

# Capítulo 5.

## Presentación de resultados

### 5.1. Introducción

En este apartado se muestran los resultados obtenidos tras la resolución de diferentes modelos, reflejando las diferentes posibilidades que el usuario tiene de estudiar el amortiguador modificando algunos parámetros.

Se estudiarán tres modelos, manteniendo la geometría del asiento y modificando la del tubo, lo que dará lugar a diferentes situaciones de interferencia, 0.2 mm, 0.25 mm y 0.325 mm; dos situaciones de carga en uso, 6000 N y 10000 N; y dos densidades de mallado que denominaremos grosero y fino. En todos los casos se mantendrán constantes las propiedades mecánicas de los materiales que compondrán el amortiguador.

Para cada caso, se analizarán los procesos de inserción y carga cíclica, y se estudiará la posibilidad de rotura dúctil durante la inserción y la resistencia a fatiga de la unión con la aplicación de la carga cíclica.

### 5.2. Definición de los modelos

A continuación, se muestran las pantallas de introducción de datos que se han seguido para la creación de los modelos, siguiendo los pasos que se exponen en el manual de usuario (Anexo A).

En primer lugar se introducen los datos geométricos de los modelos, de tal manera que las variables introducidas se encuentran dentro de un rango de valores que permita la construcción del modelo mediante ANSYS® (ver tabla 5.2-1). En las figuras 5.2-1, 5.2-2 y 5.2-3 aparecen las diferentes pantallas para la introducción de datos.

Rango de validez	Mínimo	Máximo	Unidades
<i>Diámetro tubo</i>	35	52	mm
<i>Espesor tubo</i>	0.10	2.75	mm
<i>Diámetro asiento</i>	132	150	mm
<i>Espesor asiento</i>	0.10	2.5	mm
<i>Angulo</i>	0	10	°

Tabla 5.2-1. Rango de validez de los datos geométricos.

**Introducción de datos**

Parámetros

Introduzca los datos del modelo: (en mm)

Tubo:

Espesor:  (0.10 , 2.75)

Diámetro:  (35 , 52)

Ángulo:  (0 , 10)

Asiento:

Espesor:  (0.10 , 2.5)

Diámetro:  (132 , 150)

Fig. 5.2-1. Datos geométricos para el modelo 1 (situación de interferencia 0.2).

**Introducción de datos**

Parámetros

Introduzca los datos del modelo: (en mm)

Tubo:

Espesor:  (0.10 , 2.75)

Diámetro:  (35 , 52)

Ángulo:  (0 , 10)

Asiento:

Espesor:  (0.10 , 2.5)

Diámetro:  (132 , 150)

Fig. 5.2-2. Datos geométricos para el modelo 2 (situación de interferencia 0.25).

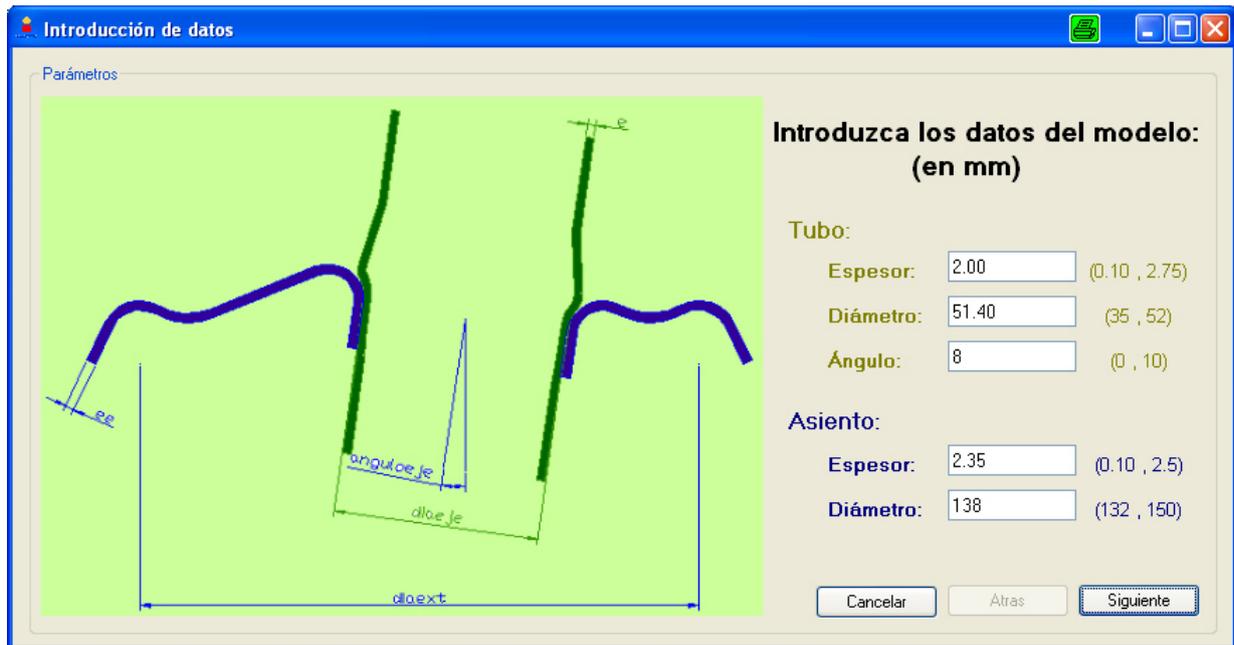


Fig. 5.2-3. Datos geométricos para el modelo 3 (situación de interferencia 0.325).

Tendremos luego que definir las propiedades mecánicas de los materiales en los que se fabrica el amortiguador. Para los tres modelos, las propiedades serán las mismas por lo que la ventana de introducción de datos será común a ambos. Los datos introducidos serán los de la curva del ensayo de tracción como se ve en la figura 5.2-4. Los coeficientes de rozamiento son los que resultan del estudio que se describe en el Anexo b.

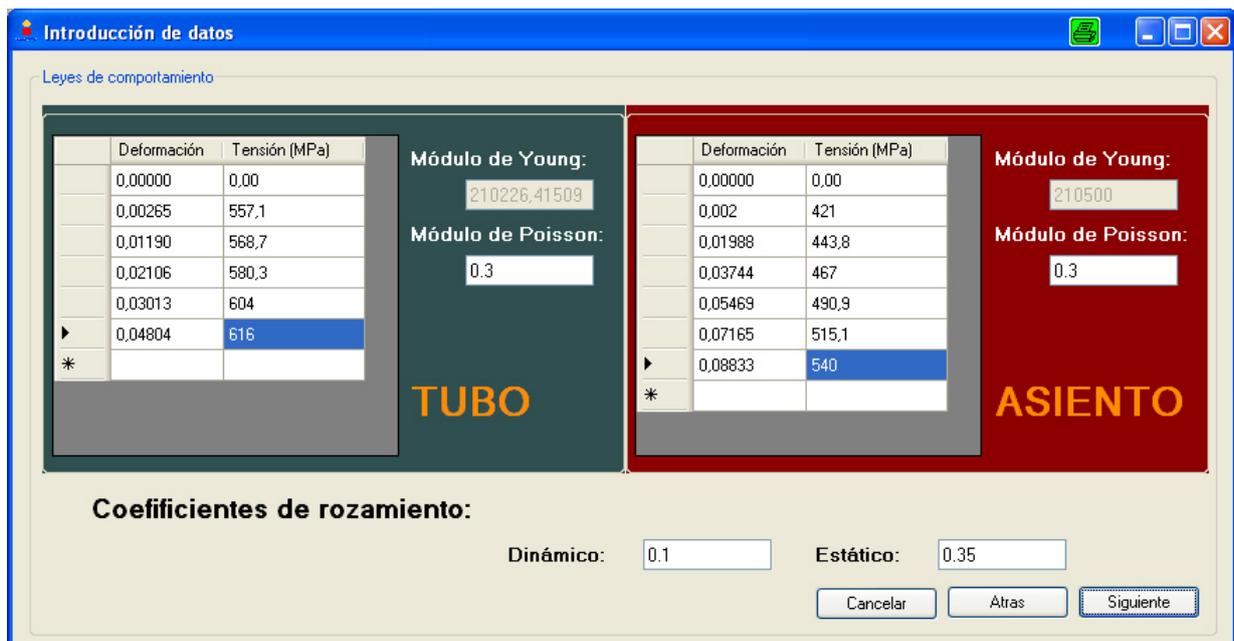


Fig. 5.2-4. Propiedades mecánicas de los materiales.

Para finalizar se describirán los coeficientes necesarios para el estudio de fatiga, los mismos en los tres modelos puesto que hablamos de los mismos materiales, y se indicará la carga de entrada en uso del amortiguador, distinguiéndose entre los casos de 6000N y 10000N. Estos casos se representan en las figuras 5.2-5 y 5.2-6.

Por último el usuario indicará el tipo de mallado en la resolución del modelo, ver figura 5.2-7.

**Introducción de datos**

Tipo de estudio

- Estudio de la rotura dúctil
- Estudio de fatiga
- Ambos

Carga (N): 6000

Mallado Fino, (4 elementos en el espesor)

Mallado Grosero, (2 elementos en el espesor)

Ley de Paris

$$N_p(a) = \int_a^{a_e} \frac{da}{A \cdot K_I(a)^n}$$

n: 3    A: 6.9E-12    B1: 17.1844    B2: 3.2889  
A1: 0.6147    A2: 0.2502    C1: 8.7822    C2: 70.0444

$$m_1 = A_1 + B_1 \cdot r^2 + C_1 \cdot r^6$$

$$m_2 = A_2 + B_2 \cdot r^2 + C_2 \cdot r^6$$

Criterio de Smith-Watson-Topper

$$\sigma_{\max} \cdot \epsilon_a \cdot E = (\sigma_f')^2 \cdot (2N)^{2b} + \sigma_f' \cdot \epsilon_f' \cdot E \cdot (2N)^{b+c}$$

Tubo:

E (MPa) 206900     $\epsilon_f'$  1.684  
 $\sigma_f'$  (MPa) 1511    b -0.093    c -0.698

Asiento:

E (MPa) 205000     $\epsilon_f'$  0.846  
 $\sigma_f'$  (MPa) 1019    b -0.109    c -0.616

Cancelar    Atras    Finalizar

Fig. 5.2-5. Propiedades a fatiga de los materiales, carga en uso de 6000 N y mallado grosero.

**Introducción de datos**

Tipo de estudio

- Estudio de la rotura dúctil
- Estudio de fatiga
- Ambos

Carga (N): 10000

Mallado Fino, (4 elementos en el espesor)

Mallado Grosero, (2 elementos en el espesor)

Ley de Paris

$$N_p(a) = \int_a^{a_e} \frac{da}{A \cdot K_I(a)^n}$$

n: 3    A: 6.9E-12    B1: 17.1844    B2: 3.2889  
A1: 0.6147    A2: 0.2502    C1: 8.7822    C2: 70.0444

$$m_1 = A_1 + B_1 \cdot r^2 + C_1 \cdot r^6$$

$$m_2 = A_2 + B_2 \cdot r^2 + C_2 \cdot r^6$$

Criterio de Smith-Watson-Topper

$$\sigma_{\max} \cdot \epsilon_a \cdot E = (\sigma_f')^2 \cdot (2N)^{2b} + \sigma_f' \cdot \epsilon_f' \cdot E \cdot (2N)^{b+c}$$

Tubo:

E (MPa) 206900     $\epsilon_f'$  1.684  
 $\sigma_f'$  (MPa) 1511    b -0.093    c -0.698

Asiento:

E (MPa) 205000     $\epsilon_f'$  0.846  
 $\sigma_f'$  (MPa) 1019    b -0.109    c -0.616

Cancelar    Atras    Finalizar

Fig. 5.2-6. Propiedades a fatiga de los materiales, carga en uso de 10000 N y mallado grosero.

**Introducción de datos**

Tipo de estudio

- Estudio de la rotura dúctil
- Estudio de fatiga
- Ambos

Carga (N):

Mallado Fino, (4 elementos en el espesor)

Mallado Grosero, (2 elementos en el espesor)

**Ley de Paris**

$$N_p(a) = \int_a^e \frac{da}{A \cdot K_I(a)^n}$$

n:  A:  B1:  B2:

A1:  A2:  C1:  C2:

$$m_1 = A_1 + B_1 \cdot r^2 + C_1 \cdot r^6$$

$$m_2 = A_2 + B_2 \cdot r^2 + C_2 \cdot r^6$$

**Crterio de Smith-Watson-Topper**

$$\sigma_{\max} \cdot \varepsilon_a \cdot E = (\sigma_f')^2 \cdot (2N)^{2b} + \sigma_f' \cdot \varepsilon_f' \cdot E \cdot (2N)^{b+c}$$

**Tubo:**

E (MPa)   $\varepsilon_f'$

$\sigma_f'$  (MPa)  b  c

**Asiento:**

E (MPa)   $\varepsilon_f'$

$\sigma_f'$  (MPa)  b  c

Fig. 5.2-7. Propiedades a fatiga de los materiales, carga en uso de 10000 N y mallado fino.

Como ha quedado reflejado en las pantallas de introducción de datos se estudiarán tres modelos, de manera que para cada uno de ellos se tendrá en cuenta la entrada en carga del amortiguador en dos situaciones: para una carga de 6000 N y para una carga de 10000 N; aunque sólo resolveremos los modelos con mallado fino para el caso de la carga de 10000 N.

Las conclusiones y comentarios acerca de los resultados se expondrán en los apartados siguientes.

### 5.3. Situación de interferencia nominal (modelo 2)

Los resultados que se exponen son aquéllos que aportan información relevante acerca de la durabilidad de la unión:

- Deformación plástica equivalente.
- Tensión equivalente de von Mises.
- Presión de contacto.
- Estado de los elementos de contacto.
- Comprobación de los criterios de Cockcroft-Lathan y Freudenthal en ductilidad.
- Evolución de las tensiones y deformaciones para realizar el estudio de fatiga durante el proceso de carga y descarga.
- Vida a fatiga de la unión.

Se pretenden analizar con detalle la inserción y la carga cíclica del amortiguador. Así, para el proceso de inserción, los resultados que se muestran son los existentes en el instante final del mismo, estudiados para el caso de la malla grosera. Para la determinación de los coeficientes de seguridad frente al fallo por rotura dúctil se necesita postprocesar cada uno de los pasos intermedios de la inserción por separado. En las gráficas del proceso de carga y descarga, se muestran los resultados asociados a la situación más desfavorable, es decir, los correspondientes al final de cada carga, así como los valores alternantes de determinadas magnitudes una vez que éstas se estabilizan. Para el estudio de fatiga, las representaciones de las variables se refieren a los puntos más desfavorables a fatiga (en el asiento y en el tubo) y son las necesarias para la determinación de la resistencia a fatiga de la unión. El valor de la carga total sobre cada amortiguador será aproximadamente la cuarta parte de la fuerza vertical ejercida por el vehículo, debido a su peso y a la componente vertical de la inercia. Por ello, el valor que se considere en los posteriores análisis deberá guardar un margen de seguridad y ser mayor que el previsto en condiciones normales, de tal manera que supondremos una carga de uso para el amortiguador de 10000 N.

En los casos en que se representa la evolución temporal de alguna de las magnitudes en un punto concreto, se hace frente a los pasos de carga aplicados para obtener la solución.

Como se ha indicado en la definición del modelo, se tiene un total de 19 pasos de carga: del 1 al 13 corresponden al proceso de inserción y los pasos del 14 al 19 representan la carga cíclica.

### **5.3.1. Proceso de inserción**

Se representan las magnitudes de análisis en el instante final del proceso de inserción.

#### Deformación plástica equivalente

En el instante final del proceso de inserción y como consecuencia del mismo, se observa que existe plastificación en una sección completa de la zona de contacto del asiento, alcanzándose el máximo valor en la zona inferior de la superficie de contacto. Dicho valor es para la interferencia estudiada de 0.009, como puede observarse en la figura 5.3.1-1.

En el tubo se tiene una situación de plastificación generalizada en toda la zona de contacto con deformaciones prácticamente uniformes en ella. Sin embargo, en la cara interior del tubo (donde tiene lugar el cambio de pendiente que facilita la inserción) existe una región en la que se produce una plastificación localizada cuyo valor de deformación plástica es de 0.0017 (ver figura 5.3.1-2).

Se tiene, por tanto, que las deformaciones que aparecen en ambos elementos durante el proceso de inserción están muy por debajo de la deformación máxima permisible (0.089 para el asiento y 0.049 para el tubo).

Es importante indicar que la representación de la deformada mediante ANSYS© se realiza multiplicando la deformada unitaria por un factor de escala.

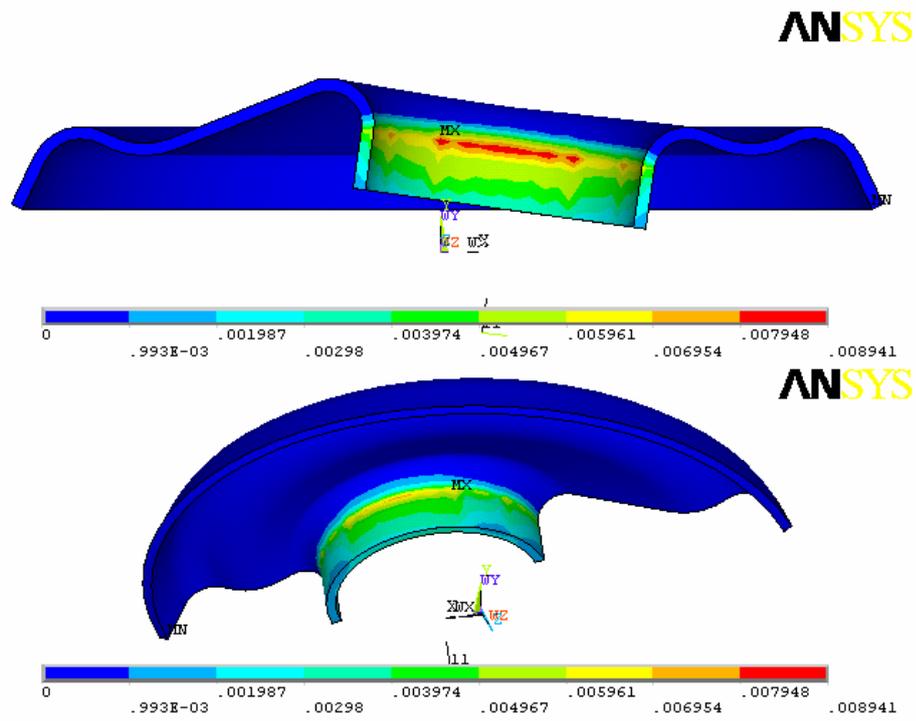


Fig. 5.3.1-1. Deformación plástica equivalente en el asiento (mm/mm). Final de la inserción.

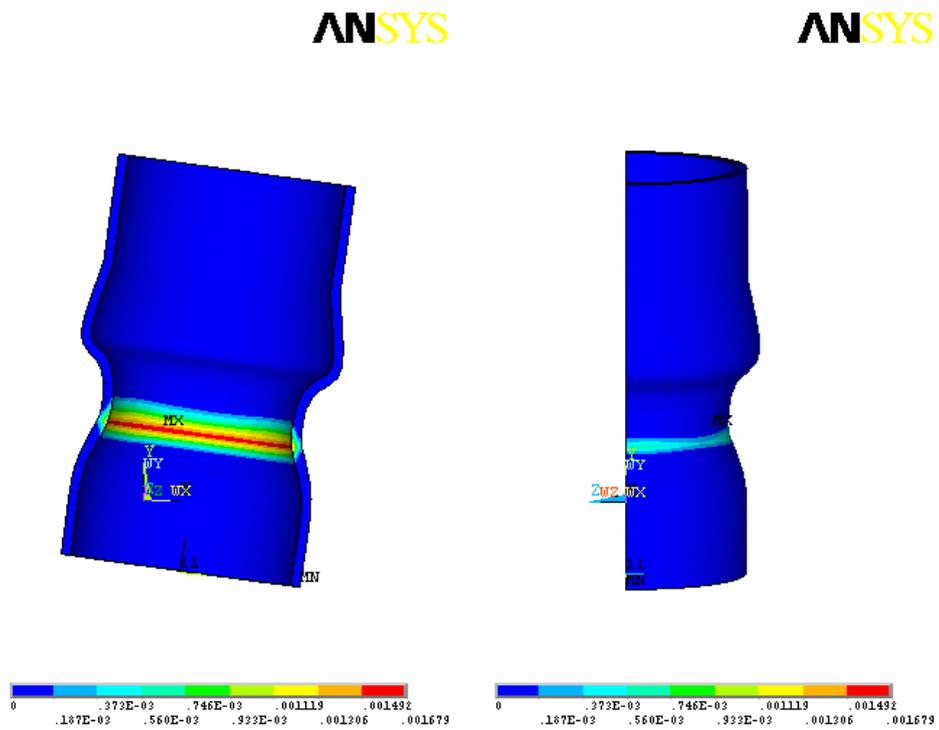


Fig. 5.3.1-2. Deformación plástica equivalente en el tubo (mm/mm). Final de la inserción.

## Tensión equivalente

Tras el proceso de inserción, las regiones del asiento que poseen tensiones equivalentes más desfavorables se corresponden con la zona de contacto y con aquella en la que se produce el cambio en la sección del asiento, como puede verse en la figura 5.3.1-3. En esta región, los valores se mantienen en un rango para la interferencia tratada entre 470 y 529 MPa.

Las tensiones equivalentes que se producen en el tubo al final de la inserción se mantienen en un rango entre 475 y 534 MPa, representado en la figura 5.3.1-4.

Como consecuencia del propio ajuste a presión entre los elementos, las tensiones principales que existen en el asiento son de tracción y en el tubo de compresión.

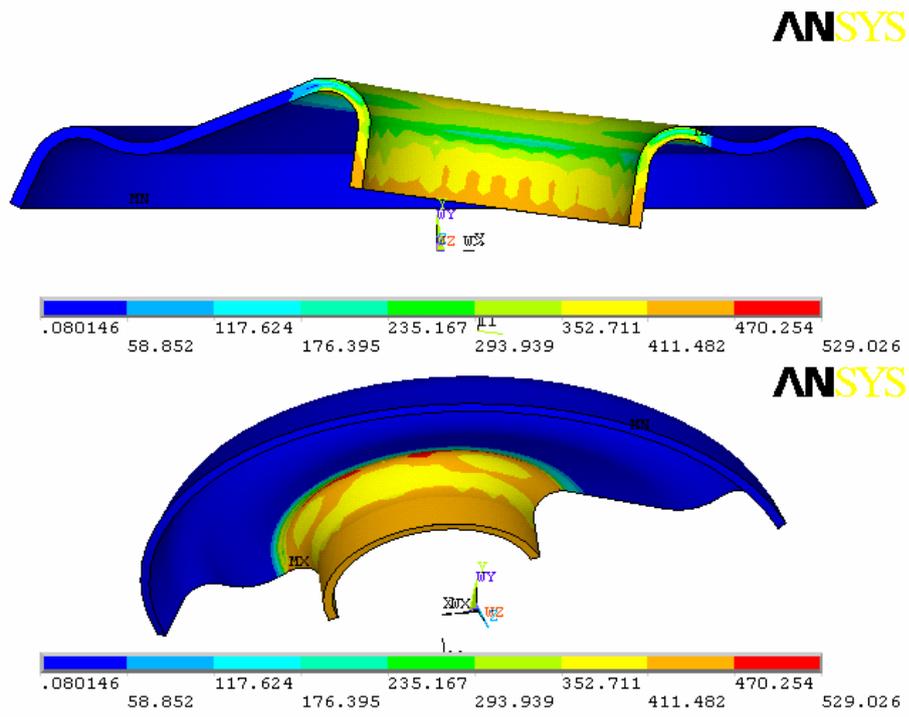


Fig. 5.3.1-3. Tensión equivalente de von Mises en el asiento (MPa). Final de la inserción.

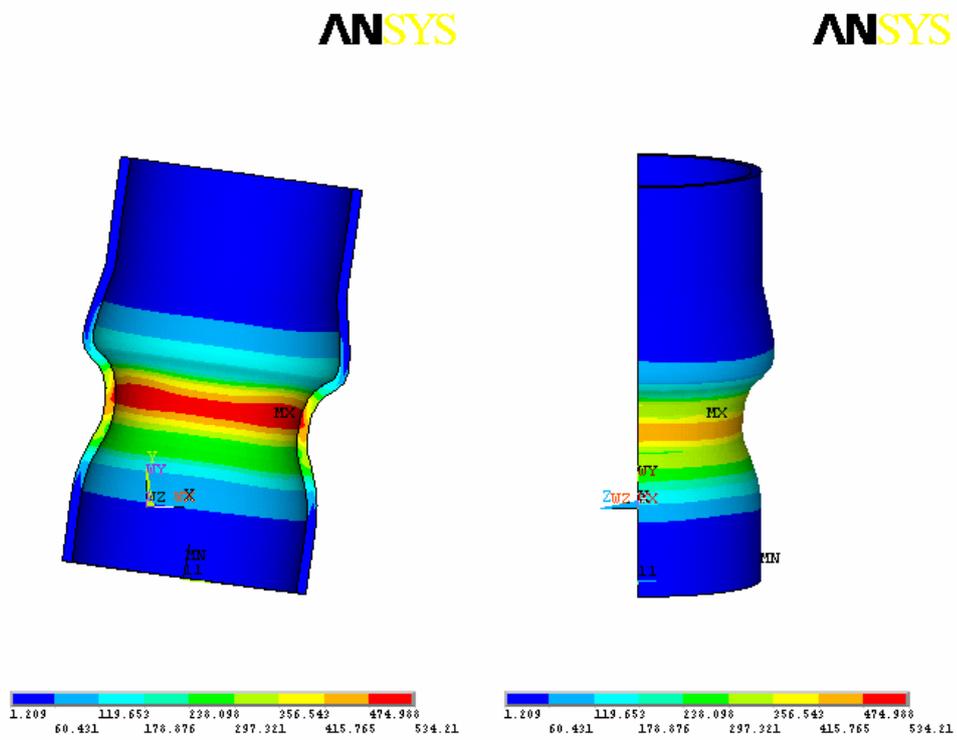


Fig. 5.3.1-4. Deformación plástica equivalente en el tubo (mm/mm). Final de la inserción.

## Presión de contacto

En cuanto a la presión de contacto entre el asiento y el tubo, se observa la existencia de dos regiones en las que el contacto se desarrolla en toda la sección de la superficie de contacto (doble anillo de contacto), lo que garantiza la factibilidad de la unión, es decir, el mantenimiento del tubo y el asiento vinculados a través del ajuste a presión tras el proceso de inserción. En el resto de la zona de contacto apenas existe presión. Este doble anillo de contacto se justifica por la existencia de una flexión en el tubo durante el proceso de inserción, que da lugar a esta doble zona de contacto junto con una región intermedia donde no se produce contacto.

La distribución de presiones se muestra en la figura 5.3.1-5 siendo su valor máximo de 139 MPa.

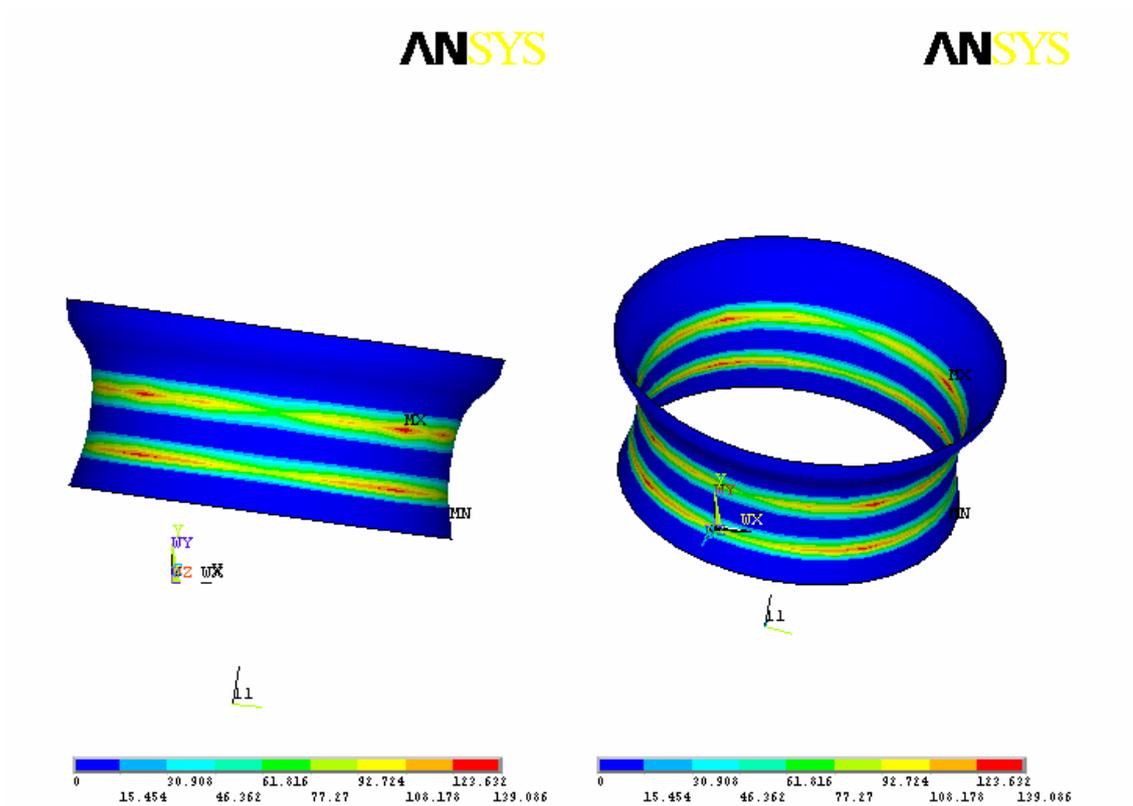


Fig. 5.3.1-5. Presión normal de contacto (MPa). Final de la inserción.

## Situación del contacto

Se pueden obtener conclusiones análogas para el contacto mediante la consideración del estado de los elementos correspondientes. Así, se observa que la existencia de contacto en toda una sección sólo se materializa a través de dos “anillos”: correspondiente a las regiones de presiones elevadas (ver figura 5.3.1-6).

