

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
DE EDIFICACIÓN



NUEVOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CON NÚCLEO DE  
POLICARBONATO, CONTRA ESPERAS DE FERRALLA Y ELEMENTOS  
SALIENTES DE ENCOFRADOS (SETAS PROTECTORAS).

## PROYECTO FIN DE CARRERA

**AUTOR:**

José Manuel Villamor Alguacil

**DIRECTORA:**

Concha Sanz Box

**Valencia, enero 2013**

## **AGRADECIMIENTOS**

Mi agradecimiento a la profesora Concha Sanz Box por la dirección de este proyecto y la mucha ayuda prestada en él. A José Albelda Vitoria por su ayuda con la simulación en Ansys.

Agradecer a las empresas que me han ayudado con su información y con el laboratorio para realizar algunos ensayos.

Finalmente, agradecer a mi familia por su apoyo en todo momento.

José M. Villamor

## Resumen

El objetivo de este proyecto es estudiar la capacidad de protección de los actuales sistemas empleados para proteger las esperas de ferralla en construcción, conocidos como *setas protectoras*, y comparar los mismos con la capacidad ofrecida por un nuevo sistema que emplea un núcleo de policarbonato como elemento resistente, evaluando la eficacia de este sistema de protección.

Para alcanzar dicho objetivo, se parte de una descripción de la situación actual ofrecida por el mercado, y empleada mayoritariamente en los últimos años, estudiando los posibles condicionantes que justifican estas soluciones como la selección adoptada por el mercado.

Una vez analizada la situación actual se evaluarán aquellas exigencias que se deberían contemplar como necesarias para considerar el sistema como adecuado para la protección de los trabajadores, tras lo cual se analizarán los ensayos cualitativos y cuantitativos que son representativos de aquellas propiedades que se consideren requisito necesario para cumplir con su función de protección, realizando simulaciones mediante modelos informáticos (programa de análisis mediante elementos finitos) y ensayos de laboratorio.

Los resultados obtenidos pondrán de manifiesto la necesidad de tomar las medidas adecuadas para alcanzar soluciones que realmente cumplan con los requisitos esperados.

Este proyecto surge del interés mostrado por la empresa privada, en desarrollar una solución al problema del empleo de sistemas de seguridad, que no garantizan la seguridad de los trabajadores. Motivo por el cual, se ha formado un grupo de trabajo AEN81/SC2/GT08, formado por la administración pública (INSHT), laboratorio de certificación (AIDICO) y técnicos de prevención en representación de la empresa privada, cuyo objeto es la mejora de la seguridad laboral y determinar las bases de una futura normativa.





## NUEVOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CON NÚCLEO DE POLICARBONATO, CONTRA ESPERAS DE FERRALLA Y ELEMENTOS SALIENTES DE ENCOFRADOS (SETAS PROTECTORAS)

### ÍNDICE

1- Descripción y alcance	1
1.1- Objetivos	1
1.2- Antecedentes y justificación	1
1.3- Metodología y alcance del proyecto	2
2- Sistemas de protección	4
2.1- Introducción	4
2.2- Materiales y proceso de fabricación	6
2.3- Normativa actual	10
3- Metodología experimental	14
3.1- Simulación mediante elementos finitos (FEA), con Ansys®	16
3.1.1- Método de los elementos finitos. Concepto teórico	17
3.1.1.1- El Método de los elementos finitos en medios continuos	17
3.1.1.2- Integración del sistema de ecuaciones para el medio continuo	21
3.1.1.3- Formulación básica, dinámica implícita. Ansys	22
3.1.1.4- Formulación básica, dinámica explícita. Ansys	22
3.1.2- Modelización en SolidWorks®	24
3.1.3- Caracterización de los materiales empleados	26
3.1.4- Geometrías	30
3.1.5- Modelos	30
3.2- Ensayos en laboratorio	34



3.2.1-	Ensayos de impacto	34
3.2.2-	Resistencia a cizalladura	38
4-	Resultados experimentales	40
4.1-	Resultados de las simulaciones	40
4.2-	Resultados de los ensayos en laboratorio	57
4.2.1-	Resultados de ensayos de impacto	57
4.2.2-	Resultados de ensayos de cizalladura	61
5-	Conclusiones	66
6-	Bibliografía	67
Anexo 1.-	Croquis de los modelos ensayados	68
Anexo 2.-	Fichas de características de los materiales	76
Anexo 3.-	Informe Técnico AIDICO, IT090065	87
Anexo 4.-	Informes de la modelización con Ansys®	105



## **1- DESCRIPCIÓN Y ALCANCE**

### **1.1- Objetivos**

El objetivo de este proyecto es el estudio de una nueva solución incorporada al mercado, frente a la existencia de anteriores soluciones ampliamente empleadas como protección en las obras, a partir de ahora *setas de protección* o simplemente *setas*. Se realiza un estudio comparativo con varias de las soluciones que a día de hoy se siguen utilizando.

Dentro del mismo proyecto se realiza un estudio de aquellos requisitos que deben cumplir estos elementos de protección y qué características se deben exigir a los materiales empleados en la fabricación de los mismos.

### **1.2- Antecedentes y justificación**

Con la aparición de la ley de prevención de 1995 y sus posteriores modificaciones, se generaba una serie de leyes y normativas, dirigidas a eliminar o prevenir los riesgos en los lugares de trabajo, incorporándose al mercado una serie de productos destinados a proteger a los trabajadores, todos ellos en principio, bajo el amparo de reglamentos o normativa que los regulan y tratan de garantizar su funcionalidad.

