas coinciden para dar por válido el modelo informático realizado mediante el cálculo a través de elementos finitos.

A continuación se exponen los resultados obtenidos mediante el simulador matemático Abaqus. Resultados que se evaluarán y compararán en posteriores apartados.



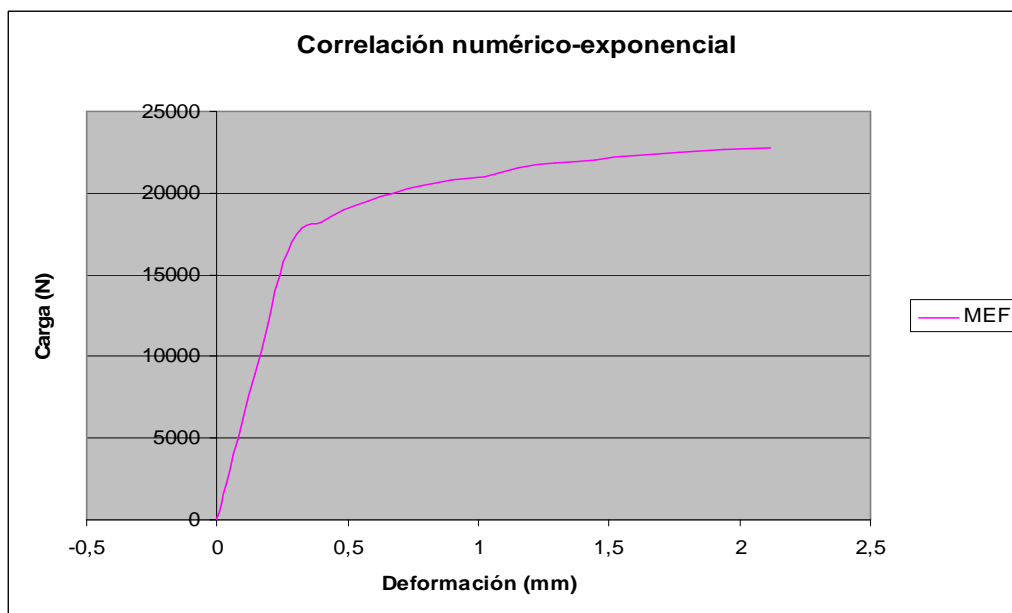
Las unidades utilizadas son Newton-milímetros

## MATERIAL 1



Gráfica 4.1 Curva tensión-deformación probeta 1

## MATERIAL 2



Gráfica 4.2 Curva tensión-deformación probeta 2

## 4.2 TUBOS

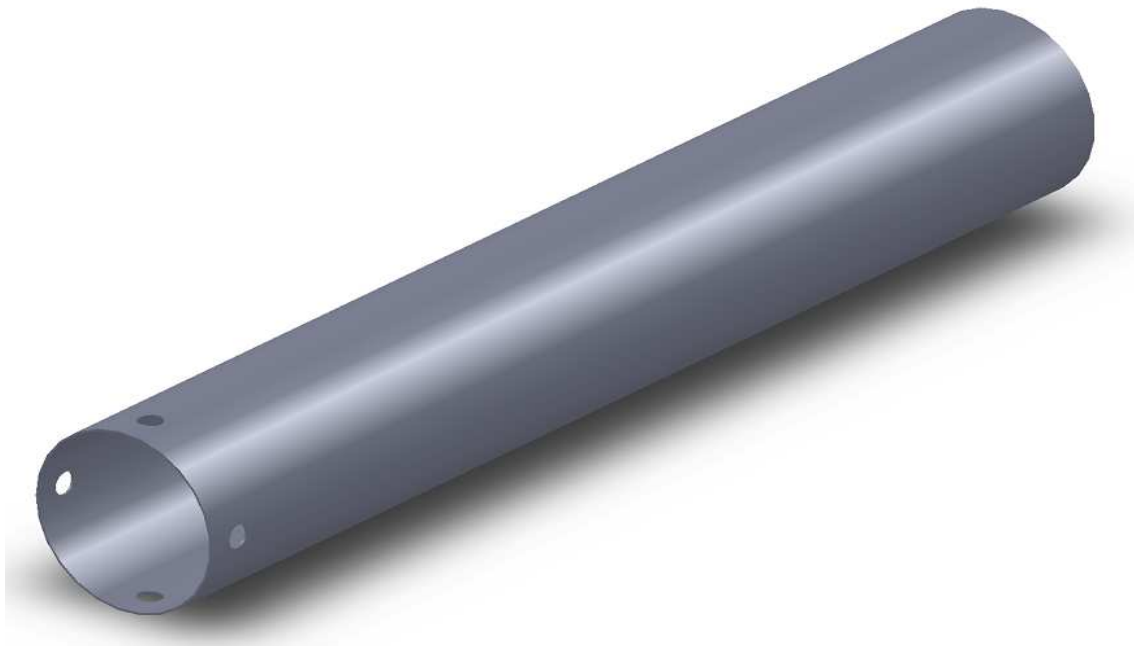
### 4.2.1 GEOMETRÍA

La geometría de los tubos se diseña, al igual que la de las probetas, mediante un programa de CAD denominado Solid Works, con el cual se representan los modelos reales. Las dimensiones de los mismos son idénticas a las que se han comentado anteriormente cuando se hacía referencia a la geometría de los tubos en el modelo real.

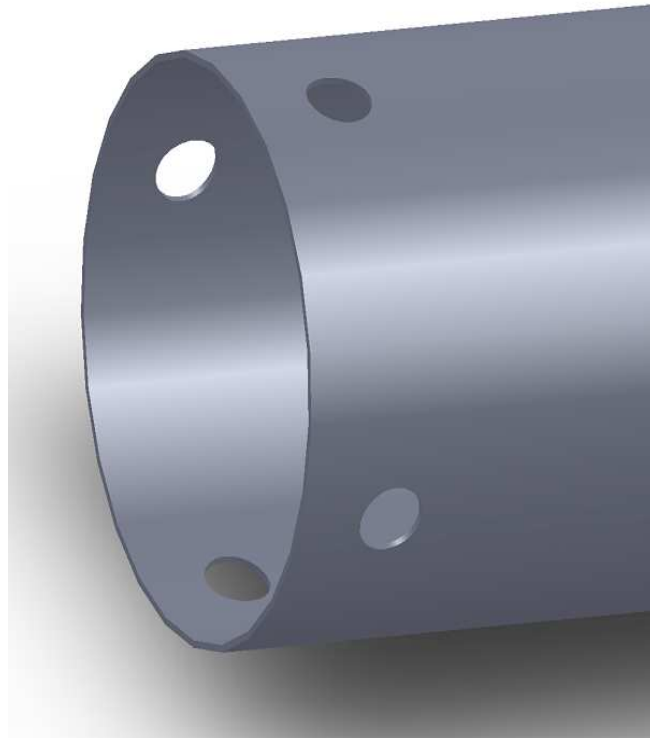
Se trata de dos tubos idénticos en cuanto a su geometría compuestos de los dos materiales que vamos a estudiar, tal y como se estudió anteriormente con las probetas.

A continuación se ven las imágenes detalladas de la geometría de los tubos:

- Diámetro exterior del tubo = 80mm.
- Diámetro interior del tubo = 78mm.
- Longitud del tubo = 500mm.
- Espesor = 2mm



*Imagen 4.8 Detalle tubo con Solid Works*



*Imagen 4.9 Detalle orificios*

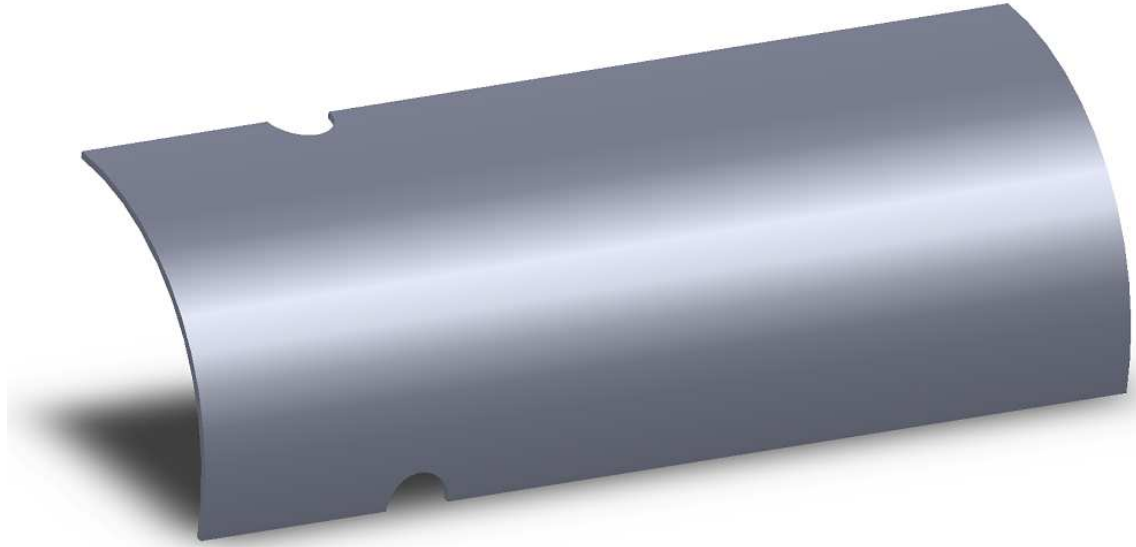
Los tubos tienen cuatro orificios pasantes que atraviesan el material transversalmente de forma simétrica con respecto a los ejes de coordenadas. Dichos orificios se sitúan a 150mm de uno de los extremos del tubo y tienen una dimensión de 10mm de diámetro cada uno de ellos.

#### **4.2.2 DISCRETIZACIÓN**

La discretización del modelo de los tubos se realiza exactamente de la misma manera que las probetas.

Este proceso de mallado se realiza con el programa de pre-proceso Patran, una vez importado el modelo de Solid Works y creada la geometría con Patran.

En primer lugar, puesto que el modelo a analizar es simétrico se parte por el eje de simetría para agilizar el mallado como ya se realizó con las probetas, de esta manera se consigue una geometría mucho más simple y fácil de trabajar.

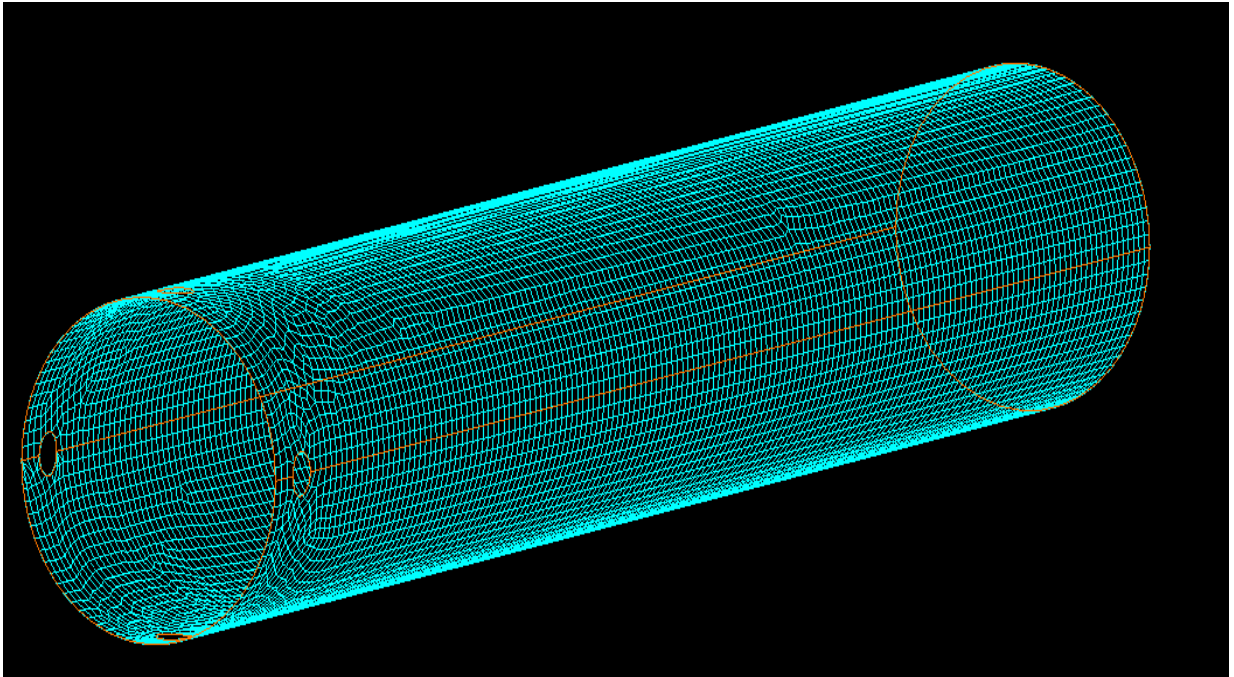


*Imagen 4.10 Detalle de la simetría del tubo*

Para discretizar el modelo se utiliza la herramienta “MESH SEED”, que sirve para homogeneizar la malla en 2 dimensiones. Esta herramienta se utiliza siempre que se trate de geometrías complejas. En el estudio de este proyecto se han utilizado geometrías complejas tanto en los tubos como en las probetas, ya que a pesar de ser modelos sencillos de diseñar, sus superficies curvadas y su casi total ausencia de ángulos rectos complican su estudio.

La creación de la malla se hará con la función “PAVER” para que al extruir la malla quede compacta, y se crearán celdas separadas entre sí 0,3 milímetros.

Este proceso es idéntico al realizado con las probetas, ya que, por otra parte, las probetas son parte de los tubos y los resultados que se pretenden alcanzar tienen que ser de la misma naturaleza. Por este motivo la manera de estudiar ambos modelos debe de ser lo más semejante posible.



*Imagen 4.11 Detalle tubo discretizado*

El modelo completo tiene aproximadamente 13.838 elementos y 15.220 nodos. Son todos de tipo lámina con cuatro nodos y doble curvatura, también denominados S4R. En el Anexo B se explica con detalle los elementos del modelo así como su situación.

## 4.2.3 CARGA Y CONDICIONES DE CONTORNO

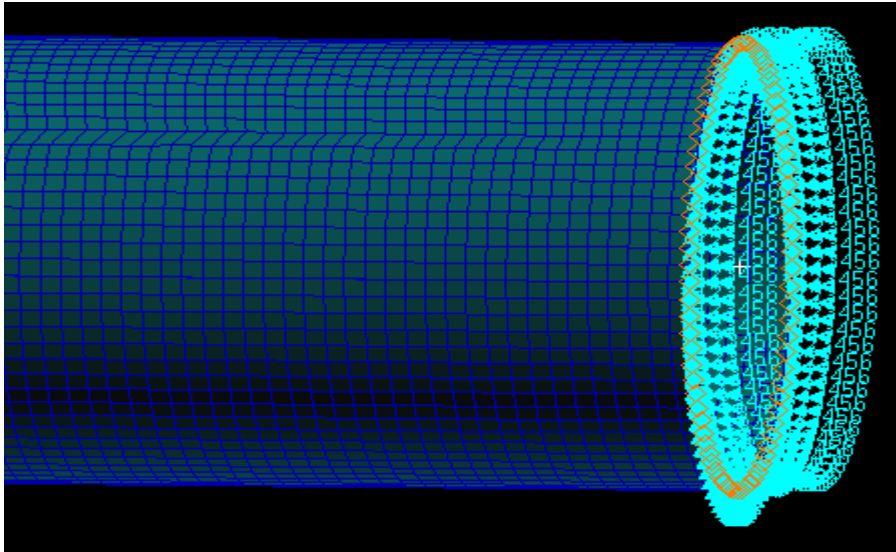
### 4.2.3.1 CONDICIONES DE CONTORNO

En este modelo, lo que se simula es un ensayo de compresión de los tubos, ya que es como actuarán una vez situados en el SLED.

Para realizar la simulación, los nodos que forman parte de uno de los extremos del tubo quedan restringidos al movimiento en los tres grados de libertad mientras que los que forman el otro extremo, que en todo caso será el extremo que tiene los orificios más cercanos, estarán restringidos al movimiento en el eje transversal al tubo y al giro, pero se permite el desplazamiento en el eje longitudinal del tubo.

Al igual que con las probetas, estas imposiciones se aplican en la pestaña "LOAD BC'S" del programa de pre-proceso PATRAN seleccionando los nodos que se quieran impedir de alguna manera al movimiento.

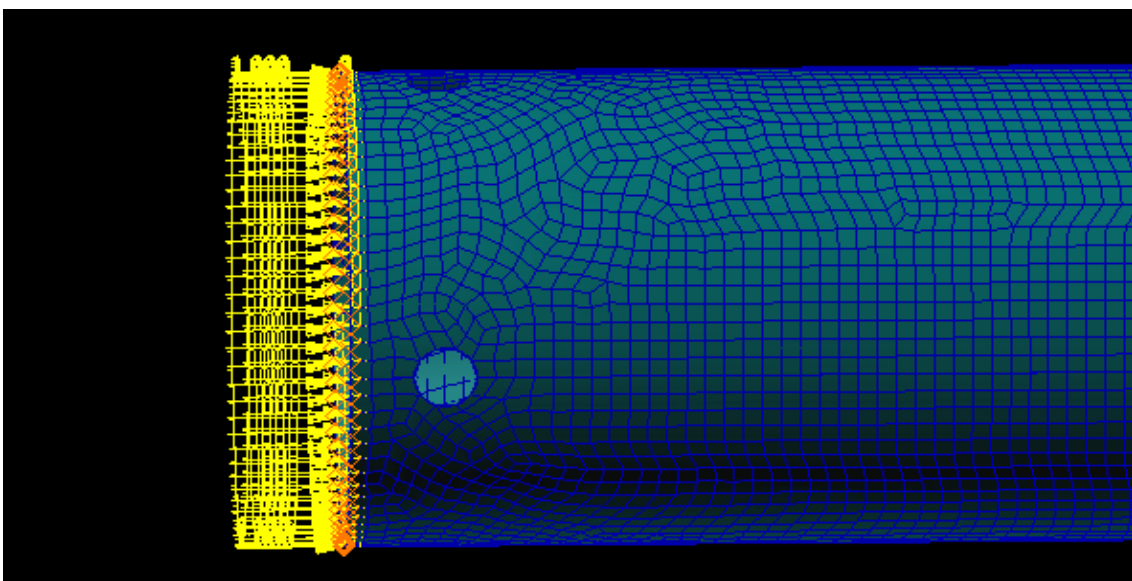




*Imagen 4.12 Detalle condición de contorno de los tubos*

Con estas restricciones lo que se pretende conseguir es ajustar el ensayo informático a las condiciones reales a las que está sometidos los tubos en el ensayo con la Instron. De esta manera se consiguen los resultados de la manera más exacta posible, para poder compararlos.

#### 4.2.3.2 CARGAS



*Imagen 4.13 Detalle cargas en los tubos*

Como se aprecia en la imagen, al tratarse de la simulación de los tubos sometidos a una compresión, las fuerzas actúan en la cara del extremo en el que no está restringido su movimiento longitudinal, de esta forma se produce una deformación en el mismo sentido del movimiento hasta alcanzar los parámetros requeridos en la norma.

#### 4.2.4 MATERIALES

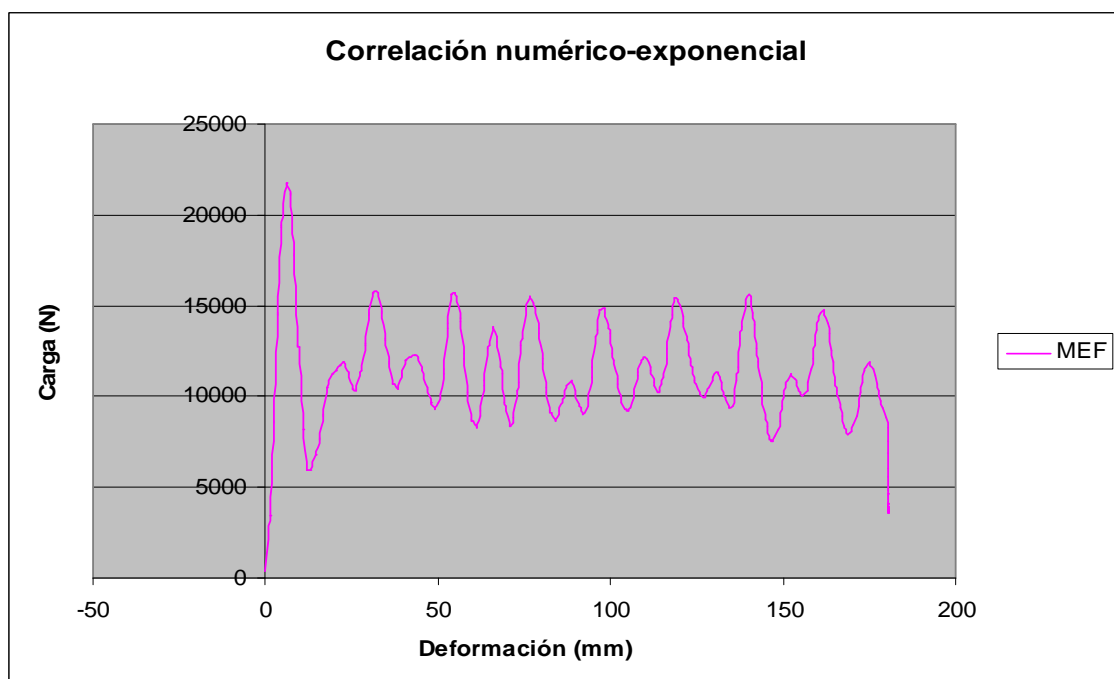
Los materiales de los tubos son exactamente los mismos que los de las probetas y sus características ya han sido comentadas anteriormente.

#### 4.1.5 RESULTADOS

A continuación se exponen los resultados obtenidos del ensayo mediante los elementos finitos, estos resultados habrá que compararlos con los obtenidos mediante el ensayo en el laboratorio para comprobar la exactitud de los mismos y poder validar el procedimiento de los elementos finitos o desestimarlos.

En el caso de los tubos las unidades utilizadas son Newton-milímetro.

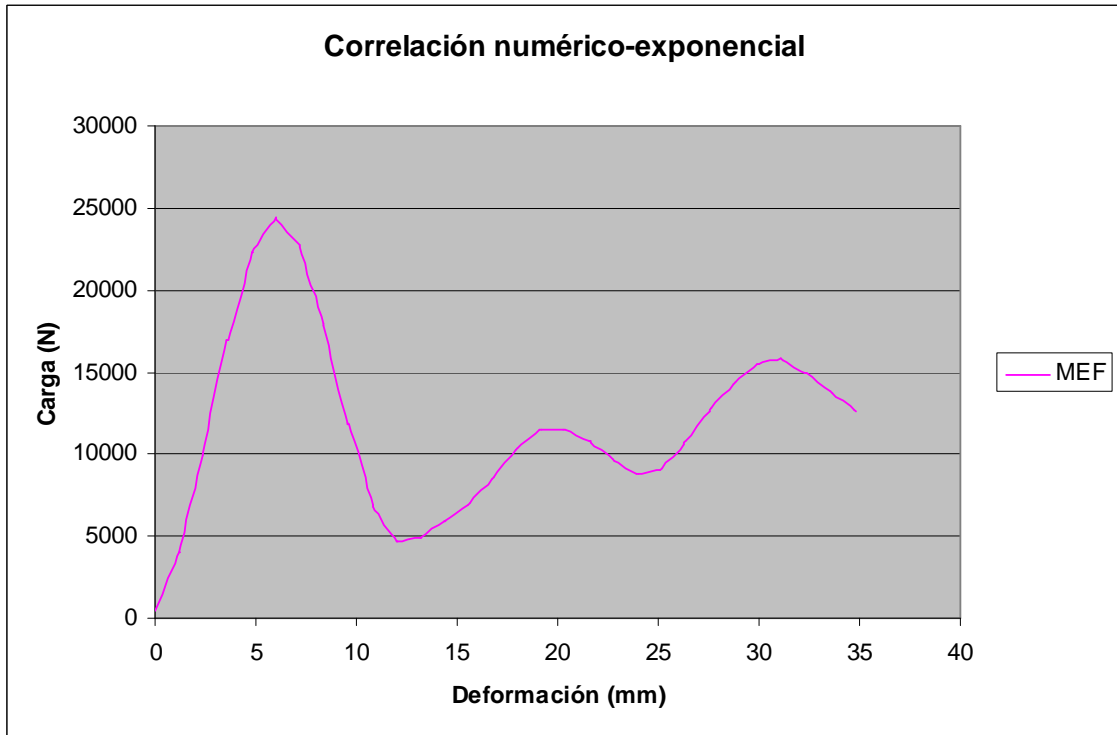
#### MATERIAL 1



Gráfica 4.3 Curva tensión-deformación tubo 1



## MATERIAL 2



Gráfica 4.4 Curva tensión-deformación tubo 2



## 5 CORRELACIÓN ENSAYOS

Una vez que se han realizado los ensayos tanto en el laboratorio como con soporte informático se ha de realizar la comparación de los resultados obtenidos a través de cada uno de los métodos.

El objetivo de este procedimiento, como quedó reflejado anteriormente en el apartado de objetivos, es el de dar validez al método realizado a través de la simulación numérica con el método de los elementos finitos, puesto que en este método hay que introducir una serie de parámetros característicos tanto de los materiales ensayados como de la forma de realizar el ensayo. Estos parámetros mencionados pueden inducir a error si no están perfectamente calibrados y normalizados, por ello es necesario realizar una comprobación previa de que todo sale correctamente para realizar la posterior investigación utilizando exclusivamente el soporte informático.

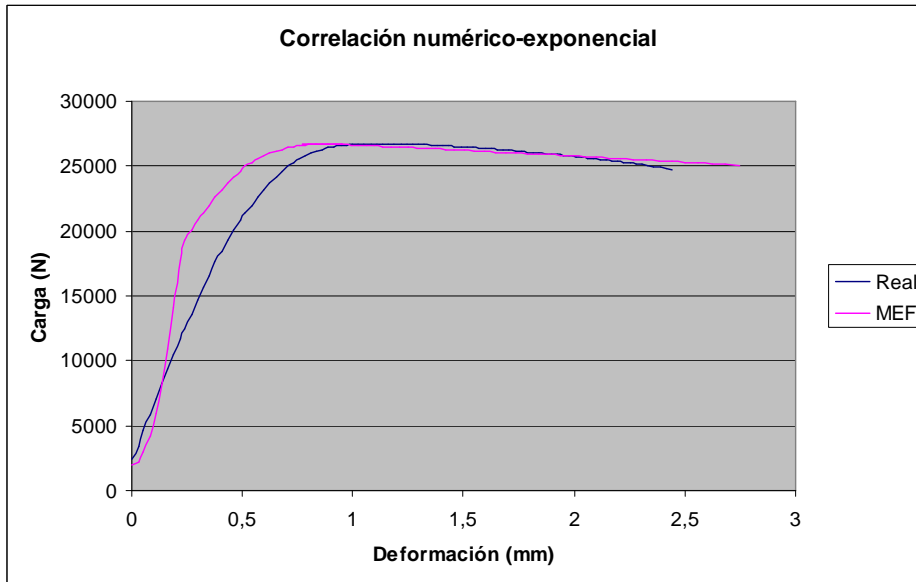
El ensayo se dará por válido siempre que exista una correlación lógica entre las curvas obtenidas por ambos métodos, es decir, que los valores pico y media de cada uno de los ensayos coincidan dentro de un rango de desviación coherente, puesto que en el ensayo por elementos finitos se obtienen gráficas que tienden a idealizar el comportamiento del material, mientras que en el ensayo real, el material puede contener impurezas o pequeñas deformaciones inapreciables que condicionan su comportamiento.

A continuación se expone la correlación obtenida en los ensayos de las probetas. El estudio se realiza con ambos materiales utilizados en la investigación.

Las gráficas corresponden a las curvas carga (Newton) - deformación (milímetros).

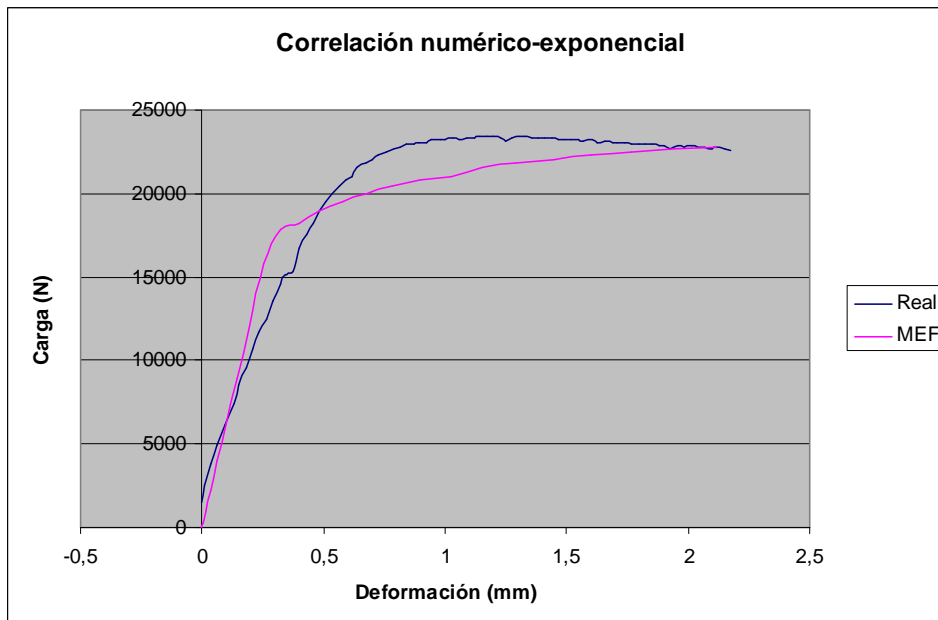


## PROBETA 1



Gráfica 5.1 Correlación probeta 1

## PROBETA 2



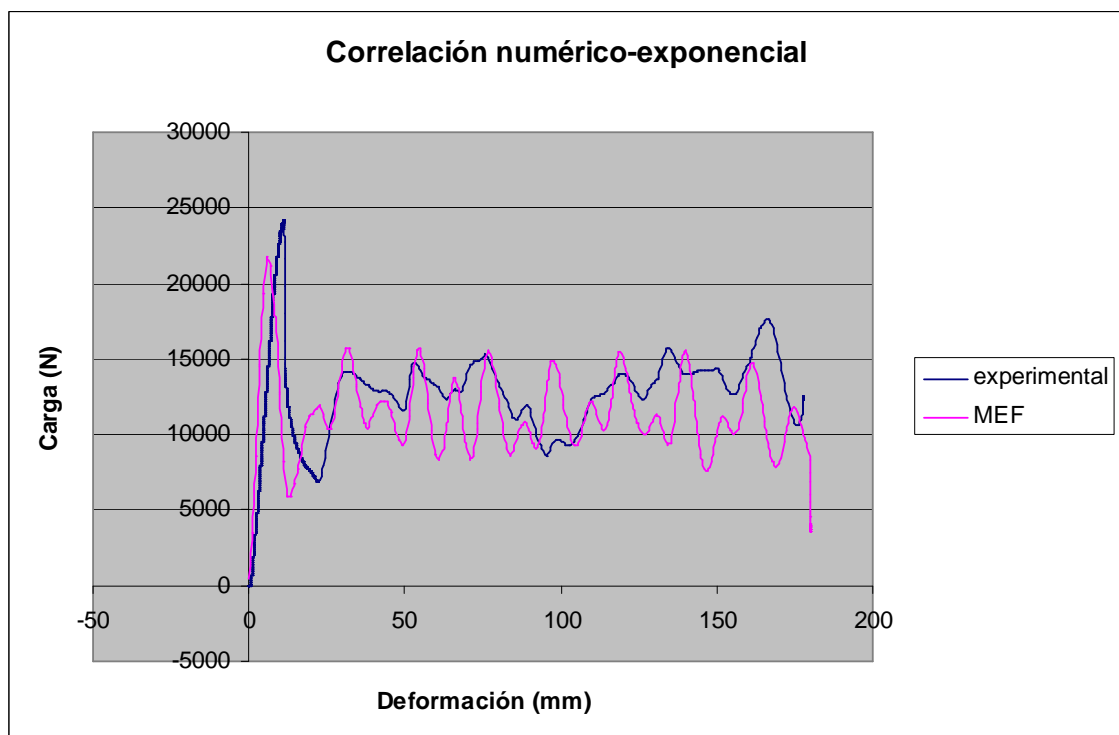
Gráfica 5.2 Correlación probeta 2

Los resultados muestran una tendencia claramente similar y dentro de unos mismos rangos de valores. Los resultados obtenidos son del mismo orden. Todo esto a pesar de los problemas que aparecieron en el ensayo de la Instron, dónde el técnico aseguró que los valores de la deformación obtenidos estaban un poco desviados de la realidad por problemas en el aparato de medida, por ese motivo no son más precisas las correlaciones, a pesar de mostrar un comportamiento elástico bastante similar.

