

Máster en Sistemas Mecánicos

Posgrado en Ingeniería Mecánica y de Materiales



Trabajo Fin de Máster

Absorbedor de Impactos Estudio Comparativo - ANEXOS -

Santiago Tornos Tejedor

Dirigido por Jesús Cuartero Salafranca
Septiembre 2010



1.	<i>Geometría</i>	3
1.1.	<i>Geometría 1 (Absorbedor de Referencia)</i>	3
1.2.	<i>Geometría 2</i>	3
1.3.	<i>Geometría 3</i>	4
1.4.	<i>Geometría 4</i>	4
1.5.	<i>Geometría 5 (Proceso Constructivo)</i>	5
1.6.	<i>Geometría 6 (Proceso Constructivo)</i>	9
2.	<i>Cálculos justificativos de Espesor</i>	13
2.1.	<i>Configuración con cilindros auxiliares interiores</i>	13
2.2.	<i>Configuración con recubrimiento auxiliar Helicoidal</i>	14
3.	<i>Materiales</i>	17
4.	<i>Resultados completos en Abaqus</i>	18
4.1.	<i>Geometría 1 – Acero (Absorbedor de Referencia)</i>	18
4.2.	<i>Geometría 1 – Duraluminio</i>	24
4.3.	<i>Geometría 2 – Acero</i>	28
4.4.	<i>Geometría 2 – Duraluminio</i>	31
4.5.	<i>Geometría 3 – Acero</i>	33
4.6.	<i>Geometría 3 – Duraluminio</i>	37
4.7.	<i>Geometría 4 – Acero</i>	39
4.8.	<i>Geometría 4 – Duraluminio</i>	43
4.9.	<i>Geometría 5 – Acero</i>	45
4.10.	<i>Geometría 5 – Duraluminio</i>	49
4.11.	<i>Geometría 6 – Acero</i>	53
4.12.	<i>Geometría 6 – Duraluminio</i>	56
4.13.	<i>Comparativa</i>	59

1. Geometría

1.1. Geometría 1 (Absorbedor de Referencia)

Cilindro hueco (Figuras 1.1.1. y 1.1.2.);

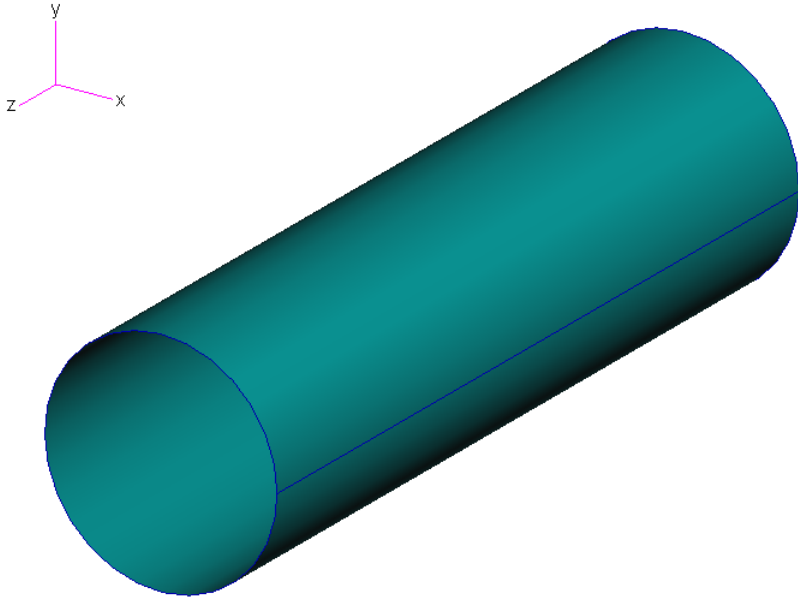


Fig. 1.1.1. Geometría 1 – Vista general

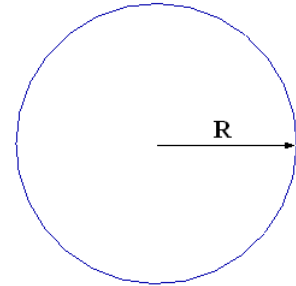


Fig. 1.1.2. Geometría 1 – Vista Frontal

$$L = 0,5 \text{ m}$$
$$R = 0,075 \text{ m}$$

1.2. Geometría 2

Cilindro hueco con dos cilindros auxiliares concéntricos con disminución progresiva de diámetro (Figuras 1.2.1. y 1.2.2.);

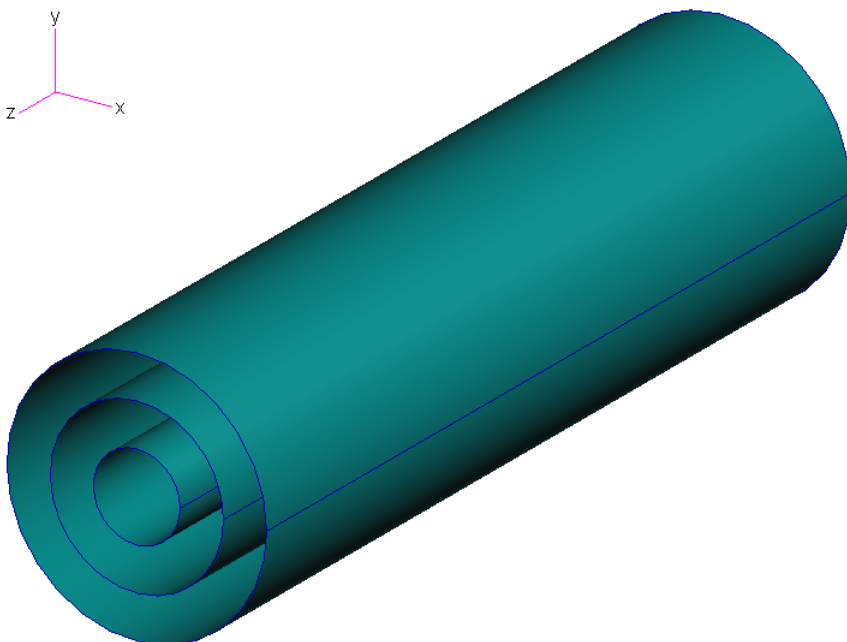


Fig. 1.2.1. Geometría 2 – Vista general

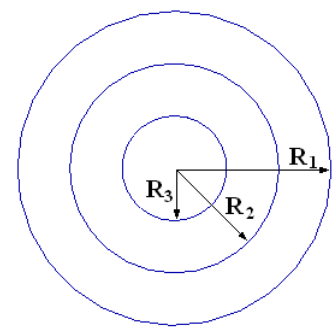


Fig. 1.2.2. Geometría 2 – Vista Frontal

$$L = 0,5 \text{ m}$$
$$R_1 = 0,075 \text{ m} \quad R_2 = 0,05 \text{ m} \quad R_3 = 0,025 \text{ m}$$

1.3. Geometría 3

Cilindro hueco con cinco cilindros auxiliares interiores no concéntricos (Figuras 1.3.1. y 1.3.2.);

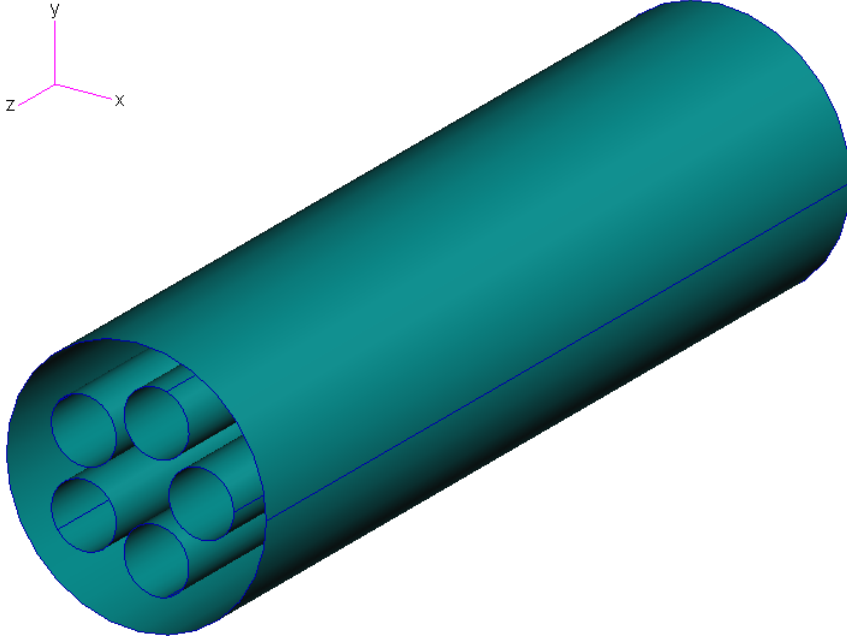


Fig. 1.3.1. Geometría 3 – Vista general

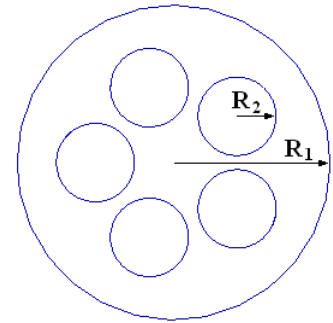


Fig. 1.3.2. Geometría 3 – Vista Frontal

$$L = 0,5 \text{ m}$$

$$R_1 = 0,075 \text{ m} \quad R_2 = 0,01875 \text{ m}$$

$$\text{Distancia} = 0.0375 \text{ m}$$

1.4. Geometría 4

Cilindro hueco con cinco cilindros auxiliares no concéntricos más un sexto cilindro auxiliar concéntrico con el principal, interiores (Figuras 1.4.1. y 1.4.2.);

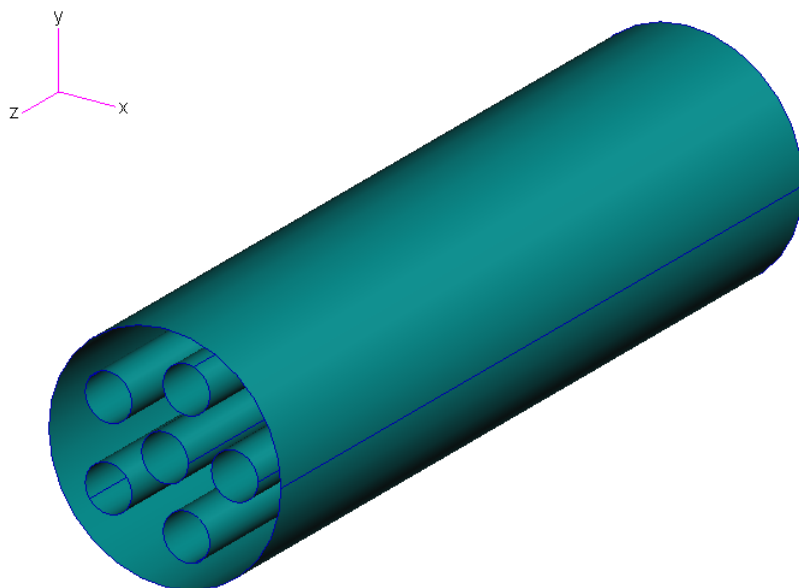


Fig. 1.4.1. Geometría 4 – Vista general

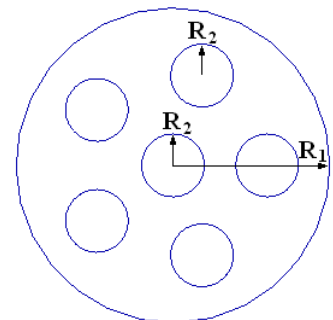


Fig. 1.4.2. Geometría 4 – Vista Frontal

$$L = 0,5 \text{ m}$$

$$R_1 = 0,075 \text{ m} \quad R_2 = 0,015 \text{ m}$$

$$\text{Distancia} = 0.045 \text{ m}$$

1.5. Geometría 5 (Proceso constructivo)

Cilindro principal con recubrimiento auxiliar helicoidal simple.

- Circunferencia de radio $R = 0,075$ m, generatriz de longitud $L = 0,5$ m igual a la del cilindro (*Figura 1.5.1.*);

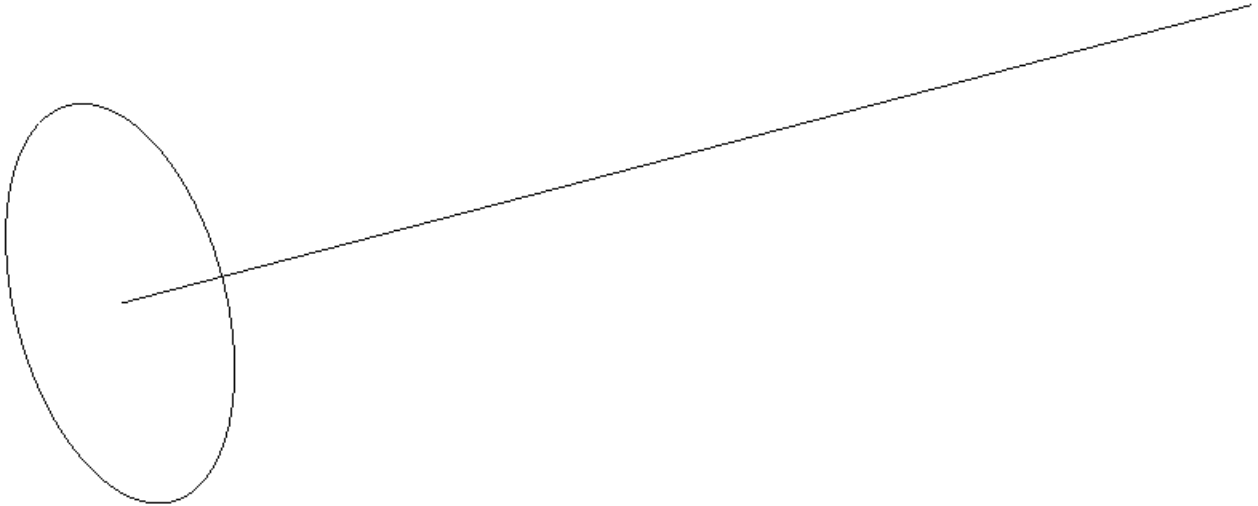


Fig. 1.5.1. Circunferencia base y Generatriz

- Se toma la circunferencia como evolvente para realizar una espiral simple a lo largo de la generatriz, con un paso de $L/12$, y un ángulo $\alpha = 6^\circ$ (*Figura 1.5.2.*);

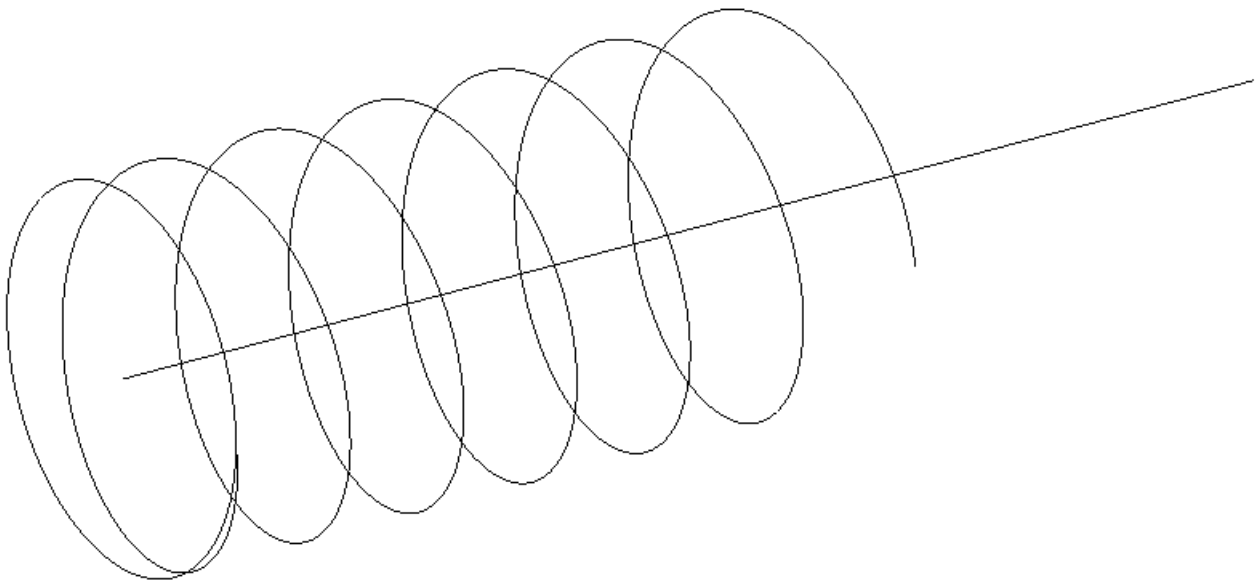


Fig. 1.5.2. Espiral Simple (parcial)

- Se realiza una segunda espiral igual a la del paso anterior (*Figura 1.5.2.*), pero desfasada 180° , para conseguir una espiral doble (*Figuras 1.5.3. y 1.5.4.*);

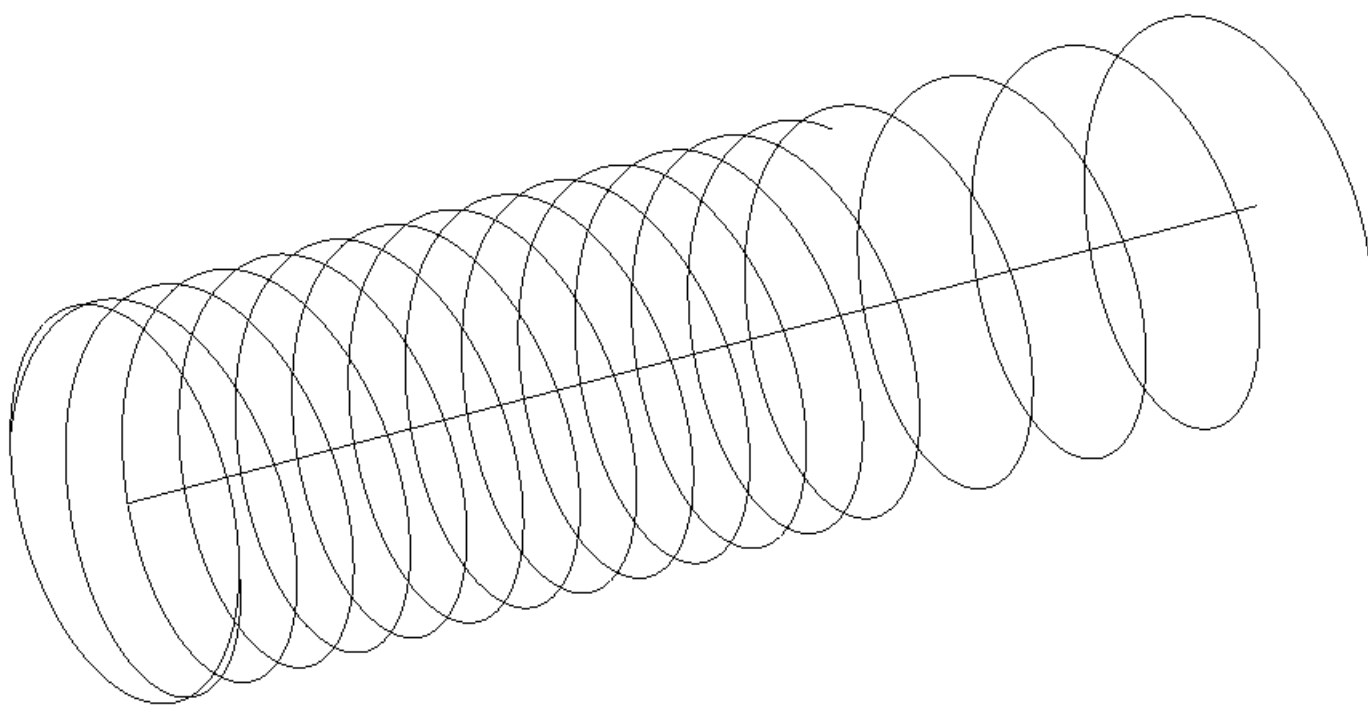


Fig. 1.5.3. Espiral Doble (parcial)

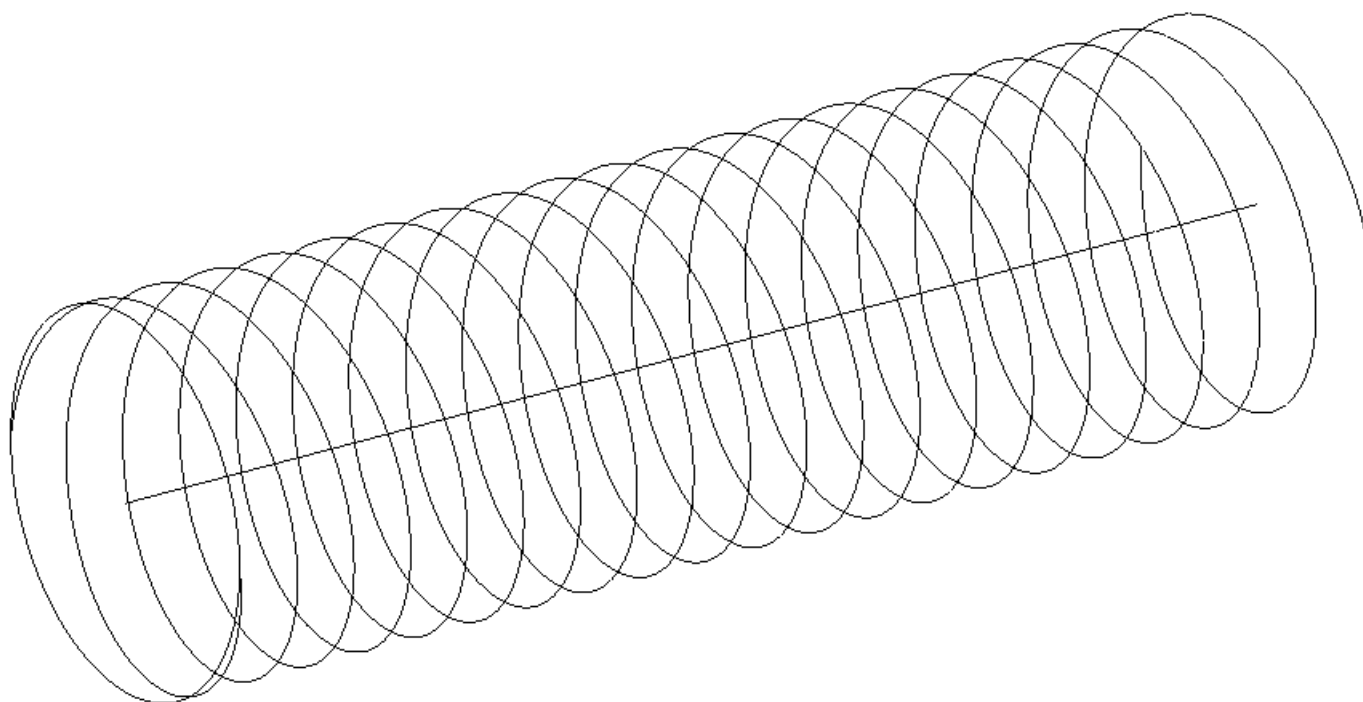


Fig. 1.5.4. Espiral Doble (completa)

- Vamos rellenando las superficies entre las curvas (*Figura 1.5.5.*) constitutivas de la espiral doble del paso anterior (*Figura 1.5.4.*), diferenciando la parte constitutiva de la hélice (*Figura 1.5.7.*) y del cilindro como complementario (*Figura 1.5.6.*);

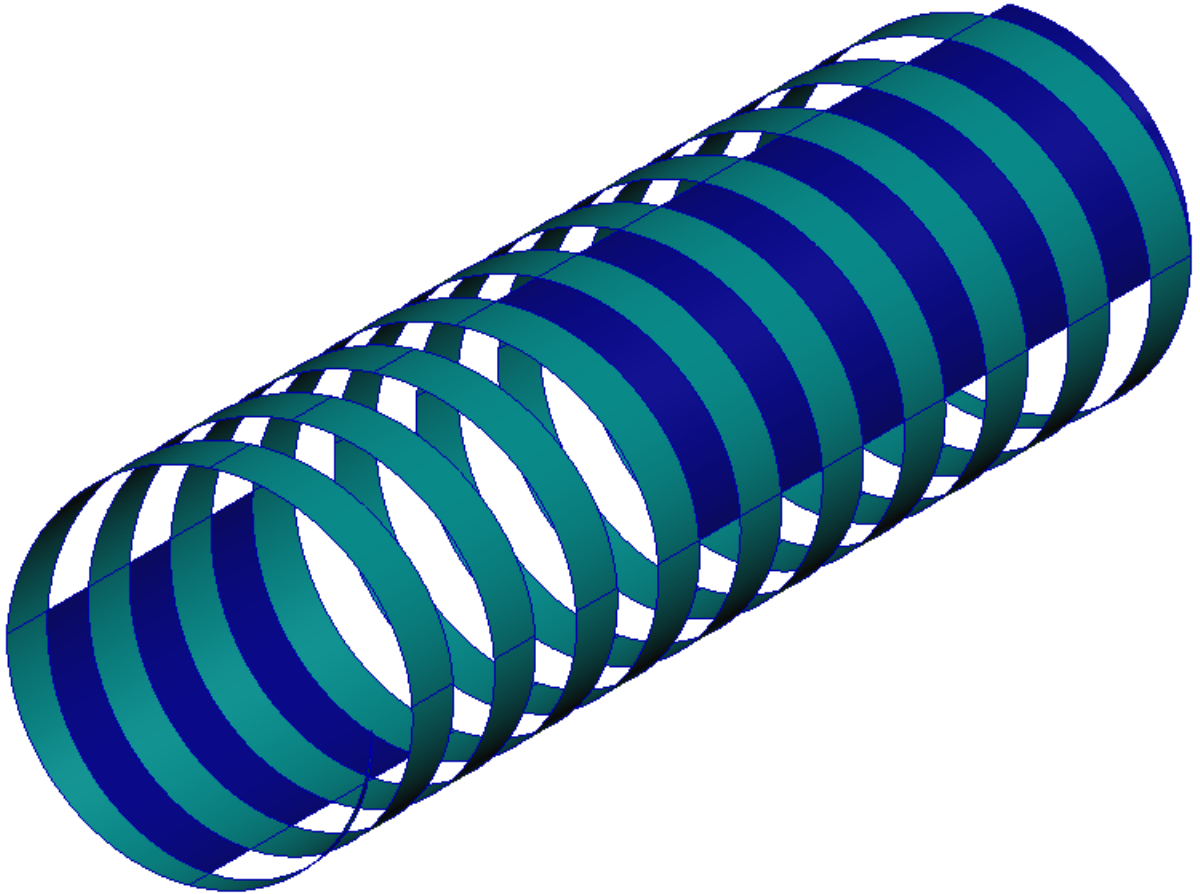


Fig. 1.5.5. Relleno de Superficies

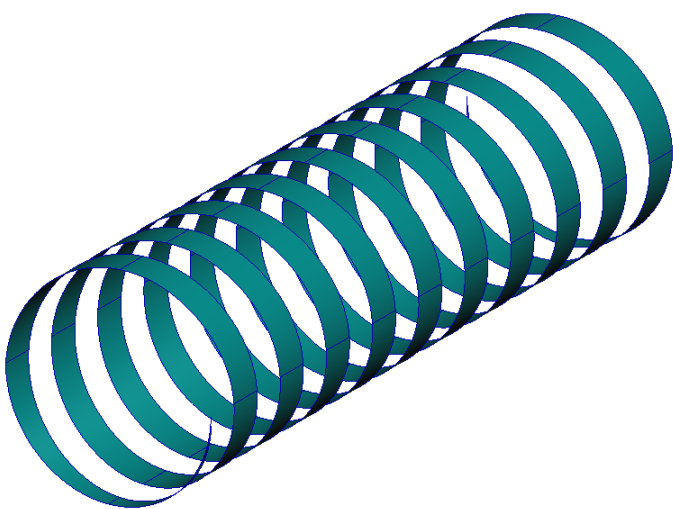


Fig. 1.5.6. Superficies del Cilindro Base (Complementario)

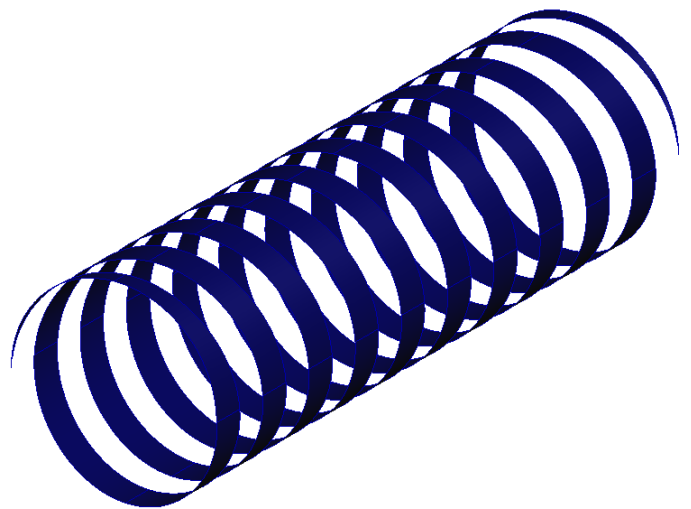


Fig. 1.5.7. Superficies de la Espiral Simple

- El resultado final (Figura 1.5.8., 1.5.9. y 1.5.10.) es el deseado: una espiral simple;

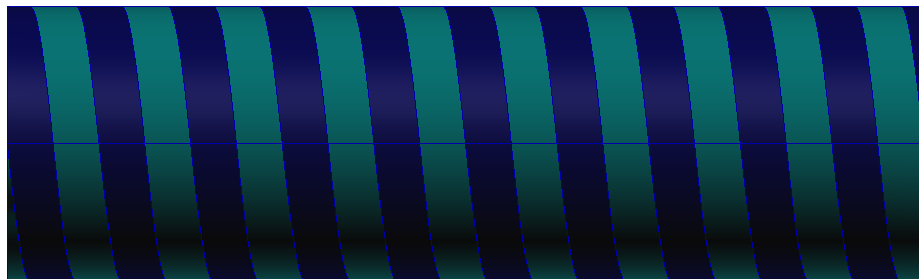


Fig. 1.5.8. Hélice Simple
Vista Lateral

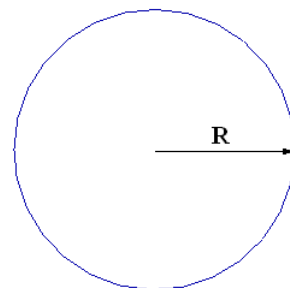
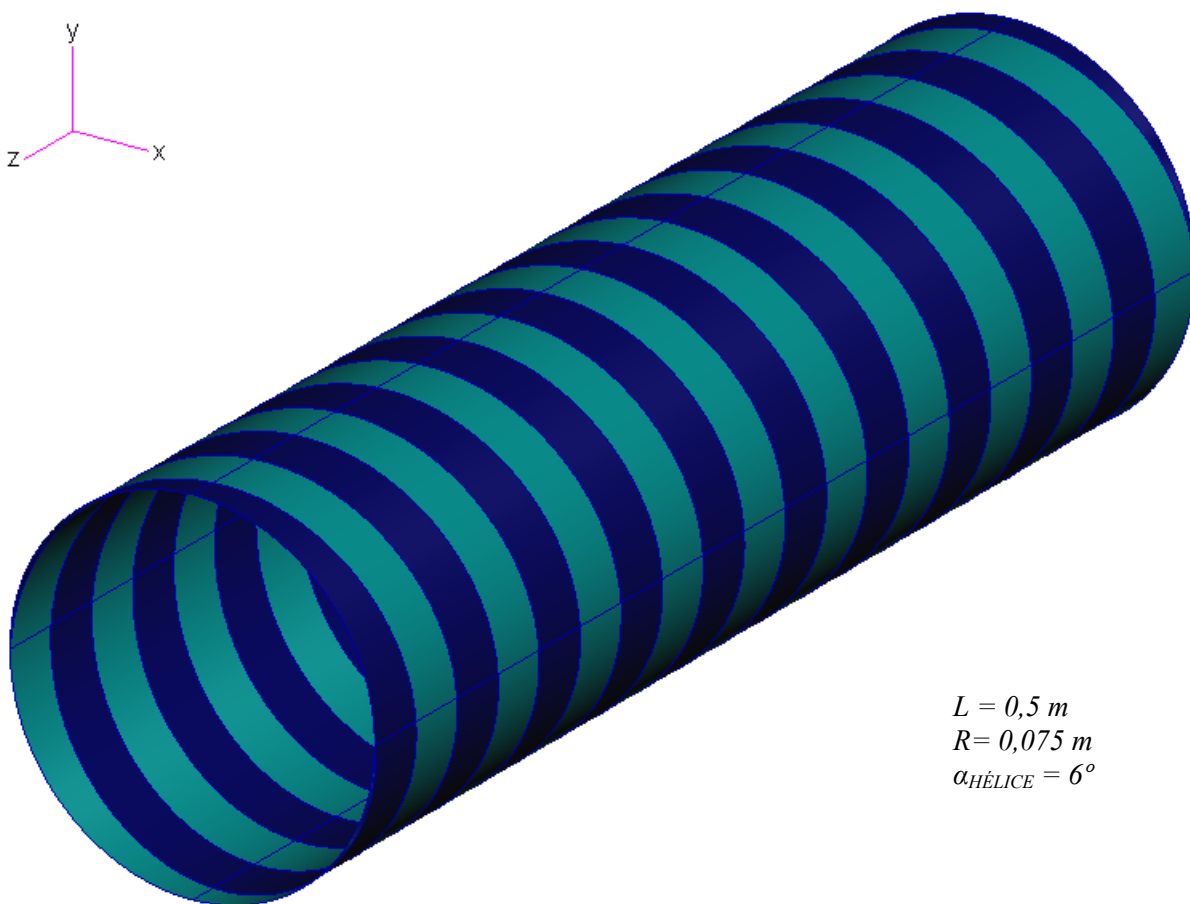
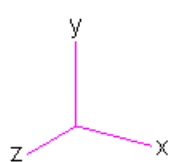


Fig. 1.5.9. Hélice Simple
Vista Frontal



$$\begin{aligned}L &= 0,5 \text{ m} \\R &= 0,075 \text{ m} \\ \alpha_{\text{HÉLICE}} &= 6^\circ\end{aligned}$$

Fig. 1.5.10. Hélice Simple
Vista General

1.6. Geometría 6 (Proceso constructivo)

Cilindro principal con recubrimiento auxiliar helicoidal doble.