Este proyecto estudia las soluciones actuales empleadas y las mejoras presentadas por el mercado, al detectar la falta de protección mostrada por parte de las soluciones que habitualmente se ven en obra. Se estudiará por tanto la capacidad para cumplir con aquellos requisitos que se justifiquen como necesarios para cumplir con su cometido.



### 1.3- Metodología y alcance del proyecto

La metodología que se seguirá para la realización de este proyecto es la siguiente:

1. Análisis de la situación actual.
2. Planteamiento de los requisitos exigibles para la protección de los trabajadores.
3. Modelización de los diseños sometidos a ensayo.
4. Simulación mediante elementos finitos.
5. Realización de ensayos mecánicos en laboratorio, de varias soluciones.
6. Discusión y conclusiones de los resultados obtenidos.

El alcance de este proyecto consiste en realizar una comparativa entre varias soluciones de protección ampliamente introducidas en el mercado y una nueva solución de reciente incorporación. Esta comparativa se realizará mediante el análisis de los resultados de simulaciones y ensayos de laboratorio cuyo objetivo es comprobar si el comportamiento de las protecciones estudiadas es efectivo o, en su caso, se crean dudas de su función como protección frente al impacto.

No entra dentro del alcance de este proyecto llegar a una solución alternativa que garantice la protección para los trabajadores, ya que como se indicará, está pendiente de la redacción de una normativa específica que indique los requisitos a cumplir por estos sistemas de protección, existe en la actualidad un grupo de trabajo formado por miembros de Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), AIDICO como laboratorio acreditado en ensayos de elementos de seguridad y diferentes Técnicos de Prevención como representantes de la empresa privada, que están trabajando en la redacción de una normativa que recoja estos sistemas de protección.

Igualmente, está fuera del alcance de este proyecto el estudio del comportamiento de estos elementos durante su vida útil. Si se exponen los resultados de ensayos de laboratorio con elementos expuestos a la intemperie, que



indican la necesidad de ampliar este proyecto con el estudio de factores como la degradación que sufren los materiales o la variación de propiedades con la variación de temperaturas que pueden registrar en su uso.



## 2- SISTEMAS DE PROTECCIÓN

### 2.1- Introducción

Dentro de los diseños actuales nos encontramos que los fabricantes han optado por diseños similares en dos direcciones concretas. Por una parte están los fabricantes que han realizado diseños conocidos como *setas de protección* que denominaremos “protecciones individuales”, y por otra parte existen sistemas para la protección de grupos de armaduras.

Los sistemas de protección individuales, son los más numerosos y están representados por múltiples formatos en torno a un diseño común. Todos ellos pueden reducirse a una sección cilíndrica coronada por un capuchón esférico o plano que protege el extremo de la barra, la *seta* de protección. En el interior de la sección cilíndrica se disponen elementos para acomodar el elemento protector a la ferralla y así asegurarse que se mantiene en su posición.

En la figura 2.1 se representa dicho esquema seguido por uno de los fabricantes.

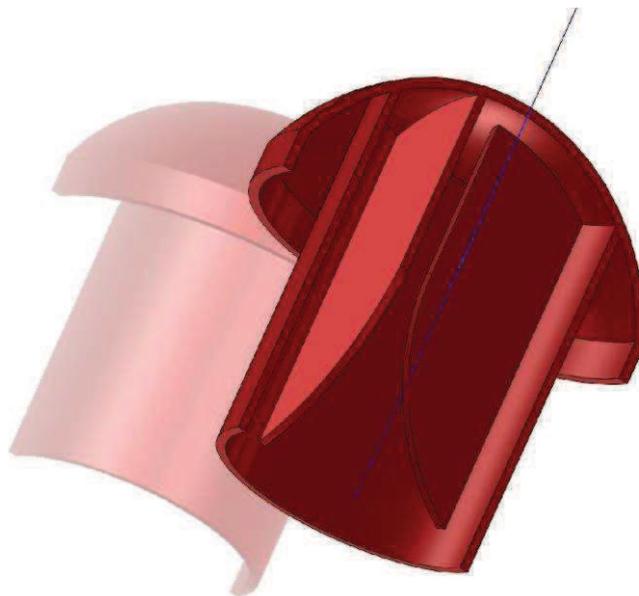


Figura 2.1 Modelo de protector con forma de “seta”.



En la figura 2.2 se muestran las soluciones de este tipo diseñadas y patentadas por varios fabricantes del mercado.



*Figura 2.2 Ejemplos de “seta” habituales en el mercado, y seta proyecto.*

En el grupo de los sistemas de protección individuales, se encuentran soluciones que han realizado mejoras en la resistencia de las *setas* empleando diversos materiales. Por una parte están las que son objeto de este proyecto, cuya mejora consiste en la ubicación de un casquillo de policarbonato en el interior de la *seta*. De esta manera se consigue mejorar la resistencia a la penetración de la barra de corrugado, cuando se produce el impacto. Otros fabricantes han optado por soluciones que incluyen una placa metálica (como el representado en la figura 2.3), y otros por la parte superior realizada con nylon.



*Figura 2.3 Seta de PE, reforzada con placa metálica.*

Los sistemas de protección de grupo, menos implantados en el mercado, diseñan soluciones para grupos de barras. Están basados en un sistema que cubre los extremos de las barras, con varios diseños que van desde el más simple, compuesto por un tablón o elemento metálico con dos laterales que impiden su caída, hasta sistemas más complejos en las que la protección superior está formada por varios materiales de mayor a menor rigidez para absorber parte de la

energía de impacto. Ejemplos de estos sistemas son los representados en las figuras 2.4 y 2.5.