Se da validez por tanto el método de los elementos finitos atendiendo a los resultados obtenidos en las probetas.

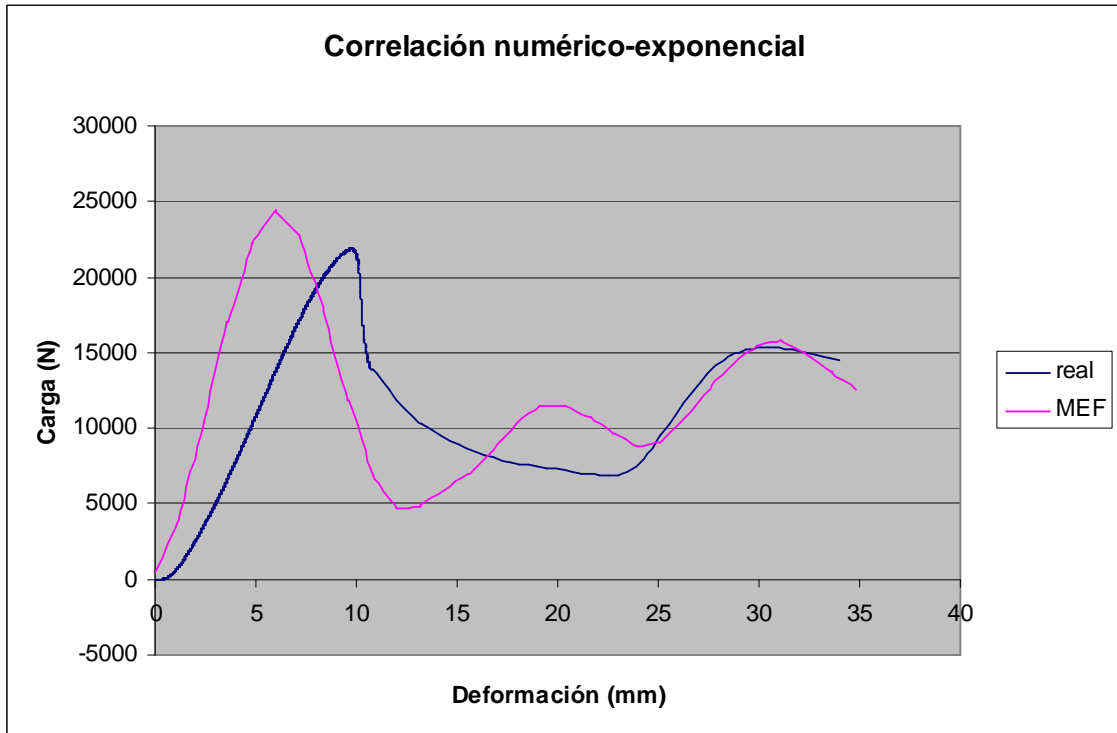
A continuación se exponen las correlaciones de los ensayos con los tubos en Newton-milímetros

### TUBO 1



Gráfica 5.3 Correlación tubo 1

## TUBO 2



Gráfica 5.4 Correlación tubo 2

En la comparación de las gráficas obtenidas en los tubos se observa una clara similitud en cuanto a forma y valores de los resultados obtenidos por ambos métodos, por tanto también se da por válido el procedimiento informático atendiendo a los ensayos con los tubos.

Tras la observación de las correlaciones obtenidas se da por válido el procedimiento del método de los elemento finitos puesto que las gráficas obtenidas por este método nos reflejan unos resultados fiables y consecuentes con el comportamiento de los materiales en la realidad, por tanto se puede empezar a investigar con diferentes dimensiones y características en los tubos para encontrar el que mejor convenga a nuestro estudio.



## 6 RESULTADOS

Una vez caracterizado el material, y comprobado la validez del método de los elementos finitos, se realiza un estudio de las diferentes dimensiones posibles para los tubos obteniendo como resultado la gráfica carga-deformación característica de cada uno de ellos, así como sus valores pico y media para poder compararlos entre ellos y sacar conclusiones acerca de los que mejor funcionarían en el SLED.

Las dimensiones que están previstas de estudio son las siguientes:

Para cada uno de los materiales:

- Siete tubos de 60 milímetros de diámetro y de longitudes variables que van desde 300 milímetros hasta 900 milímetros en intervalos de 100 en 100 milímetros; o lo que es lo mismo, tubos de 60x300, 60x400, 60x500... 60x900.
- Siete tubos de 70 milímetros de diámetro y de longitudes variables que van desde 300 milímetros hasta 900 milímetros en intervalos de 100 en 100 milímetros, igual que el caso anterior pero con tubos de 70 milímetros de diámetro
- Siete tubos de 80 milímetros de diámetro y de longitudes variables que van desde 300 milímetros hasta 900 milímetros en intervalos de 100 en 100 milímetros.

Los orificios pasantes seguirán siendo de 10 milímetros de diámetro y situados a 150 milímetros de uno de los extremos en todo caso estudiado.





## MATERIAL 1

TUBO		Carga (Pascales)	
Diámetro(mm)	Longitud(mm)	Media	Pico
60	300	75531	145797
	400	77036	143808
	500	76154	169937
	600	75115	175488
	700	76854	181451
	800	74668	183243
	900	75978	178992
70	300	86307	156542
	400	77502	174976
	500	78142	174959
	600	80921	174930
	700	77769	174954
	800	81725	174970
	900	77848	174969
80	300	87293	177930
	400	101699	192936
	500	95238	217134
	600	87240	232637
	700	100118	236997
	800	88511	243187
	900	100982	237922

Con estos ensayos se han podido observar los valores necesarios de las cargas en el impacto para lograr una misma deformación en cada uno de los tubos en este primer material.

Se observa que la carga aumenta conforme aumenta el diámetro de los tubos mucho más significativamente que conforme va aumentando en su longitud dentro de un mismo diámetro, por lo que no merece la pena realizar tubos más largos si los resultados obtenidos no varían significativamente.

## MATERIAL 2

TUBO		Carga (Pascuales)	
Diámetro(mm)	Longitud(mm)	Media	Pico
60	300	77316	182183
	400	78906	142615
	500	79838	177263
	600	76389	168014
	700	79318	190716
	800	79614	198436
	900	80410	191853
70	300	84835	185767
	400	82580	182928
	500	81505	183064
	600	82569	182983
	700	81546	182926
	800	81725	174970
	900	82500	183140
80	300	90869	216198
	400	87562	201069
	500	89863	243852
	600	99623	217239
	700	98158	258194
	800	93496	263917
	900	96711	247169

En este segundo material los resultados varían menos al pasar de un diámetro a otro aunque sigue siendo más significativo que los cambios de longitud dentro de un mismo diámetro.



## 7 CONCLUSIONES

La primera conclusión que se puede sacar al respecto de este proyecto es que el método de los elementos finitos es un método perfectamente válido y que permite realizar infinidad de ensayos ahorrando multitud de horas en el laboratorio con los ensayos tradicionales puesto que los resultados obtenidos son perfectamente coherentes con la realidad.

Con respecto al proyecto que nos concierne, puesto que el reglamento número 44 de la UNECE lo que nos normaliza son las deformaciones que deben de tener los tubos, nos hemos centrado en las cargas que son necesarias para alcanzar esas deformaciones en cada uno de los tubos ensayados.

De este modo se puede concluir que dependiendo de la carga que se emplee en el ensayo se conseguirán mejores comportamientos en la detención del carro con unos tubos o con otros. O lo que es lo mismo, en función de la masa que se pretenda ensayar y la aceleración a la que se ensaye será necesario utilizar unos tubos u otros para obtener los resultados deseables.

A continuación queda reflejada una tabla con los tubos que deberían utilizarse en función de la carga que se fuera a ensayar en el SLED:

### MATERIAL 1

DIAMETRO	CARGAS
60	74-77 Kpas
70	77-86 Kpas
80	86-102 Kpas

### MATERIAL 2

DIAMETRO	CARGAS
60	76-80 Kpas
70	80-84 Kpas
80	84-100 Kpas

La longitud de los tubos no influye de manera significativa en su comportamiento, por tanto se utilizará la longitud de tubo que mejor convenga para el diseño en cada caso.



## BIBLIOGRAFÍA

- 1.- **MSC PATRAN Reference Manual**, F.E.M. Modeling Theory Manual, MSC Software., 2001.
- 2.- **ELASTICIDAD Y RESISTENCIA DE MATERIALES**, Apuntes de la asignatura 2º Curso de Ingeniería Técnica Industrial Especialidad Mecánica.
- 3.- **FUNDAMENTOS DE CIENCIA DE LOS MATERIALES**, Apuntes de la asignatura 1º Curso de Ingeniería Técnica Industrial Especialidad Mecánica.
- 4.- **NORMA EN ISO 6892-1** del ensayo de tracción en materiales metálicos a temperatura ambiente.
- 5.- **MAN – 314 – UNIZAR – SLED**, manual de usuario y mantenimiento del sistema simulador de impacto SLED.
- 6.- **REGLAMENTO Nº 44 DE LA UNECE**, normalización de las aceleraciones en las simulaciones de impacto.

## CONSULTAS WEB

<http://www.iberisa.com>  
<http://www.wikipedia.org>  
<http://www.mscsoftware.com/>  
<http://www.instron.com.es>

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco el presente proyecto a Juan José Alba y Ramón Miralbes, por acceder a ser los tutores del mismo y haberme dado la posibilidad de realizar un estudio que considero tan interesante como útil y del que espero sirva como base para posteriores investigaciones sobre la materia. También agradecerles su dedicación y colaboración en la realización del mismo.

Mismo agradecimiento me merece el departamento de mecánica de la EUITIZ por haberme permitido utilizar sus instalaciones y equipos para la realización del mismo, así como el laboratorio del departamento para la realización del ensayo de tracción y compresión en la máquina de ensayos mecánicos Instron.



# ANEXOS

## ANEXO A: SLED

### A1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El Simulador de Impacto de tiene una longitud total de 34 m y una anchura máxima de 4 m. Con el fin de cumplir con las normativas de seguridad CE vigentes, existe un perímetro de seguridad alrededor de la máquina que impide el paso de las personas durante la ejecución de un ensayo. Dentro del laboratorio de ensayo existe una Sala de Control desde donde se opera el sistema y se visualizan los ensayos. El SLED dispone de la posibilidad de monitorizar un anillo de seguridad que impide el accionamiento de la máquina si dicho anillo de seguridad no está cerrado.

El SLED está formado por los siguientes subsistemas y/o grupos de elementos:

- Subsistema de Propulsión.
- Subsistema de Guiado.
- Carro porta – especímenes.
- Subsistema de Frenado.
- Subsistema de Control.
- Subsistema de Seguridad.

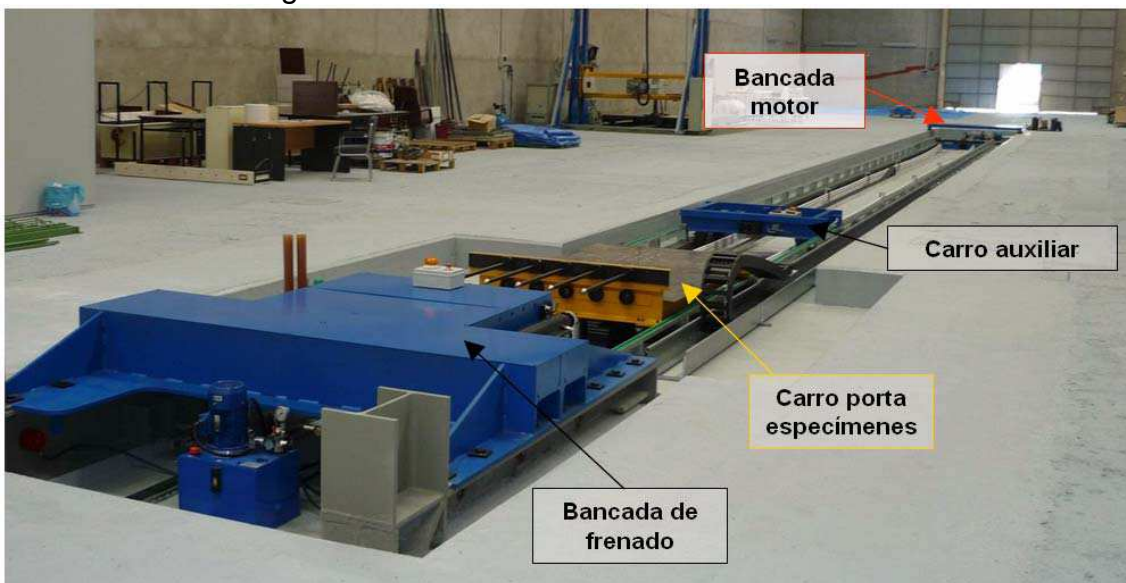


Figura A.1 Máquina SLED

## A1.1. SUBSISTEMA DE PROPULSIÓN

El subsistema de propulsión está formado por 5 gomas elásticas, cuya finalidad es proporcionar al carro principal la velocidad deseada por el usuario. El subsistema consta de los siguientes elementos:

- Gomas Elásticas.
- Soportes Gomas.
- Tambores delanteros.

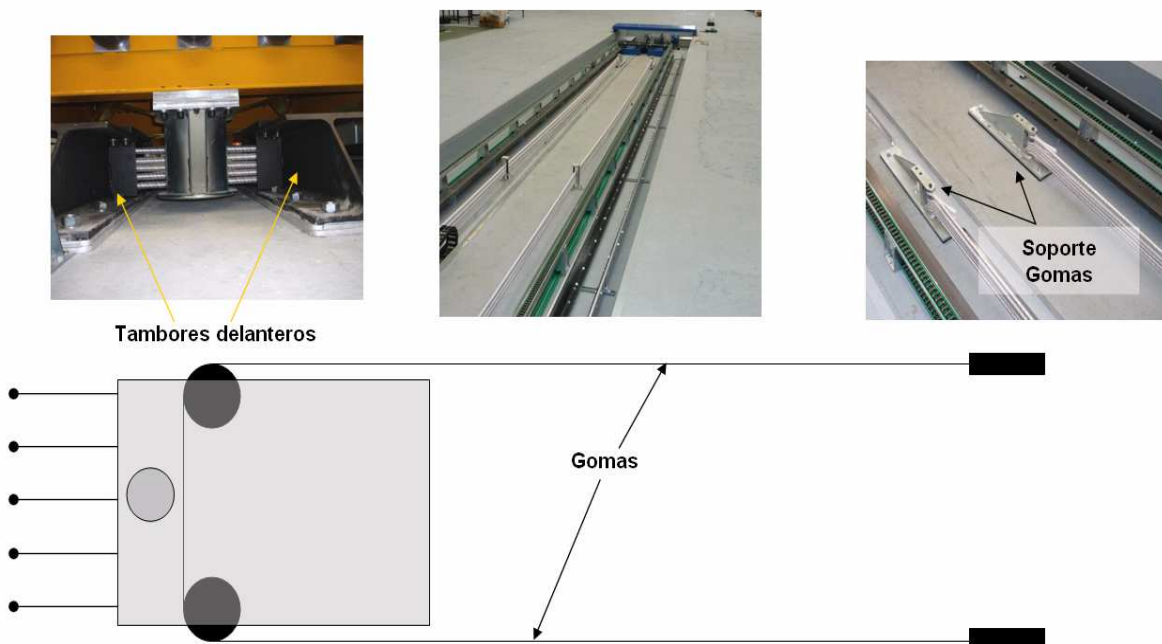


Figura A.2. Detalles subsistema de propulsión.

### A1.1.1. GOMAS ELÁSTICAS

Las gomas elásticas son de tipo multi-hilo forradas con banda protectora de nylon para minimizar el desgaste y prolongar su vida útil.

El rango de temperaturas de funcionamiento recomendado es de 18 – 22 °C.

La capacidad de propulsión de cada goma con una elongación del 75% de su longitud inicial es de 1150N nominal. El número y longitud de las gomas está adecuado a las velocidades a obtener y de las masas a lanzar. La vida media estimada de las gomas es de 1000 lanzamientos.

El sistema consta de 5 gomas de  $\phi$  22 mm y de longitud total 48,5 m en reposo. Las gomas están terminadas con unos guardacabos de acero

galvanizado para su fácil fijación a los módulos de anclaje. Están montadas según una U partiendo de un soporte de gomas hacia la barrera, alrededor de los tambores delanteros y hacia atrás hacia el otro soporte de gomas. Están montadas con un pre-tensado de 4 m, que junto a unos soportes verticales las mantiene en una disposición correcta aún cuando el sistema está destensado.

### A1.1.2. SOPORTES DE LAS GOMAS

Elementos de anclaje de las gomas ubicados al final de la pista de aceleración (junto a la bancada motor).



*Figura A.3. Soportes gomas.*

### A1.2. SUBSISTEMA DE GUIADO

El objetivo es conseguir el perfecto guiado longitudinal de los carros (auxiliar y sled). El subsistema consta de los siguientes elementos:



-Raíles de guiado: Fabricados en pletinas de acero de 120x40mm de 5 m de longitud, alineados y montados sobre vigas soporte embebidas en el suelo.

-Grupos de rueda: Sobre los raíles de guiado ruedan los grupos de rueda de cada carro. Los grupos de rueda están compuestos por 3 rodillos guía con muñequilla de dos hileras de bolas con obturación de labio en ambos lados.

### A1.3. CARRO PORTA-ESPECÍMENES (CARRO PRINCIPAL)

El carro principal (sled) es donde se colocan los especímenes a ensayar. Está construido en perfiles de acero estructural soldado, distensionado y diseñado para soportar aceleraciones de 80 g sin sufrir deterioro.

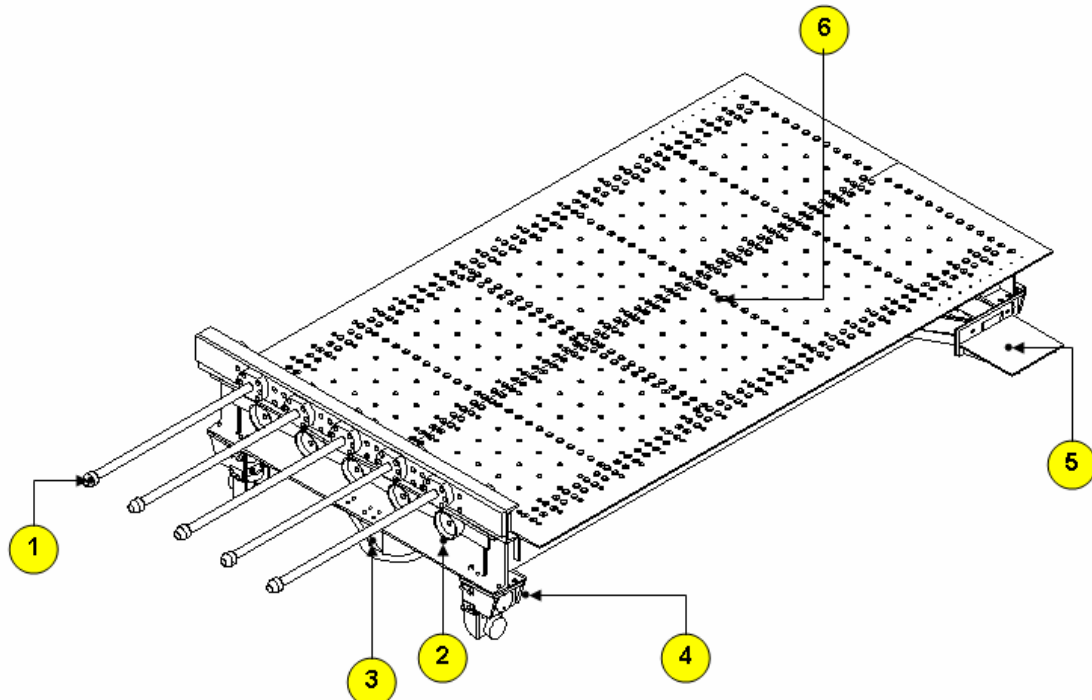


Figura A.4. Carro principal (sled). (1) vástagos del sistema de frenado, (2) cazoletas para colapso de tubos, (3) tambor de tensado de gomas, (4) grupo de rueda, (5) pieza de fijación del porta-cables (6) superficie de fijación del espécimen de ensayo.

El subsistema consta de los siguientes elementos:

-Vástagos del sistema de frenado: El frontal del sled dispone de un refuerzo mecanizado donde se fijan los vástagos del sistema de frenado. En el extremo de dichos vástagos se atornillan unas “bellotas” de diferentes geometrías para conseguir diferentes pulsos de frenado al introducirse en los tubos de poliuretano del subsistema de frenado.



*Figura A.5. Detalle vástagos del sistema de frenado y “bellotas”.*

-Cazoletas para el colapso de tubos: En la parte inferior del frontal del SLED se dispone de un refuerzo mecanizado donde se atornillan unas cazoletas donde se colapsaran los tubos de acero que se utilizaran como medio de frenado.

El SLED posee dos tipos de frenado independientes y que no se pueden utilizar simultáneamente (salvo casos excepcionales, pruebas, etc.):

- Tubos de poliuretano (máximo 5).
- Colapso de tubos de acero de pared delgada (máximo 5).

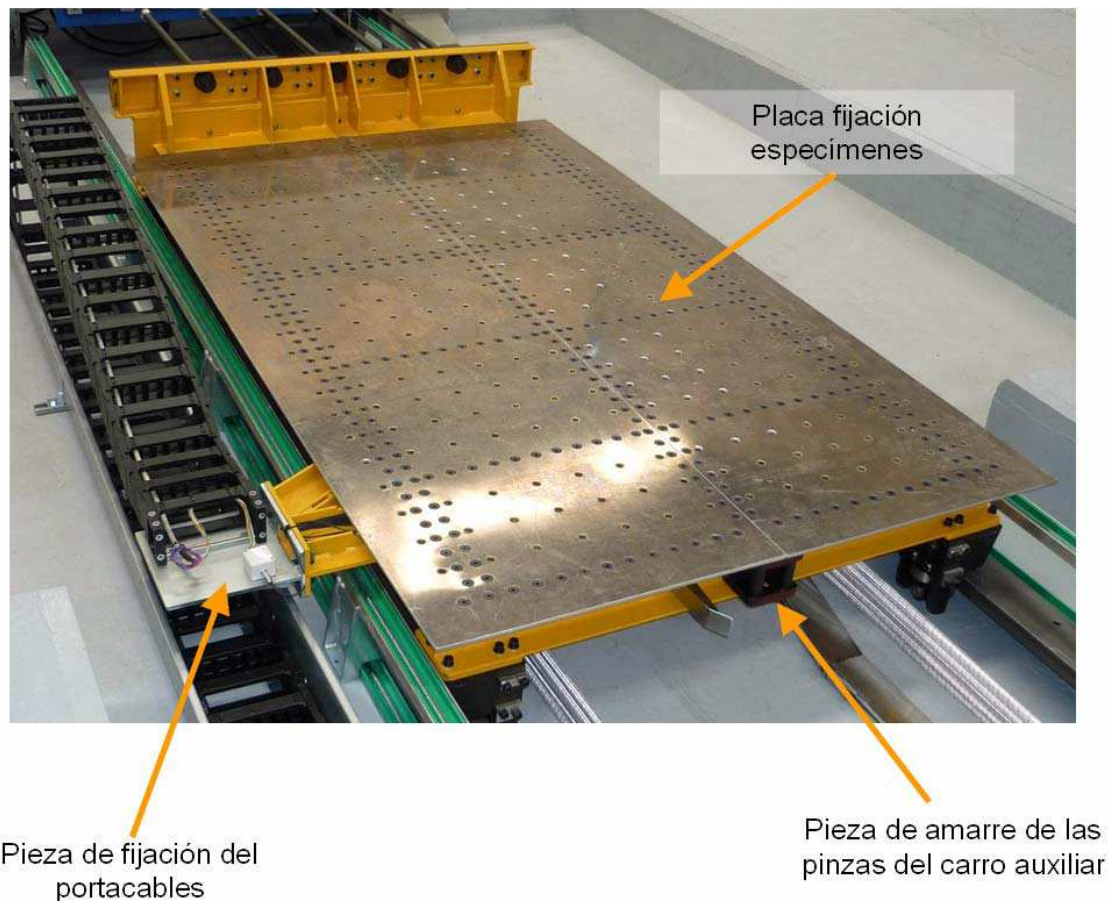
-Tambor de tensado de gomas: En la parte inferior del sled está atornillado un tambor que tensará las gomas cuando el sled realiza la carrera de retroceso consiguiendo el efecto de catapulta deseado.



*Figura A.6. Detalle tambor tensado de gomas.*

- Grupos de rueda: Los grupos de rueda (4) están formados por 3 rodillos guía con muñequilla de dos hileras de bolas con obturación de labio en ambos lados. Dichos rodillos están regulados de fábrica para ajustarse a las guías y proporcionar un perfecto guiado (longitudinal y transversal).

- Pieza de fijación del porta-cables: Es la pieza donde se fija el porta-cables necesario para poder guiar los cables de los sensores posicionados en el SLED hasta el sistema de adquisición de datos, asegurando la integridad de los cables durante la carrera de aceleración y tensado.



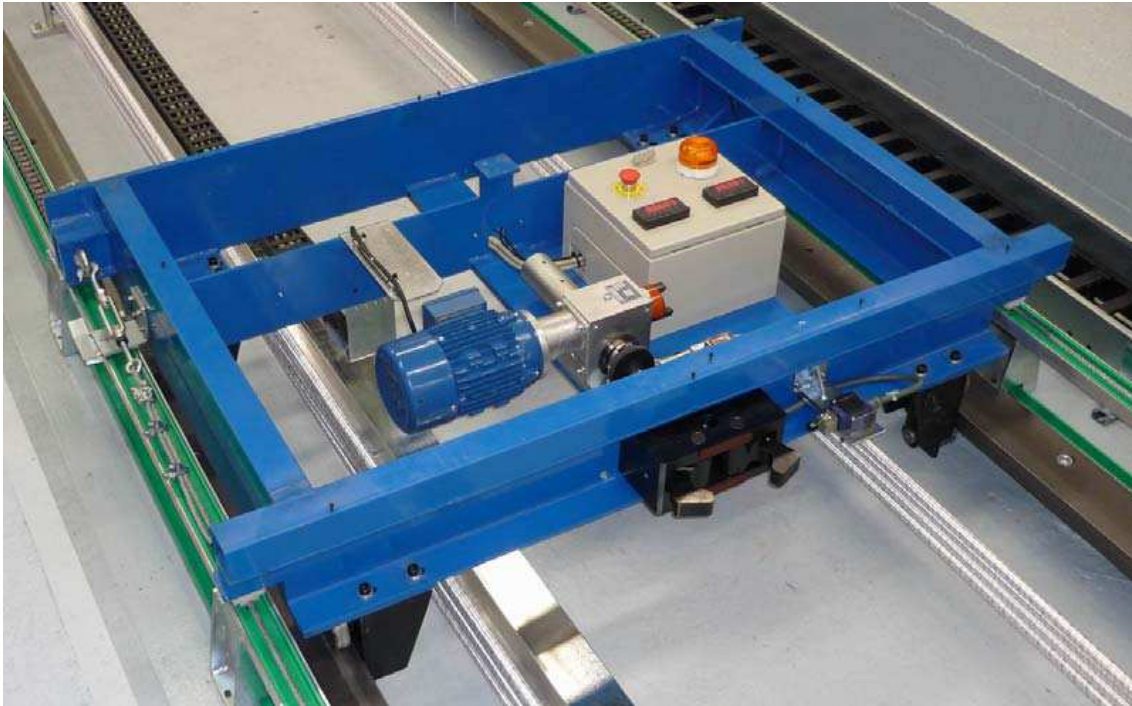
*Figura A.7. Detalle de la instalación definitiva.*

## **A1.4. CARRO AUXILIAR**

El carro auxiliar es el encargado de posicionar, tensando las gomas, el SLED en el punto de la carrera de aceleración más adecuado para obtener la velocidad solicitada por el usuario. Alcanzado dicho punto el carro auxiliar liberará el carro principal tras lo consiguiente orden del usuario.

El carro auxiliar está fabricado con perfiles de acero estructural soldado y distensionado con los mecanizados necesarios para el anclaje de los distintos elementos.





*Figura A.8. Detalle carro auxiliar.*

Un ejemplo de cómo funciona el carro auxiliar con el carro principal sería el siguiente:

- 1) El carro auxiliar, propulsado por las cadenas, avanza sobre la pista de aceleración en busca del carro principal, que se encontrará al final de la pista de aceleración.
- 2) El carro auxiliar detecta que está en la posición necesaria para enganchar el SLED gracias a un fin de carrera.
- 3) El carro auxiliar enganchará al carro principal mediante la pinza ubicada en la parte frontal del mismo.
- 4) En el momento en que ambos carros son solidarios se inicia la carrera de tensado. El carro auxiliar retrocederá sobre la pista de aceleración propulsado por las cadenas, durante la carrera el carro principal está tensando las gomas. El desplazamiento finalizará cuando se alcance el punto que proporcione la carrera de aceleración suficiente para alcanzar la velocidad programada.
- 5) Una vez que se ha alcanzado la tensión necesaria en la gomas se realiza la apertura de la "pinza" del carro auxiliar y el carro principal (sled) queda libre siendo propulsado por las gomas.