- Circunferencia de radio $R = 0,075$ m, generatriz de longitud $L = 0,5$ m igual a la del cilindro (*Figura 1.6.1.*);

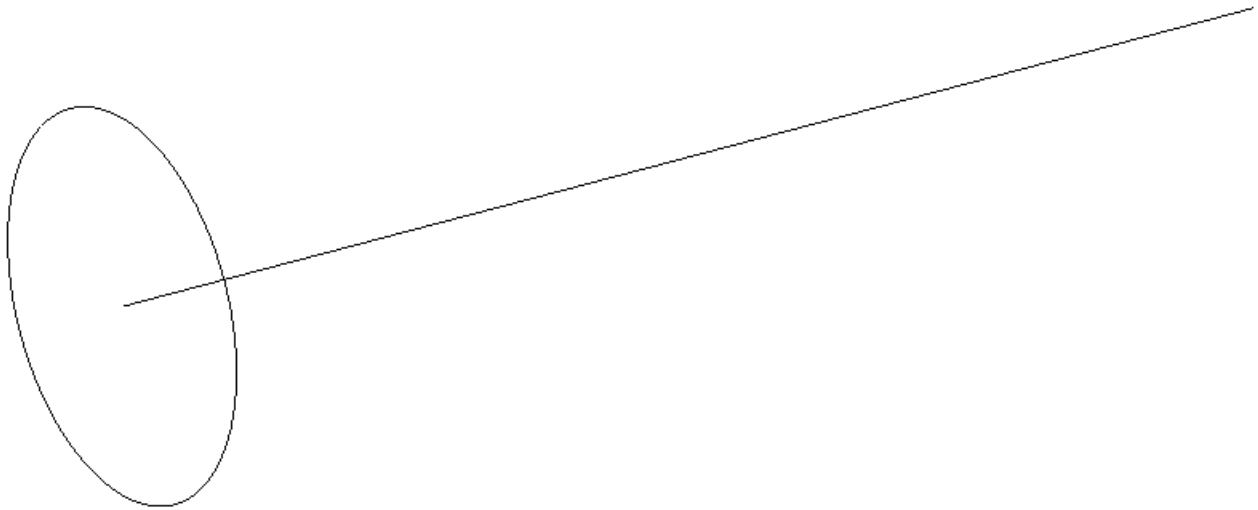


Fig. 1.6.1. Circunferencia base y Generatriz

- Se toma la circunferencia como evolvente para realizar una espiral simple a lo largo de la generatriz, con un paso de $L/12$, y un ángulo $\alpha = 6^\circ$ (*Figura 1.6.2.*);

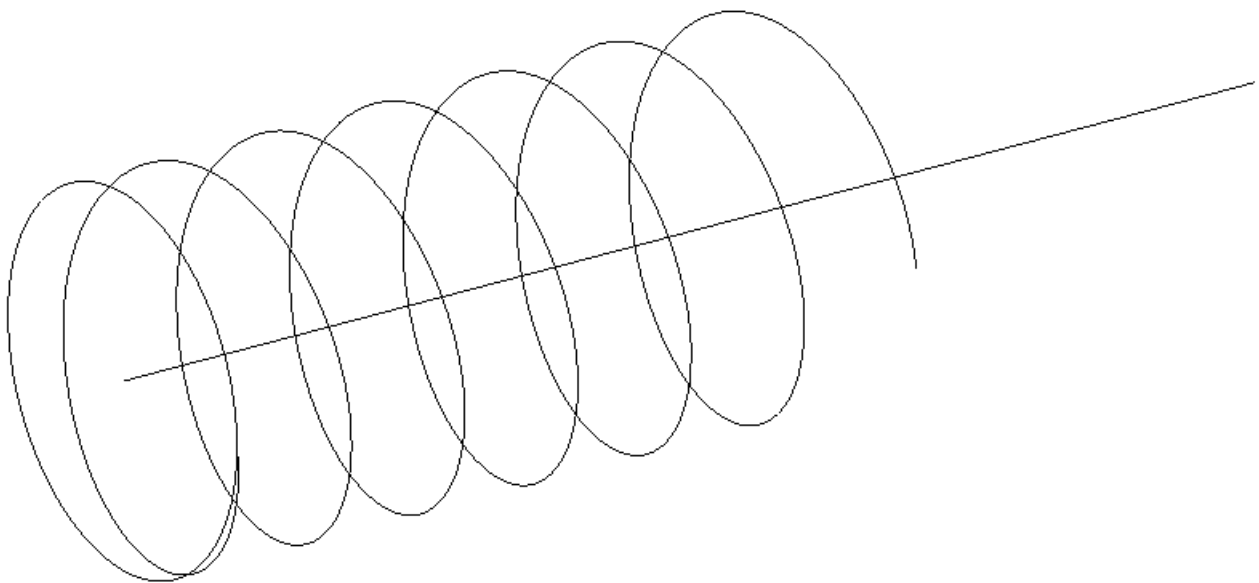


Fig. 1.6.2. Espiral Simple (parcial)

- Se realiza una segunda, tercera y cuarta espiral igual a la del paso anterior (*Figura 1.6.2.*), pero desfasada 90° , para conseguir una espiral cuádruple (*Figuras 1.6.3. y 1.6.4.*);

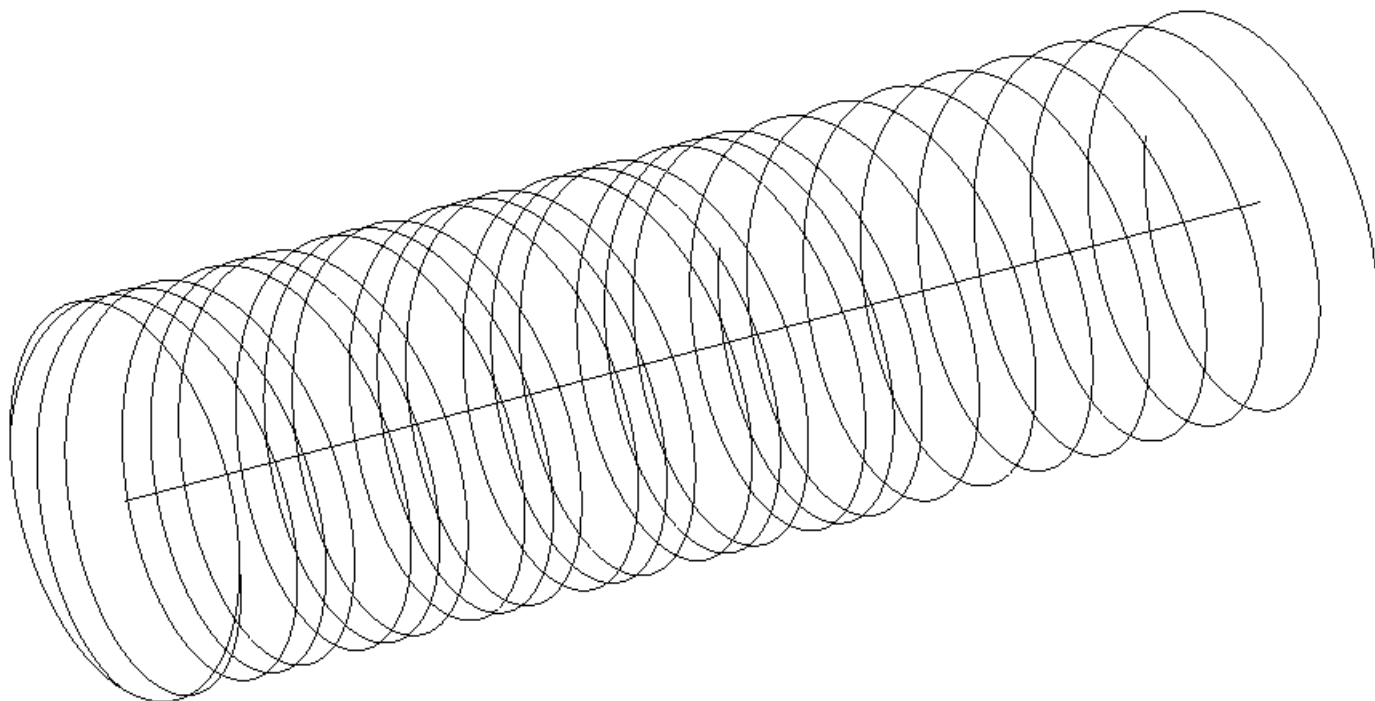


Fig. 1.6.3. Espiral Cuádruple (parcial)

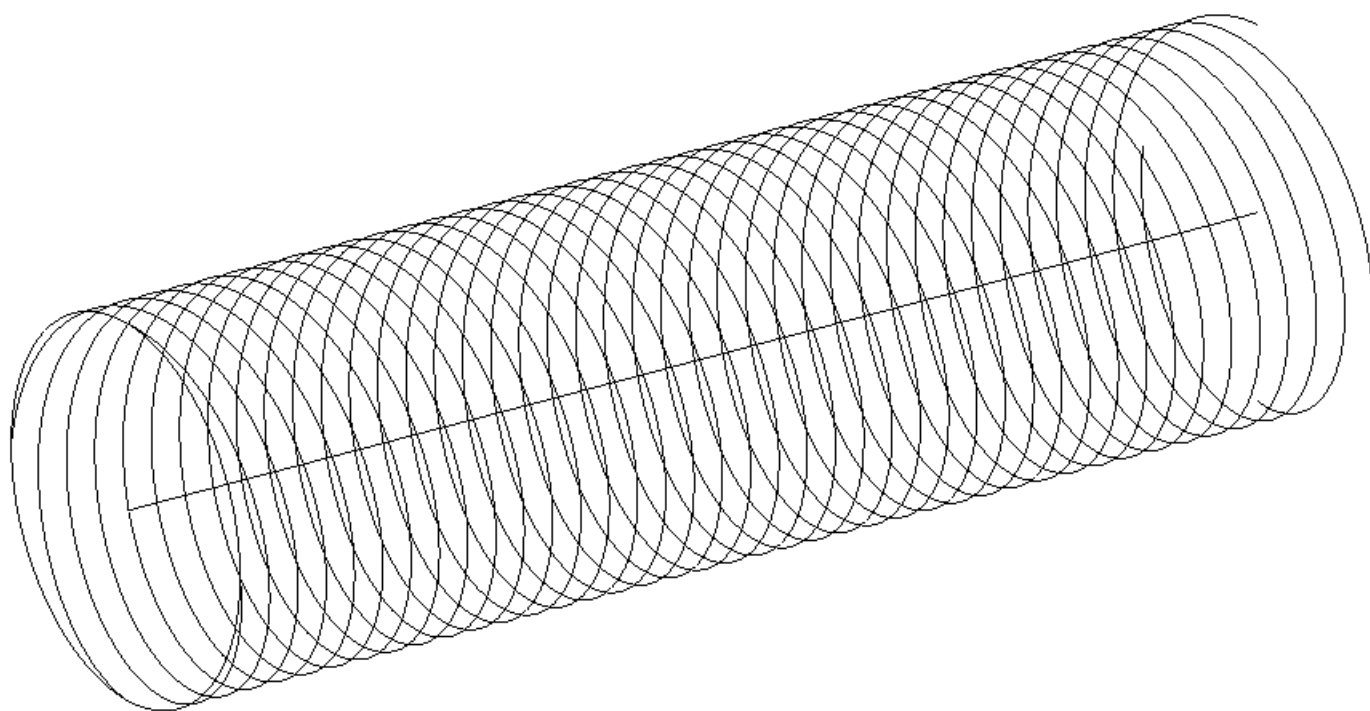


Fig. 1.6.4. Espiral Cuádruple (completa)

- Vamos rellenando las superficies entre las curvas (*Figura 1.6.5.*) constitutivas de la espiral cuádruple del paso anterior (*Figura 1.6.4.*), diferenciando la parte constitutiva de la hélice (*Figura 1.6.7.*) y del cilindro como complementario (*Figura 1.6.6.*);

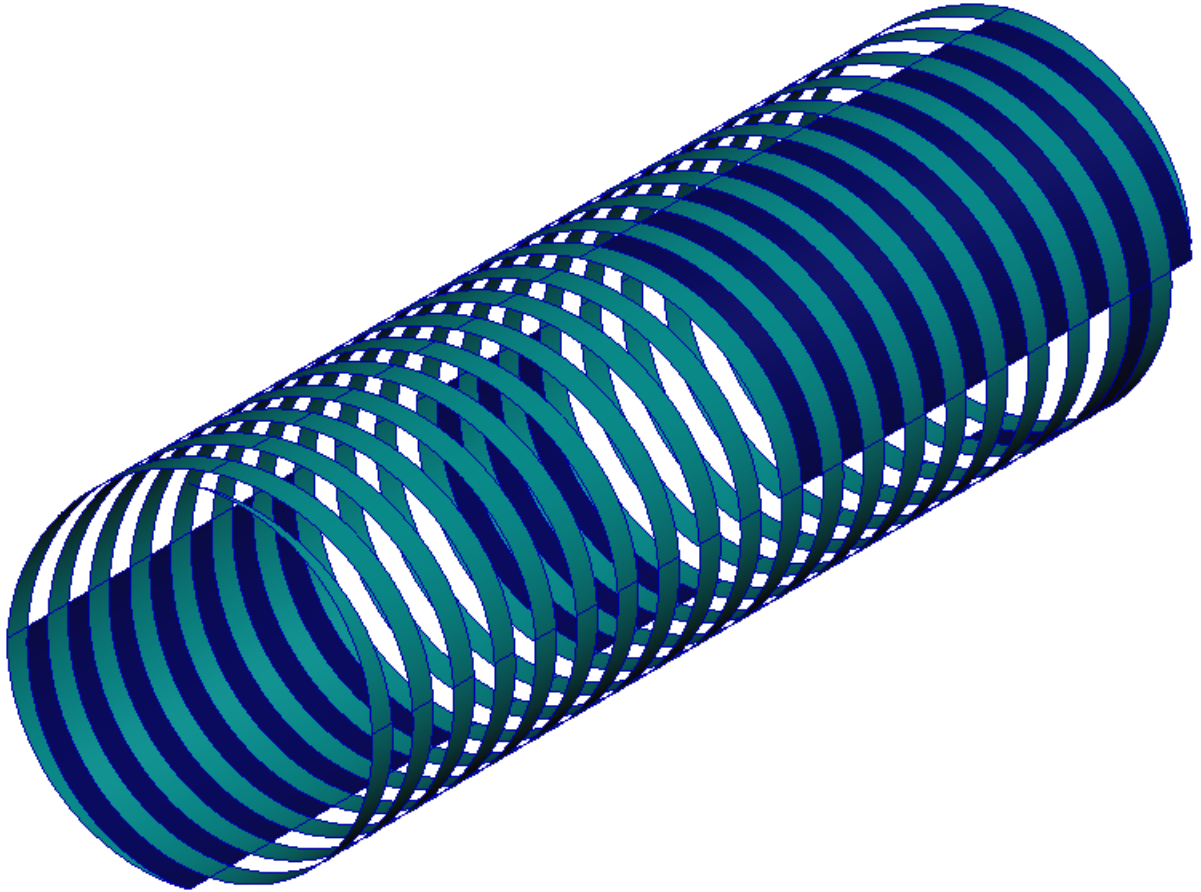


Fig. 1.6.5. Relleno de Superficies

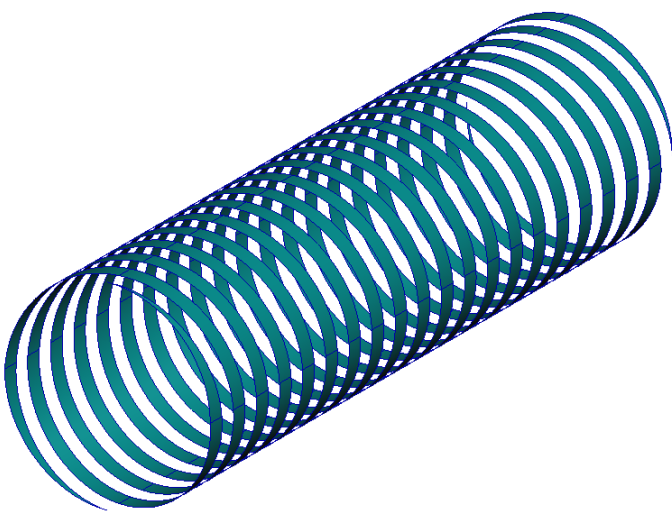


Fig. 1.6.6. Superficies del Cilindro Base (Complementario)

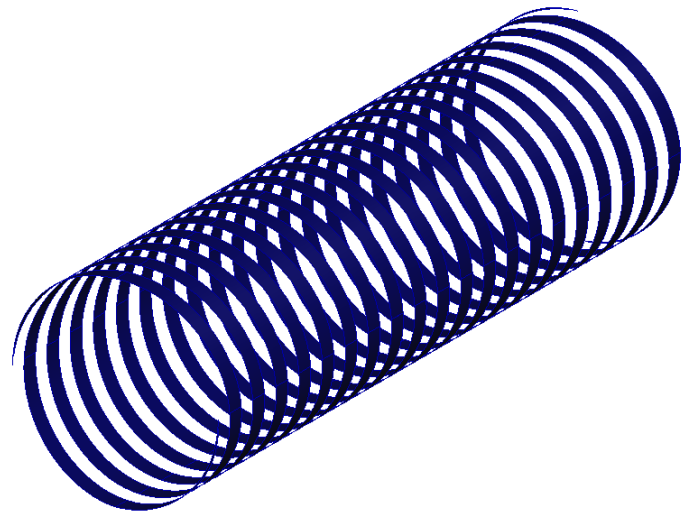


Fig. 1.6.7. Superficies de la Espiral Doble

- El resultado final (Figura 1.6.8., 1.6.9. y 1.6.10.) es el deseado: una espiral doble;

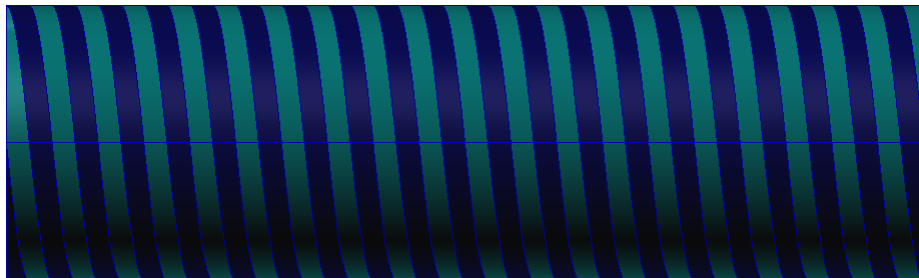


Fig. 1.6.8. Hélice Doble
Vista Lateral

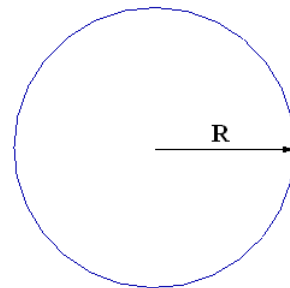


Fig. 1.6.9. Hélice Doble
Vista Frontal

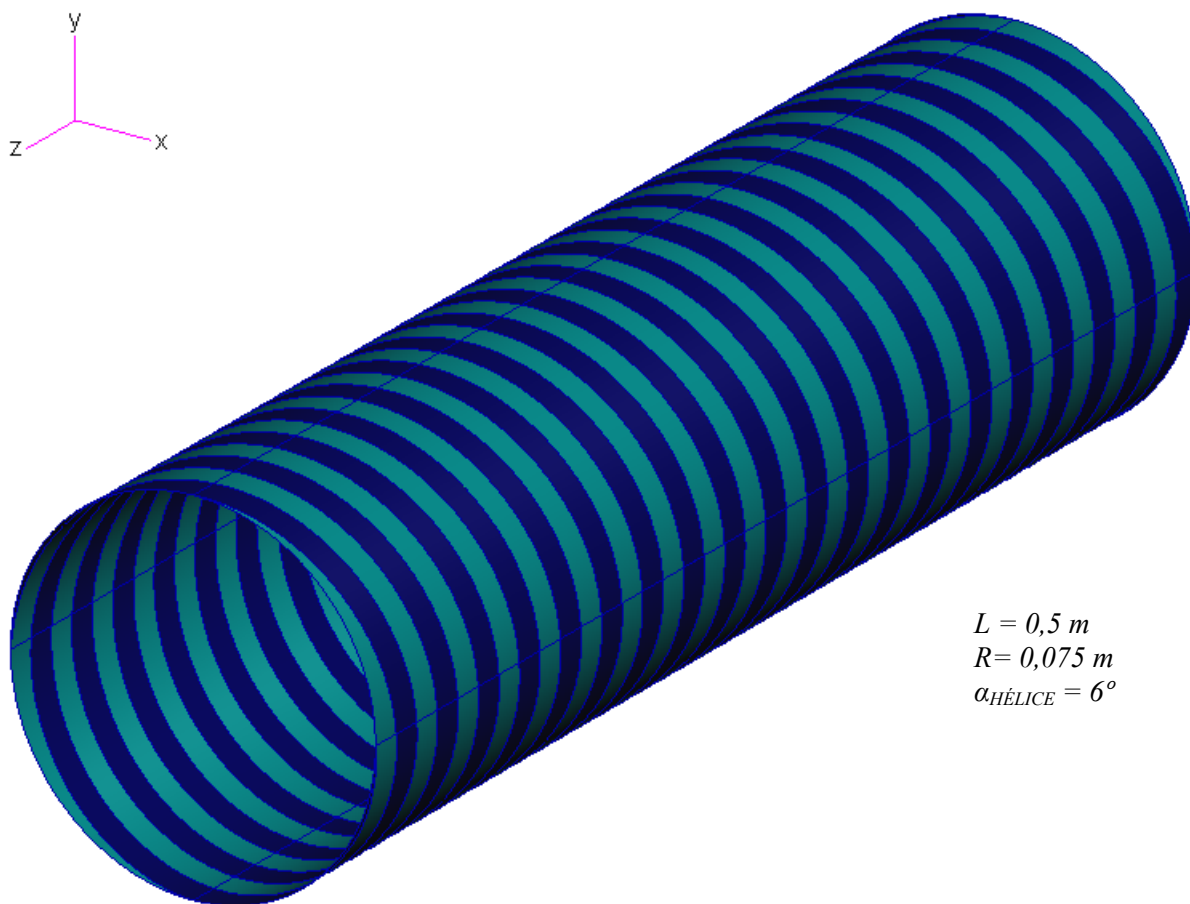
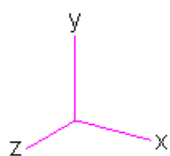


Fig. 1.6.10. Hélice Doble
Vista General

2. Cálculos justificativos de Espesor

2.1. Configuración con cilindros auxiliares interiores

- Absorbedor de impactos de referencia (Geometría 1, Figura 2.1.1.);

Densidad = ρ_R

Longitud = L

Espesor = e_R

$$P_{TOTAL R} = \pi (R_{ext} - R_{int})^2 L \rho_R = \pi e^2 L \rho_R$$

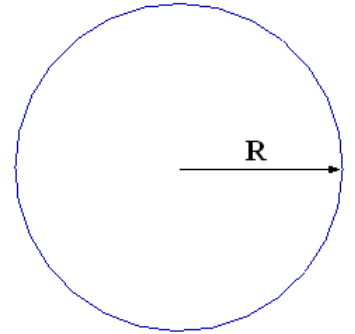


Fig. 2.1.1. Configuración de Referencia

- Absorbedor de impactos mejorado con cilindros auxiliares (Genérico, Figura 2.1.2.);

Densidad = ρ_M

Longitud = L

Espesor = e_M (Todos los cilindros presentan el mismo espesor)

$$\begin{aligned} P_{TOTAL M} &= [\pi (R_{1ext} - R_{1int})^2 + [\pi (R_{2ext} - R_{2int})^2] n_{cilindros}] L \rho_M = \\ &= [\pi e_M^2 + [\pi e_M^2] n_{cilindros}] L \rho_M = \\ &= [\pi e_M^2 + [\pi e_M^2] n_{cilindros}] L \rho_M = \\ &= (n_{cilindros} + 1) \pi e_M^2 L \rho_M \end{aligned}$$

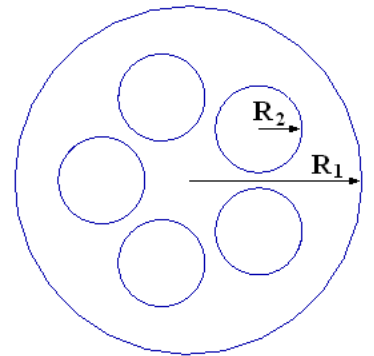


Fig. 2.1.2. Configuración Mejorada (Genérica)

$$P_{TOTAL R} = P_{TOTAL M}$$

$$\pi e^2 L \rho_R = (n_{cilindros} + 1) \pi e_M^2 L \rho_M$$

$$e_M = \sqrt{\frac{e^2 \rho_R}{(n_{cilindros} + 1) \rho_M}}$$

Podemos así calcular los espesores correspondientes a todas las configuraciones de cilindros auxiliares interiores, y para ambos materiales, tanto acero como duraluminio (*Tabla 2.1.1.*);

<i>ESPESOR</i>	<i>Geometría 1</i> $n_{cilindros} = 0$	<i>Geometría 2</i> $n_{cilindros} = 2$	<i>Geometría 3</i> $n_{cilindros} = 5$	<i>Geometría 4</i> $n_{cilindros} = 6$
<i>Acero</i> ($\rho = 7856 \text{ Kg/m}^3$)	<i>0,0025 m</i>	<i>0,00144 m</i>	<i>0,001 m</i>	<i>0,00094 m</i>
<i>Duraluminio</i> ($\rho = 2800 \text{ Kg/m}^3$)	<i>0,00418 m</i>	<i>0,0024 m</i>	<i>0,00172 m</i>	<i>0,00158 m</i>

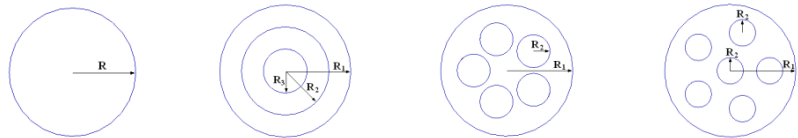


Tabla 2.1.1. Espesor para geometría de cilindros auxiliares interiores

2.2. Configuración con recubrimiento auxiliar Helicoidal

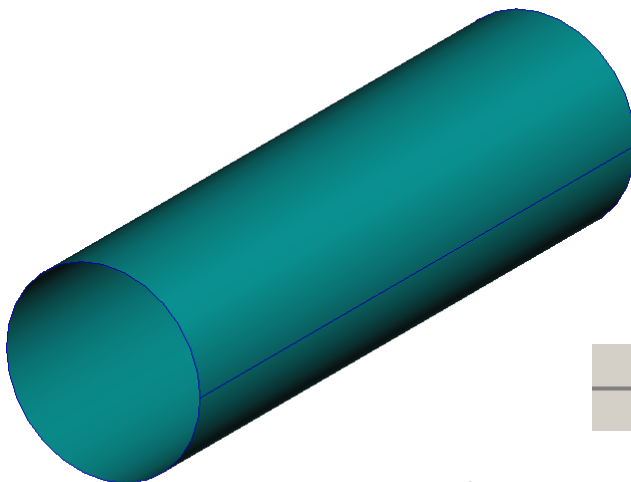
Para este caso, hemos usado el soporte de cálculo de áreas de Patran (*Figuras 2.2.1., 2.2.2., 2.2.3., 2.2.4. y 2.2.5.*);

- **Absorbedor de impactos de referencia (Geometría 1);**

Densidad = ρ_R

Espesor = e_R

$$P_{TOTAL R} = e_R A_{cilindro} \rho_R$$



Surface ID	Area
Summary	0.235619

Fig. 2.2.1. Área Geometría 1 con Patran

- **Absorbedor de impactos mejorado con hélices auxiliares (Genérico);**

Para este cálculo, y por razones constructivas para su posterior mallado, se han tomado dos áreas en consideración para formar el cilindro, la propia hélice y su complementario, como bien se ha explicado en el apartado del presente documento 1.5. Geometría 5 (Proceso constructivo) y 1.6. Geometría 6 (Proceso constructivo);

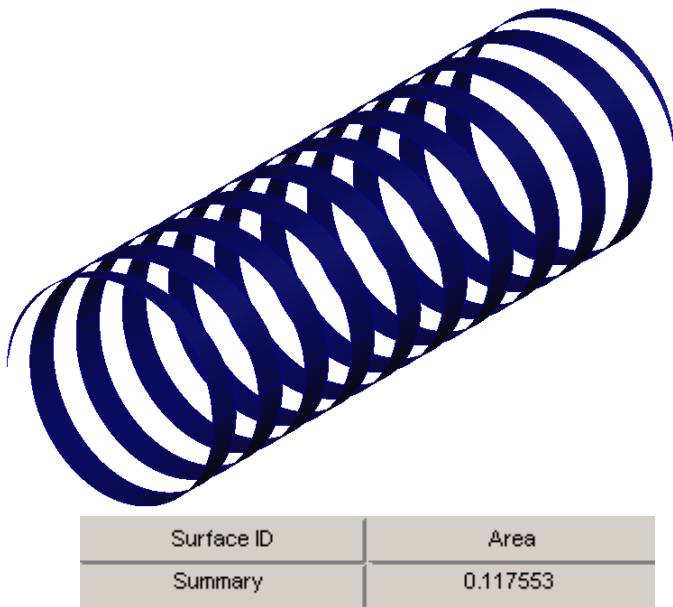


Fig. 2.2.2. Área Geometría 5 con Patran (Hélice)

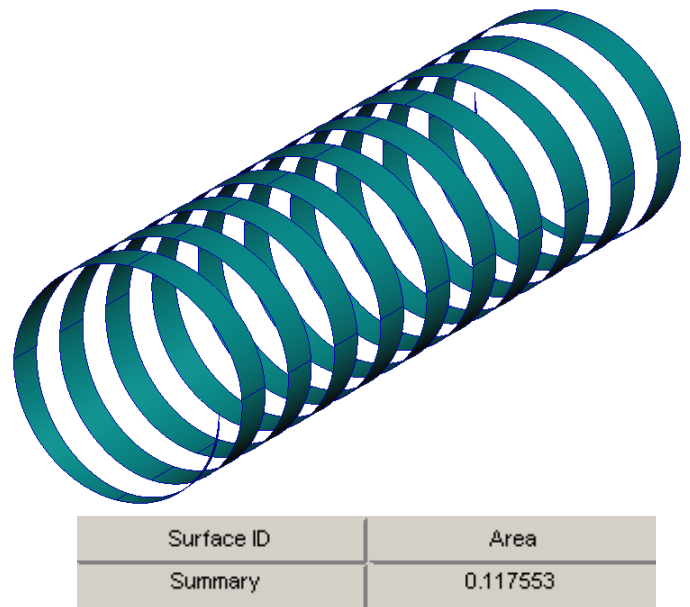


Fig. 2.2.3. Área Geometría 5 con Patran (Complementario)

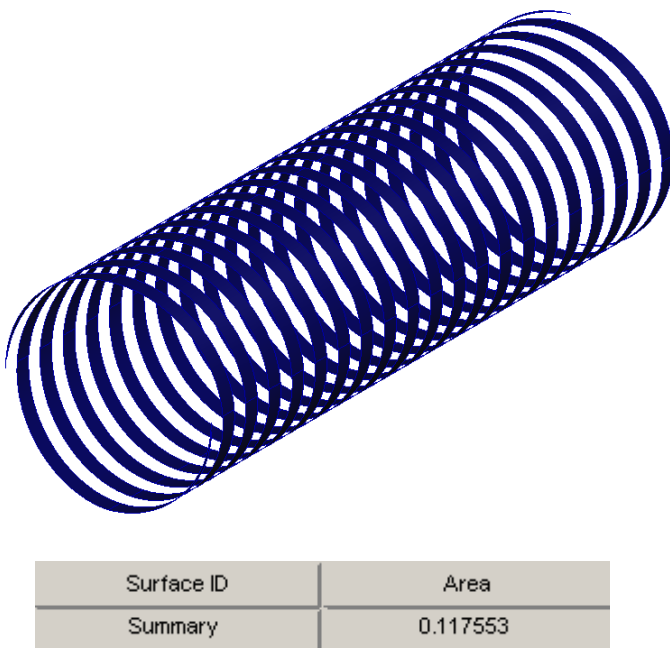


Fig. 2.2.4. Área Geometría 6 con Patran (Hélice)

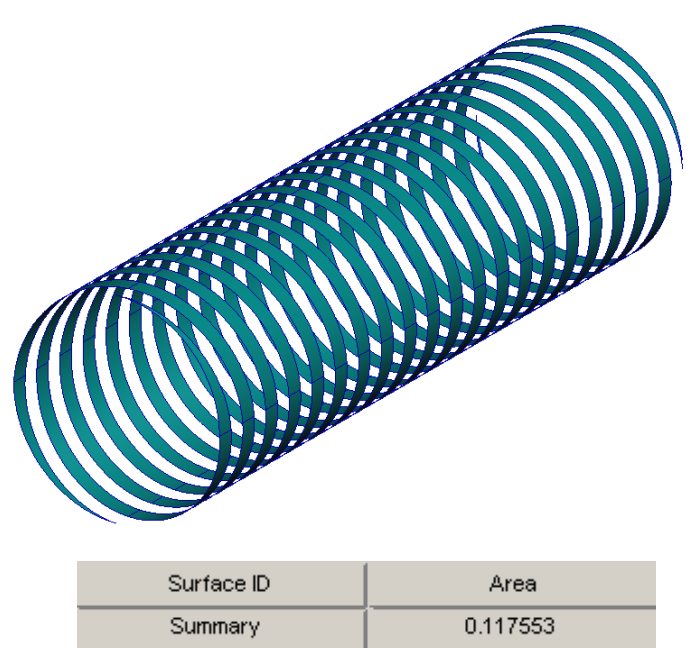


Fig. 2.2.5. Área Geometría 6 con Patran (Complementario)

$$A_{\text{hélice}} = A_{\text{complementario}} = A_M = A_{M5} = A_{M6}$$

$$\text{Densidad} = \rho_M$$

$$\text{Espesor} = e_R$$

$$P_{\text{TOTAL M}} = (A_{\text{hélice}} 2e_M + A_{\text{complementario}} e_M) \rho_M = 3e_M A_M \rho_M$$

$$e_R A_{\text{cilindro}} \rho_R = 3e_M A_M \rho_M$$

$$e_M = \frac{e_R A_{\text{cilindro}} \rho_R}{3e_M A_M \rho_M}$$

Podemos así calcular los espesores correspondientes a todas las configuraciones con recubrimiento auxiliar helicoidal, y para ambos materiales, tanto acero como duraluminio (Tabla 2.2.1.);

<i>ESPESOR</i>	<i>Geometría 1</i>	<i>Geometría 5 – 6</i>	
		<i>Hélice</i>	<i>Complementario</i>
<i>Acero ($\rho = 7856 \text{ Kg/m}^3$)</i>	<i>0,0025 m</i>	<i>0,00333 m</i>	<i>0.00166 m</i>
<i>Duraluminio ($\rho = 2800 \text{ Kg/m}^3$)</i>	<i>0,00418 m</i>	<i>0.00934 m</i>	<i>0.00465 m</i>

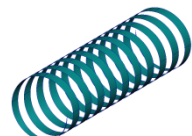
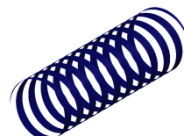
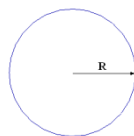


Tabla 2.2.1. Espesor para geometría de recubrimiento auxiliar helicoidal

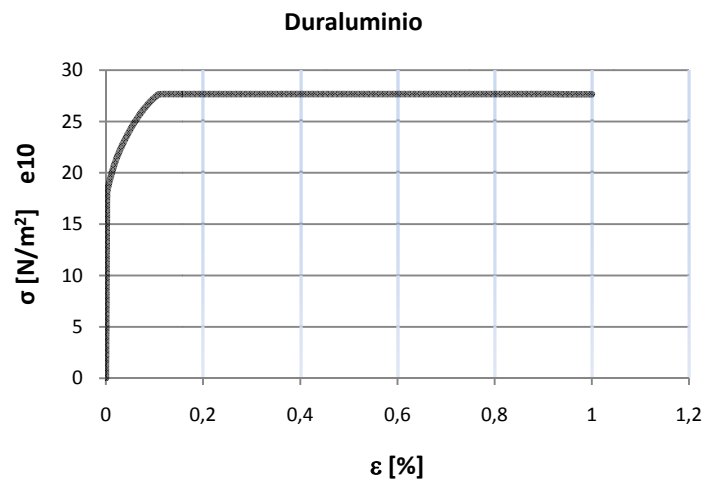
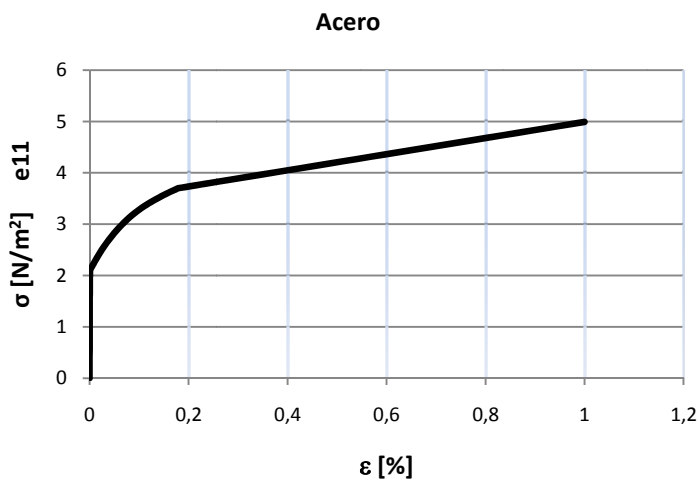
3. Materiales

- ACERO (Gráfica 3.1.):

$$\rho = 7856 \text{ Kg/m}^3 \quad E = 2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2 \quad \nu = 0,3$$

- DURALUMINIO (Gráfica 3.2.):

$$\rho = 2800 \text{ Kg/m}^3 \quad E = 7,1 \times 10^{10} \text{ N/m}^2 \quad \nu = 0,3$$



3

- PLACA RÍGIDA: $\rho = 20000 \text{ Kg/m}^3$ $E = 2,1 \times 10^{15} \text{ N/m}^2$ $\nu = 0,3$
 $e = 0,01 \text{ m}$ $L = 0,16 \text{ m}$

$$Ec = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \left[\left((0,16^2) 0,01 \right) 20000 \right] 166,66^2 = 71105,422 \text{ J}$$

4. Resultados completos en Abaqus

4.1. Geometría 1 – Acero (Absorbedor de Referencia)

Evolución de la geometría 1 en Acero en función del tiempo ($e = 0,0025\text{ m}$).

- **$t = 0\text{ s}$** : La placa todavía no ha impactado con el absorbedor (*Figura 4.1.1.*);

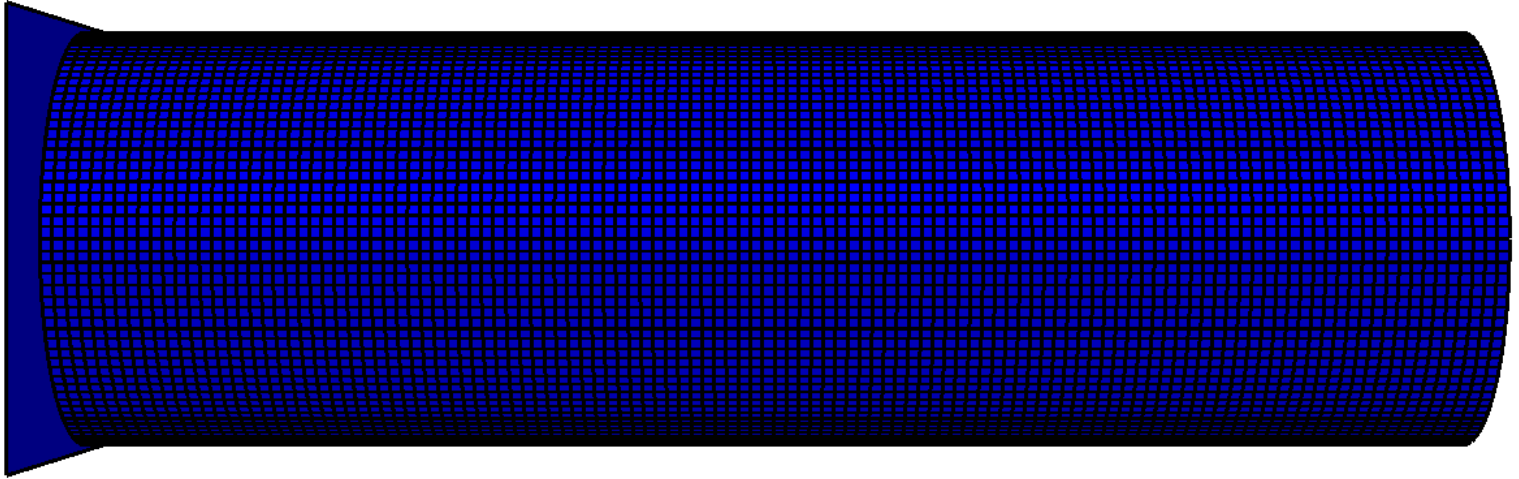


Fig. 4.1.1. $t = 0\text{ s}$

- **$t = 0,001\text{ s}$** : Tras el impacto, se puede ya observar la tendencia a la deformación del absorbedor, con la aparición de una marcada compactación del material en su base, mientras el material se va agolpando contra la placa rígida conforme avanza. Se empiezan a apreciar pequeñas estricciones previas a la compactación en la parte del absorbedor en contacto con la placa, y algunos elementos son expulsados del conjunto (*Figura 4.1.2.*);

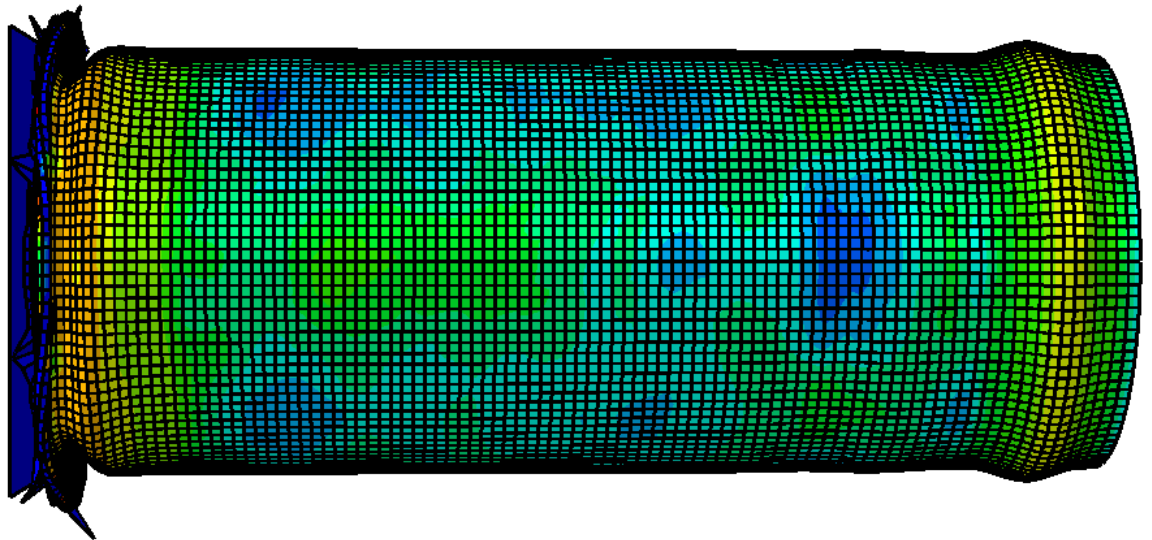


Fig. 4.1.2. $t = 0,001\text{ s}$

- **$t = 0,002$ s:** La compactación en la base es ya muy acusada. El resto del material sigue agolpándose y replegándose contra la placa, y se aprecian estricciones mayores previas a la compactación en la parte del absorbedor en contacto con la placa. (Se han eliminado del conjunto los elementos expulsados). (*Figura 4.1.3.*);

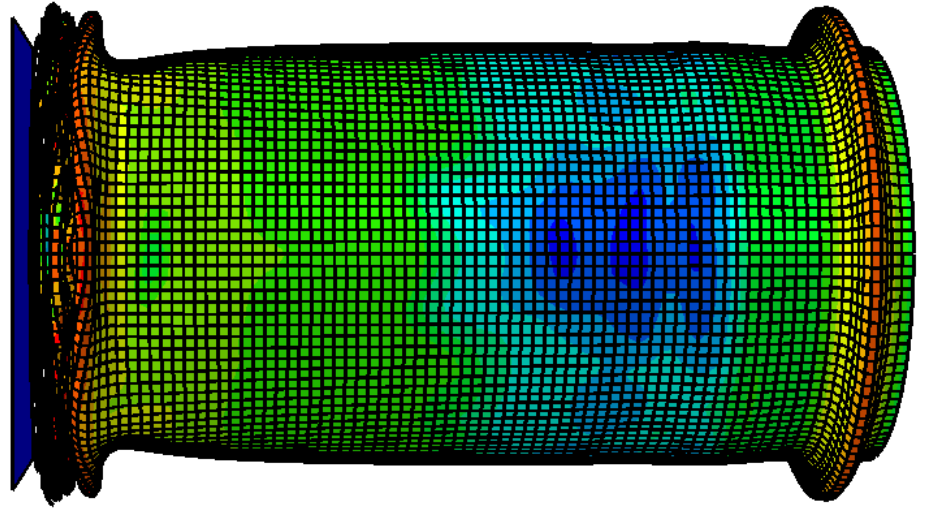


Fig. 4.1.3. $t = 0,002$ s

- **$t = 0,0035$ s:** La compactación en la base es ya tan acusada, que ha aparecido una segunda que se solapa con la primera. El resto del material sigue agolpándose y replegándose contra la placa, creando estricciones y compactaciones ya en ambos extremos. (Se han eliminado del conjunto los elementos expulsados). (*Figura 4.1.4.*);