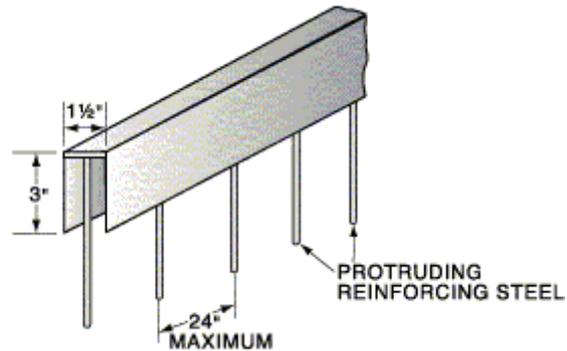


Figura 2.4 Solución de estructura con placa metálica



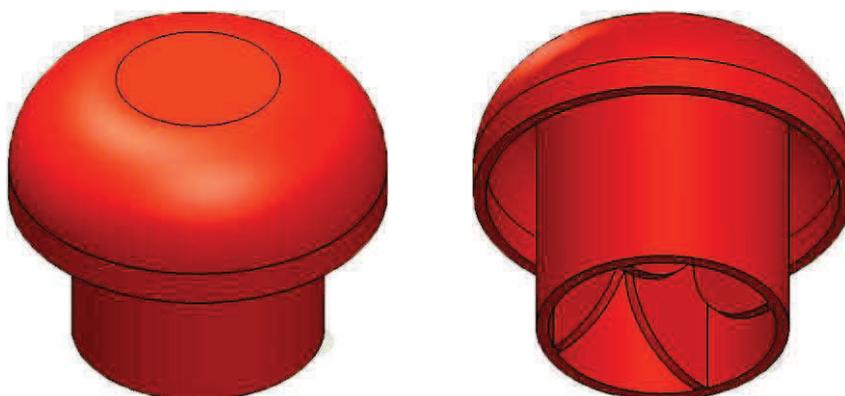
Figura 2.5 Solución de sistema de soporte fijado a barra y madera como cubrición.

## 2.2- Materiales y proceso de fabricación

En este proyecto se estudiará el comportamiento de varias soluciones del grupo que hemos llamado “protecciones individuales”. Estas soluciones son la que a continuación se describen en cuanto a su forma, material y proceso de fabricación. Se identificarán a partir de este momento como *seta 1*, *seta 2*, *seta 3* y *seta proyecto*.

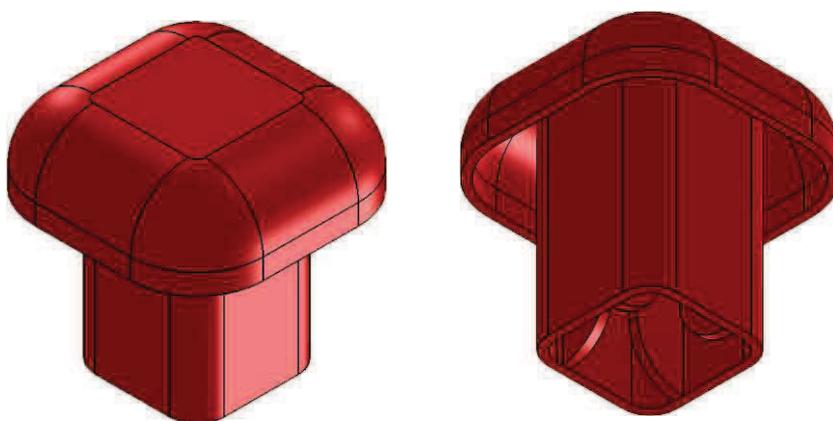


SETA 1



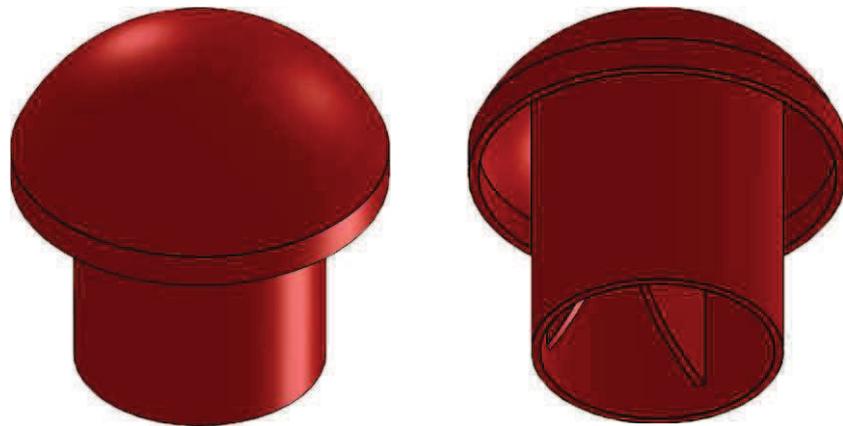
La *seta* 1 está formada por una parte cilíndrica con unos elementos interiores variables que forman la parte que se acopla a la barra donde va a colocarse. Una parte superior en forma esférica hasta donde se produce el encuentro con el cilindro, donde se remata con un parte plana. Las dimensiones de este modelo son de 43 mm de alta por 53 mm de ancha, con un espesor de pared de 1'7 mm. En el croquis que se adjunta en el Anexo 1 se completan estas dimensiones.

SETA 2



La *seta* 2 está formada por una parte prismática con las aristas redondeadas y con unos elementos interiores variables que forman la parte que se acopla a la barra donde va a colocarse. La parte superior parte de un prisma con redondeo en las aristas, a partir de una forma cuadrada y plana en la parte superior. Las dimensiones de este modelo son de 55 mm de alta por 55 de ancha, con un espesor de pared de 2 mm. En el croquis que se adjunta en el Anexo 1 se completan estas dimensiones y se detalla mejor la forma de la misma.