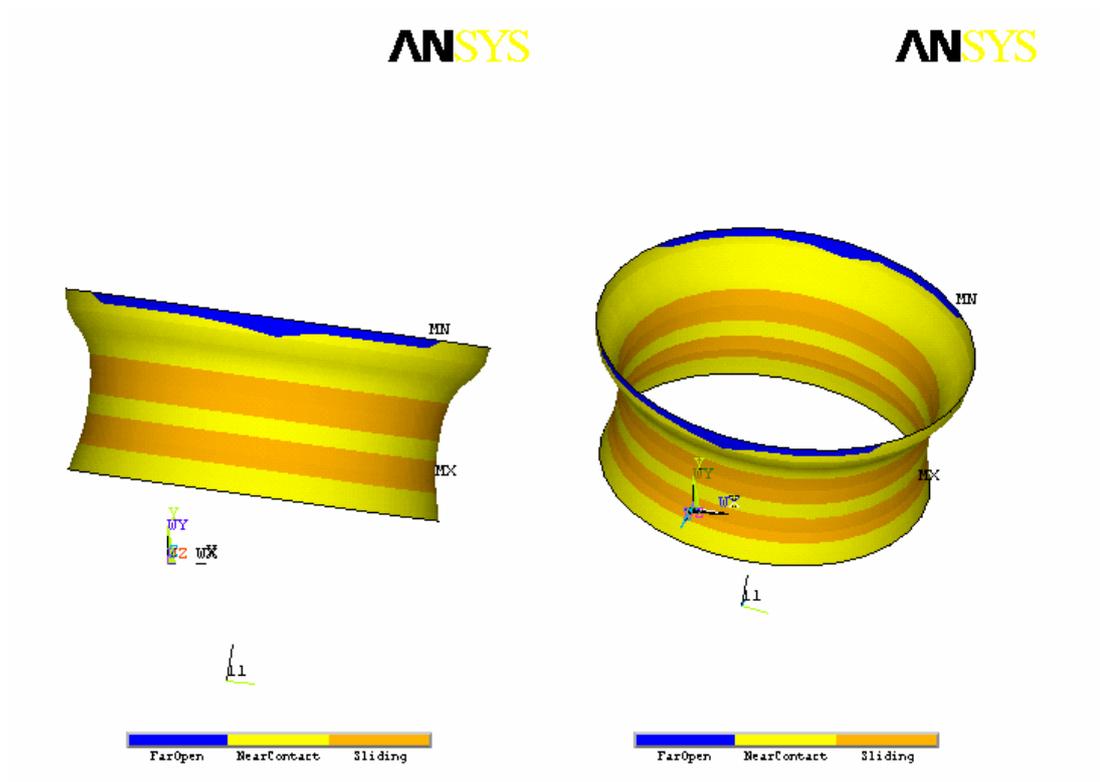


Fig. 5.3.1-6. Estado de los elementos de contacto. Final de la inserción.

## Comprobación de los criterios de rotura dúctil

En la mayoría de los procesos en los que aparece deformación plástica, el factor limitante del proceso es generalmente la iniciación de la fractura dúctil y dado que la fractura dúctil involucra una considerable disipación de energía, dentro de los criterios empíricos y semi-empíricos se han usado en la aplicación los coeficientes de Freundenthal [4.7.1] y Cockcroft-Latham.[4.7.2] Estos coeficientes se calculan para cada uno de los elementos del amortiguador mediante la curva del ensayo de tracción del material y se comparan con los obtenidos siguiendo el proceso de inserción que sufre el asiento en el tubo, definiéndose los coeficientes de seguridad en rotura dúctil, como el cociente entre ambos valores. Los

coeficientes de seguridad deben encontrarse dentro de unos márgenes de seguridad que se materializan en tener un valor por debajo de la unidad.

Por tanto se ha comprobado la posibilidad de rotura dúctil aplicando los criterios de Freudenthal y Cockcroft-Latham, resultando unos coeficientes de seguridad que se detallan en la tabla 5.3.1-1.

ASIENTO		TUBO	
Freudenthal	Cockcroft-Latham	Freudenthal	Cockcroft-Latham
6.78E-02	5.45E-02	3.21E-02	1.38E-02

Tabla. 5.3.1-1. Coeficientes de seguridad en rotura dúctil.

Ninguno de ellos supera la unidad por lo que podemos concluir que no se produce rotura dúctil en el amortiguador como consecuencia del proceso de inserción.

En la tabla 5.3.1-2 se muestran como resumen los valores obtenidos en este apartado referidos al proceso de inserción del asiento en el tubo.

PROCESO DE INSERCIÓN		
Deformación plástica equivalente (mm/mm)	ASIENTO	0.008941
	TUBO	0.001679
Tensión equivalente (MPa)	ASIENTO	529.026
	TUBO	534.210
Presión de contacto (MPa)		139.086
Coeficiente de seguridad Cockcroft-Latham	ASIENTO	5.45E-02
	TUBO	1.38E-02
Coeficiente de seguridad Freudenthal	ASIENTO	6.78E-02
	TUBO	3.21E-02

Tabla. 5.3.1-2. Resumen de valores proceso de inserción.

### **5.3.2. Proceso de carga y descarga**

Se representan las tensiones y deformaciones en el instante más desfavorable del proceso cíclico: después de la primera carga.

#### Deformación plástica equivalente

Después de aplicar la primera de las cargas cíclicas, el estado de deformación plástica equivalente en el asiento es prácticamente el mismo que el que se tenía al final del proceso de inserción, de manera que se tiene la misma distribución a nivel general y los valores máximos alcanzados son sólo un poco más elevados, 0,009028, como se representa en la figura 5.3.2-1.

Para el tubo ocurre exactamente lo mismo: la distribución de las deformaciones plásticas es prácticamente igual y los valores máximos algo mayores, 0,01679 (ver figura 5.3.2-1), aunque hay ciertas zonas que se descargan. Se observa así que el proceso de inserción provoca la plastificación de los componentes, fundamentalmente en la zona de contacto, y la aplicación de la carga cíclica no da lugar al aumento de dicha deformación plástica.

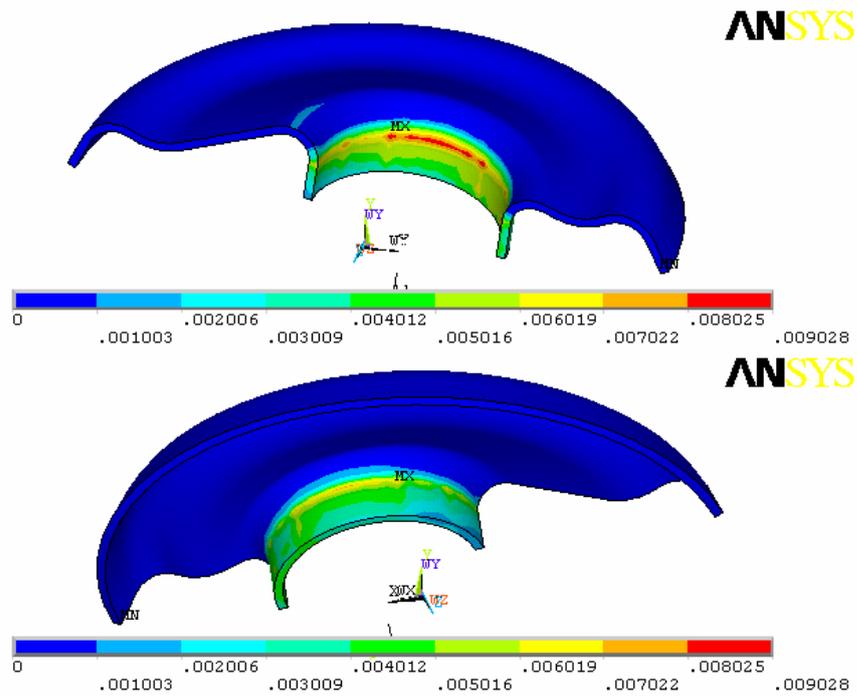


Fig. 5.3.2-1. Deformación plástica equivalente en el asiento (mm/mm) después de la primera carga.

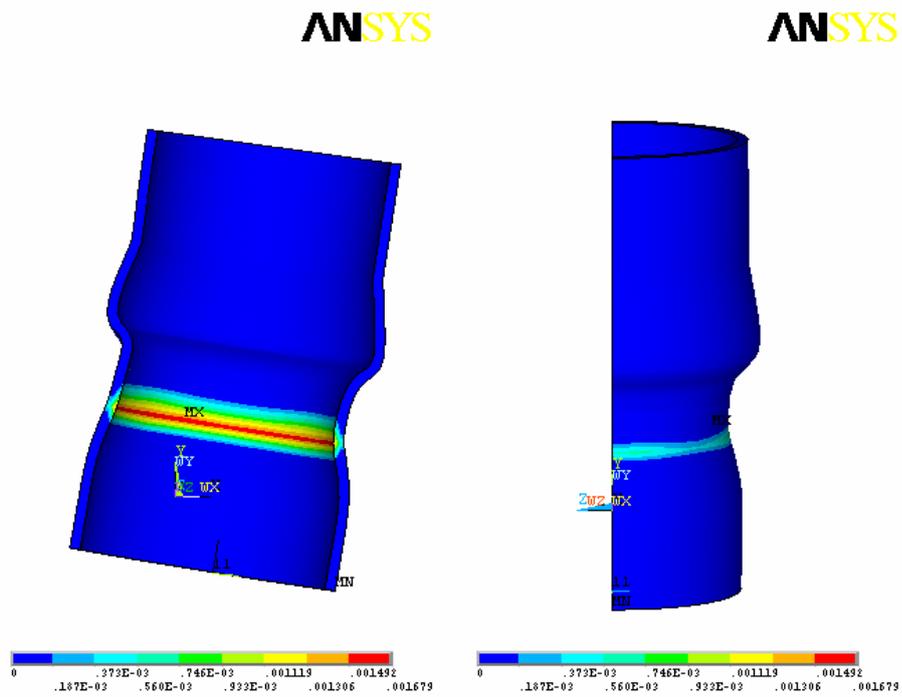


Fig. 5.3.2-2. Deformación plástica equivalente en el tubo (mm/mm) después de la primera carga.

### Tensión equivalente

Las tensiones equivalentes presentes en el asiento tras la aplicación de la primera carga alcanzan su valor máximo en la zona de contacto entre los elementos, particularmente en la región en la que el asiento se apoya sobre el resalto del tubo. Estos valores llegan hasta los 427 MPa. Se observa también, que se alcanza un cierto nivel de tensiones en toda la superficie del asiento debido a que la carga aplicada actúa sobre la parte exterior del mismo, lo que afecta al estado tensional en todo el asiento. El estado tensional del asiento tras la primera carga se muestra en la figura 5.3.2-3.

Para el tubo, las tensiones equivalentes tras la primera carga son máximas también en la misma situación que para el asiento, dicho valor máximo es de 564 MPa y se representan en la figura 5.3.2-4.

Analizando el orden de magnitud de los resultados, se comprueba que para el asiento, desde un punto de vista tensional, el instante final de la primera carga es un poco más desfavorable que el del proceso de inserción. Para el tubo se tiene la situación opuesta en lo que respecta al nivel de tensiones. Esto se debe a que la aplicación de la primera de las cargas cíclicas supone una acción mayor sobre el asiento, ya que la inserción consiste en la actuación de una fuerza uniforme sobre el mismo, sin embargo, en el tubo se produce una relajación tensional como consecuencia de que la carga cíclica provoca un momento sobre la unión que modifica la zona del tubo sobre la que el asiento ejerce un mayor empuje.

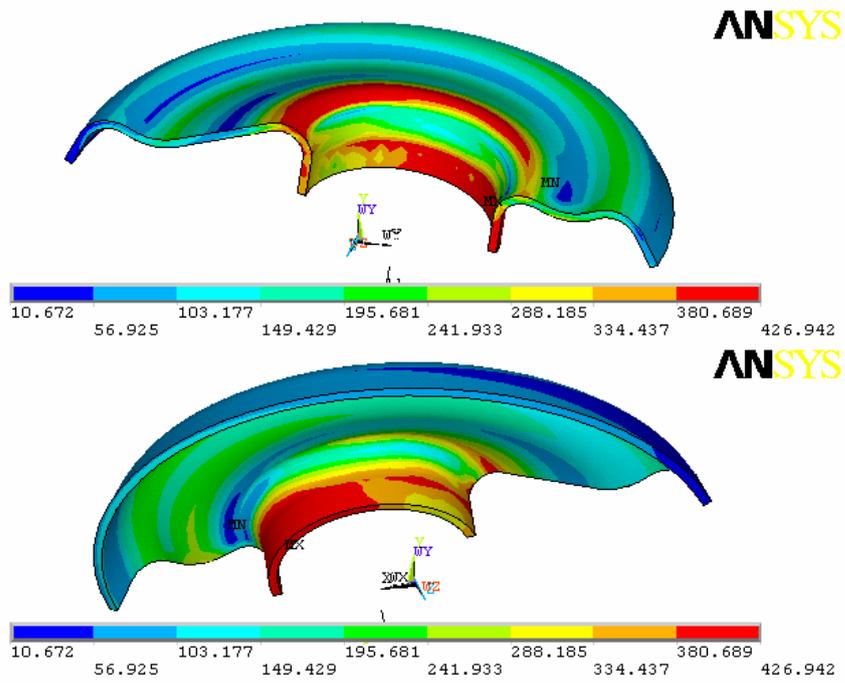


Fig. 5.3.2-3. Tensión equivalente de von Mises en el asiento (MPa) después de la primera carga.

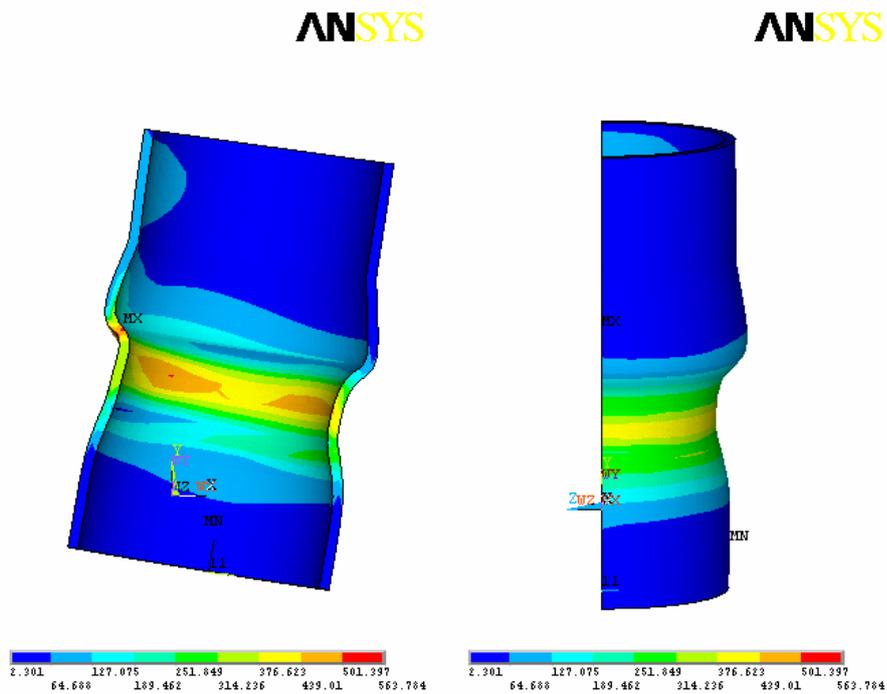


Fig. 5.3.2-4. Tensión equivalente de von Mises en el tubo (MPa) después de la primera carga.

Las magnitudes del contacto se representan tras los ciclos de carga y descarga una vez que sus valores se estabilizan.

### Presión de contacto

Estudiando la presión de contacto entre el asiento y el tubo, se tiene la misma conclusión ya obtenida en cuanto a la existencia de dos anillos de contacto en el que se tienen valores elevados de la presión como resultado de la carga cíclica (valores tras la carga y la descarga), no obstante los valores máximos se concentran en una zona muy concreta, coincidiendo con el cambio de curvatura de la zona de contacto, siendo de 603 MPa tras la carga tal y como se observa en la figura 5.3.2-5, y 162 MPa tras la descarga (ver figura 5.3.2-6).

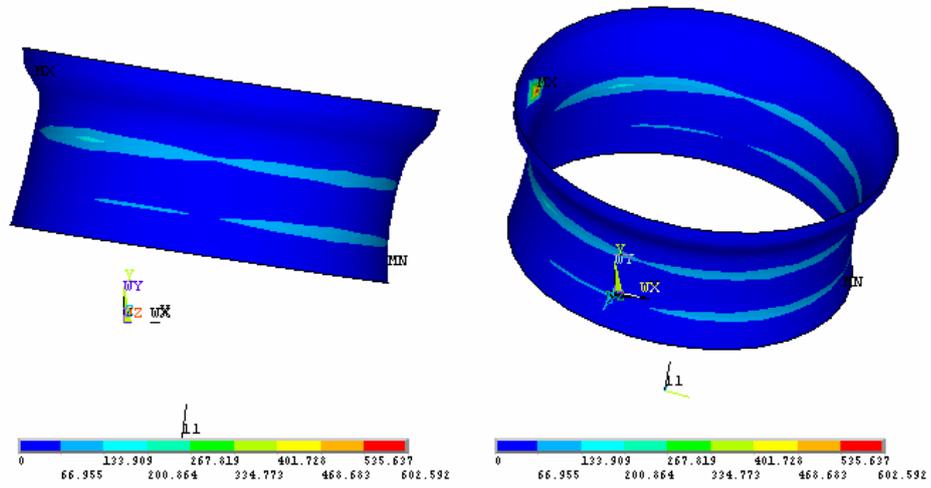


Fig. 5.3.2-5. Presión normal de contacto tras la carga (MPa).

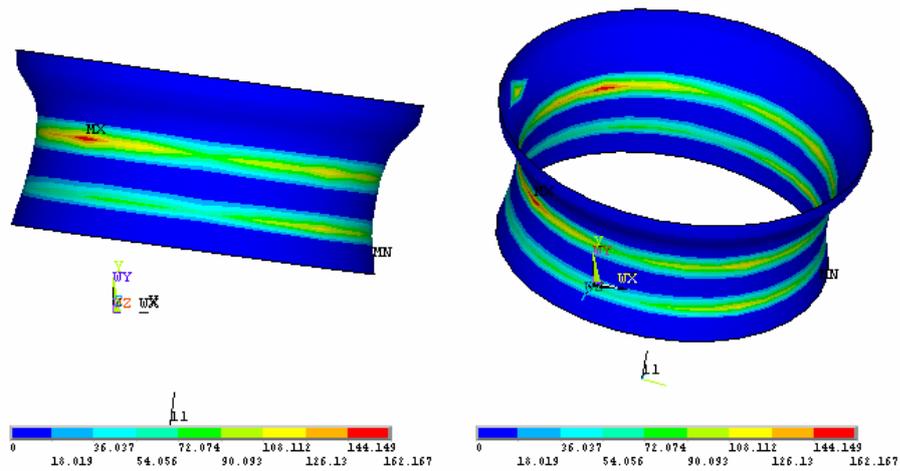


Fig. 5.3.2-6. Presión normal de contacto tras la descarga (MPa).

### Situación del contacto

Mediante el análisis del estado de los elementos de contacto se verifica a lo largo de todo el proceso cíclico, la existencia de dos anillos de contacto, tras la carga y la descarga. La situación que se tiene es la de contacto con deslizamiento, aunque existen pequeñas regiones de contacto sin deslizamiento, fundamentalmente en la zona de contacto asociada al extremo libre del asiento y entre las dos bandas de deslizamiento definidas, como se observa en la figura 5.3.2-7 tras la carga y en la 5.3.2-8 tras la descarga.

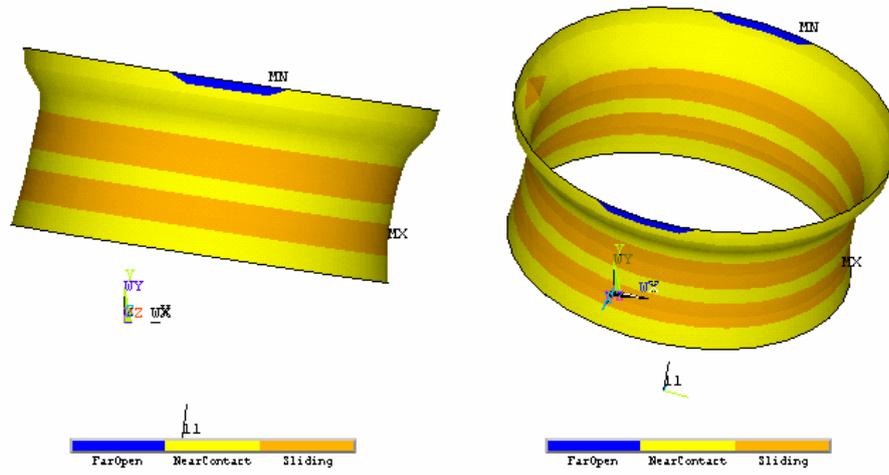


Fig. 5.3.2-7. Estado de los elementos de contacto tras la carga.

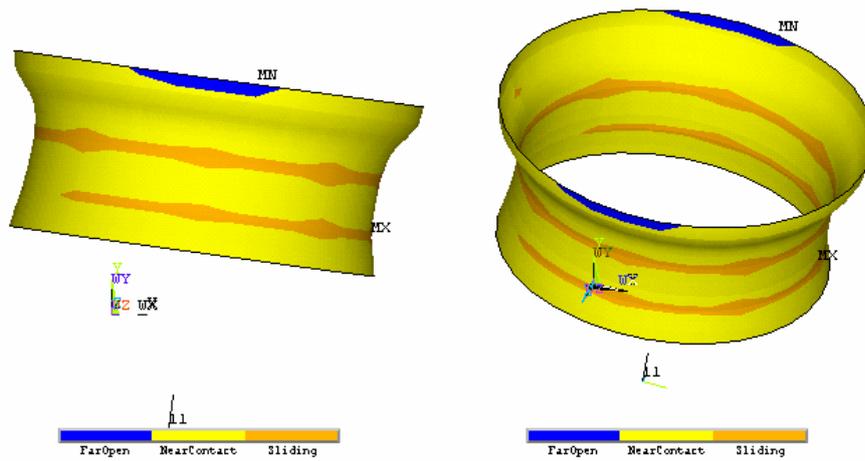


Fig. 5.3.2-8. Estado de los elementos de contacto tras la descarga.

Los valores de las variables significativas en el proceso de carga y descarga se muestran en la tabla 5.3.2-1.

VALORES MÁXIMOS CARGA Y DESCARGA		
Deformación plástica equivalente (mm/mm)	ASIENTO	0.009028
	TUBO	0.001679
Tensión equivalente (MPa)	ASIENTO	426.942
	TUBO	563.784
Presión de contacto (MPa) Carga		602.592
Presión de contacto (MPa) Descarga		162.167

Tabla. 5.3.2-1. Resumen de valores proceso de carga y descarga.

### 5.3.3. Estudio de fatiga

Como se ha comentado, las magnitudes de interés para desarrollar el estudio de fatiga son las tensiones y la diferencia de deformaciones en la dirección más desfavorable. La localización de dichos puntos se debe a la existencia de la unión por ajuste a presión y al momento que sobre ella origina la carga aplicada.

De acuerdo con los resultados obtenidos del estudio numérico del proceso de carga cíclica sobre el asiento, la utilización del criterio de iniciación de grieta de Smith, Watson y Topper proporciona los puntos más desfavorables a fatiga.

En el caso del asiento la cara más desfavorable es aquella que no se encuentra en contacto, coincidiendo la zona de inicio de la grieta con el cambio de curvatura en la geometría del asiento, como puede verse en la figura 5.3.3-1, ya que en dicha zona se producirá un estado alternante de tracción y compresión durante la aplicación de la carga cíclica. El punto crítico se encuentra en el plano de simetría del elemento. La iniciación de grieta en el tubo se producirá al final de la zona de contacto, sobre el resalto, en el punto sobre el que se apoya el asiento al aplicar la carga, estando situado éste en el plano de simetría del tubo tal y como se observa en la figura 5.3.3-2.

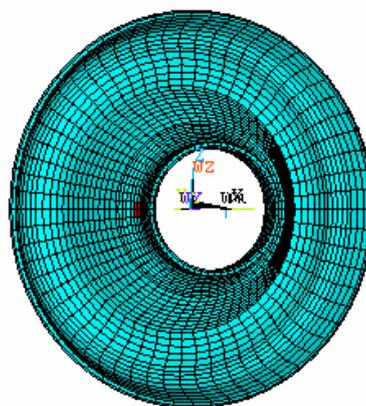
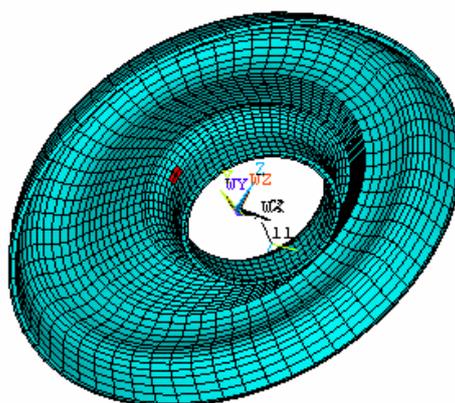


Fig. 5.3.3-1. Puntos más desfavorables a fatiga en el asiento.

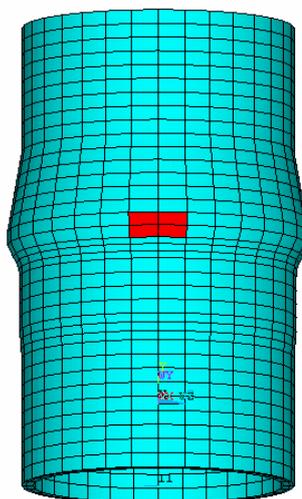


Fig. 5.3.3-2. Puntos más desfavorables a fatiga en el tubo.

Se representarán a continuación los resultados asociados a dichos puntos: deformaciones, tensiones y variaciones en el espesor.

### Deformaciones

En el punto más desfavorable del asiento, la evolución de la deformación equivalente en el tiempo muestra que existe un elevado nivel de deformaciones plásticas de valor aproximadamente constante, 0.0028, y la aplicación de la carga cíclica da lugar a una variación pequeña de las deformaciones elásticas, entre los valores de 0.0015 y 0.0020 representada en la figura 5.3.3-3.

En el punto más desfavorable del tubo se tiene la situación opuesta: la deformación plástica (de valor nulo aproximadamente constante en el tiempo) es mucho menor que la elástica, comprendida entre 0.0008 y 0.0024. Por tanto, el punto más desfavorable para la iniciación de grieta habrá sufrido una pequeña plastificación durante el proceso de inserción y la actuación de las cargas y descargas no incrementarán dicho nivel de deformación plástica como se observa en la figura 5.3.3-4.

En los gráficos a lo largo del espesor, se presentan los valores empleados en el análisis de fatiga, que están asociados a la dirección más desfavorable para la iniciación y crecimiento de grieta.

DEF. ELASTICA  
DEF. PLASTICA

ANSYS

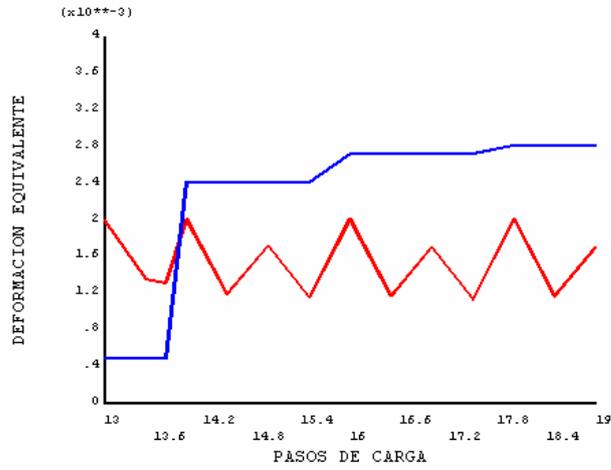


Fig. 5.3.3-3. Evolución de la deformación en el punto más desfavorable del asiento (mm/mm).

DEF. ELASTICA  
DEF. PLASTICA

ANSYS

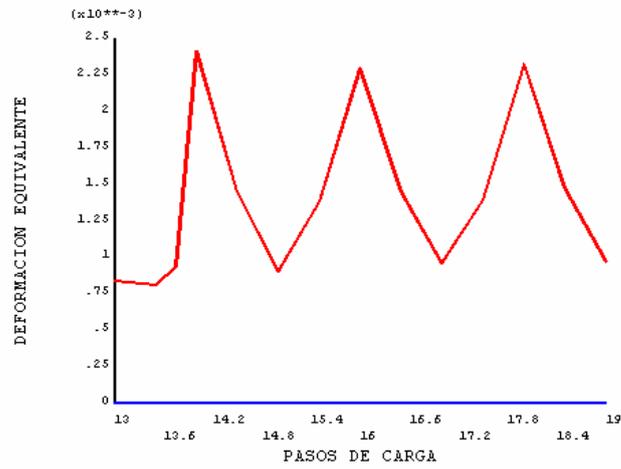


Fig. 5.3.3-4. Evolución de la deformación en el punto más desfavorable del tubo (mm/mm).

## Tensiones

La evolución temporal de la tensión equivalente en el punto más desfavorable a fatiga del asiento muestra que la aplicación de una carga supone un incremento del nivel de tensiones y una descarga da lugar a un decremento. De este modo, las tensiones equivalentes varían entre 230 y 375 MPa para los valores mínimos y máximos (ver figura 5.3.3-5).

Para el tubo, se tiene que la aplicación de la carga supone una relajación del nivel de tensiones equivalentes en el punto más desfavorable. Por tanto, la evolución temporal del proceso de carga cíclica da lugar a valores comprendidos entre 150 y 340 MPa como se refleja en la figura 5.3.3-6.

En el amortiguador podremos distinguir dos situaciones de manera general, ya que el asiento se encontrará a tracción, mientras que el tubo se encontrará a compresión, sin embargo debido al efecto Poisson en el tubo también existirán zonas a tracción aunque de valores menores. Es evidente que las tensiones perjudiciales desde el punto de vista de la resistencia a fatiga son las de tracción, por tanto, serán éstas las que haya que tener en cuenta al realizar dicho estudio. Por lo tanto y aunque hayamos tenido en cuenta la vida a fatiga del tubo, hubiera sido suficiente la determinación de la vida a fatiga del asiento como representativa del conjunto del amortiguador.

TENSIONES

ANSYS

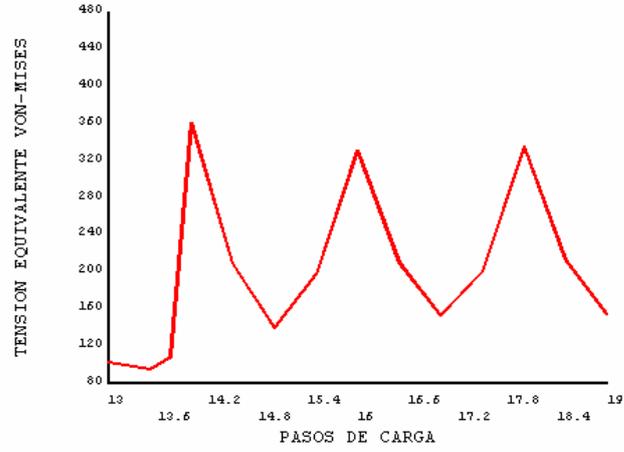


Fig. 5.3.3-5. Evolución de la tensión equivalente de von Mises en el punto más desfavorable del asiento.

TENSIONES

ANSYS

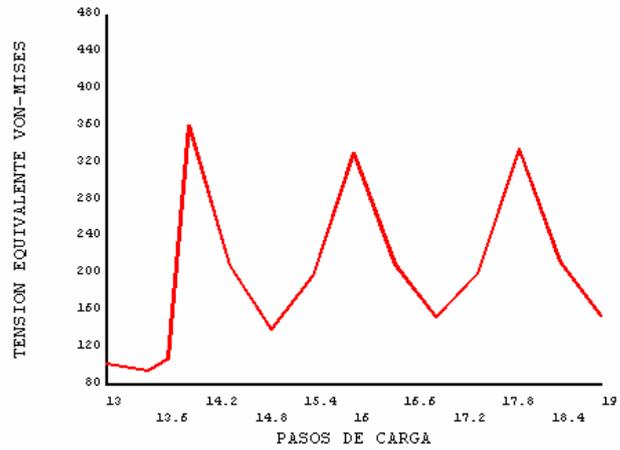


Fig. 5.3.3-6. Evolución de la tensión equivalente de von Mises en el punto más desfavorable del tubo.