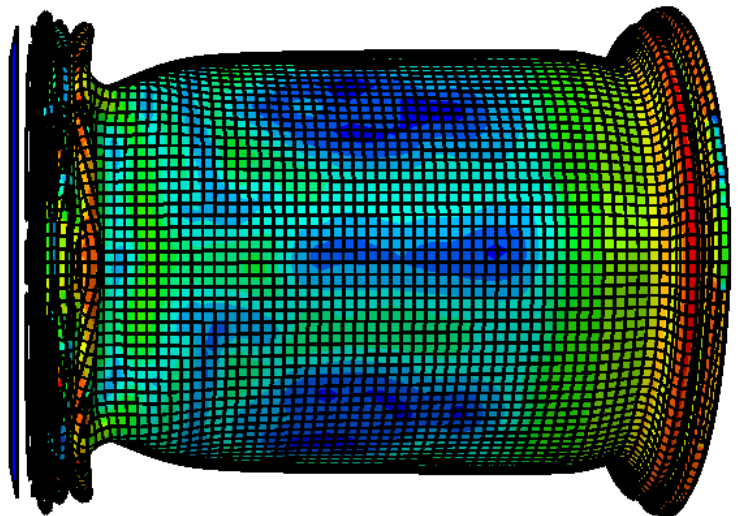


Fig. 4.1.4. $t = 0,0035$ s

- **$t = 0,005$ s:** Se siguen sucediendo las compactaciones en ambos extremos, solapándose unas con otras, asemejándose a la forma de un acordeón. La placa casi se ha detenido. (Se han eliminado del conjunto los elementos expulsados). (*Figura 4.1.5.*);

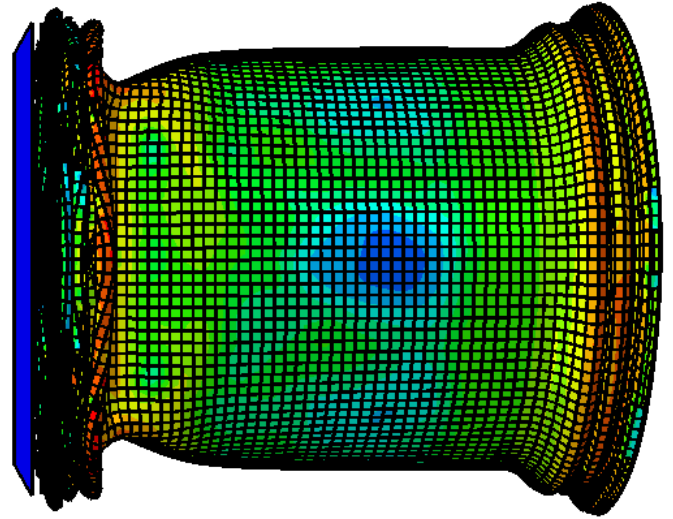


Fig. 4.1.5. $t = 0,005$ s

- **$t = 0,0055$ s:** La placa se ha detenido por completo, e incluso se desplaza ligeramente hacia atrás. La forma final del absorbedor casi no ha presentado variaciones respecto del instante anterior. Los esfuerzos han descendido de manera muy acusada. (Se han eliminado del conjunto los elementos expulsados). (*Figura 4.1.6.*);

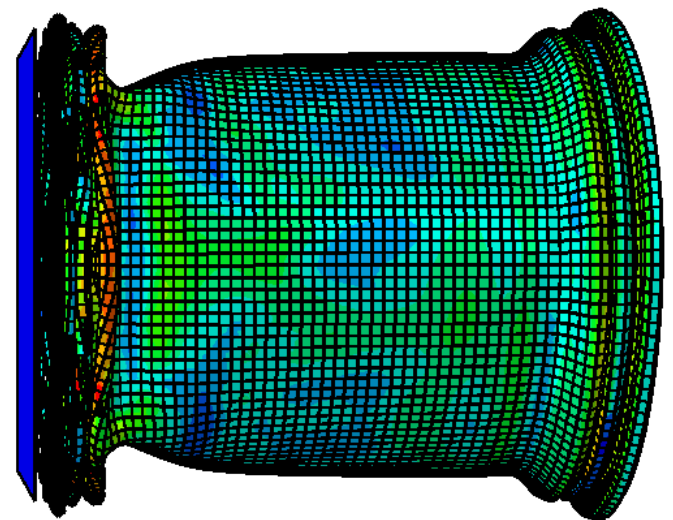
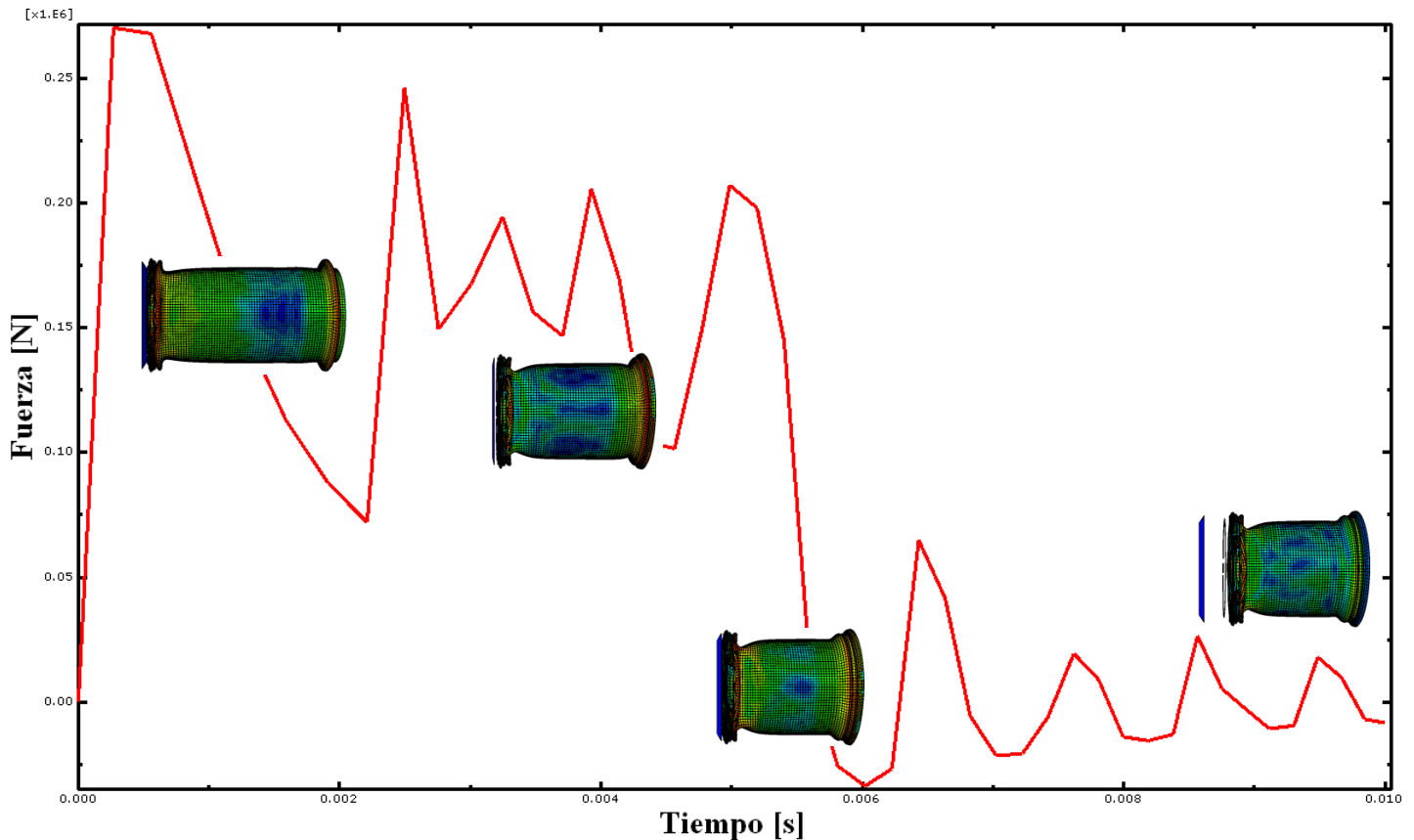


Fig. 4.1.5. $t = 0,0055$ s

- **Gráficas de comportamiento:** (Gráficas 4.1.1., 4.1.2. y 4.1.3.)



Gráfica 4.1.1. Reacciones en la base – Geometría 1 – Acero

La gráfica está referenciada a las reacciones en el eje Z de todos los nodos de la base del absorbedor.

Estas reacciones presentan grandes desviaciones, debido a la aparición de las deformaciones en el cuerpo del absorbedor mencionadas anteriormente.

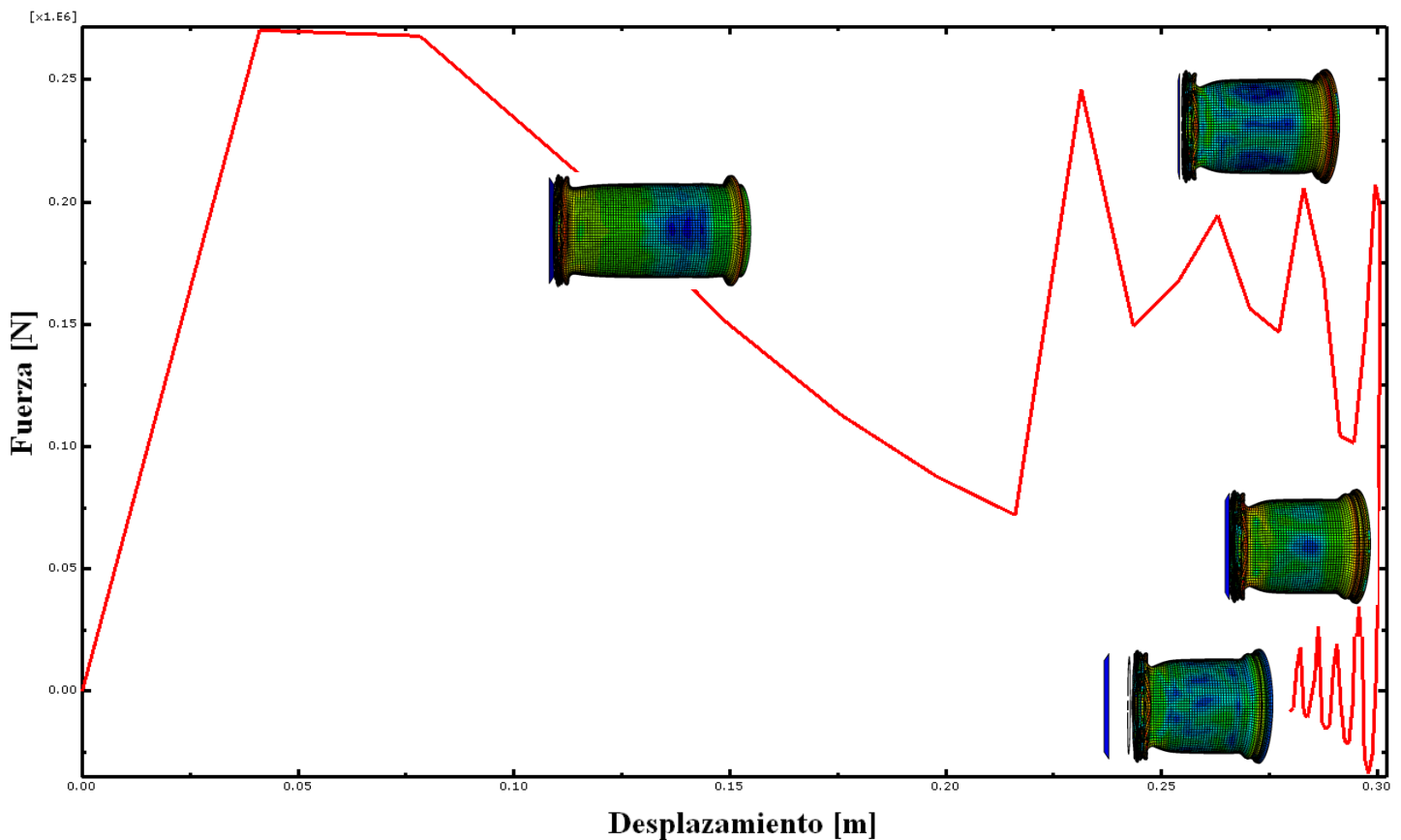
Podemos observar una gran reacción inicial, en el momento del impacto.

Posteriormente, y en el mismo instante que empieza a aparecer la compactación principal en la base del absorbedor y los primeros pliegues en la parte en contacto con la placa, el valor de la fuerza decae.

Poco a poco, el absorbedor va plegándose sobre sí mismo y creando la forma de acordeón, apreciándose grandes altibajos.

En los momentos finales, los pliegues se solapan unos con otros, deteniendo totalmente a la placa. El valor de la fuerza decae totalmente a 0,00541 segundos.

Debido a la recuperación elástica del material, la expansión longitudinal de éste crea las desviaciones finales, positivas y negativas, muy inferiores al resto hasta la estabilización final.



Gráfica 4.1.2. Tensión-Deformación – Geometría 1 – Acero

La gráfica esté referenciada a los esfuerzos y desplazamientos sobre la placa rígida que impacta contra el absorbedor.

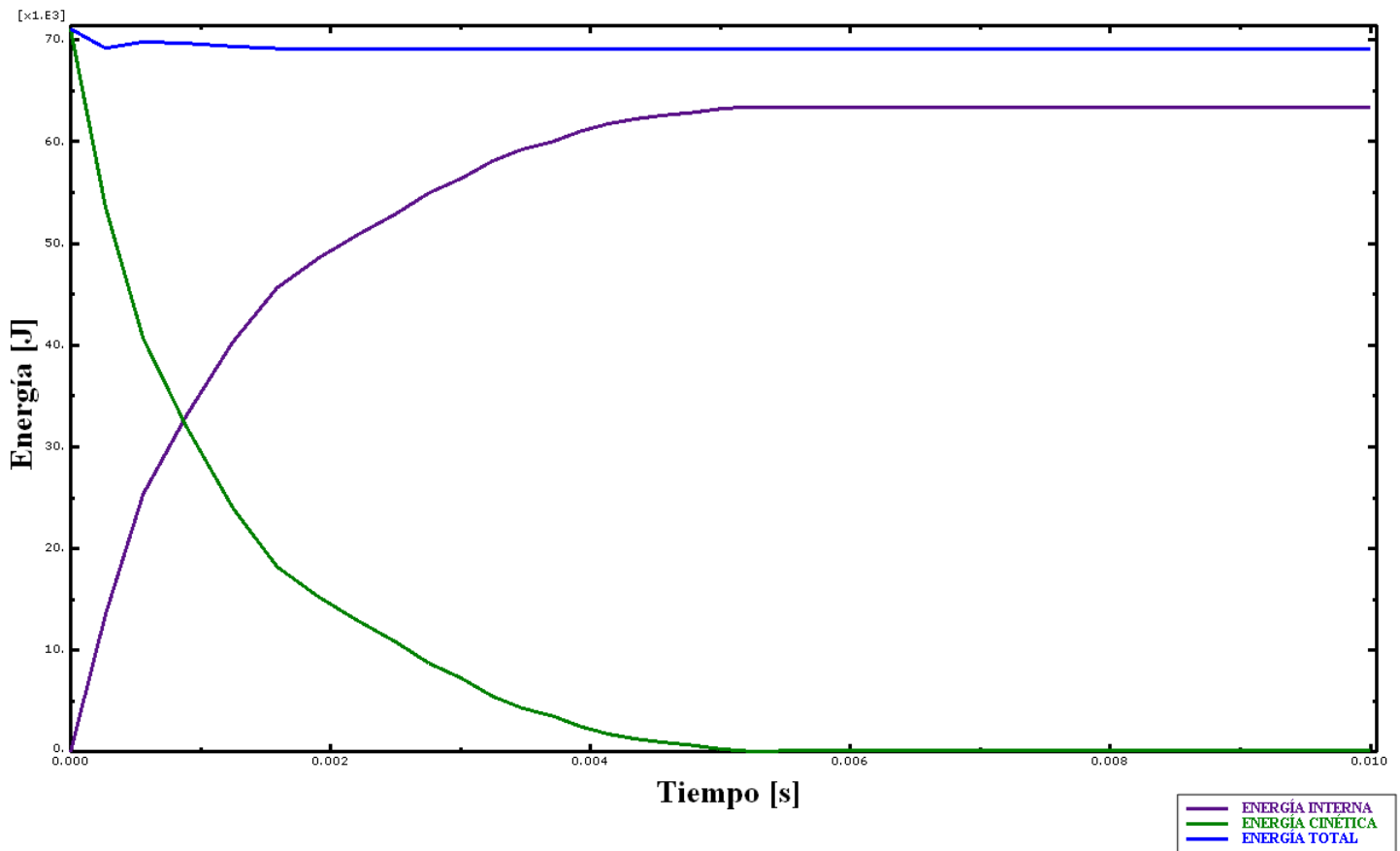
De forma análoga a la *Gráfica 4.1.1.*, el desplazamiento no es uniforme.

Posteriormente al momento del impacto, en donde se presenta la mayor y más pronunciada deformación debido a la aparición de la compactación principal en la base del absorbedor y los primeros pliegues en la parte en contacto con la placa, se suaviza el desplazamiento.

Es interesante la parte final de la gráfica, donde se pueden apreciar grandes altibajos, sin duda debidos a la aparición de los pliegues en forma de acordeón.

Al final, la placa se detiene completamente, incluso se aprecia un retorno de la misma, debido a la recuperación elástica del material.

Aunque visualmente hemos observado la efectividad del absorbedor al detener completamente a la placa (absorción total de la energía cinética, correspondiente al área por debajo de la gráfica), la eficacia del mismo vendrá dado por el intervalo de tiempo necesario para ello.



Gráfica 4.1.3. Energía – Geometría 1 – Acero

La energía cinética de la placa es de **71105,422 J**.

La energía interna máxima, que corresponde con la energía absorbida, es de **63429,1 J**.

El tiempo de absorción es de **0,00541 s**.

Como se puede observar, hay un desajuste entre la energía cinética y la absorbida. Este desajuste es debido a numerosos procesos intermedios como el rozamiento y la pequeña disminución de la energía total del sistema.

La energía total del sistema, que debería ser constante, presenta una pequeña disminución en el momento del impacto, para luego estabilizarse.

Esta disminución es debida a los propios procesos de análisis del software Abaqus, que deprecia para el cálculo los elementos que han sido completamente destruidos, por lo que las energías de éstos no se contabilizan. La mayor parte de estos elementos son destruidos en el momento del impacto.

Cabe resaltar que una elección adecuada del tamaño de malla es crucial. Con un tamaño de elementos muy grande, la depreciación de sus grandes áreas ocasiona un comportamiento diferente y peor al esperado.

Un tamaño de elementos muy pequeño, a pesar de lograr un cálculo más estricto con cada vez menores depreciaciones, aumenta de manera desproporcionada el tiempo de análisis.

4.2. Geometría 1 – Duraluminio

Evolución de la geometría 1 en Duraluminio en función del tiempo ($e = 0,00418\text{ m}$).

- **$t = 0\text{ s}$** : La placa todavía no ha impactado con el absorbedor (*Figura 4.1.1.*).
- **$t = 0,0005\text{ s}$** : El impacto recorre el absorbedor en toda su longitud. La parte en contacto con la placa empieza a plegarse sobre sí misma y es expulsada hacia el exterior. Algunos elementos son expulsados del conjunto. La base empieza a mostrar el inicio de compactación (*Figura 4.2.1.*);

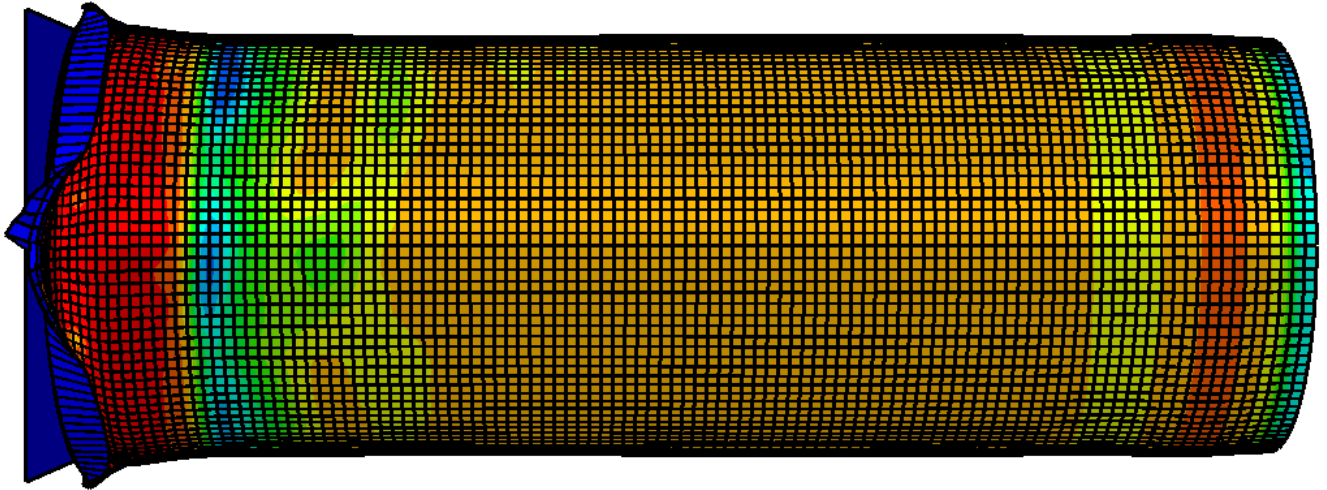


Fig. 4.2.1. $t = 0,0005\text{ s}$

- **$t = 0,001\text{ s}$** : La similitud con la configuración en Acero es evidente, aunque el absorbedor soporta peor los esfuerzos, a pesar de aumentar su espesor. Las estricciones y compactaciones en la zona en contacto con la placa son más marcadas, y la compactación en la base, aunque menos pronunciada, más acusada. (Se han eliminado del conjunto los elementos expulsados) (*Figura 4.2.2.*);

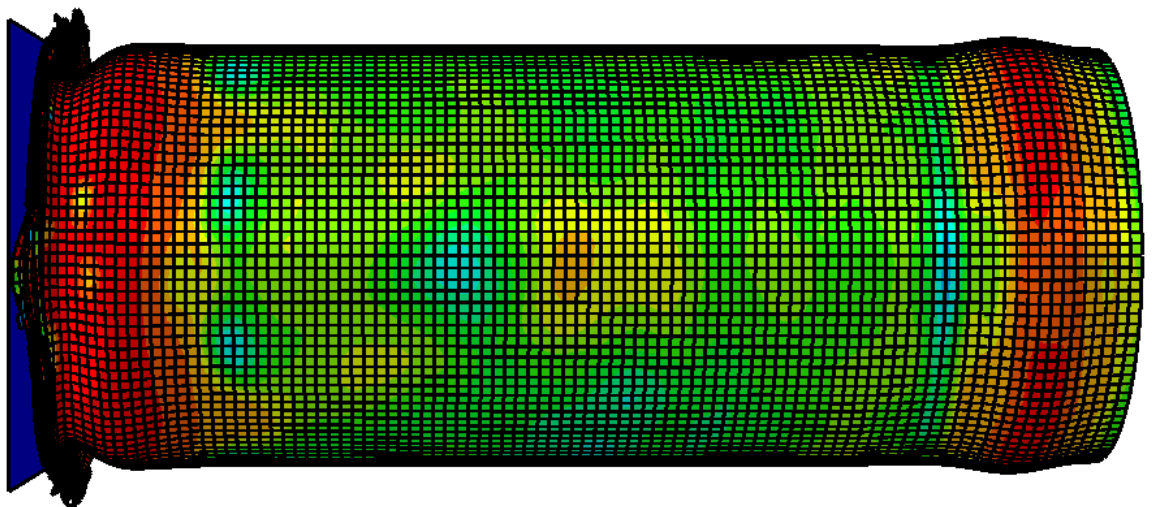


Fig. 4.2.2. $t = 0,001\text{ s}$

- **$t = 0,002$ s:** La compactación en la zona en contacto con la placa es muy acusada, presentando ya forma de acordeón. El resto del material sigue agolpándose y replegándose. Se siguen apreciando pequeñas estricciones previas a la compactación, e incluso pliegues. La compactación en la base, por el contrario, es más suave. (Se ha eliminado del conjunto el material expulsado). (*Figura 4.2.3.*);

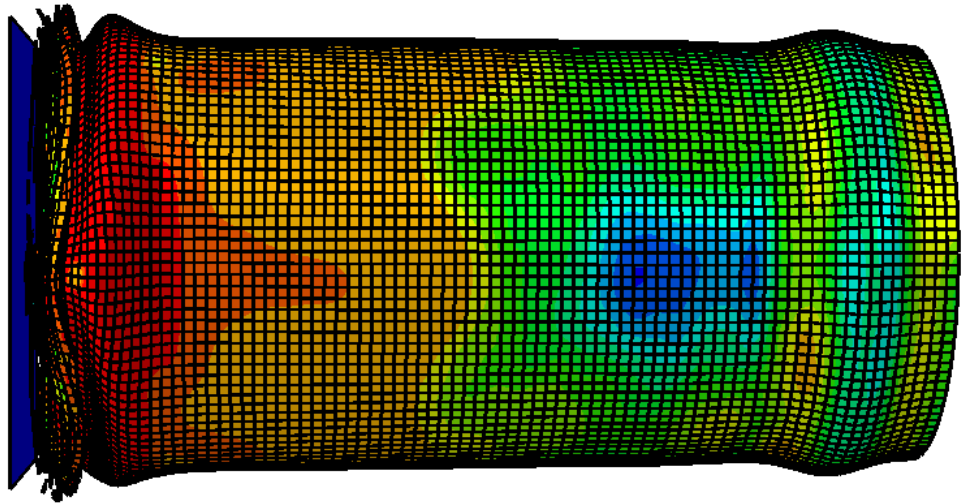


Fig. 4.2.3. $t = 0,002$ s

- **$t = 0,003$ s:** La forma de acordeón es más que evidente en la zona en contacto con la placa, y en un instante anterior a la configuración en Acero. La compactación en la base, por el contrario, es mucho más suave, y única. La placa casi se ha detenido. (Se ha eliminado del conjunto el material expulsado). (*Figura 4.2.4.*);

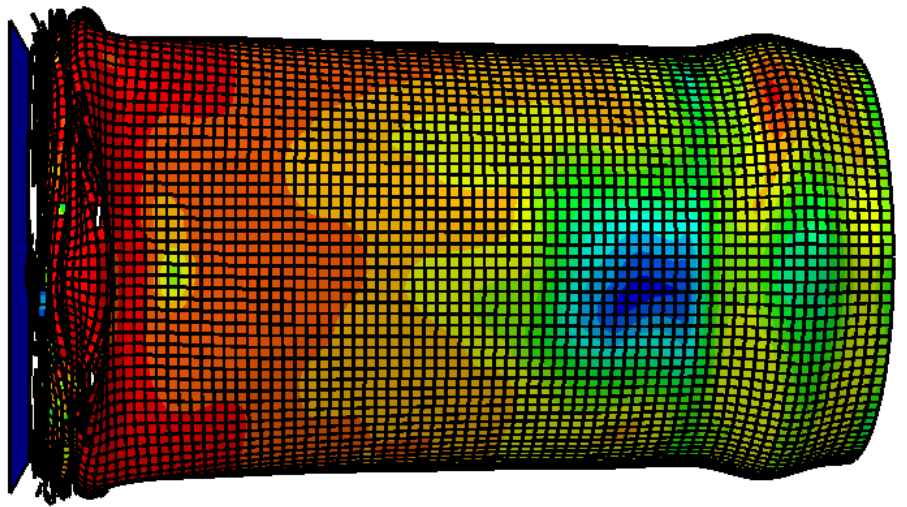


Fig. 4.2.4. $t = 0,003$ s

- **$t = 0,004$ s:** La placa se ha detenido por completo, e incluso se desplaza ligeramente hacia atrás. La forma final del absorbedor casi no ha presentado variaciones respecto del instante anterior. Los esfuerzos han descendido de manera muy acusada. (Se han eliminado del conjunto los elementos expulsados). (Figura 4.2.5.);

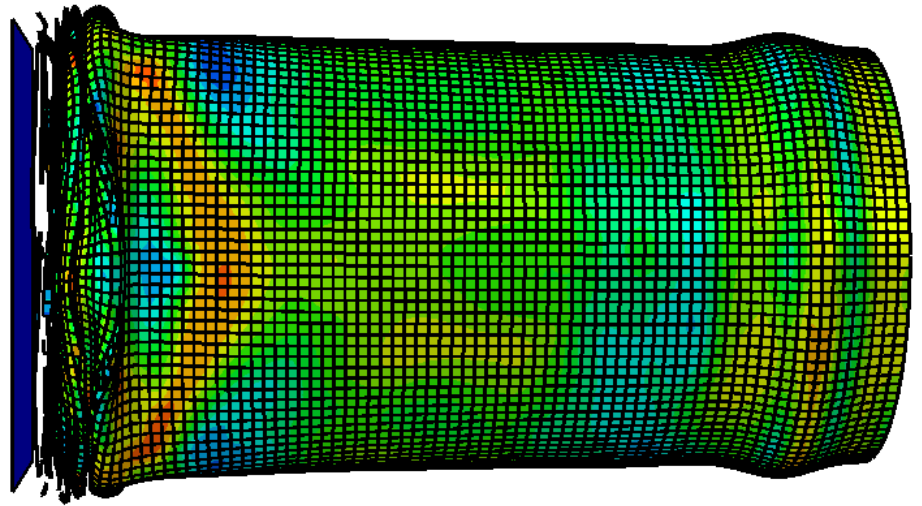
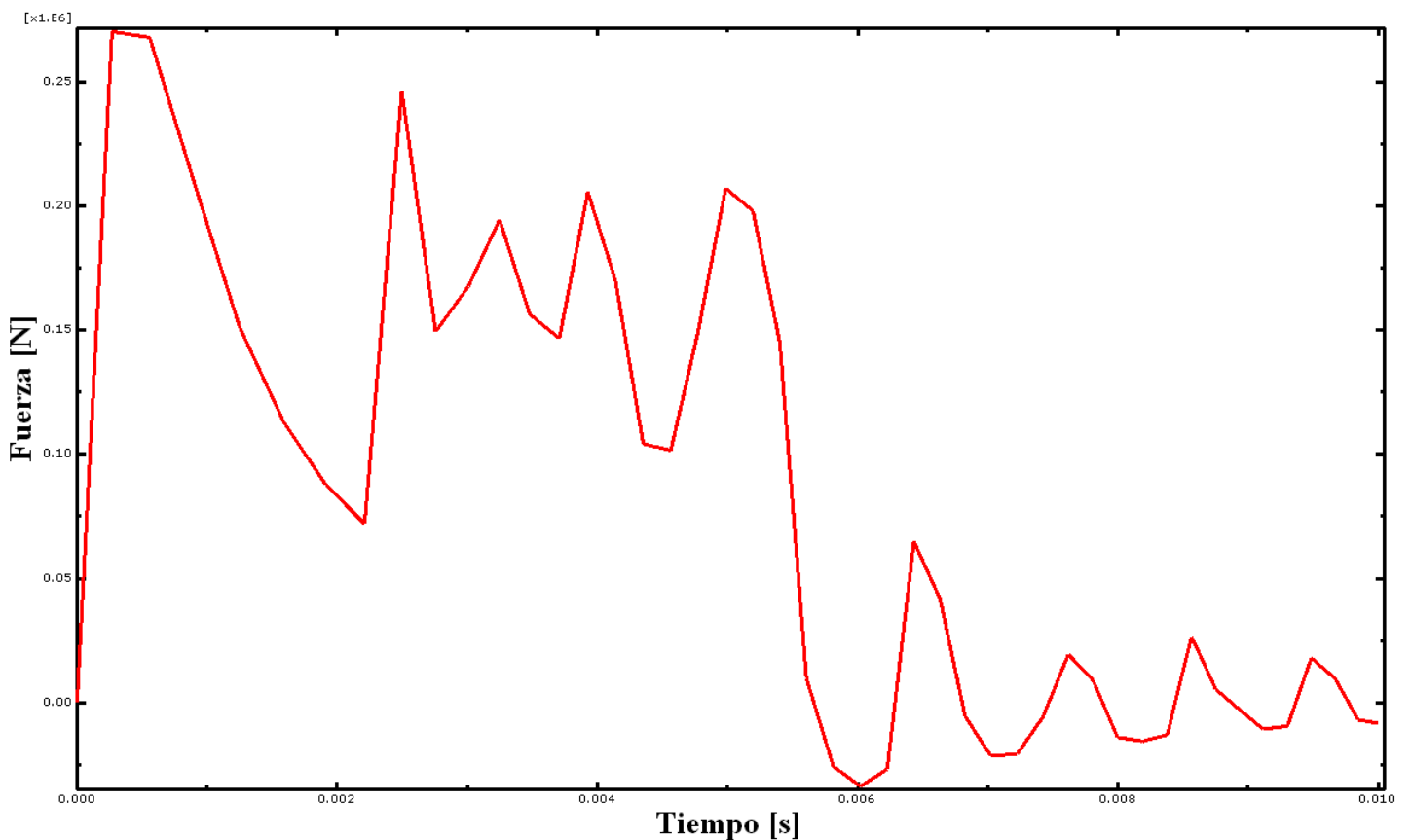
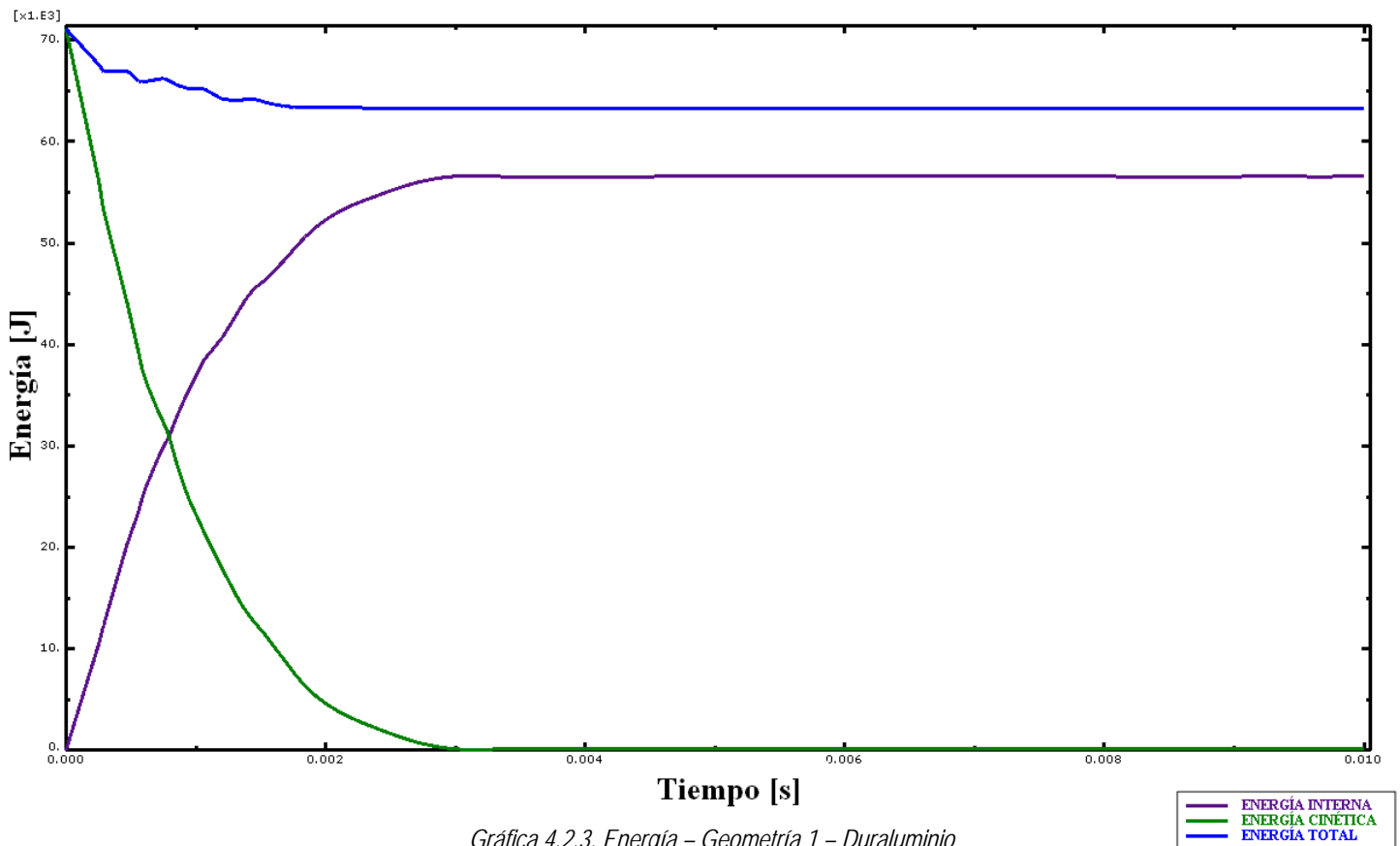
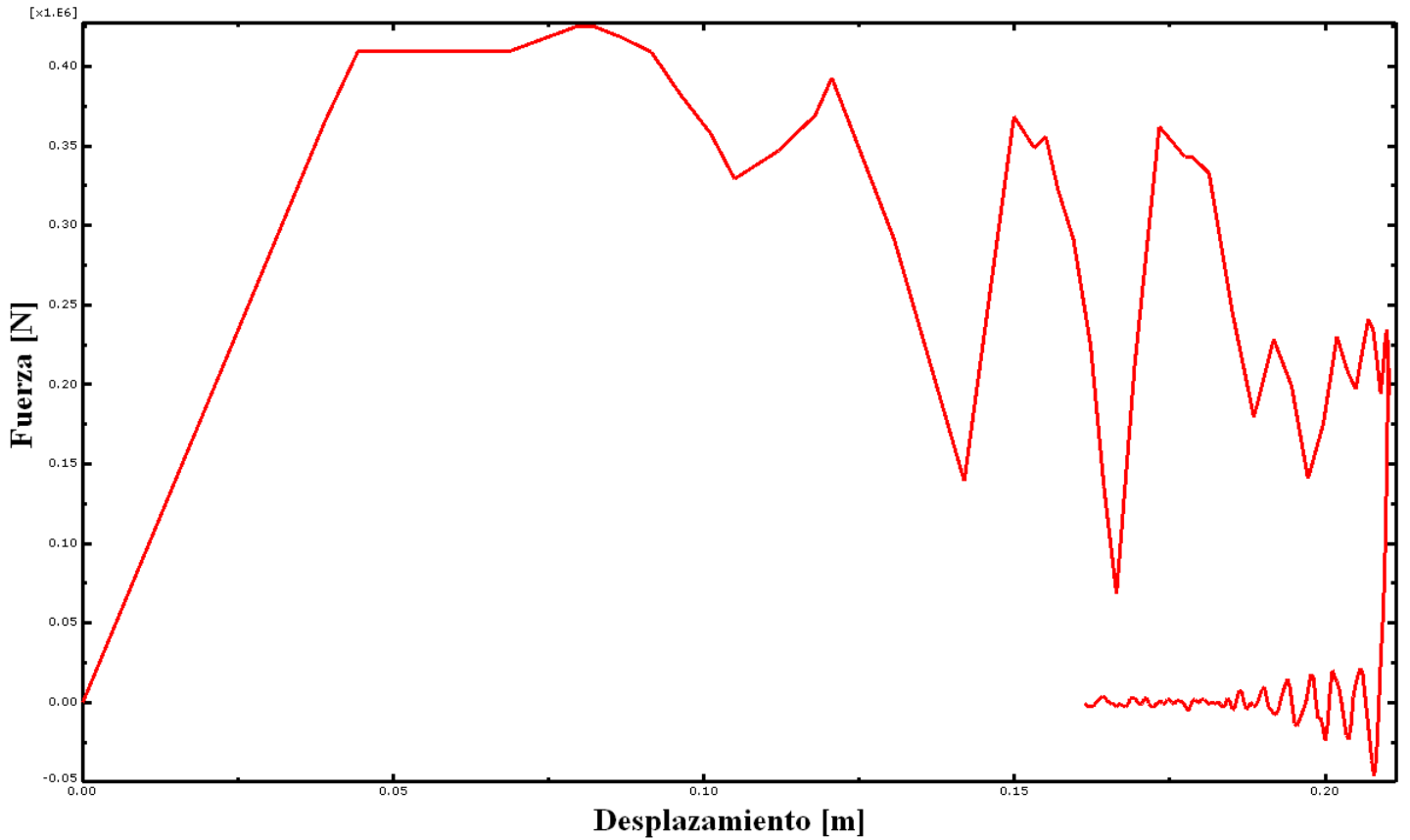


Fig. 4.2.5. $t = 0,004$ s

- **Gráficas de comportamiento:** (Gráficas 4.2.1., 4.2.2. y 4.2.3.)