SETA 3



La *seta 3* está formada por una parte cilíndrica con unos elementos interiores variables que forman la parte que se acopla a la barra donde va a colocarse, con una parte superior en forma esférica. Las dimensiones de este modelo son de 54 mm de alta por 54 de ancha, con un espesor de pared de 1'2 mm. Siendo esta última la que posee un menor espesor entre las estudiadas. En el croquis que se adjunta en el Anexo 1 se completan estas dimensiones.

SETA PROYECTO



La *seta proyecto* está compuesta por tres elementos distintos. Una parte con una forma inicial cilíndrica que se va ensanchando y con unos elementos interiores variables que forman la parte que se acopla a la barra donde va a colocarse, de color blanco. Una parte exterior de color rojo y con forma esférica, que se acopla a la anterior en su parte superior dándole una imagen similar a la *seta 1* vista en planta. Y por último un elemento interior transparente que refuerza la parte que va a sufrir los mayores esfuerzos entre la barra y la *seta*. Las dimensiones totales de



este modelo son de 56 mm de alta por 57 de ancha. Con espesores de 1'5 mm para la parte exterior (roja), de 2'0 mm para la parte blanca y de hasta 7'0 mm en el refuerzo interior. En el croquis que se adjunta en el Anexo 1 se completan estas dimensiones.

Las primeras *setas*, numeradas del 1 al 3, son todas ellas productos fabricados con polietileno de alta densidad, se adjunta ficha de datos del polietileno Braskem IE 59 U3 facilitada por uno de los fabricantes. Se tomará este material como representante de las propiedades de los PEAD empleados, que se utilizarán para las simulaciones, aunque no se tiene constancia del grado comercial utilizado exactamente en cada modelo.

La *seta* de proyecto está realizada en varios materiales, de polietileno la parte roja, de polipropileno la parte blanca y de policarbonato el refuerzo interior. El polipropileno del cual se adjuntan sus datos es el Braskem H202HC y del policarbonato el Lexan EXL1162T.

Todos los elementos de protección descritos se han realizado por un proceso de inyección. Proceso óptimo para la fabricación con termoplásticos de grandes cantidades de cualquier producto que tenga una forma que requiera de su fabricación en molde.

Además todos ellos comparten elementos en común como son la elección de un color llamativo, como el rojo, para la totalidad o alguna parte, de manera que sean fácilmente visibles. En el caso de la *seta* de proyecto, el fabricante da la opción de elegir entre otros colores. Se ha elegido para todos ellos, los polímeros por varios motivos como pueden ser: su funcionalidad por su bajo peso y fácil alojamiento en su posición de trabajo; sus reducidos costes de adquisición y producción, y de entre todos ellos el PE por su menor coste.

En la tabla 2.1 se recogen los precios de los polímeros más frecuentemente utilizados (polímero tipo suministrado para inyección €/kg), y en la tabla 2.2 los precios de los *setas* descritas. Es destacable la diferencia existente de precios entre las *setas* 1, 2 y 3, y la *seta* de proyecto.



Tabla 2.1 Precios de polímeros, marzo de 2011 [3]

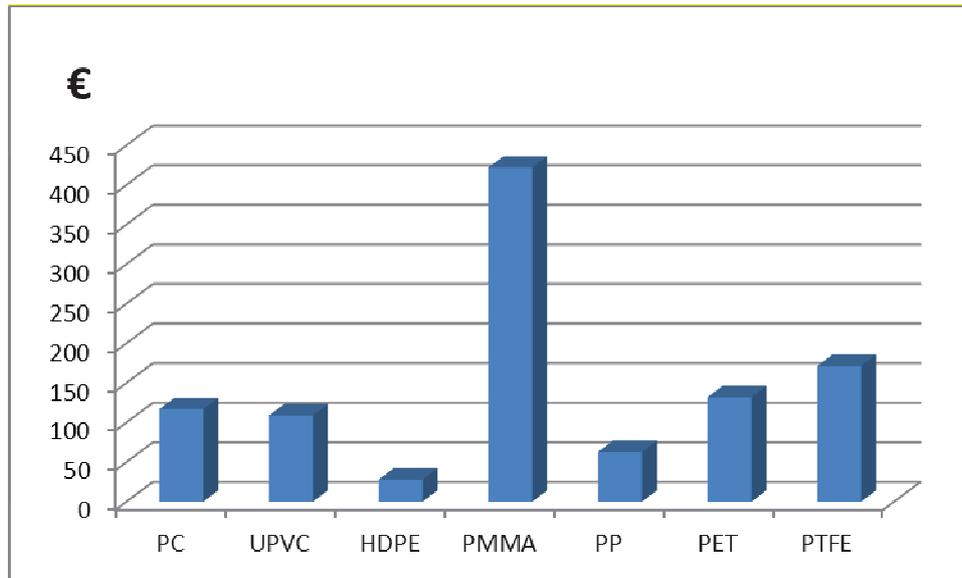
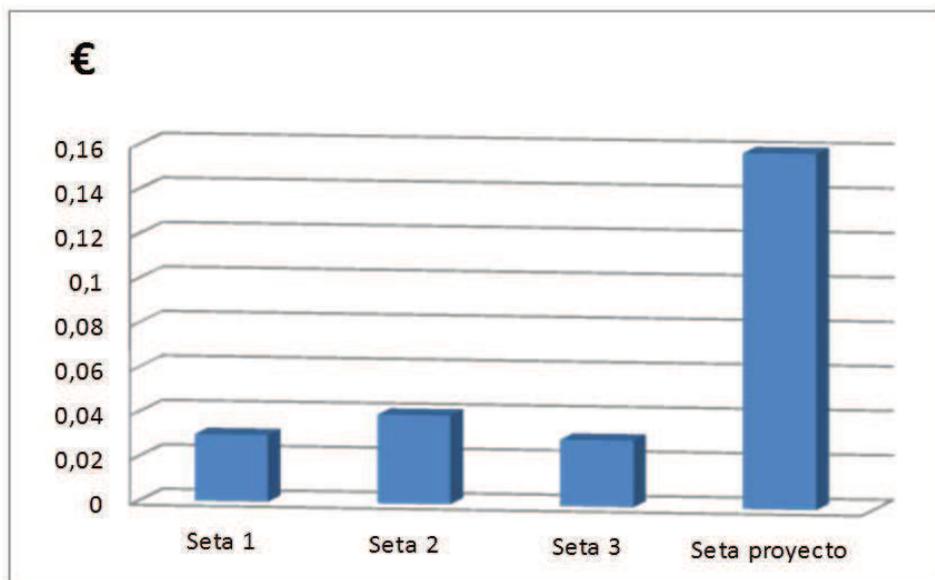