## A1.5. SUBSISTEMA DE FRENADO

El Sistema de Frenado tiene como objeto el decelerar el carro principal (de forma no destructiva) siguiendo unos corredores de deceleración determinados por las distintas normativas u otros pulsos de deceleración seleccionados por el usuario, de manera que los elementos montados sobre el carro sean sometidos a unas deceleraciones similares a las que se producirían durante un choque real. Se incluyen dos sistemas de deceleración de tecnologías diferentes. Los elementos del subsistema de frenado se montan sobre el carro principal (sled) y sobre la barrera de impacto.

### A1.5.1. BARRERA DE IMPACTO

La barrera de impacto se ancla sobre un bloque de reacción, formado por una estructura de acero embebida en hormigón, ubicado al final de la pista de aceleración. La barrera de impacto está construida a base de vigas soldadas de acero estructural distensionada con capacidad para soportar los esfuerzos generados durante el impacto.

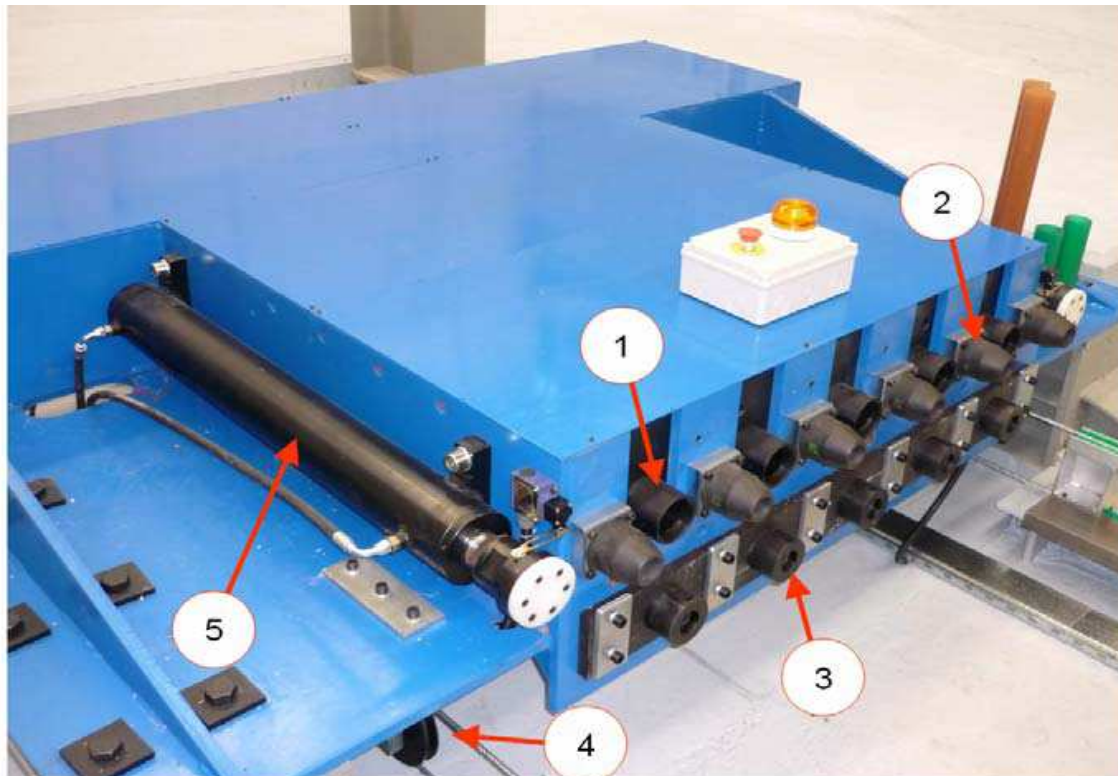


Figura A.9. Barrera de impacto. (1) Tubos lapeados, (2) topes progresivos (3) anclajes tubos colapsables (4) poleas de reenvío, (5) cilindros extractores.

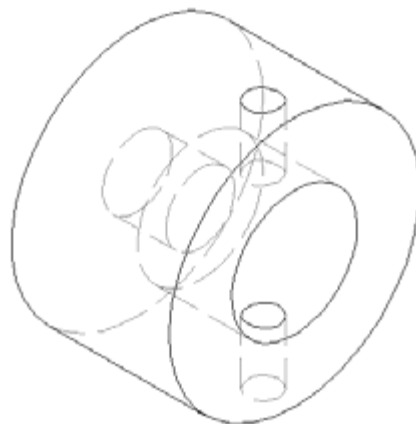
La barrera de impacto consta de los siguientes elementos:

- Tubos lapeados: Cinco tubos de lapeados 80x60 H8 para alojamiento de los tubos de poliuretano.
- Topes progresivos: Seis topes progresivos cónicos con vaciado central constituyen el sistema de frenado de emergencia evitando el impacto directo entre el carro principal y la barrera de impacto en caso de agotamiento de carrera del sistema de frenado. Estos topes son capaces de absorber una energía de 3000 J.



*Figura A.10. Tope progresivo.*

- Anclaje tubos colapsables: Piezas cilíndricas de  $\varnothing$  80 mm donde encajan los tubos colapsables y se fijan mediante un pasador de  $\varnothing$  10 mm.



*Figura A.11. Anclaje de tubo colapsable.*

Los anclajes de los tubos colapsables son piezas atornilladas con tornillos M20 a una placa mecanizada que se atornilla a la parte inferior de la barrera de impacto. Estos anclajes se pueden sustituir por otros de diferentes diámetros en función de las dimensiones de los tubos colapsables.

- Poleas de reenvío: Los extremos de las cadenas que proporcionan movimiento de avance y retroceso al carro auxiliar se cierran mediante un cable de acero. El guiado y reenvío de dicho cable en el extremo de la carrera de aceleración se realiza mediante unas poleas atornilladas en la parte inferior de la barrera de impacto.

- Cilindros extractores: Cuando el carro principal ha colisionado contra la barrera de impacto decelerado por el sistema de frenado es necesario desencajarlo. Para ello se utilizan 2 cilindros hidráulicos que se desplazan simultáneamente en la carrera de avance. Los cilindros están alimentados por un grupo hidráulico situado en la parte inferior trasera de la barrera de impacto.

### *A1.5.2. SISTEMAS DE DECELERACIÓN*

#### -Sistema de deceleración por medio de tubos de poliuretano:

Los elementos que componen el sistema de frenado por tubos de poliuretano están ubicados principalmente en la barrera de impacto y en el frontal de carro principal.

El sistema disipa la energía cinética del carro principal convirtiéndola en energía de deformación en los tubos de poliuretano especiales, previamente insertados en los tubos lapeados de la barrera.

La carrera máxima de frenado es de 750 mm aproximadamente. Los tubos de poliuretano son reutilizables (300 ensayos aprox.). Para homogeneizar resultados (recuperación de tubos) y una duración mayor deben ser almacenados en un congelador. Es importante asegurarse que la alimentación al congelador no es interrumpida en ningún momento para mantener los tubos siempre a la temperatura óptima y listos para ensayar.



Sobre el carro principal van montados:

- Cinco vástagos de acero con sus correspondientes bellotas de acero intercambiables. Diámetros crecientes producen niveles de deceleración crecientes. Las bellotas son intercambiables y se montan y desmontan enroscándose directamente a los vástagos. Se suministran bellotas de 46,5 mm, pudiéndose montar desde 45 a 48 mm.

-Sistema de deceleración por colapso de tubos metálicos.

Sobre la barrera de impacto ubicada al final de la pista de rodadura se sitúa la placa frontal de impacto, desmontable y con un sistema de sujeción de tubos metálicos de pared, diámetro y longitud variable.

Sobre el carro principal se monta la placa frontal de impacto con cazoletas desmontables.

El sistema disipa la energía cinética del carro principal convirtiéndola en energía de deformación permanente en los tubos metálicos, que colapsan de manera homogénea. La carrera máxima de frenado del sistema depende de las características geométricas de los tubos metálicos (diámetro, espesor de pared y longitud del tubo). Los tubos metálicos no son reutilizables, siendo un consumible para cada ensayo.

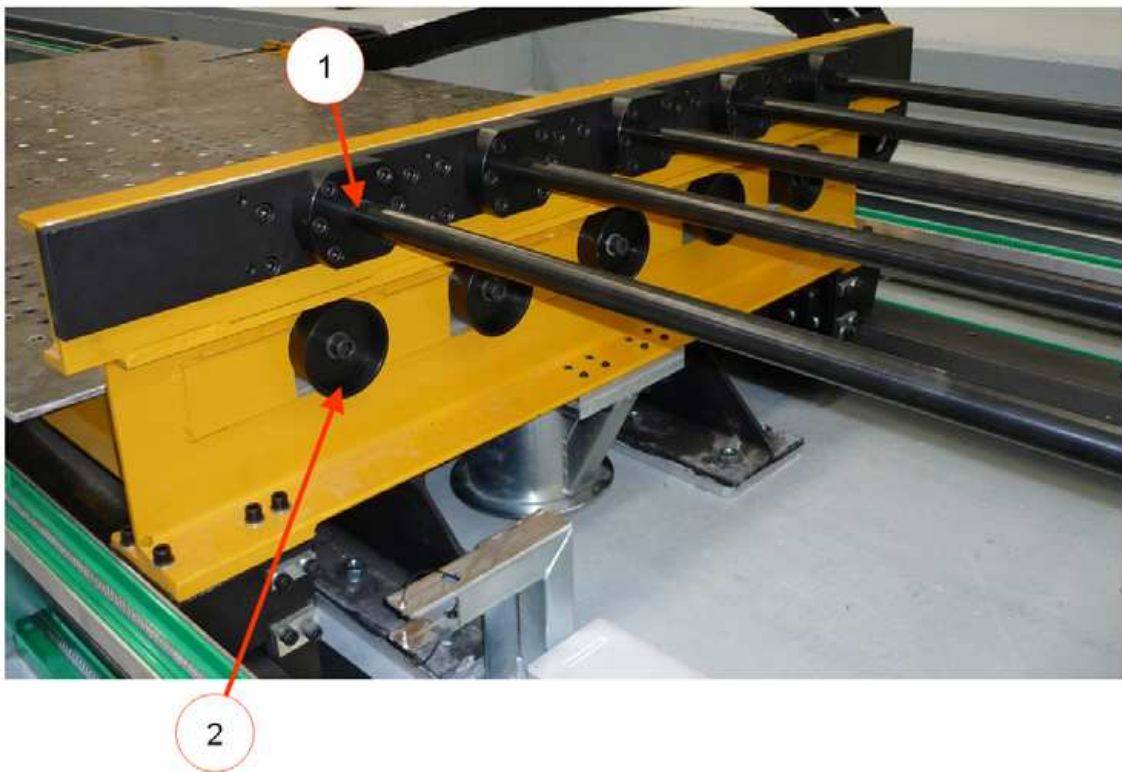


Figura A.12. Vástagos y bellotas (1), Cazoletas (2).

## A1.6. SUBSISTEMA DE CONTROL

El Subsistema de Control tiene como misión la realización de las distintas rutinas: extracción del carro principal tras un impacto, posicionado del carro auxiliar, disparo y supervisión de las seguridades.

El Subsistema de Control consta de los siguientes elementos:

- Pupitre de Control: desde el cual el usuario puede realizar todos los movimientos propios del sistema de manera manual, mediante el accionamiento de botones y selectores.

- Armario de Potencia de la sala de control: que debe permanecer siempre cerrado y donde se encuentra el interruptor general de alimentación del sistema, excepto del motor – reductor de tracción del subsistema de posicionamiento.

- Armario de Potencia de la pista: que debe permanecer siempre cerrado y donde se encuentra el interruptor de alimentación del motor – reductor de tracción del subsistema de posicionamiento.

- PC + software: dedicado para el modo automático, que realizan las rutinas básicas, la monitorización del sistema y la supervisión de seguridades de forma automática.

- Sensor de posición absoluto: con el cual se permite al sistema de control conocer en todo momento la posición exacta del carro auxiliar.

- Medidor de velocidad: Tiene como finalidad determinar la velocidad con la que el carro principal alcanza la barrera de impacto. Ubicado junto a los raíles de guiado cerca de la barrera, el medidor de velocidad genera un haz de luz vertical que es cortado dos veces por los dos salientes de una horquilla sujeta al carro principal. Un procesador ubicado en el pupitre de control, mide el tiempo transcurrido entre cortes y calcula la velocidad del carro. La tarjeta del medidor de velocidad, que contiene el procesador, proporciona una señal de sincronismo tipo contacto libre de tensión al paso del carro principal por el medidor de velocidad.

- Pre-trigger: En el pupitre de control se suministra un contacto abierto sin tensión que se cierra al presionar el botón de “disparo” del PC. El conexionado es de tipo clema.

- Sensores: tanto de presencia como de posición de los distintos elementos móviles del sistema para su adecuado control.

# **ANEXO B: EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS**

## ***B1.-INTRODUCCIÓN***

Durante el proyecto van a simularse mediante técnicas de análisis numérico el comportamiento de los tubos mediante la aplicación del método de los elementos finitos.

En el punto B.2 se presenta un resumen teórico general sobre el método de los elementos finitos. Como se verá mas adelante es necesaria la utilización de tres módulos distintos para completar el proceso de modelado, cálculo y post proceso. Todas las simulaciones numéricas realizadas en este proyecto van a realizarse mediante la aplicación de este método a cada uno de los modelos presentados.

Los resultados obtenidos mediante este método de cálculo servirán para evaluar las sollicitaciones mecánicas actuantes sobre los tubos sometidos a una serie de cargas y sujetos a unas determinadas condiciones de contorno según el estudio del que se trate. Así mismo, proporcionarán valores representativos de componentes de tensión y deformación que en definitiva, es el objetivo marcado en la realización de este proyecto.

## ***B.2.LA TEORÍA DE LOS ELEMENTOS FINITOS***

### ***B2.1. INTRODUCCIÓN***

El Método de los Elementos Finitos (MEF) es un método numérico que se utiliza para resolver sistemas de ecuaciones diferenciales. Su evolución y desarrollo desde mediados del siglo XX hasta nuestros días ha sido constante y en la actualidad puede considerarse como el método numérico más utilizado en la mayoría de los ámbitos de la ingeniería.

Son muchas las facetas de la ingeniería en las que se precisa determinar la distribución de tensiones y deformaciones en un continuo elástico. Los casos particulares de dichos problemas pueden variar desde problemas bidimensionales de tensión o deformación plana, sólidos de revolución y flexión de placas y láminas, hasta el análisis más general de sólidos tridimensionales.

El MEF consiste en su formulación física en la división del dominio espacial, ya sea unidimensional, bidimensional o tridimensional en una serie de subdominios de geometría simple, a los cuales se les denomina elementos.

Estos elementos se encuentran formados por una serie de puntos que definen su geometría y se denominan nodos. En el interior de cada elemento se interpola una función de desplazamientos que se formula en función de los valores de desplazamientos que existen en los nodos.

La forma de trabajo de estos elementos consiste en aplicar las ecuaciones de compatibilidad y comportamiento y obtener una relación entre la fuerza aplicada sobre los elementos y los desplazamientos de los nodos. Esta relación se expresa mediante la matriz elemental, la cual depende del número de nodos, situación de estos, material utilizado, geometría de elementos y tipo de problema. Dependiendo del tipo de formulación del problema se determina si el problema es lineal (elasticidad lineal) o si no es lineal (comportamiento del material complejo)

A continuación se expresa el proceso de cálculo con el MEF:

- Planteamiento de continuidad de desplazamientos y equilibrio de fuerza entre elementos.
- Sistema de ecuaciones globales de la estructura.
- Tipo de formulación inicial (lineal o no lineal).
- Resolución.
- Obtención de los desplazamientos nodales (incógnitas básicas).
- Obtención de otras variables: deformaciones y tensiones.

La aproximación de los elementos finitos no requiere la selección del tipo de ecuación que será usada para modelar la estructura. Los códigos disponibles en el mercado han definido previamente los elementos para los cuales la matriz de rigidez individual del elemento ha sido resuelta. De esta forma, el usuario necesita definir únicamente el tipo de elemento. Una vez que el elemento ha sido definido el procedimiento es el siguiente:

1. Decidir la geometría requerida para modelar correctamente el problema.

- 1D (cables, vigas)
- 2D (tensión o deformación plana)
- 2D axisimétrica (láminas y sólidos de revolución)

- 3D (láminas y sólidos)
2. Seleccionar el tipo de elemento y formular la matriz de rigidez del elemento si se requiere.
- Definir la matriz que relaciona las deformaciones del elemento con los desplazamientos nodales  $\{B\}$
  - Definir la matriz de la ley constitutiva  $\{D\}$
  - Aplicar una rutina numérica cuadrática para evaluar la rigidez del elemento sobre el volumen del elemento.

$$\int \{B\}^T \{D\} \{B\} dv$$

El MEF consiste en dividir un medio continuo en un número finito de partes cuyo comportamiento se especifica con un número finito de parámetros, pasando de un sistema con infinitos grados de libertad a otro con un número fijo, con propiedades físicas y geométricas muy parecidas, en el que las ecuaciones de equilibrio se pueden expresar mediante un sistema algebraico de ecuaciones simultáneas con un determinado número de incógnitas, obteniéndose la solución del sistema completo mediante el ensamblaje de las soluciones para cada elemento finito.

3. Discretizar la geometría en una malla.
- Definir las localizaciones de los nodos de los elementos.
  - Agudizar el mallado en zonas de concentración de tensiones
4. Definir las propiedades locales del elemento.
- Anisótropo
  - Isótropo
  - Ortótropo
5. Siguiendo los pasos anteriores obtenemos la matriz de rigidez del elemento
6. Transformar la matriz de rigidez local del elemento en coordenadas globales
7. Obtener el ensamblaje de la matriz de rigidez suponiendo las matrices de rigidez globales de los elementos

8. Definir las condiciones de contorno aplicadas al sistema y formular el vector de fuerzas nodales  $\{F\}$  así como definir desplazamientos, nodos fijos, contactos, cargas, temperatura, etc.

9. Resolver el conjunto de ecuaciones algebraicas lineales resultante usando los métodos apropiados.

10. Resolver tensiones y deformaciones locales de elementos. Calcular tensiones y deformaciones en lámina y comparar con los criterios de rotura.

Una vez que se han establecido las características de los nodos o los elementos, las ecuaciones individuales deben ensamblarse para formar un sistema global de ecuaciones que describa la respuesta general del sistema. Este ensamblaje, el cual aparece en el punto 9, da lugar a un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales cuya forma básica es la siguiente.

$$[K]\{u\}=\{f\}$$

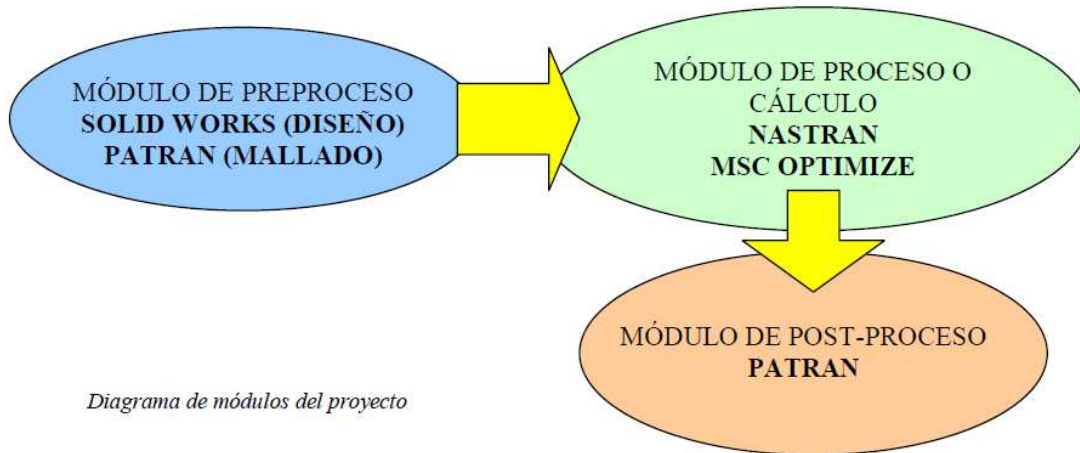
En donde:

- $[K]$  es una matriz  $(nxn)$  de rigidez del sistema;
- $\{u\}$  es un vector columna  $(nx1)$  que normalmente representa los términos de desplazamiento del sistema que son desconocidos.
- $\{f\}$  es un vector columna  $(nx1)$  que normalmente son las cargas aplicadas que son conocidas.

## ***B2.2. NASTRAN: PROGRAMA ELEMENTOS FINITOS***

Un programa de cálculo de Elementos finitos, sea cual sea el tipo de problema, tiene tres partes (o módulos) claramente diferenciadas.





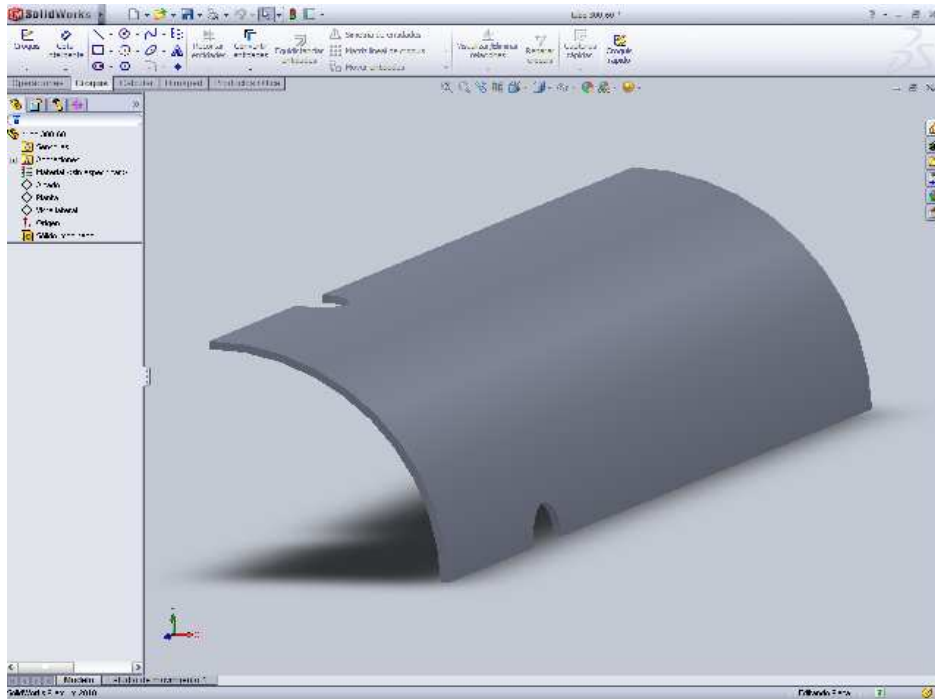
En letra negrita aparecen los nombres de los programas comerciales utilizados en cada una de las partes que constituyen el estudio.

A continuación se explican las características de los programas comerciales utilizados para este proyecto.

### B2.3.- SOLID WORKS

Solid Works es el módulo de diseño (CAD) utilizado, este programa permite la creación del modelo en tres dimensiones con relativa rapidez y precisión. Al trabajar con tubos, no existe demasiada complicación al crear los modelos por sus geometrías sencillas. Además este módulo contempla la opción de exportar el modelo a varios programas pre-proceso, entre ellos el que utilizamos para analizar los modelos de los tubos. Tras el proceso de diseño se guarda en un formato exportable para posteriormente poder importar el modelo al programa de pre-proceso Patran para realizar la discretización del mismo. En las siguientes imágenes se muestra el proceso seguido para la creación del modelo:

1º- Se realiza una simplificación del modelo por simetrías y se dibuja el modelo en su forma más simple:



*Figura B.1 Imagen SolidWorks*

2º- Por simetrías, se desglosa el tubo entero. Al hacerlo por simetrías se simplifica mucho el trabajo puesto que los cambios no se realizan en el modelo completo, sino en parte del mismo:



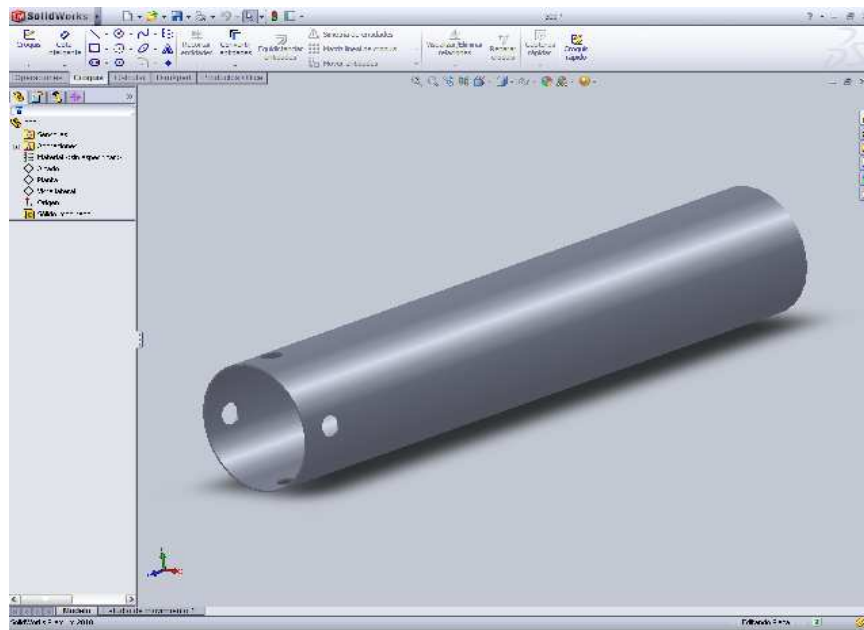


Figura B.2 Imagen SolidWorks

## B2.4.- PATRAN / NASTRAN

Patran es el módulo de Preproceso utilizado en este caso con salida a Nastran, en él se define el elemento a estudiar y el tipo de discretización deseada para la resolución del problema. Para ello se siguen unos determinados pasos que son los siguientes:

- Geometría y posicionamiento:

Tras importar el modelo desde Solid Works, se comprueba que tiene la propiedad de sólido en Patran, se eligen unos ejes de referencia para modificar entidades si fuese necesario con la función “geometry” del propio programa. Esta geometría se trata por medio de coordenadas u otros elementos de ayuda auxiliar (rectas, circunferencia, etc...).

- Discretización:

El sólido que queremos analizar se divide en nodos, en donde se consideran los grados de libertad del objeto a estudio, y elementos los cuales forman la malla de nuestro estudio conectando los nodos. Este apartado es muy importante ya que hay que definir el elemento con el cual se va a

discretizar el objeto. Una vez elegido el elemento a utilizar, la discretización se puede realizar de forma automática o generando elemento a elemento.

Nastran tiene un criterio a la hora de nombrar los distintos elementos de su librería. A continuación se detalla la manera que tiene este programa de nombrar a los elementos.

### ➤ **Un elemento escalar (0-D):**

Es un elemento que conecta dos grados de libertad en la estructura o un grado de libertad y el terreno. Los elementos escalares están disponibles para trabajar como muelles, masas y amortiguadores viscosos. Es posible, utilizando sólo elementos escalares y restricciones, construir un modelo de elementos finitos de una estructura con comportamiento lineal. Pero la utilización de elementos escalares con "offset" puede ocasionar valores incorrectos en un análisis de pandeo ya que no se considera el efecto de no linealidad por grandes desplazamientos.

Cuando se definen elementos escalares entre nodos, los nodos deben ser coincidentes, de lo contrario cualquier fuerza aplicada al nodo por el elemento escalar puede inducir momentos en la estructura y causar resultados incorrectos.

Los elementos escalares son útiles para modelizar componentes de una estructura con sus modos de vibración o cuando se quiere considerar las propiedades eléctricas o térmicas dentro de un modelo global. Los elementos escalares se utilizan conjuntamente con los elementos estructurales con los detalles geométricos de la estructura física local no son de interés o son desconocidos. Ejemplos típicos los tenemos en amortiguadores, rigidez de una junta de unión, etc...

### ➤ **Elementos línea ó uni-dimensionales (1-D)**

A continuación se muestran el criterio con el que Nastran nombra los elementos línea ó uni-dimensionales:

**CROD, CONROD, CTUBE:** Barra bi-articulada (4 gdl/nodo)

**CBAR:** Viga prismática (6 gdl/nodo)

**CBEAM:** Viga recta con alabeo (7 gdl/nodo)

**CBEND:** Viga curva o tubería (6 gdl/nodo)

**CGAP:** Elemento GAP de contacto/rozamiento nodo-a-nodo.

### ➤ **Elementos finitos bi-dimensionales (2-D):**

A continuación se muestran el criterio con el que Nastran nombra los elementos finitos bi-dimensionales:

**CQUADX:** Elemento axisimétrico cuadrilátero parabólico.

**CRAC2D:** Elemento cuadrilátero (simple).

**CTRIA:** Elemento triangular plano isoparamétrico de 3-nodos.

**CTRIA6:** Elemento Shell triangular isoparamétrico.

**CTRIAR:** Elemento triangular simple isoparamétrico de 3-nodos

**CTRIAX:** Elemento triangular axisimétrico de alto-orden

**CTRIAX6:** Elemento axisimétrico triangular isoparamétrico de 6-nodos.

**CQUAD4:** Elemento cuadrilátero plano isoparamétrico de 4-nodos

**CQUAD8:** Elemento Shell curvado isoparamétrico parabólico

**CQUAD:** Elemento cuadrilátero parabólico de alto orden

**CQUADR:** Elemento isoparamétrico plano de 4-nodos con rigidez de membrana.

**CSHEAR:** Elemento placa cuadrilátero de 4-nodos.

### ➤ Elementos finitos tri-dimensionales (3-D):

A continuación se muestran el criterio con el que Nastran nombra los elementos finitos tri-dimensionales:

**CPENTA:** Elemento sólido prisma triangular de 6-15 nodos que se utiliza habitualmente como elemento de transición de sólidos a Shells,

**CHEXA:** Elemento sólido exaédrico de 8-20 nodos más general de NX Nastran

**CRAC3D:** Elemento cuadrilátero que se utiliza para modelizar discontinuidades en sólidos debido a grietas.

**CTETRA:** Elemento sólido tetraédrico de 4-10 nodos y tres grados de libertad de translación por nodo

Además de estos 4 tipos de elementos, Nastran posee otros tipos denominados “especiales”.

- Materiales:

Los materiales son definidos a partir de la selección del material y la definición de los requerimientos necesarios para establecer su comportamiento, además esta permitido combinar comportamientos de materiales como por ejemplo Elasticidad – Plasticidad. Nastran ofrece una amplia librería de

materiales que permiten la simulación de modelos con características lineales, no-lineales, materiales isotropitos y anisotropicos. El uso de integración numérica en los elementos incluye integración numérica a lo largo de la sección transversal en Shells y Vigas, proporcionando mayor flexibilidad para analizar estructuras más complejas. El comportamiento del material es definido dentro de las siguientes categorías generales:

- Propiedades generales (Amortiguamiento, densidad, expansión térmica).
- Propiedades elásticas.
- Propiedades inelásticas.
- Propiedades térmicas.
- Propiedades acústicas.
- Propiedades para fluidos hidrostáticos.
- Propiedades de difusión de masa.
- Propiedades eléctricas.
- Ecuaciones de estado.