Gráfica 4.2.1. Reacciones en la base – Geometría 1 – Duraluminio



La energía interna máxima, que corresponde con la energía absorbida, es de **56661,7 J**.
El tiempo de absorción es de **0,00314 s**.

4.3. Geometría 2 – Acero

Evolución de la geometría 2 en Acero en función del tiempo ($e = 0,00144\text{ m}$).

- **$t = 0\text{ s}$** : La placa todavía no ha impactado con el absorbedor (*Figura 4.3.1.*);

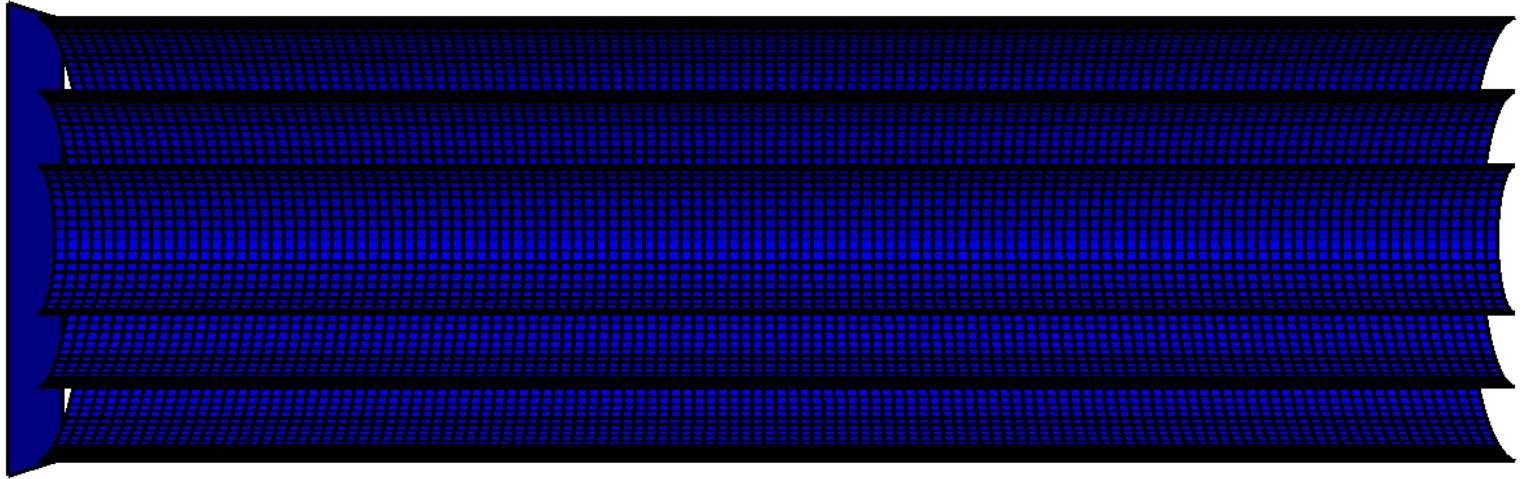


Fig. 4.3.1. (Sección Longitudinal) $t = 0\text{ s}$

- **$t = 0,001\text{ s}$** : Tras el impacto, se puede ya observar la tendencia a la deformación del absorbedor, con la aparición de una marcada compactación del material en su base (excepto para el cilindro más interior, la cuál es bastante suave). La parte en contacto con la placa se repliega sobre sí misma, formando compactaciones y estricciones con forma de acordeón (para todos los cilindros) en un instante muy temprano (la disminución de espesor se hace patente). (*Figura 4.3.2.*);

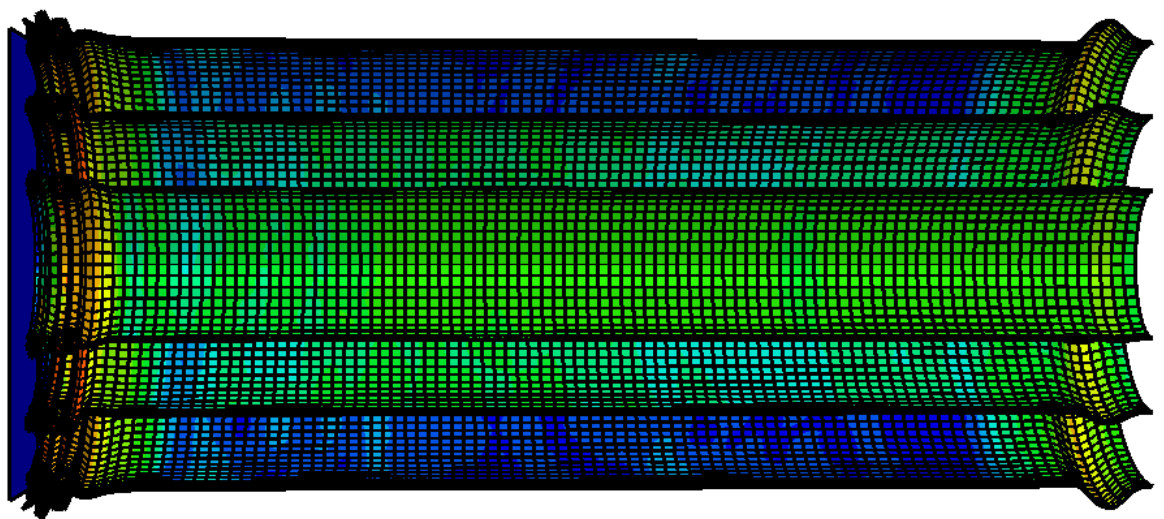


Fig. 4.3.2. (Sección Longitudinal) $t = 0,001\text{ s}$

- **$t = 0,0055$ s:** La placa se ha detenido por completo, e incluso se desplaza ligeramente hacia atrás. Los esfuerzos han descendido de manera muy acusada. Desde el instante anterior hasta el presente, el absorbedor se deforma progresivamente de la misma manera, con estricciones y compactaciones en forma de acordeón, muy acusadas en ambos extremos para todos los cilindros (*Figura 4.3.3.*);

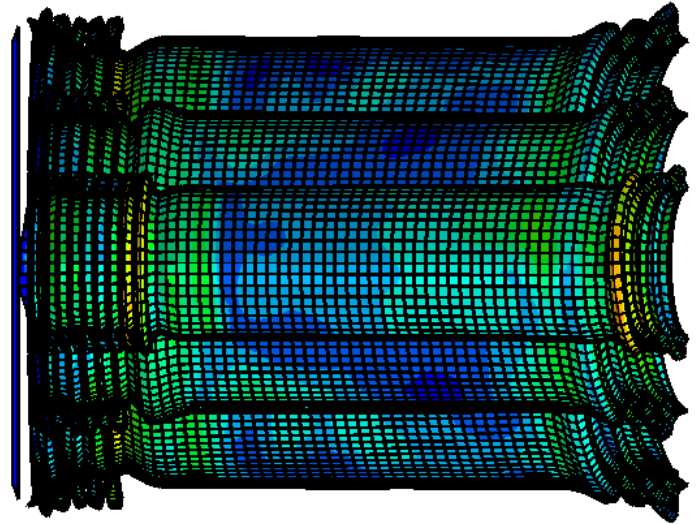
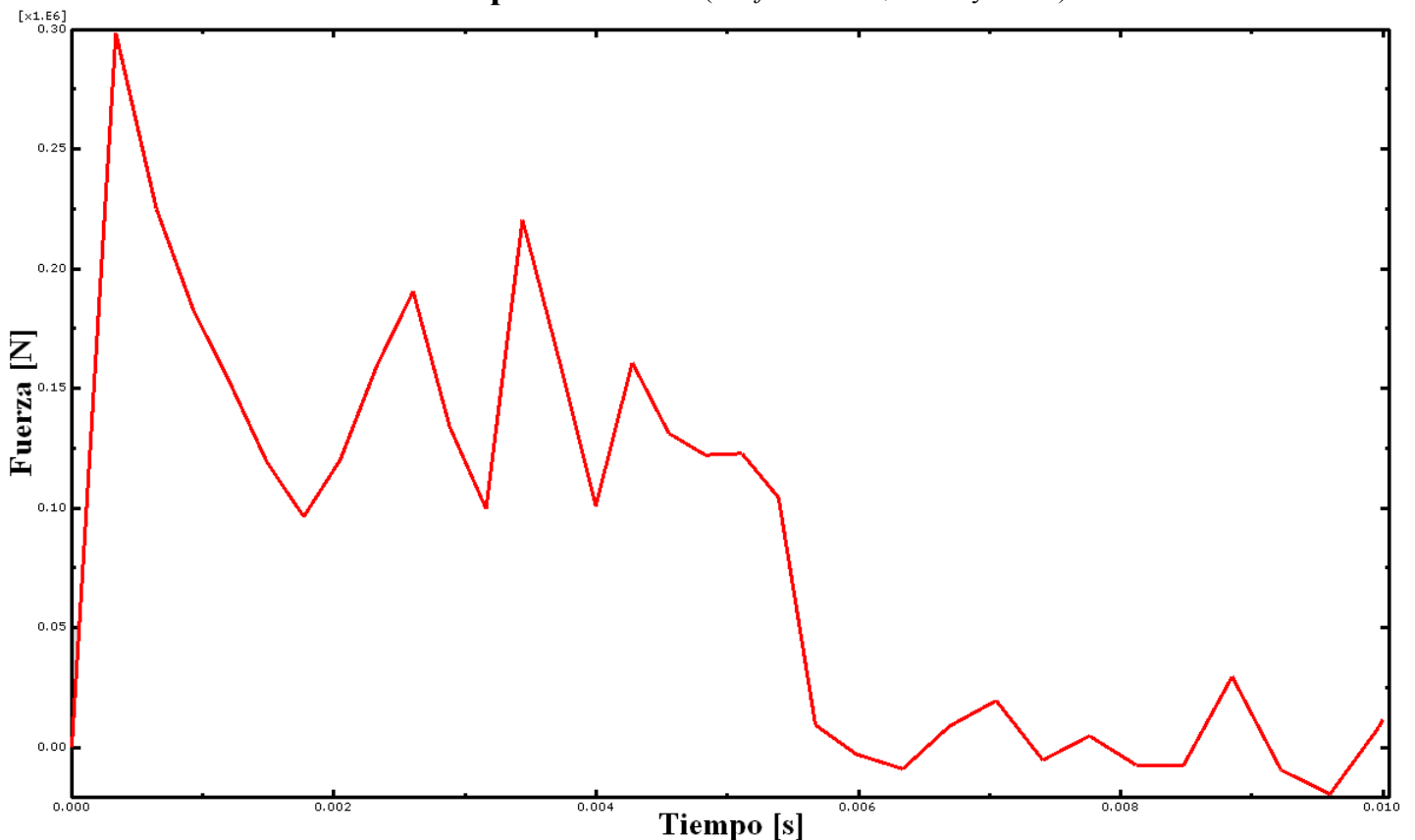
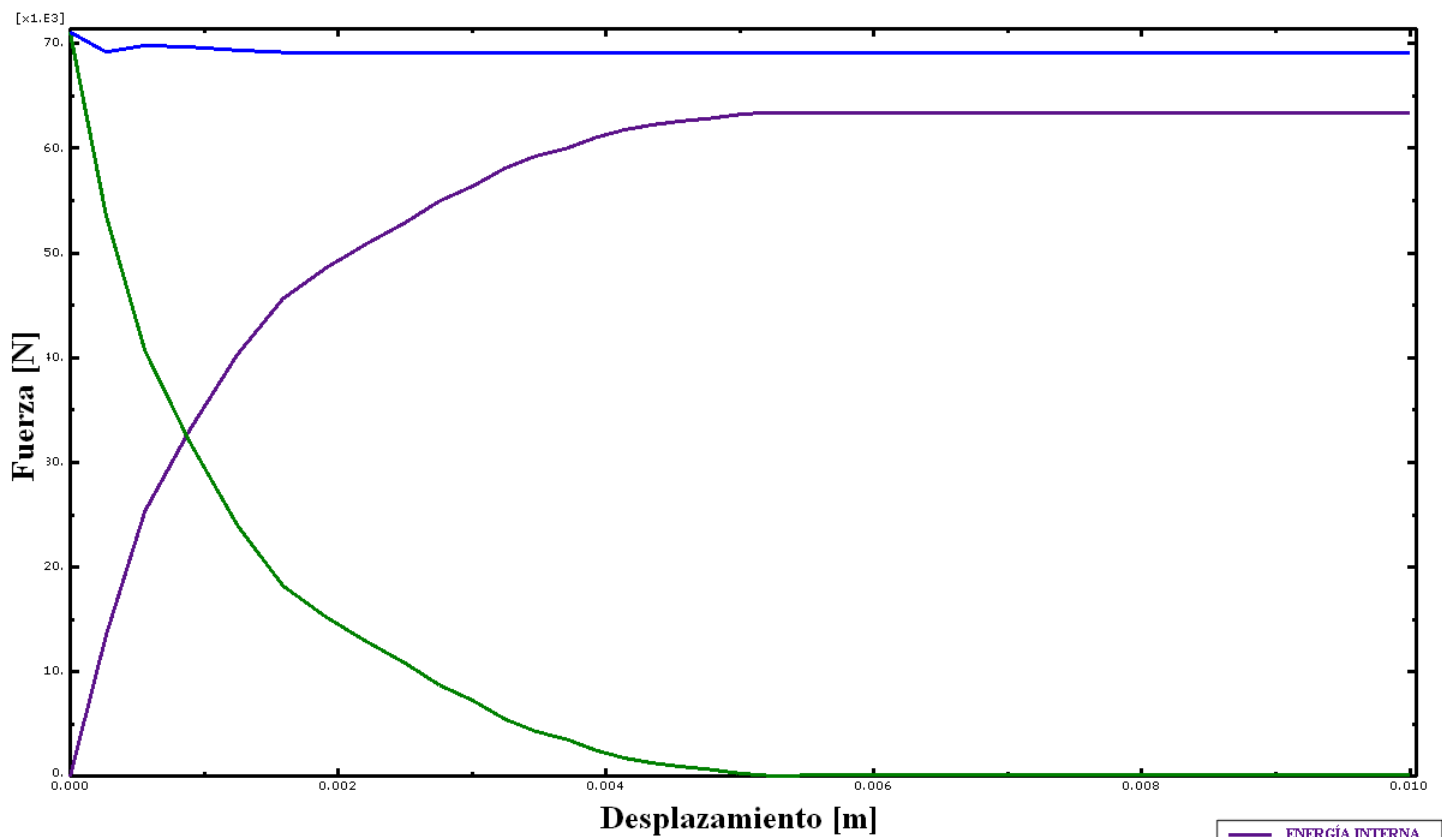
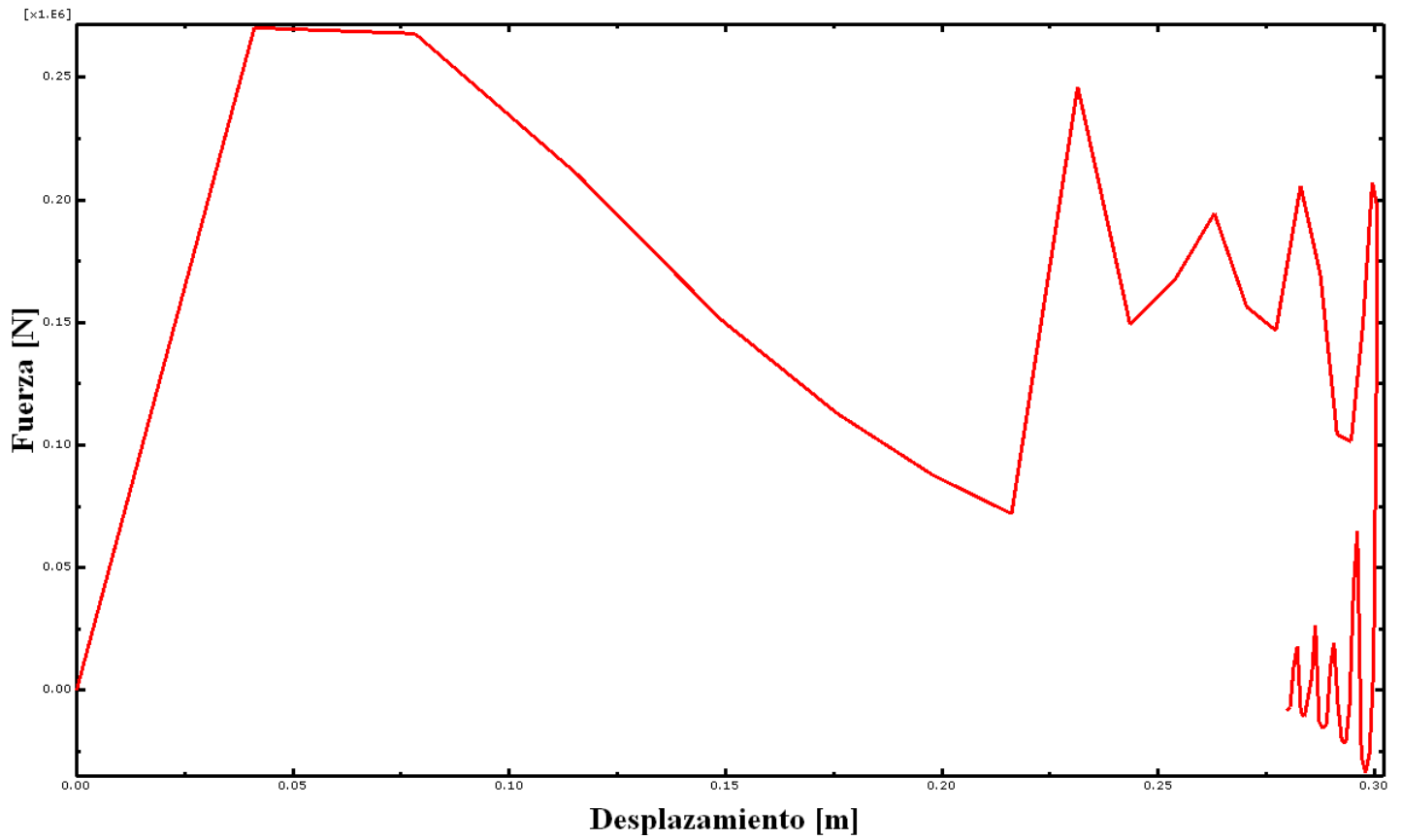


Fig. 4.3.3. (Sección Longitudinal) $t = 0,0055$ s

- **Gráficas de comportamiento:** (*Gráficas 4.3.1., 4.3.2. y 4.3.3.*)



Gráfica 4.3.1. Reacciones en la base – Geometría 2 – Acero



La energía interna máxima, que corresponde con la energía absorbida, es de **63429,1 J**.
El tiempo de absorción es de **0,0054 s**.

4.4. Geometría 2 – Duraluminio

Evolución de la geometría 2 en Duraluminio en función del tiempo ($e = 0,002417\text{ m}$).

- **$t = 0\text{ s}$** : La placa todavía no ha impactado con el absorbedor (*Figura 4.3.1.*).
- **$t = 0,0005\text{ s}$** : El impacto recorre el absorbedor en toda su longitud, concentrándose en el cilindro más interior. La parte en contacto con la placa se repliega sobre sí misma, formando compactaciones y estricciones con forma de acordeón en un instante muy, muy temprano. En la base se aprecia la aparición de una pequeña compactación, excepto para el cilindro más interior. (*Figura 4.4.1.*);

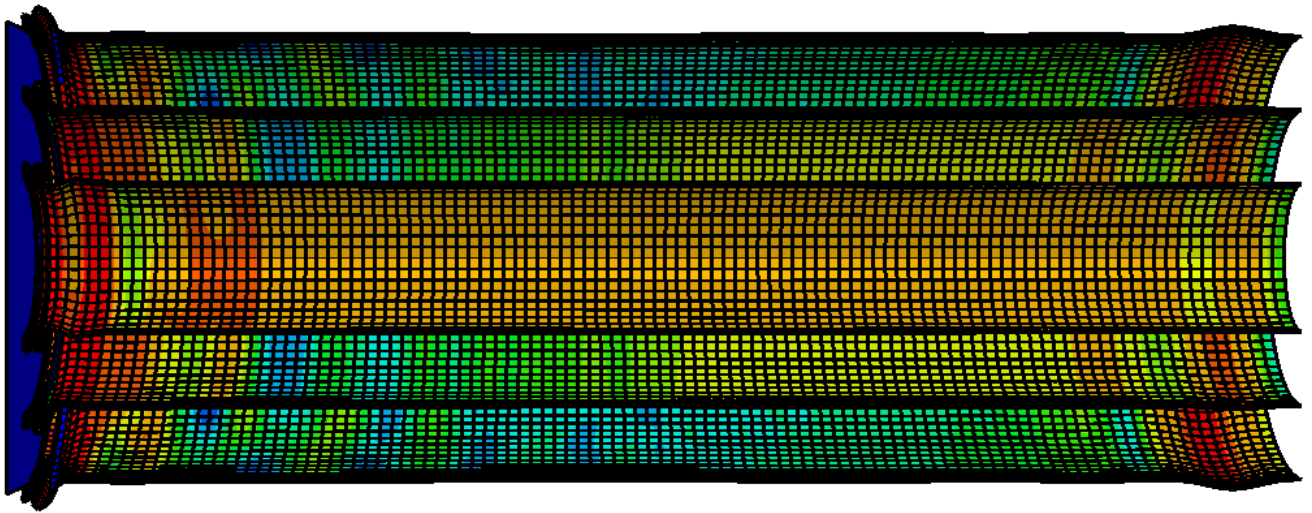


Fig. 4.4.1. (Sección Longitudinal) $t = 0,0005\text{ s}$

- **$t = 0,004\text{ s}$** : A pesar del instante tan temprano, la placa se ha detenido por completo, e incluso se desplaza ligeramente hacia atrás. La forma final del absorbedor casi no ha presentado variaciones respecto del instante $t = 0,0015$, un gran lapso de tiempo. La forma de acordeón y las estricciones y pliegues son muy parecidos a los de la configuración en Acero, pero más acusados, sobre todo para el cilindro más interior. La deformación longitudinal es corta. Se aprecia un pequeño pandeo para el cilindro más interior. (*Figura 4.4.2.*);

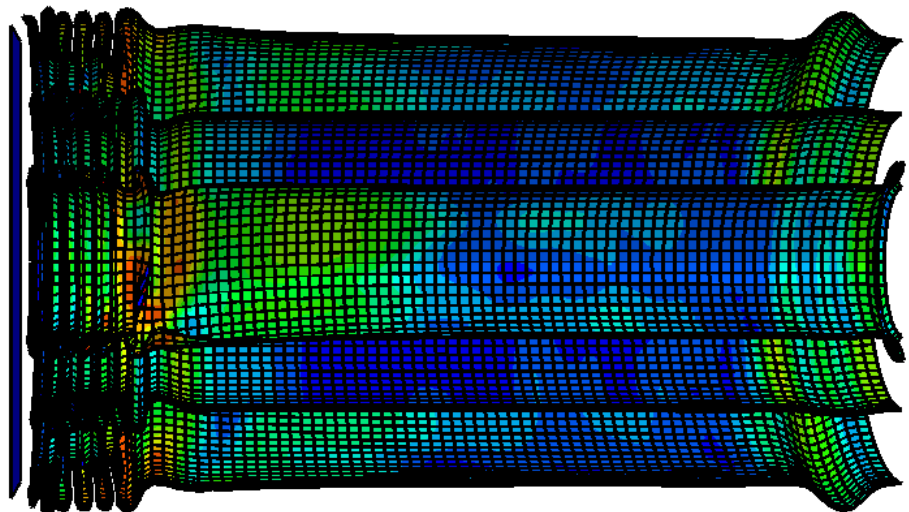
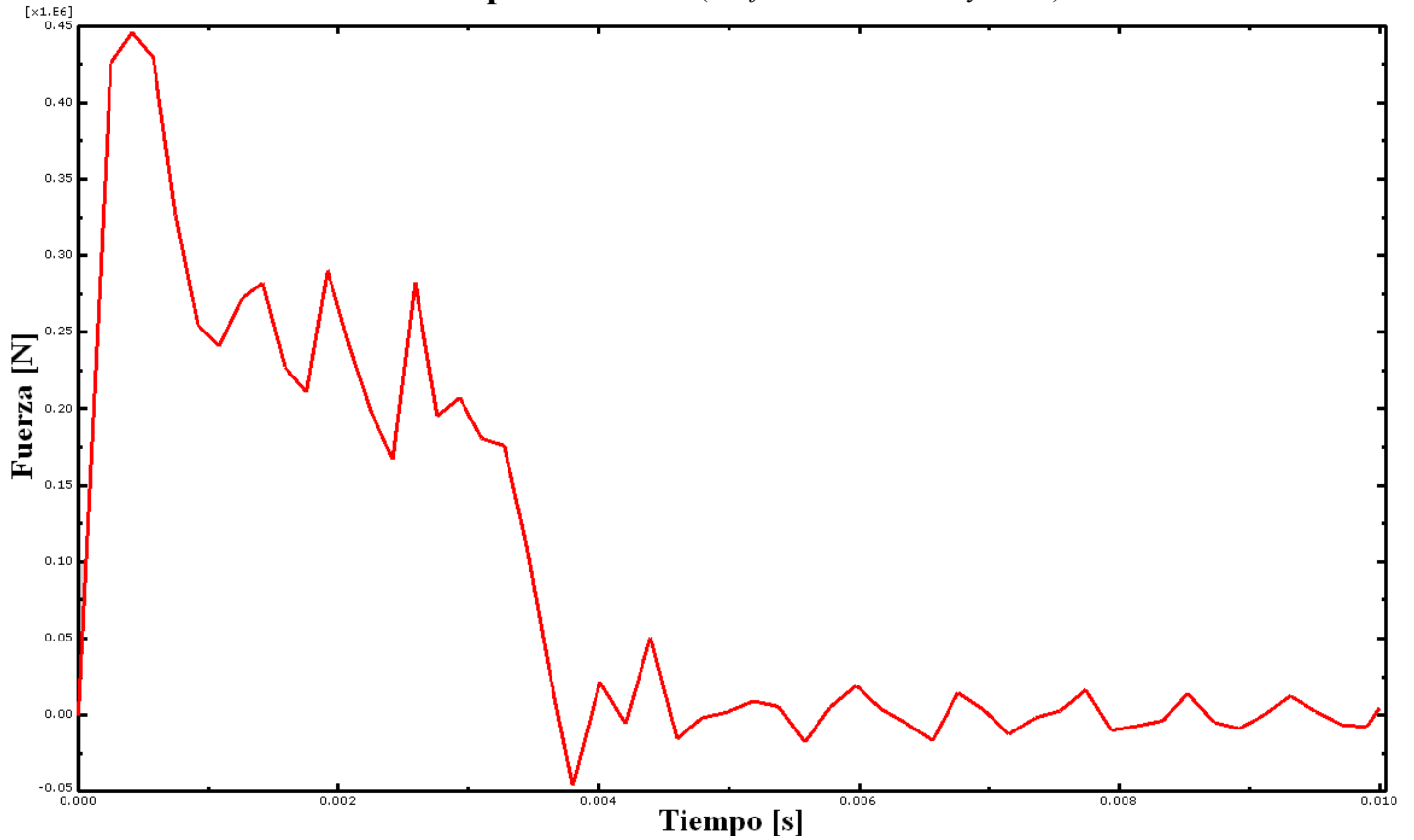
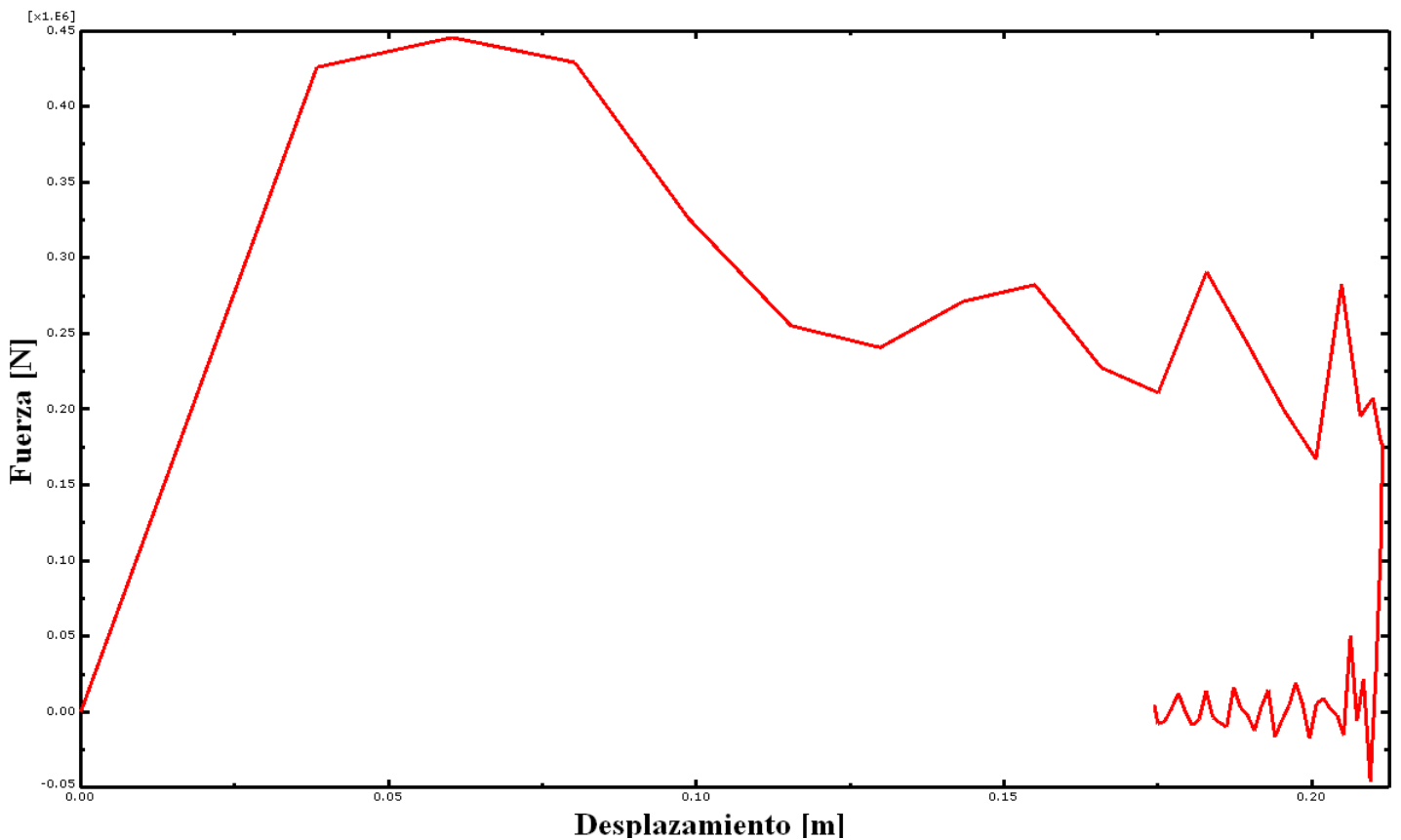


Fig. 4.4.2. (Sección Longitudinal) $t = 0,004\text{ s}$

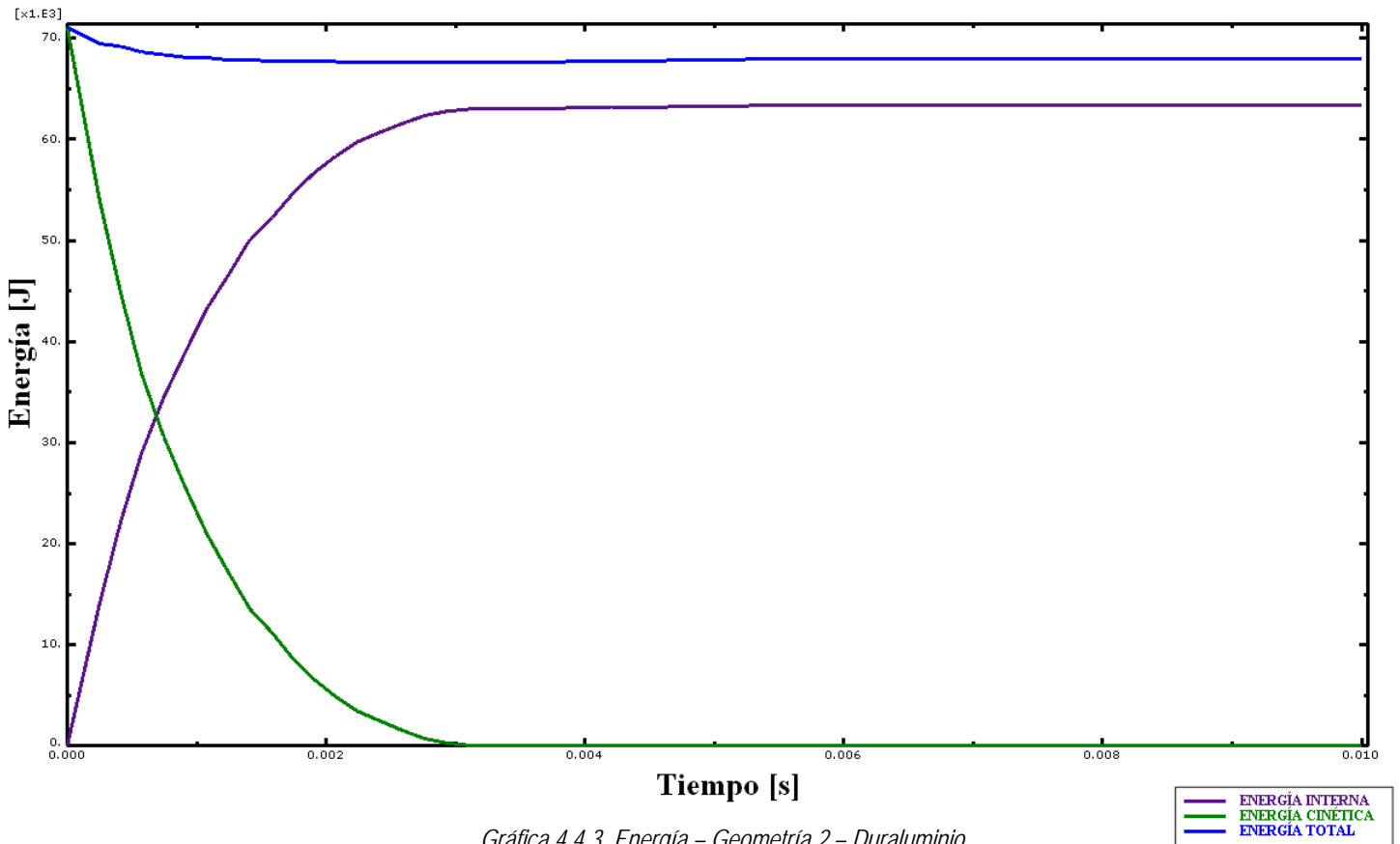
- **Gráficas de comportamiento:** (Gráficas 4.4.1., 4.4.2. y 4.4.3.)



Gráfica 4.4.1. Reacciones en la base – Geometría 2 – Duraluminio



Gráfica 4.4.2. Tensión-Deformación – Geometría 2 – Duraluminio



La energía interna máxima, que corresponde con la energía absorbida, es de **63065,4 J**. El tiempo de absorción es de **0,00327 s**.

4.5. Geometría 3 – Acero

Evolución de la geometría 3 en Acero en función del tiempo ($e = 0,001\text{ m}$).