Tabla 2.2 Precios de setas.



### 2.3- Normativa actual

En cumplimiento del artículo 40.2 de la Constitución Española, por el cual el estado debe velar por la seguridad e higiene en el trabajo, y de la directiva Europea 89/391/CEE relativa a la promoción de medidas para la mejora de la seguridad e higiene en el trabajo, se desarrolla la Ley 31/1995 de 8 de noviembre, sobre la Prevención de Riesgos Laborales. Ley modificada por: Ley 39/1999, de 5 de



noviembre, para promover la conciliación de la vida familiar y laboral de las personas trabajadoras; RDL 5/2000, de 4 de agosto, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley sobre Infracciones y Sanciones; Ley 54/2003, de 12 de diciembre, de reforma marco normativo de la Prevención de Riesgos Laborales y RD 171/2004, de 30 de enero, por el que se desarrolla el artículo 24 de la ley 31/1995, en materia de coordinación de actividades empresariales.

En el ámbito de esta Ley se desarrollan los Reales Decretos y Normas Técnicas donde se definen los riesgos y medidas preventivas que deben tomarse para el aseguramiento de la seguridad de los trabajadores, en los cuales se recogen medidas para la eliminación del riesgo. Por ejemplo: el Real Decreto 1435/1992, de 27 de noviembre, sobre máquinas, en el que se recoge como riesgo a eliminar la presencia de objetos punzantes o cortantes; la Norma UNE-EN 397:1995/A1, cascos de protección para la industria (Equipo de Protección Individual); la Norma UNE-EN 1263-1/1997, redes de seguridad (protección colectiva).

La Ley de Prevención en su artículo 41. Obligaciones de los fabricantes, importadores y suministradores, indica en su primer punto:

1. *“Los fabricantes, importadores y suministradores de maquinaria, equipos, productos y útiles de trabajo están obligados a asegurar que éstos no constituyan una fuente de peligro para el trabajador, siempre que sean instalados y utilizados en las condiciones, forma y para los fines recomendados por ellos.*

*Los fabricantes, importadores y suministradores de elementos para la protección de los trabajadores están obligados a asegurar la efectividad de los mismos, siempre que sean instalados y usados en las condiciones y de la forma recomendada por ellos. A tal efecto, deberán suministrar la información que indique el tipo de riesgo al que van dirigidos, el nivel de protección frente al mismo y la forma correcta de su uso y mantenimiento.”*

Dentro de esta indicación debemos incluir los productos y útiles de protección, así como para los equipos de protección individual (EPI) existe una



reglamentación específica, que les obliga al cumplimiento de unos requisitos de seguridad (recogidos en el RD 773/1997, de 30 de mayo, Equipos de protección individual) y de la normativa específica donde se desarrollan. En el caso de las *setas de protección* al ser una protección colectiva, nos encontramos con un vacío legal al no existir una reglamentación específica sobre las exigencias y ensayos que deben cumplir, tanto el producto en sí, como los materiales empleados para su fabricación. Existiendo en la actualidad en el mercado diversos modelos de bajo coste y alta implantación en las obras, cuya protección en caso de caída sobre el elemento que protegen es de dudosa eficacia.

Es destacable que este hecho fuera mencionado en un artículo del 15 de enero de 1997, realizado por la División de California, de la Occupational Safety and Health Association, CAL/OSHA [4]. Donde comunican que las protecciones tipo *seta*, realizadas en plástico se comportan ineficazmente frente al riesgo de punzonamiento. Indicando que este tipo de protección no protege de caídas de 3 a 6 pies de altura (aproximadamente entre 91 y 183 cm) y que sólo se comportan apropiadamente para la protección contra cortes y abrasiones producidas por el roce o golpe con el extremo de la ferralla. Para demostrar esta falta de protección se dejó caer sacos cargados con 140 y 160 libras de peso (aproximadamente entre 63'5 y 72'6 kg) y se dejaron caer de alturas de 3 a 6 pies. Estos ensayos demuestran que parte de los elementos empleados son atravesados por la armadura y empujados por el saco y en otros casos tanto la armadura como la protección penetran en el saco.

La división de California, de la OSHA, requiere en su informe el uso de elementos de protección que eliminen el riesgo de penetración tanto de la armadura como de la armadura y el sistema de protección. Indicando como ejemplo el uso de protecciones que contengan una lámina metálica, capaz de impedir el punzonamiento por parte de la misma.