- Cargas y condiciones de contorno:

Por último se definen las cargas a las que está sometido el sólido, condiciones de apoyo en desplazamiento y contactos entre distintas superficies.

Una vez llegado a este paso la etapa en Patran ha finalizado pero antes éste prepara la información para ser enviada a la siguiente etapa, procesador o programa principal, y dibuja por pantalla la geometría inicial y las condiciones para que sean verificadas por el usuario.

Posteriormente, deberá obtenerse un fichero de datos (input) en el cual se especifican todos los parámetros necesarios para, posteriormente, llevar a cabo el cálculo. Este fichero contiene la siguiente información:

- 1) Aparece un listado de todos los nodos que forman parte del modelo y con las coordenadas espaciales de cada uno dependiendo del sistema de referencia utilizado.
- 2) Aparecen los distintos grupos de elementos existentes. Cada uno de los grupos se especifican de la siguiente forma: primero aparece un listado del conjunto de nodos que forman parte de dicho grupo (NSET) y, después, se enumera cada elemento detallando el conjunto de nodos que forma parte del mismo (ELSET).
- 3) Se asigna a cada uno de los grupos el material correspondiente según las especificaciones dadas. Además, cuando se trata de elementos tipo lámina (SHELL) se especifica el espesor, el

- número de puntos de integración y el sistema de orientación de cada grupo de elementos.
- 4) Se definen los materiales utilizados. En este bloque se especifica el nombre del material y las distintas propiedades asociadas a los mismos (densidad, módulo elástico, límite de rotura, etc...).
  - 5) Se define del tipo de cálculo que va a realizarse.
  - 6) Se especifican tanto las condiciones de contorno como las cargas aplicadas. En este caso aparece un listado de los nodos en los cuales se aplican las condiciones de contorno con sus correspondientes valores de restricción, y otro listado de los nodos en los que deben aplicarse las cargas con el correspondiente valor de las mismas.

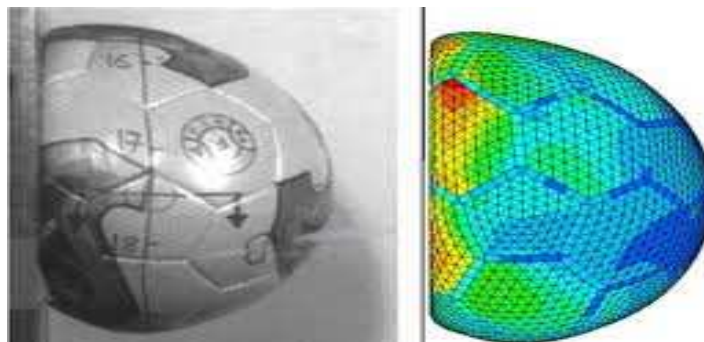
Una vez obtenido y comprobado el fichero anterior, se realiza el proceso de cálculo del modelo. En este caso, va a utilizarse el programa ABAQUS.

Tras el análisis se estudian y analizan los resultados, obteniendo graficas, tablas comparativas e información de todo tipo (tensión, deformación, datos de volumen, de masa, de fuerzas, etc...).

### **B2.5.- ABAQUS**

ABAQUS es un programa de cálculo por elementos finitos de propósito general realizado por la empresa Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.

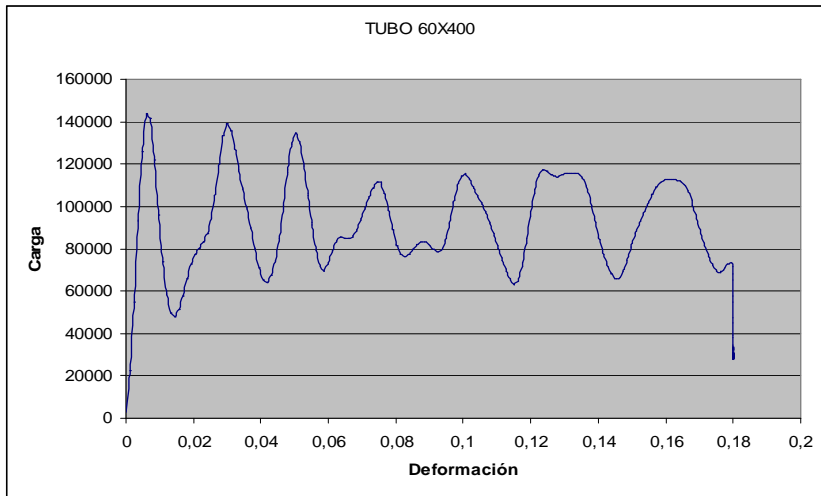
Permite resolver problemas de mecánica del sólido, lineal y no lineal, en los rangos estático y dinámico. Incluye modelos de material de tipo elastoplástico y viscoplastico, entre otros. En cuanto se refiere a problemas de no linealidad geométrica incluye formulaciones para grandes deformaciones y problemas de contacto.



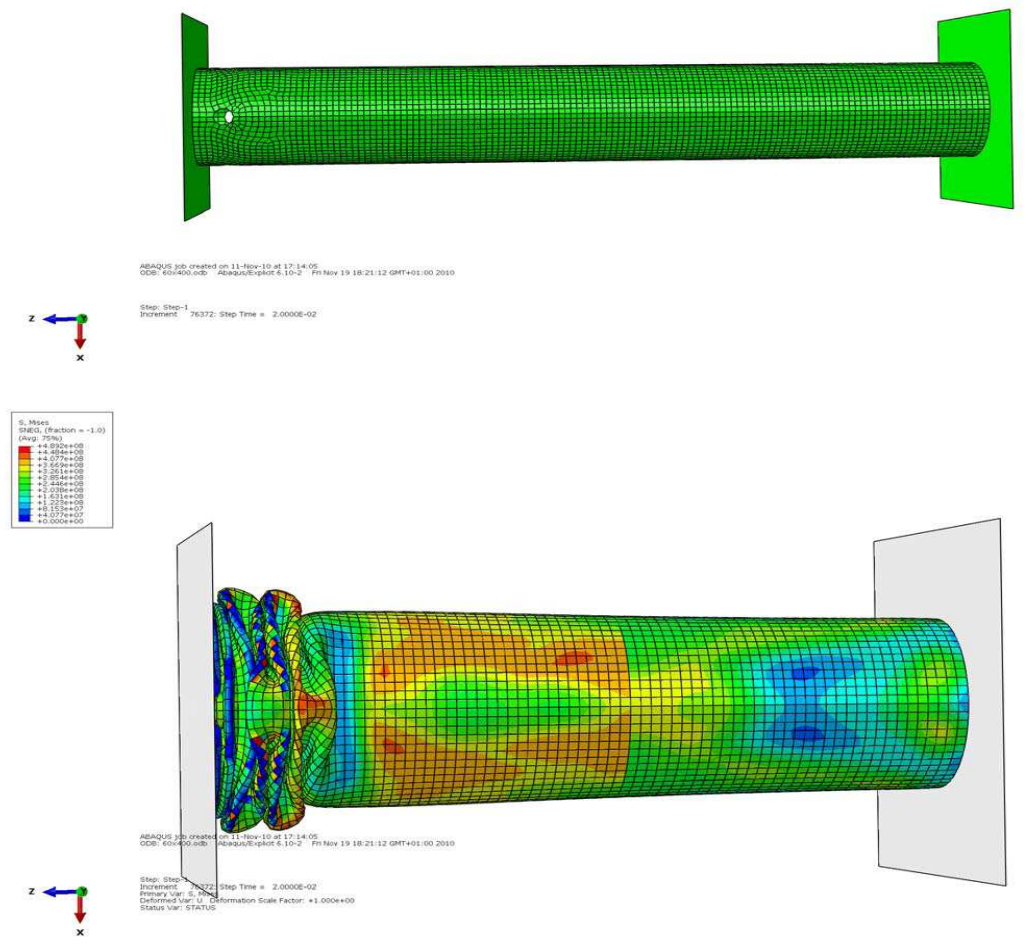
*Figura B.3 Ejemplo del modelo de una pelota estudiado con Abaqus.*

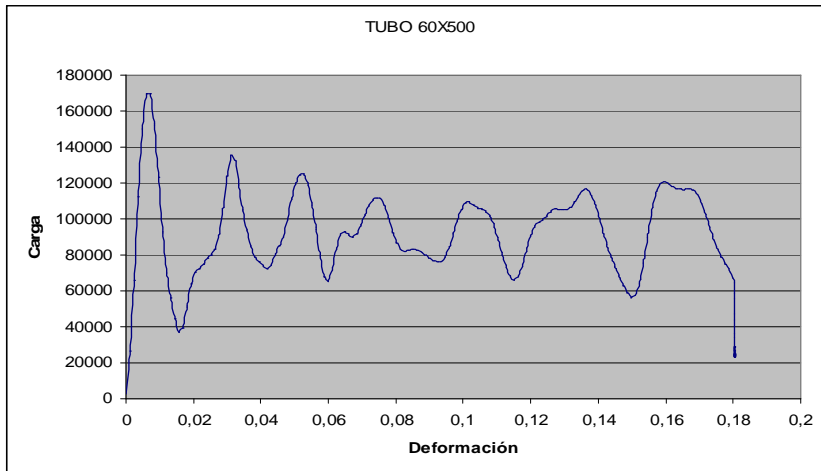




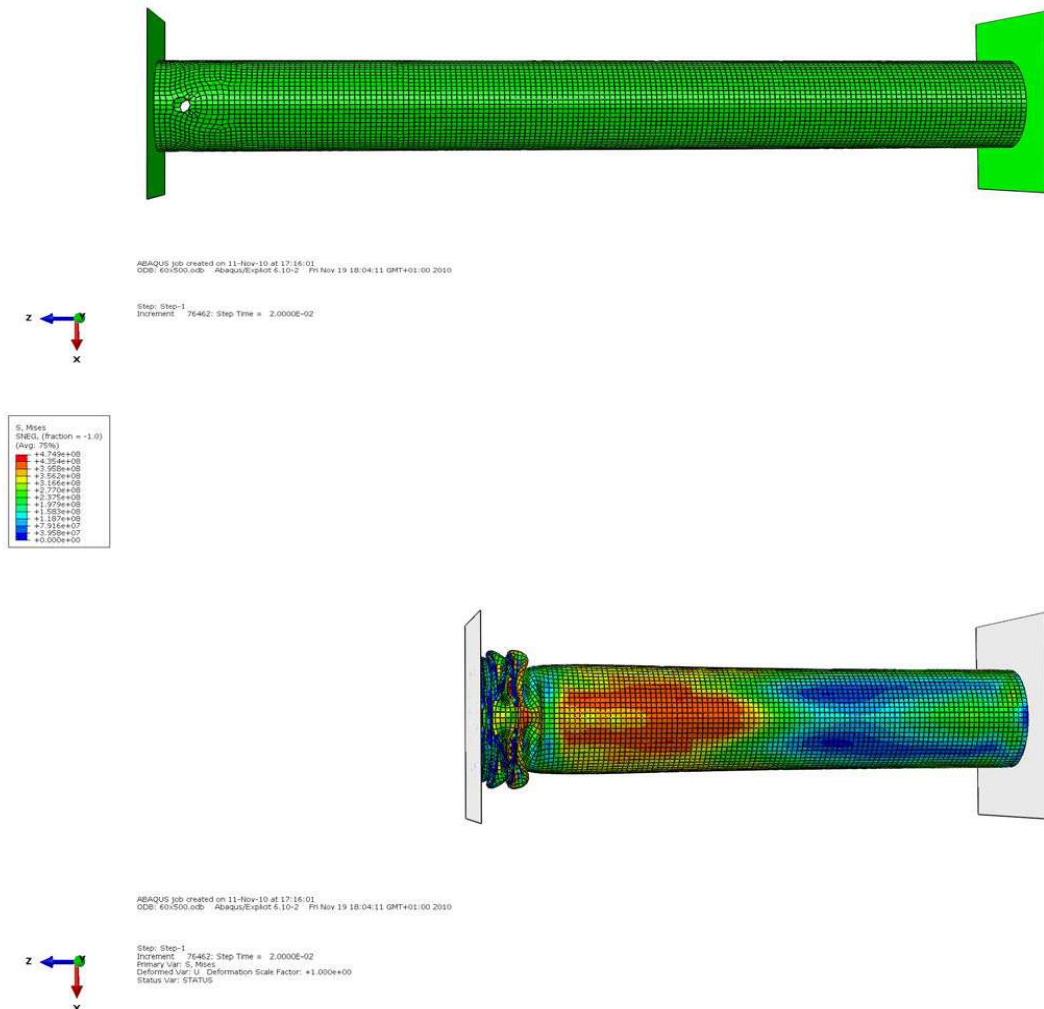


VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
143808	77036,1

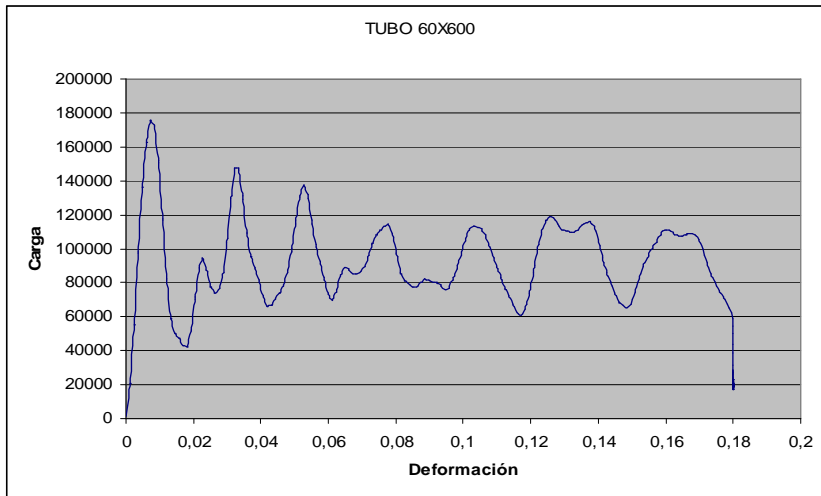




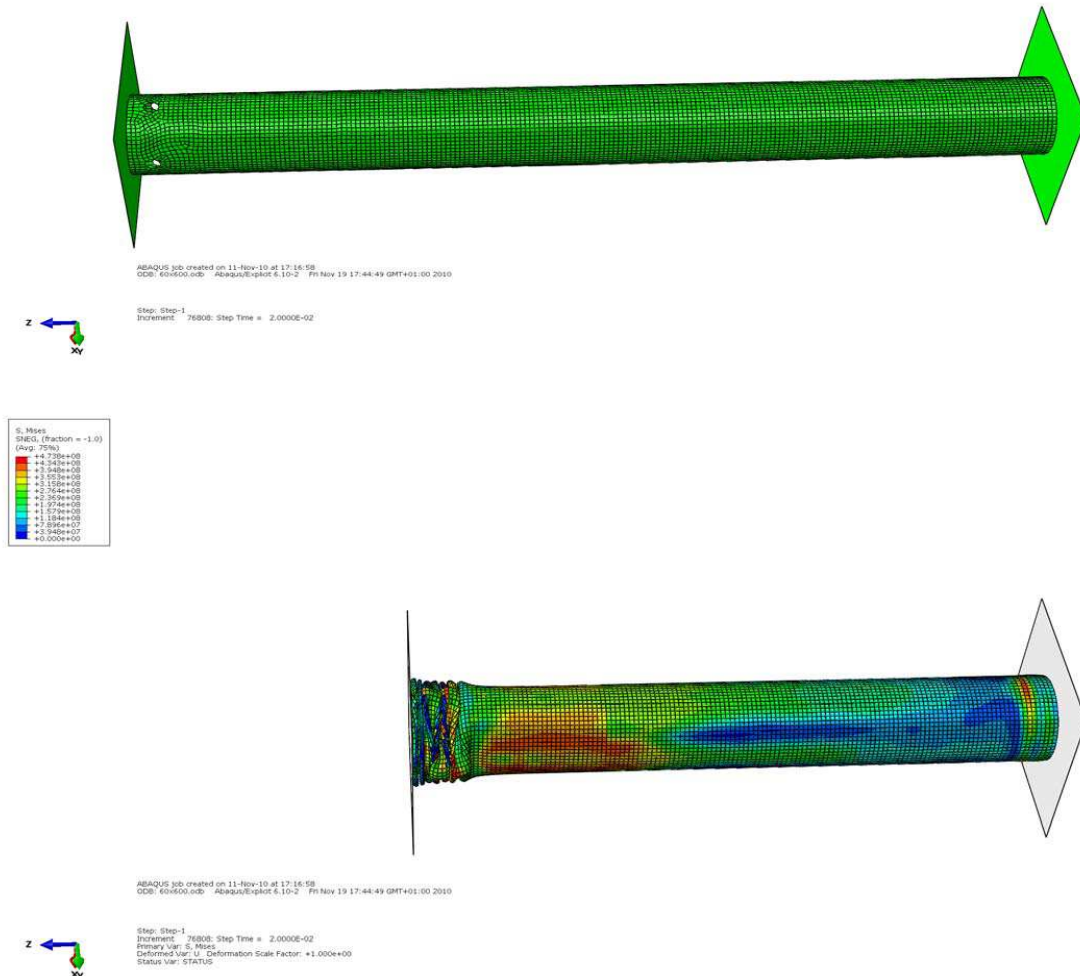
VALORES CARGA (Pa)	
PICO	MEDIA
169937	76153,8

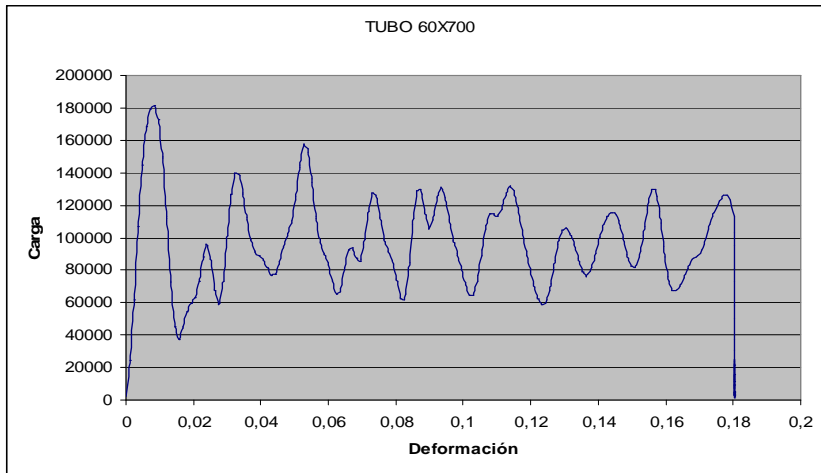




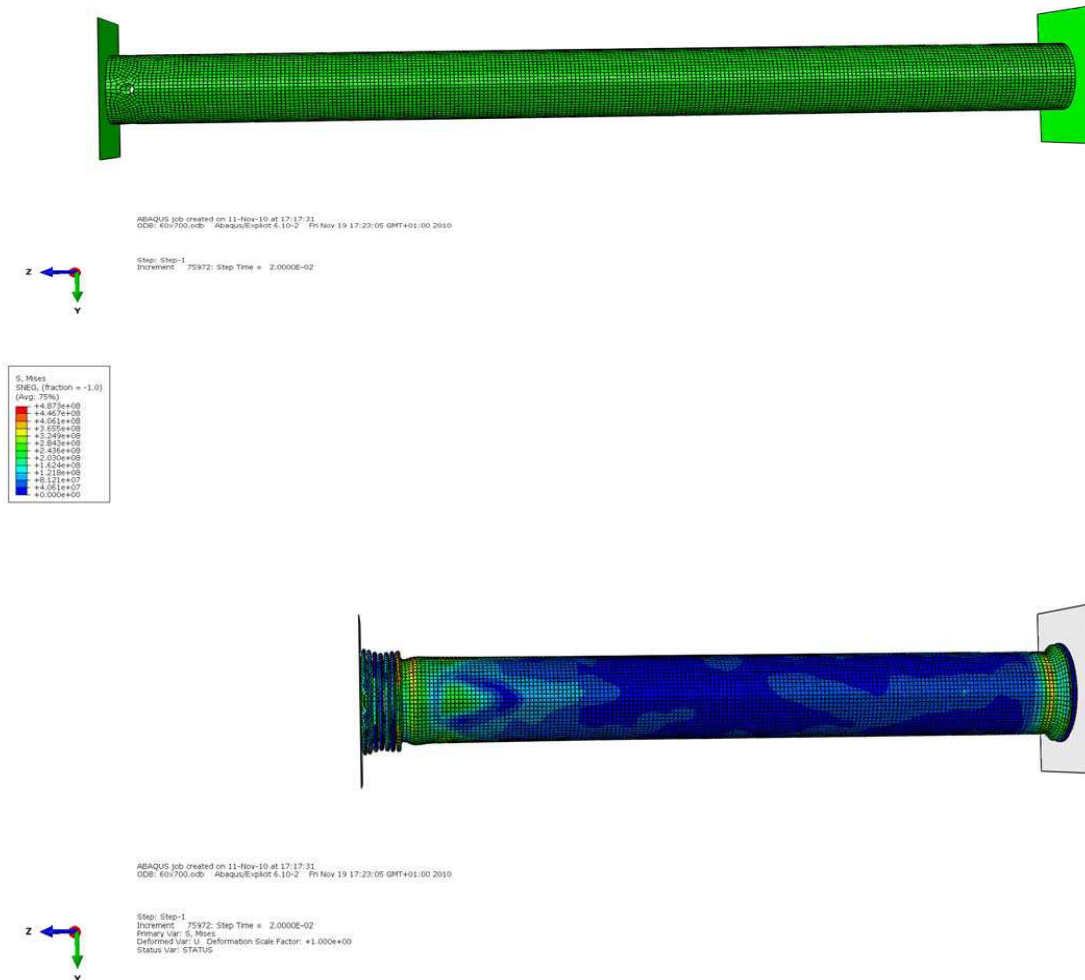


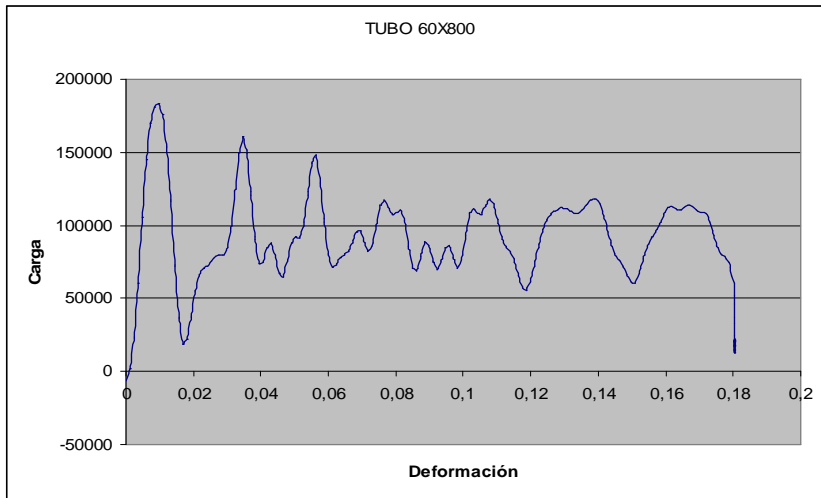
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
175488	75115,1





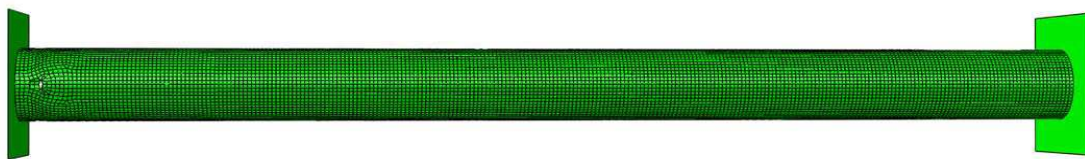
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
181451	76854,0





### VALORES CARGA (Pas)

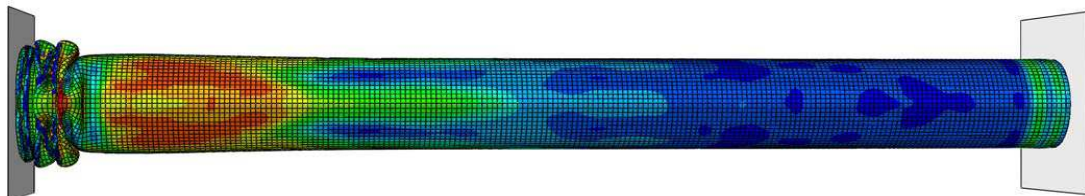
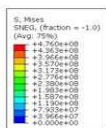
PICO	MEDIA
183243	74668



ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:18:05  
ODB: 60x800.odb - ABAQUS/Explicit 6, 10-2 Fri Nov 19 16:58:54 GMT+01:00 2010



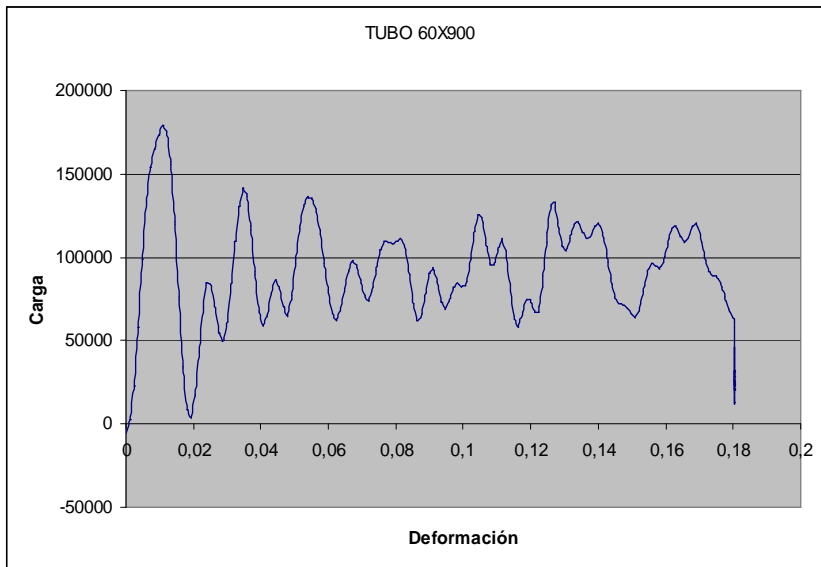
Step: Step-1  
Increment: 76206; Step Time = 2.0000E-02



ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:18:05  
ODB: 60x800.odb - ABAQUS/Explicit 6, 10-2 Fri Nov 19 16:58:54 GMT+01:00 2010

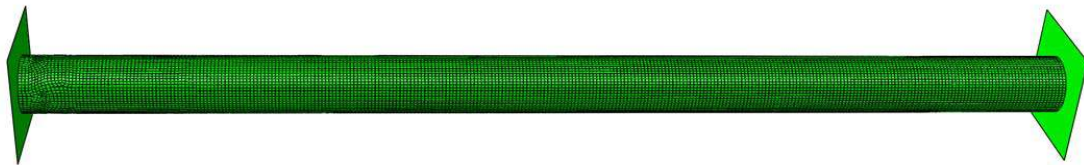


Step: Step-1  
Increment: 76206; Step Time = 2.0000E-02  
Primary Var: S, Mises  
Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00  
Status Var: STATUS



### VALORES CARGA (Pas)

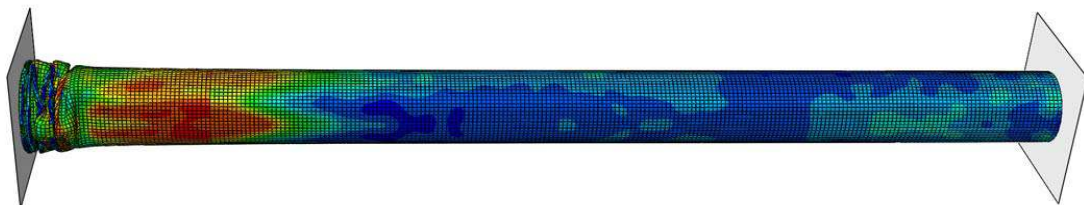
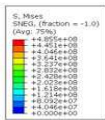
PICO	MEDIA
178992	75978



ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:18:37  
CDB: 60x900.cdb - ABAQUS/Explicit 6.10-2 Fri Nov 19 16:31:10 GMT+01:00 2010



Step: Step-1  
Increment: 75897; Step Time = 2.0000E-02



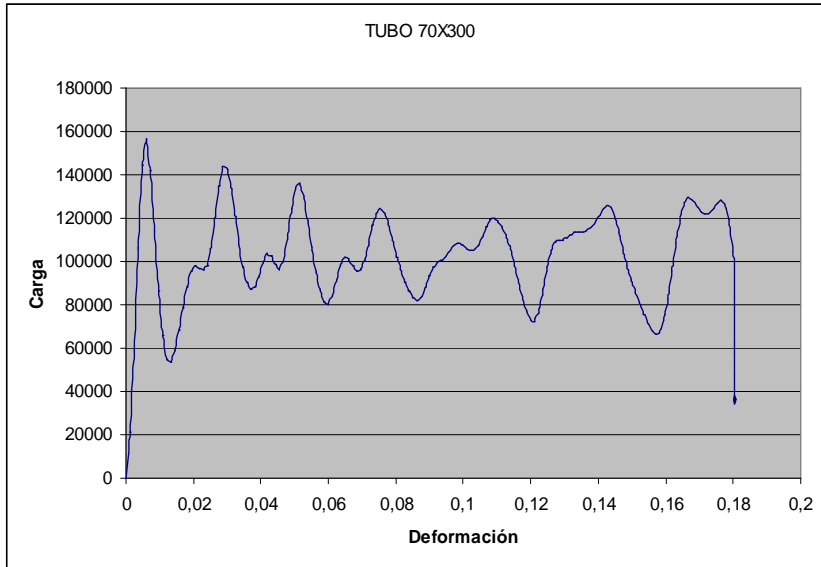
ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:18:37  
CDB: 60x900.cdb - ABAQUS/Explicit 6.10-2 Fri Nov 19 16:31:10 GMT+01:00 2010