- **$t = 0\text{ s}$** : La placa todavía no ha impactado con el absorbedor (*Figura 4.5.1.*);

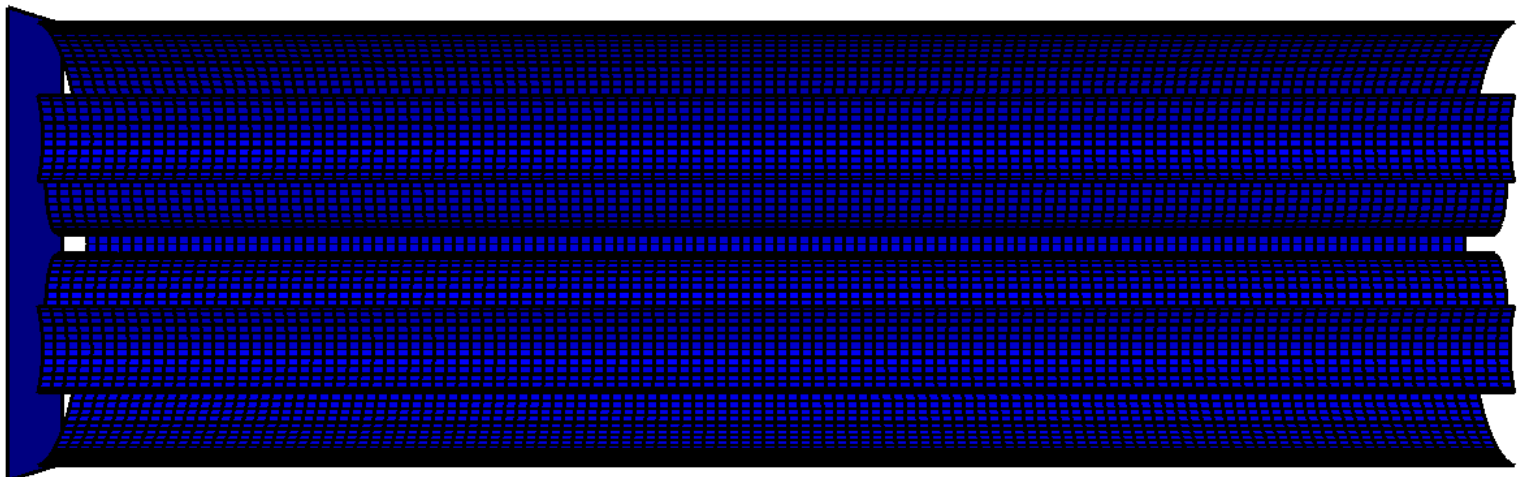


Fig. 4.5.1. (Sección Longitudinal) $t = 0\text{ s}$

- **$t = 0,001$ s:** Tras el impacto, observamos un comportamiento completamente distinto del cilindro exterior y los interiores. En la base aparece una marcada compactación sólo para el cilindro exterior. Y mientras que en la parte en contacto con la placa se repliega sobre sí misma, formando compactaciones y estricciones con forma de acordeón (sólo para el cilindro exterior), los cilindros interiores simplemente colapsan, quedando totalmente destrozados. Se aprecia un leve inicio de pandeo en los mismos (*Figura 4.5.2.*);

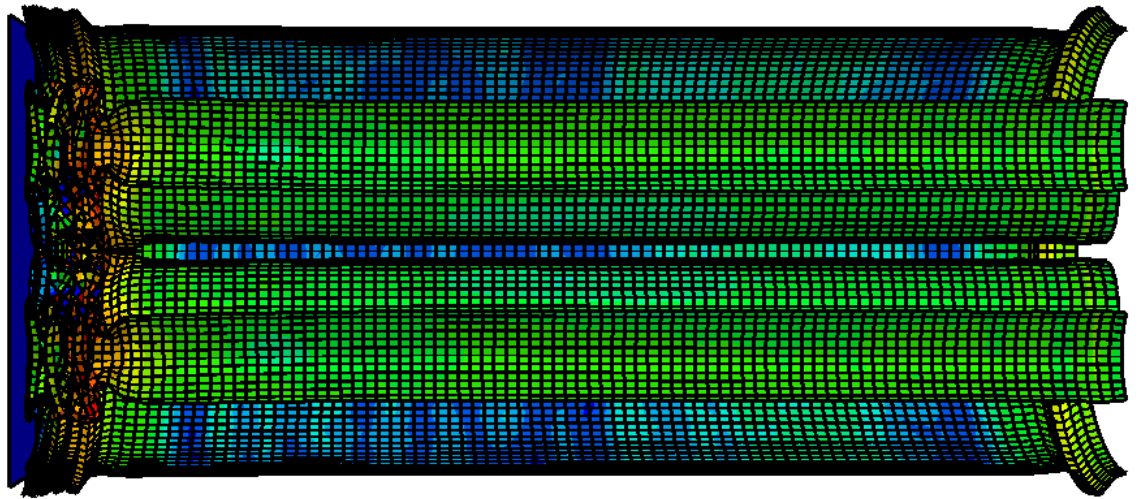


Fig. 4.5.2. (Sección Longitudinal) $t = 0,001$ s

- **$t = 0,0035$ s:** El colapso de los cilindros interiores es más que evidente. A pesar de ello, casi no presentan compactaciones notables en la base. El cilindro exterior se sigue replegando sobre sí mismo, manifestando la conocida forma de acordeón por ambos extremos, pero sometido a pocos esfuerzos (la gran mayoría de ellos recaen en los cilindros interiores). La deformación longitudinal es muy elevada para un instante tan temprano (*Figura 4.5.3.*);

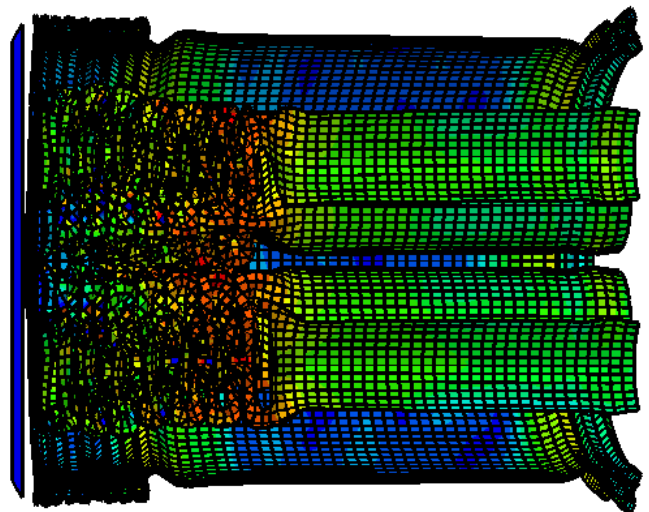


Fig. 4.5.3. (Sección Longitudinal) $t = 0,0035$ s

- **$t = 0,0065$ s:** La placa se ha detenido por completo, e incluso se desplaza ligeramente hacia atrás. Los esfuerzos han descendido de manera muy acusada. Desde el instante anterior hasta el presente, el absorbedor se deforma progresivamente de la misma manera, con un gran colapso de los cilindros interiores, prácticamente en su totalidad, y con estricciones y compactaciones en forma de acordeón, muy acusadas en ambos extremos para el cilindro exterior. La deformación longitudinal es enorme, y el lapso de tiempo importante. (Figura 4.5.4.);

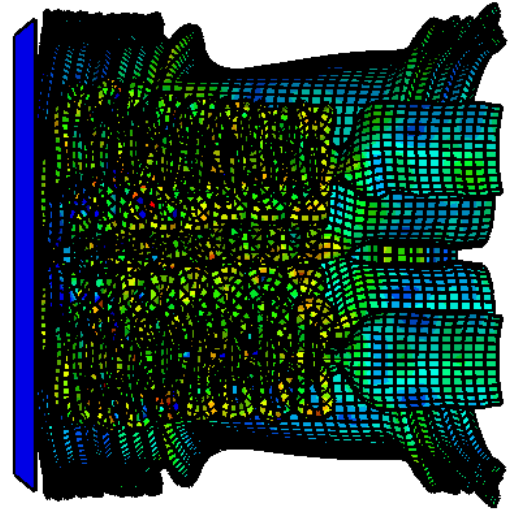
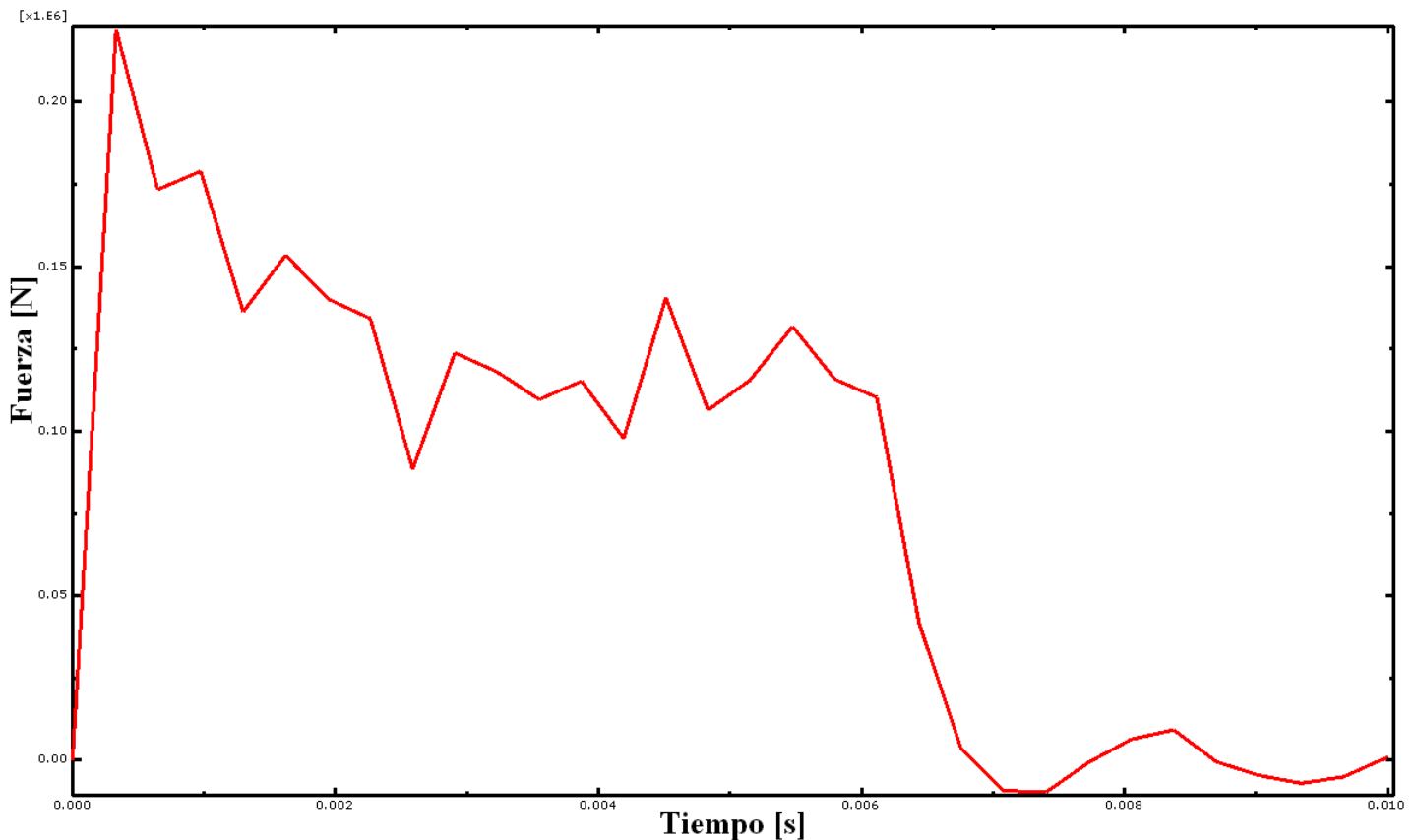
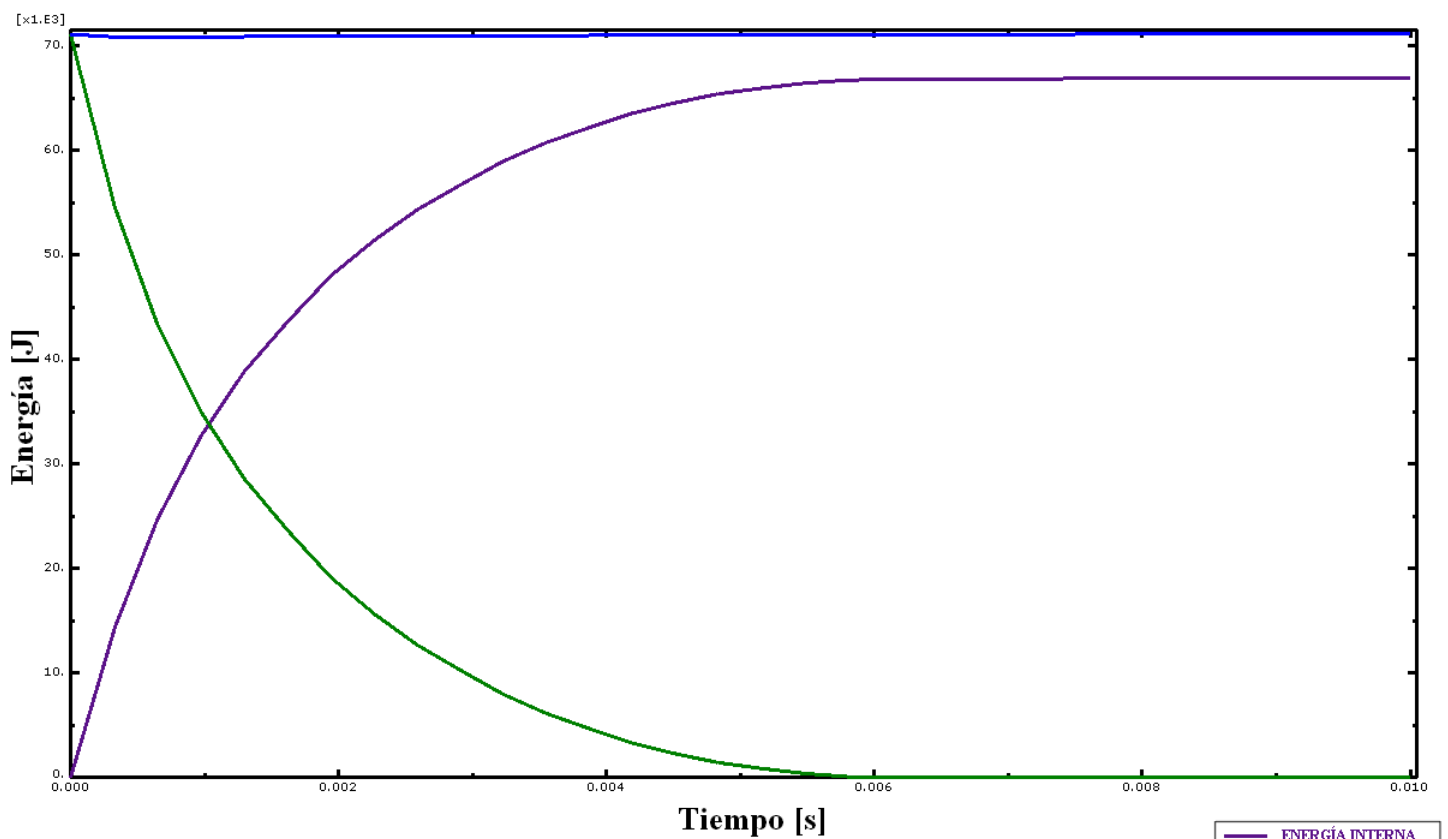
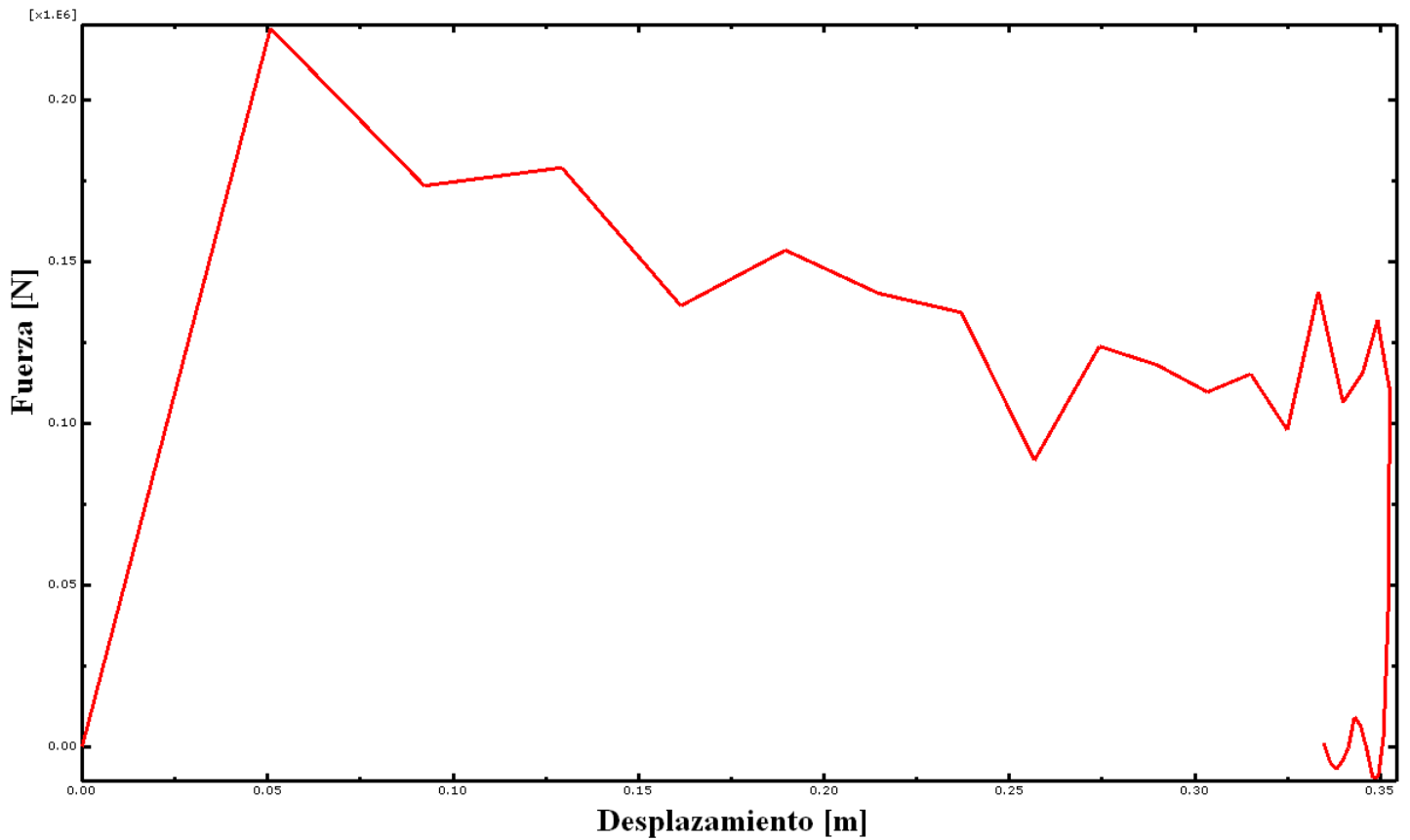


Fig. 4.5.4. (Sección Longitudinal) $t = 0,0065$ s

- **Gráficas de comportamiento:** (Gráficas 4.5.1., 4.5.2. y 4.5.3.)



Gráfica 4.5.1. Reacciones en la base – Geometría 3 – Acero



La energía interna máxima, que corresponde con la energía absorbida, es de **66827,5 J**.
El tiempo de absorción es de **0,00611 s**.

4.6. Geometría 3 – Duraluminio

Evolución de la geometría 3 en Duraluminio en función del tiempo ($e = 0,001709\text{ m}$).

- **$t = 0\text{ s}$:** La placa todavía no ha impactado con el absorbedor (*Figura 4.5.1.*).
- **$t = 0,001\text{ s}$:** Seguimos observando un comportamiento desigual entre el cilindro exterior y los interiores. El impacto recorre el absorbedor en toda su longitud, concentrándose en los cilindros interiores. La parte en contacto con la placa se repliega sobre sí misma, formando compactaciones y estricciones con forma de acordeón en un instante muy temprano. En la base se aprecia la aparición de una marcada compactación, sólo para el cilindro exterior. Se aprecia un leve inicio de pandeo en los cilindros interiores. (*Figura 4.6.1.*);

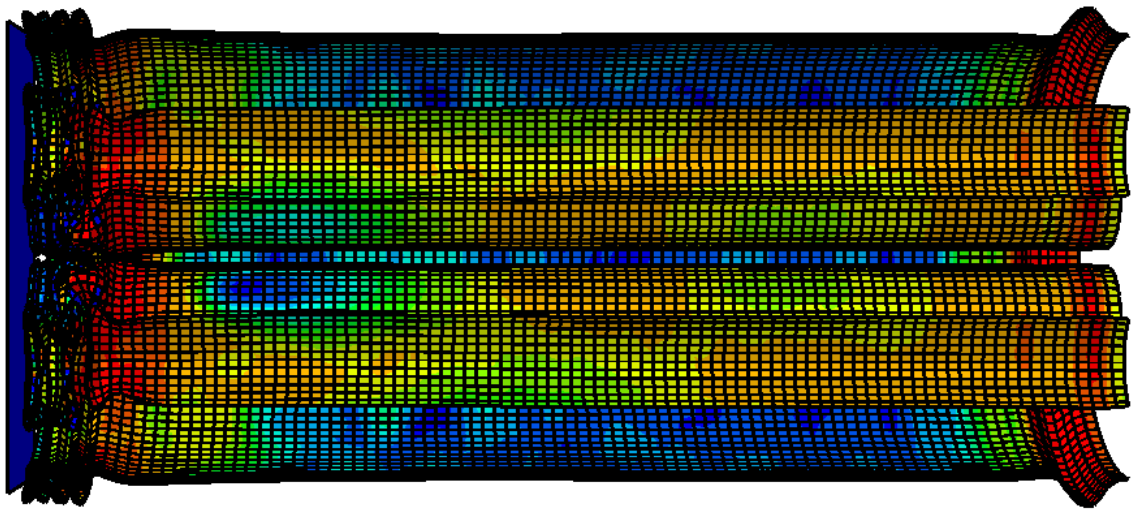


Fig. 4.6.1. (Sección Longitudinal) $t = 0,001\text{ s}$

- **$t = 0,004\text{ s}$:** A pesar del instante tan temprano, la placa se ha detenido por completo, e incluso se desplaza ligeramente hacia atrás. El colapso de los cilindros interiores, y su elevado pandeo es más que evidente. A pesar de ello, casi no presentan compactaciones notables en la base. El cilindro exterior se sigue replegando sobre sí mismo, manifestando la conocida forma de acordeón por el extremo de la placa, y muy marcado en la base, con grandes hendiduras. La deformación longitudinal es menos acusada que en la configuración en Acero (*Figura 4.6.2.*);

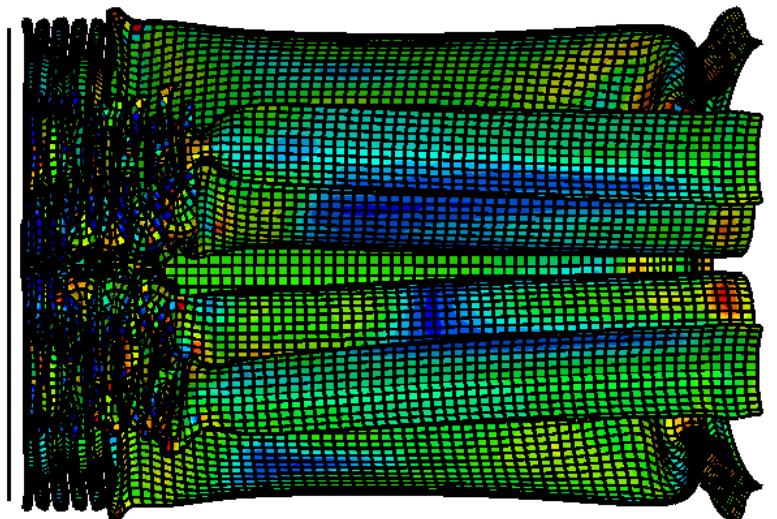
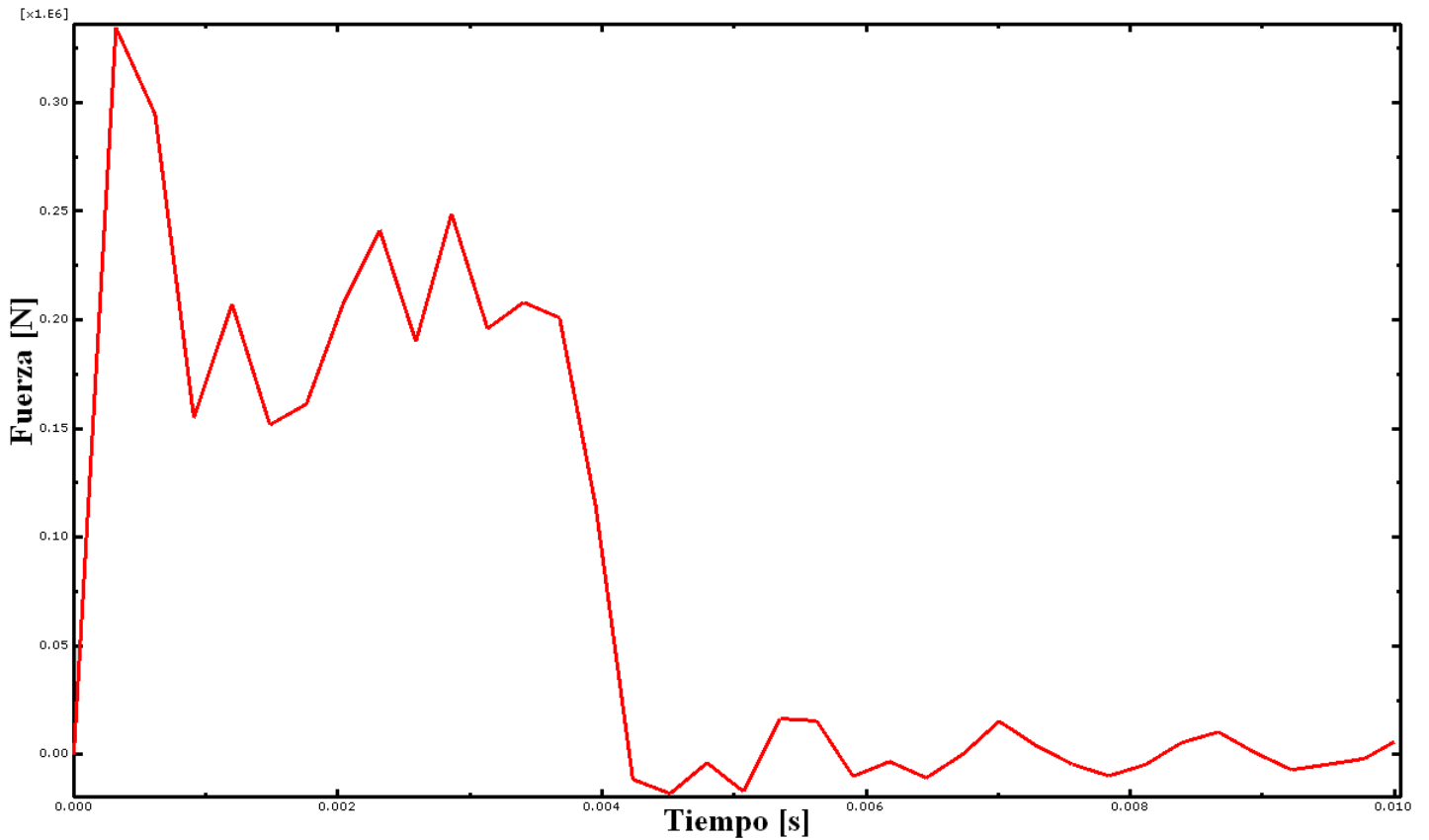
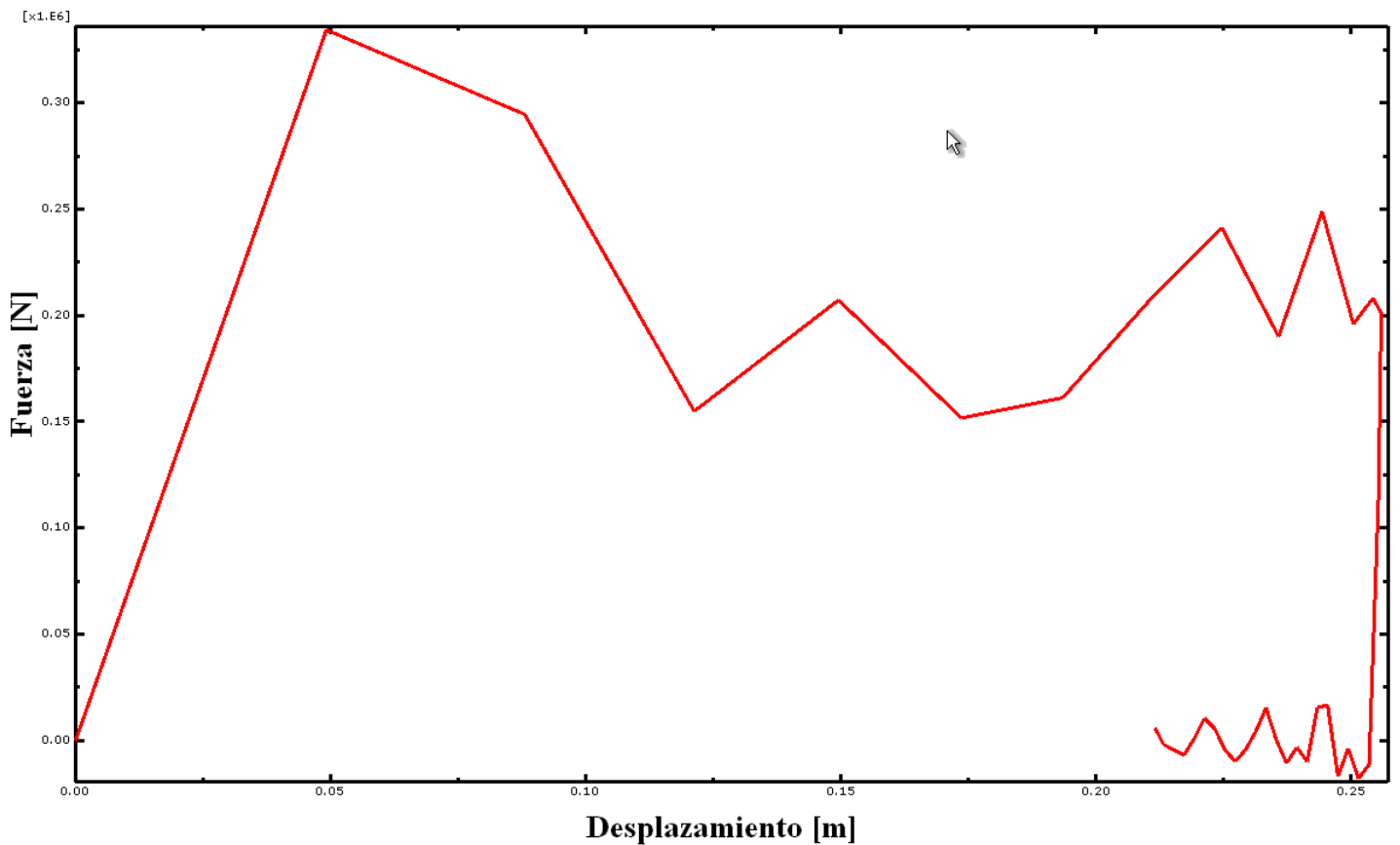


Fig. 4.6.2. (Sección Longitudinal) $t = 0,004\text{ s}$

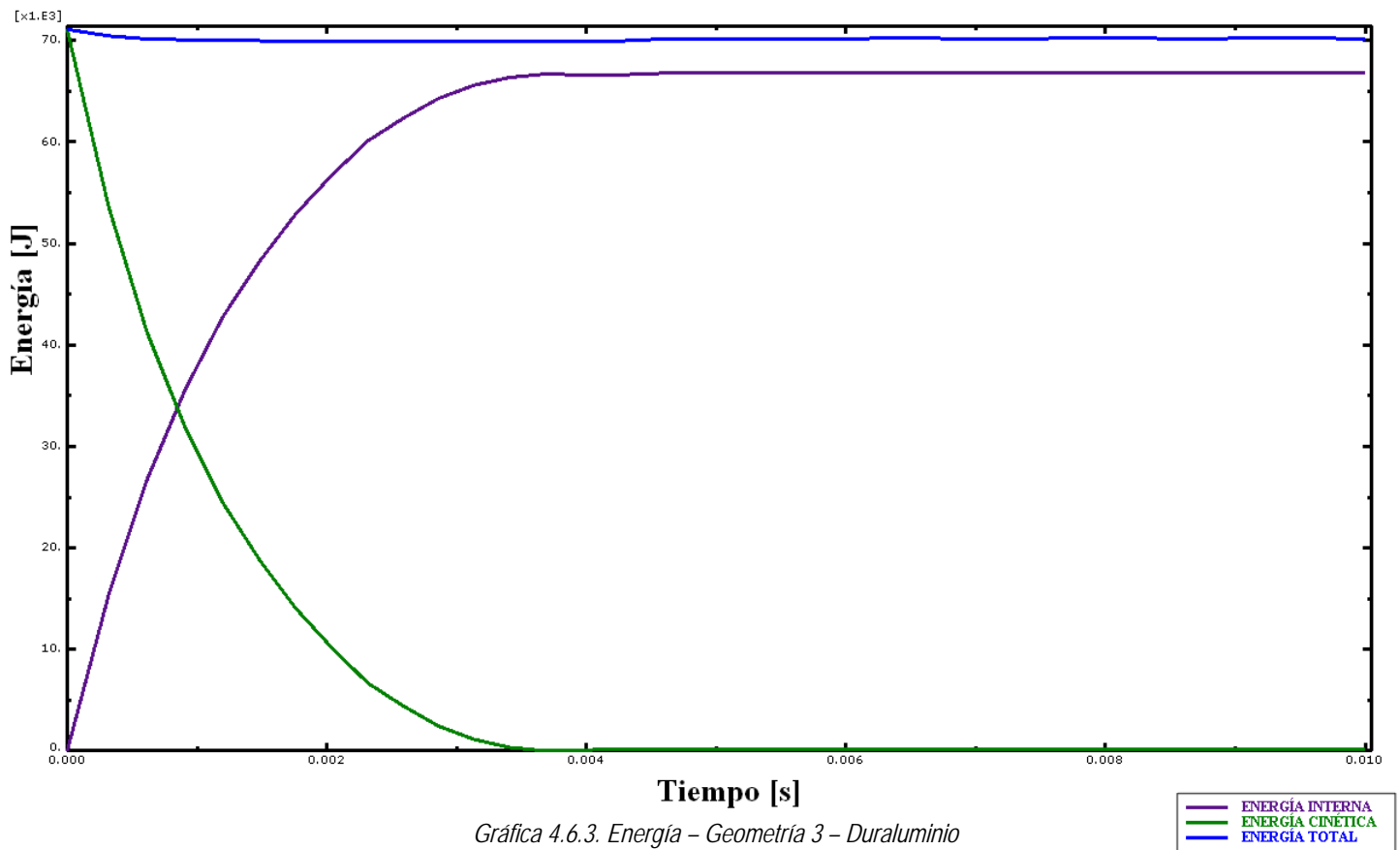
- **Gráficas de comportamiento:** (Gráficas 4.6.1., 4.6.2. y 4.6.3.)



Gráfica 4.6.1. Reacciones en la base – Geometría 3 – Duraluminio



Gráfica 4.6.2. Tensión-Deformación – Geometría 3 – Duraluminio



La energía interna máxima, que corresponde con la energía absorbida, es de **66692,8 J**. El tiempo de absorción es de **0,00367 s**.

4.7. Geometría 4 – Acero

Evolución de la geometría 4 en Acero en función del tiempo ($e = 0,000944 \text{ m}$).

- **$t = 0 \text{ s}$** : La placa todavía no ha impactado con el absorbedor (*Figura 4.7.1.*);

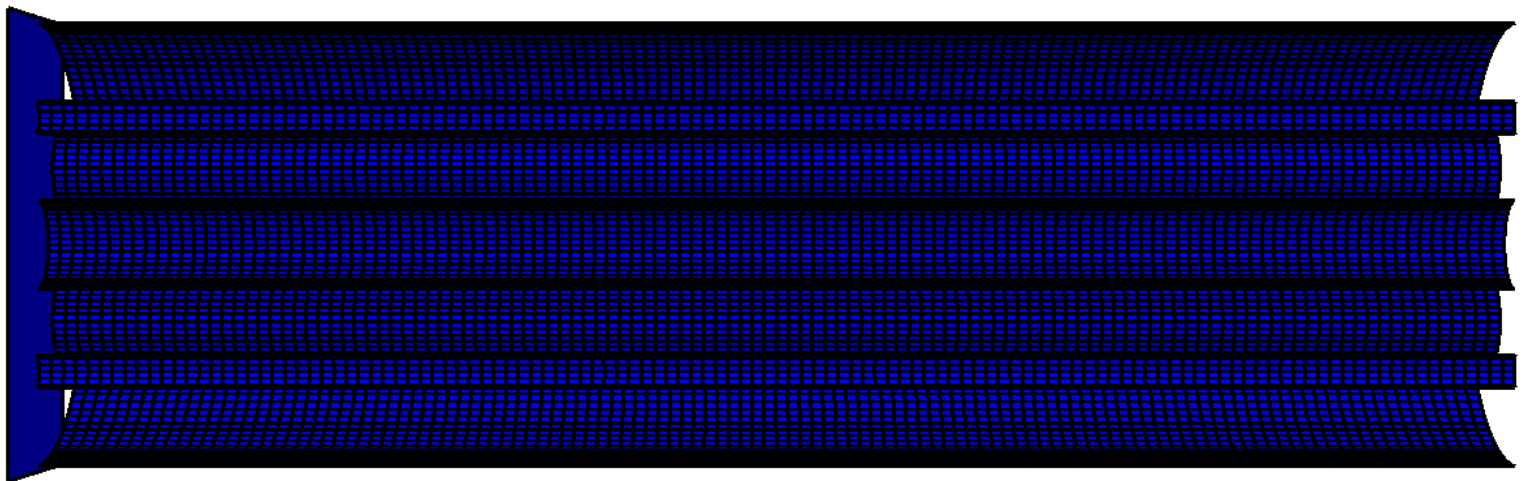


Fig. 4.7.1. (Sección Longitudinal) $t = 0 \text{ s}$

- **$t = 0,001$ s:** Tras el impacto, seguimos observando un comportamiento completamente distinto del cilindro exterior y los interiores, y muy parecido a los de la configuración de Geometría 3, pero más estable. En la base aparece una marcada compactación sólo para el cilindro exterior. La parte en contacto con la placa se repliega sobre sí misma, formando compactaciones y estricciones con forma de acordeón (también para los cilindros interiores). No se aprecia pandeo de ningún componente (*Figura 4.7.2.*);

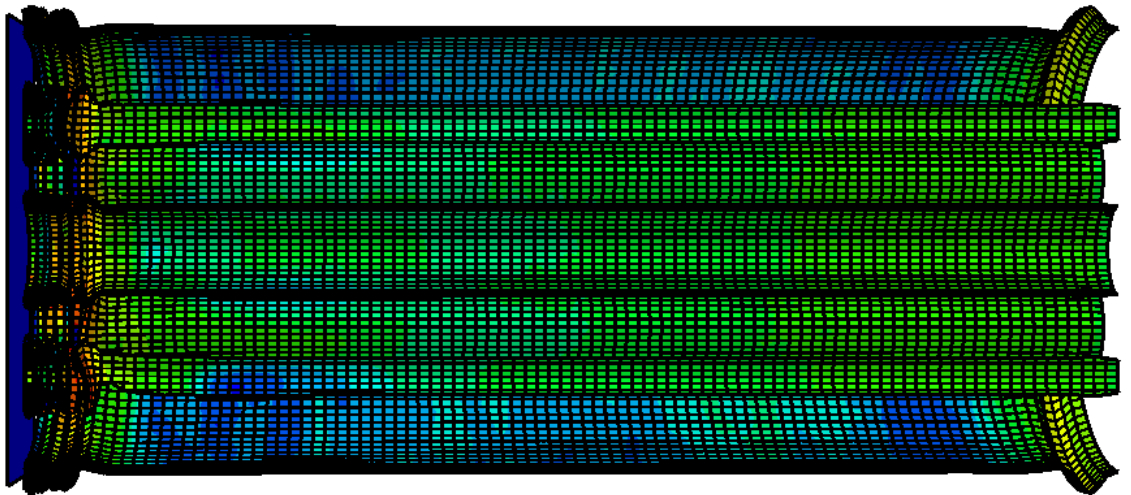


Fig. 4.7.2. (Sección Longitudinal) $t = 0,001$ s

- **$t = 0,002$ s:** Es alrededor de este instante cuando los cilindros interiores en contacto con la placa colapsan, pero a continuación de la deformación anterior en forma de acordeón. El cilindro exterior sigue replegándose como un acordeón. En la base, el cilindro exterior presenta una compactación notable, mientras que para los cilindros interiores es casi inapreciable (*Figura 4.7.3.*);

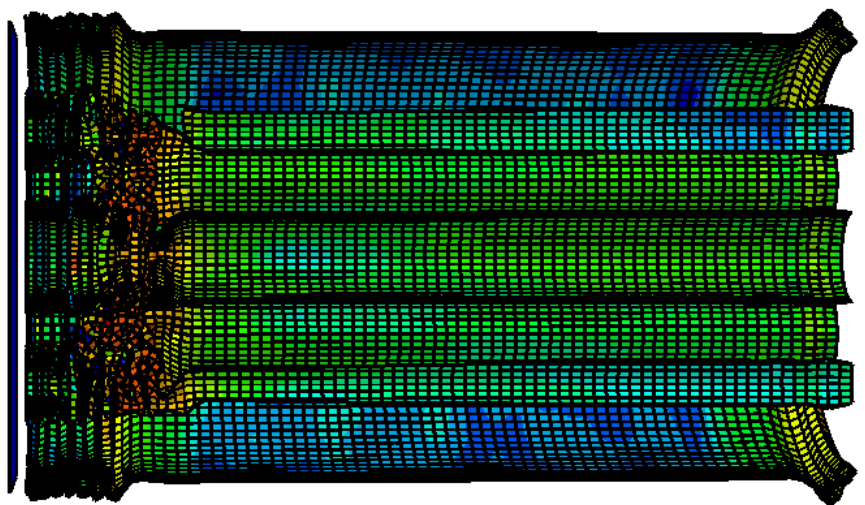


Fig. 4.7.3. (Sección Longitudinal) $t = 0,002$ s

- **$t = 0,0065$ s:** La placa se ha detenido por completo, e incluso se desplaza ligeramente hacia atrás. Los esfuerzos han descendido de manera muy acusada. Desde el instante anterior hasta el presente, el absorbedor se deforma progresivamente de la misma manera, con un gran colapso de los cilindros interiores sobre su deformación inicial de acordeón, prácticamente en su totalidad. El cilindro exterior presenta la típica compactación en forma de acordeón en el extremo en contacto con la placa, y grandes hendiduras en la base, mucho mayores que en la configuración de Geometría 3. La deformación longitudinal es enorme, y el lapso de tiempo importante (*Figura 4.7.4.*);