## Resistencia a fatiga

En el amortiguador podremos distinguir dos situaciones de manera general, ya que el asiento se encontrará a tracción, mientras que el tubo se encontrará a compresión, sin embargo debido al efecto Poisson en el tubo también existirán zonas a tracción aunque de valores menores. Es evidente que las tensiones perjudiciales desde el punto de vista de la resistencia a fatiga son las de tracción, por tanto, serán éstas las que haya que tener en cuenta al realizar dicho estudio. Por lo tanto y aunque hayamos tenido en cuenta la vida a fatiga del tubo, hubiera sido suficiente la determinación de la vida a fatiga del asiento como representativa del conjunto del amortiguador.

Según los valores que se utilizan para los parámetros del criterio de iniciación de grieta, se tienen unos datos de la vida a fatiga del asiento del orden del millón de ciclos ( $2.97 \times 10^6$  ciclos), mientras que para el tubo podemos hablar de “vida infinita” a fatiga ( $5.71 \times 10^{13}$  ciclos).

Los intervalos de variación de la deformación y tensión equivalente en el punto más desfavorable en el estudio de fatiga así como la vida a fatiga para cada componente del amortiguador se resumen en la tabla 5.3.3-1.

RESULTADOS PUNTO MAS DESFAVORABLE			
Deformación (mm/mm)	ASIENTO	Plástica	0.0028
		Elástica	0.0015-0.0020
	TUBO	Plástica	0
		Elástica	0.0008-0.0024
Tensión equivalente (MPa)	ASIENTO	230-375	
	TUBO	150-340	
Vida (ciclos)	ASIENTO	2.97E+06	
	TUBO	5.71E+13	

Tabla. 5.3.3-1. Resumen de valores del estudio de fatiga.

## **5.4. Modificación de parámetros en la definición del modelo**

En el presente proyecto se ha planteado el análisis de la unión entre el tubo y el asiento de un amortiguador por medio de un ajuste a presión, permitiendo al usuario de la aplicación la construcción de diferentes geometrías mediante la variación de algunos parámetros del modelo aunque siempre manteniendo los patrones que conforman las geometrías de los componentes del amortiguador, así como el uso de distintos materiales. Además se han obtenido los resultados asociados al proceso de montaje y a su posterior uso en el automóvil, estudiándose el proceso de inserción así como el proceso de carga cíclica, pudiendo el usuario definir distintas cargas de uso en el amortiguador, así como el tipo de malla con que desea realizar el estudio.

En este apartado compararemos los resultados obtenidos mediante la variación de algunos de estos parámetros por parte del usuario de la aplicación. En concreto nos centraremos en tres de ellos: la interferencia, la carga de uso y el tipo de mallado.

### **5.4.1. Influencia de la interferencia**

Consideraremos la posibilidad de variar la interferencia entre el asiento y el tubo y como está modificación de la interferencia, manteniendo constantes los demás parámetros del modelo, afecta a los resultados obtenidos en el análisis del amortiguador.

Distinguiremos entre tres valores de la interferencia, en primer lugar una interferencia de 0.2 mm, en segundo lugar una interferencia de 0.25 mm (valor de interferencia nominal) y por último una interferencia de 0.325 mm.

Compararemos aquellos resultados que aportan información relevante acerca de la durabilidad de la unión.

#### **5.4.1.1 Proceso de inserción**

En este apartado se comentan los resultados correspondientes al instante final del proceso de inserción y son comparados en cada uno de los casos estudiados. Estos resultados son: deformación plástica equivalente, tensión equivalente de von Mises, presión de contacto y estado de los elementos de contacto.

### Deformación plástica equivalente

En el instante final del proceso de inserción, como consecuencia del mismo, se observa que existe plastificación en una sección completa de la zona de contacto del asiento, alcanzándose el máximo valor en la zona inferior de la superficie de contacto, valor que aumenta a medida que lo hace la interferencia. Dicho valor es para la interferencia de 0.2 mm de 0.005, para la interferencia de 0.25 mm de 0.009 y para la interferencia de 0.325 mm de 0.015, como se refleja en la figura 5.4.1.1-1.

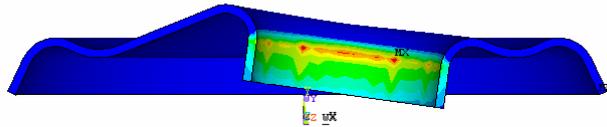
En el tubo, al final del proceso de inserción, se tiene una situación de plastificación generalizada en toda la zona de contacto con deformaciones prácticamente uniformes en ella. Sin embargo, en la cara interior del tubo (donde tiene lugar el cambio de pendiente que facilita la inserción) existe una región en la que se produce una plastificación localizada cuyos valores de deformación plástica aumentan a la vez que lo hace la interferencia con valores para la interferencia de 0.2 mm de 0.0009, para la interferencia de 0.25 mm de 0.0017 y para la interferencia de 0.325 mm de 0.0025, representados en la figura 5.4.1.1-2.

En la tabla 5.4.1.1-1 puede observarse la proporcionalidad entre el crecimiento de la interferencia y el crecimiento de la deformación plástica equivalente.

VALORES MÁXIMOS	Interferencia 0.2 mm	Interferencia 0.25 mm	Interferencia 0.325 mm
ASIENTO	0.005437	0.008941	0.014989
TUBO	0.000926	0.001679	0.002519

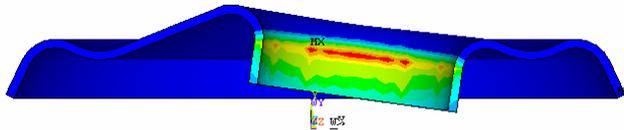
Tabla 5.4.1.1-1. Valores máximos de la deformación plástica equivalente (mm/mm) tras el proceso de inserción.

ANSYS



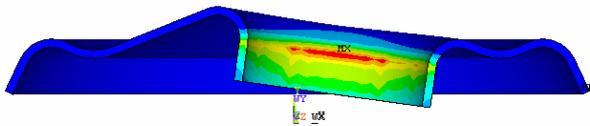
Interferencia 0.2 mm

ANSYS



Interferencia 0.25 mm

ANSYS



Interferencia 0.325 mm

Fig. 5.4.1.1-1. Influencia de la interferencia en la deformación plástica equivalente en el asiento (mm/mm).

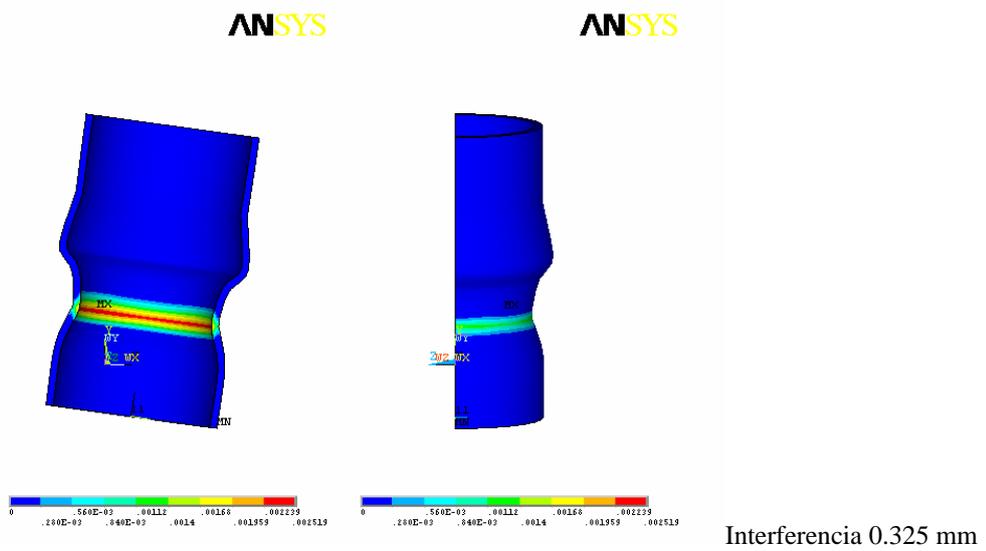
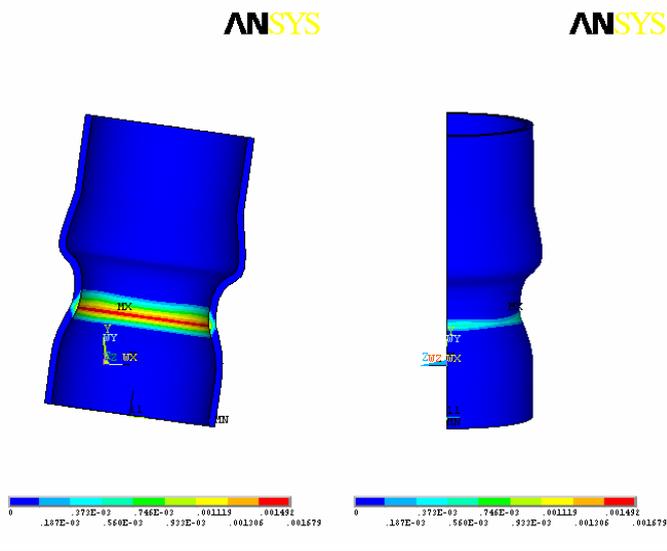
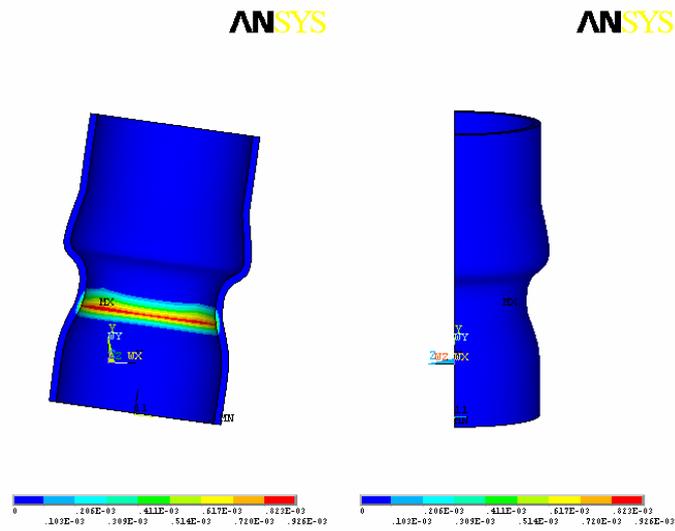


Fig. 5.4.1.1-2. Influencia de la interferencia en la deformación plástica equivalente en el tubo (mm/mm).

## Tensión equivalente

Tras el proceso de inserción, las regiones del asiento que poseen tensiones equivalentes más desfavorables se corresponden con la zona de contacto y con aquella en la que se produce el cambio en la sección del asiento. En esta región, los valores se mantienen en un rango para la interferencia de 0.2 mm entre 397 y 446 MPa, para la interferencia de 0.25 mm entre 470 y 529 MPa y para la interferencia de 0.325 mm entre 380 y 428 MPa, representados en la figura 5.4.1.1-3. Podemos concluir que una vez sobrepasada la interferencia nominal se produce una relajación del estado tensional.

Las tensiones equivalentes que se producen en el tubo al final de la inserción se mantienen en un mismo rango para la interferencia de 0.2 mm y para la interferencia de 0.25 mm, entre 475 y 534 MPa, mientras que una vez superada la interferencia nominal descienden los valores de la tensión aunque de manera menos acusada que en el asiento a valores entre 469 y 527 MPa (ver figura 5.4.1.1-4).

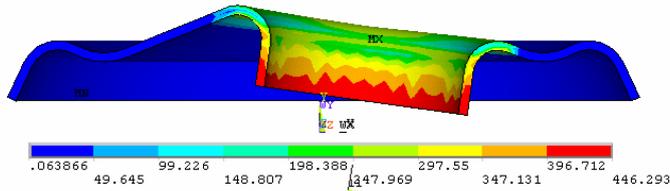
En ambos elementos las distribuciones de tensión equivalente son muy parecidas para los diferentes casos estudiados.

En la tabla 5.4.1.1-2 se resumen estos valores.

VALORES MÁXIMOS	Interferencia 0.2 mm	Interferencia 0.25 mm	Interferencia 0.325 mm
ASIENTO	446.397	529.026	428.130
TUBO	534.397	534.210	527.218

Tabla 5.4.1.1-2. Valores máximos de la tensión equivalente (MPa) tras el proceso de inserción.

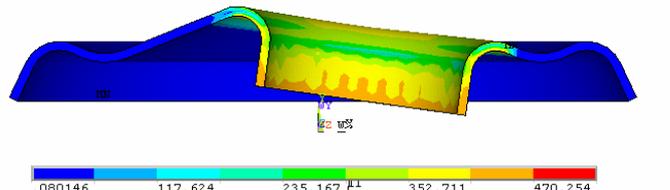
ANSYS



ANSYS

Interferencia 0.2 mm

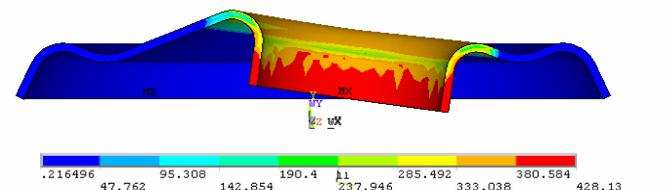
ANSYS



ANSYS

Interferencia 0,25 mm

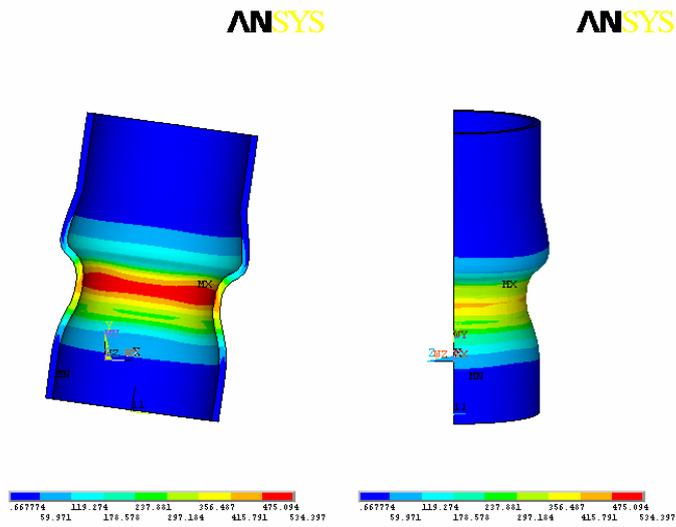
ANSYS



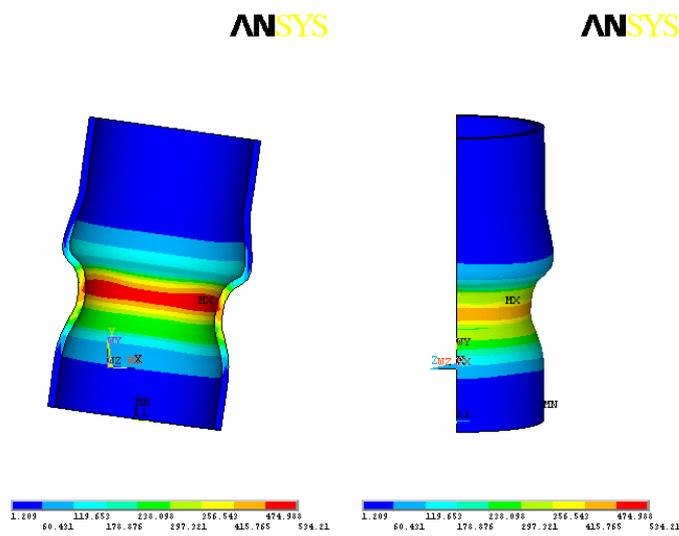
ANSYS

Interferencia 0.325 mm

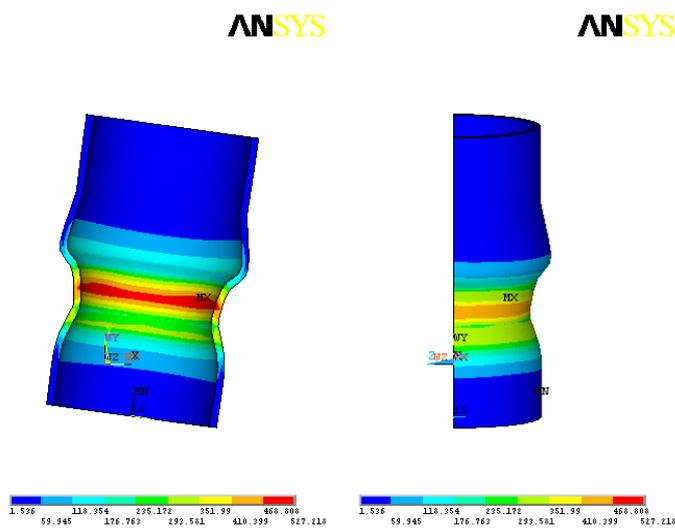
Fig. 5.4.1.1-3. Influencia de la interferencia en la tensión equivalente de von Mises en el asiento (MPa).



Interferencia 0.2 mm



Interferencia 0.25 mm



Interferencia 0.325 mm

Fig. 5.4.1.1-4. Influencia de la interferencia en la tensión equivalente de von Mises en el tubo (mm/mm).

### Presión de contacto

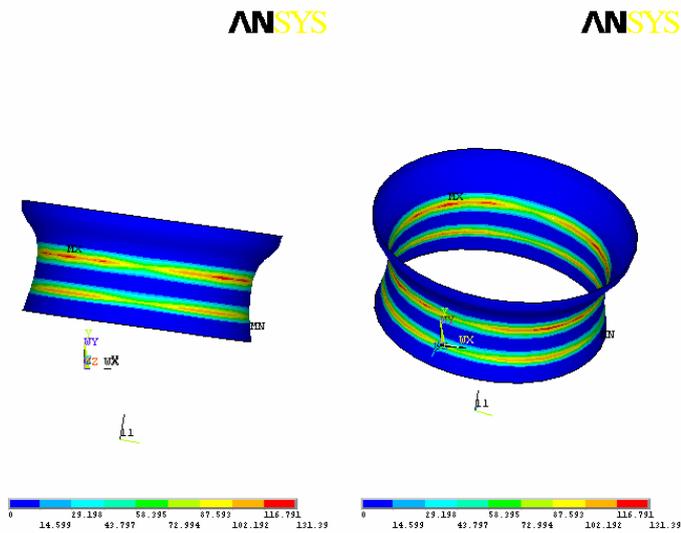
En cuanto a la presión de contacto entre el asiento y el tubo, todas las situaciones dan lugar a distribuciones de presión muy similares. Se observa la existencia de dos regiones en las que el contacto se desarrolla en toda la sección de la superficie de contacto (doble anillo de contacto), en el resto de la zona de contacto apenas existe presión.

El valor de la presión, aumenta a la vez que lo hace la interferencia aproximadamente de manera proporcional y como se representa en la figura 5.4.1.1-5, siendo para la interferencia de 0.2 mm de 131 MPa, para la interferencia de 0.25 mm de 139 MPa y para la interferencia de 0.325 mm de 148 MPa.

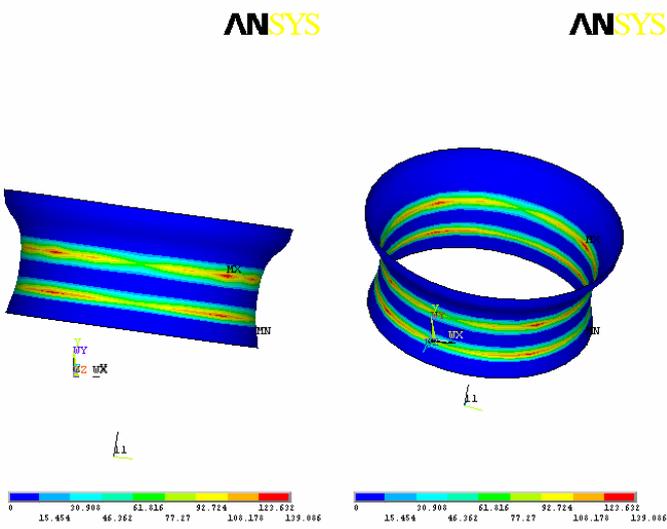
En la tabla 5.4.1.1-3 aparecen los valores máximos de la presión de contacto tras el proceso de inserción en función de la interferencia tratada.

VALORES MÁXIMOS	Interferencia 0.2 mm	Interferencia 0.25 mm	Interferencia 0.325 mm
Presión de contacto (MPa)	131.390	139.086	148.131

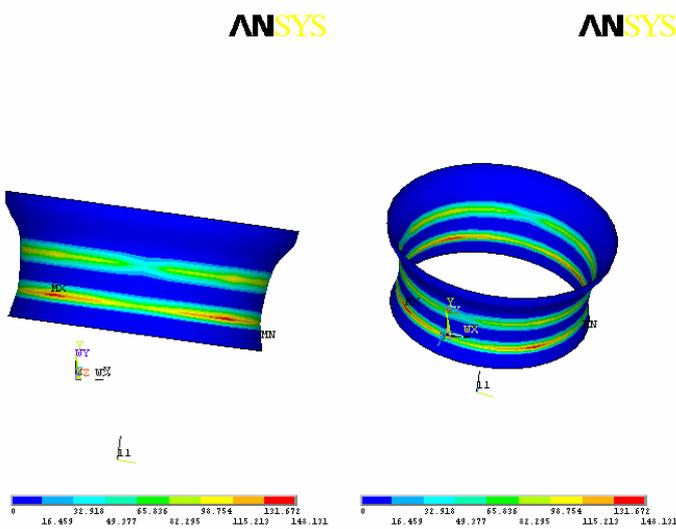
Tabla 5.4.1.1-3. Valores máximos de la presión de contacto (MPa) tras el proceso de inserción.



Interferencia 0.2 mm



Interferencia 0.25 mm



Interferencia 0.325 mm

Fig. 5.4.1.1-5. Influencia de la interferencia en la presión normal de contacto (MPa). Final de la inserción.

### Situación del contacto

Se pueden obtener conclusiones análogas para el contacto mediante la consideración del estado de los elementos correspondientes. Así, se observa que la existencia de contacto en toda una sección sólo se materializa a través de dos “anillos”: correspondiente a las regiones de presiones elevadas. Estos anillos pueden verse representados en la figura 5.4.1.1-6.

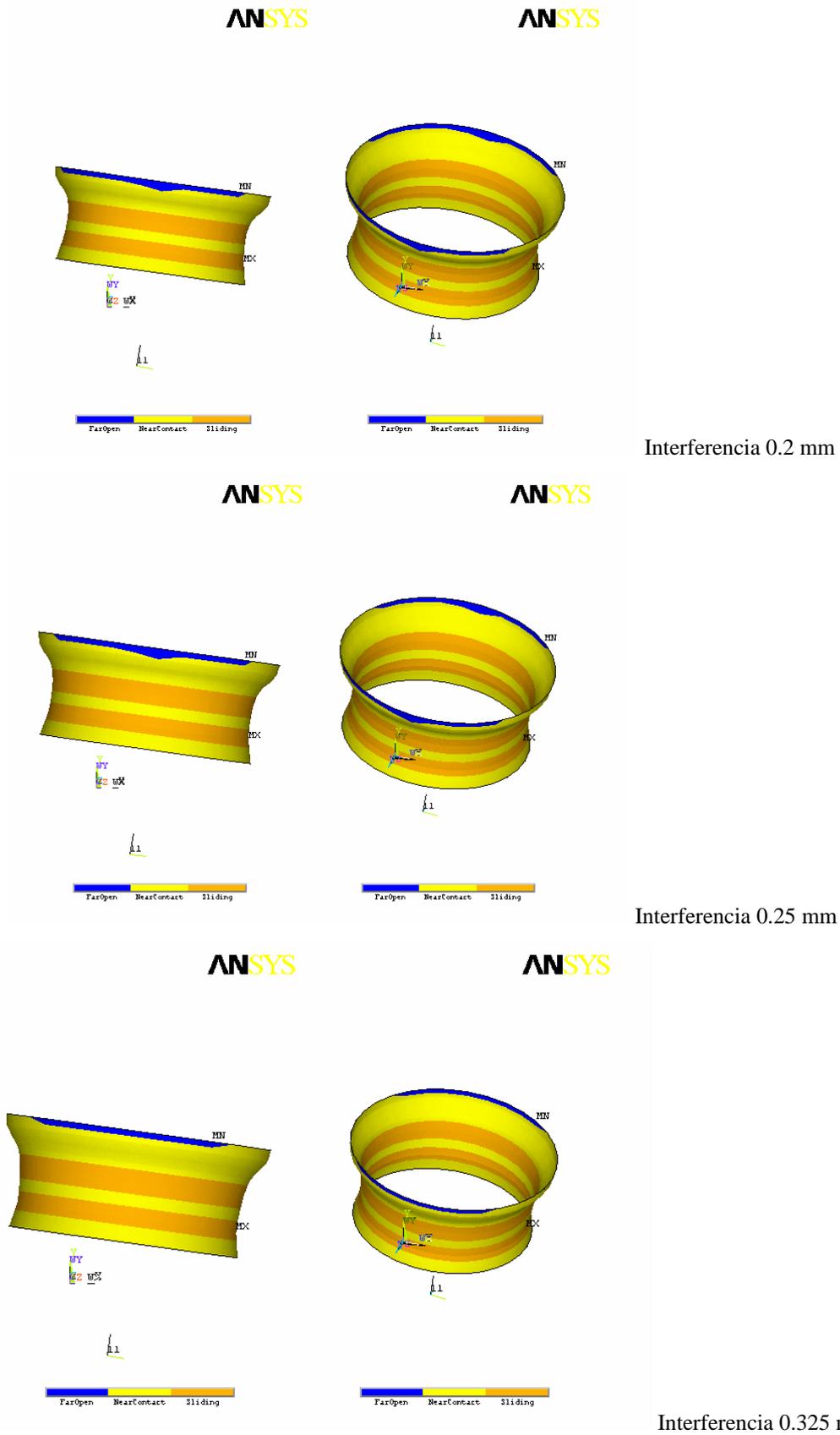


Fig. 5.4.1.1-6. Influencia de la interferencia en el estado de los elementos de contacto. Final de la inserción.

### Comprobación de los criterios de rotura dúctil

Los valores de los coeficientes de seguridad determinados en cada uno de los casos de interferencia, dependiendo del criterio seguido, se resumen en la tabla 5.4.1.1-4, pudiendo observarse como a medida que aumenta la interferencia aumenta el valor de los coeficientes. Esta tendencia tiene una sencilla explicación desde el momento que todos los parámetros que determinan su cálculo también son proporcionales al aumento de la interferencia.

COEFICIENTES DE SEGURIDAD	ASIENTO		TUBO	
	Freudenthal	Cockcroft-Latham	Freudenthal	Cockcroft-Latham
Interferencia 0,2 mm	3.95E-02	2.74E-02	1.84E-02	7.47E-03
Interferencia 0,25 mm	6.78E-02	5.45E-02	3.21E-02	1.38E-02
Interferencia 0,325 mm	0.12	9.88E-02	4.89E-02	2.06E-02

Tabla. 5.4.1.1-4. Coeficientes de seguridad.

### 5.4.1.2 Proceso de carga y descarga

En este apartado se comentan los resultados de deformaciones plásticas y tensiones equivalentes correspondientes al instante más desfavorable del proceso de carga cíclica desde el punto de vista de la resistencia, es decir, tras la primera carga, considerando la influencia de la interferencia en éstas. Además, se analiza la situación del contacto (presiones y estado de los elementos de contacto) tras la carga y tras la descarga, una vez que las magnitudes de interés se estabilizan dentro de un rango de valores, todo ello en las situaciones de interferencia estudiadas.

#### Deformación plástica equivalente

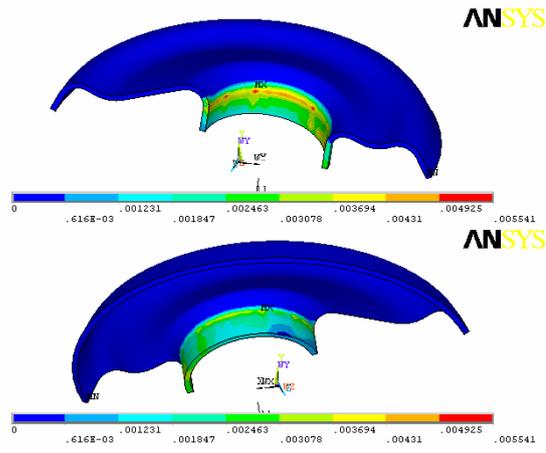
Después de aplicar la primera de las cargas cíclicas, el estado de deformación plástica equivalente en el asiento tiene la misma distribución a nivel general entre los tres casos estudiados y los valores máximos alcanzados crecen con la interferencia aunque una vez superado el caso de interferencia nominal este crecimiento se acentúa, siendo su valor de 0.005541 para la interferencia de 0.2 mm, 0.009028 para la interferencia de 0.25 mm y 0.015019 para la última de las interferencias estudiadas como se representa para los casos en estudio en la figura 5.4.1.2-1.

Para el tubo ocurre exactamente lo mismo: la distribución de las deformaciones plásticas es prácticamente igual y los valores máximos algo mayores a medida que aumenta la interferencia, este valor varía desde 0.000926 para la interferencia de 0.2 mm hasta 0.002519 para la interferencia de 0.325 mm pasando por 0.01679 para la interferencia de 0.25 mm, aunque en este caso el crecimiento de la deformación es aproximadamente proporcional al incremento de la interferencia, ver figura 5.4.1.2-2.

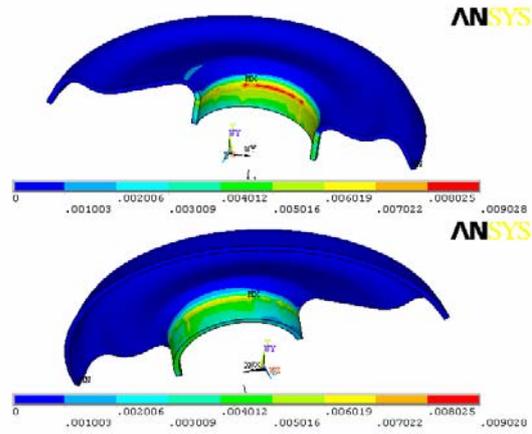
En la tabla 5.4.1.2-1 se resumen estos valores.

VALORES TRAS LA PRIMERA CARGA		Interferencia 0.2 mm	Interferencia 0.25 mm	Interferencia 0.325 mm
Deformación plástica equivalente (mm/mm)	ASIENTO	0.005541	0.009028	0.015019
	TUBO	0.000926	0.001679	0.002519

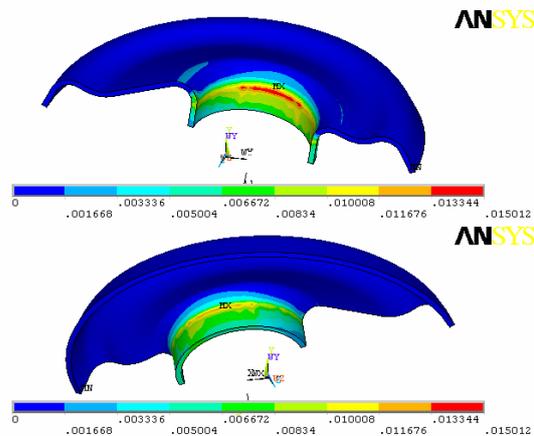
Tabla. 5.4.1.2-1. Valores máximos de la deformación plástica equivalente tras la primera carga.