Estos resultados son recogidos por la CAL/OSHA en su "*Pocket guide for the construction industry*" [5], donde se recogen unas exigencias mínimas para este tipo de protectores, cuyos resultados se reflejarán en siguientes apartados.



En España como se ha comentado ya en este proyecto, se está estudiando la creación de una normativa que garantice unas características mínimas para la funcionalidad de estos productos, actualmente sin regulación específica. Estando siempre bajo la responsabilidad del empresario el garantizar la seguridad de los trabajadores conforme el artículo 14 de la Ley 31/1995 y sucesivas modificaciones.



### 3- METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Antes de proceder con la parte experimental en cuanto a simulaciones y ensayos realizados, se exponen los condicionantes que impone la función como elemento de seguridad, que requieren que las *setas protectoras* cumplan con una exigencia mecánica y por otra parte un buen estado del material, o funcionalidad a lo largo de la vida del mismo. Por estos motivos se pueden establecer dos objetivos: estudiar aquellos requisitos resistentes que le exigiremos al elemento y por otra parte evaluar que condicionantes pueden variar con el tiempo, la capacidad de la *seta* en cuanto a sus funciones, degradación por deterioro y/o por envejecimiento.

Los sistemas de protección deben proteger al trabajador de los riesgos que puedan ocurrir en su trabajo, en cuyo caso deberíamos conocer el caso más desfavorable posible. Podemos tomar como valor seguro para una mayoría, el suficiente para soportar la caída de una persona de altura y peso que se corresponda con el percentil 99 de un estudio antropométrico de la población laboral. Este percentil es el peso y estatura máximo cuyo valor no sea sobrepasado por el 99 % de la población, con lo cual protegeríamos al 99 % de la población trabajadora. Del estudio antropométrico realizado por el Centro Nacional de Medios de Protección de Sevilla, perteneciente al INSHT [6], tenemos que para un percentil de 99 se registran unos valores de peso y estatura de 104´9 kg y 1´864 m, respectivamente. El término altura, lo podemos emplear para evaluar la máxima altura desde la cual podría golpear una persona que cayera al mismo nivel sobre un elemento protegido que apenas sobresaliera del suelo unos 15 cm. Lo que equivaldría, si se rotara sobre el talón y golpease sobre el protector con una caída máxima de 1´71 m, en el caso más extremo. O a partir de la normativa de seguridad en cuanto a la obligatoriedad de proteger caídas a distinto nivel, establecer esa altura en 2 metros. Para alturas superiores a dos metros la legislación vigente exige la colocación de un sistema eficaz contra las caídas, barandillas de seguridad certificadas, por lo que no cabría esperar mayores alturas de caída.



Por otra parte tomando como valores del base de cálculo los establecidos en la guía de construcción e industria del CAL/OSHA [5]. Las exigencias requeridas a las protecciones varían según el grado de protección que queremos tener, desde proteger para caídas de menos de 6 pies (1'829 m), hasta 10 pies (3'048 m). Siendo el peso que debe soportar, en todos los casos, de 250 lbs (113'4 kg).

De ambos condicionantes y siempre para estar del lado de la seguridad, se toma el caso más desfavorable de ambos. Por lo que para las simulaciones realizadas más adelante se tomarán como valores de cálculo los valores: 115 kg de peso y una altura de caída de 3 m.

Con estos datos y aplicando el principio de conservación de la energía, la energía potencial del cuerpo se convertirá en energía cinética en el momento de impacto. Simplificando los cálculos y estando del lado de la seguridad, el caso más desfavorable sería suponer el total de la masa en el punto más alto y que sea esa energía potencial la que se convierta íntegramente en energía cinética en el impacto contra el elemento de protección, sin ningún tipo de pérdida o amortiguación. Para estos valores, tendremos:

$$E_{Pi} + E_{Ci} = E_{Pf} + E_{Cf} \rightarrow mgh_i + 0 = 0 + \frac{1}{2}mv_f^2$$
$$mgh_i = \frac{1}{2}mv_f^2 \rightarrow v_f = \sqrt{2gh_i} = \sqrt{2 \cdot 9'81 \cdot 3} = 7'67 \frac{m}{s^2}$$
$$E = E_c + E_p = 0 + mgh_i = 115 \cdot 9'81 \cdot 3 = 3384'45 \text{ J}$$

Para evaluar la resistencia de los modelos se realizarán simulaciones mediante elementos finitos del impacto contra un cuerpo blando que simule el cuerpo humano, ensayos en laboratorio de impacto (en este caso únicamente se han realizado sobre la *seta* con refuerzo de policarbonato) y ensayos de cizalladura.

Las simulaciones se realizarán para conocer el comportamiento de lo que sería el impacto real, aportando información sobre el comportamiento del conjunto y comparar los resultados con los ensayos de laboratorio, a partir de la modelización



de un impacto entre el cuerpo humano y el elemento protector que en cada caso se emplee. El cuerpo humano ha sido modelizado por un elemento del peso requerido y de un material del cual se conocen sus características, la gelatina balística. Este es un material ampliamente utilizado para simular al cuerpo humano en estudios forenses de balística y heridas causadas por armas blancas, y que aporta unos resultados viables.

Mediante ensayos de impacto, con caída de cuerpos rígidos, evaluaremos la resistencia propia del elemento resistente. Es el caso más desfavorable, ya que la energía que absorbe el cuerpo rígido es despreciable. Mediante el ensayo de impacto con un cuerpo blando parte de la energía se empleará en deformar al elemento protector y la otra en la deformación del propio cuerpo blando. Se comprobará de esta manera como se comporta el elemento protector. Una menor superficie hace que las tensiones alcanzadas sean mayores en el cuerpo blando y se pueda producir la penetración de la barra junto con el protector, lo cual no sería un resultado que garantice un buen comportamiento del elemento protector.