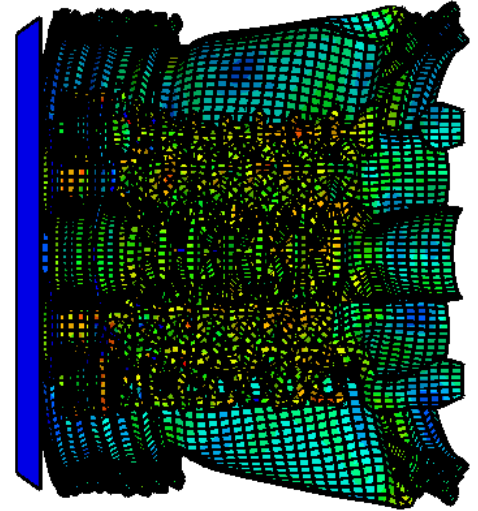
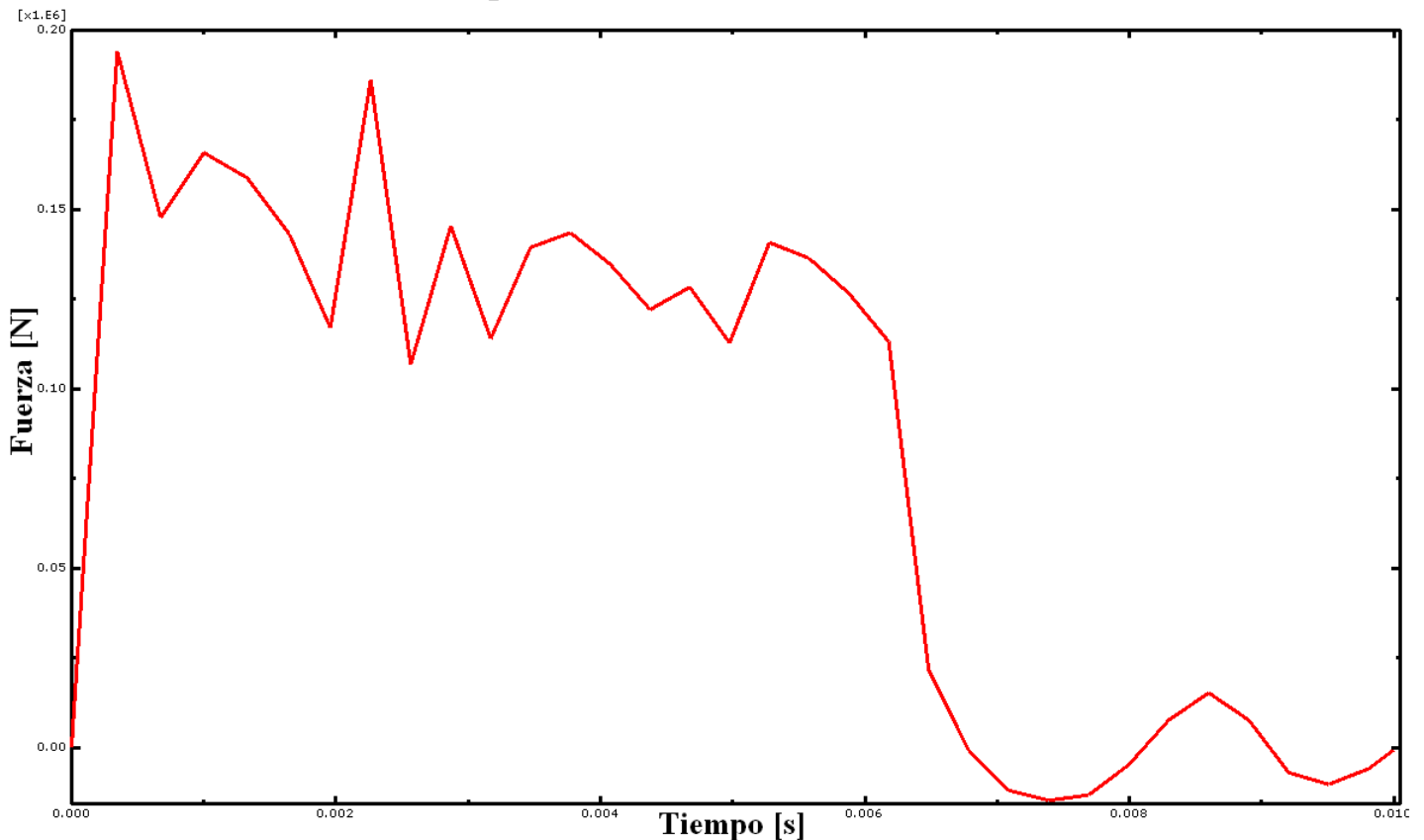
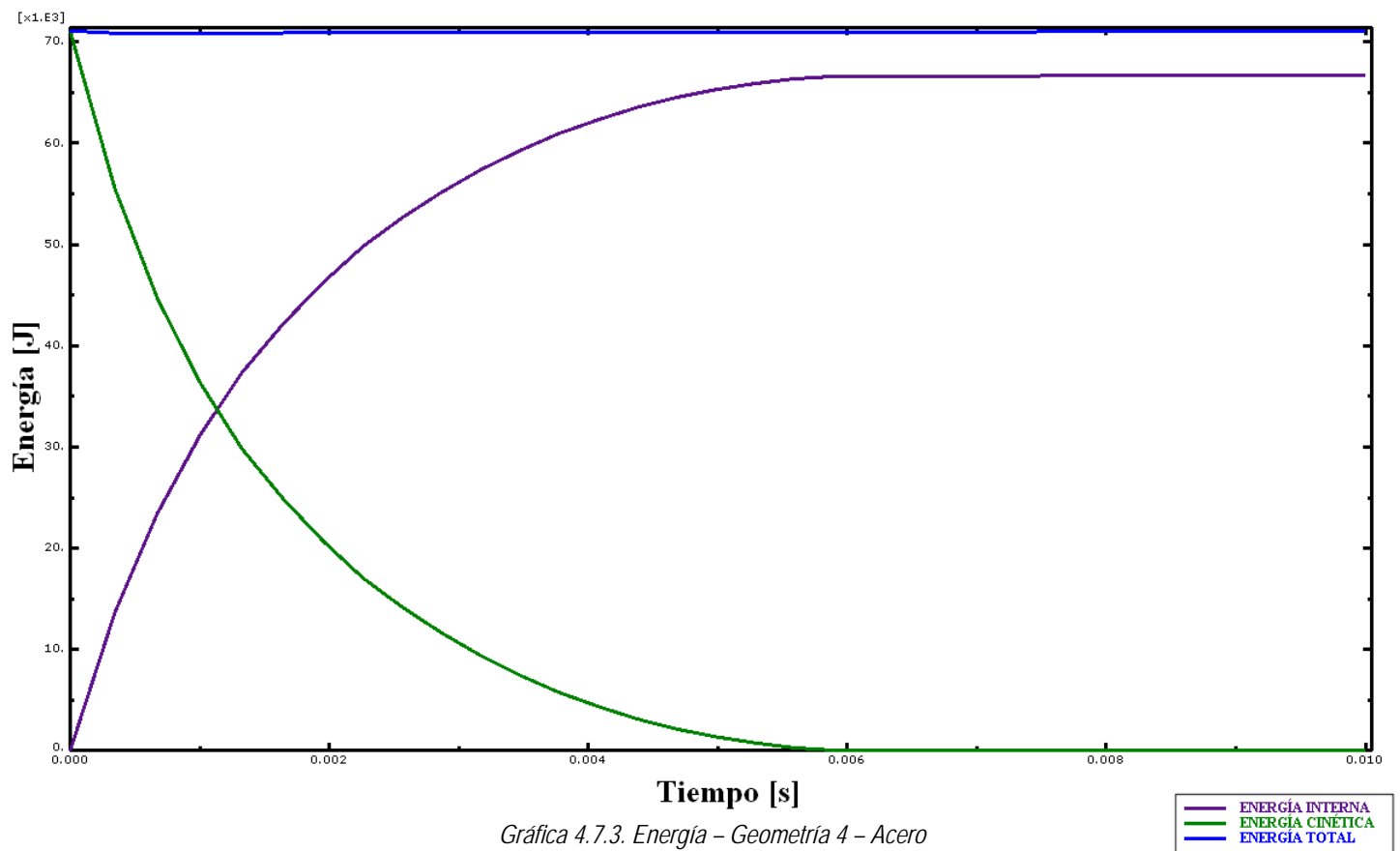
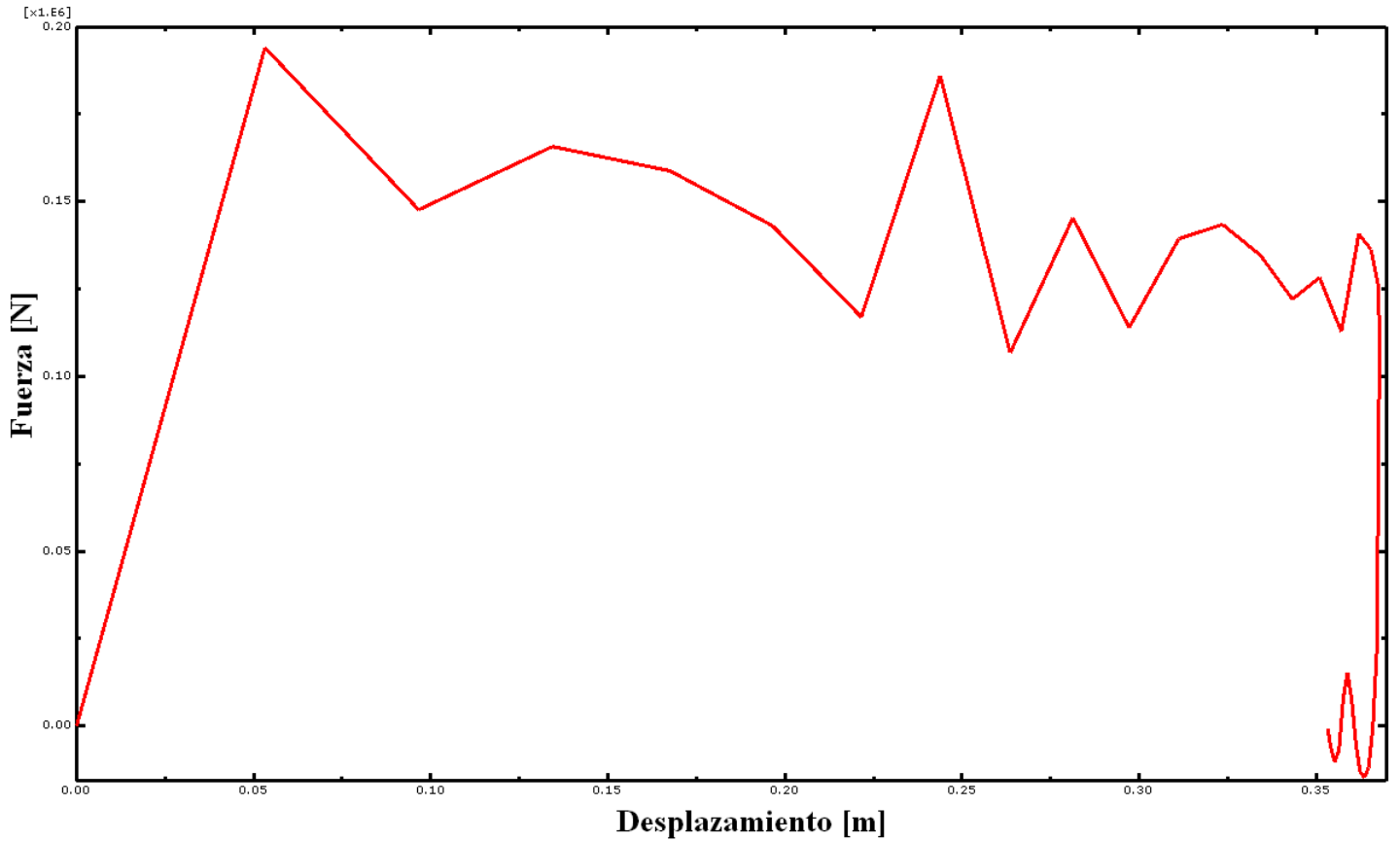


Fig. 4.7.4. (Sección Longitudinal) $t = 0,0065$ s

- **Gráficas de comportamiento:** (*Gráficas 4.7.1., 4.7.2. y 4.7.3.*)



Gráfica 4.7.1. Reacciones en la base – Geometría 4 – Acero



La energía interna máxima, que corresponde con la energía absorbida, es de **66659,5 J**.
El tiempo de absorción es de **0,00618 s**.

4.8. Geometría 4 – Duraluminio

Evolución de la geometría 4 en Duraluminio en función del tiempo ($e = 0,00158\text{ m}$).

- **$t = 0\text{ s}$:** La placa todavía no ha impactado con el absorbedor (*Figura 4.7.1.*).
- **$t = 0,0005\text{ s}$:** Seguimos observando un comportamiento desigual entre el cilindro exterior y los interiores. El impacto recorre el absorbedor en toda su longitud, concentrándose en todos los cilindros por igual en la parte en contacto con la placa, y sólo en el exterior en la base. La parte en contacto con la placa se repliega sobre sí misma, formando compactaciones y estricciones con forma de acordeón en un instante muy temprano. En la base se aprecia la aparición de una compactación muy acusada, sólo para el cilindro exterior. No se aprecia pandeo (*Figura 4.8.1.*);

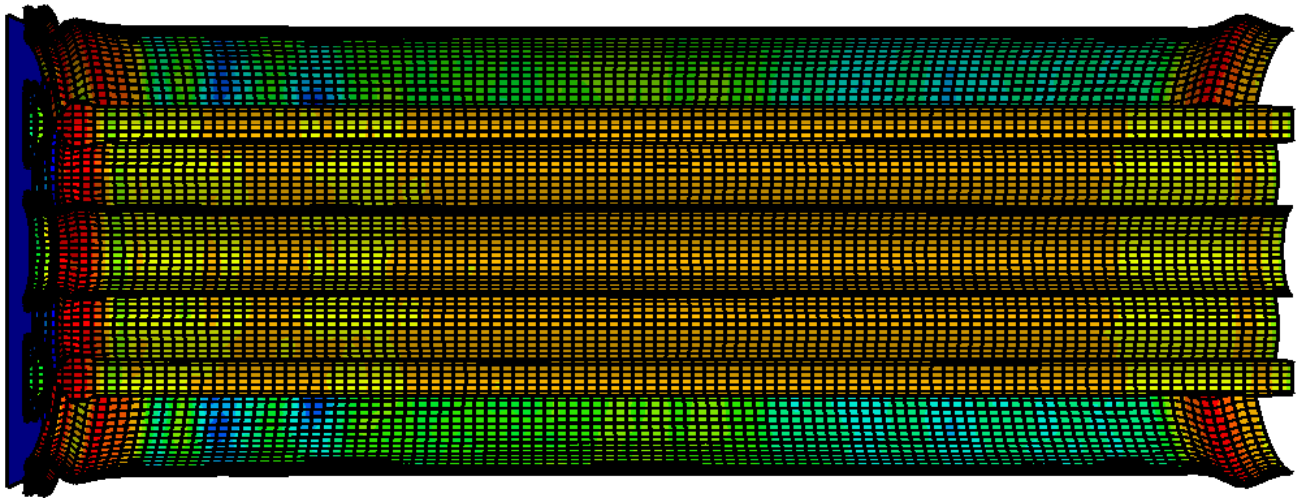


Fig. 4.8.1. (Sección Longitudinal) $t = 0,0005\text{ s}$

- **$t = 0,004\text{ s}$:** A pesar del instante tan temprano, la placa se ha detenido por completo, e incluso se desplaza ligeramente hacia atrás. El colapso de los cilindros interiores sobre su deformación inicial de acordeón, y su elevado pandeo es evidente. A pesar de ello, casi no presentan compactaciones notables en la base. El cilindro exterior se sigue replegando sobre sí mismo, manifestando la conocida forma de acordeón por el extremo de la placa, y muy marcado en la base, con grandes hendiduras. La deformación longitudinal es poco acusada, comparada con la configuración en Acero (*Figura 4.8.2.*);

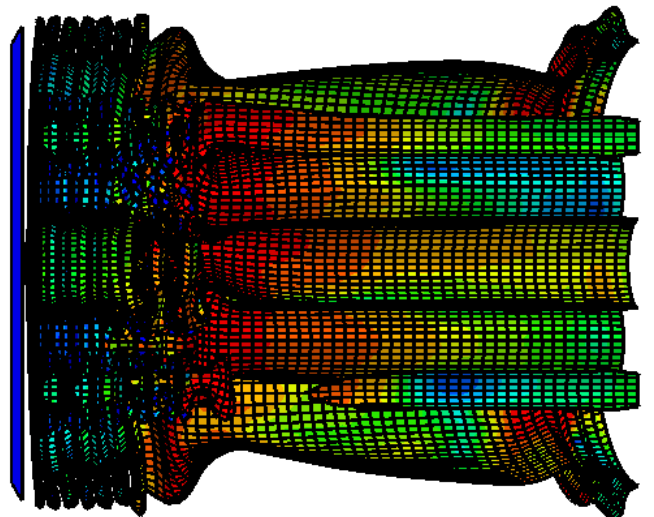
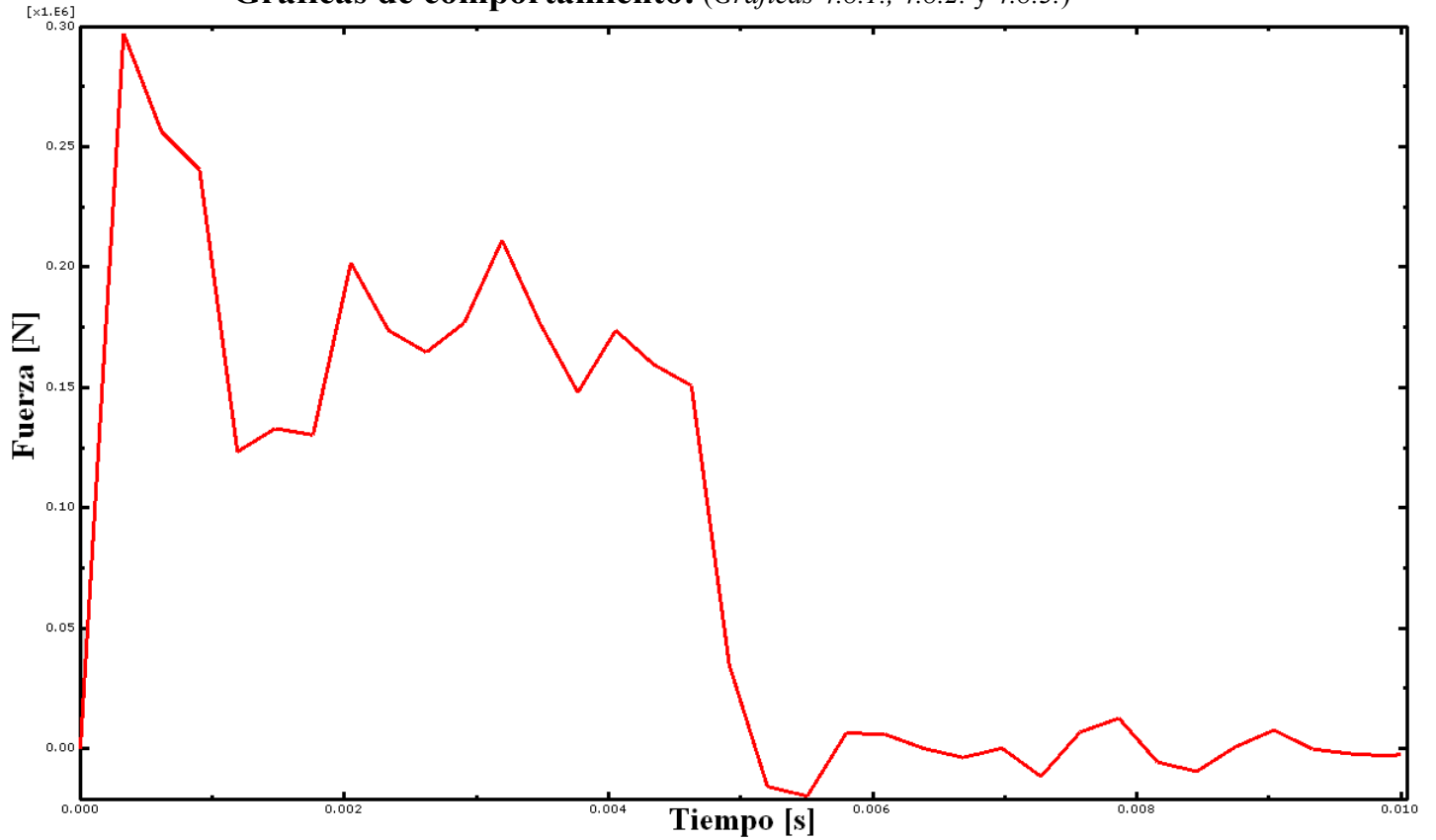
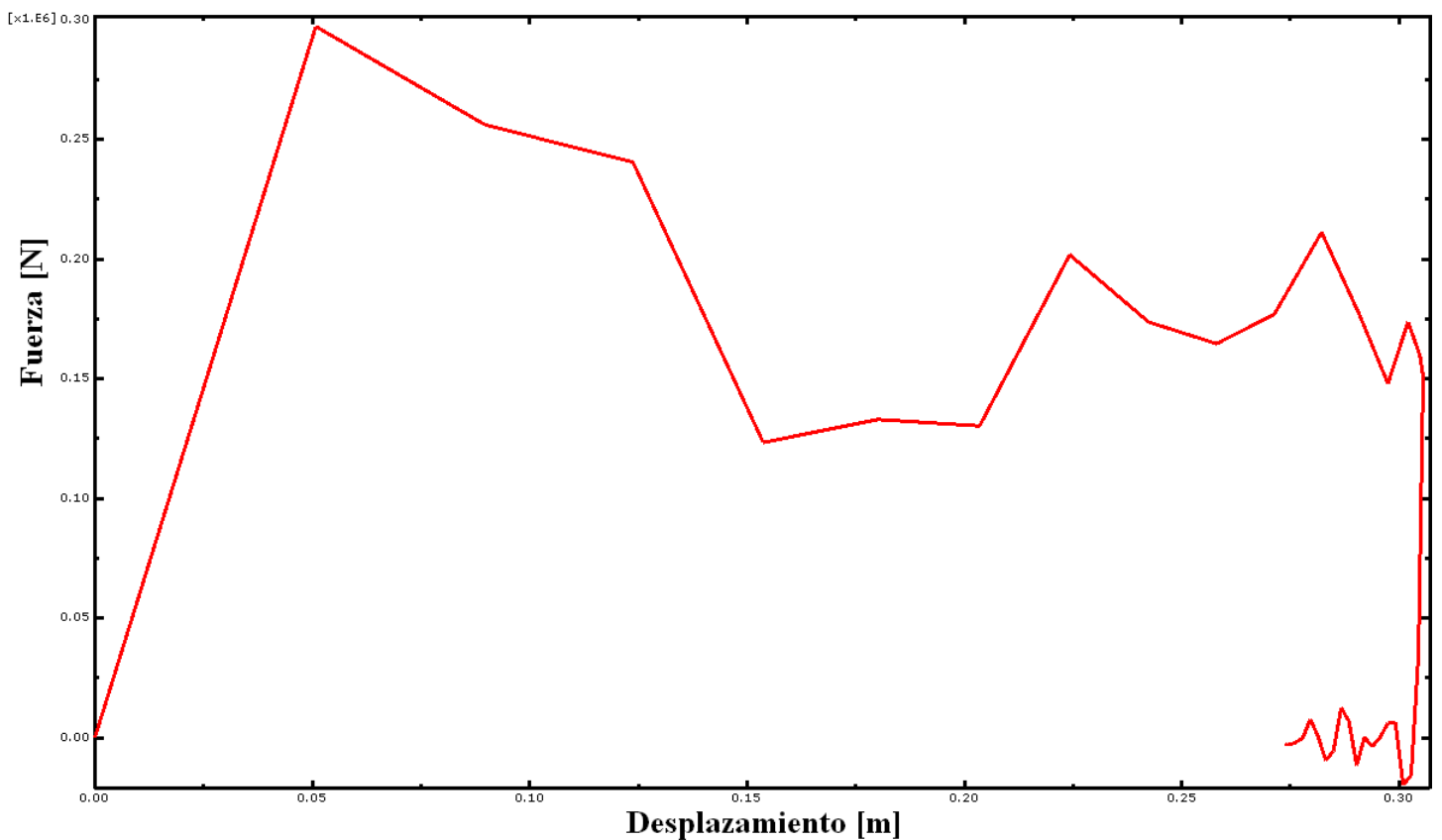


Fig. 4.8.2. (Sección Longitudinal) $t = 0,004\text{ s}$

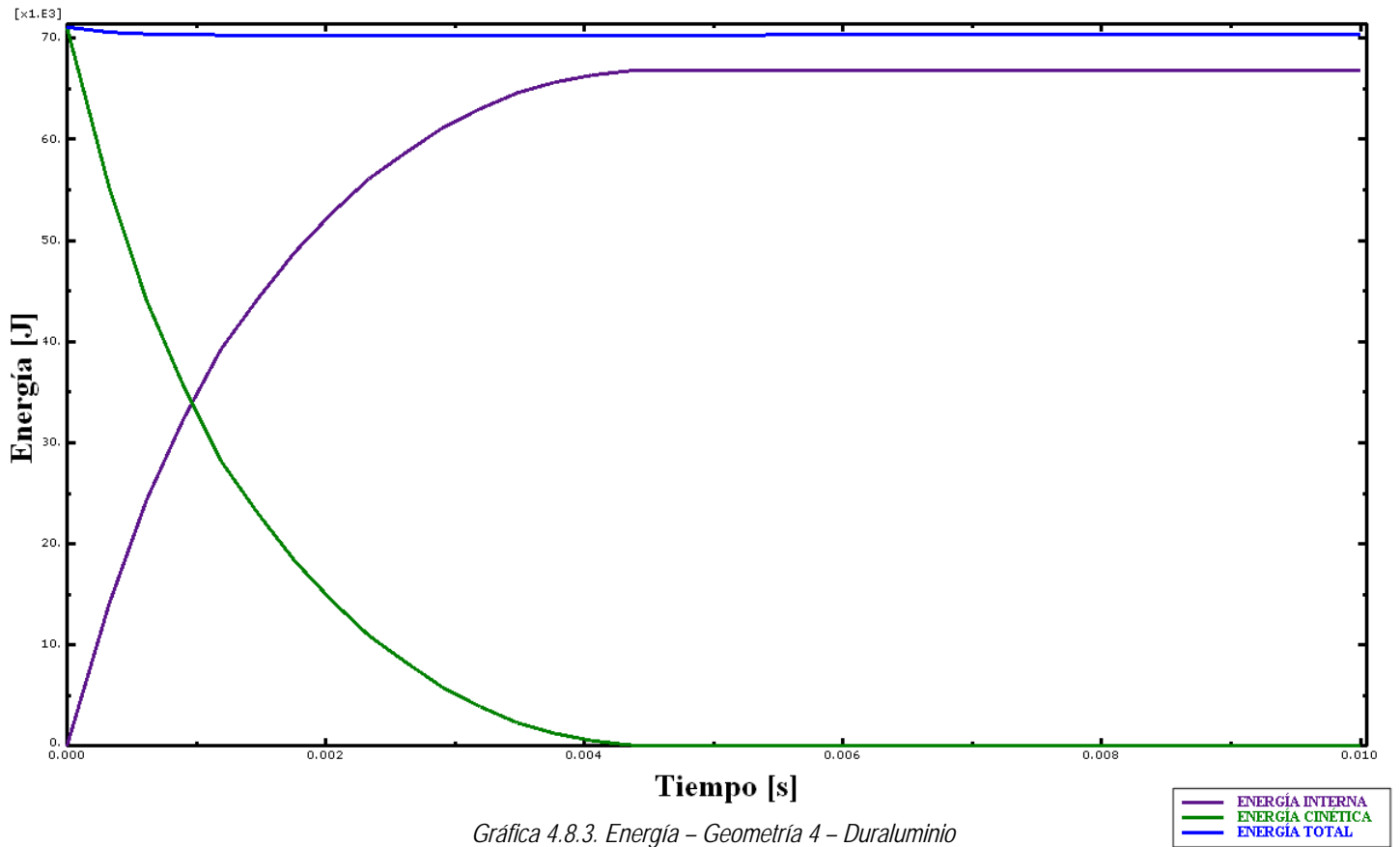
- **Gráficas de comportamiento:** (Gráficas 4.8.1., 4.8.2. y 4.8.3.)



Gráfica 4.8.1. Reacciones en la base – Geometría 4 – Duraluminio



Gráfica 4.8.2. Tensión-Deformación – Geometría 4 – Duraluminio



La energía interna máxima, que corresponde con la energía absorbida, es de **66887,4 J**.
El tiempo de absorción es de **0,00462 s**.

4.9. Geometría 5 – Acero

Evolución de la geometría 5 en Acero en función del tiempo
($e_{\text{HÉLICE ACERO}} = 0,00333 \text{ m}$ $e_{\text{CILINDRO ACERO}} = 0,00166 \text{ m}$)

- **$t = 0 \text{ s}$** : La placa todavía no ha impactado con el absorbedor (*Figura 4.9.1.*);

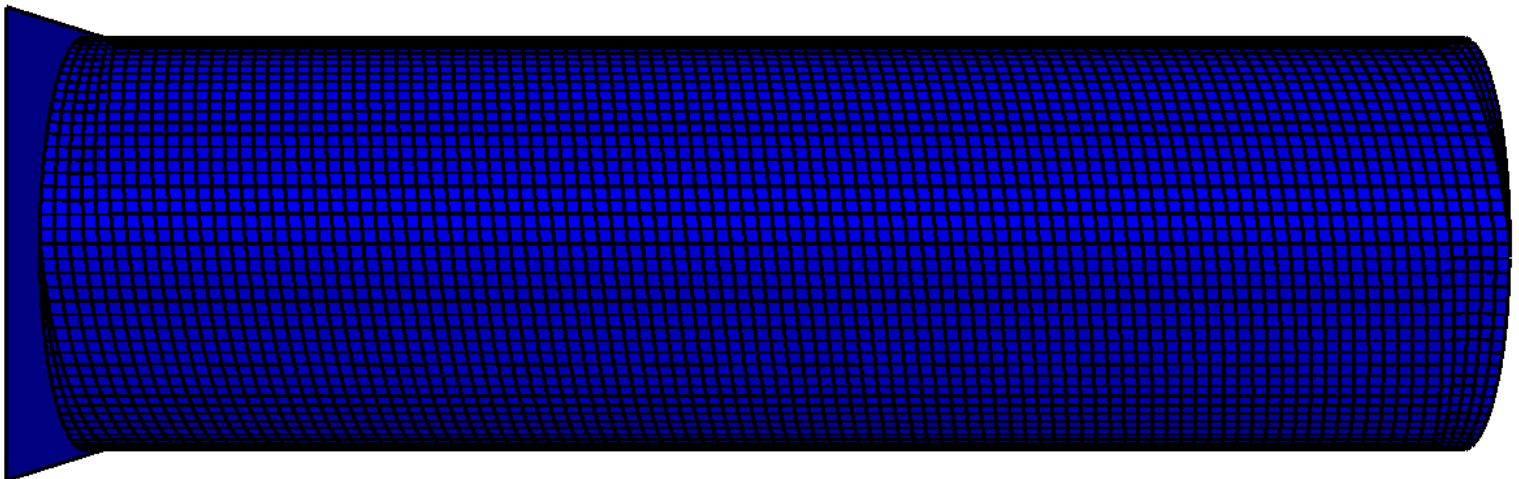


Fig. 4.9.1. $t = 0 \text{ s}$

- **$t = 0,0005$ s:** Tras el impacto, observamos un comportamiento muy diferente respecto al resto de cilindros. La base casi no recibe esfuerzos, pero la zona en contacto con la placa ha sufrido una deformación importante, plegándose sobre sí misma y proyectándose hacia el exterior. Se distinguen dos zonas bien diferenciadas; por un lado el cilindro, al tener un menor espesor recibe una mayor concentración de esfuerzos, y empieza a chafarse formando pliegues. Por otro, la hélice soporta mejor el impacto y se deforma menos. (Se han eliminado del conjunto los elementos expulsados) (*Figura 4.9.2.*);

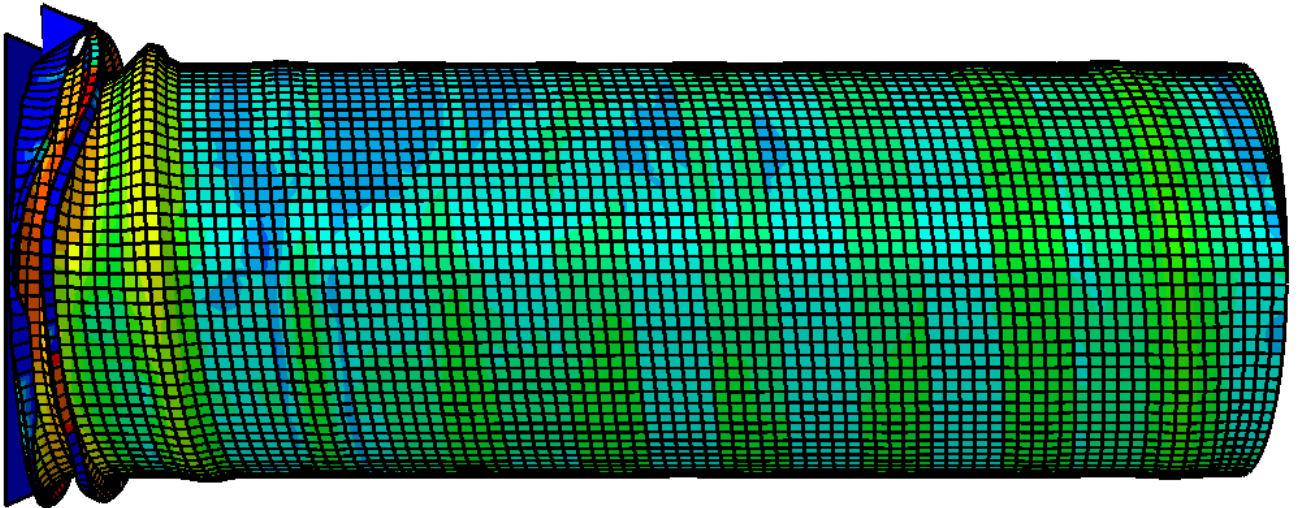


Fig. 4.9.2. $t = 0,0005$ s

- **$t = 0,002$ s:** Las dos zonas se hacen claramente visibles. El cilindro no es capaz de aguantar el esfuerzo y se pliega entre la hélice, mientras ésta aguenta mejor el avance de la placa. Está claro que esta configuración incita al absorbedor a deformarse en forma de acordeón. Muchos elementos son proyectados hacia el exterior. Los esfuerzos sobre el absorbedor son menores que en el resto de casos. La deformación longitudinal es enorme para este instante, comparado con los casos anteriores. (Se han eliminado del conjunto los elementos expulsados) (*Figura 4.9.3.*);

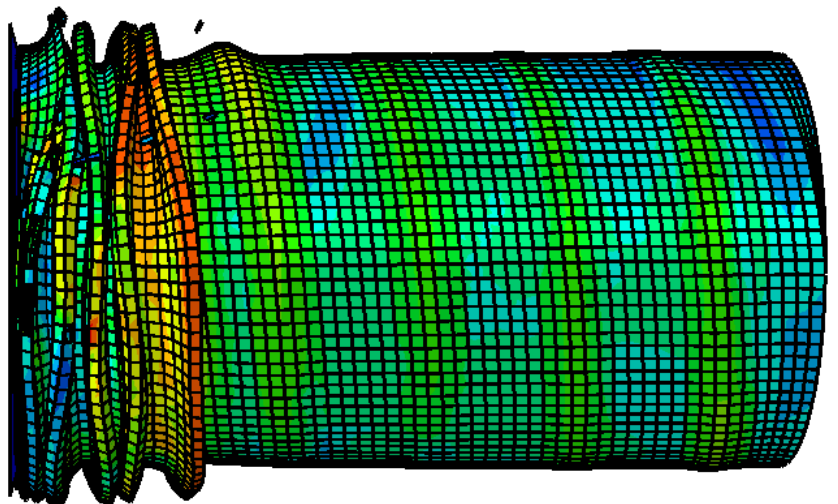


Fig. 4.9.3. $t = 0,002$ s

- **$t = 0,004$ s:** La placa sigue avanzando conforme el absorbedor se va deformando en forma de acordeón. Se alternan las secciones propias del cilindro, muy plegadas, con las de la hélice. (Se han eliminado del conjunto los elementos expulsados) (*Figura 4.9.4.*);

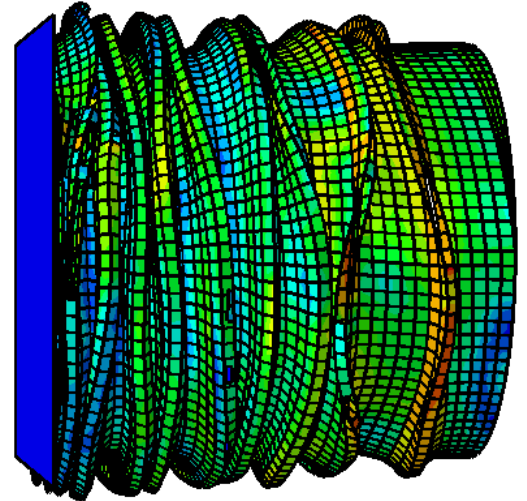


Fig. 4.9.4. $t = 0,004$ s

- **$t = 0,006$ s:** La deformación longitudinal del absorbedor ha sido grande. La placa se ha detenido por completo, y se desplaza muy acusadamente hacia atrás. Es evidente la gran recuperación elástica del material en forma de hélice. Los esfuerzos han descendido de manera muy acusada. Desde el instante anterior hasta el presente, el absorbedor se deforma progresivamente de la misma manera, en una muy marcada forma de acordeón. (Se han eliminado del conjunto los elementos expulsados) (*Figura 4.9.5.*);