Interferencia 0.2 mm

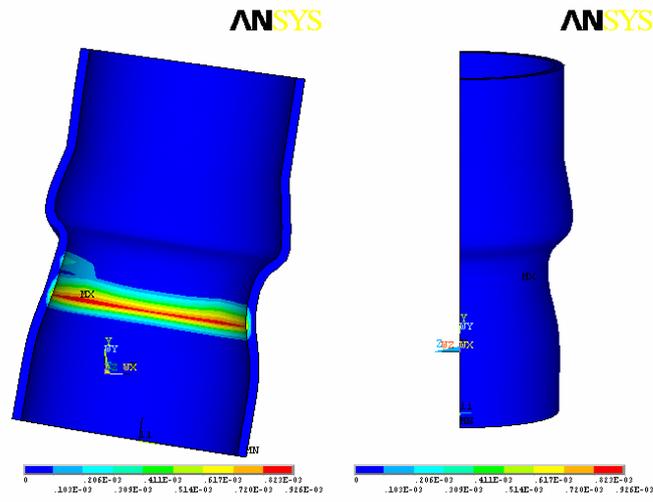


Interferencia 0.25 mm

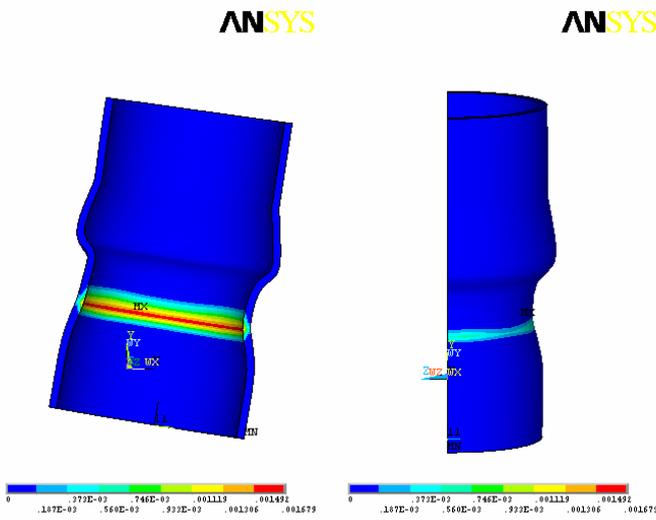


Interferencia 0.325 mm

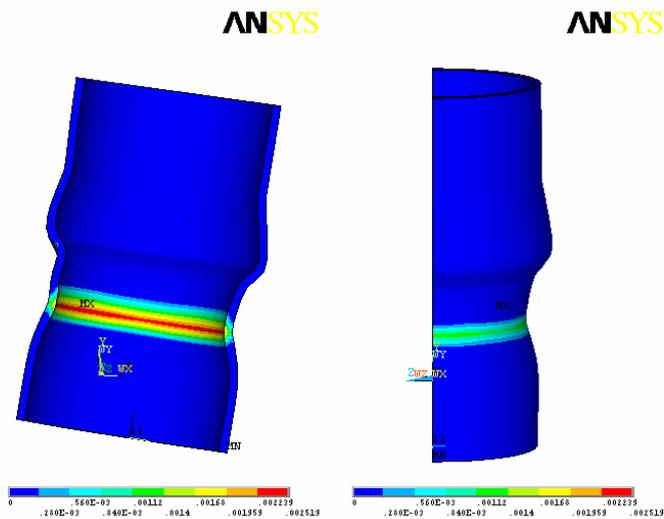
Fig. 5.4.1.2-1. Influencia de la interferencia en la deformación plástica equivalente en el asiento (mm/mm) después de la primera carga.



Interferencia 0.2 mm



Interferencia 0,25 mm



Interferencia 0.325 mm

Fig. 5.4.1.2-2. Influencia de la interferencia en la deformación plástica equivalente en el tubo (mm/mm) después de la primera carga.

### Tensión equivalente

Las tensiones equivalentes presentes en el asiento tras la aplicación de la primera carga alcanzan su valor máximo en la zona de contacto entre los elementos, particularmente en la región en la que el asiento se apoya sobre el resalto del tubo y para la interferencia de menor valor, llegando los valores hasta los 437 MPa en este caso, mientras que para la interferencia de 0.25 mm este valor es 427 MPa y 430 MPa para la interferencia de 0.325 mm.

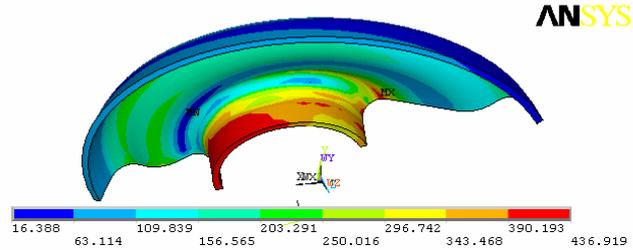
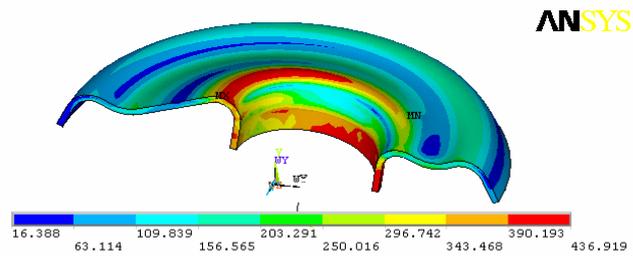
Para el tubo, las tensiones equivalentes tras la primera carga son máximas también en la misma situación que para el asiento, dicho valor es de 602 MPa. En los otros dos casos, este valor es 564 MPa para la interferencia de 0.25 mm y 566 MPa para la restante.

Las distribuciones son en ambos elementos muy parecidas independientemente de la interferencia estudiada como puede observarse para el asiento en la figura 5.4.1.2-3 y para el tubo en la figura 5.4.1.2-4.

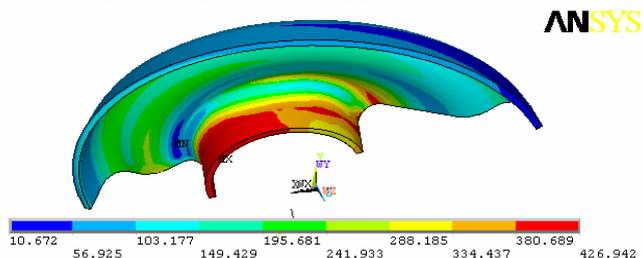
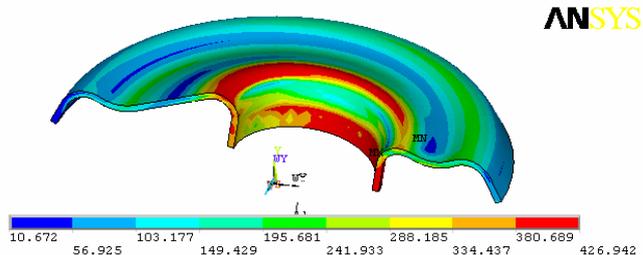
Para resumir los valores obtenidos se rellena la siguiente tabla 5.4.1.2-2.

VALORES TRAS LA PRIMERA CARGA		Interferencia 0.2 mm	Interferencia 0.25 mm	Interferencia 0.325 mm
Tensión equivalente (MPa)	ASIENTO	436.919	426.942	429.885
	TUBO	601.708	563.784	565.786

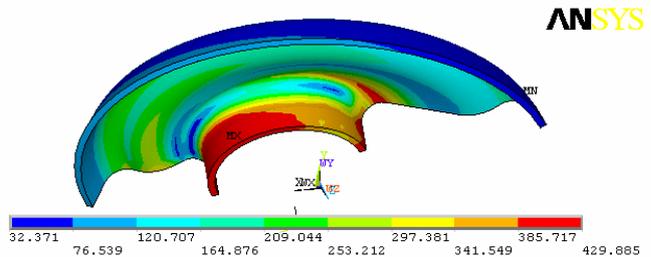
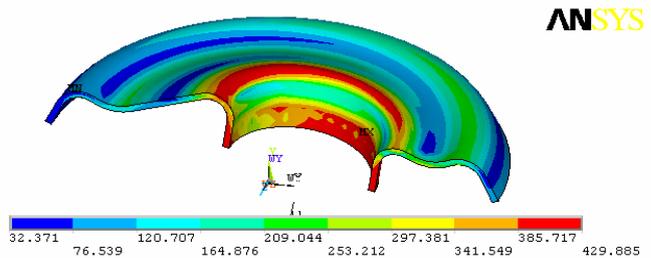
Tabla. 5.4.1.2-2. Valores máximos de la tensión equivalente tras la primera carga.



Interferencia 0.2 mm

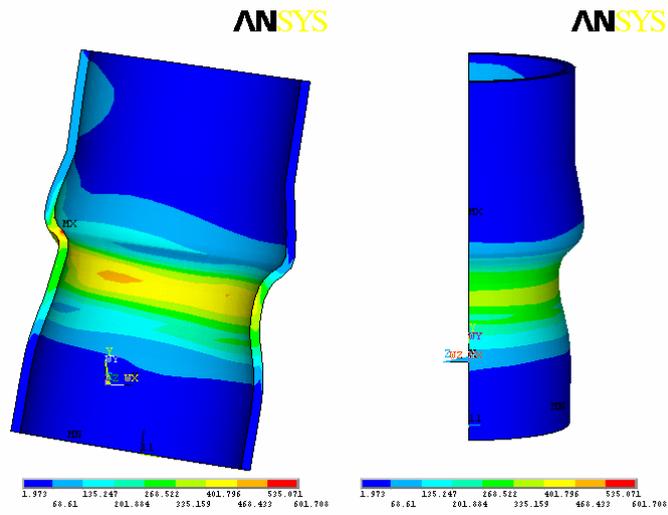


Interferencia 0.25 mm

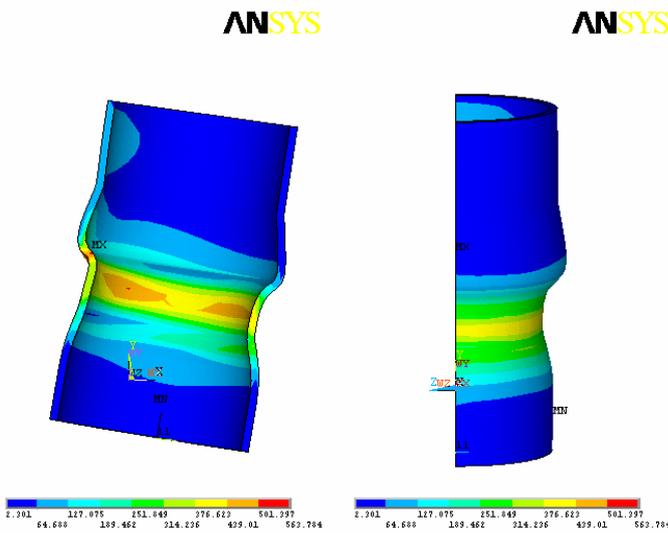


Interferencia 0.325 mm

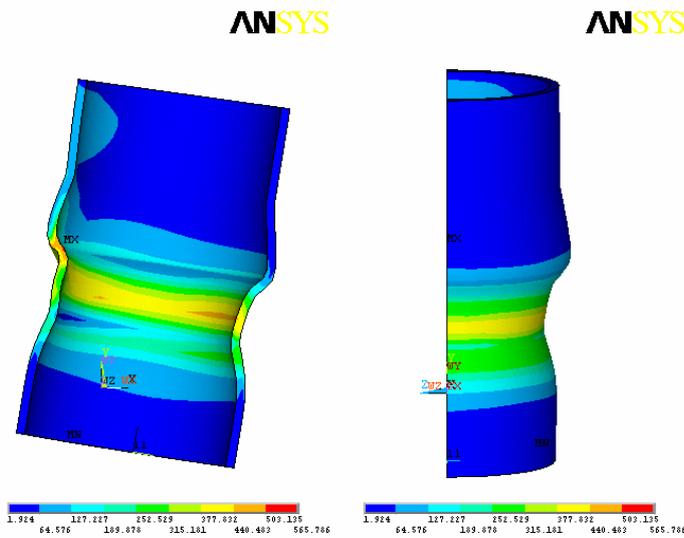
Fig. 5.4.1.2-3. Influencia de la interferencia en la tensión equivalente en el asiento (MPa) tras de la primera carga.



Interferencia 0.2 mm



Interferencia 0.25 mm



Interferencia 0.325 mm

Fig. 5.4.1.2-4. Influencia de la interferencia en la tensión equivalente en el tubo (MPa) tras de la primera carga.

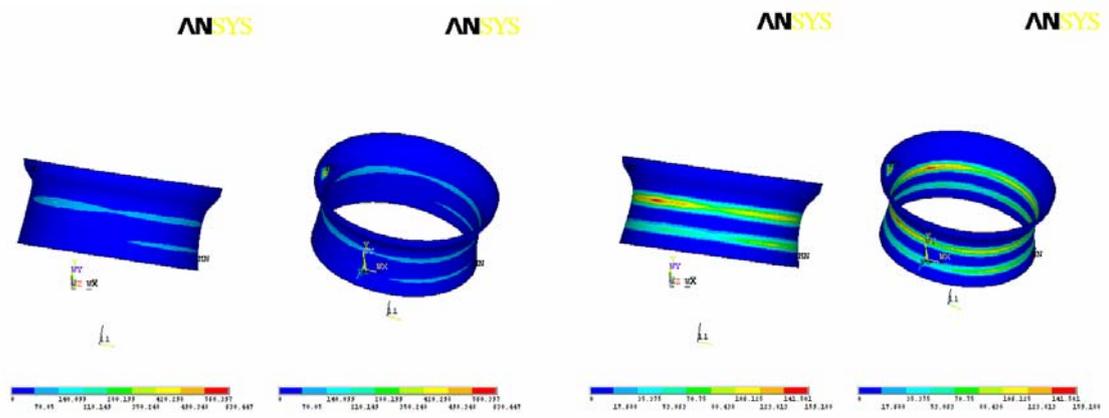
## Presión de contacto

Estudiando la presión de contacto entre el asiento y el tubo, se tiene la misma conclusión ya obtenida en cuanto a la existencia de dos anillos de contacto en el que se tienen valores elevados de la presión para cualquiera de las interferencias estudiadas, este valor de la presión de contacto se concentra en una zona muy concreta, coincidiendo con el cambio de curvatura de la zona de contacto y da lugar a distribuciones muy parecidas en los tres casos estudiados. Los valores extremos de la presión en dicho punto como resultado de la carga cíclica (valores tras la carga y la descarga), tienen un comportamiento totalmente distinto en función de la interferencia según tratemos la carga o la descarga. Así para el caso de la entrada en carga del amortiguador, el aumento de la interferencia lleva consigo una disminución de la presión de contacto que incluso se acentúa con aquélla, descendiendo desde los 630 MPa en el caso más desfavorable que se da para la interferencia de 0.2 mm hasta los 420 MPa en el caso de 0,325 mm de interferencia pasando por 602 MPa para la interferencia nominal. Cuando se produce la descarga la situación se da a la inversa y la presión de contacto crece a medida que lo hace la interferencia hasta el valor de 222 MPa en el caso de máxima interferencia, pasando por los 162 MPa de la situación intermedia. Las distribuciones de presión se han representado en la figura 5.4.1.2-5.

Resumiremos estos valores en la tabla 5.4.1.2-3.

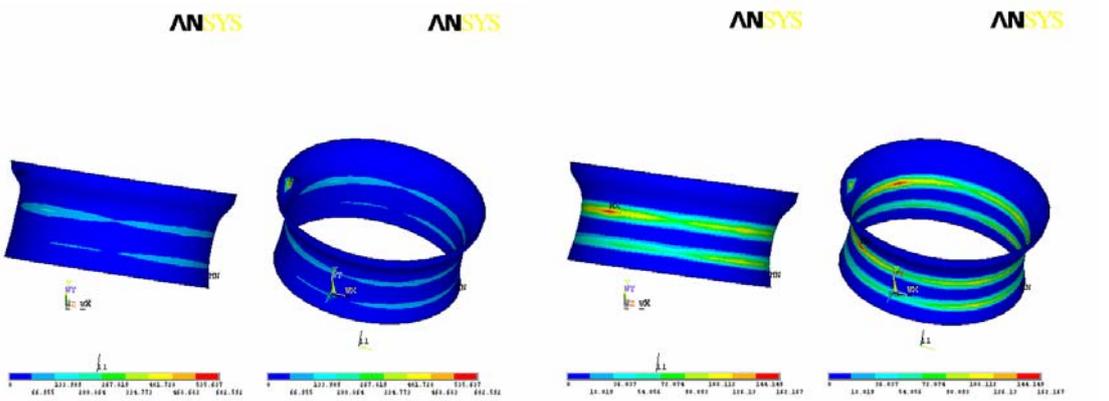
VALORES MÁXIMOS TRAS LA CARGA Y LA DESCARGA	Interferencia 0.2 mm	Interferencia 0.25 mm	Interferencia 0.325 mm
Presión de contacto (MPa). Carga	630.447	602.592	419.884
Presión de contacto (MPa). Descarga	159.188	162.167	222.815

Tabla. 5.4.1.2-3. Valores máximos de la presión de contacto tras la carga y la descarga.



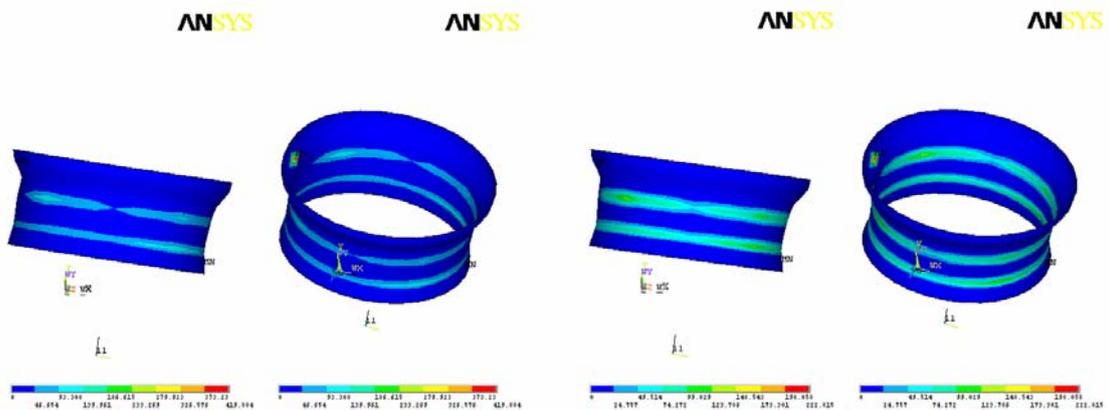
(a)

(b) Interferencia 0.2 mm



(a)

(b) Interferencia 0.25 mm



(a)

(b) Interferencia 0.325 mm

Fig. 5.4.1.2-5. Influencia de la interferencia en la presión normal de contacto (MPa).

Caso (a) tras la carga. Caso (b) tras la descarga.

### Situación de contacto

Mediante el análisis del estado de los elementos de contacto se verifica, para las tres interferencias y a lo largo de todo el proceso cíclico, la existencia de dos anillos de contacto. Tras la carga y la descarga la situación que se tiene es la de contacto con deslizamiento, aunque existen pequeñas regiones de contacto sin deslizamiento, fundamentalmente en la zona de contacto asociada al extremo libre del asiento y entre las dos bandas de deslizamiento definidas. Esta situación se muestra en la figura 5.4.1.2-6.

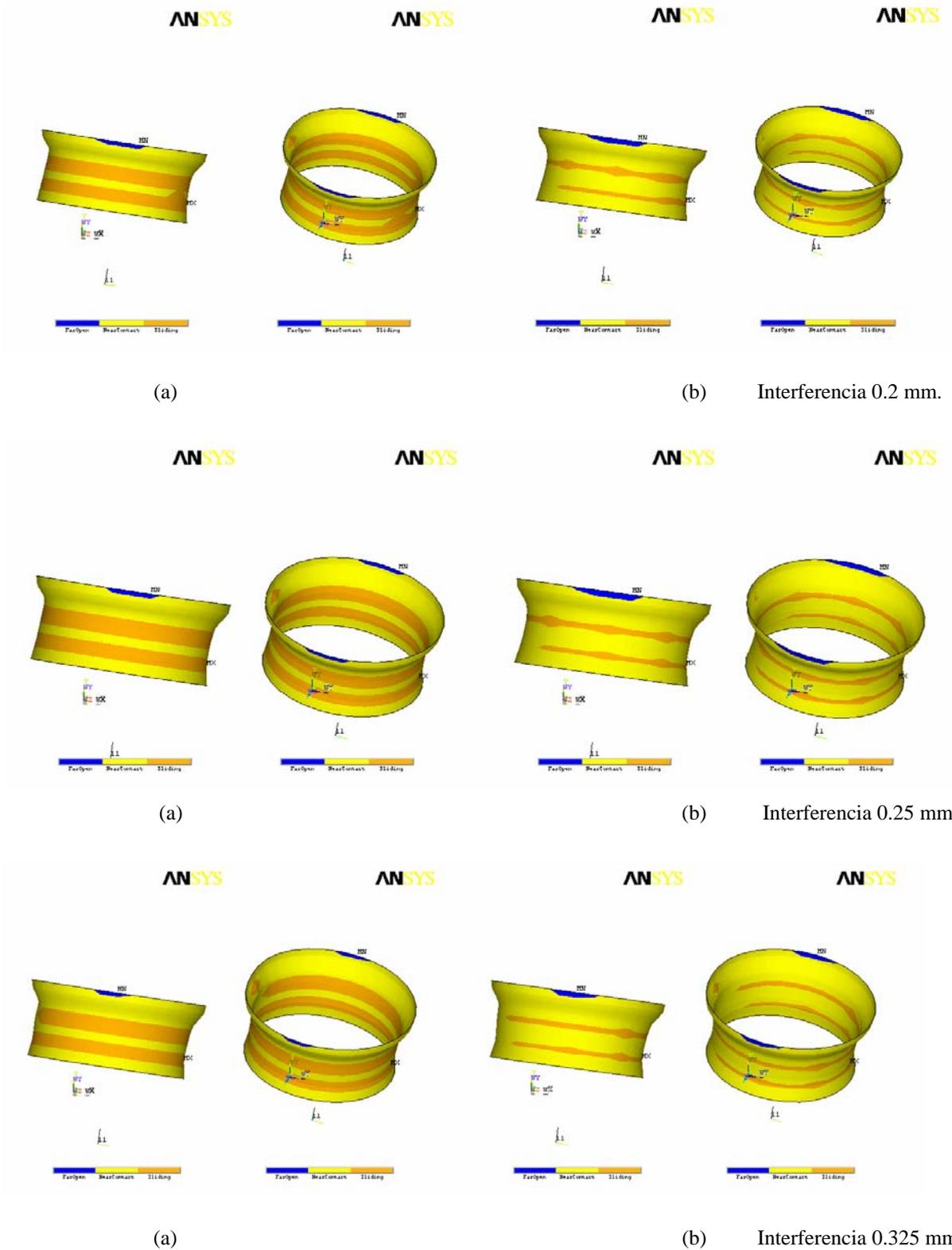


Fig. 5.4.1.2-6. Influencia de la interferencia en el estado de los elementos de contacto.

Caso (a) tras la carga. Caso (b) tras la descarga.

### **5.4.1.3 Estudio de fatiga**

En el asiento, el punto más desfavorable a fatiga se sitúa en la cara que no se encuentra en contacto y en la zona donde comienza el cambio de curvatura de la sección para los tres casos estudiados, no apreciándose diferencias significativas entre los tres casos que además se representan en la figura 5.4.1.3-1. Para el tubo, el punto más desfavorable es aquél sobre el que se apoya el asiento al aplicar la carga, situado en la superficie de contacto, concretamente sobre el resalto del tubo como puede observarse en la figura 5.4.1.3-2 y de nuevo la zona de iniciación de la grieta coincide para las tres interferencias y se sitúa sobre el plano de simetría del tubo.

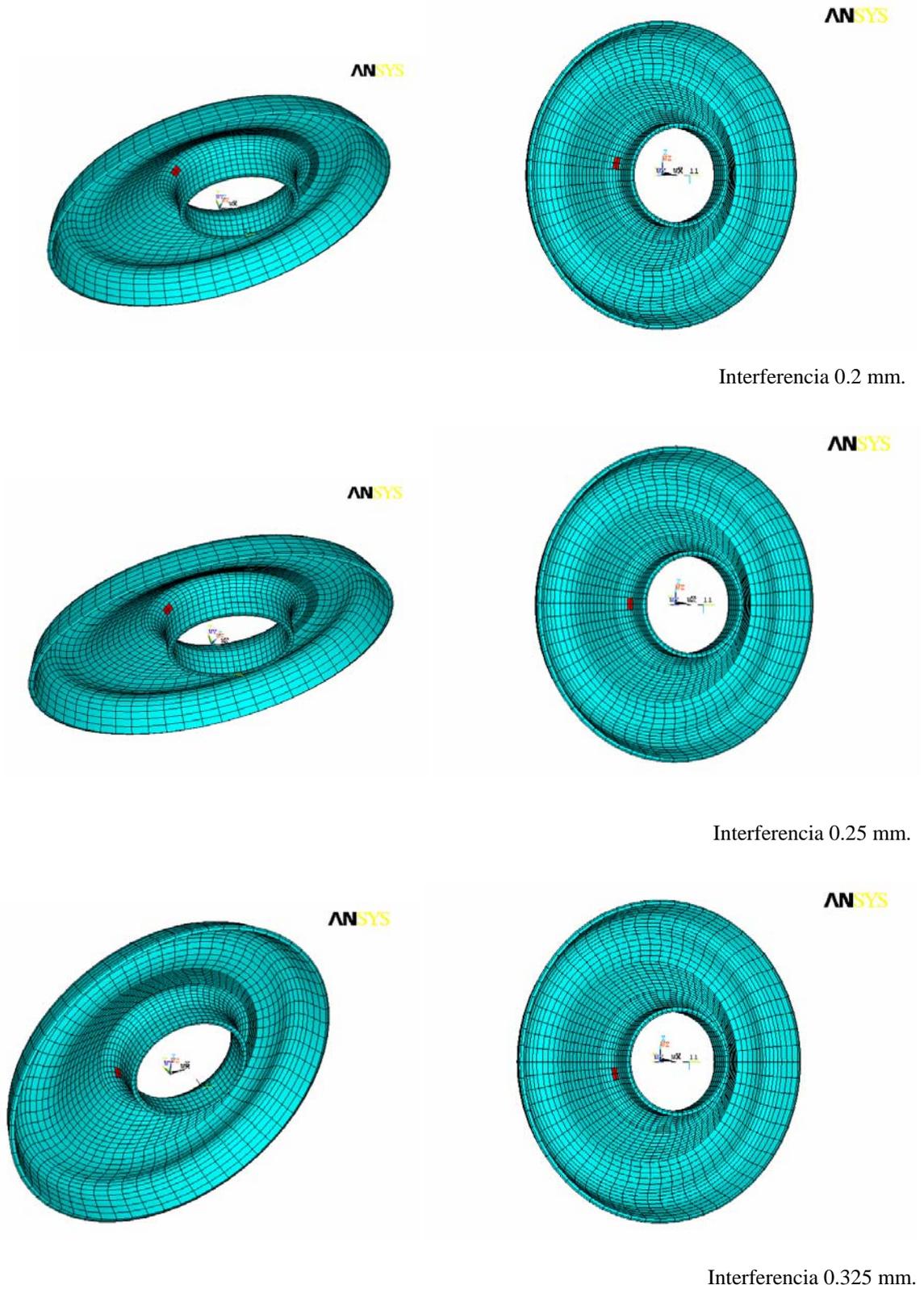
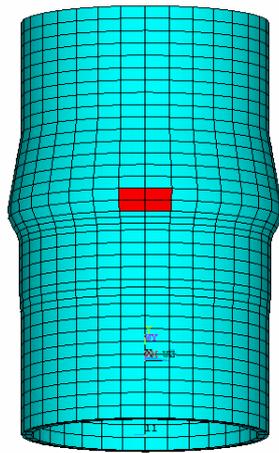
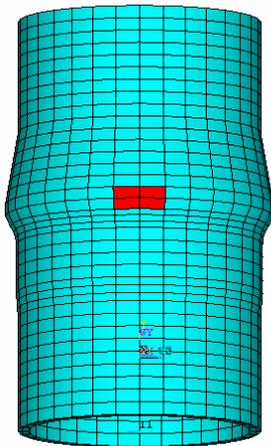


Fig. 5.4.1.3-1. Influencia de la interferencia en los puntos más desfavorables a fatiga en el asiento.



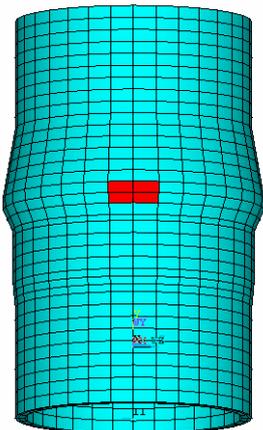
ANSYS

Interferencia 0.2 mm.



ANSYS

Interferencia 0.25 mm.



ANSYS

Interferencia 0.325 mm.

Fig. 5.4.1.3-2. Influencia de la interferencia en lo puntos más desfavorables a fatiga en el tubo.

Se expondrán ahora los resultados de tensiones y deformaciones en los puntos más desfavorables a fatiga, tanto para el asiento como para el tubo referidos a la evolución temporal de dichas magnitudes, obteniéndose después conclusiones acerca de la vida a fatiga.

### Deformaciones

Como se observa en la figura 5.4.1.3-3, en el punto más desfavorable del asiento, la evolución de la deformación equivalente en el tiempo muestra que para la interferencia de 0.2 mm existe un nivel de deformaciones plásticas de valor nulo que aumenta para la interferencia nominal hasta 0.0028 y luego vuelve a descender para la interferencia de 0.325 mm hasta 0.0018, manteniéndose en ambos casos constante debido a las sollicitaciones a las que está sometido el modelo. Por otro lado la aplicación de la carga cíclica da lugar a una variación pequeña de las deformaciones elásticas, que presentan unos intervalos del mismo orden de magnitud para las interferencias extremas, siendo éste mayor en el caso de la interferencia de 0.25 mm. Por otro lado los valores máximos son parecidos para los tres casos, aunque se observa la tendencia de crecimiento hasta la interferencia nominal para luego decrecer hasta la interferencia de 0.325 mm. En los tres casos estudiados el valor de la deformación plástica es mayor que el de la elástica.

En el punto más desfavorable del tubo se tiene la situación opuesta: la deformación plástica (de valor aproximadamente constante en el tiempo) es mucho menor que la elástica y de valor nulo o prácticamente nulo, representada en la gráfica 5.4.1.3-4, donde el punto más desfavorable para la iniciación de grieta tiene unos máximos de la deformación elástica de valor aproximadamente constante mientras que los mínimos descienden para el caso nominal para luego crecer cuando lo hace la interferencia hasta 0.325 mm.

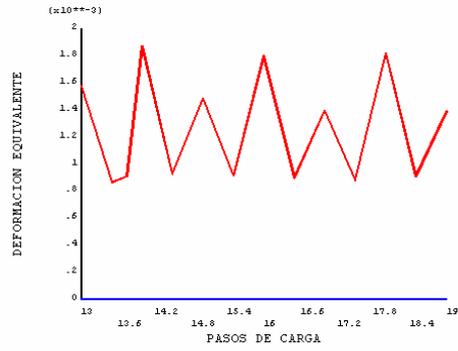
Resumiremos estos valores en la tabla 5.4.1.3-1.

RESULTADOS PUNTO MAS DESFAVORABLE			Interferencia 0.2 mm	Interferencia 0.25 mm	Interferencia 0.325 mm
Deformación (mm/mm)	ASIENTO	Plástica	0	0.0028	0.0018
		Elástica	0.0009-0.0018	0.0015-0.0020	0.0008-0.0016
	TUBO	Plástica	0	0	1.21E-05
		Elástica	0.001-0.0024	0.0008-0.0024	0.0016-0.0027

Tabla 5.4.1.3-1. Valores del intervalo de variación de la deformación en el punto más desfavorable.