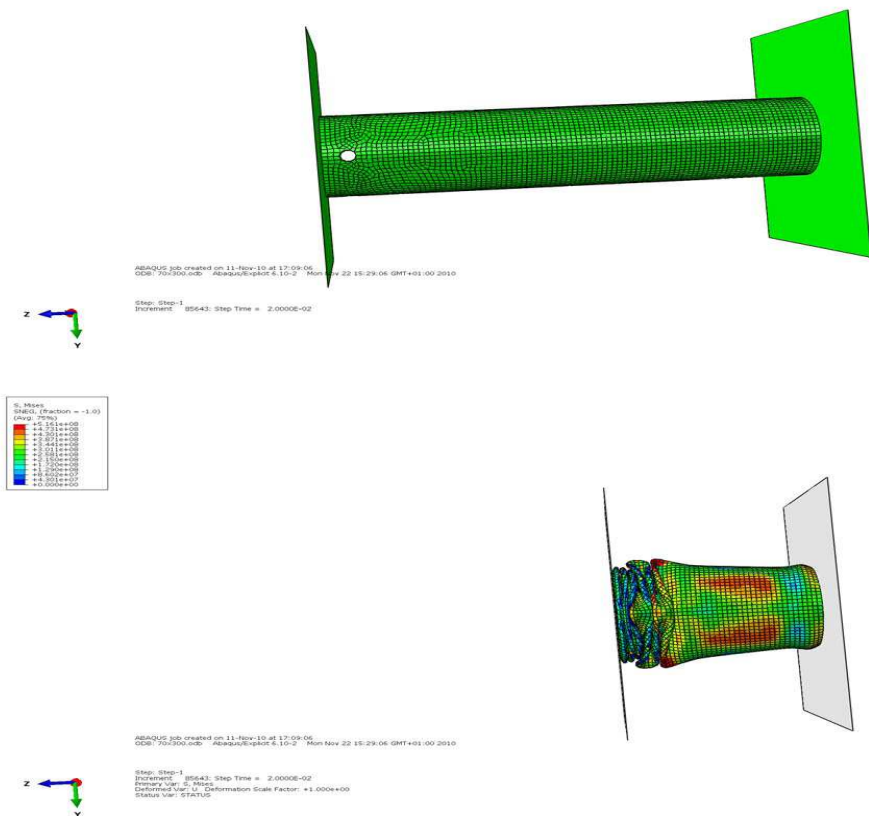
Step: Step-1  
Increment: 75897; Step Time = 2.0000E-02  
Primary Var: S, Mises  
Deformed Var: U, Deformation Scale Factor = 1.000E+00  
Status Var: STATUS

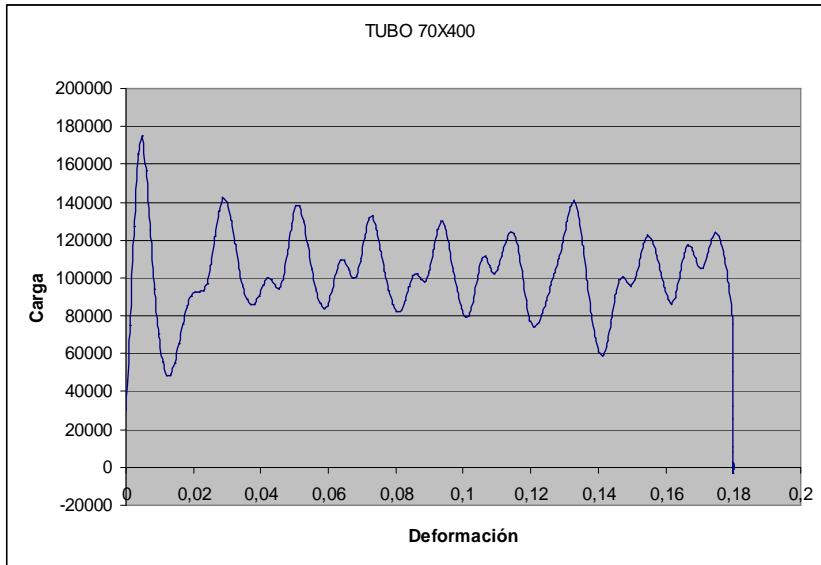


Ahora se observan los resultados obtenidos de los tubos de 70mm de diámetro:

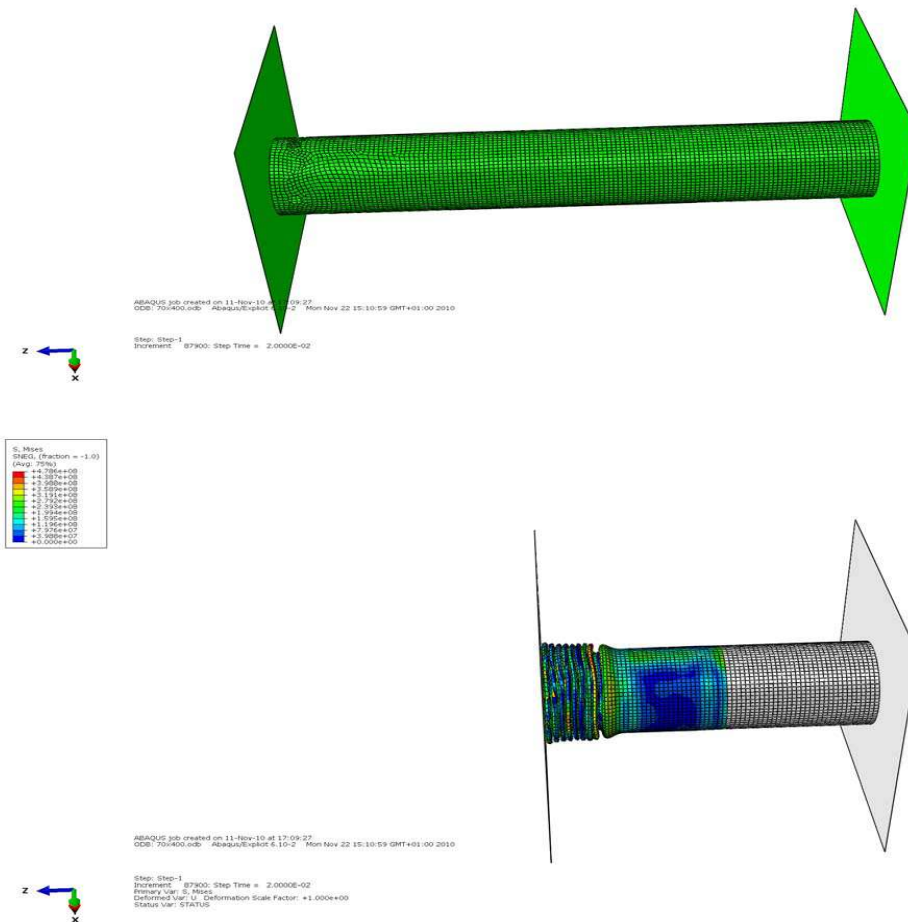


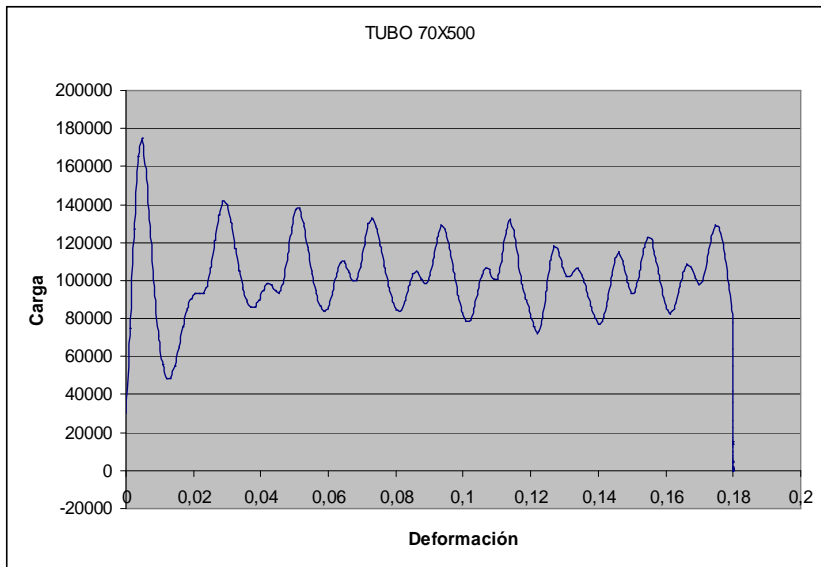
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
156542	86307





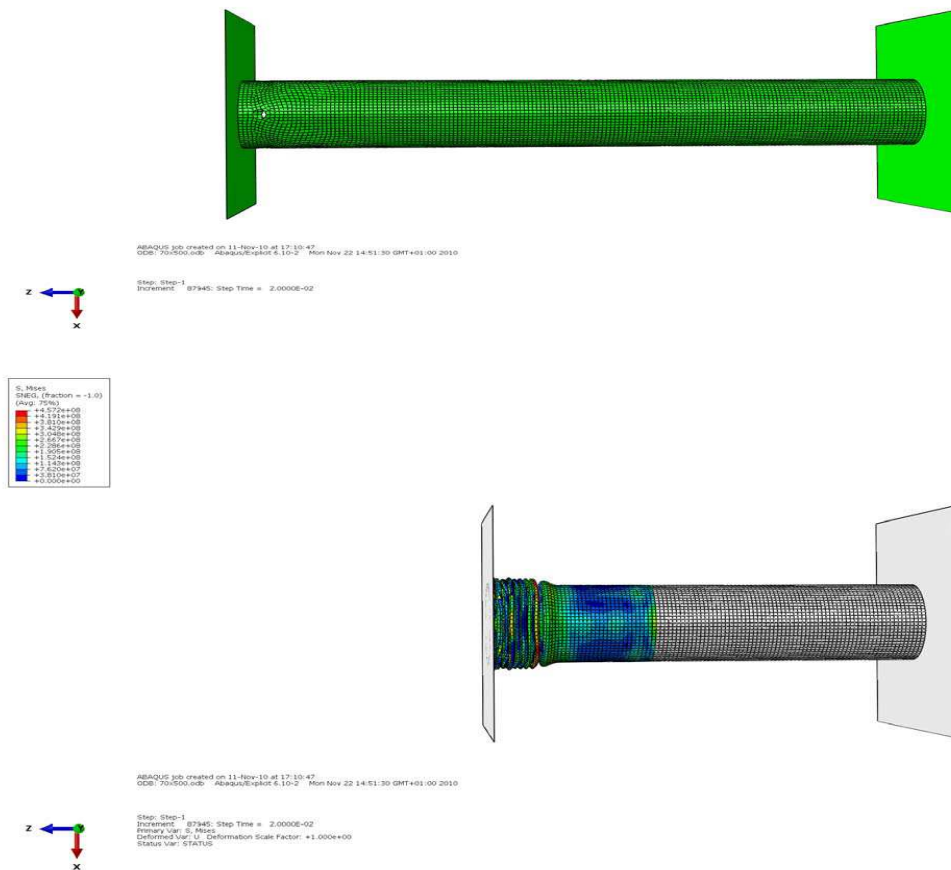
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
174976	77502



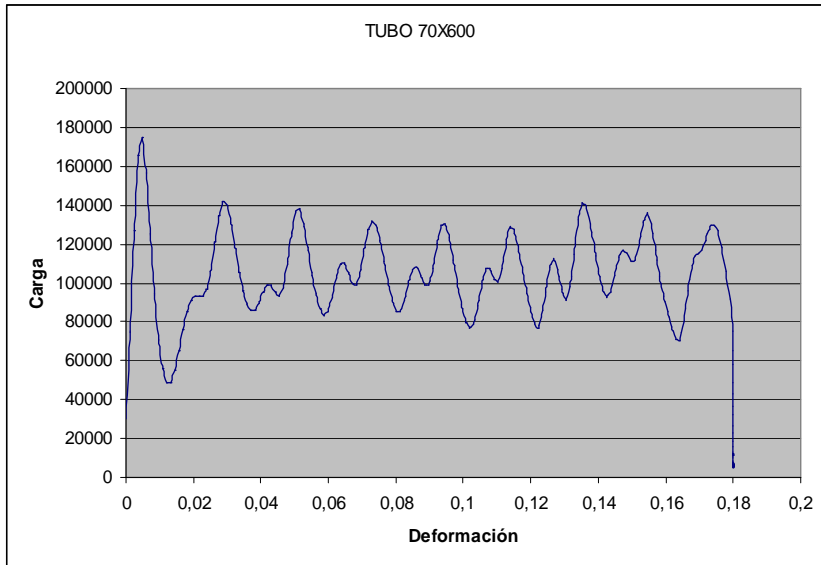


**VALORES CARGA (Pas)**

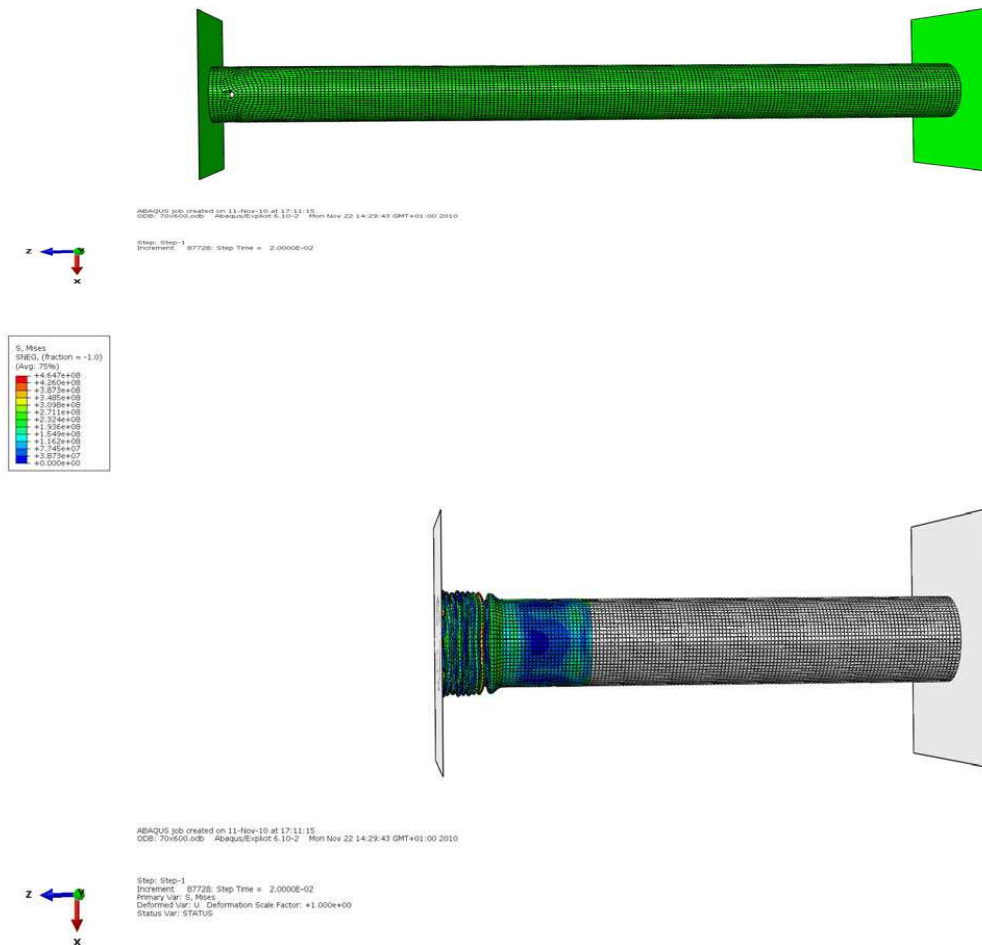
PICO	MEDIA
174959	78142



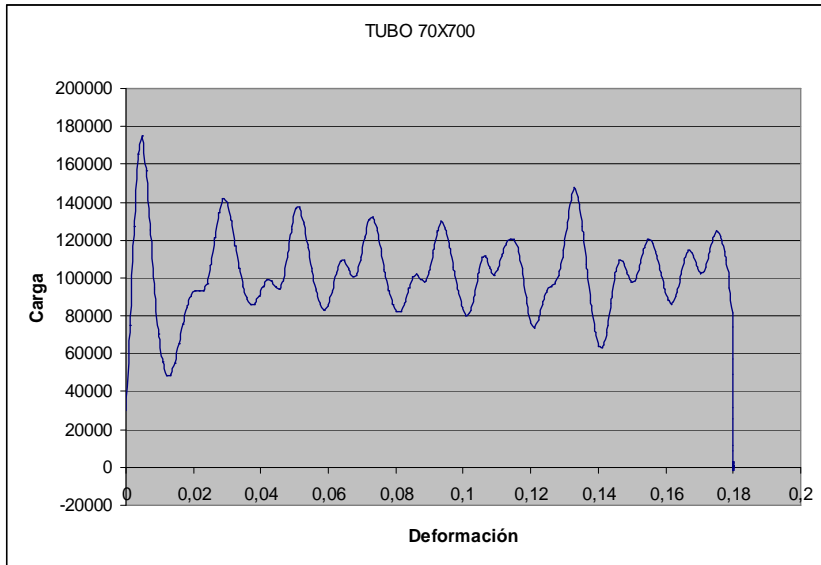




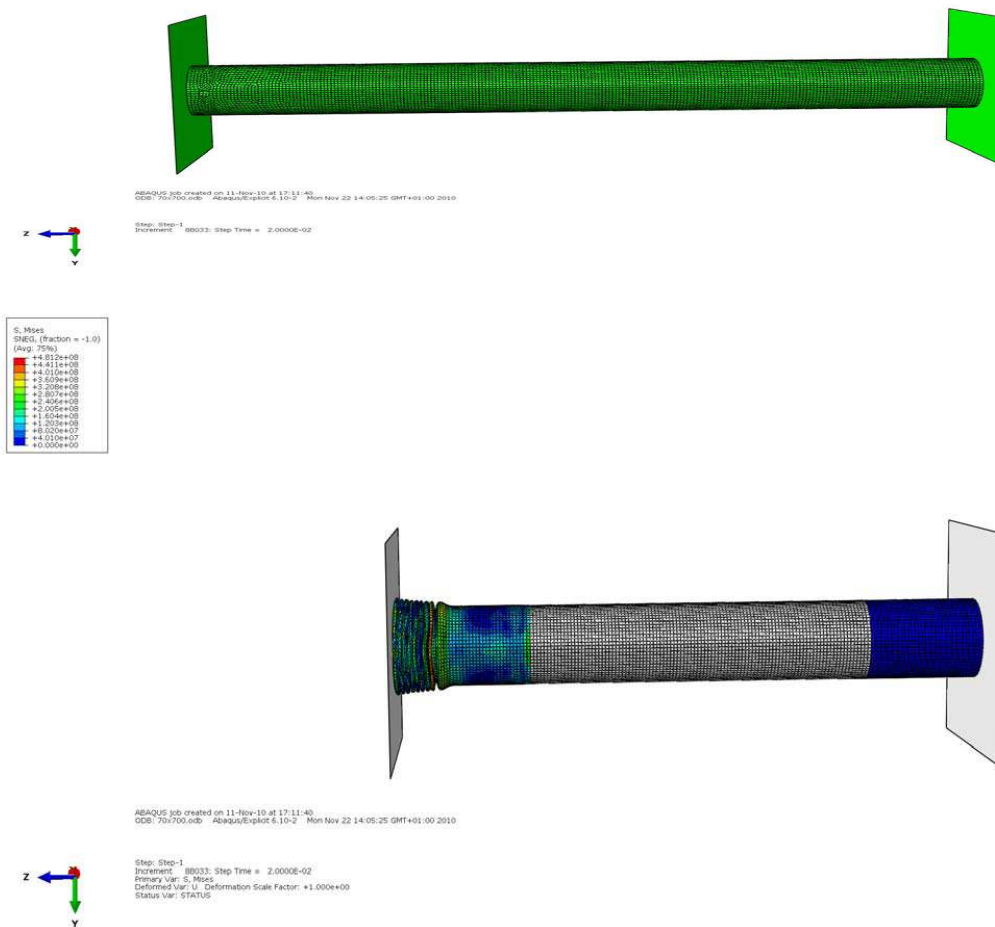
VALORES CARGA (Pa)	
PICO	MEDIA
174930	80921

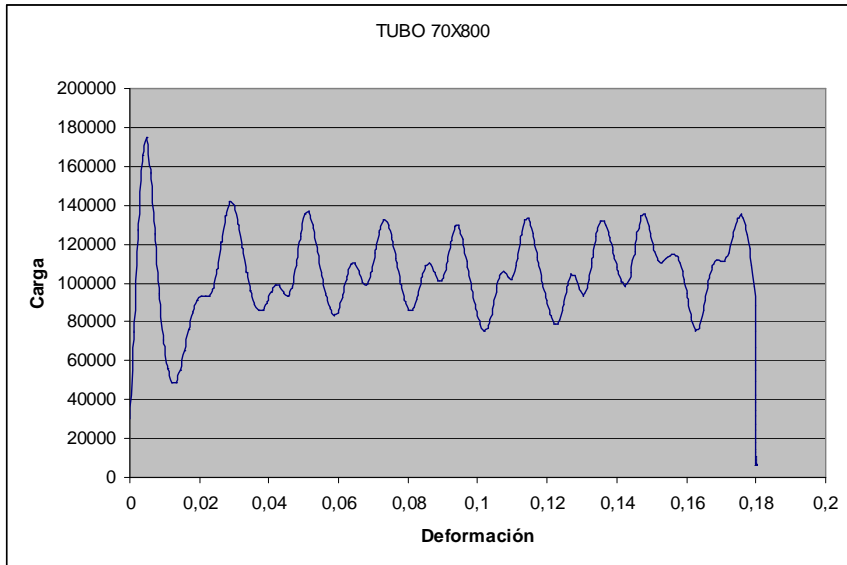




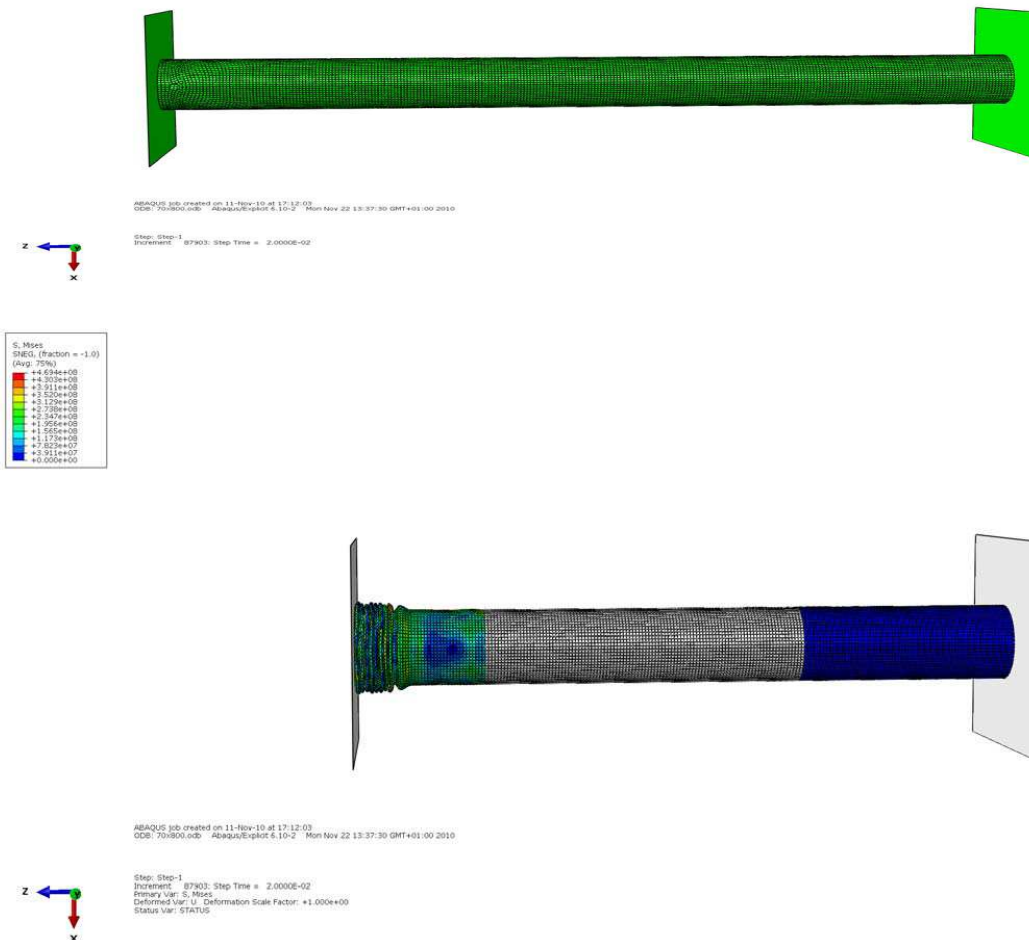


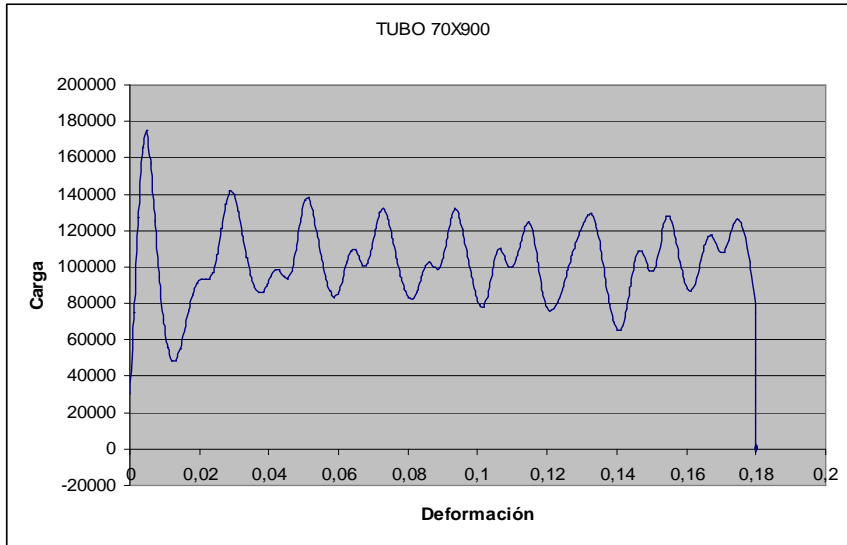
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
174954	77769



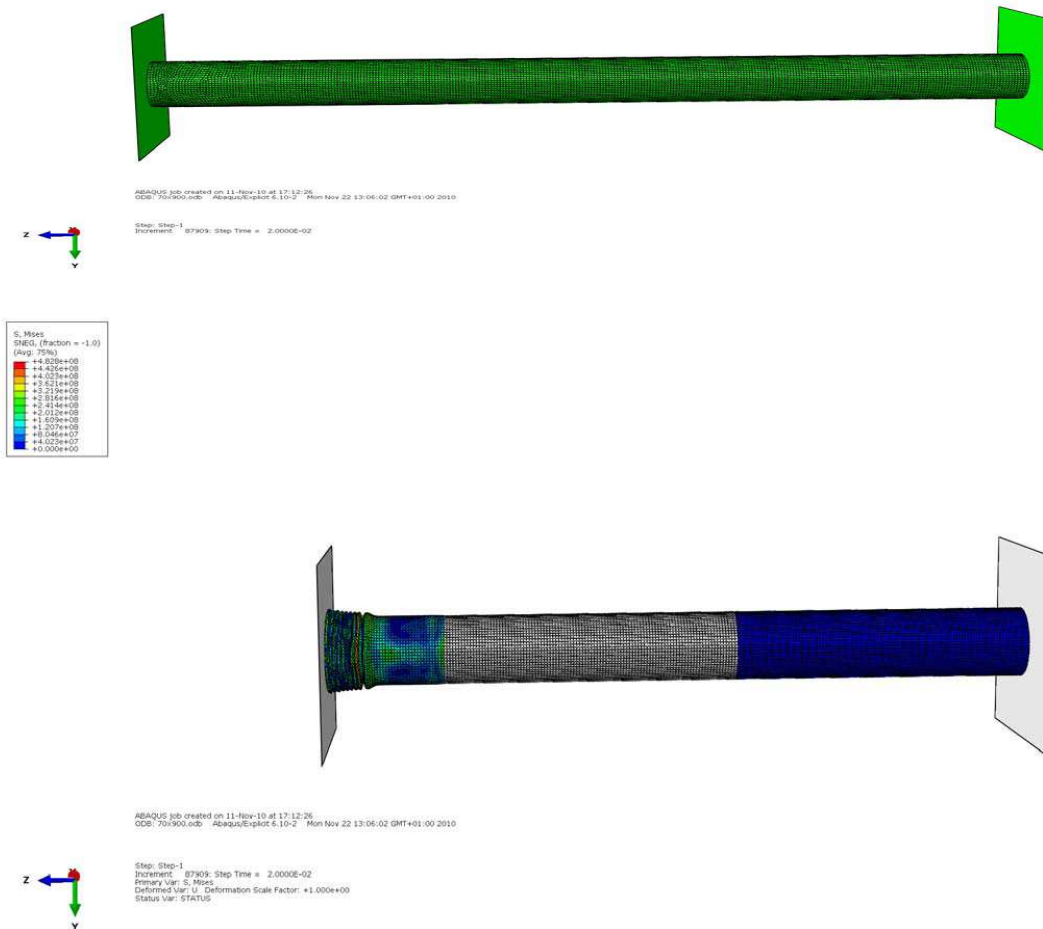


VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
174970	81725

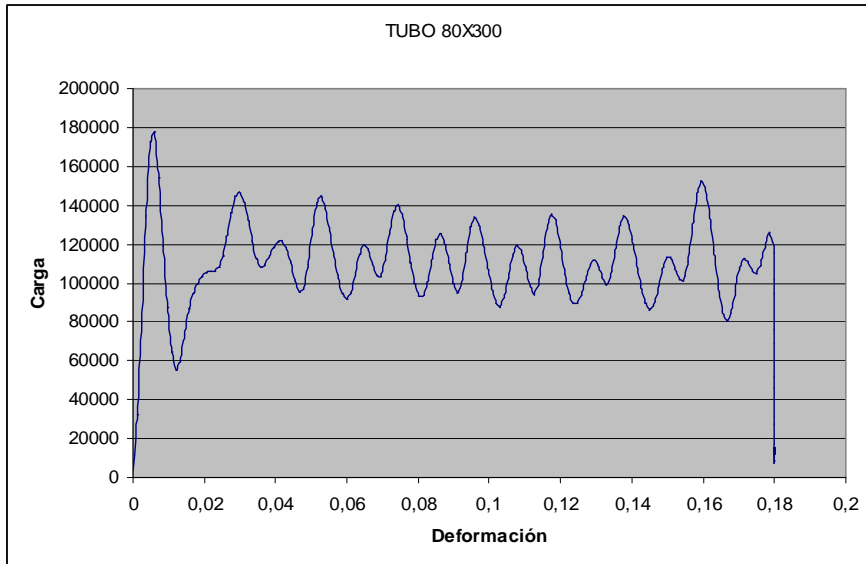




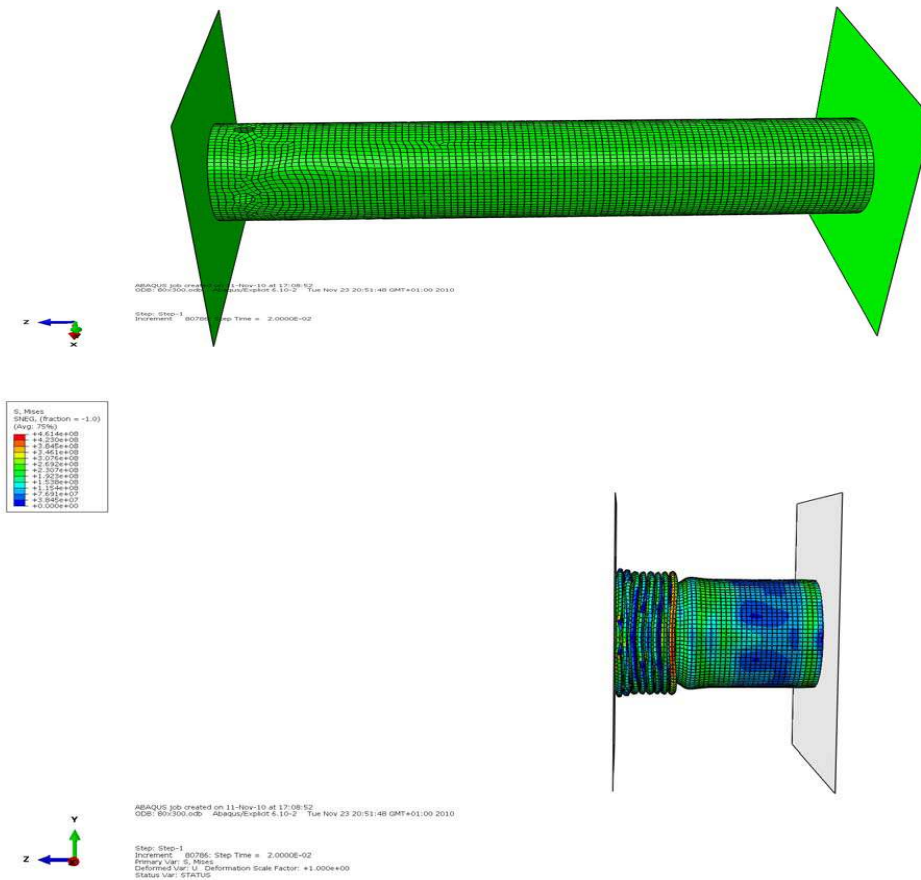
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
174969	77848