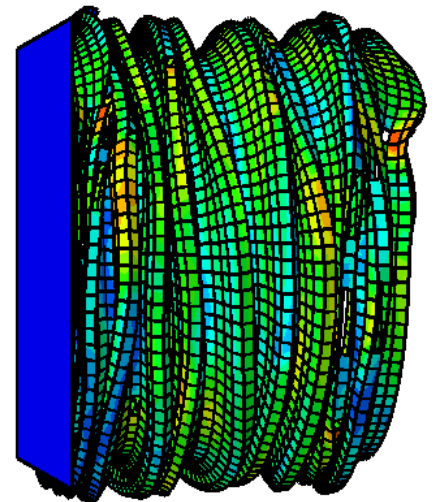
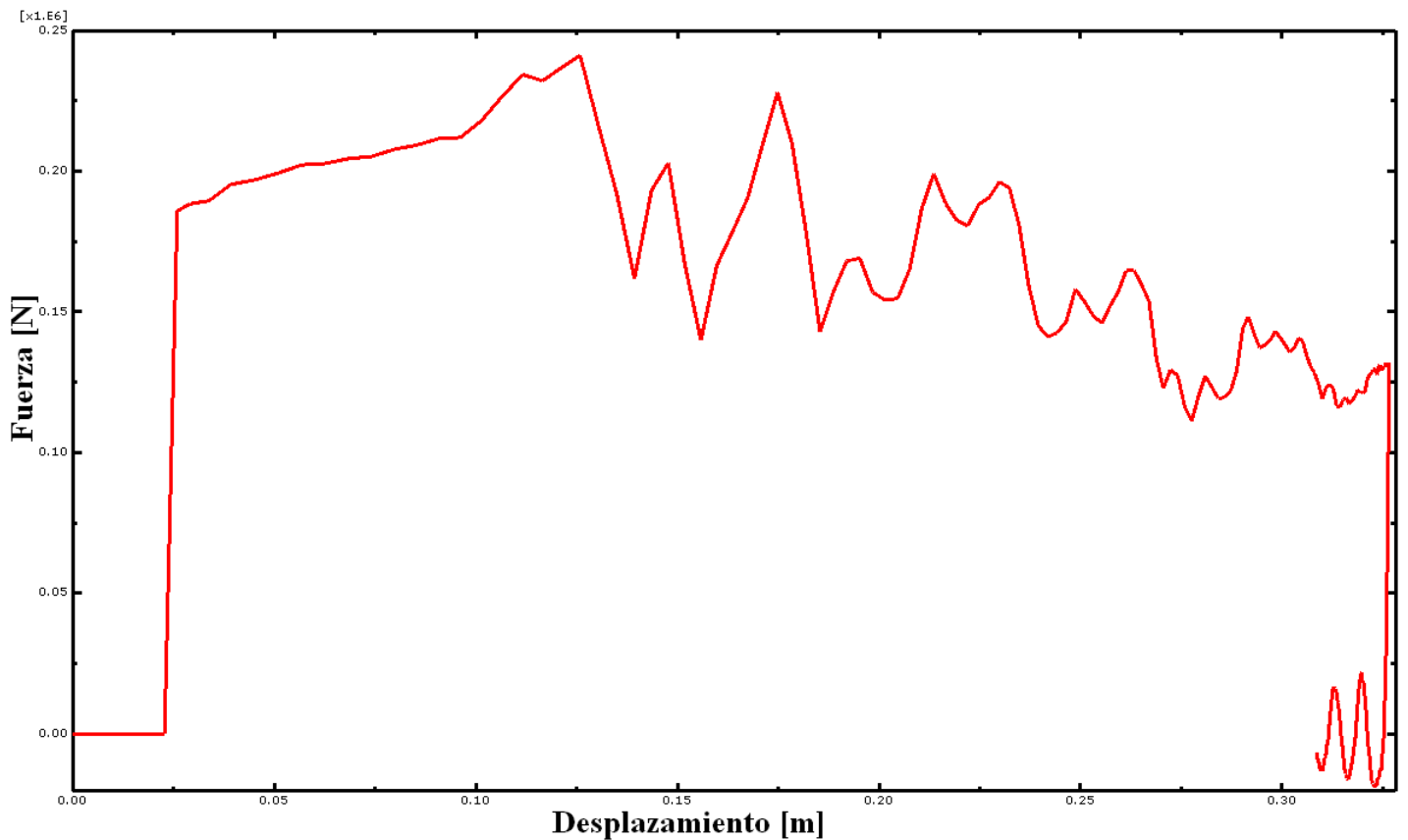
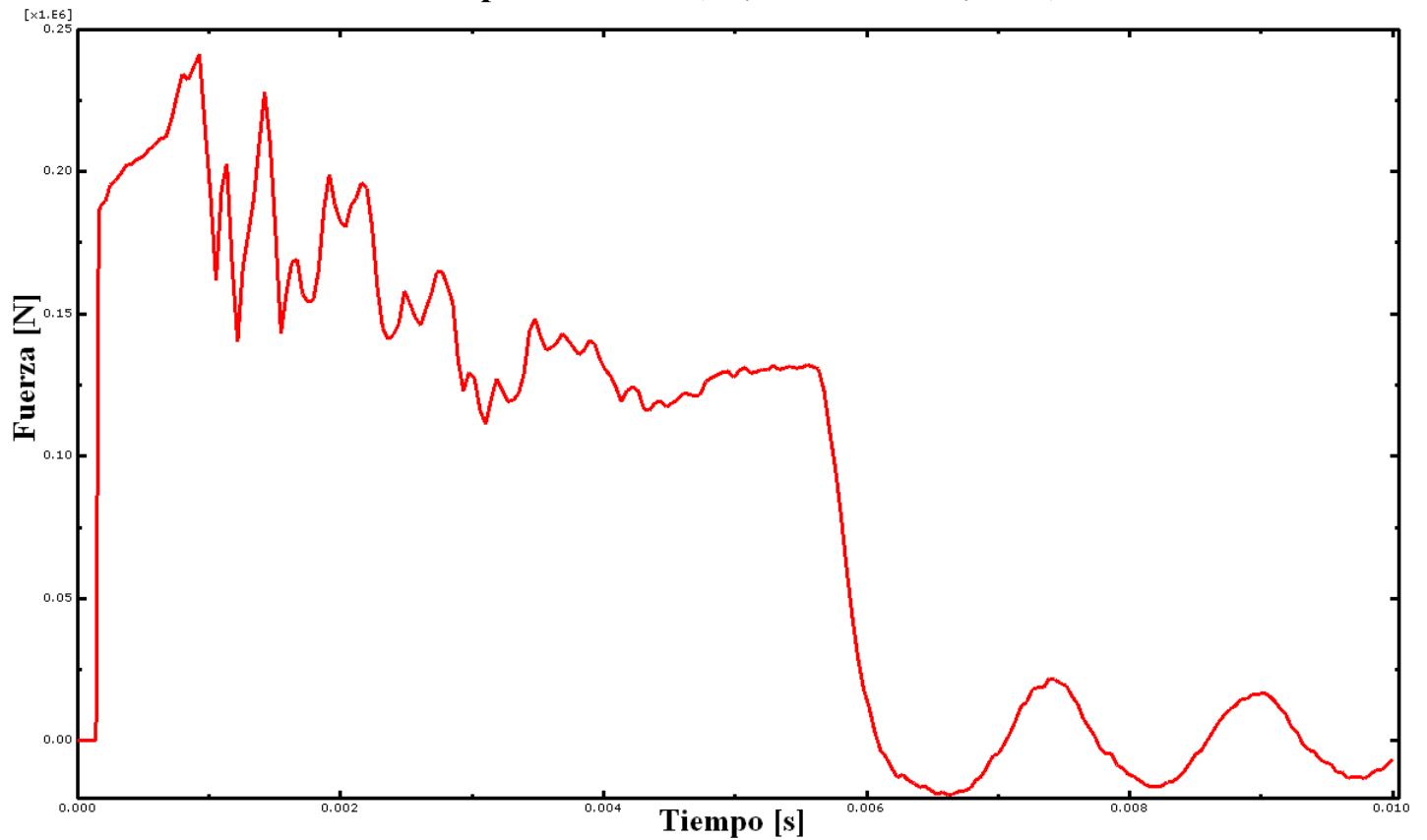
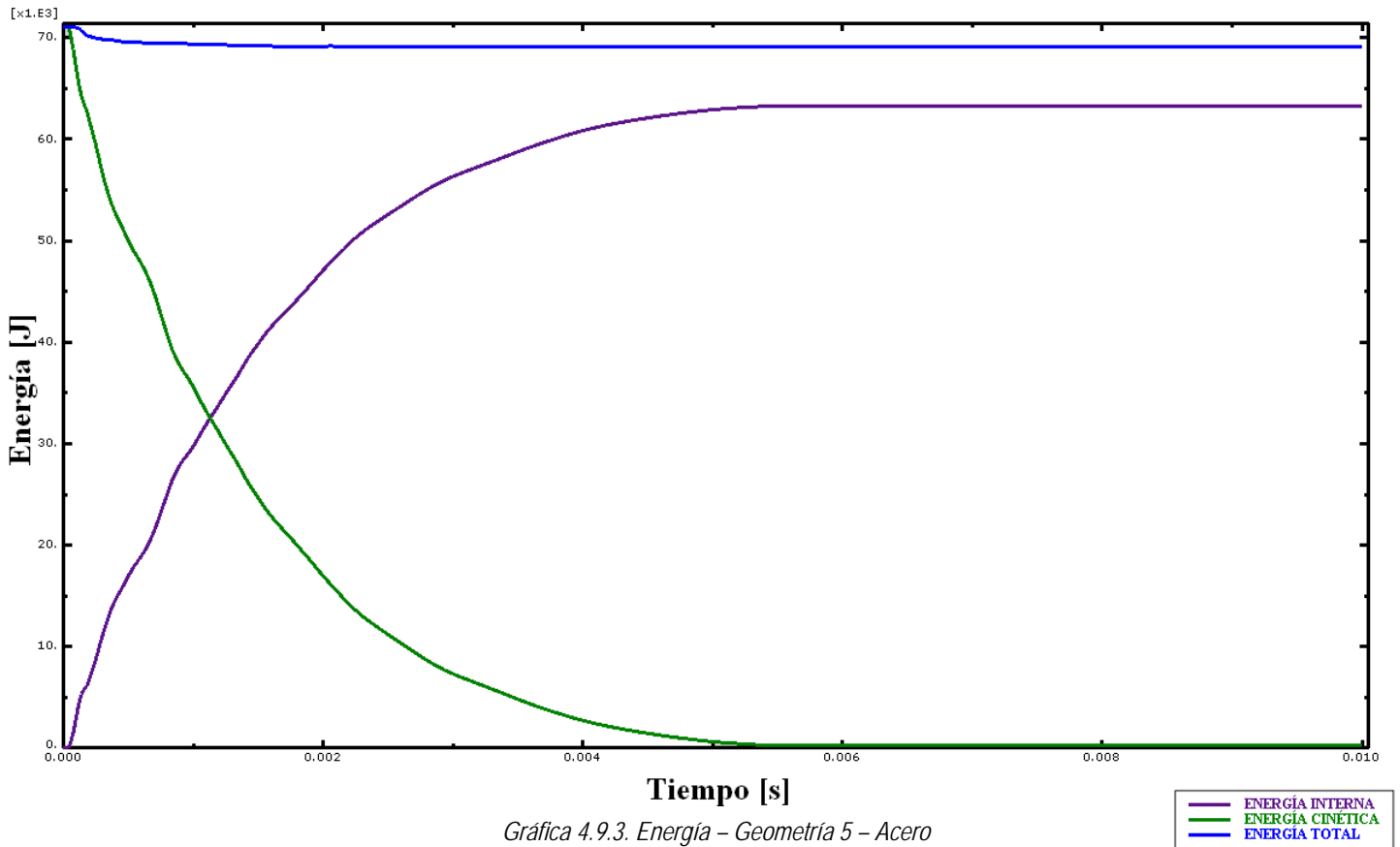


Fig. 4.9.5. $t = 0,006$ s

- **Gráficas de comportamiento:** (Gráficas 4.9.1., 4.9.2. y 4.9.3.)



Gráfica 4.9.2. Tensión-Deformación – Geometría 5 – Acero



Gráfica 4.9.3. Energía – Geometría 5 – Acero

La energía interna máxima, que corresponde con la energía absorbida, es de **63281,5 J**.
El tiempo de absorción es de **0,00567 s**.

4.10. Geometría 5 – Duraluminio

Evolución de la geometría 5 en Duraluminio en función del tiempo
($e_{\text{HÉLICE ACERO}} = 0,00934 \text{ m}$ $e_{\text{CILINDRO ACERO}} = 0,004657 \text{ m}$)

- **t = 0 s:** La placa todavía no ha impactado con el absorbedor (*Figura 4.9.1.*);
- **t = 0,0005 s:** El comportamiento tras impacto es muy similar a la misma geometría en Acero, pero más acusado. La base casi no recibe esfuerzos, la zona en contacto con la placa ha sufrido una deformación importante, plegándose e incluso superponiéndose sobre sí misma y proyectándose hacia el exterior. El cilindro empieza a plegarse levemente a lo largo de toda su longitud. La hélice soporta mejor los esfuerzos y se deforma menos. (*Figura 4.10.1.*);

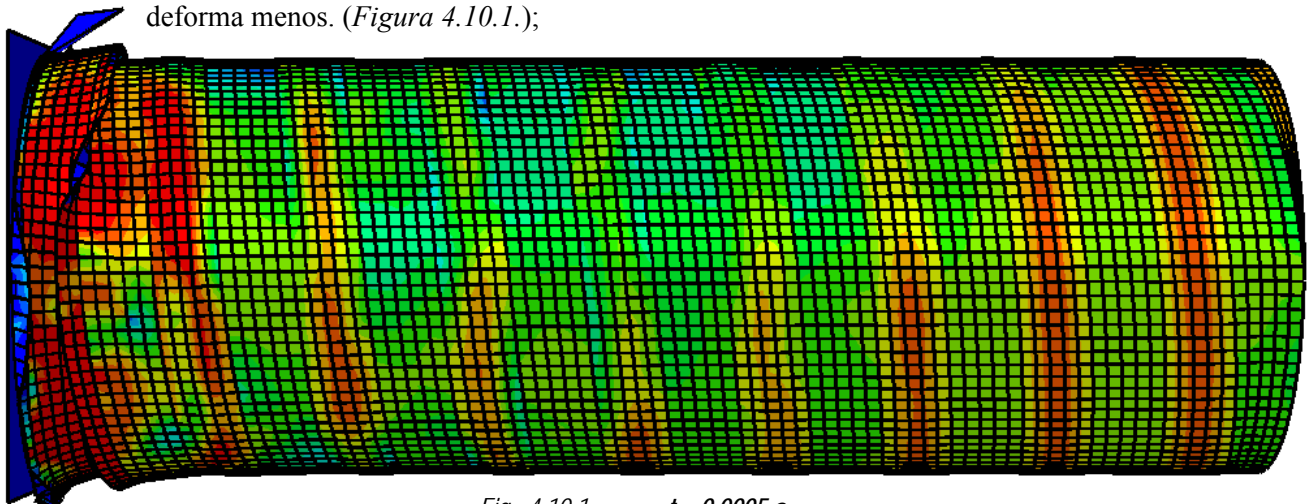


Fig. 4.10.1. $t = 0,0005 \text{ s}$

- **$t = 0,002$ s:** Las dos zonas se hacen claramente visibles. El cilindro no es capaz de aguantar el esfuerzo y rompe sus uniones con el resto del absorbedor, montándose por encima de éste. La hélice aguanta mejor el avance de la placa. La deformación en forma de acordeón no llega a producirse por la falta de estabilidad de la configuración. Muchos elementos son proyectados hacia el exterior. La deformación longitudinal es moderada. Se aprecia la aparición de un leve pandeo (Se han eliminado del conjunto parte de los elementos expulsados) (*Figura 4.10.2. y 4.10.3.*);

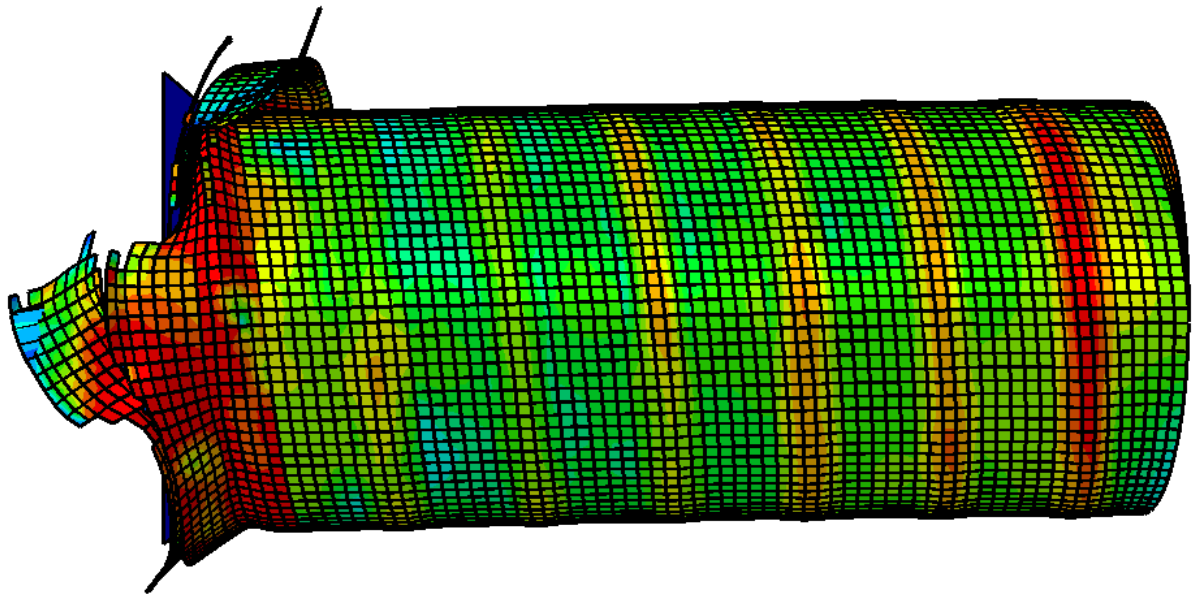


Fig. 4.10.2. $t = 0,002$ s

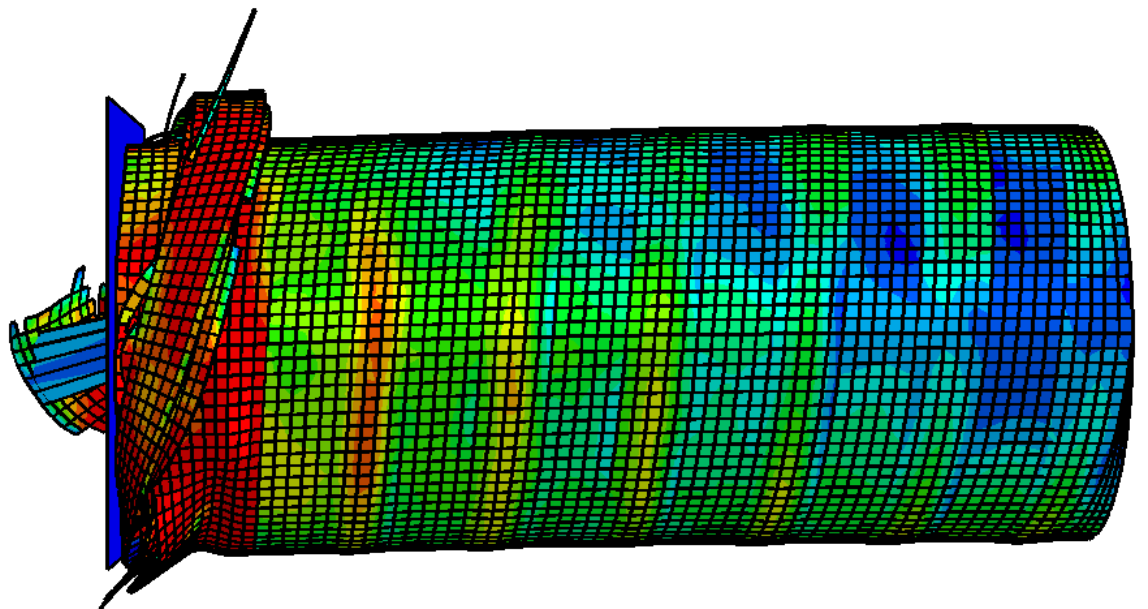


Fig. 4.10.3. (Vista girada) $t = 0,002$ s

- **$t = 0,0025$ s:** Contrariamente a lo que cabría esperar, la placa se ha detenido por completo, y se desplaza muy acusadamente hacia atrás, a pesar de la evidente rotura de partes del absorbedor. La deformación desde el instante anterior es similar, y mínima. (Se han eliminado del conjunto parte de los elementos expulsados) (Figura 4.10.4. y 4.10.5.);

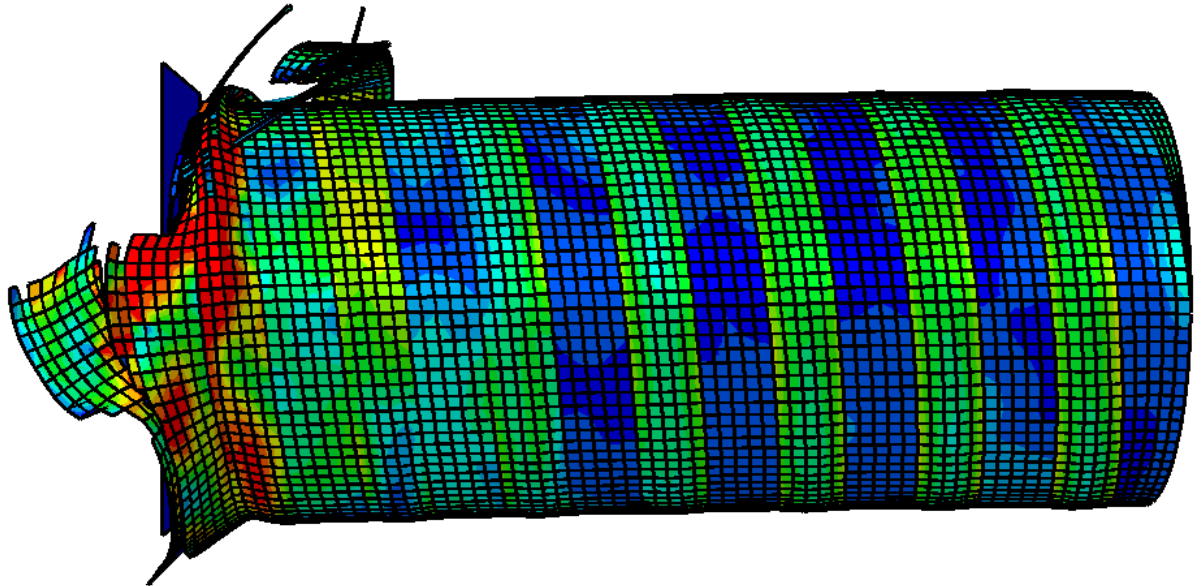


Fig. 4.10.4. (Vista Girada) $t = 0,0025$ s

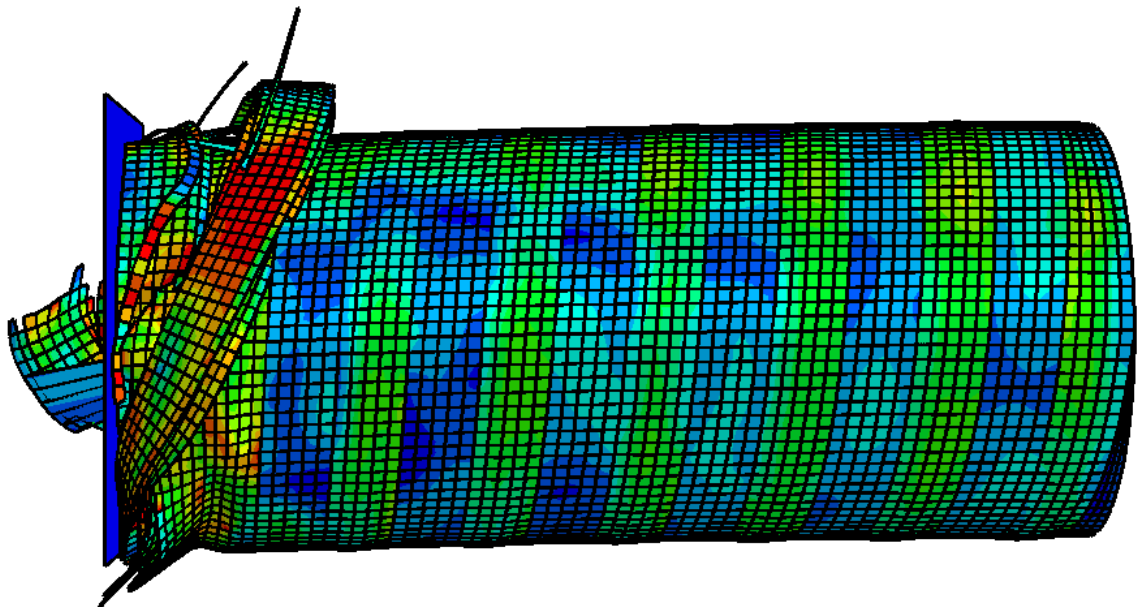
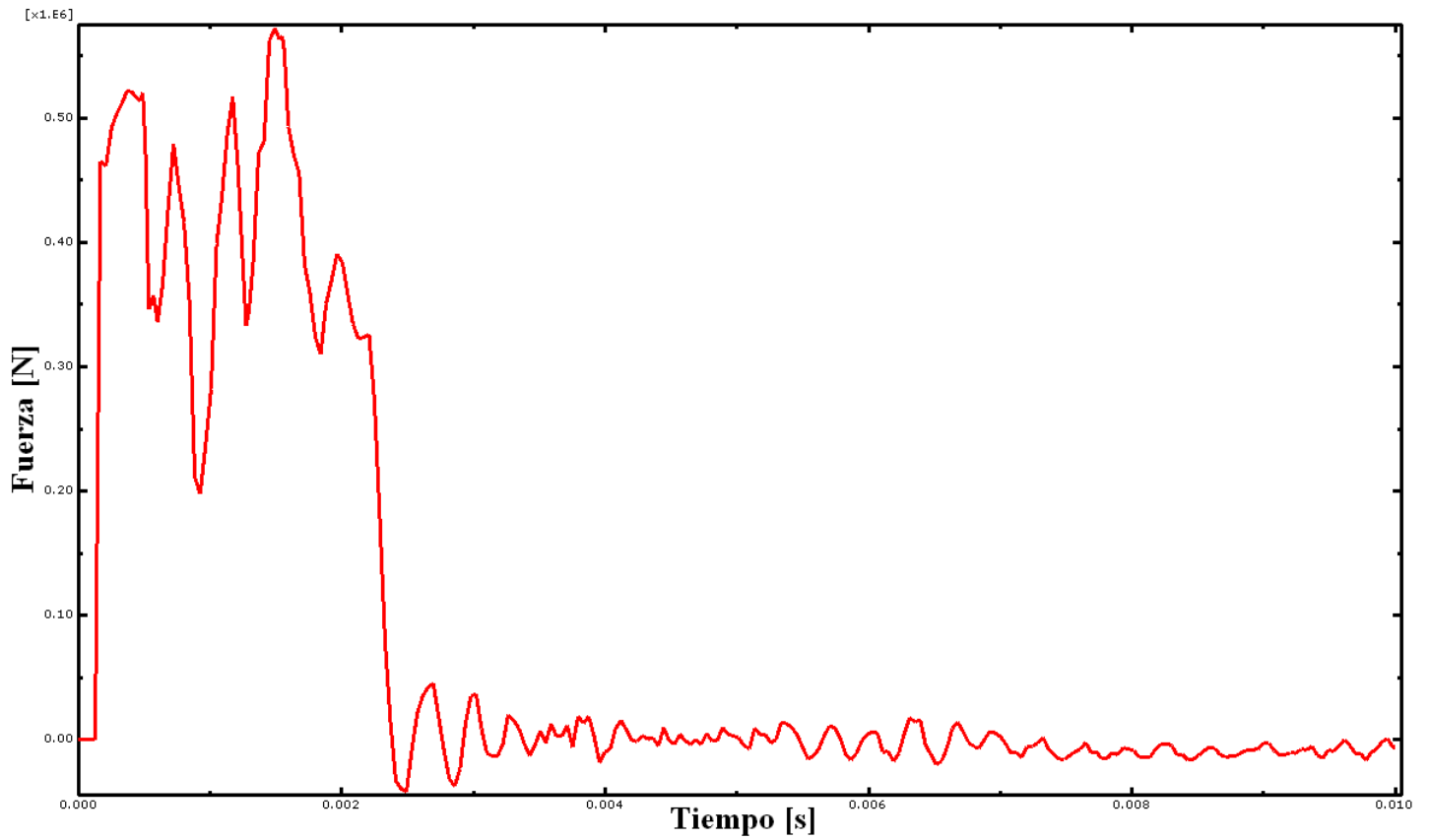


Fig. 4.10.5. (Vista Girada) $t = 0,0025$ s

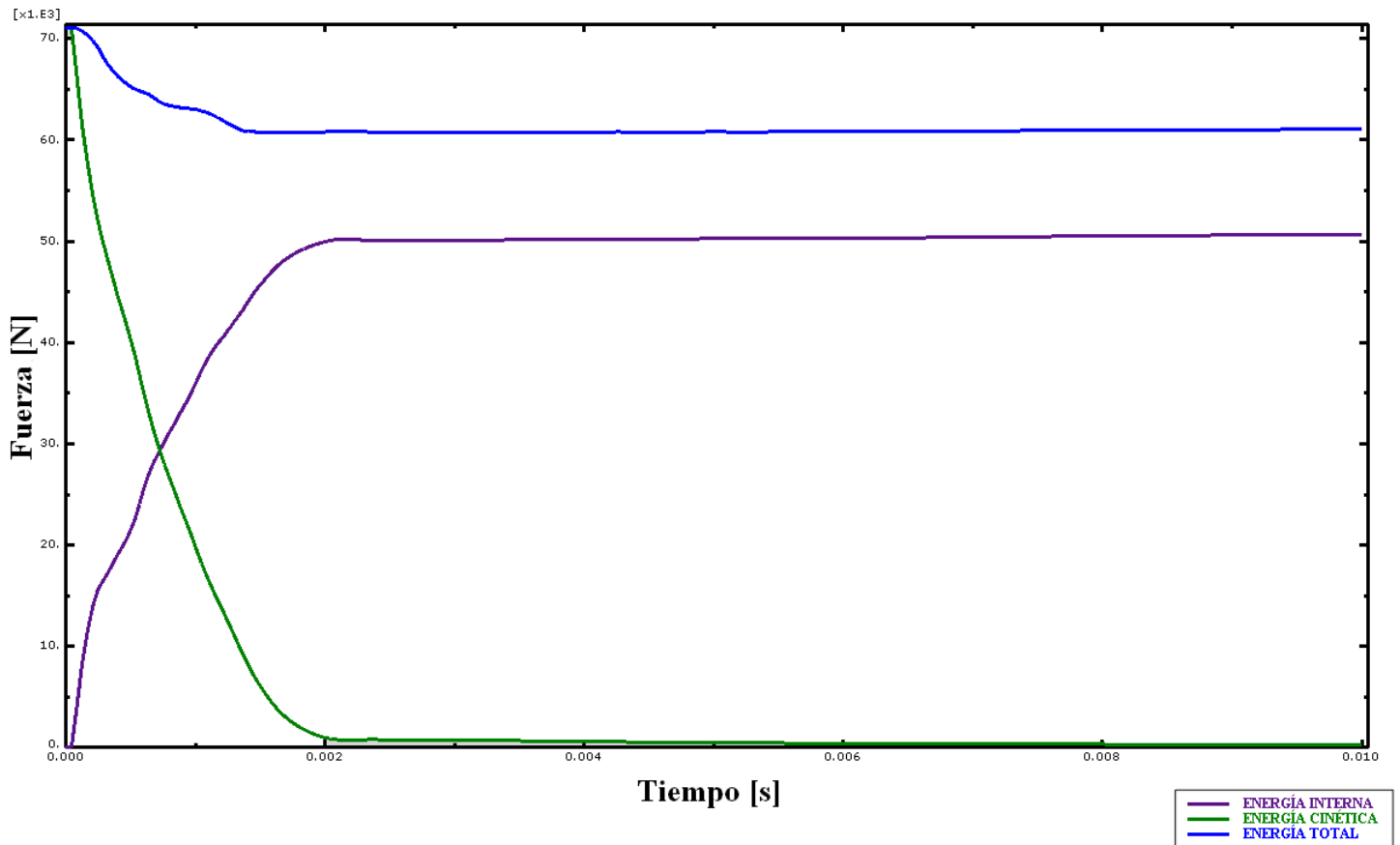
- **Gráficas de comportamiento:** (Gráficas 4.10.1., 4.10.2. y 4.10.3.)



Gráfica 4.10.1. Reacciones en la base – Geometría 5 – Duraluminio



Gráfica 4.10.2. Tensión-Deformación – Geometría 5 – Duraluminio



Gráfica 4.10.3. Energía – Geometría 5 – Duraluminio

La energía interna máxima, que corresponde con la energía absorbida, es de **50209,4 J**.
El tiempo de absorción es de **0,00216 s**.

4.11. Geometría 6 – Acero

Evolución de la geometría 5 en Acero en función del tiempo
($e_{\text{HÉLICE ACERO}} = 0,00333 \text{ m}$ $e_{\text{CILINDRO ACERO}} = 0,00166 \text{ m}$)

- **t = 0 s**: La placa todavía no ha impactado con el absorbedor (*Figura 4.11.1*);

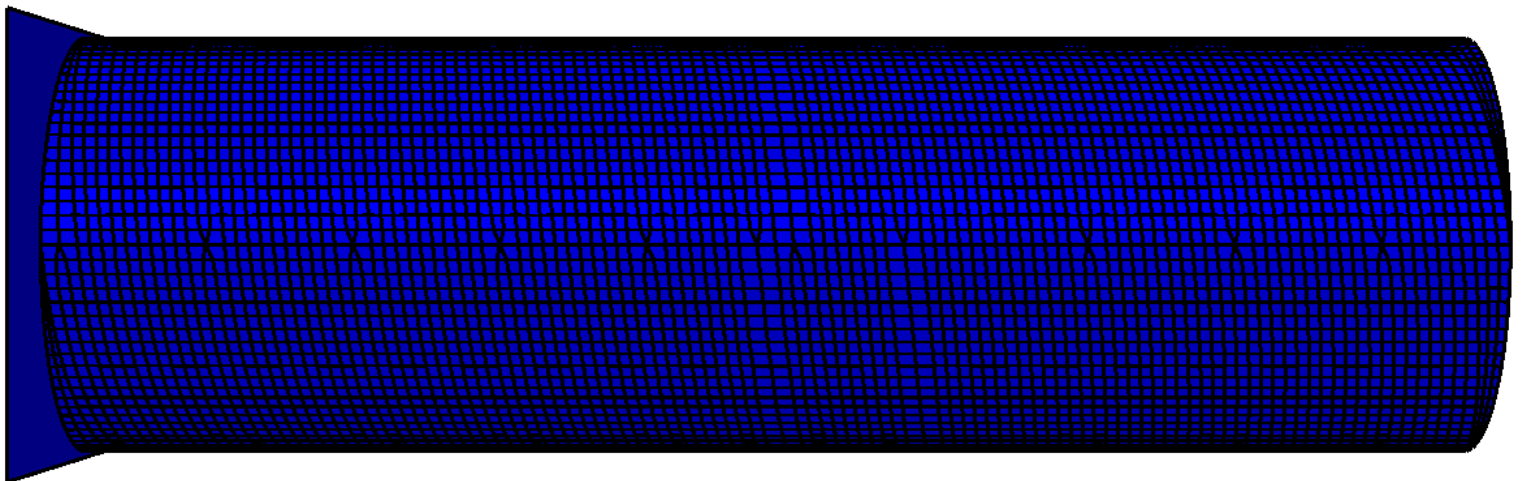


Fig. 4.11.1. $t = 0 \text{ s}$

- **$t = 0,001$ s:** La deformación del absorbedor es muy similar a la de Geometría 5 en Acero, pero la doble hélice incita todavía más al cilindro a deformarse como un acordeón. Los esfuerzos en la base siguen siendo mínimos, concentrándose en la zona en contacto con la placa. (Se han eliminado del conjunto los elementos expulsados) (*Figura 4.11.2.*);

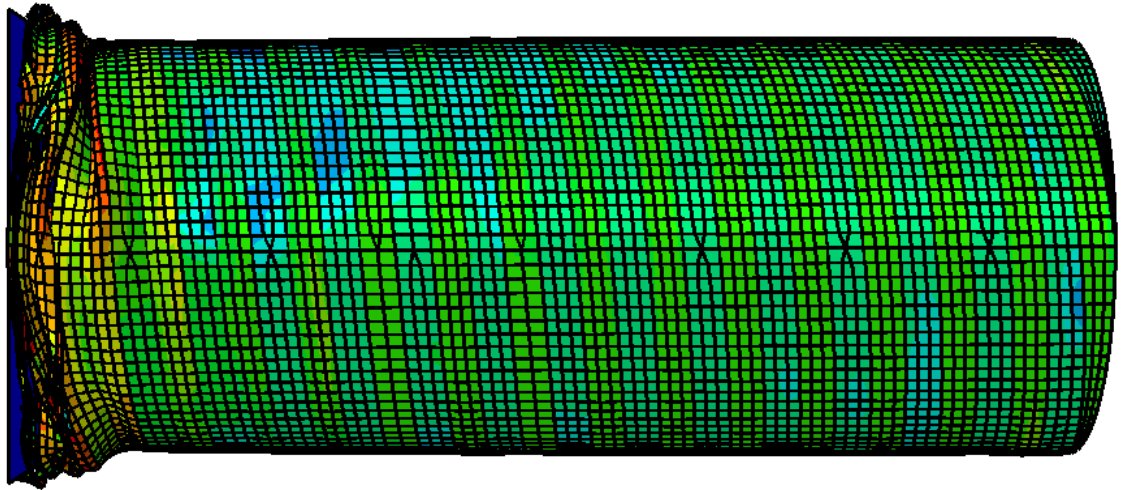


Fig. 4.11.2. $t = 0,001$ s

- **$t = 0,006$ s:** El absorbedor sigue deformándose como un acordeón de una manera muy visible, incitado por la doble hélice, hasta que la placa se detiene por completo y se desplaza levemente hacia atrás. La forma de deformarse y el comportamiento son iguales a los de la Geometría 5 en Acero, pero la configuración de doble hélice limita más el desplazamiento longitudinal (*Figura 4.11.3.*);