DEF. ELASTICA  
DEF. PLASTICA

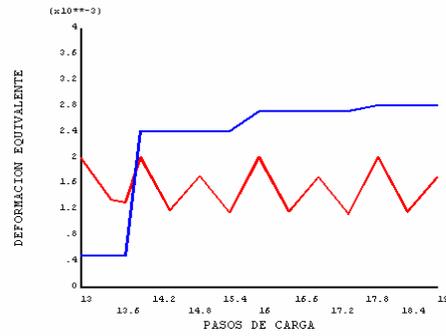
ANSYS



Interferencia 0.2 mm.

DEF. ELASTICA  
DEF. PLASTICA

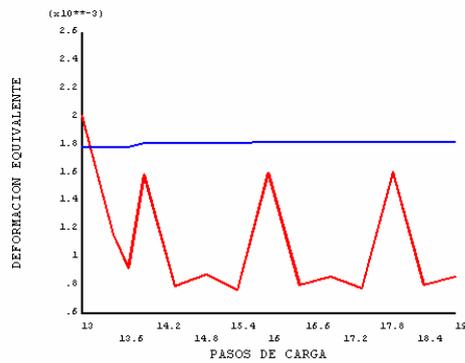
ANSYS



Interferencia 0.25 mm.

DEF. ELASTICA  
DEF. PLASTICA

ANSYS

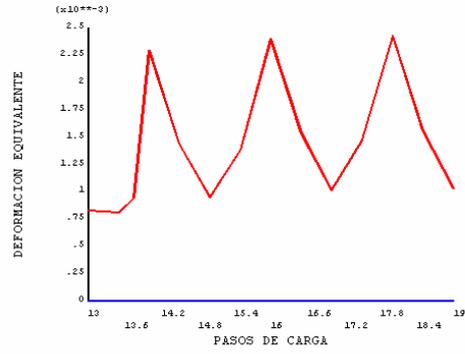


Interferencia 0.325 mm.

Fig. 5.4.1.3-3. Influencia de la interferencia en la evolución de la deformación en el punto más desfavorable del asiento (mm/mm).

DEF. ELASTICA  
DEF. PLASTICA

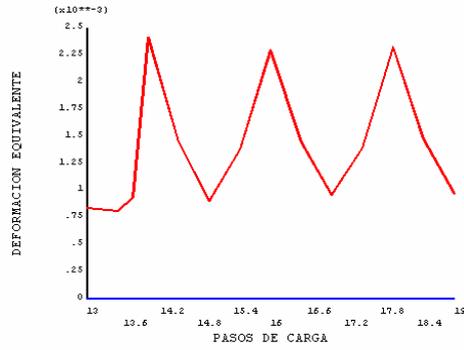
ANSYS



Interferencia 0.2 mm.

DEF. ELASTICA  
DEF. PLASTICA

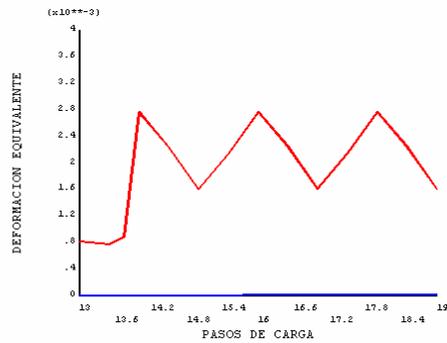
ANSYS



Interferencia 0.25 mm.

DEF. ELASTICA  
DEF. PLASTICA

ANSYS



Interferencia 0.325 mm.

Fig. 5.4.1.3-4. Influencia de la interferencia en la evolución de la deformación en el punto más desfavorable del tubo (mm/mm).

## Tensiones

La evolución temporal de la tensión equivalente en el punto más desfavorable a fatiga del asiento muestra que un incremento de la interferencia hasta 0.25 mm lleva consigo un incremento tanto de los valores máximos como mínimos, mientras que a partir de esta interferencia la tensión decrece. Aunque la diferencia entre estos valores extremos es la misma en los casos límite de interferencia, en el caso de la interferencia de 0.25 mm los valores máximos y mínimos son los mayores que aparecen en los tres casos, siendo sin embargo su diferencia la menor de las estudiadas, lo que quiere decir que el estado tensional para la interferencia nominal es el que varía de manera menos pronunciada como se representa en la figura 5.4.1.3-5.

Para el tubo, ver figura 5.4.1.3-6, se tiene que el incremento de la interferencia hasta 0.25 mm no produce apenas modificaciones del nivel de tensiones equivalentes en el punto más desfavorable, mientras que a partir de la variación de la interferencia hasta 0.325 mm se produce un aumento en las tensiones tanto para los valores mínimos como máximos a valores de 240 y 400 MPa respectivamente.

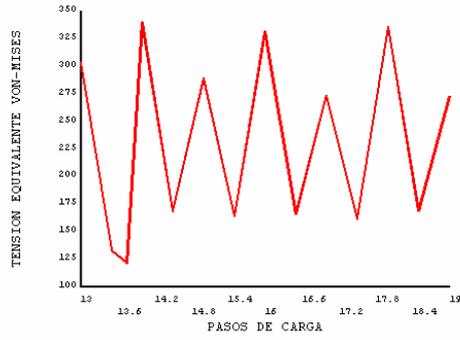
Estos valores se resumen en la tabla 5.4.1.3-2.

RESULTADOS PUNTO MAS DESFAVORABLE		Interferencia 0.2 mm	Interferencia 0.25 mm	Interferencia 0.325 mm
Tensión equivalente (MPa)	ASIENTO	160-340	230-375	120-300
	TUBO	160-350	150-340	240-400

Tabla 5.4.1.3-2. Valores del intervalo de variación de la tensión equivalente en el punto más desfavorable.

TENSIONES

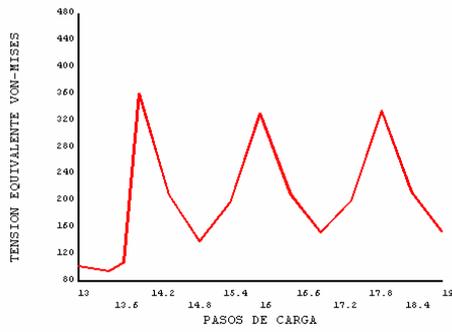
ANSYS



Interferencia 0.2 mm.

TENSIONES

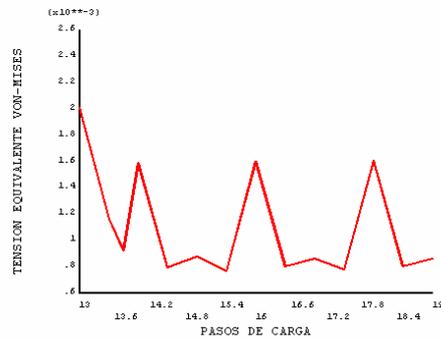
ANSYS



Interferencia 0.25 mm.

TENSIONES

ANSYS

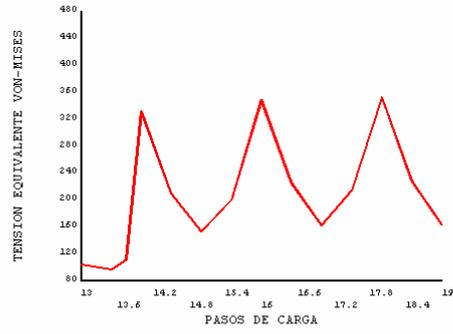


Interferencia 0.325 mm.

Fig. 5.4.1.3-5. Influencia de la interferencia en la evolución de la tensión equivalente de von Mises en el punto más desfavorable del asiento.

TENSIONES

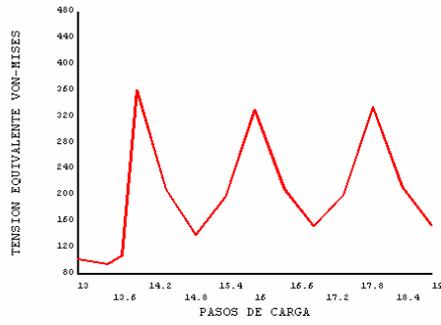
ANSYS



Interferencia 0.2 mm.

TENSIONES

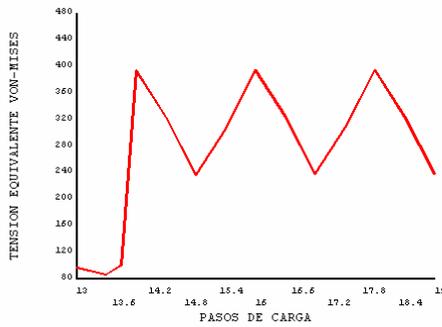
ANSYS



Interferencia 0.25 mm.

TENSIONES

ANSYS



Interferencia 0.325 mm.

Fig. 5.4.1.3-6. Influencia de la interferencia en la evolución de la tensión equivalente de von Mises en el punto más desfavorable del tubo.

## Resistencia a fatiga

De acuerdo con los criterios utilizados y los resultados en tensiones y deformaciones obtenidos de la resolución numérica, se tienen los siguientes valores de la resistencia a fatiga de los distintos componentes:

- Asiento: En función de las distintas propiedades de fatiga empleadas, el resultado de la vida a fatiga, para la situación de carga contemplada, se encuentra en torno al millón de ciclos para las diferentes situaciones estudiadas.
- Tubo: En este caso, los resultados de vida son mayores pudiendo considerar que nos encontramos con resultados de “vida infinita” en todos los casos estudiados.

Como resumen, se comparan en la tabla 5.4.1.3-3 los resultados de la vida de la unión.

RESULTADOS PUNTO MAS DESFAVORABLE		Interferencia 0.2	Interferencia 0.25	Interferencia 0.325
Vida (ciclos)	ASIENTO	4.09E+06	2.97E+06	1.15E+06
	TUBO	3.85E+13	5.71E+13	2.60E+14

Tabla 5.4.1.3-3. Valores de la vida a fatiga de la unión.

## 5.4.2. Influencia de la malla

Analizaremos en este caso la influencia en el estudio del amortiguador del mallado del modelo. Consideraremos la posibilidad para el usuario de trabajar con dos mallados diferentes que denominaremos mallado “*grosero*”, que es aquel para el que hemos estudiado el modelo nominal en el apartado 5.3, y mallado “*fino*”.

La diferencia entre ambos mallados tal y como se indicaba en el capítulo correspondiente a la definición del modelo, radica en el número de elementos en que se divide el espesor de los elementos del amortiguador, siendo para el mallado grosero el número de elementos igual a dos, mientras que para el mallado fino este número es igual a cuatro.

Compararemos aquellos resultados que aportan información relevante acerca de la durabilidad de la unión, manteniendo constantes los parámetros del modelo y variando el tipo de mallado.

### 5.4.2.1 Proceso de inserción

En este apartado se comentan los resultados correspondientes al instante final del proceso de inserción y son comparados en cada uno de los casos estudiados.

#### Deformación plástica equivalente

En el instante final del proceso de inserción, como consecuencia del mismo, se observa que existe plastificación en una sección completa de la zona de contacto del asiento, alcanzándose el máximo valor en la zona inferior de la superficie de contacto. Dichos valores pueden observarse en la figura 5.4.2.1-1, siendo de 0.009 para el caso de mallado grosero y de 0.013 para el caso de mallado fino.

En el tubo, al final del proceso de inserción, se tiene una situación de plastificación generalizada en toda la zona de contacto con deformaciones prácticamente uniformes en ella. Sin embargo, en la cara interior del tubo (donde tiene lugar el cambio de pendiente que facilita la inserción) existe una región en la que se produce una plastificación localizada cuyos valores de deformación plástica son de 0.0017 para el caso de mallado grosero y de 0.0024 para el caso de mallado fino y que se reflejan en la figura 5.4.2.1-2.

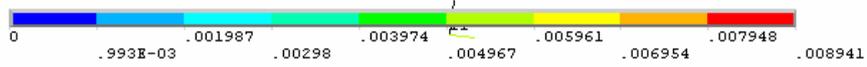
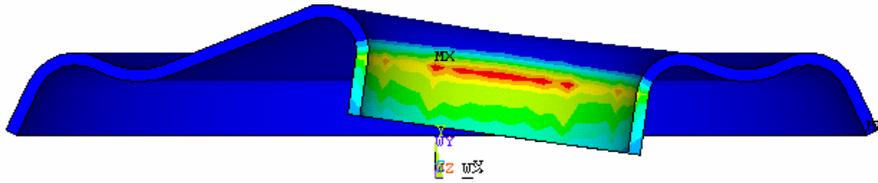
En ambos elementos las distribuciones de deformaciones son muy parecidas para los dos casos de mallado.

Como resumen se muestran los valores en la tabla 5.4.2.1-1 para cada interferencia.

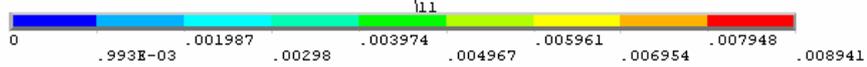
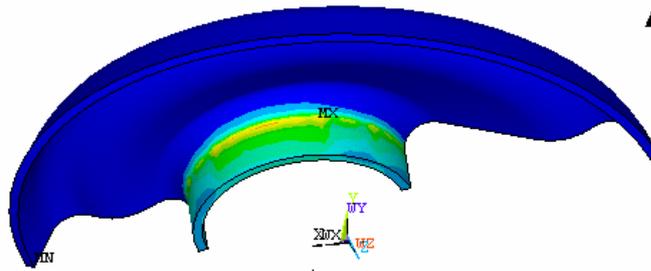
VALORES MÁXIMOS MONTAJE			
Deformación plástica equivalente (mm/mm)	ASIENTO	Malla grosera	0.008941
		Malla fina	0.012981
	TUBO	Malla grosera	0.001679
		Malla fina	0.002402

Tabla 5.4.2.1-1. Valores máximos de la deformación plástica equivalente (mm/mm) tras el proceso de inserción.

ANSYS

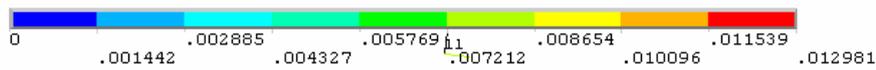
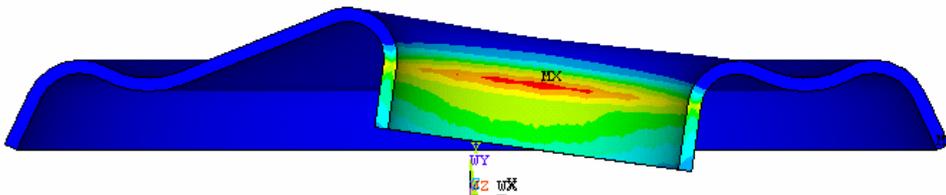


ANSYS

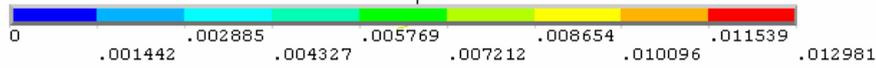
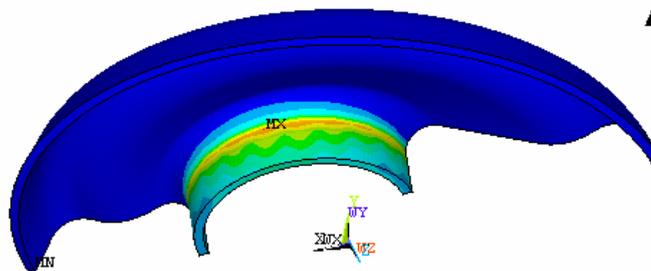


Mallado grosero

ANSYS



ANSYS



Mallado fino

Fig. 5.4.2.1-1. Influencia del mallado en la deformación plástica equivalente en el asiento (mm/mm).

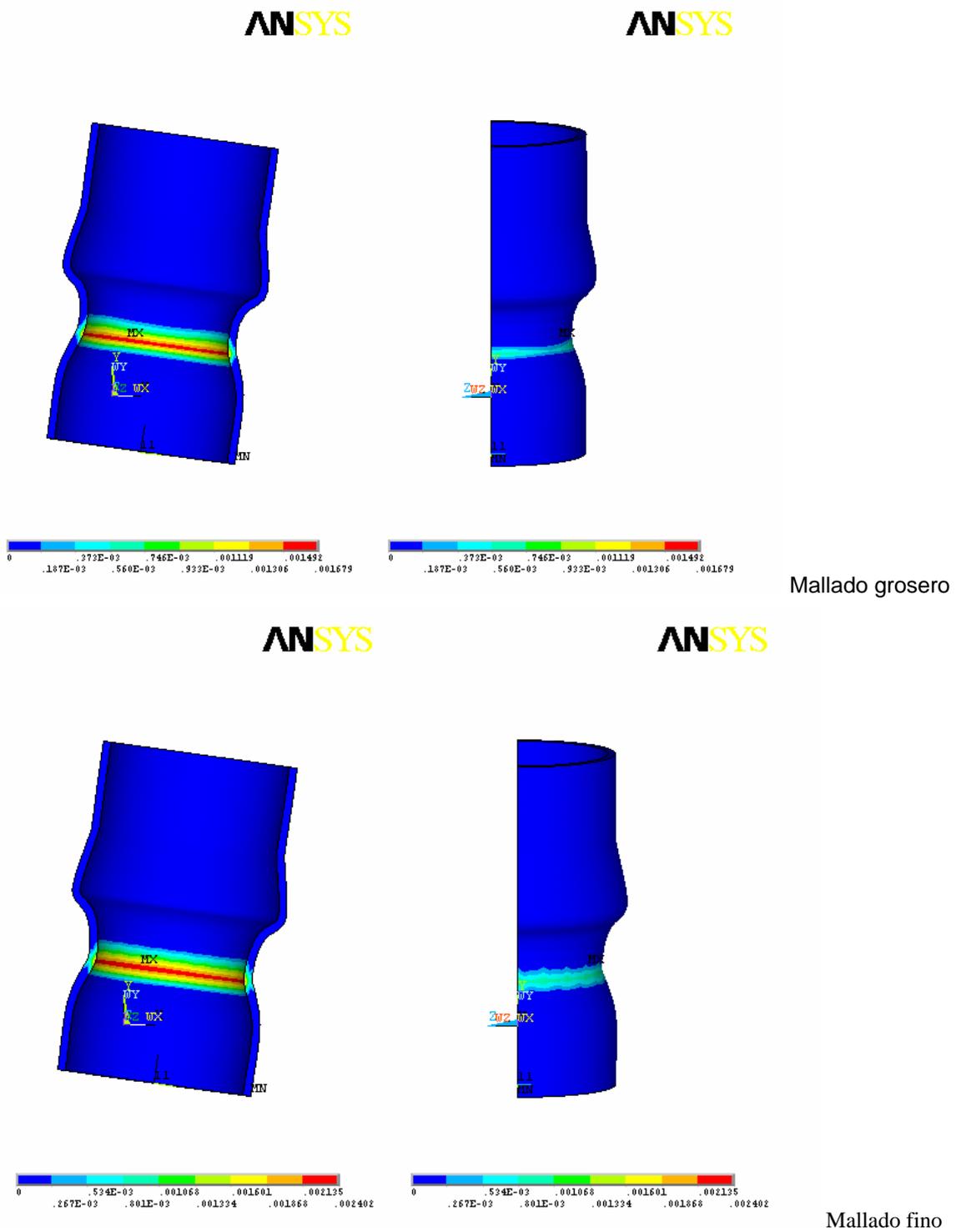


Fig. 5.4.2.1-2. Influencia del mallado en la deformación plástica equivalente en el tubo (mm/mm).

### Tensión equivalente

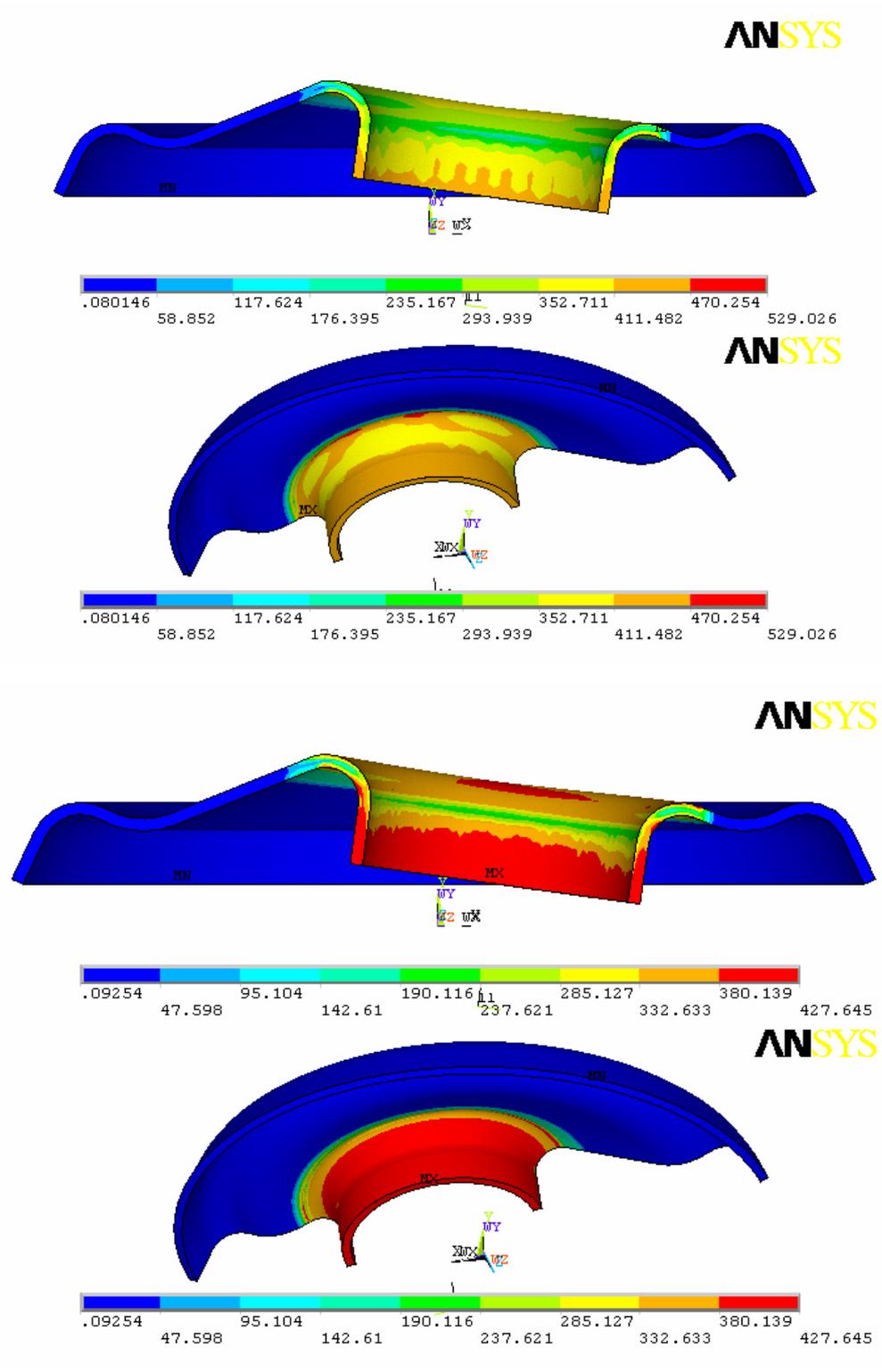
Tras el proceso de inserción, las regiones del asiento que poseen tensiones equivalentes más desfavorables se corresponden con la zona de contacto y con aquella en la que se produce el cambio en la sección del asiento. Los valores se mantienen en un rango entre 470 y 529 MPa para el caso de mallado grosero y entre 380 y 427 MPa para el mallado fino que se representan en la figura 5.4.2.1-3, pudiendo observarse como las franjas que definen los mismos valores de tensión están mucho mejor definidas en el mallado fino, siendo las zonas de tensiones máximas más homogéneas.

Las tensiones equivalentes que se producen en el tubo se mantienen en un rango entre 475 y 534 MPa para la grosera y de entre 465 y 524 MPa para la malla fina, estando concentradas en una zona más concreta para la malla fina, ver figura 5.4.2.1-4.

En la tabla 5.4.2.1-2 se resumen estos valores.

VALORES MÁXIMOS MONTAJE			
Tensión equivalente (MPa)	ASIENTO	Malla grosera	529.026
		Malla fina	427.645
	TUBO	Malla grosera	534.210
		Malla fina	523.992

Tabla 5.4.2.1-2. Valores máximos de la tensión equivalente (MPa) tras el proceso de inserción.



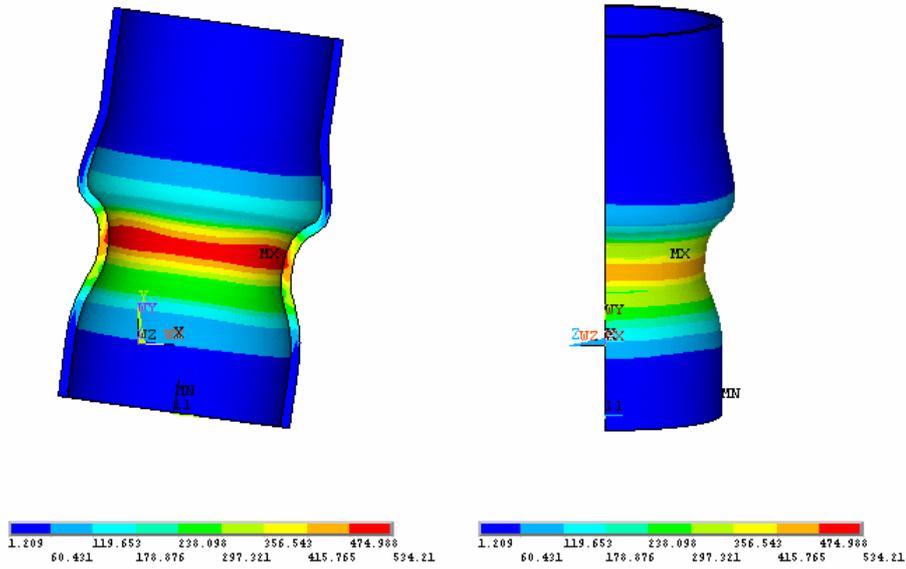
Mallado grosero

Mallado fino

Fig. 5.4.2.1-3. Influencia del mallado en la tensión equivalente de von Mises en el asiento (MPa).

ANSYS

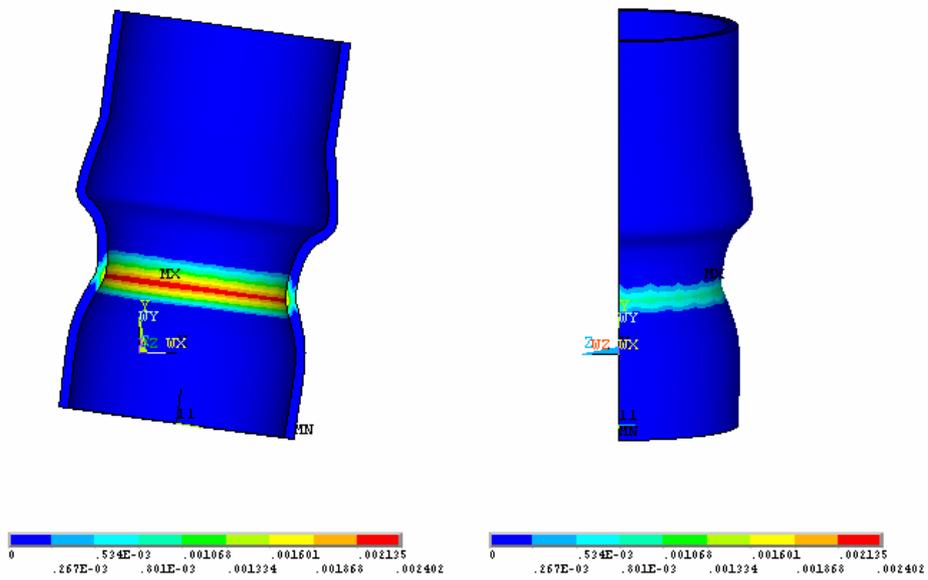
ANSYS



Mallado grosero

ANSYS

ANSYS



Mallado fino

Fig. 5.4.2.1-4. Influencia del mallado en la deformación plástica equivalente en el tubo (mm/mm).

### Presión de contacto

En cuanto a la presión de contacto entre el asiento y el tubo, todas las situaciones dan lugar a distribuciones de presión muy similares. De nuevo se observa la existencia de dos regiones en las que el contacto se desarrolla en toda la sección de la superficie de contacto (doble anillo de contacto) mientras que en el resto de la zona de contacto apenas existe presión. La existencia de flexión en el tubo justifica esta doble zona de contacto junto con una región intermedia donde no se produce contacto.

El valor de la presión, se representa en la figura 5.4.2.1-5, siendo de 139 MPa para el caso de mallado grosero y de 138 MPa para el caso de mallado fino, luego apenas hay diferencias tanto en los valores como en las distribuciones de presión.

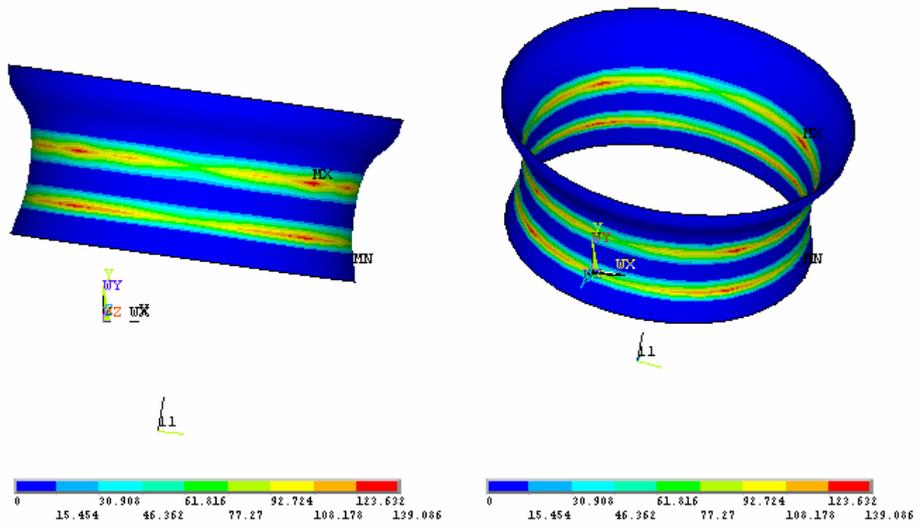
En la tabla 5.4.2.1-3 aparecen los valores máximos de la presión de contacto tras el proceso de inserción.

Presión de contacto (MPa)	Malla grosera	139.086
	Malla fina	137.667

Tabla 5.4.2.1-3. Valores máximos de la presión de contacto (MPa) tras el proceso de inserción.