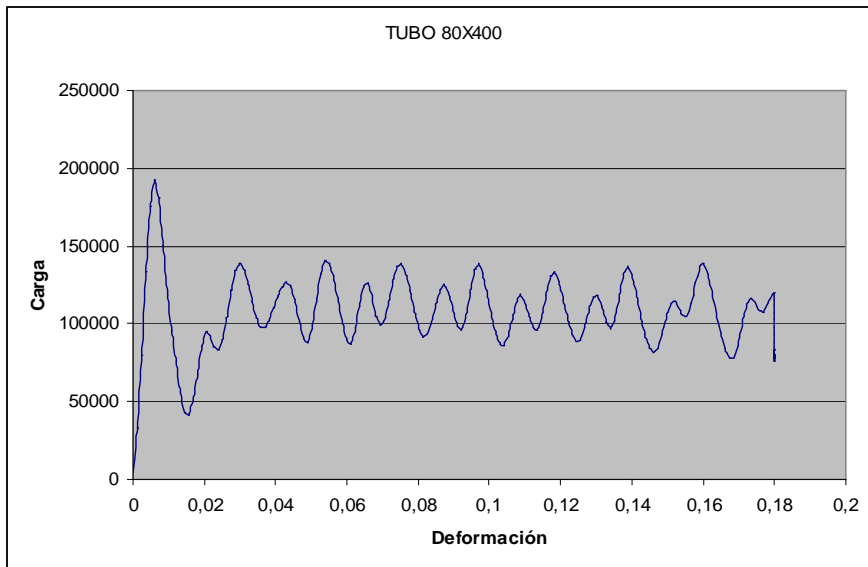


De este primer material, solo queda por comprobar los resultados de los tubos de 80mm, que se exponen a continuación:

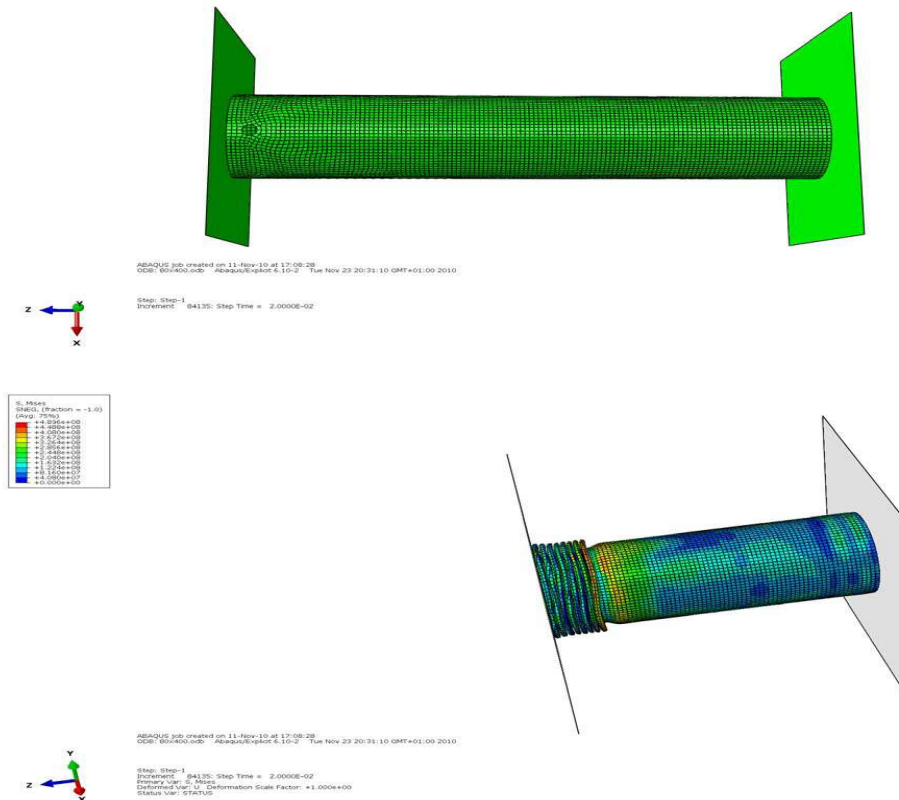


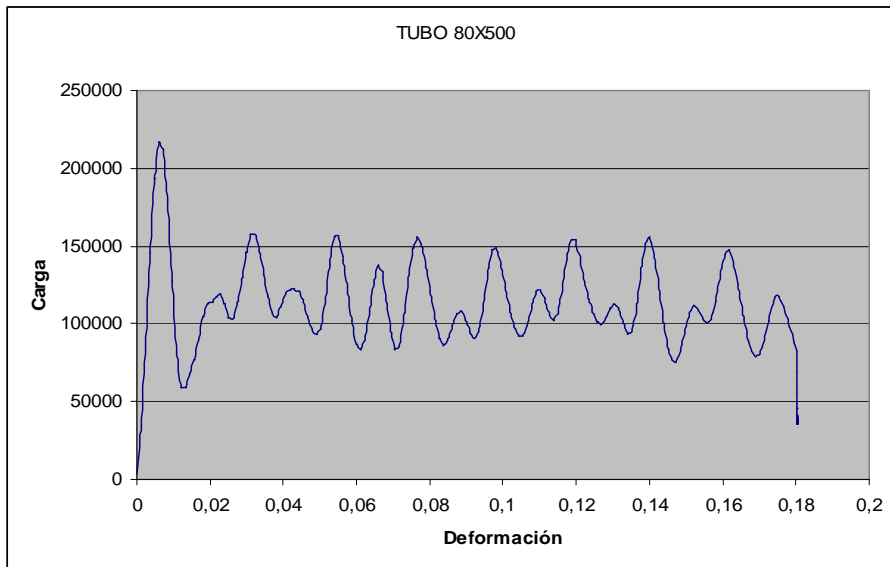
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
177930	87293





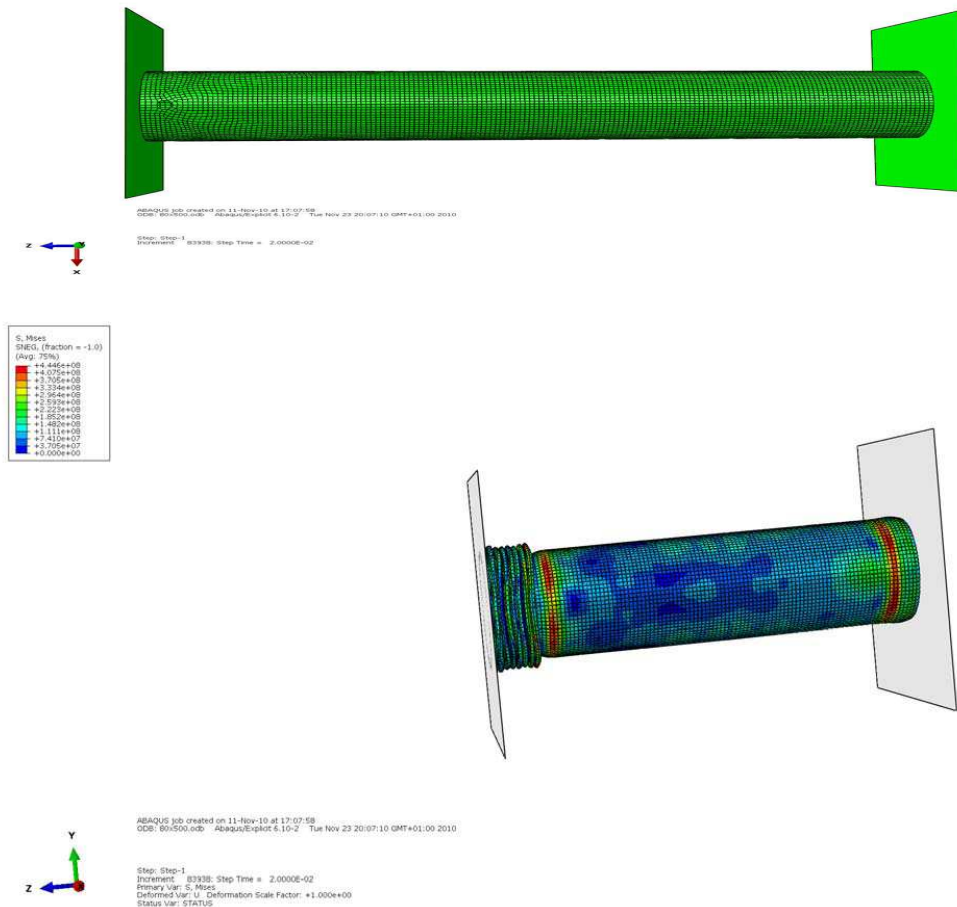
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
192936	101699

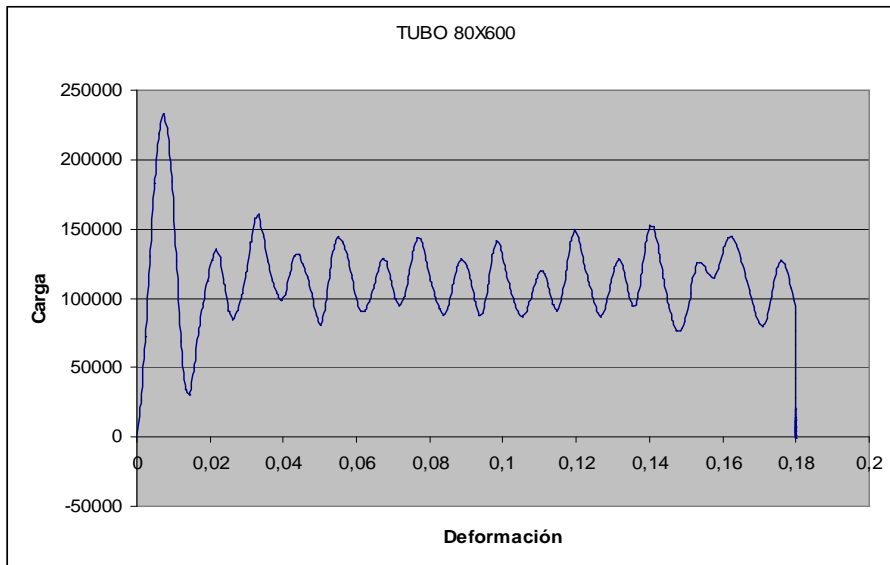




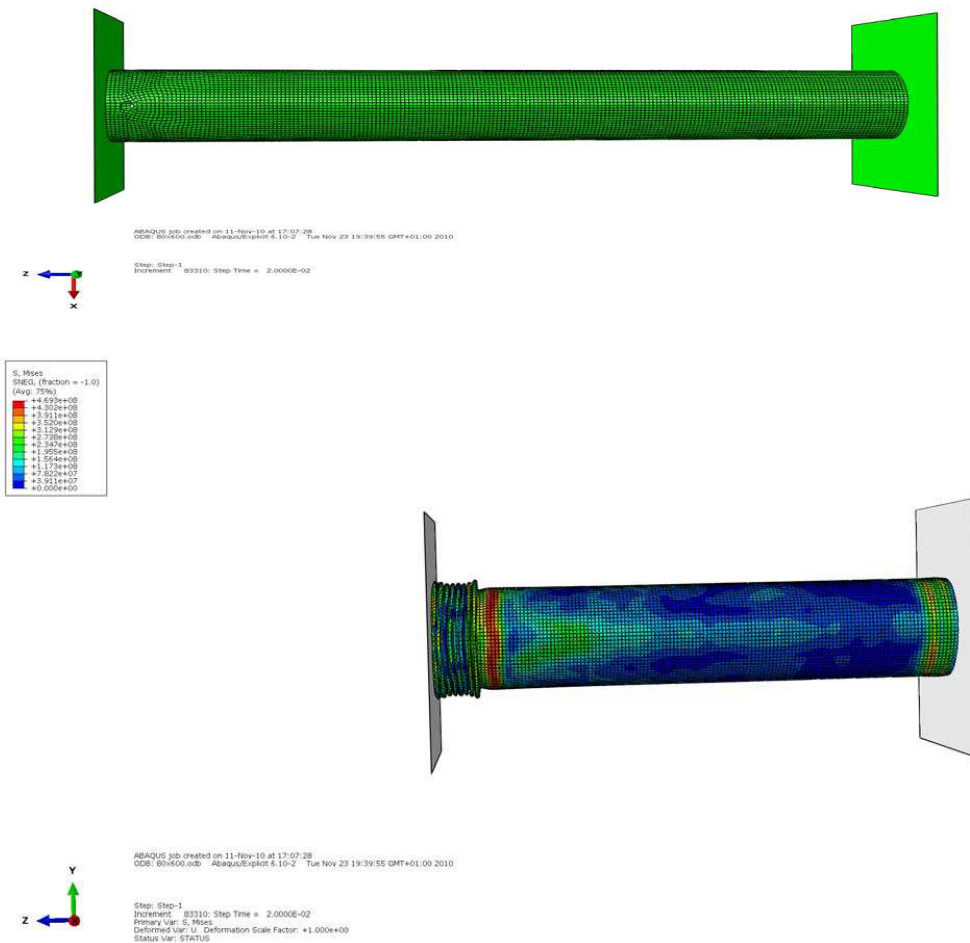
### VALORES CARGA (Pas)

PICO	MEDIA
217134	95238

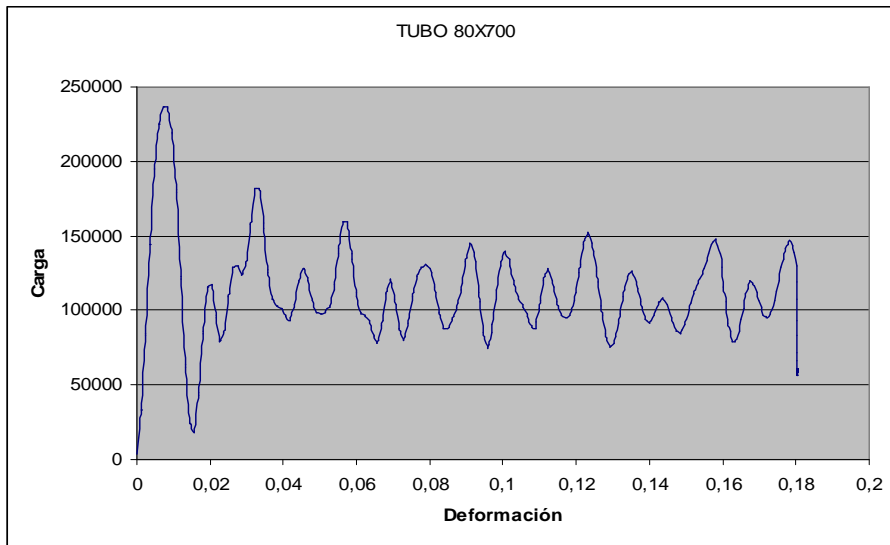




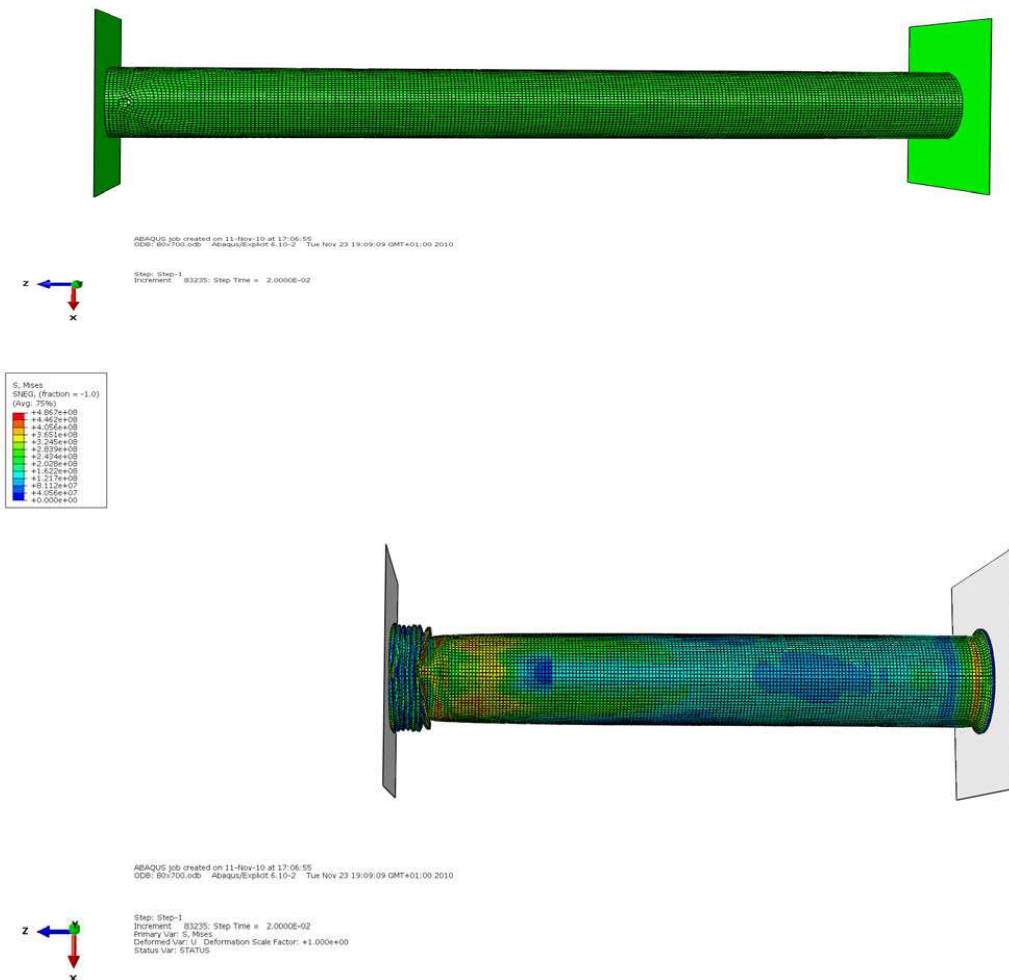
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
232637	87240

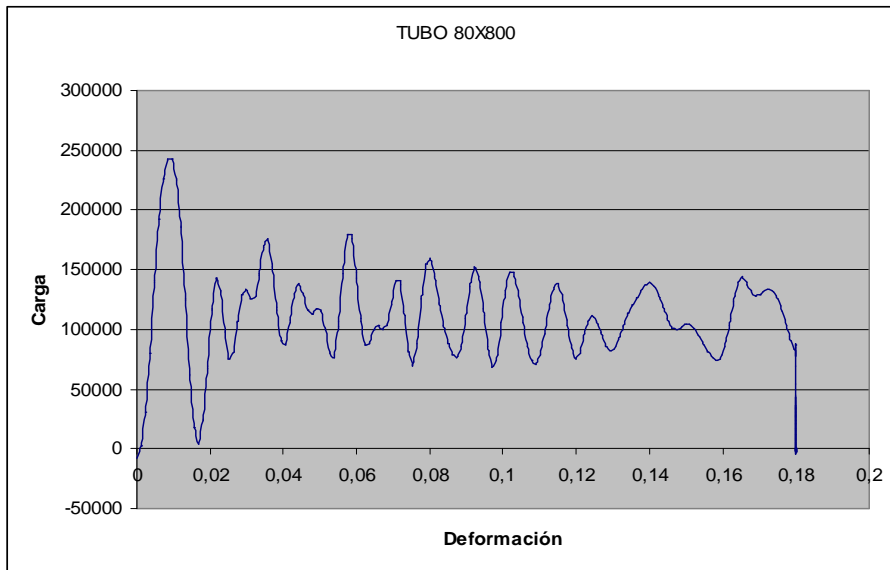






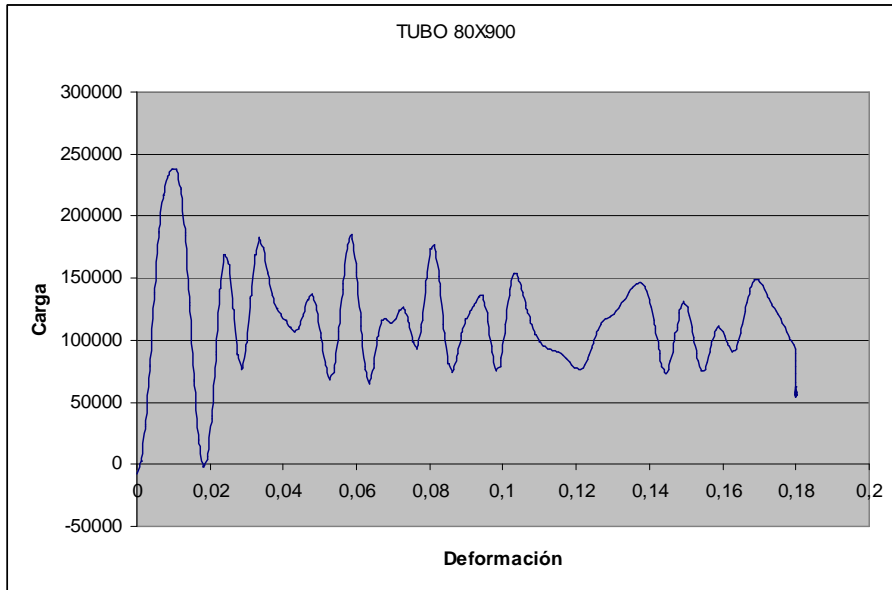
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
236997	100118





VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
243187	88511





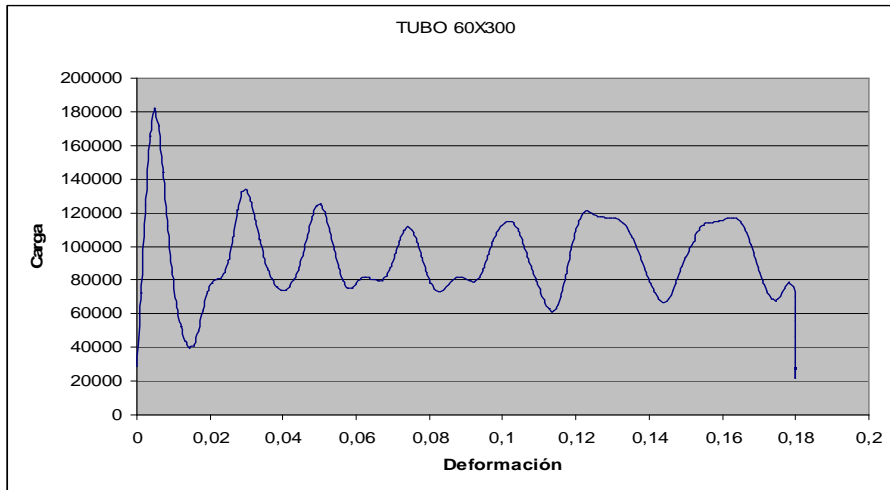
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
237922	100982



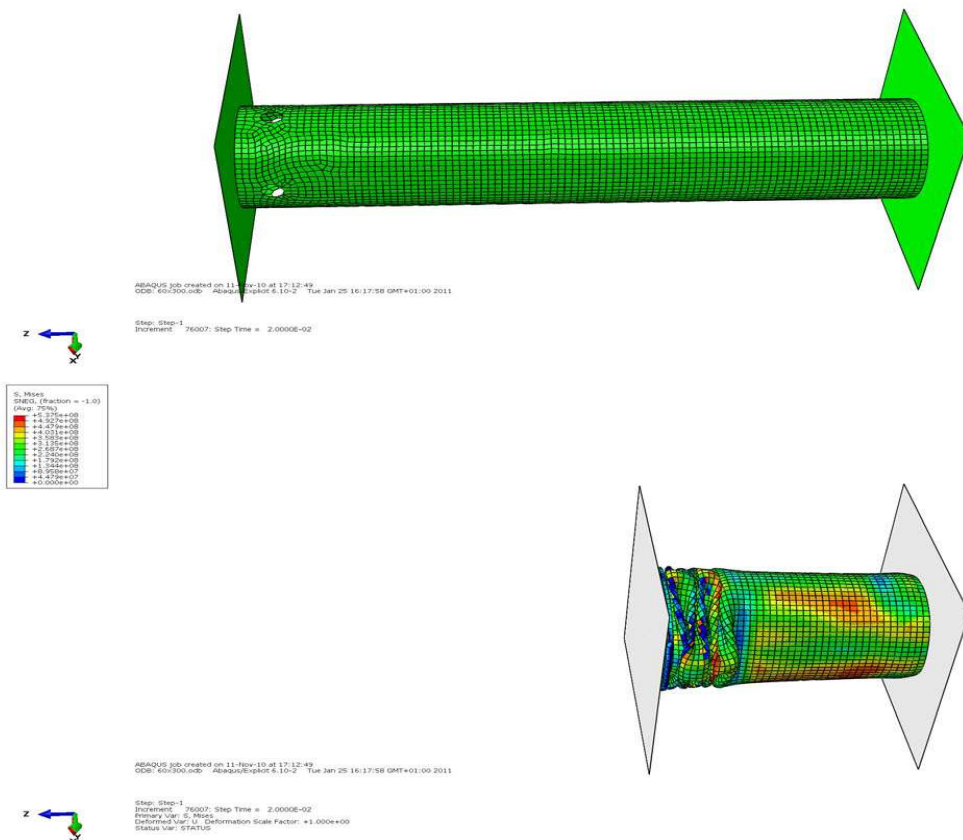


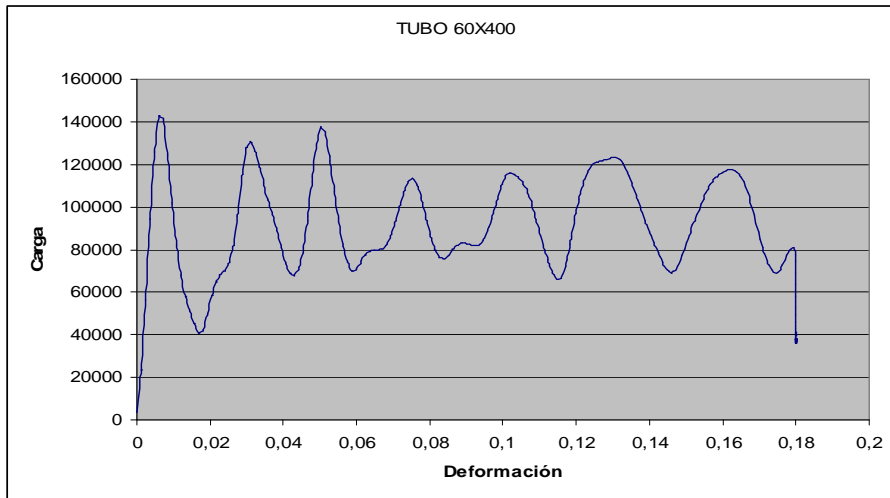
## MATERIAL 2

Tubos de 60mm de diámetro:

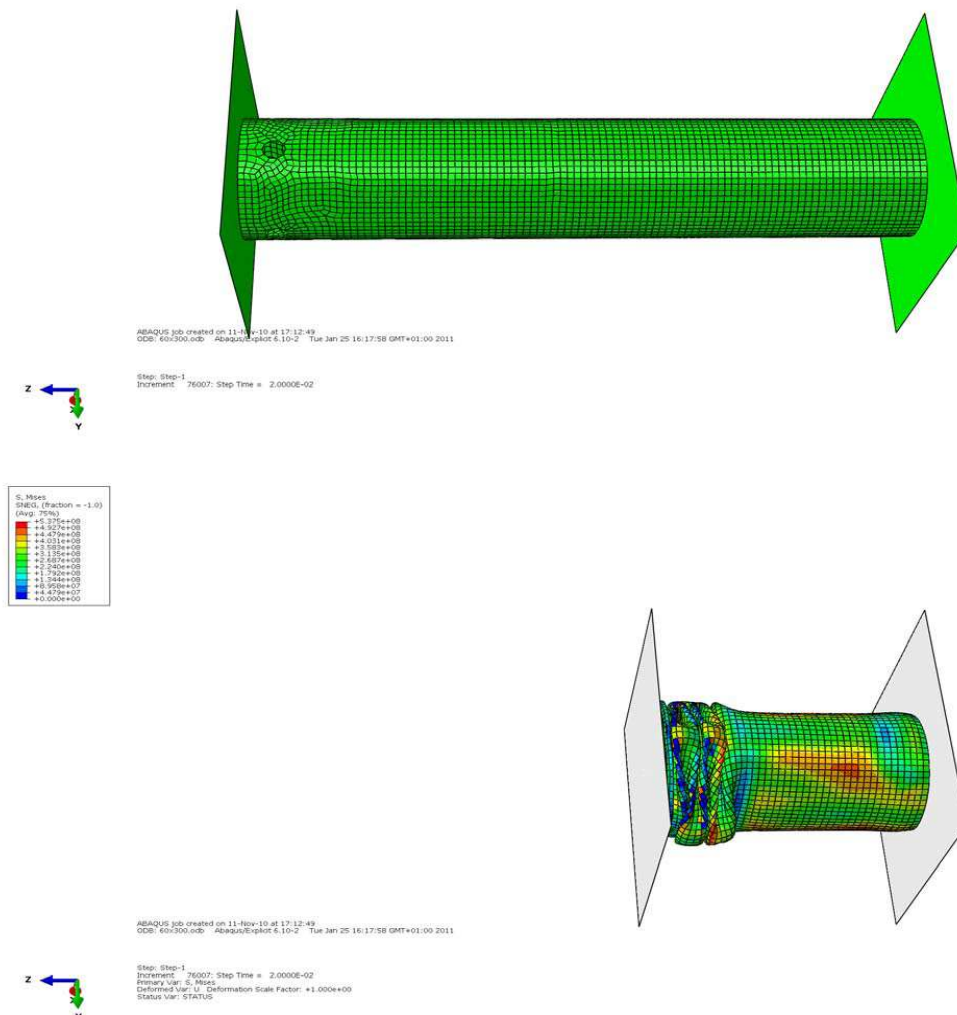


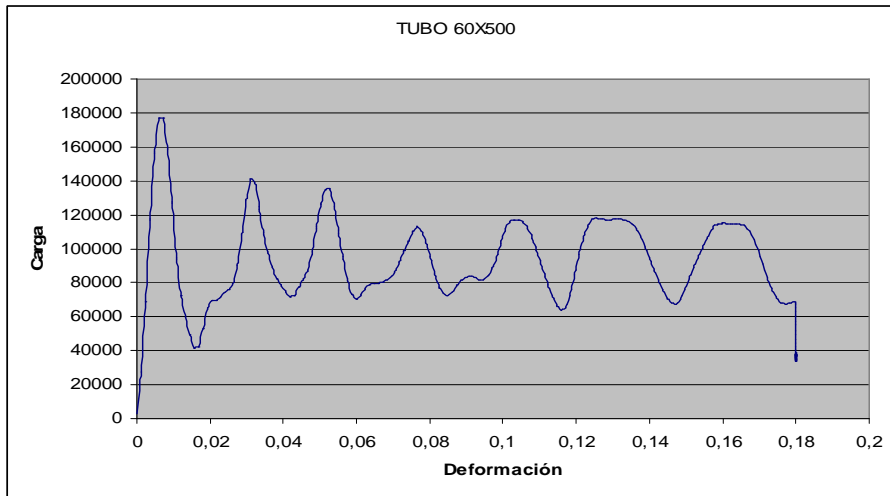
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
182183	77316