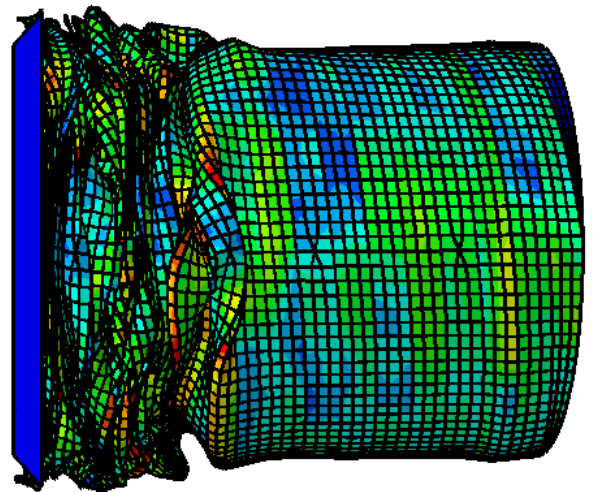
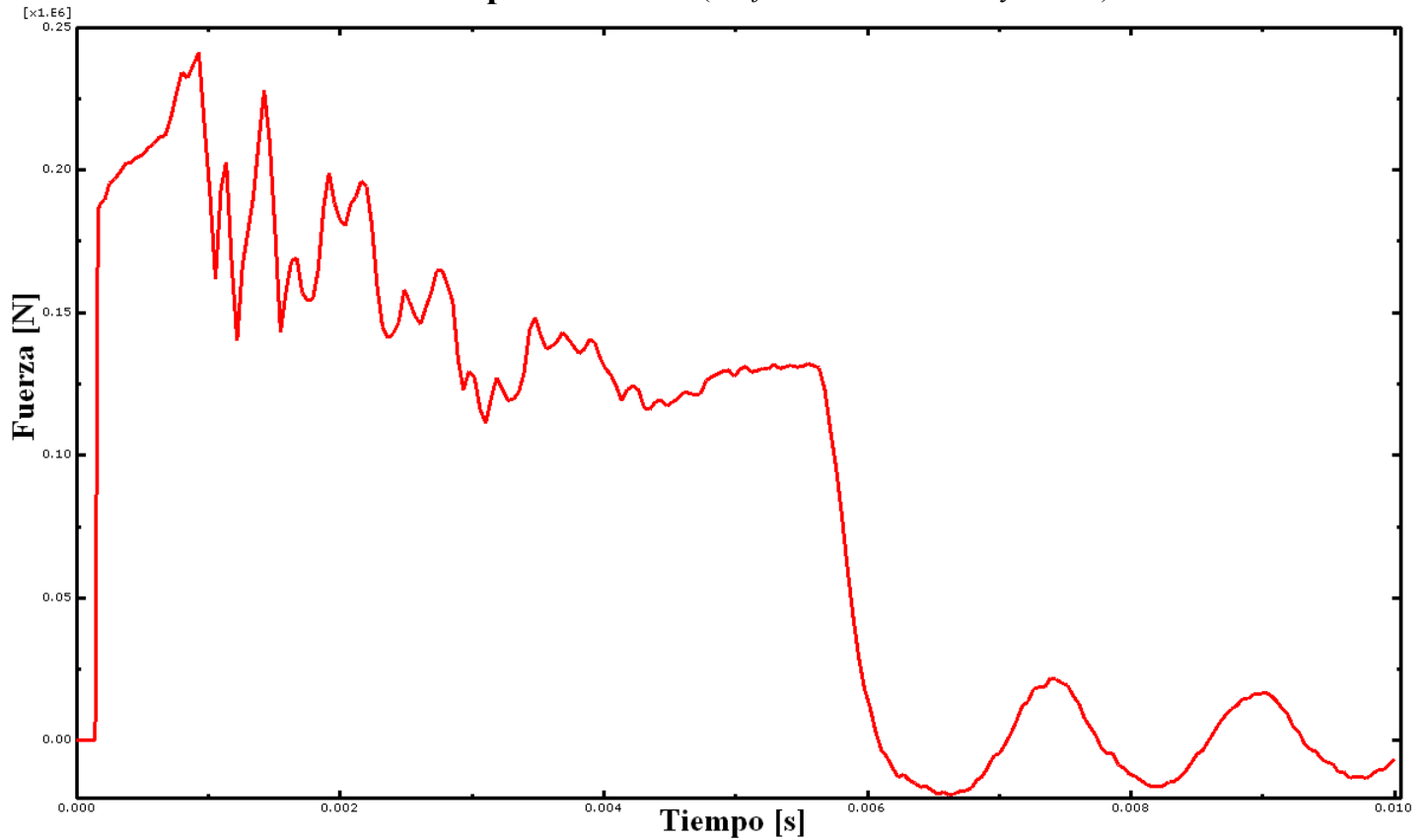
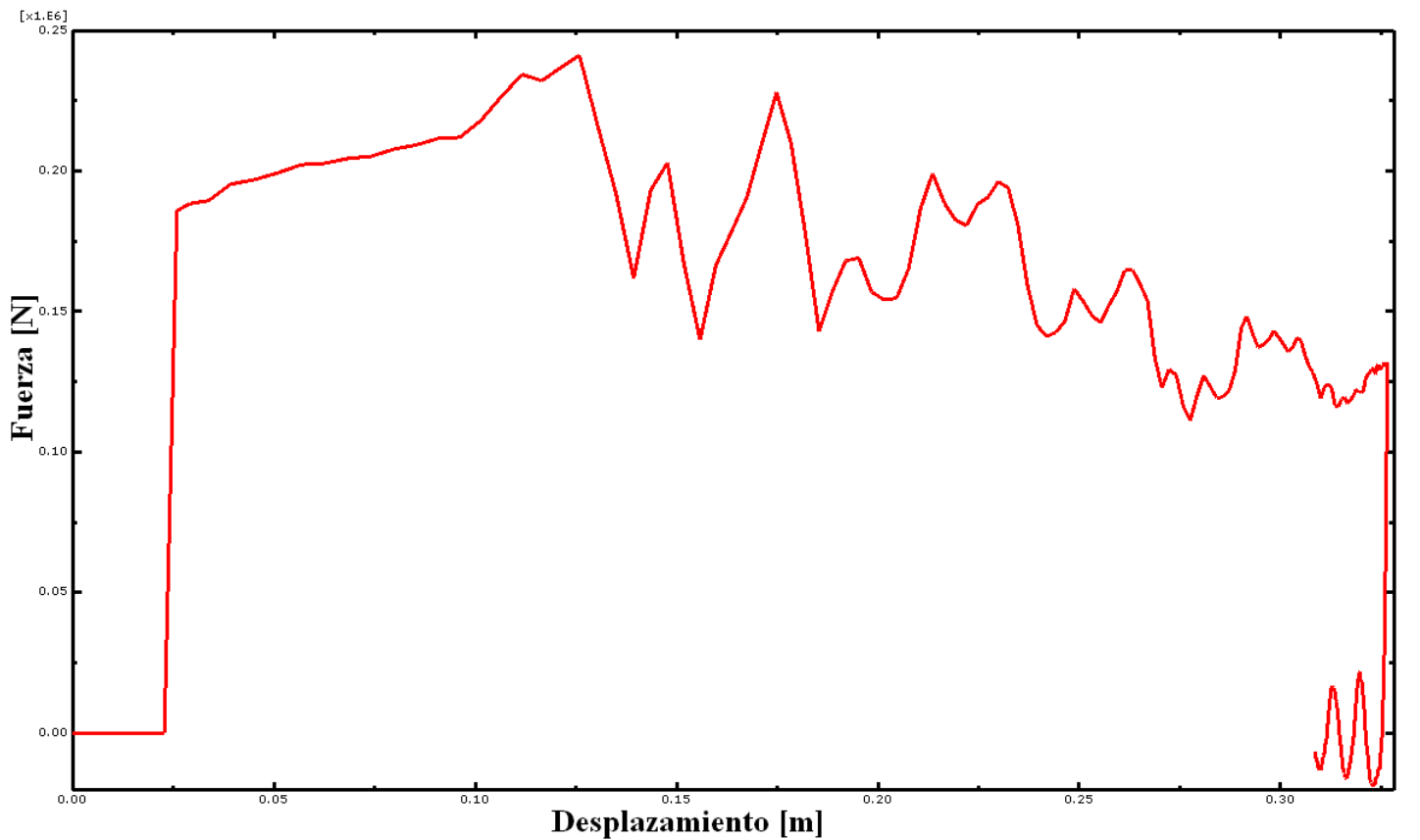


Fig. 4.11.3. $t = 0,006$ s

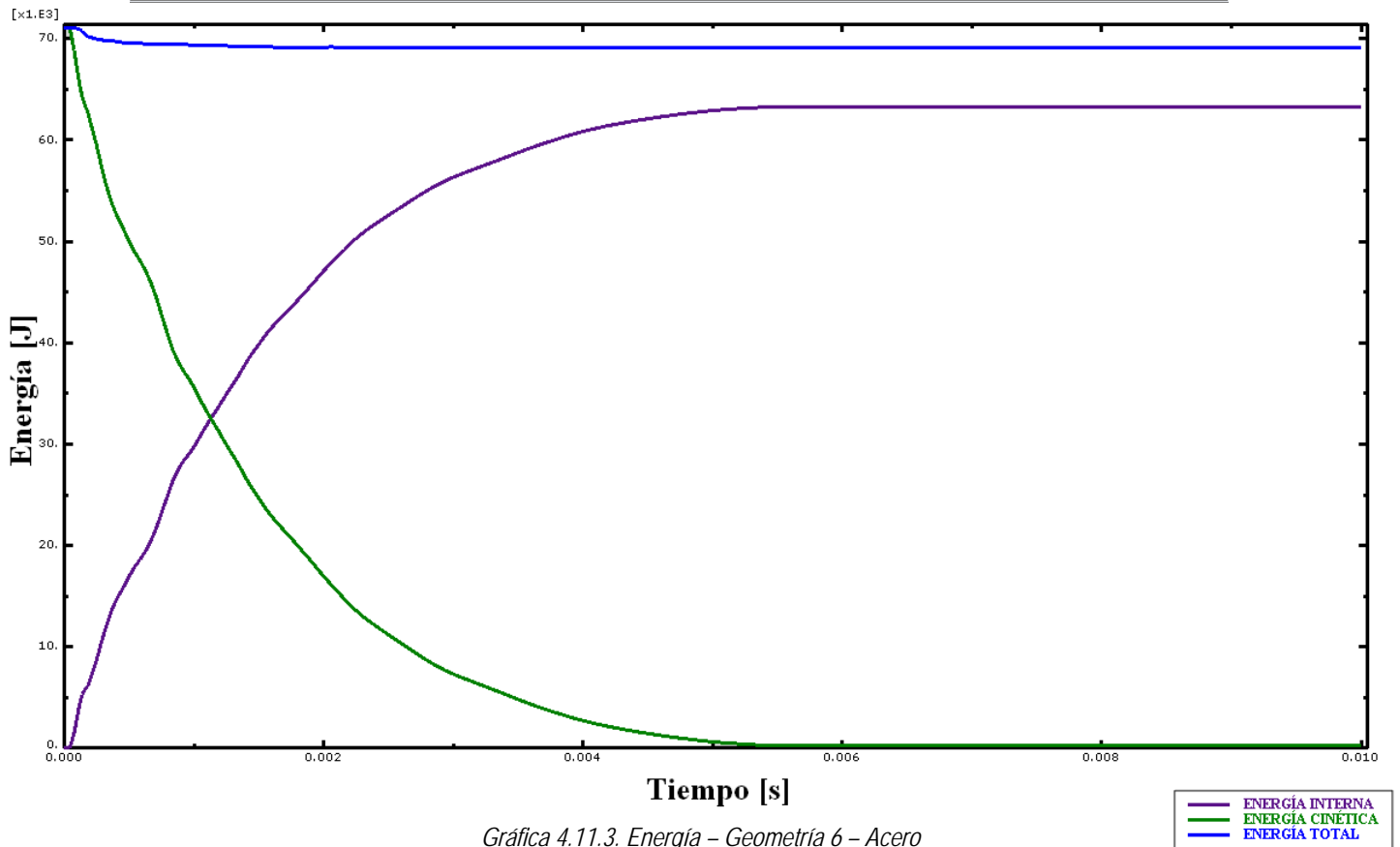
- **Gráficas de comportamiento:** (Gráficas 4.11.1., 4.11.2. y 4.11.3.)



Gráfica 4.11.1. Reacciones en la base – Geometría 6 – Acero



Gráfica 4.11.2. Tensión-Deformación – Geometría 6 – Acero



4.12. Geometría 6 – Duraluminio

Evolución de la geometría 6 en Duraluminio en función del tiempo
($e_{\text{HÉLICE ACERO}} = 0,00934 \text{ m}$ $e_{\text{CILINDRO ACERO}} = 0,004657 \text{ m}$)

- **$t = 0 \text{ s}$:** La placa todavía no ha impactado con el absorbedor (*Figura 4.11.1.*);
- **$t = 0,001 \text{ s}$:** El comportamiento es muy similar a la Geometría 5 en Duraluminio. La base casi no recibe esfuerzos, la zona en contacto con la placa ha sufrido una deformación importante, plegándose sobre sí misma y proyectándose hacia el exterior. (Se han eliminado del conjunto parte de los elementos expulsados) (*Figura 4.12.1.*);

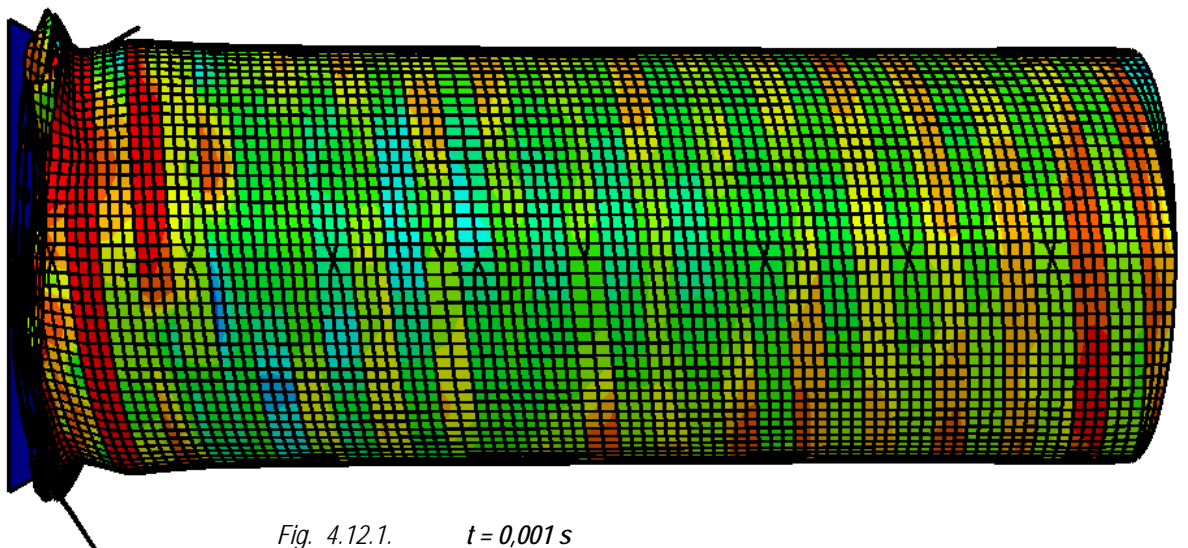


Fig. 4.12.1. $t = 0,001 \text{ s}$

- **$t = 0,003$ s:** la placa se ha detenido por completo, y se desplaza muy acusadamente hacia atrás, a pesar de la evidente rotura de partes del absorbedor. La deformación desde el instante anterior es similar, y mínima. La deformación en forma de acordeón es evidente en la parte en contacto con la placa, pero inexistente en el resto del absorbedor. (Se han eliminado del conjunto parte de los elementos expulsados) (Figura 4.12.2.);

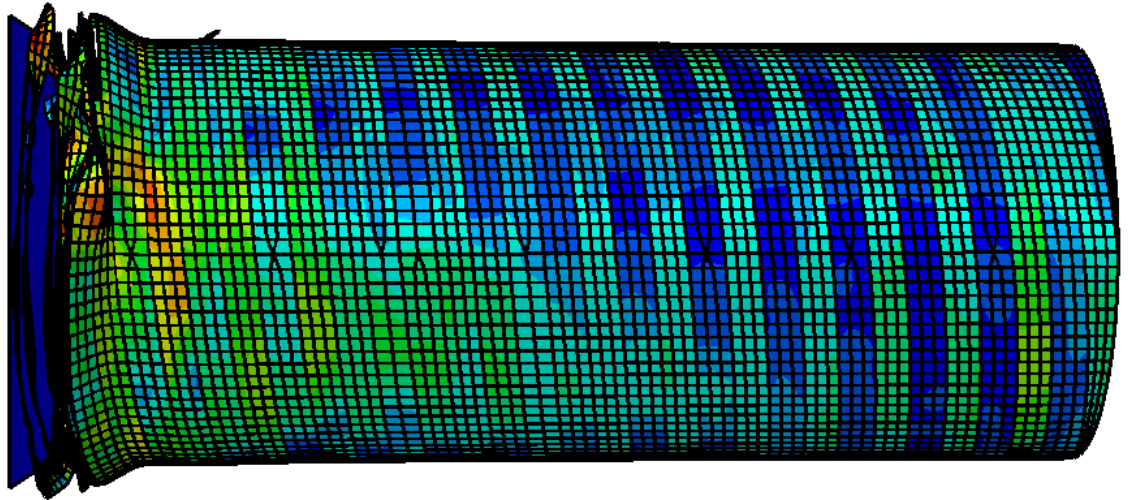
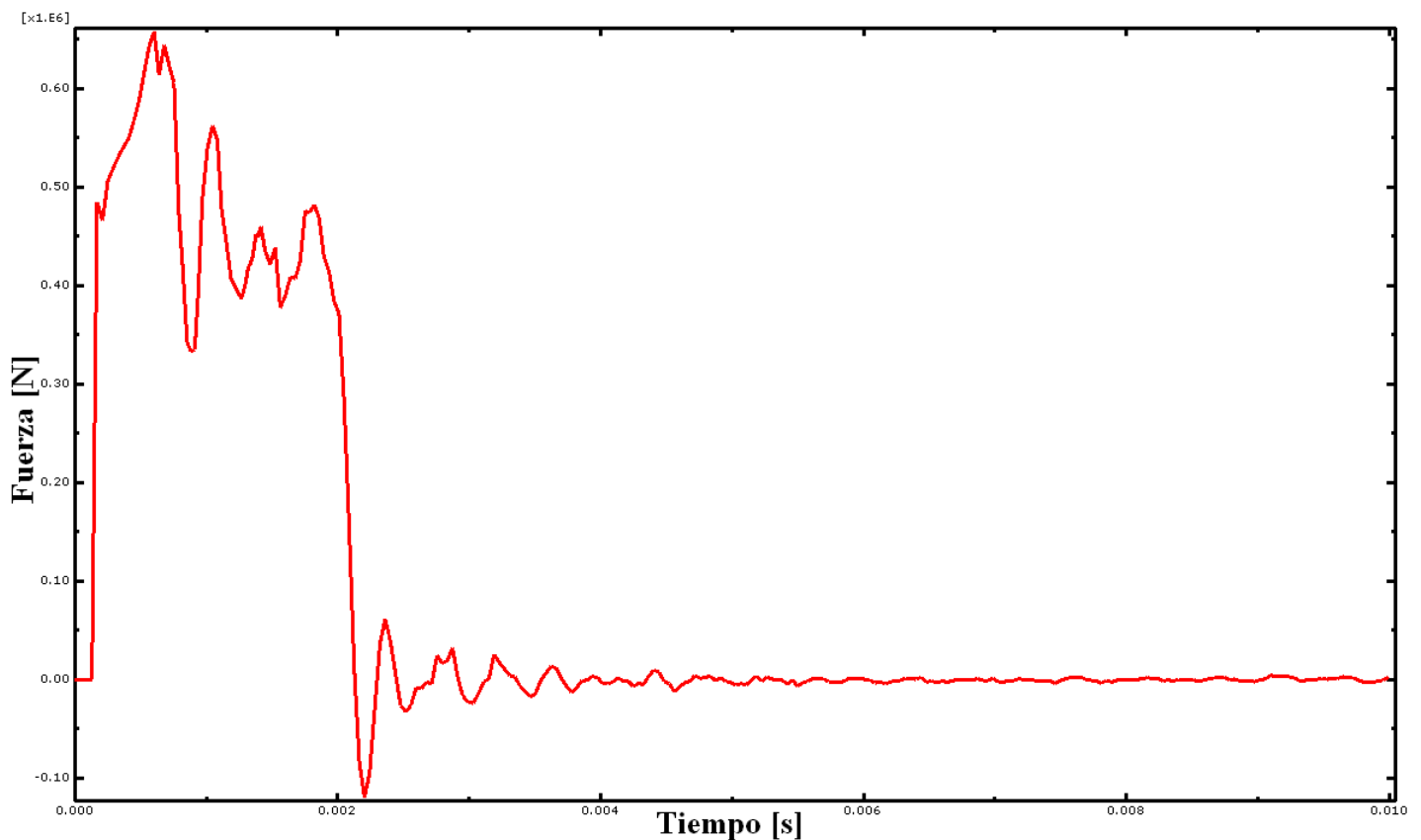
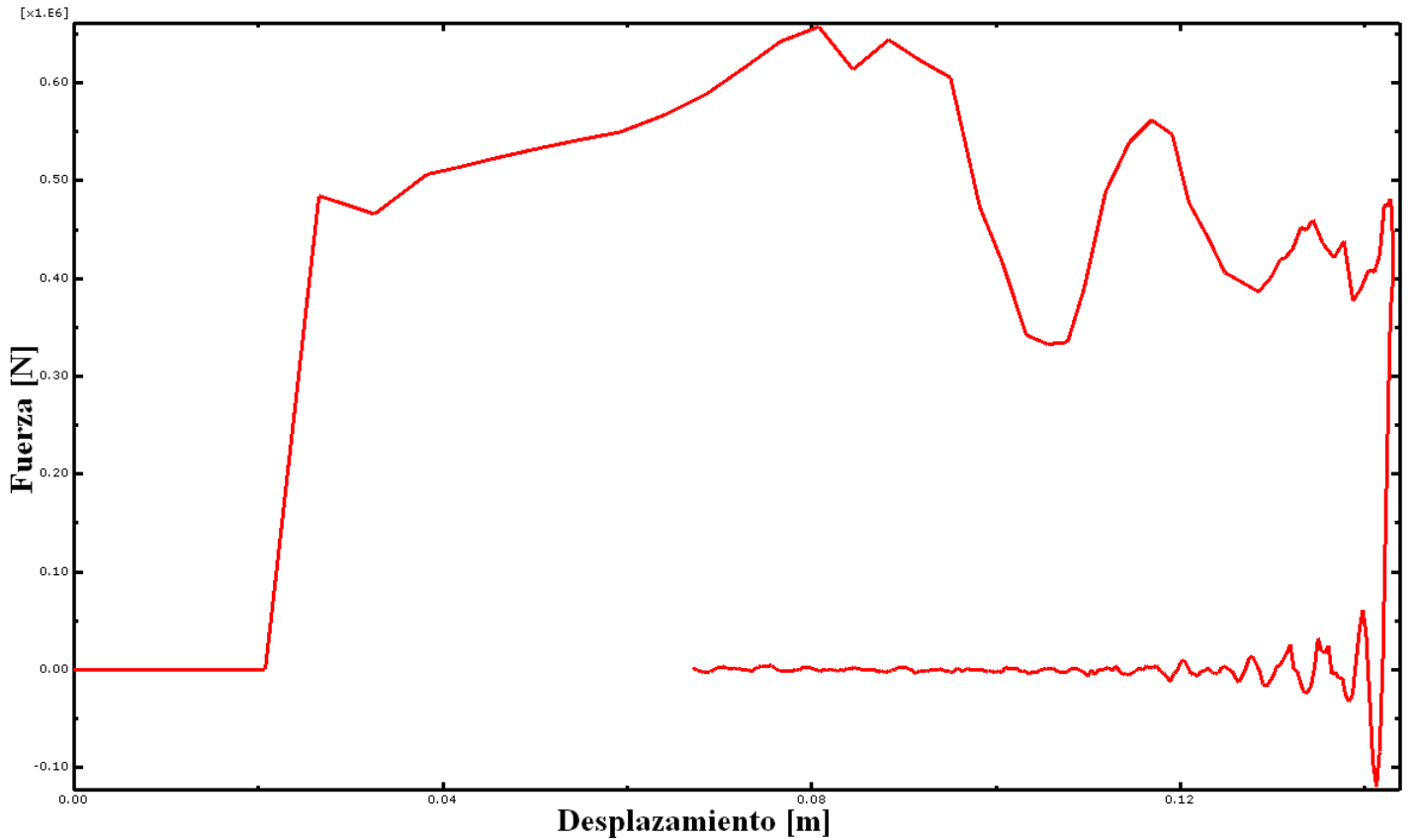


Fig. 4.12.2. $t = 0,003$ s

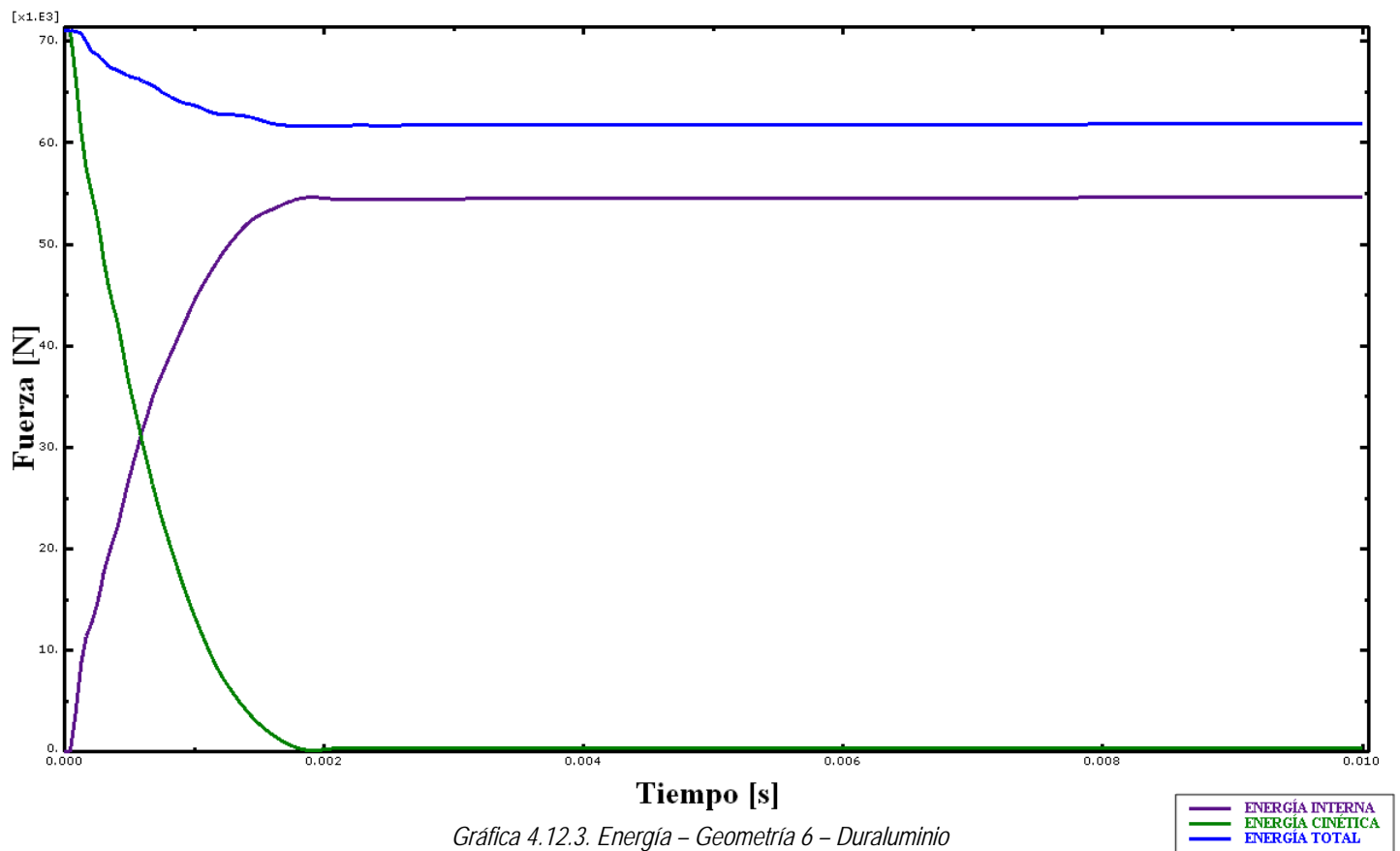
- **Gráficas de comportamiento:** (Gráficas 4.12.1., 4.12.2. y 4.12.3.)



Gráfica 4.12.1. Reacciones en la base – Geometría 6 – Duraluminio



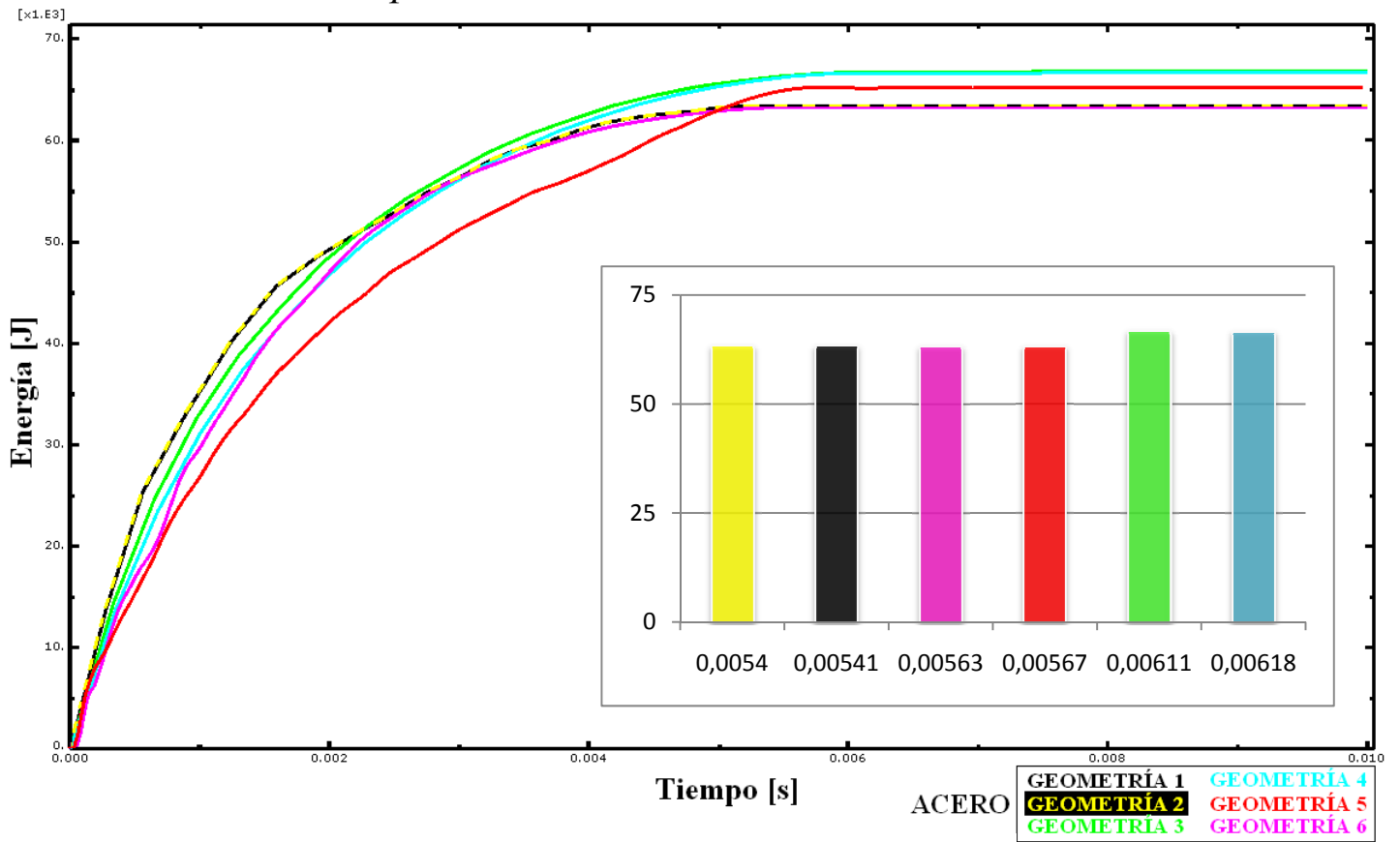
Gráfica 4.12.2. Tensión-Deformación – Geometría 6 – Duraluminio



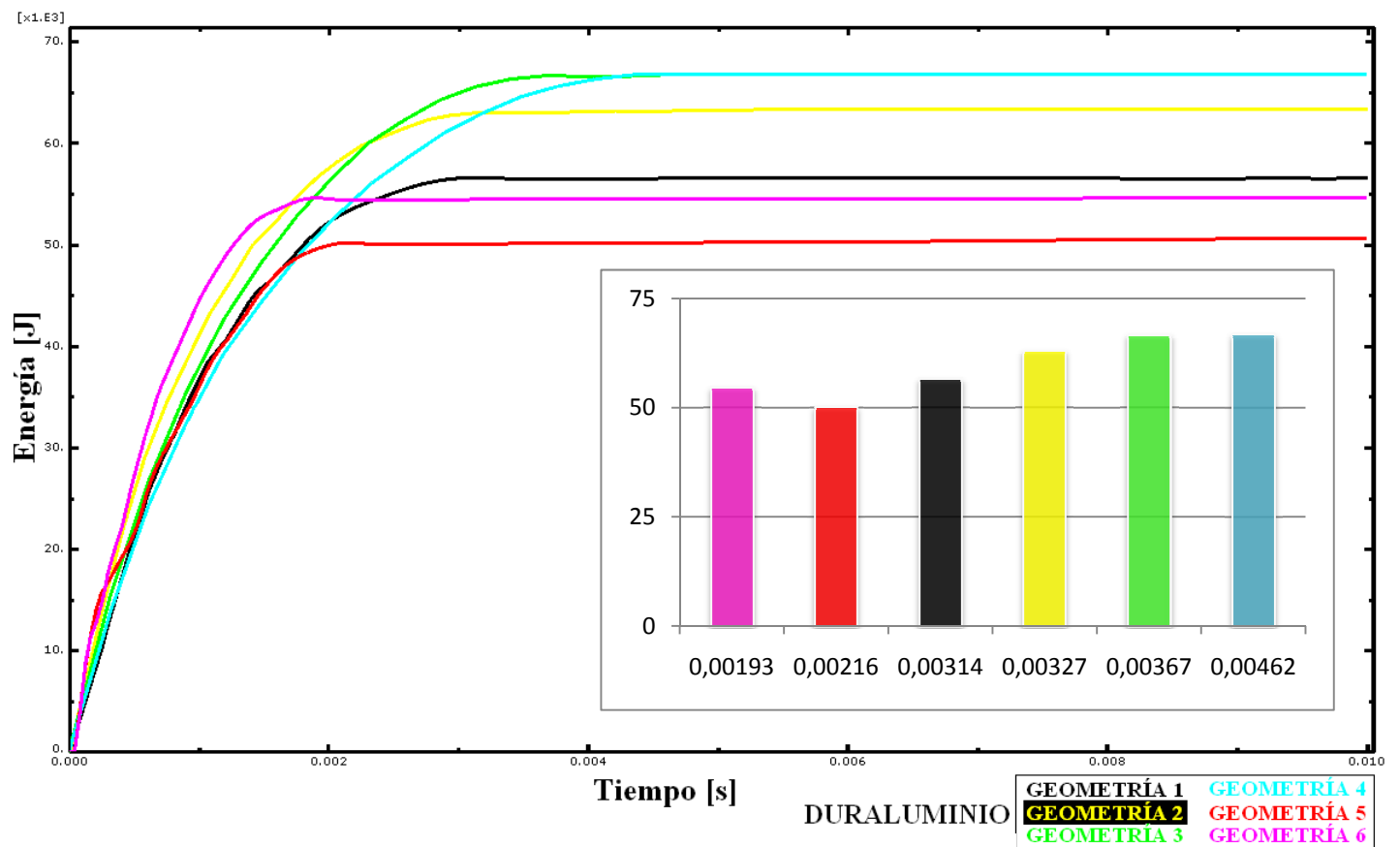
Gráfica 4.12.3. Energía – Geometría 6 – Duraluminio

La energía interna máxima, que corresponde con la energía absorbida, es de **54629,3 J**.
El tiempo de absorción es de **0,00193 s**.

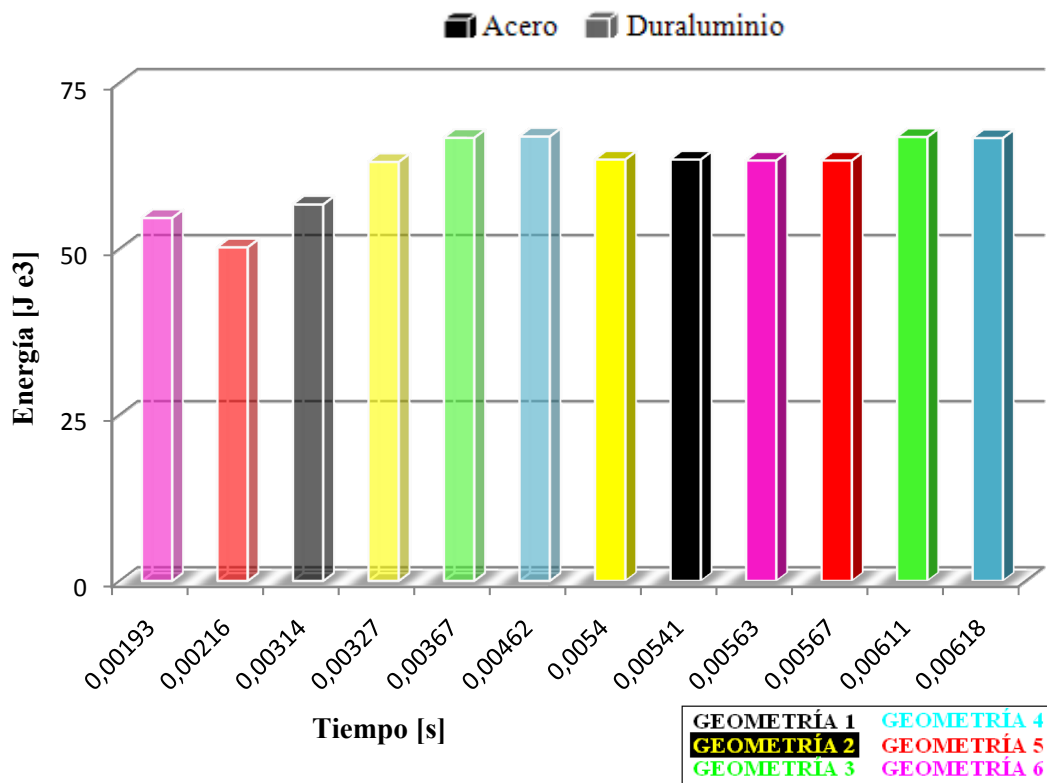
4.13. Comparativa



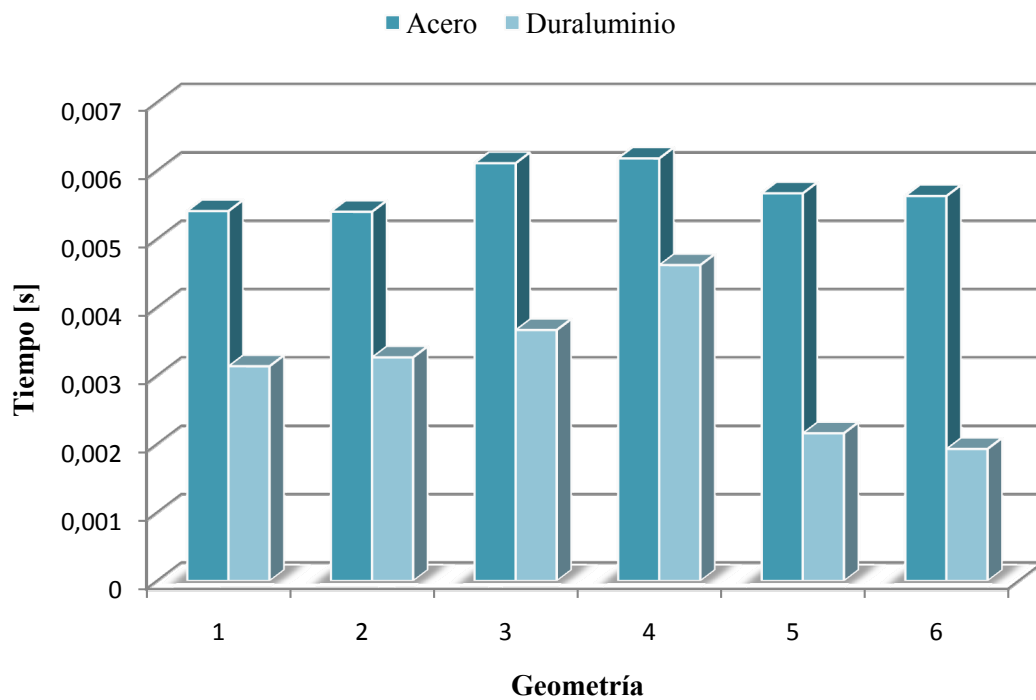
Gráfica 4.13.1. Comparativa Energía Interna según Geometría: ACERO



Gráfica 4.13.1. Comparativa Energía Interna según Geometría: Duraluminio



Gráfica 4.13.3. Comparativa Energía Interna: Acero vs Duraluminio



Gráfica 4.13.4. Comparativa Tiempo de Absorción: Acero vs Duraluminio