ANSYS

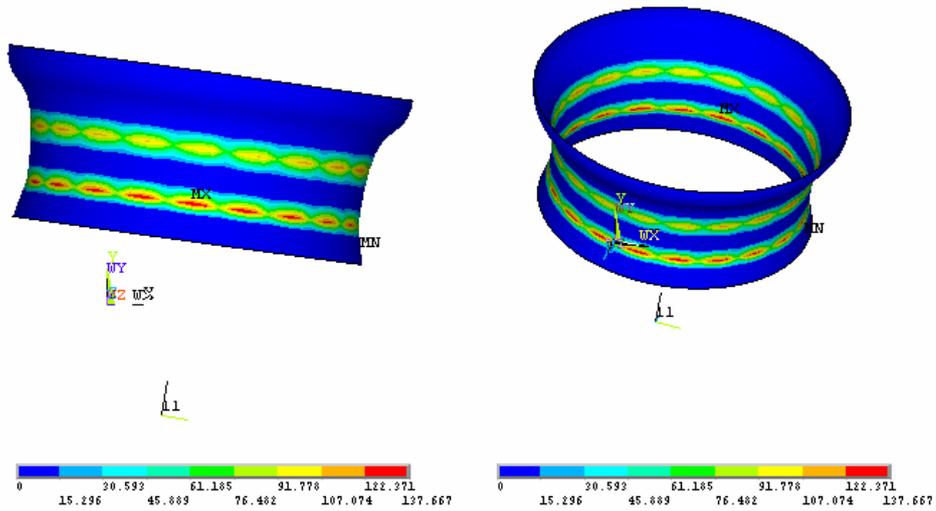
ANSYS



Mallado grosero

ANSYS

ANSYS

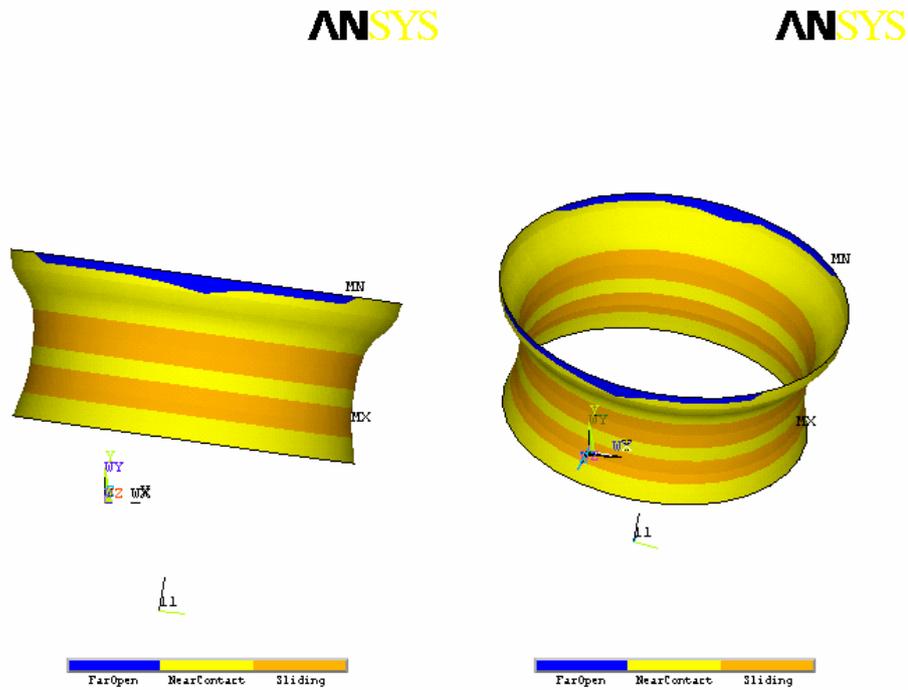


Mallado fino

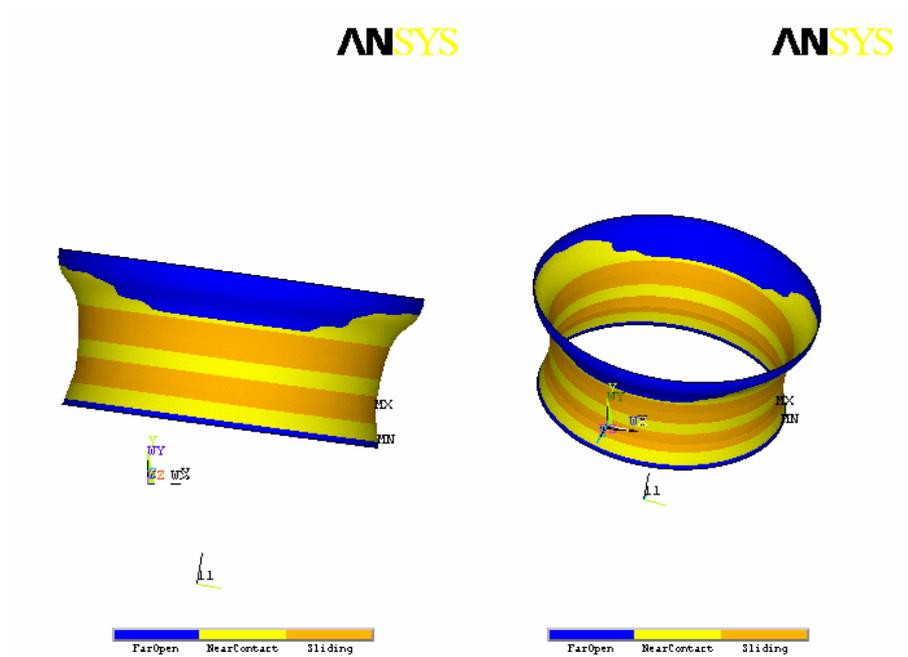
Fig. 5.4.2.1-5. Influencia del mallado en la presión normal de contacto (MPa). Final de la inserción.

## Situación del contacto

En la figura 5.4.2.1-6 se observa la existencia de contacto en toda una sección definido a través de dos “anillos”: correspondiente a las regiones de presiones elevadas.



Mallado grosero



Mallado fino

Fig. 5.4.2.1-6. Influencia del mallado en el estado de los elementos de contacto. Final de la inserción.

### Comprobación de los criterios de rotura dúctil

Los valores de los coeficientes de seguridad determinados en cada uno de los casos de mallado, dependiendo del criterio seguido, se resumen en la tabla 5.4.2.1-4.

COEFICIENTES DE SEGURIDAD		ASIENTO		TUBO	
		Freudenthal	Cockcroft-Latham	Freudenthal	Cockcroft-Latham
MALLADO	Grosero	6.78E-02	5.45E-02	3.21E-02	1.38E-02
	Fino	0.11	0.11	4.69E-02	2.85E-02

Tabla. 5.4.2.1-4. Coeficientes de seguridad.

### 5.4.2.2 Proceso de carga y descarga

#### Deformación plástica equivalente

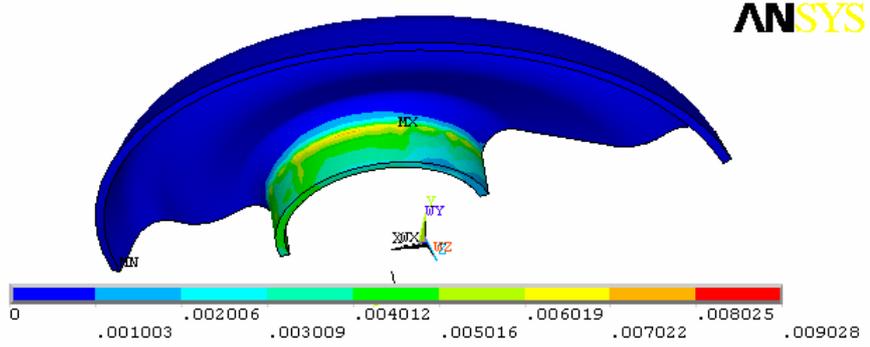
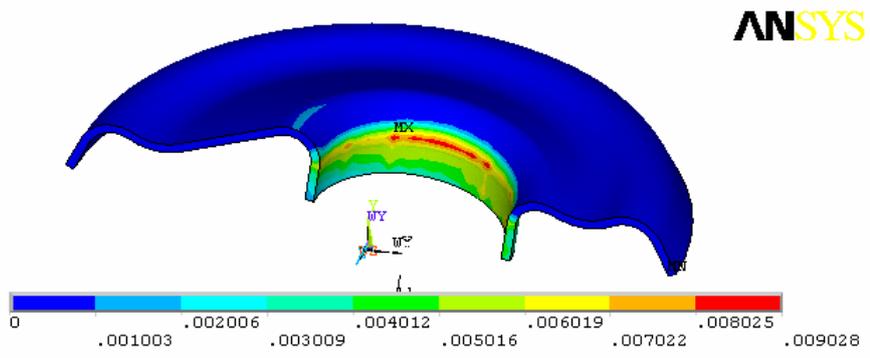
Después de aplicar la primera de las cargas cíclicas, la distribución a nivel general de la deformación plástica equivalente en el asiento es prácticamente la misma para los dos casos considerados y los valores máximos alcanzados son sólo un poco más elevados para la malla fina, siendo su valor de 0.009028 para el mallado grosero y 0.019019 para el mallado fino tal y como se observa en la figura 5.4.2.2-1.

Para el tubo ocurre exactamente que la distribución de las deformaciones plásticas es prácticamente igual en el contorno del tubo aunque aparece una zona de deformaciones elevadas en el resalto del tubo para el mallado fino. Los valores máximos varían desde 0.001679 para la malla grosera hasta 0.009924 para la malla fina en esta zona del resalto, ver figura 5.4.2.2-2.

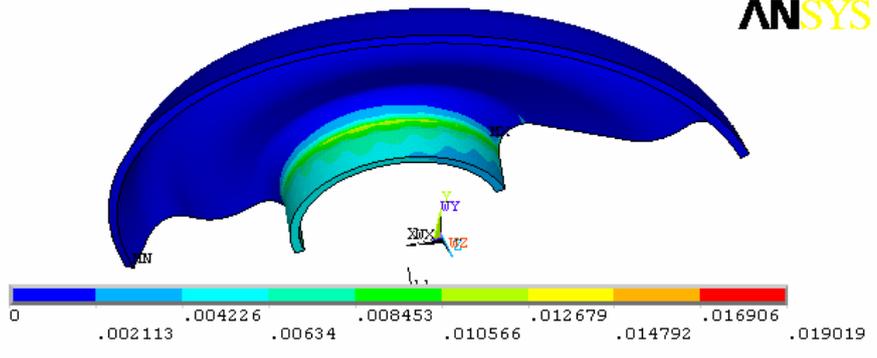
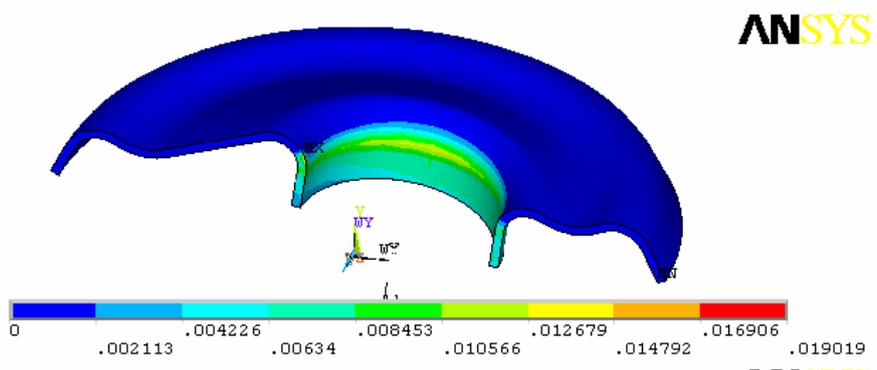
En la tabla 5.4.2.2-1 se resumen estos valores.

VALORES MÁXIMOS TRAS LA PRIMERA CARGA			
Deformación plástica equivalente (mm/mm)	ASIENTO	Malla grosera	0.009028
		Malla fina	0.019019
	TUBO	Malla grosera	0.001679
		Malla fina	0.009924

Tabla. 5.4.2.2-1. Valores máximos de la deformación plástica equivalente tras la primera carga.



Mallado grosero



Mallado fino

Fig. 5.4.2.2-1. Influencia del mallado en la deformación plástica equivalente en el asiento (mm/mm) después de la primera carga.

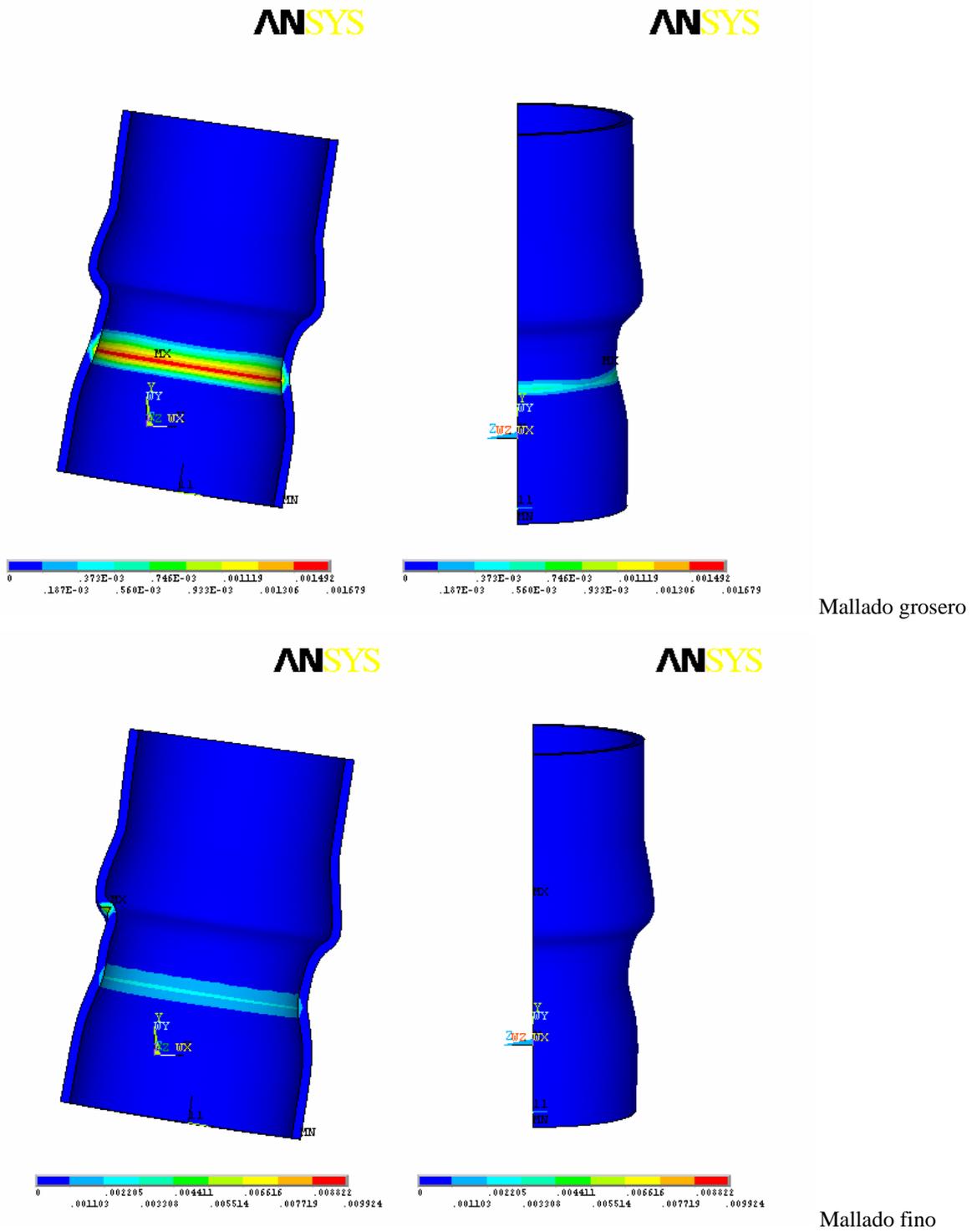


Fig. 5.4.2.2-2. Influencia del mallado en la deformación plástica equivalente en el tubo (mm/mm) después de la primera carga.

### Tensión equivalente

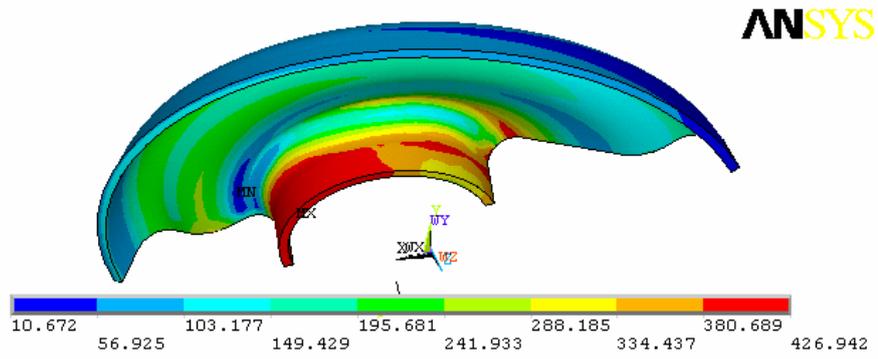
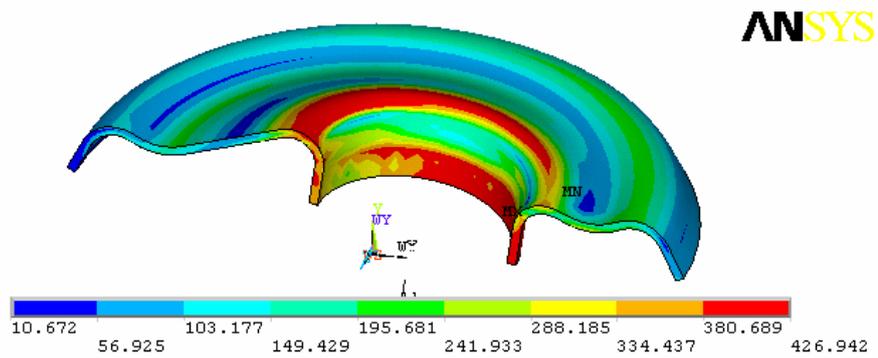
Las tensiones equivalentes presentes en el asiento tras la aplicación de la primera carga alcanzan su valor máximo en 429 MPa en el caso de malla fina reduciéndose hasta 427 MPa en el caso de la grosera, es decir los valores son prácticamente los mismos. Se observa también, que las distribuciones de tensión son muy parecidas tal y como se puede ver en la figura 5.4.2.2-3.

Para el tubo, como se representa en la figura 5.4.2.2-4, las tensiones equivalentes tras la primera carga tienen unas distribuciones prácticamente iguales, alcanzándose los valores máximos también para el mallado fino siendo dicho valor 602 MPa mientras que para la otra malla este valor desciende hasta 564 MPa.

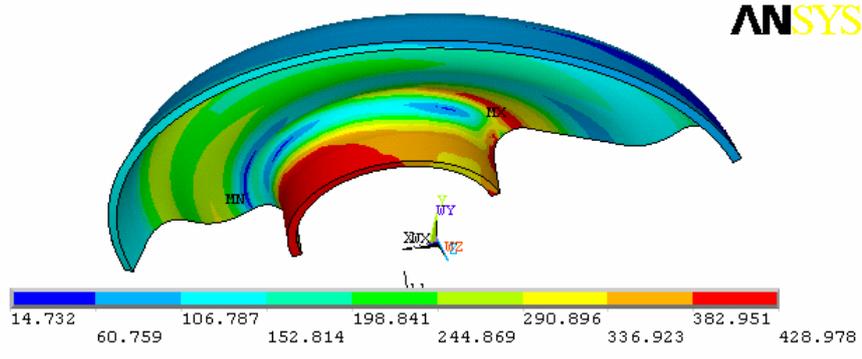
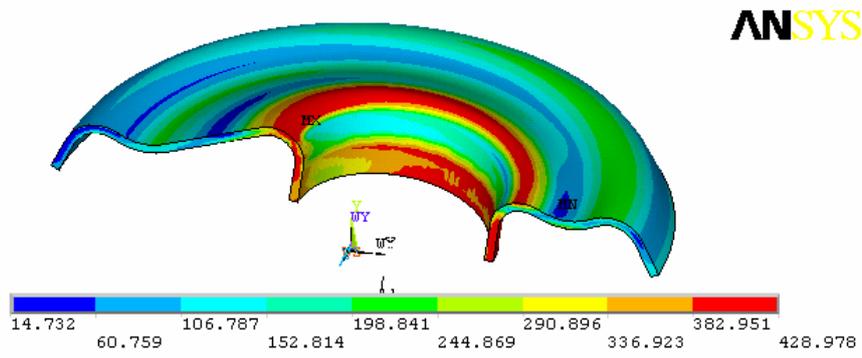
Sirva la tabla 5.4.2.2-2 a modo de resumen.

VALORES MÁXIMOS TRAS LA PRIMERA CARGA			
Tensión equivalente (MPa)	ASIENTO	Malla grosera	426.942
		Malla fina	428.978
	TUBO	Malla grosera	563.784
		Malla fina	602.756

Tabla. 5.4.2.2-2. Valores máximos de la tensión equivalente tras la primera carga.

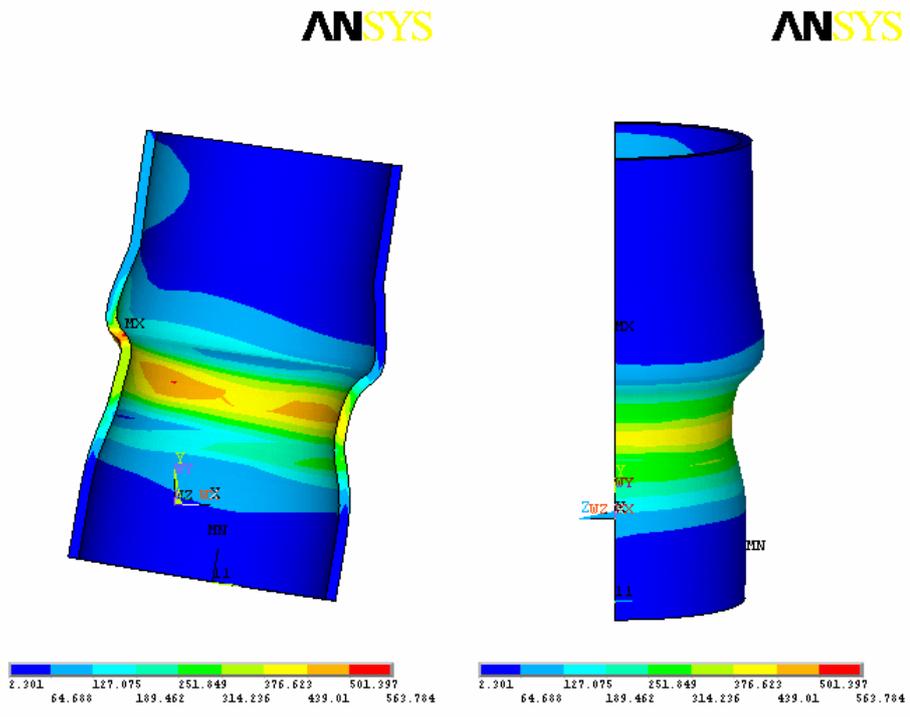


Mallado grosero

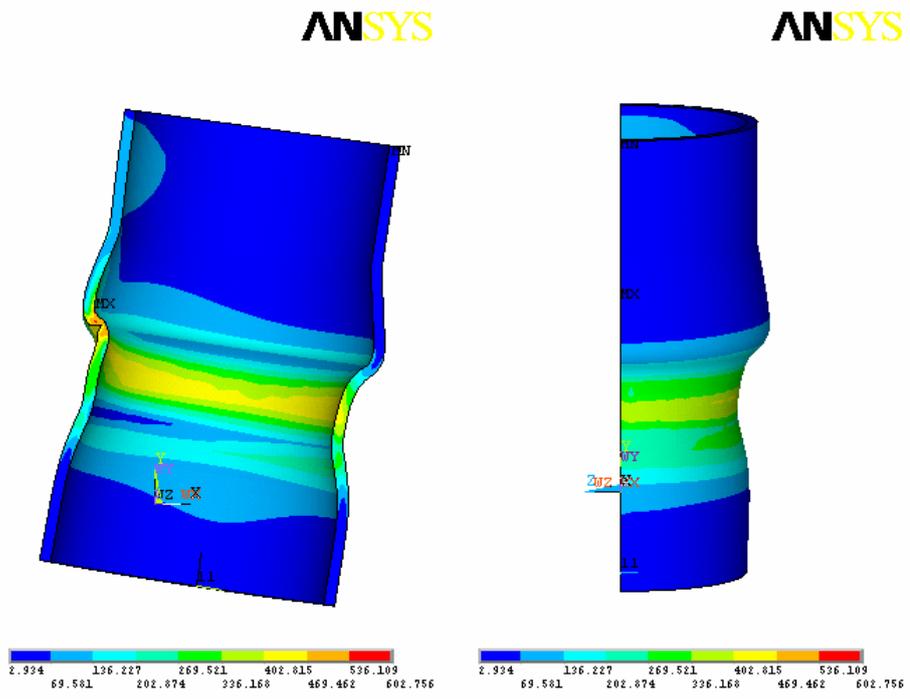


Mallado fino

Fig. 5.4.2.2-3. Influencia del mallado en la tensión equivalente en el asiento (Mpa) tras de la primera carga.



Mallado grosero



Mallado fino

Fig. 5.4.2.2-4. Influencia del mallado en la tensión equivalente en el tubo (Mpa) tras de la primera carga.

## Presión de contacto

Los valores máximos de la presión de contacto se concentran en una zona muy concreta, coincidiendo con el cambio de curvatura de la zona de contacto, teniendo unas distribuciones de presión que aunque cualitativamente son parecidas no lo son tanto cuantitativamente. Los valores extremos de la presión en dicho punto como resultado de la carga cíclica (valores tras la carga y la descarga), reflejados en la figura 5.4.2.2-5, son de 603 y 163 MPa en el caso de mallado grosero y de 1258 y 830 MPa respectivamente para el fino, es decir en este último caso son mucho mayores.

Resumiremos estos valores en la tabla 5.4.2.2-3.

VALORES MÁXIMOS TRAS LA CARGA Y LA DESCARGA		
Presión de contacto (MPa). Carga	Malla grosera	602.592
	Malla fina	1258
Presión de contacto (MPa). Descarga	Malla grosera	162.167
	Malla fina	829.819

Tabla. 5.4.2.2-3. Valores máximos de la presión de contacto tras la carga y la descarga.

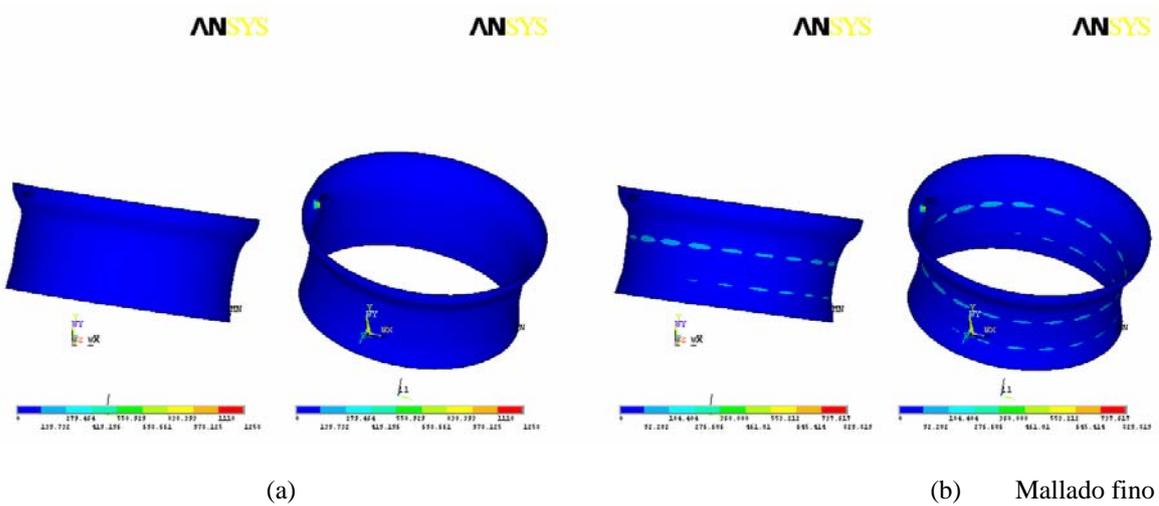
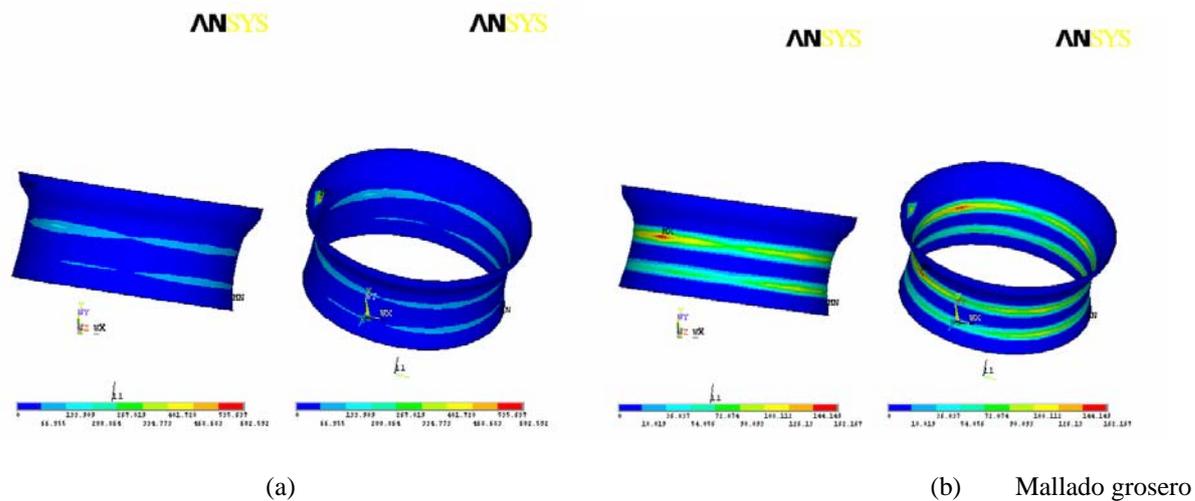


Fig. 5.4.2.2-5. Influencia del mallado en la presión normal de contacto (MPa).  
 Caso (a) tras la carga. Caso (b) tras la descarga.

### Situación del contacto

Mediante el análisis del estado de los elementos de contacto se verifica, para los dos mallados y a lo largo de todo el proceso cíclico, la existencia de dos anillos de contacto, tras la carga y la descarga la situación que se tiene es la de contacto con deslizamiento, aunque existen pequeñas regiones de contacto sin deslizamiento, fundamentalmente en la zona de contacto asociada al extremo libre del asiento y entre las dos bandas de deslizamiento definidas. Esta situación se muestra en la figura 5.4.2.2-6.