### **3.1 - Simulación mediante elementos finitos (FEA), con Ansys®**

La simulación de los efectos producidos por un choque entre un cuerpo con comportamiento aproximado a las características del cuerpo humano (gelatina balística) y el elemento de protección (*seta*) colocado en una barra de acero (de 12 mm de diámetro), ha sido realizado, mediante el empleo de la versión 12.1 de Ansys®.

Después de una breve introducción al concepto de elementos finitos y a la aplicación de algoritmos matemáticos de cálculo, en los siguientes apartados se seguirá el proceso de simulación realizado mediante la herramienta de simulación de Ansys®, Workbench, y concretamente dentro de Workbench, el módulo Explicit Dynamics, con el que se pueden estudiar choques y penetraciones entre varios objetos, comenzando con la modelización de los diseños sometidos a ensayos, descritos en el apartado 2.2, de este proyecto.



### **3.1.1- Método de los elementos finitos. Concepto teórico**

El Método de los Elementos Finitos es el mejor método aplicable al análisis de estructuras de cualquier tipo, sometidas a solicitaciones mecánicas y térmicas tanto estacionarias como transitorias.

Un problema de elasticidad, se resuelve planteando la relación existente entre las fuerzas exteriores y los movimientos o las deformaciones del cuerpo. Esto implica el planteamiento de las ecuaciones diferenciales que definen estas relaciones: las ecuaciones de equilibrio, las ecuaciones de continuidad y las ecuaciones constitutivas [7]. Dependiendo de la complejidad del problema se puede aplicar los métodos habituales de la resistencia de materiales y realizar simplificaciones para hallar resultados aproximados. Para problemas más complejos en donde los resultados aproximados de la resistencia de materiales son insuficientes se utiliza el método de los elementos finitos.

El Método de los Elemento Finitos es una simplificación de dichas ecuaciones, puesto que su forma diferencial se sustituye por un conjunto discreto de ecuaciones y de sus respectivas condiciones de contorno para su posterior resolución. En función del número de estas ecuaciones será necesario o no implementar el problema para su resolución computarizada [8].

#### **3.1.1.1- El Método de los elementos finitos en medios continuos**

La discretización del problema en el caso de un medio continuo se lleva a cabo mediante un proceso de modelización para convertirlo en un número finito de elementos ensamblados entre sí en puntos llamados nodos, el planteamiento de las ecuaciones de desplazamientos para dichos nodos y la imposición de las condiciones de contorno apropiadas en términos de compatibilidad de desplazamiento nodal [9].

De la resolución del mismo como un todo, se obtendrá el campo de desplazamientos para cada uno de los nodos y, a partir de él y si fuera necesario, el campo de tensiones [8].

El comportamiento en el interior del elemento se interpolará a partir de los desplazamientos nodales mediante las llamadas funciones de forma.

Según este planteamiento, los errores se deberán principalmente a (i) la aproximación del dominio, (ii) la aproximación del comportamiento en el interior de



cada elemento y (iii) la precisión aritmética usada en la resolución del sistema de ecuaciones mediante métodos numéricos [9].

## Formulación general

### Elemento

El subsiguiente desarrollo matemático considerará un elemento genérico  $e$  de nodos  $i, j, \dots$ , de superficie  $S^e$  y volumen  $V^e$  [8].

Campo de desplazamientos del elemento

$$\{a^e\} = \begin{Bmatrix} \{a_i\} \\ \{a_j\} \\ \vdots \\ \{a_n\} \end{Bmatrix}$$

donde  $\{a_i\}$  es el vector columna de desplazamientos de cada nodo en coordenadas

locales (ver Figura 3.1), que será de la forma  $\{a_i\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix}$ .

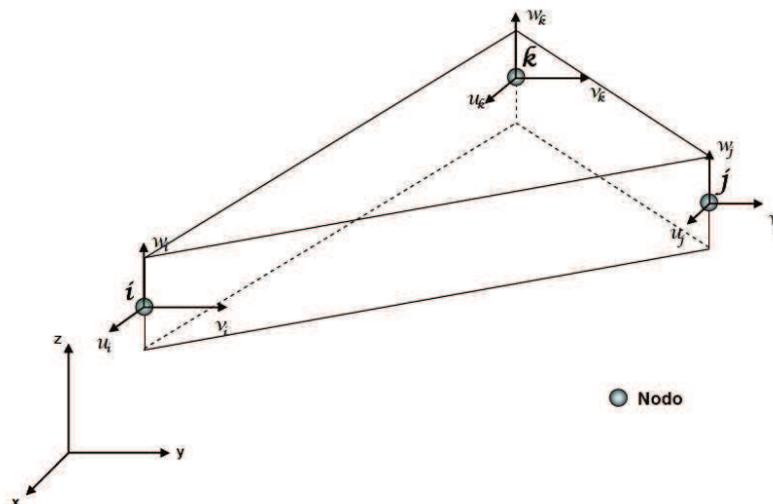


Figura 3.1 Representación esquemática del campo de desplazamientos de un elemento.

El campo de desplazamientos del elemento quedará definido por tanto por la relación:



$$\{u(x \ y \ z)\} = [N(x \ y \ z)]\{a^e\} = \left[ [N_i(x \ y \ z)], [N_j(x \ y \ z)], \dots \right] \begin{Bmatrix} \{a_i\} \\ \{a_j\} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{Bmatrix}$$

Donde  $[N_i(x \ y \ z)], [N_j(x \ y \ z)], \dots$  son las denominadas matrices de forma, que se caracterizan por las siguientes propiedades:

- Son cuadradas, ya que el número de componentes del vector columna  $\{u(x \ y \ z)\}$  es igual al número de componentes en  $\{a_i\}, \{a_j\}, \dots$
- Cumplen  $[N_i(x_i \ y_i \ z_i)] = [I]$ ,  $[N_i(x_j \ y_j \ z_j)] = [0]$  si  $i \neq j$  puesto que las funciones de interpolación toman los valores de los desplazamientos nodales en los mismos.