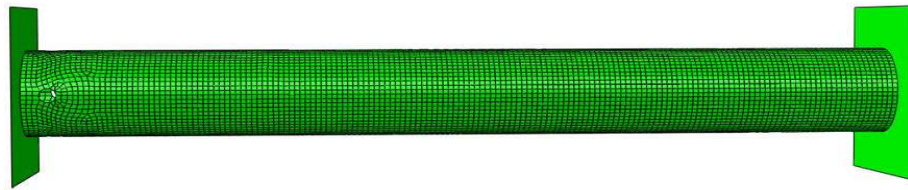


VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
142615	78906





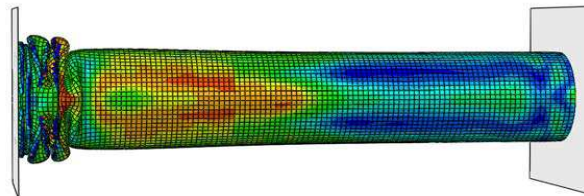
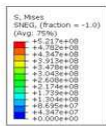
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
177263	79838



ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:16:01  
ODB: 60x500.odb ABAQUS/Explicit 6.10-2 Tue Mar 25 15:46:05 GMT+01:00 2011



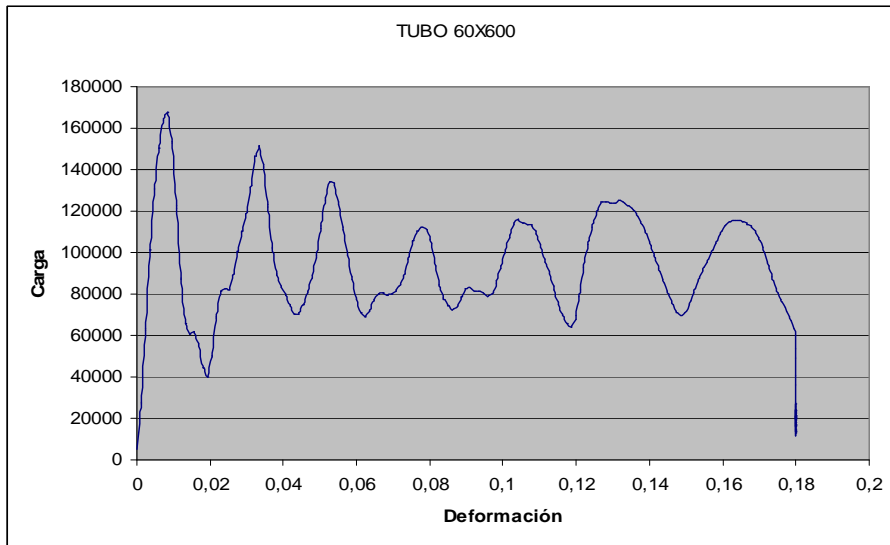
Step: Step-1  
Increment: 75671; Step Time = 2.0000E-02



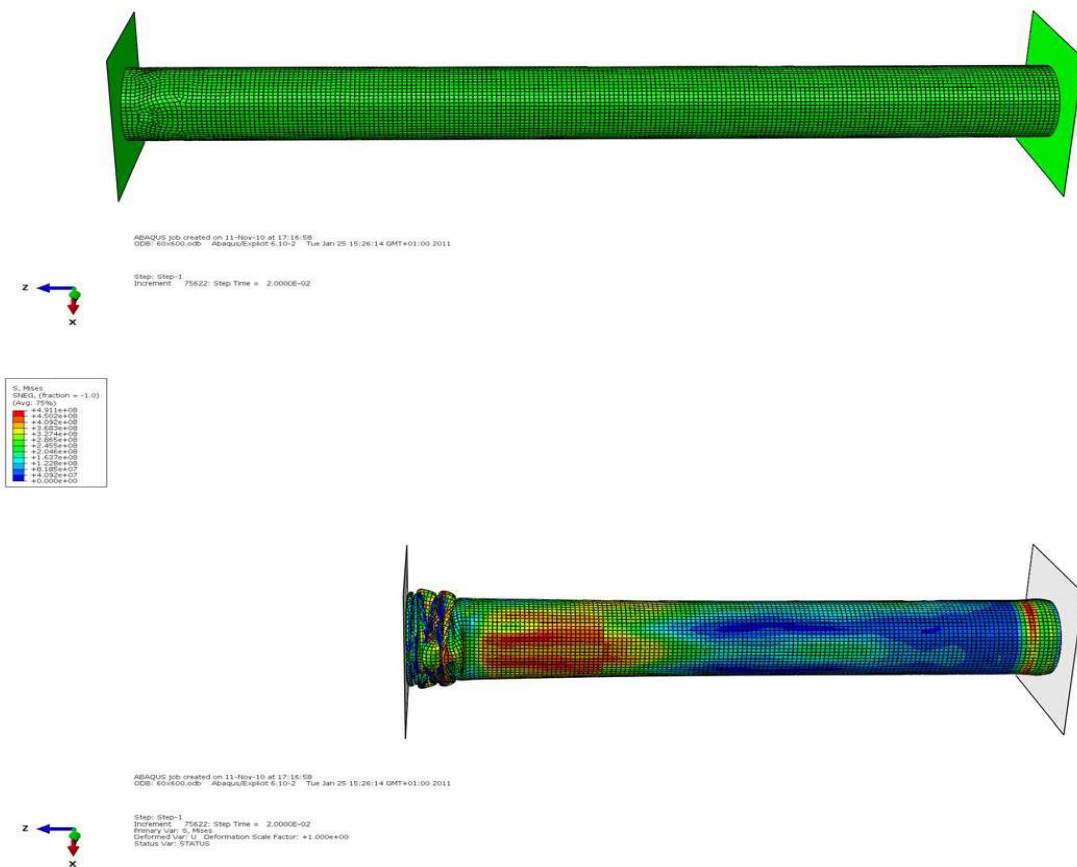
ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:16:01  
ODB: 60x500.odb ABAQUS/Explicit 6.10-2 Tue Mar 25 15:46:05 GMT+01:00 2011



Step: Step-1  
Increment: 75671; Step Time = 2.0000E-02  
Primary var: S, Mises  
Deformed var: U, Deformation Scale Factor: 1.000E+00  
Status var: STRESS

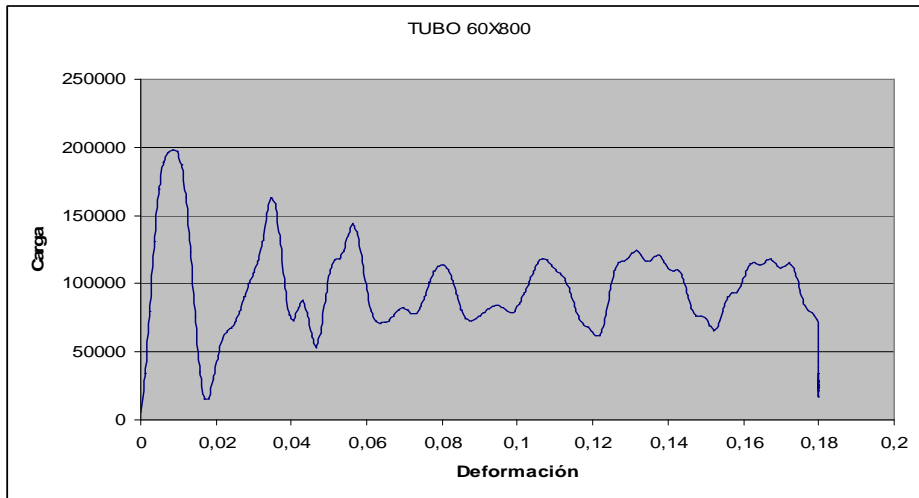


VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
168014	76389

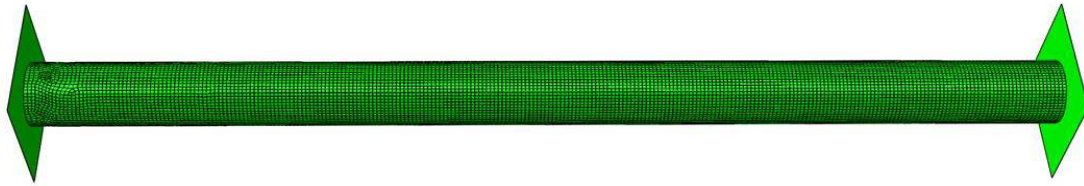








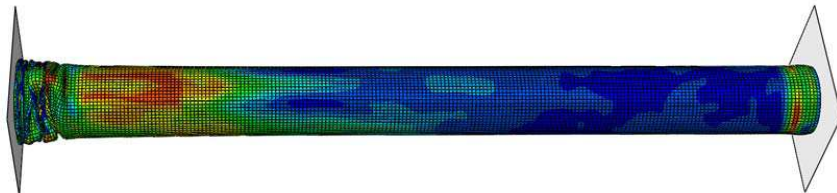
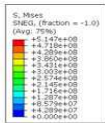
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
198436	79614



ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:18:05  
ODB: 60x800.odb Abaqus/Explicit 6.10-2 Tue Jan 25 14:39:00 GMT+01:00 2011



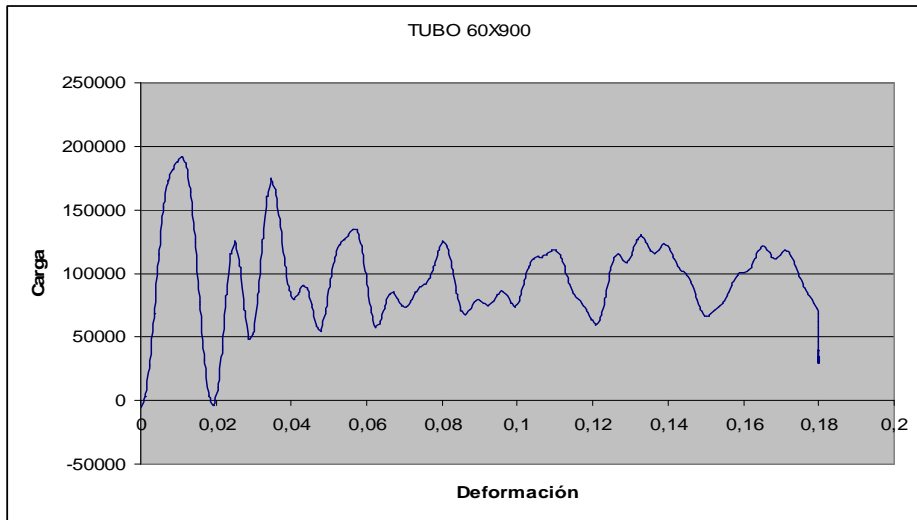
Step: Step-1  
Increment: 75611; Step Time = 2.0000E-02



ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:18:05  
ODB: 60x800.odb Abaqus/Explicit 6.10-2 Tue Jan 25 14:39:00 GMT+01:00 2011



Step: Step-1  
Increment: 75611; Step Time = 2.0000E-02  
Primary Var: U, Deformation Scale Factor: 1.000E+00  
Status Var: STATUS



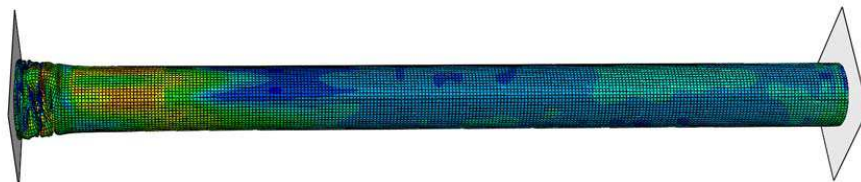
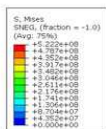
**VALORES CARGA (Pas)**

PICO	MEDIA
191853	80410



ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:18:37  
 ODB: 60x900.odb - ABAQUS/Explicit 6.10-2 Tue Jan 25 14:11:14 GMT+01:00 2011

Step: Step-1  
 Increment: 75211; Step Time = 2.0000E-02

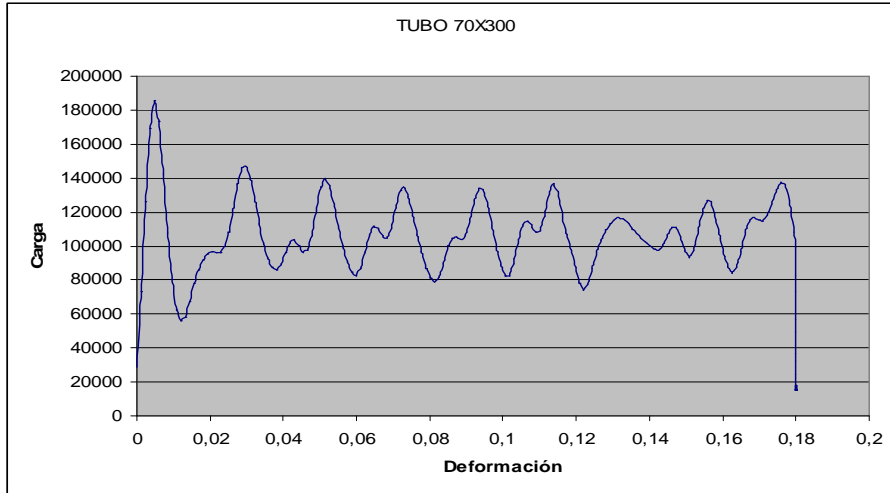


ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:18:37  
 ODB: 60x900.odb - ABAQUS/Explicit 6.10-2 Tue Jan 25 14:11:14 GMT+01:00 2011

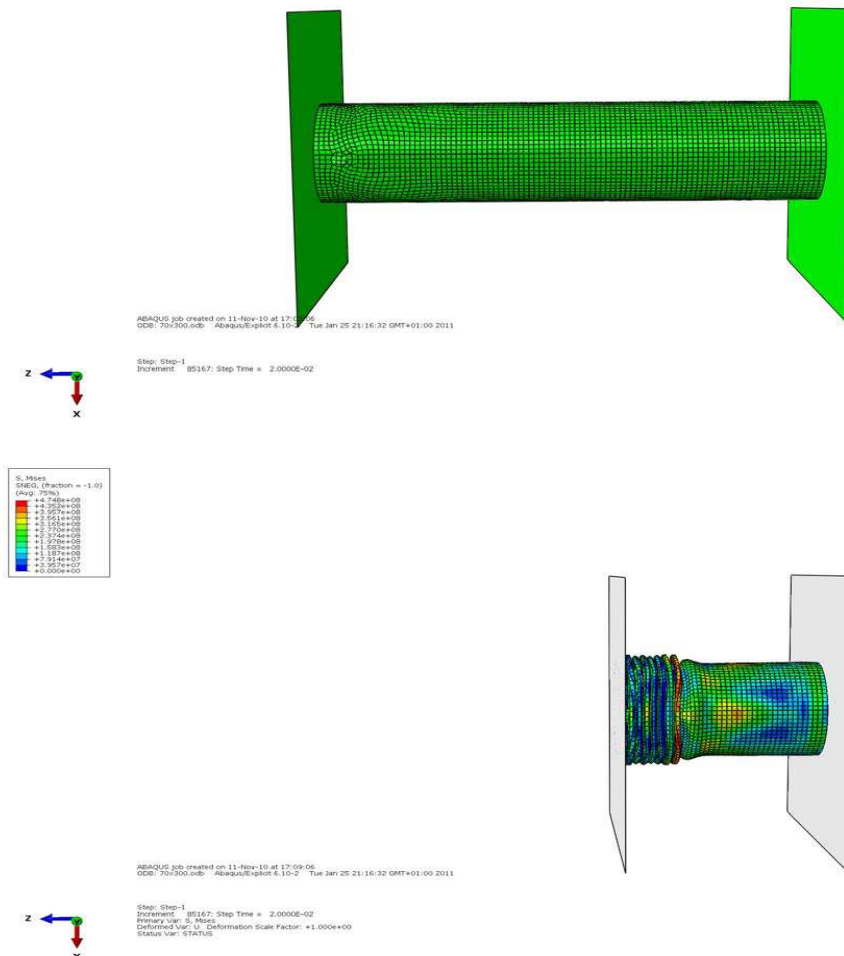
Step: Step-1  
 Increment: 75211; Step Time = 2.0000E-02  
 Primary Var: S, Mises  
 Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00  
 Status Var: S, Fract.

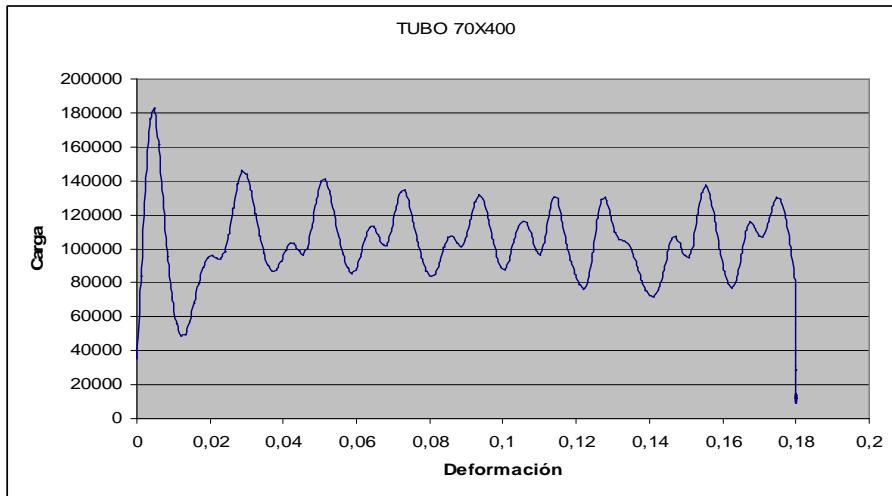


Tubos de 70mm de diámetro:

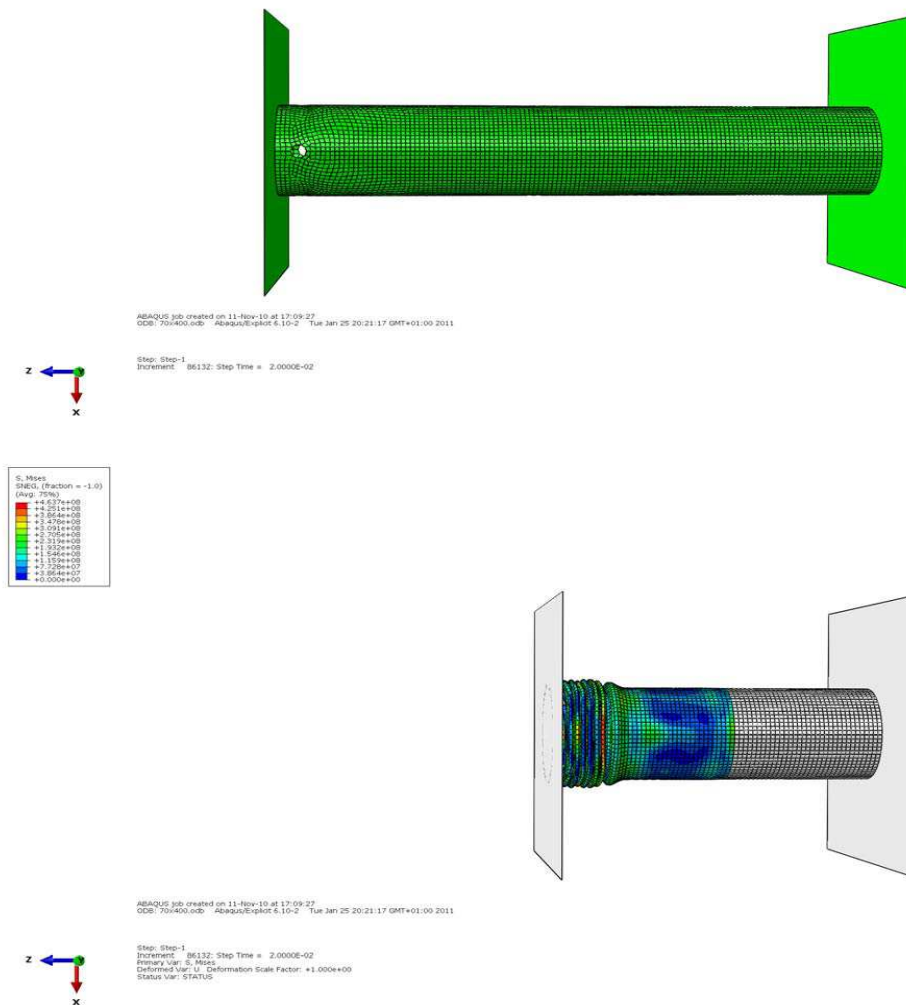


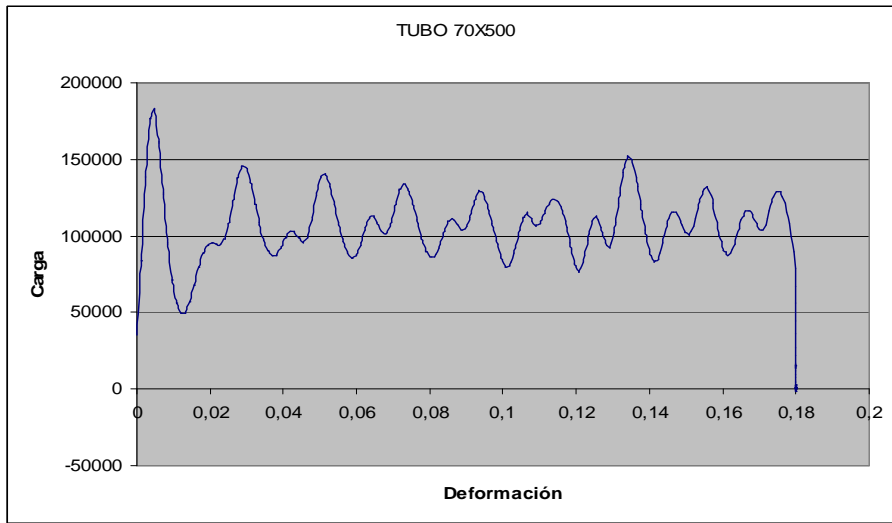
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
185767	84835



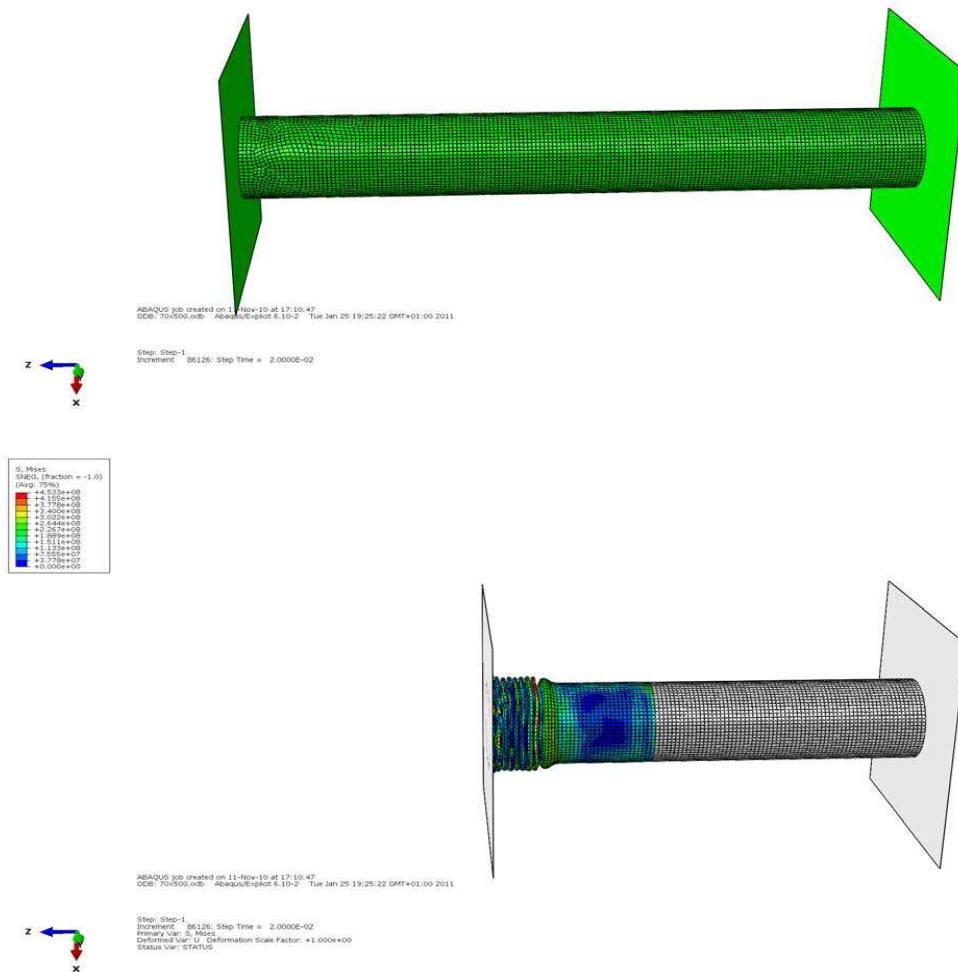


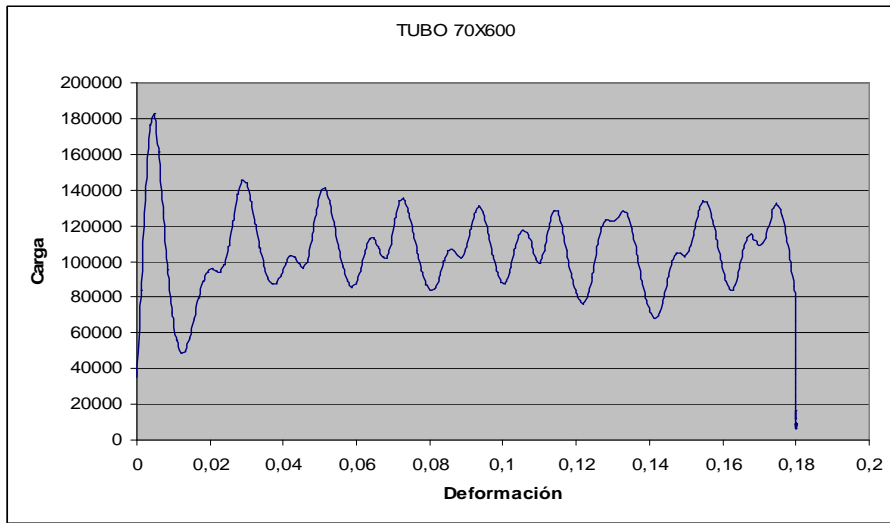
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
182928	82580



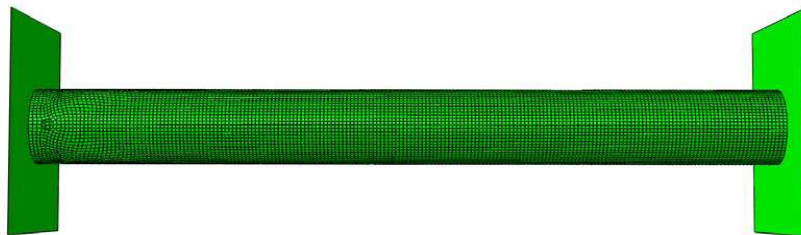


VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
183064	81505





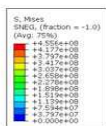
VALORES CARGA (Pa)	
PICO	MEDIA
182983	82569



ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:11:15  
ODB: 70x600.odb Abaqus/Explicit 6.10-2 Tue Jan 25 18:28:30 GMT+01:00 2011



Step: Step-1  
Increment: BK108; Step Time = 2.0000E-02

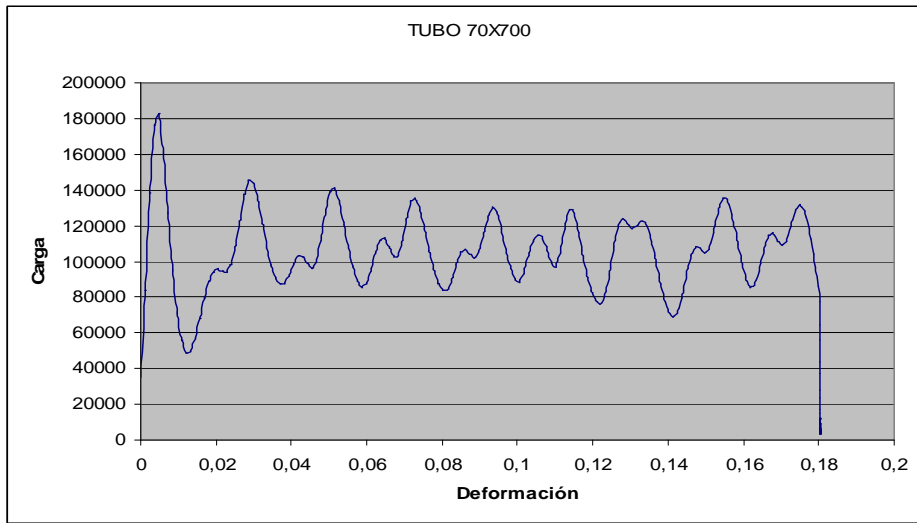


ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:11:15  
ODB: 70x600.odb Abaqus/Explicit 6.10-2 Tue Jan 25 18:28:30 GMT+01:00 2011