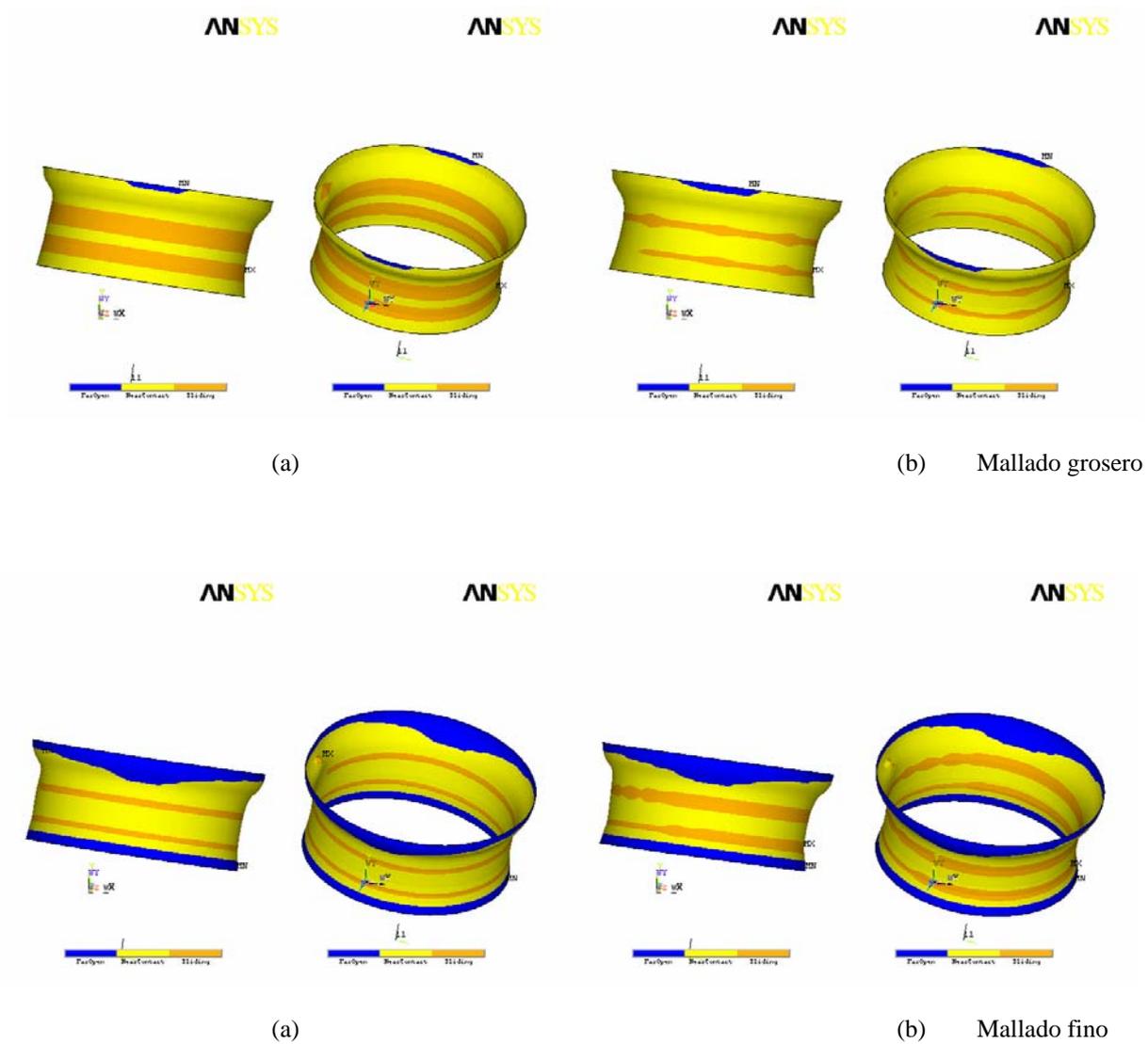


Fig. 5.4.2.2-6. Influencia del mallado en el estado de los elementos de contacto.  
 Caso (a) tras la carga. Caso (b) tras la descarga.

### **5.4.2.3 Estudio de fatiga**

De acuerdo con los resultados obtenidos del estudio numérico del proceso de carga cíclica sobre el asiento, la utilización del criterio de iniciación de grieta de Smith, Watson y Topper proporciona como puntos más desfavorables a fatiga para cada una de las interferencias los mostrados en las figuras correspondientes.

Los puntos más desfavorables desde el punto de vista de la fatiga se producen, tanto para el asiento como para el tubo, en las mismas zonas, independientemente del tipo de mallado empleado para el estudio. La iniciación de grieta en el tubo se producirá al final de la zona de contacto, en la zona donde se tiene la protuberancia (resalto), coincidiendo el nodo crítico con el plano de simetría del tubo, ver figura 5.4.2.3-2. En el asiento, por el contrario, el punto más desfavorable para la iniciación se tiene en la cara donde no hay contacto, como se observa en la figura 5.4.2.3-1, en la región donde existe el cambio de curvatura de la sección, desplazándose ligeramente del plano de simetría para el caso de mallado fino.

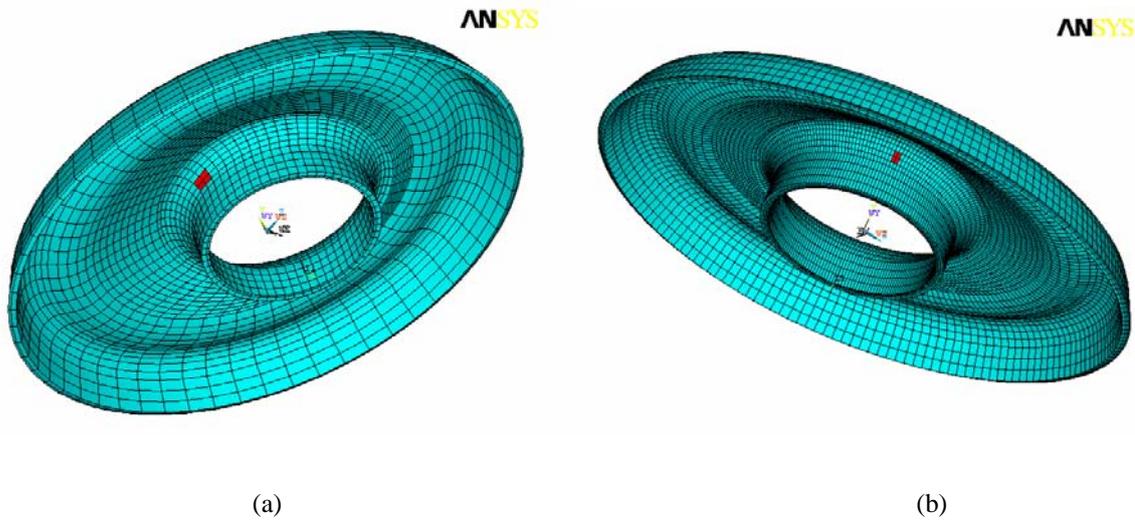


Fig. 5.4.2.3-1. Influencia del mallado en los puntos más desfavorables a fatiga en el asiento.  
Caso (a) mallado grosero. Caso (b) mallado fino.

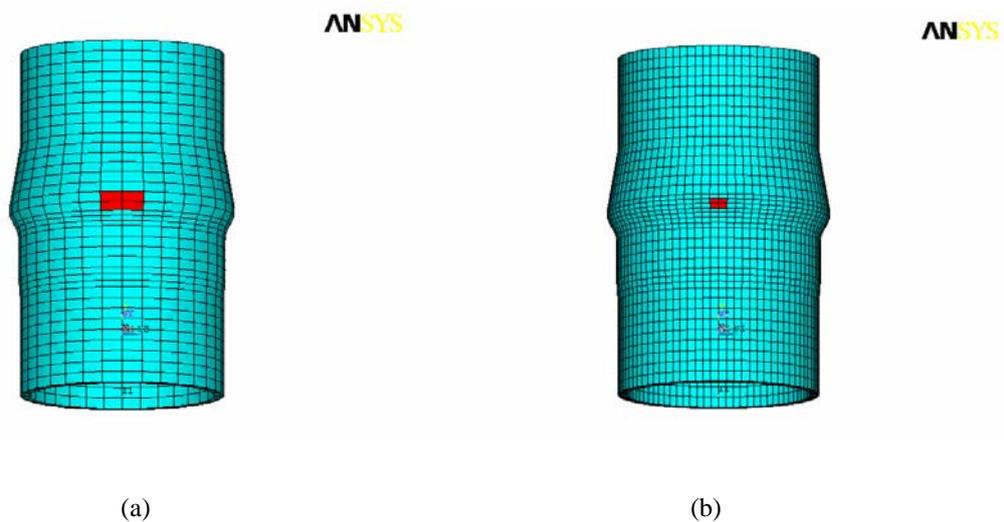


Fig. 5.4.2.3-2. Influencia del mallado en los puntos más desfavorables a fatiga en el tubo.  
Caso (a) Mallado grosero. Caso (b) Mallado fino.

Se expondrán ahora los resultados de tensiones y deformaciones en los puntos más desfavorables a fatiga, tanto para el asiento como para el tubo. Estos resultados se refieren a la evolución temporal de dichas magnitudes dependiendo del tipo de malla empleada y nos permitirán obtener conclusiones acerca de la vida a fatiga de la unión.

## Deformaciones

En el punto más desfavorable del asiento, como se observa en la figura 5.4.2.3-3, la evolución de la deformación equivalente en el tiempo muestra que existe un nivel de deformaciones plásticas de valor aproximadamente constante aunque mayor en el caso de la malla grosera y que en el caso de la malla fina los valores mínimos de la deformación elástica son menores dando lugar a que la variación de esta deformaciones sea mucho mayor.

En el punto más desfavorable del tubo se tiene la situación opuesta ya que la deformación plástica (de valor aproximadamente constante en el tiempo) es mucho menor que la elástica, teniendo valores próximos a cero como se representa en la figura 5.4.2.3-4, mientras que la componente elástica de la deformación crece con la malla fina aunque sólo para los valores mínimos manteniéndose los máximos en el mismo valor independientemente del tipo de mallado empelado.

Resumiremos estos valores en la tabla 5.4.2.3-1.

RESULTADOS PUNTO MAS DESFAVORABLE			Mallado grosero	Mallado fino
Deformación (mm/mm)	ASIENTO	Plástica	0.0028	0.0019
		Elástica	0.0015-0.0020	0.0006-0.0020
	TUBO	Plástica	0	0.0002
		Elástica	0.0008-0.0024	0.0019-0.0024

Tabla 5.4.2.3-1. Valores del intervalo de variación de la deformación en el punto más desfavorable.

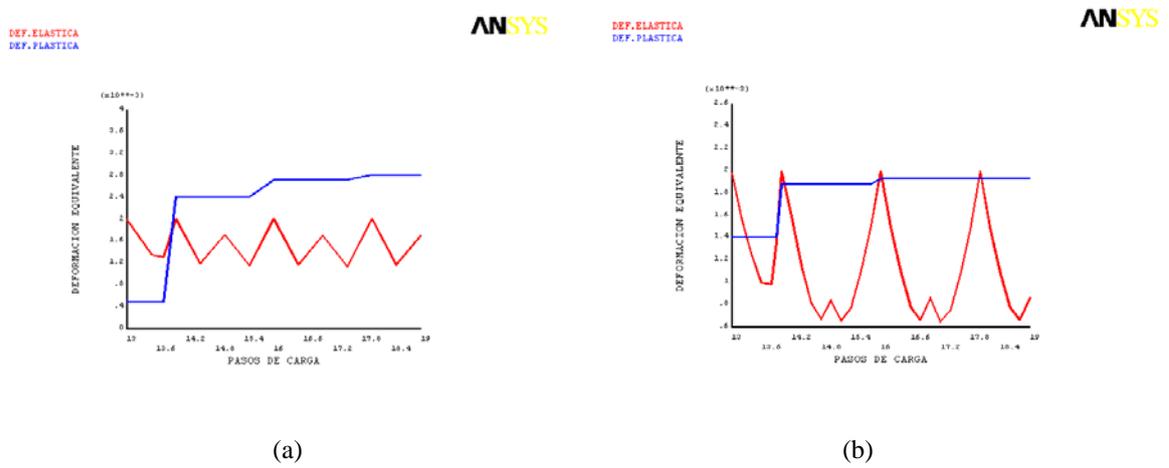


Fig. 5.4.2.3-3. Influencia del mallado en la evolución de la deformación en el punto más desfavorable del asiento (mm/mm). Caso (a) Mallado grosero. Caso (b) Mallado fino.

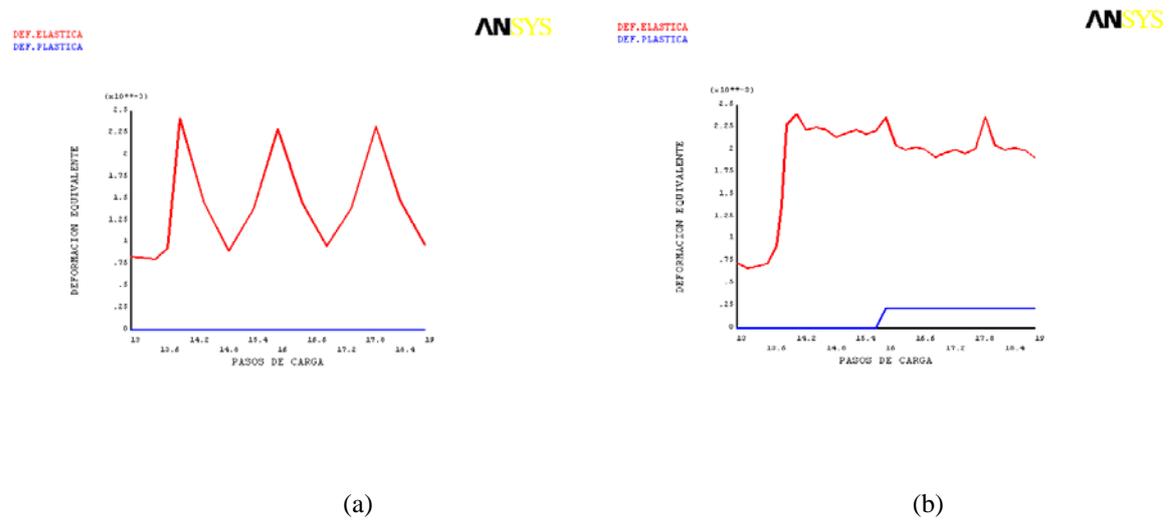


Fig. 5.4.2.3-4. Influencia del mallado en la evolución de la deformación en el punto más desfavorable del tubo (mm/mm). Caso (a) Mallado grosero. Caso (b) Mallado fino.

## Tensiones

La evolución temporal de la tensión equivalente en el punto más desfavorable a fatiga del asiento muestra para las dos opciones de mallado que los máximos se mantienen aproximadamente constantes mientras que el valor mínimo es mucho menor para la malla fina, de tal manera que las tensiones equivalentes varían entre 90 y 380 MPa en el caso grosero y entre 230 y 375 MPa en el caso fino, ambos casos se representan en la figura 5.4.2.3-5.

Para el tubo, ver figura 5.4.2.3-6, se tiene que la modificación del mallado presenta una situación opuesta, mientras que los valores máximos siguen siendo muy parecidos, los valores mínimos disminuyen si empleamos la malla fina. La evolución temporal de las tensiones da lugar a valores comprendidos entre 190 y 360 MPa en el mallado grosero y entre 150 y 340 MPa para el otro mallado.

Estos valores se resumen en la tabla 5.4.2.3-2.

RESULTADOS PUNTO MAS DESFAVORABLE		Mallado grosero	Mallado fino
Tensión equivalente (MPa)	ASIENTO	230-375	90-380
	TUBO	150-340	190-360

Tabla 5.4.2.3-2. Valores del intervalo de variación de la tensión equivalente en el punto más desfavorable.

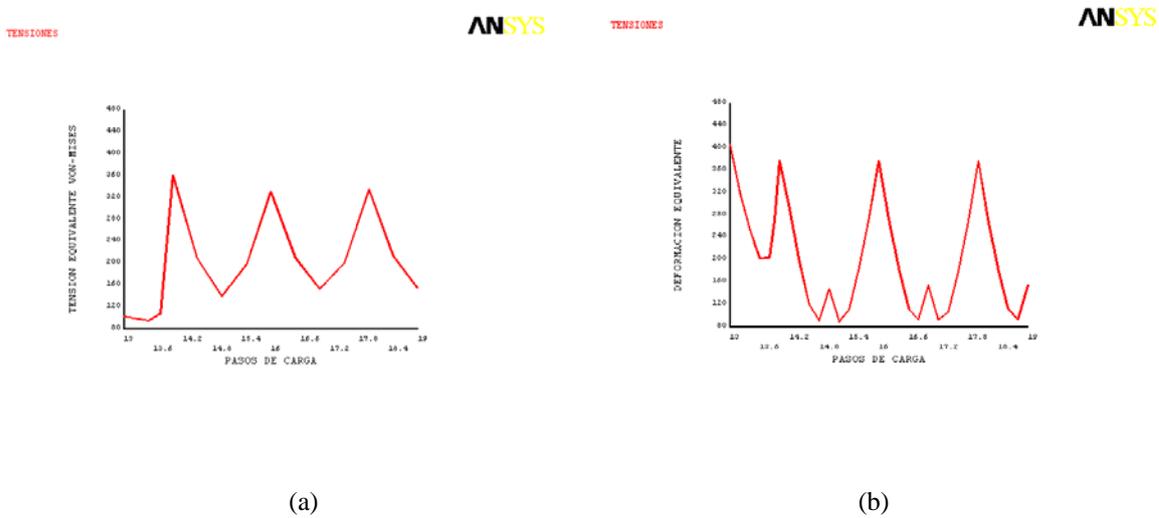


Fig. 5.4.2.3-5. Influencia del mallado en la evolución de la tensión equivalente de von Mises en el punto más desfavorable del asiento. Caso (a) Mallado grosero. Caso (b) Mallado fino.

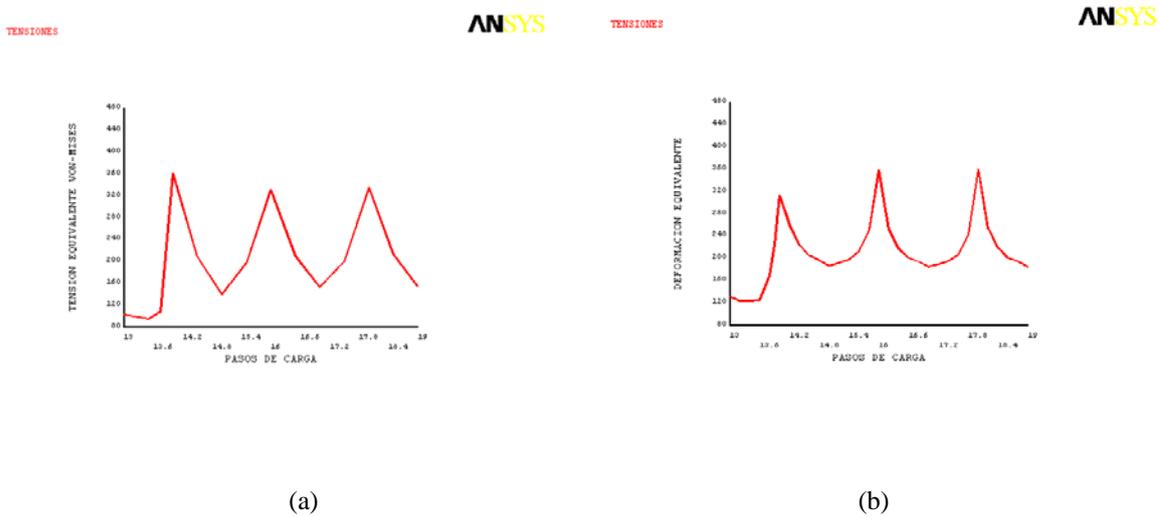


Fig. 5.4.2.3-6. Influencia del mallado en la evolución de la tensión equivalente de von Mises en el punto más desfavorable del tubo. Caso (a) Mallado grosero. Caso (b) Mallado fino.

### Resistencia a fatiga

- Asiento: En función de las distintas propiedades de fatiga empleadas, el resultado de la vida a fatiga, para la situación de carga contemplada, se encuentra en torno al millón de ciclos para los dos tipos de malla contemplados.
- Tubo: En este caso, los resultados de vida son mayores pudiendo considerar que nos encontramos con resultados de “vida infinita” en todos los casos estudiados.

Como resumen, se comparan en la tabla 5.4.2.3-3 los resultados de la vida de la unión.

RESULTADOS PUNTO MAS DESFAVORABLE		Mallado grosero	Mallado fino
Vida (ciclos)	ASIENTO	2.97E+06	5.90E+05
	TUBO	5.71E+13	6.99E+11

Tabla 5.4.2.3-3. Valores de la vida a fatiga de la unión.

### 5.4.3. Influencia de la carga de uso

Nos centraremos ahora en estudiar la influencia que la carga de uso del amortiguador puede tener sobre las magnitudes en estudio en el presente documento. Consideraremos dos posibles casos de carga, 6000 N y 10000 N, siendo éste último el caso que más se aproxima a la realidad de funcionamiento de nuestro modelo, como ya reseñábamos en el apartado 5.3. Además de la misma manera que se ha procedido en los casos de influencia estudiados anteriormente se mantendrán constantes todas las demás magnitudes que definen el modelo.

La influencia de la carga de uso sólo será patente una vez concluido el proceso de inserción, en el momento en que el amortiguador entre en carga, por lo tanto será a partir de ese instante donde comenzaremos el estudio de la influencia de este parámetro.

De nuevo compararemos aquellos resultados que aporten información relevante acerca de la durabilidad de la unión.

#### 5.4.3.1 Proceso de carga y descarga

##### Deformación plástica equivalente

Después de aplicar la primera de las cargas cíclicas, el estado de deformación plástica equivalente en el asiento es prácticamente el mismo en los dos casos considerados, siendo su valor de 0.008990 para la carga de 6000 N y 0.009028 para la carga de 10000 N tal y como se observa en la figura 5.4.3.1-1.

Para el tubo ocurre exactamente lo mismo: la distribución de las deformaciones plásticas es prácticamente igual y los valores máximos 0.001679 para ambos casos, ver figura 5.4.3.1-2.

En la tabla 5.4.3.1-1 se resumen estos valores.

VALORES MÁXIMOS TRAS LA PRIMERA CARGA			
Deformación plástica equivalente (mm/mm)	ASIENTO	Carga 6000 N	0.008990
		Carga 10000 N	0.009028
	TUBO	Carga 6000 N	0.001679
		Carga 10000 N	0.001679

Tabla. 5.4.3.1-1. Valores máximos de la deformación plástica equivalente tras la primera carga.

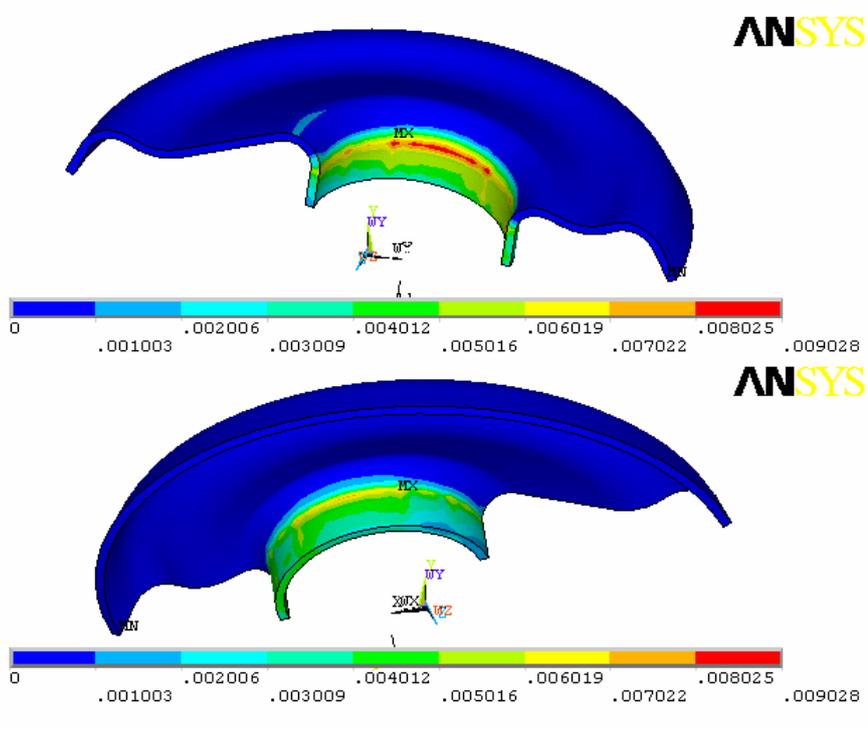
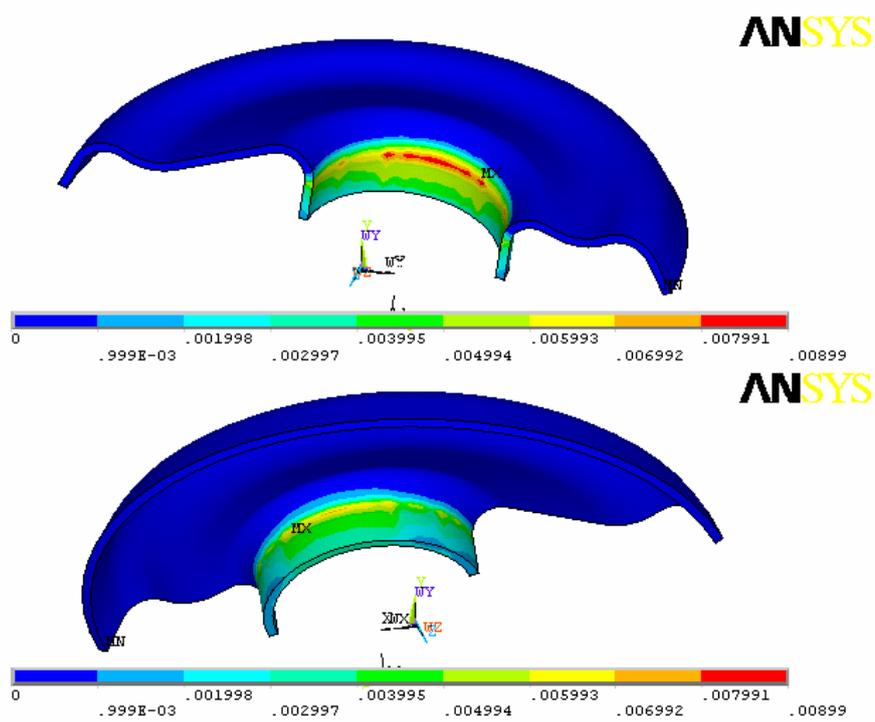
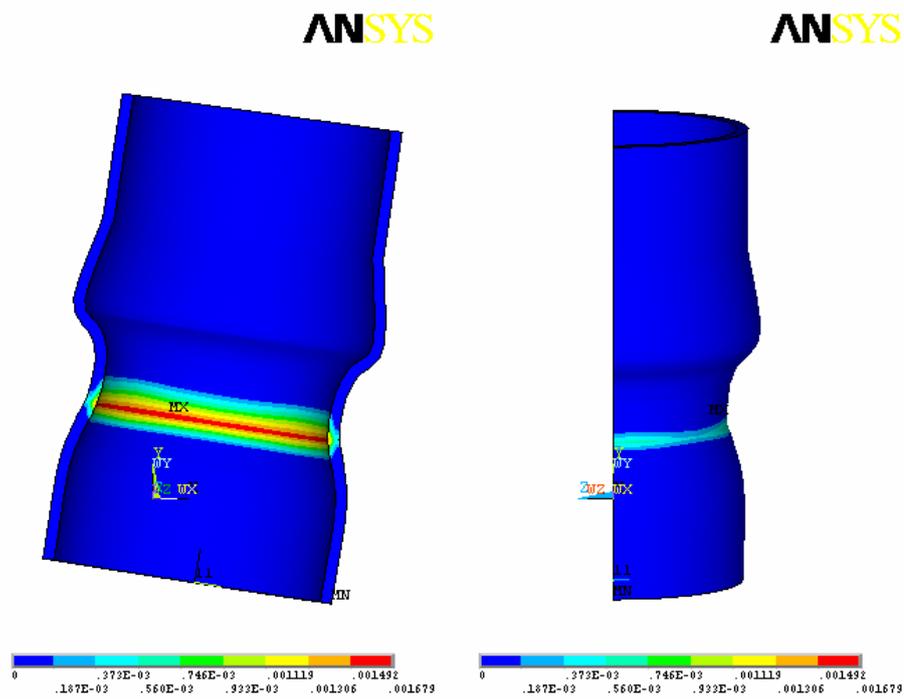
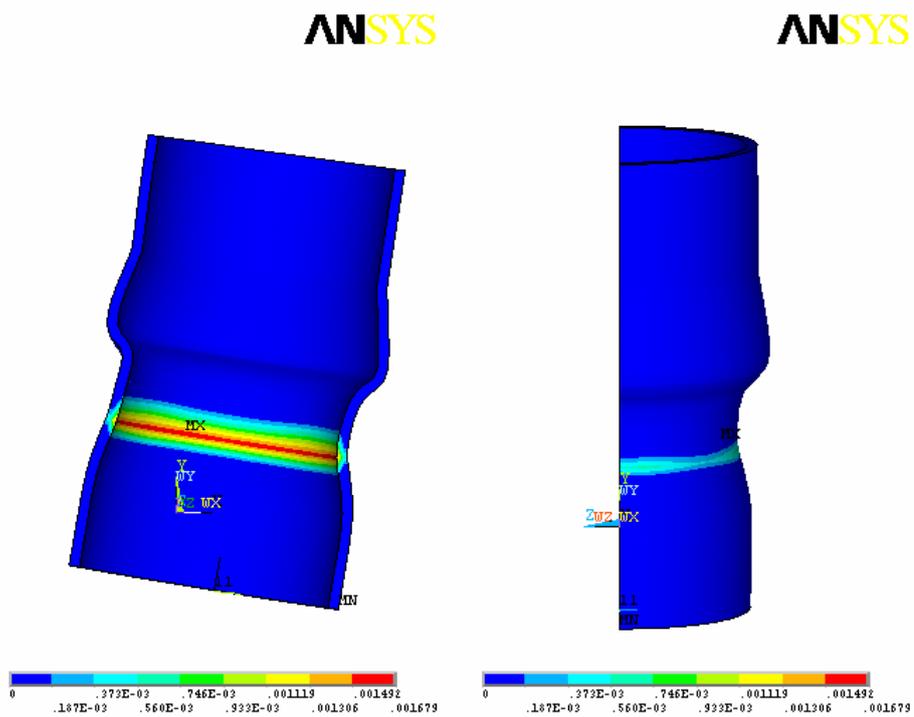


Fig. 5.4.3.1-1. Influencia de la carga en la deformación plástica equivalente en el asiento (mm/mm) después de la primera carga.



Carga 6000 N



Carga 10000 N

Fig. 5.4.3.1-2. Influencia de la cara en la deformación plástica equivalente en el tubo (mm/mm) después de la primera carga.

### Tensión equivalente

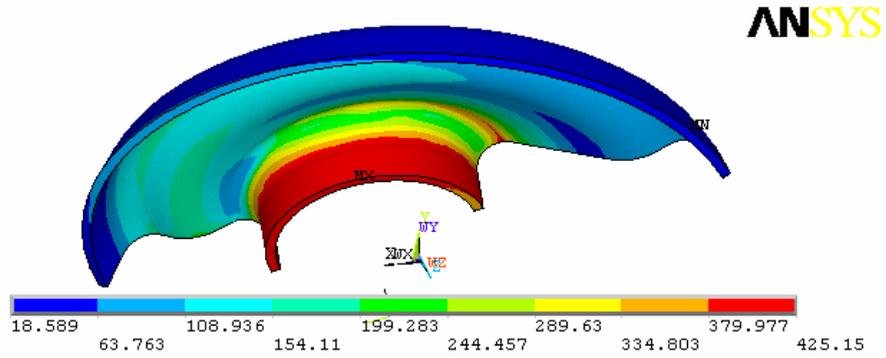
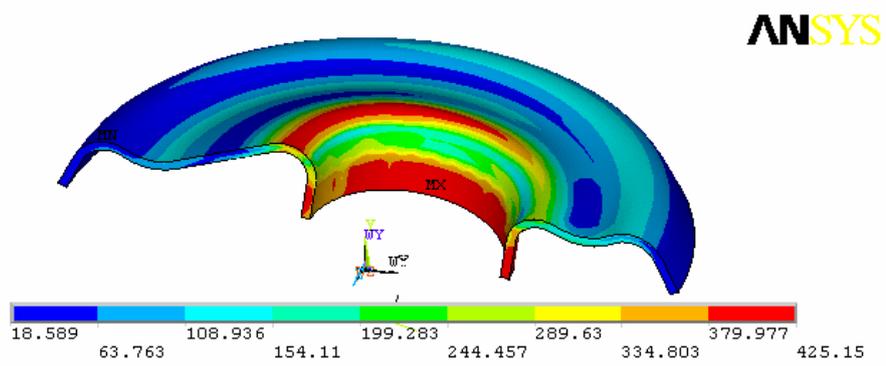
Las tensiones equivalentes presentes en el asiento tras la aplicación de la primera carga alcanzan su valor máximo en las mismas zonas para ambos casos, teniendo unos valores prácticamente iguales, 425 MPa para la carga de 6000 N y 427 MPa para la de 10000 N como se refleja en la figura 5.4.3.1-3.