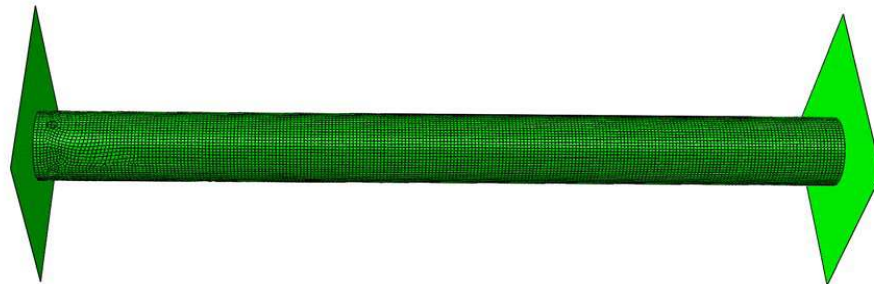


Step: Step-1  
Increment: BK108; Step Time = 2.0000E-02  
Primary Var: S, Mises  
Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000E+00  
Status Var: STATUS





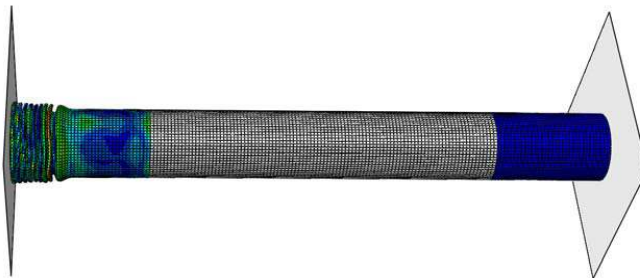
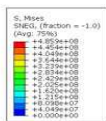
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
182926	81546



ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:11:40  
ODB: 70x700.odb ABAQUS/Explicit 6.10-2 Tue Jan 25 17:19:09 GMT+01:00 2011



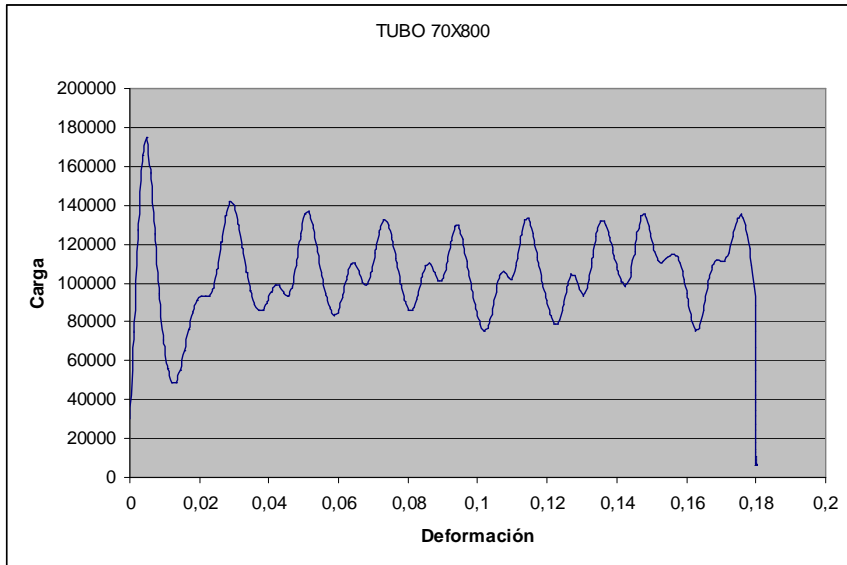
Step: Step-1  
Increment: BK201; Step Time = 2.0000E-02



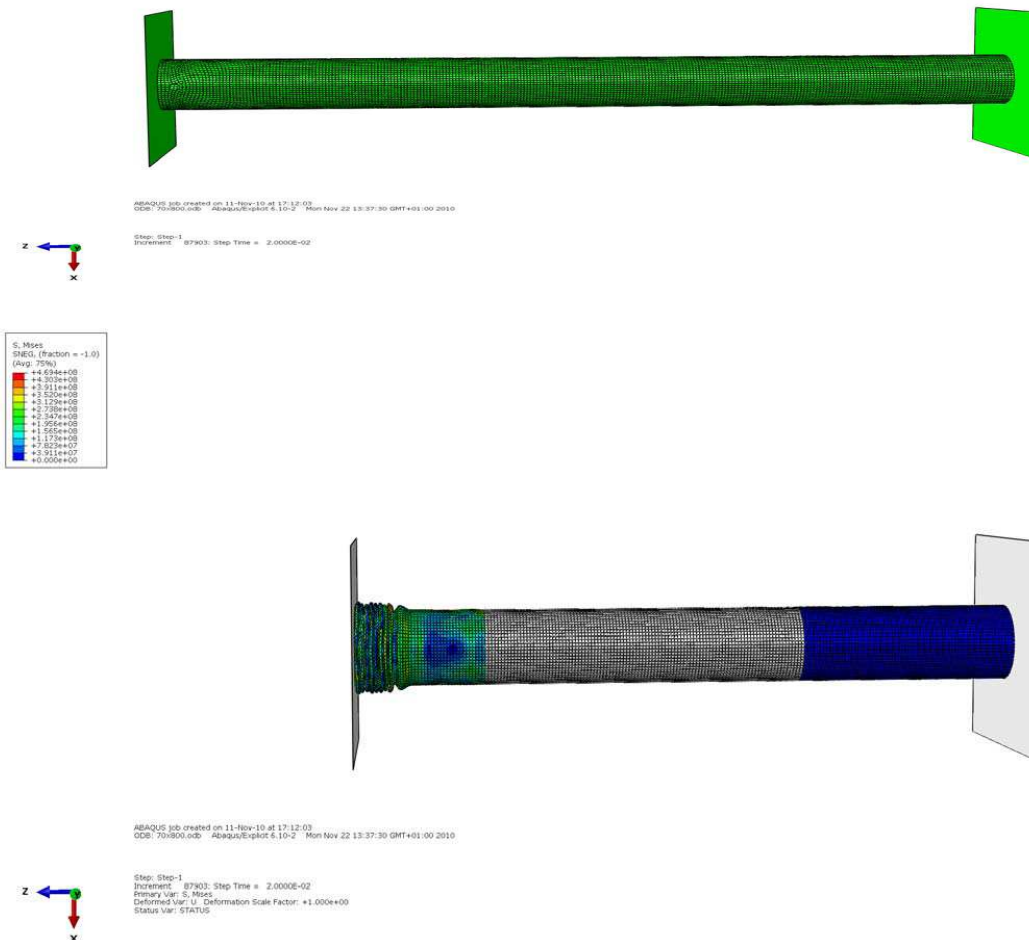
ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:11:40  
ODB: 70x700.odb ABAQUS/Explicit 6.10-2 Tue Jan 25 17:19:09 GMT+01:00 2011

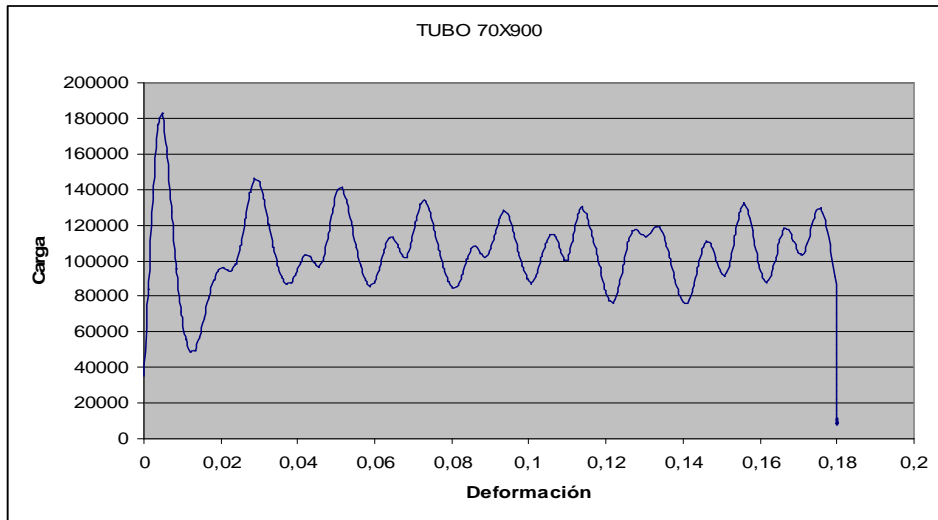


Step: Step-1  
Increment: BK201; Step Time = 2.0000E-02  
Display: S, Mises  
Deformed: U; Deformation Scale Factor: \*1.000e+00  
Status: U; STATUS



VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
174970	81725





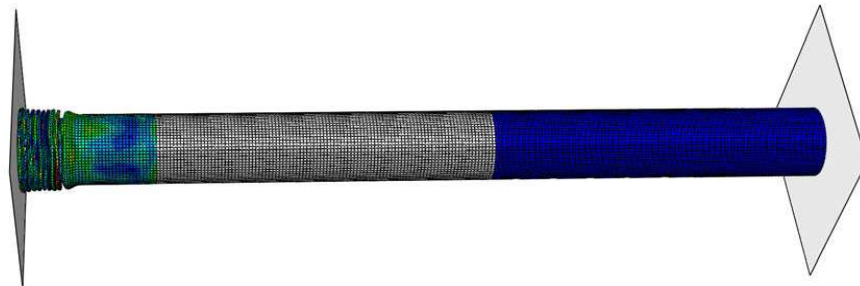
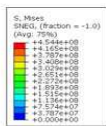
**VALORES CARGA (Pas)**

PICO	MEDIA
183140	82500



ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:12:26  
ODB: 70x900.odb ABAQUS/Explicit 6.10-2 Tue Jan 25 16:42:07 GMT+01:00 2011

Step: Step-1  
Increment: 96118; Step Time = 2.0000E-02



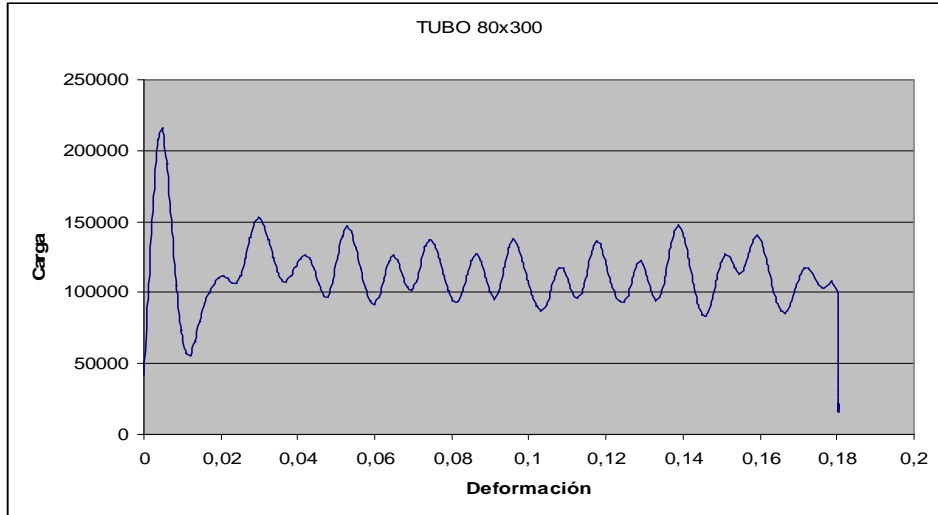
ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:12:26  
ODB: 70x900.odb ABAQUS/Explicit 6.10-2 Tue Jan 25 16:42:07 GMT+01:00 2011

Step: Step-1  
Increment: 96118; Step Time = 2.0000E-02  
Primary var: S, Mises  
Deformed var: U, Deformation Scale Factor: +1.000E+00  
Status var: STRESS

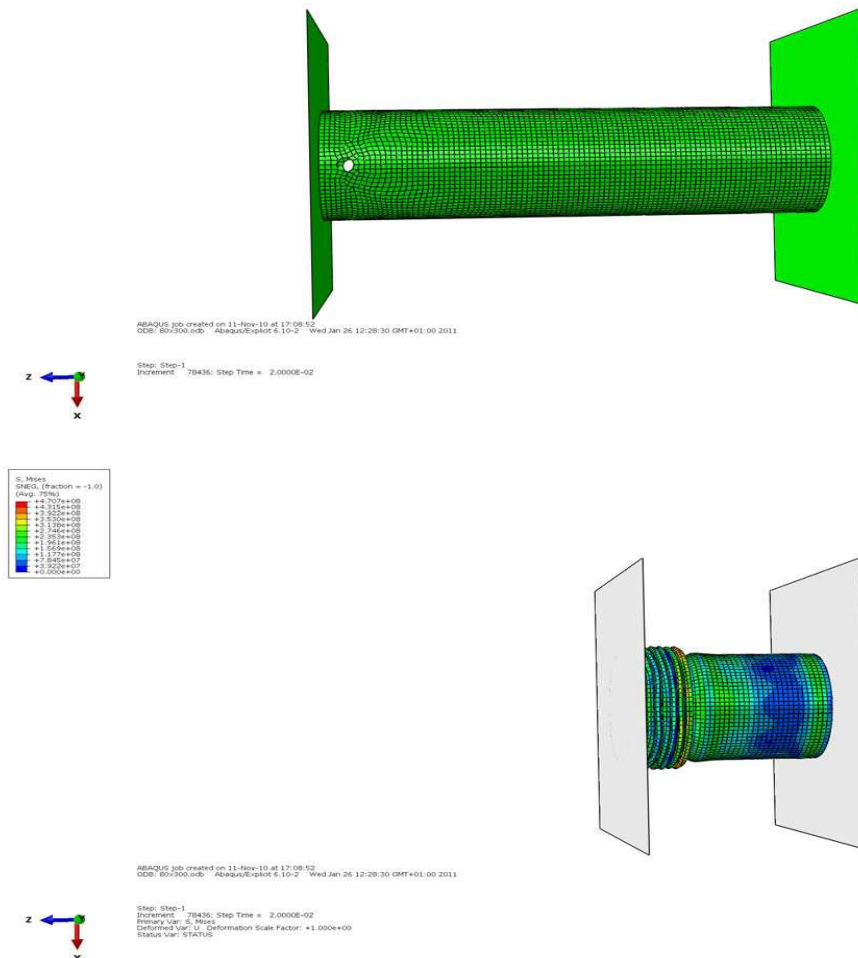


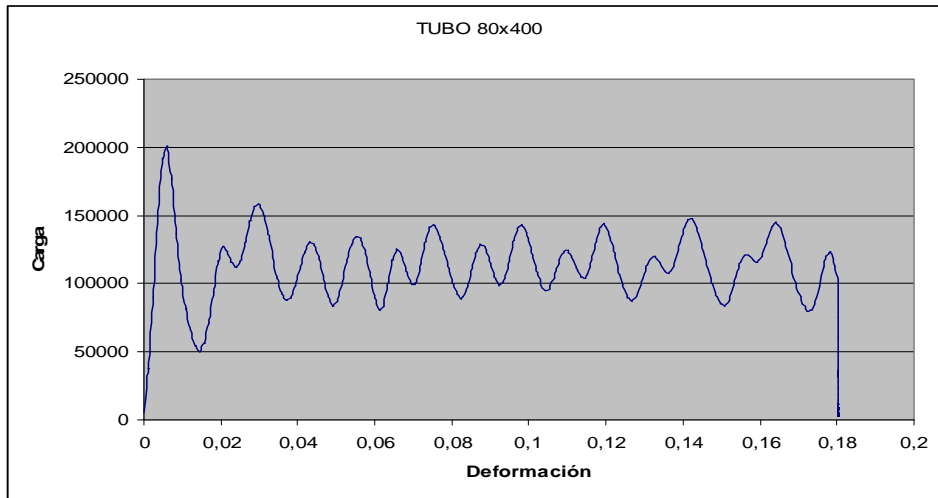


Tubos de 80mm de diámetro:



VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
216198	90869





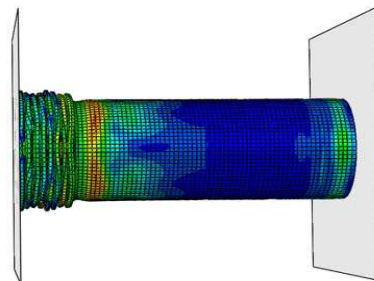
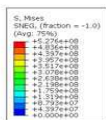
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
201069	87562



ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:08:28  
CDB: 80x400.cdb ABAQUS/Explicit 6.10-2 Wed Jan 26 12:09:23 GMT+01:00 2011



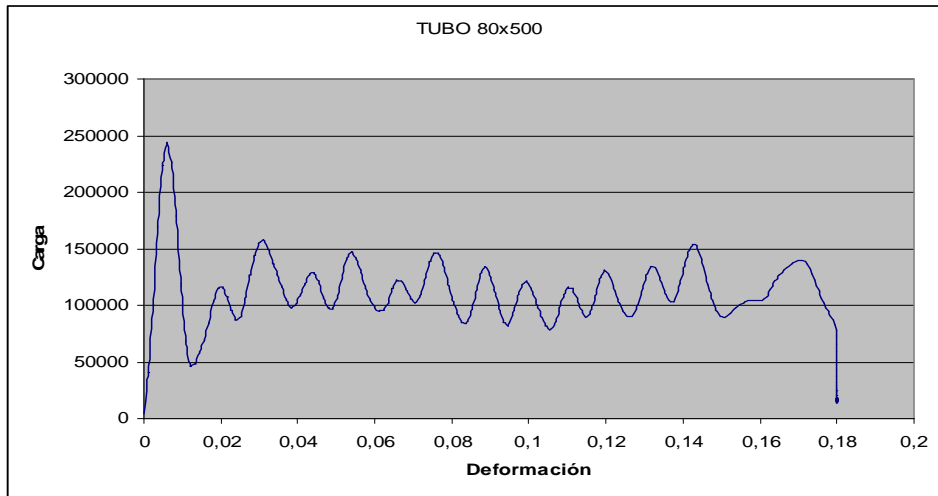
Step: Step-1  
Increment: 76911; Step Time = 2.0000E-02



ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:08:28  
CDB: 80x400.cdb ABAQUS/Explicit 6.10-2 Wed Jan 26 12:09:23 GMT+01:00 2011



Step: Step-1  
Increment: 76911; Step Time = 2.0000E-02  
Primary var: S, Mises  
Deformed var: U, Deformation Scale Factor = 1.000E+00  
Status var: STATUS



### VALORES CARGA (Pas)

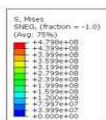
PICO	MEDIA
243852	89863

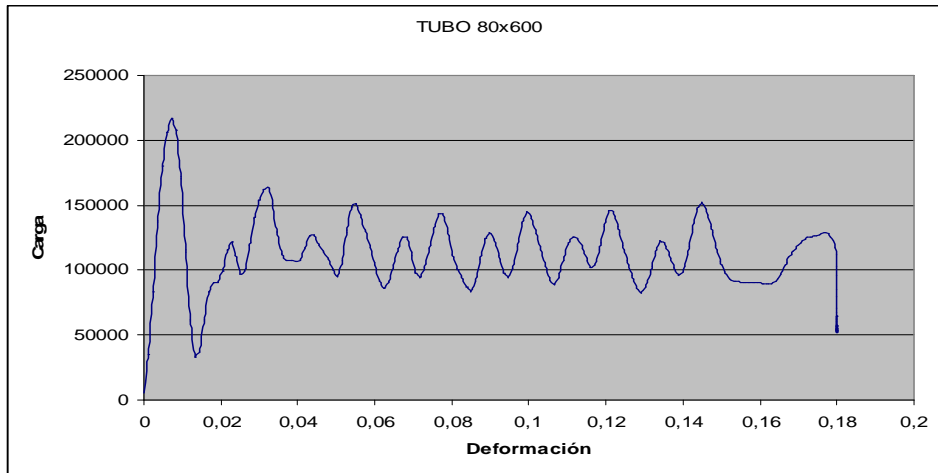


ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:07:58  
ODB: 80x500.odb - ABAQUS/Explicit 6.10-2 Wed Jan 26 11:47:14 GMT+01:00 2011

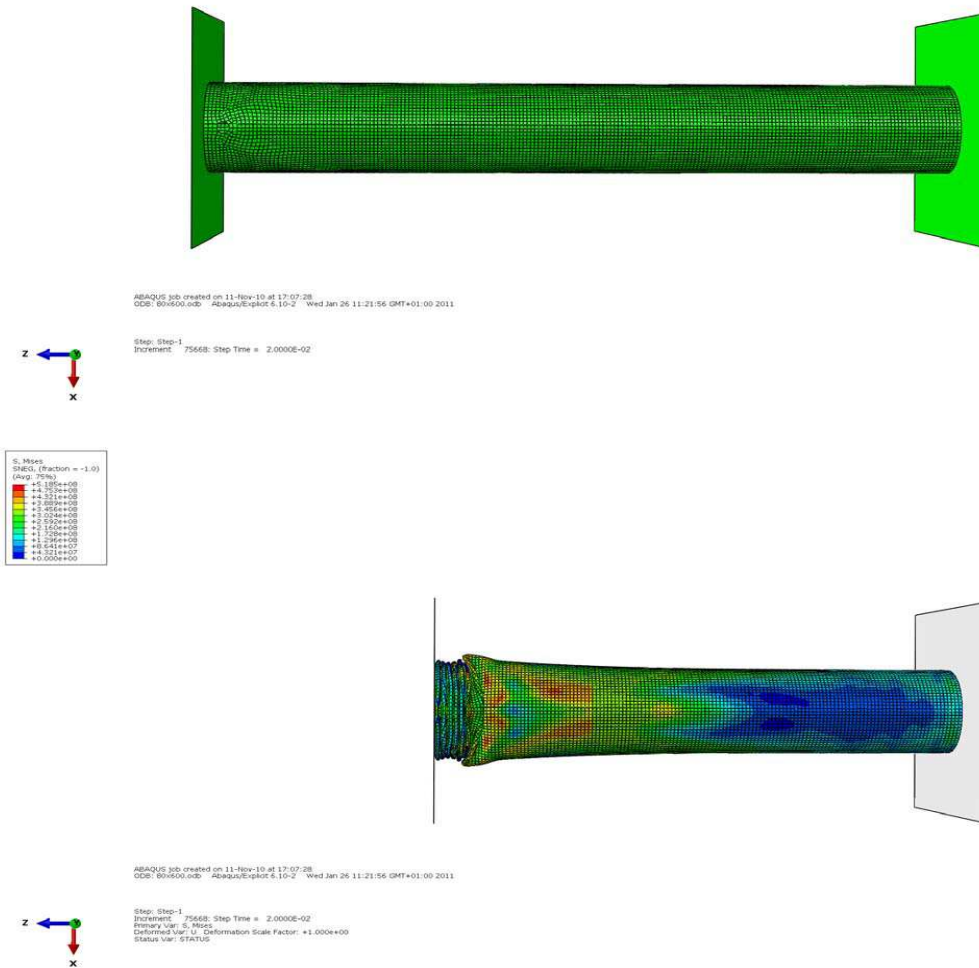


Step: Step-1  
Increment: 76516; Step Time = 2.0000E-02

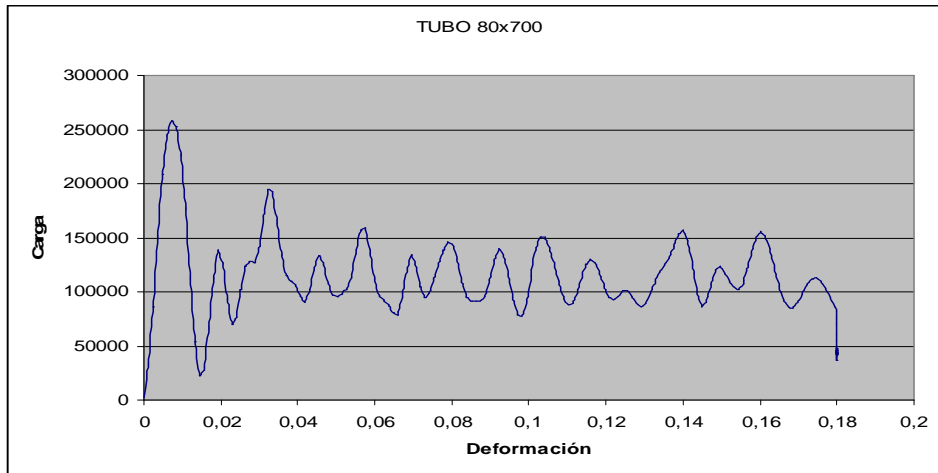




VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
217239	99623







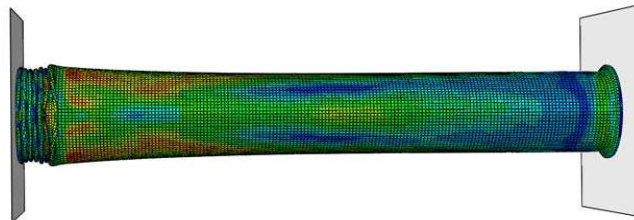
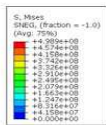
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
258194	98158



ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:06:55  
ODB: 80x700.odb ABAQUS/Explicit 6.10-2 Wed Jan 26 10:53:33 GMT+01:00 2011



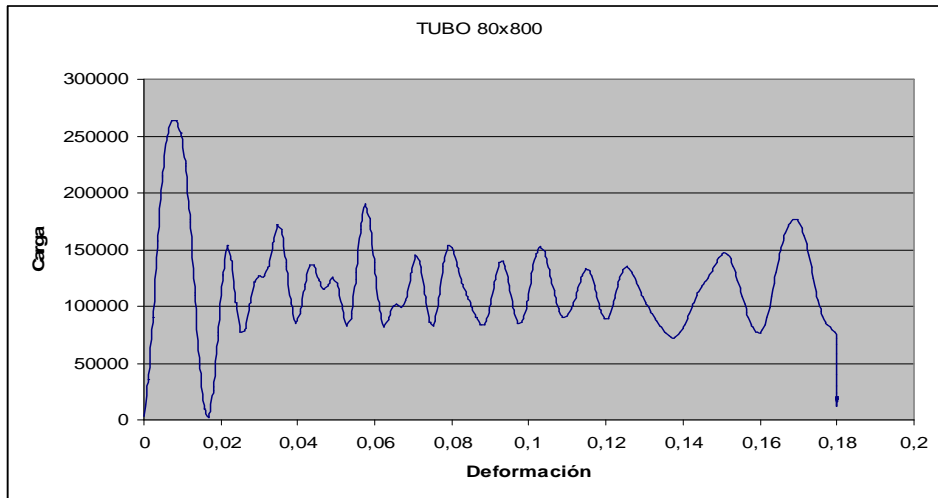
Step: Step-1  
Increment: 74948; Step Time = 2.0000E-02



ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:06:55  
ODB: 80x700.odb ABAQUS/Explicit 6.10-2 Wed Jan 26 10:53:33 GMT+01:00 2011



Step: Step-1  
Increment: 74948; Step Time = 2.0000E-02  
Primary Var: S, Mises  
Deferred Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+00  
Status Var: STATUS



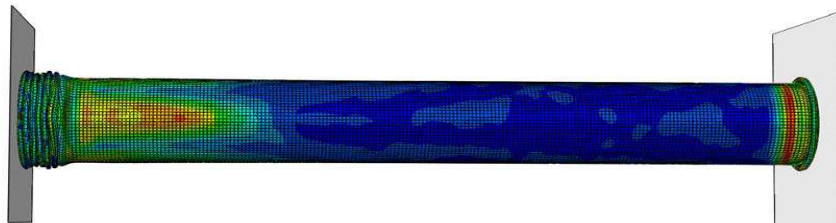
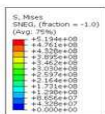
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
263917	93496



ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:06:21  
ODB: 80x800.odb; abaqus/Explicit 6.10-2; Wed Jan 26 10:23:26 GMT+01:00 2011



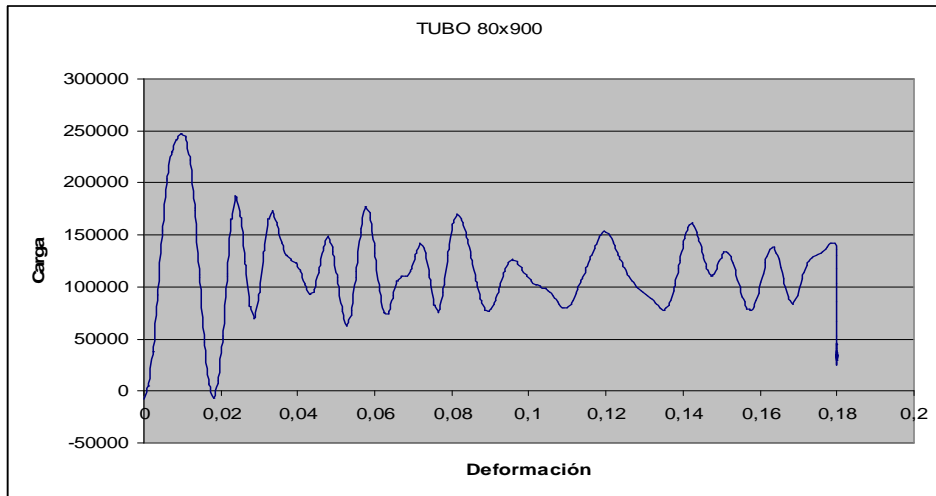
Step: Step-1  
Increment: 72414; Step Time = 2.00000E-02



ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:06:21  
ODB: 80x800.odb; abaqus/Explicit 6.10-2; Wed Jan 26 10:23:26 GMT+01:00 2011



Step: Step-1  
Increment: 72414; Step Time = 2.00000E-02  
Display: var: S, Mises  
Deformed: var: U, Deformation Scale Factor: +1.0000E+00  
Status: var: STATUS



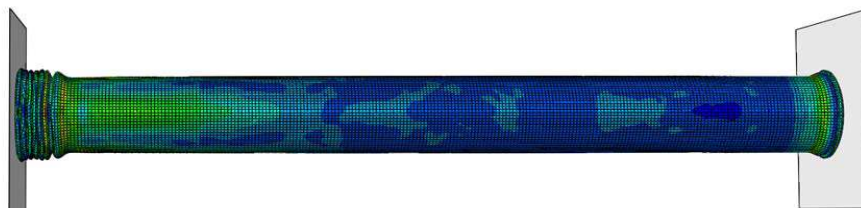
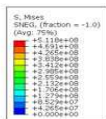
VALORES CARGA (Pas)	
PICO	MEDIA
247169	96711



ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:03:39  
ODB: 80x900.odb - Abaqus/Explicit 6.10-2 - Wed Jan 26 09:49:40 GMT+01:00 2011



Step: Step-1  
Increment: 74073; Step Time = 2.0000E-02



ABAQUS job created on 11-Nov-10 at 17:03:39  
ODB: 80x900.odb - Abaqus/Explicit 6.10-2 - Wed Jan 26 09:49:40 GMT+01:00 2011



Step: Step-1  
Increment: 74073; Step Time = 2.0000E-02  
Primary Var: S, Mises  
Deferred Var: U; Deformation Scale Factor: +1.000e+00  
Status Var: STATUS



Escuela  
Universitaria  
Ingeniería  
Técnica  
Industrial  
ZARAGOZA

## Cálculo y diseño del sistema de detención del SLED por el método de los elementos finitos

---