Para el tubo, las tensiones equivalentes tras la primera carga alcanzan los valores máximos para la carga más alta, ver figura 5.4.3.14, siendo dicho valor 564 MPa, para la otra carga este valor desciende hasta 531 MPa.

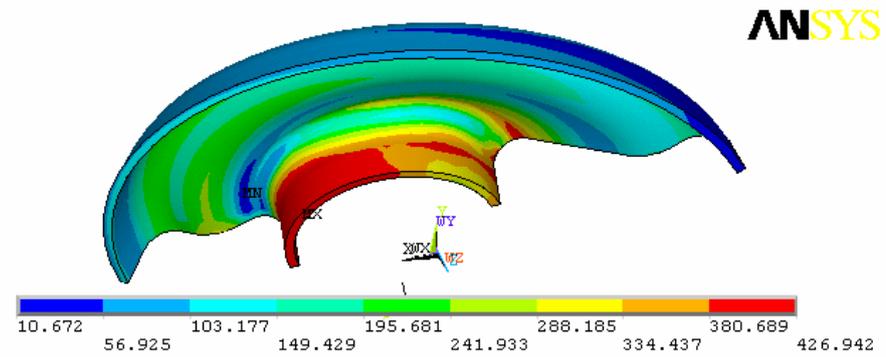
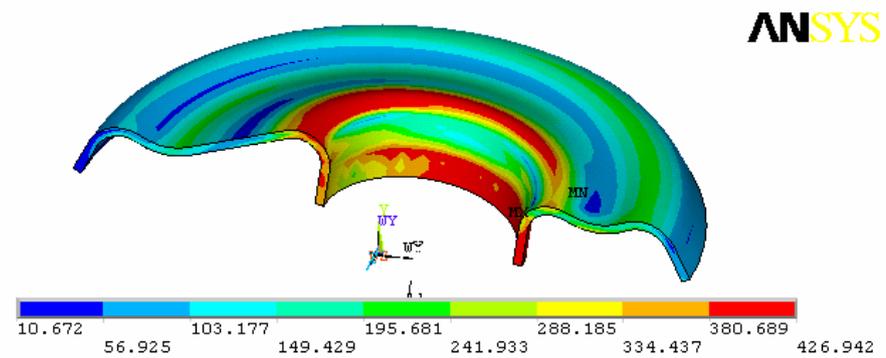
Sirva la tabla 5.4.3.1-2 a modo de resumen.

VALORES MÁXIMOS TRAS LA PRIMERA CARGA			
Tensión equivalente (MPa)	ASIENTO	Carga 6000 N	425.150
		Carga 10000 N	426.942
	TUBO	Carga 6000 N	530.945
		Carga 10000 N	563.784

Tabla. 5.4.3.1-2. Valores máximos de la tensión equivalente tras la primera carga.

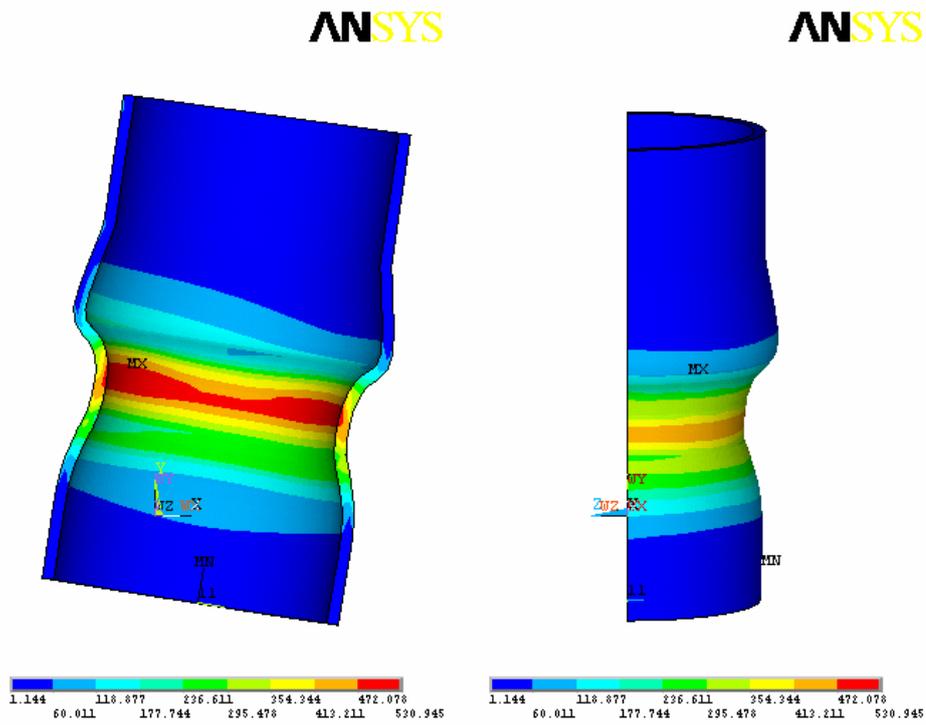


Carga 6000 N

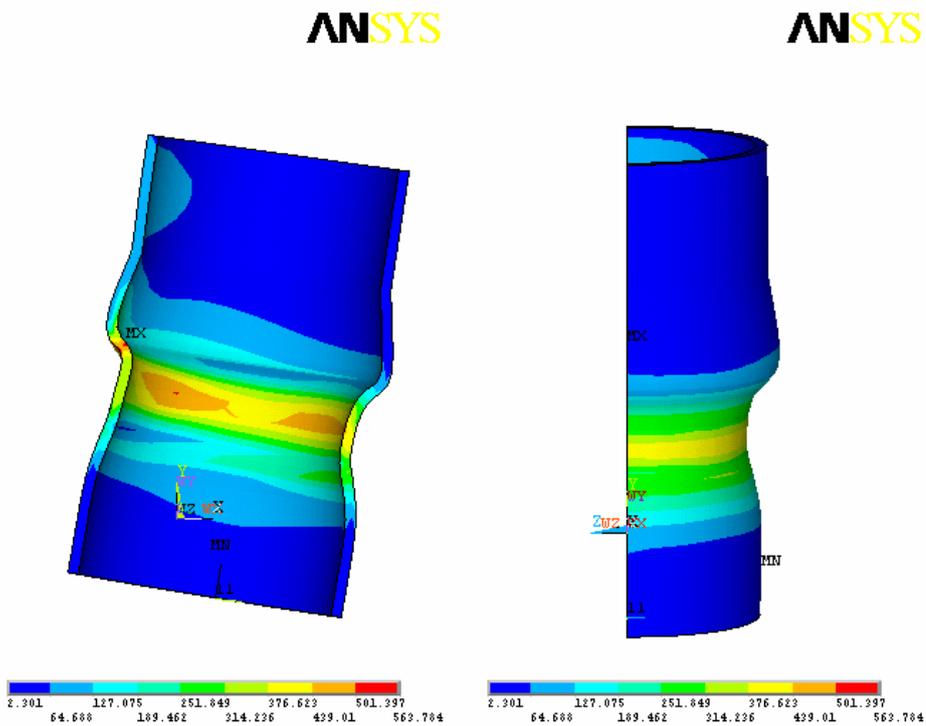


Carga 10000 N

Fig. 5.4.3.1-3. Influencia de la carga en la tensión equivalente en el asiento (Mpa) tras de la primera carga.



Carga 6000 N



Carga 10000 N

Fig. 5.4.3.1-4. Influencia de la carga en la tensión equivalente en el tubo (Mpa) tras de la primera carga.

### Presión de contacto

Los valores máximos de la presión de contacto se concentran en una zona muy concreta, coincidiendo con el cambio de curvatura de la zona de contacto, sin embargo aunque las distribuciones de presiones son muy parecidas, como se observa en la figura 5.4.3.1-5, no ocurre lo mismo con los valores máximos que se encuentran entre 140 y 144 MPa para la carga de 6000 N mientras que para la carga de 10000 N este intervalo es mucho mayor y toma como valores máximos en la carga y la descarga 602 y 162 MPa respectivamente.

Resumiremos estos valores en la tabla 5.4.3.1-3.

VALORES MÁXIMOS TRAS LA CARGA Y LA DESCARGA		
Presión de contacto (MPa). Carga	Carga 6000 N	140.346
	Carga 10000 N	602.592
Presión de contacto (MPa). Descarga	Carga 6000 N	143.346
	Carga 10000 N	162.167

Tabla. 5.4.3.1-3. Valores máximos de la presión de contacto tras la carga y la descarga.

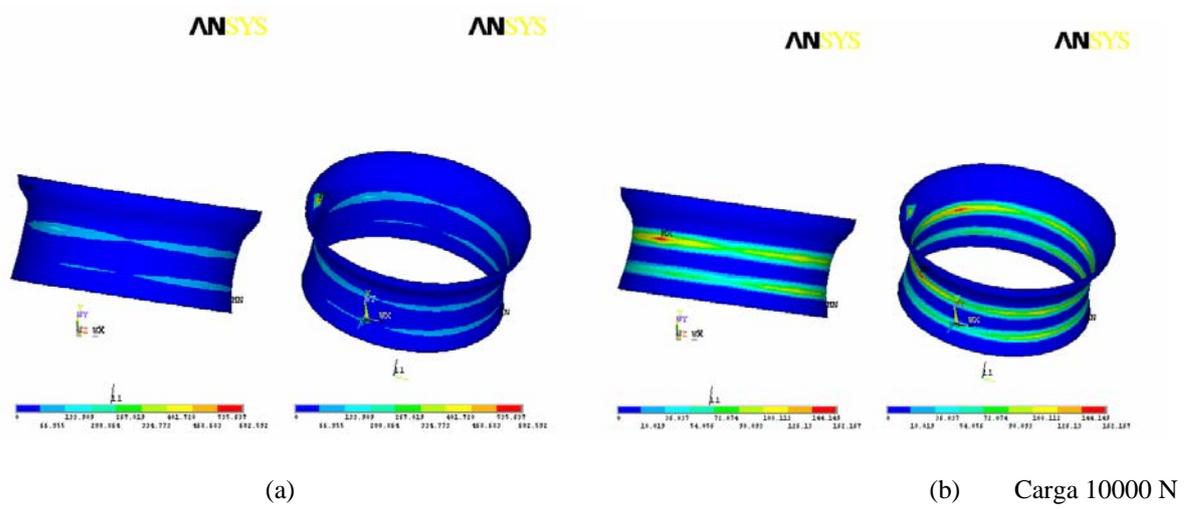
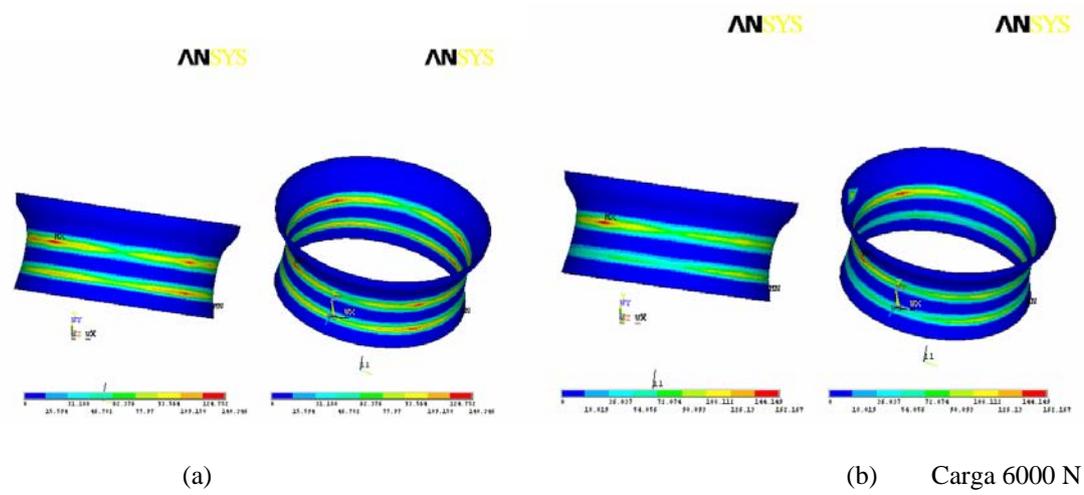


Fig. 5.4.3.1-5. Influencia de la carga en la presión normal de contacto (MPa).  
 Caso (a) tras la carga. Caso (b) tras la descarga.

### Situación del contacto

Del análisis del estado de los elementos de contacto puede observarse como para el caso de la carga de 6000 N, y como podía esperarse, la situación de contacto presenta menos elementos en deslizamiento para el caso de entrada en carga, mientras que para la descarga las situaciones son muy parecidas. Estas situaciones se muestran en la figura 5.4.3.1-6.

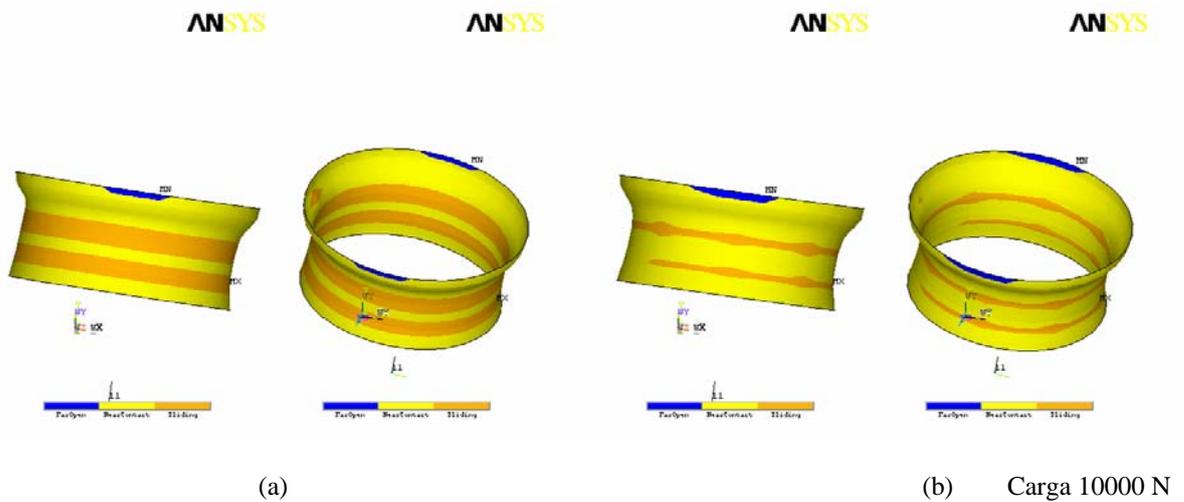
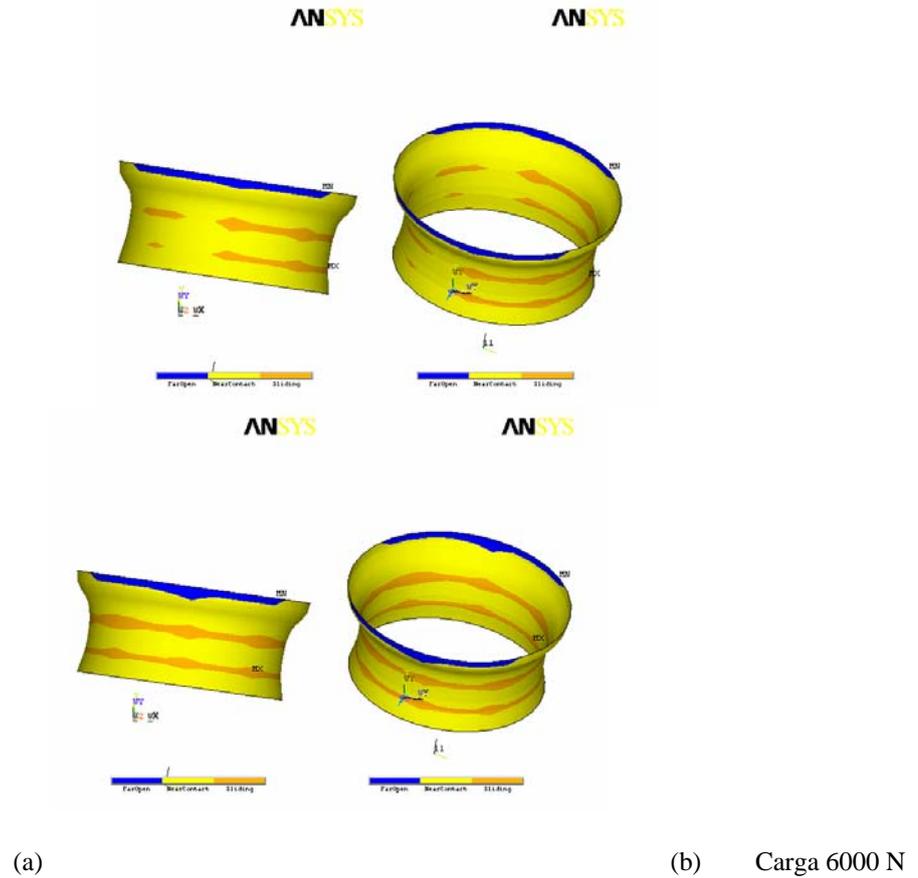


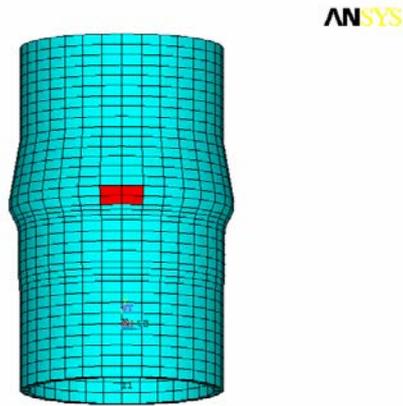
Fig. 5.4.3.1-6. Influencia de la carga en el estado de los elementos de contacto.  
Caso (a) tras la carga. Caso (b) tras la descarga.

### 5.4.3.2 Estudio de fatiga

En el caso del asiento es donde se aprecian diferencias más significativas en cuanto a la situación de los puntos más desfavorables desde el punto de vista de la fatiga. De tal manera que para la carga de 6000 N la zona donde hay mayor probabilidad de que se inicie una grieta se encontrara en la cara que se haya en contacto (asiento-tubo), mientras que para la carga de 10000 N esta zona se localizará en la cara que no está en contacto. En el tubo no se presentan unas diferencia tan acusadas, aunque para la carga de 6000 N el punto más desfavorable para la iniciación de la grieta se desplaza fuera del plano de simetría aunque en una zona próxima a la del caso estudiado para 10000 N. Estas zonas se puede observar en la figura 5.4.3.2-1 para el tubo y 5.4.3.2-2 para el asiento.

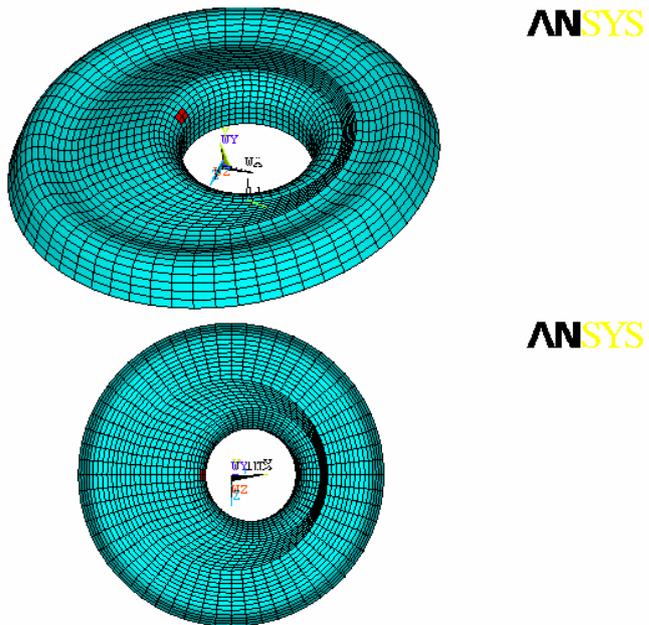


(a)

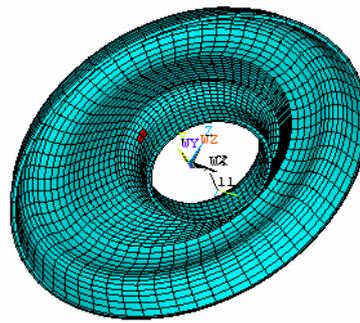


(b)

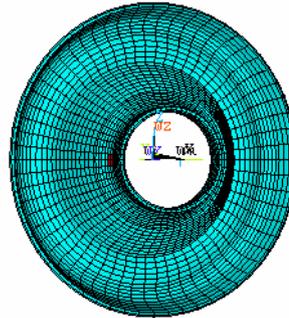
Fig. 5.4.3.2-1. Influencia de la carga en lo puntos más desfavorables a fatiga en el tubo.  
Caso (a) Carga 6000 N. Caso (b) Carga 10000 N.



(a)



ANSYS



ANSYS

(b)

Fig. 5.4.3.2-2. Influencia de la carga en los puntos más desfavorables a fatiga en el asiento.  
Caso (a) Carga de 6000N. Caso (b) Carga de 10000N.

Se expondrán ahora los resultados de tensiones y deformaciones en los puntos más desfavorables a fatiga, tanto para el asiento como para el tubo, referidos a la evolución temporal de dichas magnitudes dependiendo de la carga empleada, buscando obtener los datos necesarios para determinar la vida a fatiga de la unión.

### Deformaciones

En el punto más desfavorable del asiento, como se observa en la figura 5.4.3.2-3, la evolución de la deformación equivalente en el tiempo muestra, que existe un nivel de deformaciones plásticas nula para la carga de 6000 N y de valor aproximadamente constante e igual a 0.0028 para la carga de 10000 N, mientras que para la deformación elástica los valores mínimos y máximos son prácticamente los mismos.

En el punto más desfavorable del tubo se tiene para los dos casos de carga una situación en que la deformación plástica es nula. En el caso de la deformación elástica los valores mínimos son del mismo orden para ambas cargas, aunque para la carga de 10000 N el valor máximo es el doble del que se da para la carga de 6000 N, representada en la figura 5.4.3.2-4.

Resumiremos estos valores en la tabla 5.4.3.2-1.

RESULTADOS PUNTO MAS DESFAVORABLE			Carga 6000 N	Carga 10000 N
Deformación (mm/mm)	ASIENTO	Plástica	0	0.0028
		Elástica	0.0013-0.0017	0.0015-0.0020
	TUBO	Plástica	0	0
		Elástica	0.0010-0.0012	0.0008-0.0024

Tabla 5.4.3.2-1. Valores del intervalo de variación de la deformación en el punto más desfavorable.

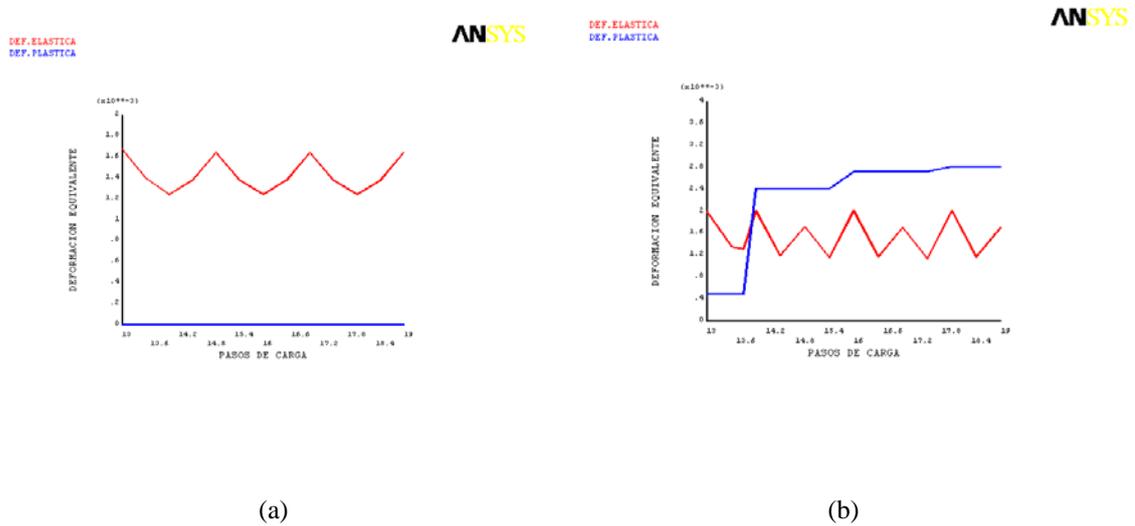
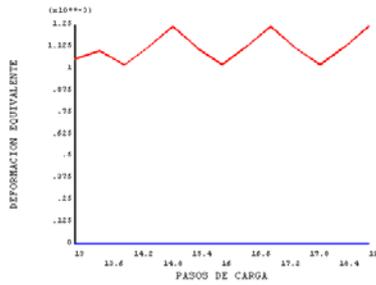
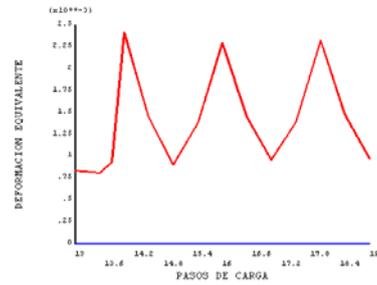


Fig. 5.4.3.2-3. Influencia de la carga en la evolución de la deformación en el punto más desfavorable del asiento (mm/mm). Caso (a) Carga 6000 N. Caso (b) Carga 10000 N.



(a)



(b)

Fig. 5.4.3.2-4. Influencia de la carga en la evolución de la deformación en el punto más desfavorable del tubo (mm/mm). Caso (a) Carga 6000 N. Caso (b) Carga 10000 N.

### Tensiones

La evolución temporal de la tensión equivalente en el punto más desfavorable a fatiga del asiento muestra que la aplicación de una mayor carga supone un incremento del nivel de tensiones tanto para los valores mínimos como máximos y una diferencia de tensiones también mayor para el caso de carga de 10000 N . De este modo, las tensiones equivalentes varían entre 140 y 200 MPa en el caso de carga de 6000 N y entre 230 y 375 MPa en el caso de la carga de 10000 N, ambos casos se representan en la figura 5.4.3.2-5.

Para el tubo, ver figura 5.4.3.2-6, se tiene que la aplicación de una mayor carga supone un disminución del valor mínimo de la tensión mientras que el valor máximo aumenta, teniendo como conclusión que en definitiva aumenta el intervalo de tensiones en la carga y la descarga. La evolución temporal del proceso de carga cíclica da lugar a valores comprendidos entre 190 y 250 MPa para la carga de 6000 N y entre 150 y 340 MPa para la de 10000 N.

Estos valores se resumen en la tabla 5.4.3.2-2.

RESULTADOS PUNTO MAS DESFAVORABLE	Carga 6000 N	Carga 10000 N
--------------------------------------	--------------	---------------

Tensión equivalente (MPa)	ASIENTO	140-200	230-375
	TUBO	190-250	150-340

Tabla 5.4.3.2-2. Valores del intervalo de variación de la tensión equivalente en el punto más desfavorable.

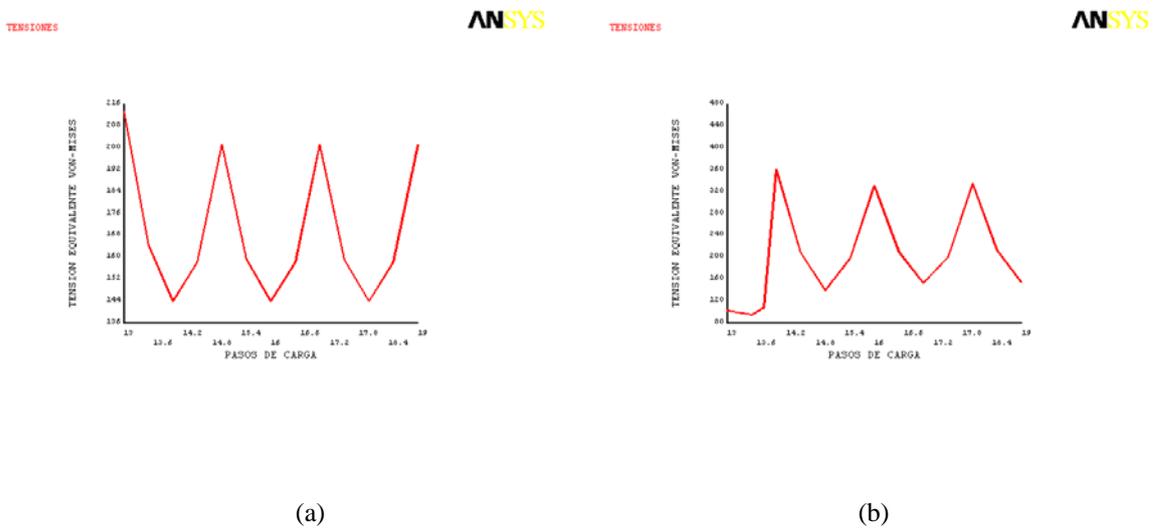
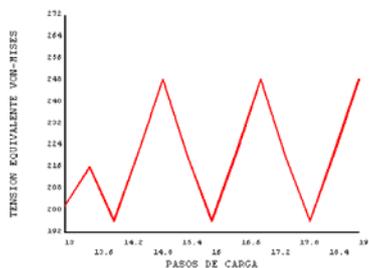
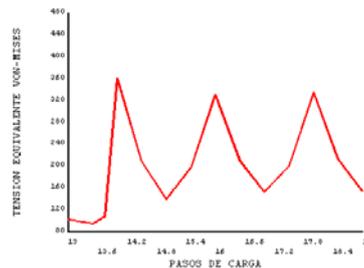


Fig. 5.4.3.2-5. Influencia de la carga en la evolución de la tensión equivalente de von Mises en el punto más desfavorable del asiento. Caso (a) Carga 6000 N. Caso (b) Carga 10000 N.



(a)



(b)

Fig. 5.4.3.2-6. Influencia de la carga en la evolución de la tensión equivalente de von Mises en el punto más desfavorable del tubo. Caso (a) Carga 6000 N. Caso (b) Carga 10000 N.

### Resistencia a fatiga

- Asiento: el resultado de la vida a fatiga, para las situaciones de carga contempladas, muestra como no podía ser de otra manera una mayor vida para el caso de 6000 N que se encuentra en torno a los cien millones de ciclos en comparación con el millón de ciclos para los que se estima el orden de magnitud de la vida para la carga de mayor valor.
- Tubo: los resultados de vida son también mayores para la menor carga aunque nos movemos en unos órdenes de magnitud para los que se puede considerar “vida infinita” en los dos casos contemplados.

Como resumen, se comparan en la tabla 5.4.3.2-3 los resultados de la vida de la unión.

RESULTADOS PUNTO MAS DESFAVORABLE		Carga 6000 N	Carga 10000 N
Vida (ciclos)	ASIENTO	1.48E+08	2.97E+06
	TUBO	5.71E+14	5.71E+13

Tabla 5.4.3.2-3. Valores de la vida a fatiga de la unión.