Por lo tanto, si se consideran las mismas funciones de forma en todas las componentes de  $\{u(x \ y \ z)\}$  se deduce que  $[N_i(x_i \ y_i \ z_i)] = N_i(x \ y \ z) \cdot [I]$  en donde  $N_i(x \ y \ z)$  es la función escalar de forma.

### *Campo de deformaciones del elemento*

Las deformaciones se obtienen mediante derivadas parciales de las componentes del corrimiento y en general se escriben de la forma [8]:

$\{\gamma\} = [S]\{u\} = [S][N]\{a^e\} = [B]\{a^e\}$  con  $[B] = [S][N]$  donde  $[S]$  es una matriz operacional que incluye las derivaciones parciales adecuadas, como se verá más abajo.

Teniendo en cuenta que  $[N] = \left[ [N_i], [N_j], \dots \right]$  se tendrá:

$$[B] = [S][N] = \left[ [S][N_i], [S][N_j], \dots \right] = \left[ [B_i], [B_j], \dots \right] \text{ en donde } [B_i] = [S][N_i]$$

### *Campo de esfuerzos del elemento*

El campo de esfuerzos  $\{\sigma\}$ , que contendrá el mismo número de elementos que el campo de deformaciones  $\{\gamma\}$ , vendrá dado por:



$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} = [D]\{\gamma\} - [D]\{\eta\}$  donde  $[D]$  es la matriz de rigidez del material y  $\{\eta\}$  son las deformaciones térmicas.

### Equilibrio del elemento

Suponiendo que existe una distribución de fuerzas volumétricas por unidad de volumen  $\{F_v\}$  y que en sus bordes libres (si los tuviese) pueden actuar además fuerzas superficiales por unidad de superficie  $\{\phi\}$ , se trata de calcular el conjunto de fuerzas nodales  $\{s\}$  que permite el equilibrio del elemento (ver Figura 3.2).

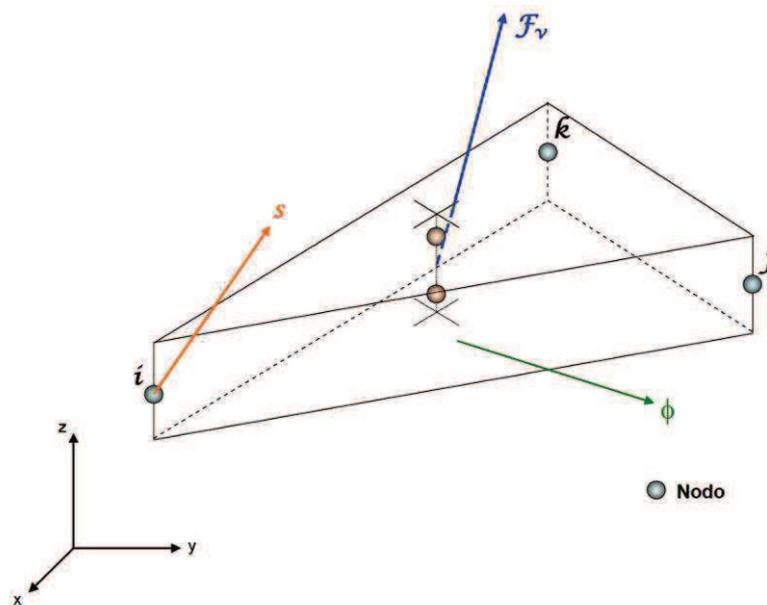


Figura 3.2 Fuerzas que intervienen en el equilibrio de un elemento.

Aplicando el principio de los desplazamientos virtuales en correspondencia a un desplazamiento virtual del elemento arbitrario  $\{\delta\alpha^e\}$ , el campo de desplazamientos de dicho elemento vendrá dado por:

$$\{\delta u\} = [N]\{\delta\alpha^e\}$$

Mientras que el campo de deformaciones virtuales cinemáticamente consistente con  $\{\delta\alpha^e\}$ , será:

$$\{\delta\gamma\} = [B]\{\delta\alpha^e\}$$



De acuerdo con el principio de los desplazamientos virtuales resultará:

$$\{\delta a^e\} \{s\} + \int_V \{\delta u\}^T \{F_V\} dV + \int_S \{\delta u\}^T \{\phi\} dS = \int_V \{\delta \gamma\}^T \{\sigma\} dV$$

Sustituyendo los valores de  $\{\delta u\}$ ,  $\{\delta \gamma\}$  y  $\{\sigma\}$  quedará:

$$\{\delta a^e\} \left[ \{s\} + \int_V [N]^T \{F_V\} dV + \int_S [N]^T \{\phi\} dS - \int_V [B]^T [D] [B] dV \{a^e\} + \int_V [B]^T [D] \{\eta\} dV \right] = 0$$

Como la expresión anterior debe verificarse para cualquiera que sea el valor del desplazamiento virtual  $\{\delta a^e\}$  que se considere, deberá ser:

$$\begin{aligned} \{s\} &= \left[ \int_V [B]^T [D] [B] dV^e \right] \{a^e\} - \int_V [B]^T [D] \{\eta\} dV^e - \int_V [N]^T \{W\} dV^e - \int_S [N]^T \{\phi\} dS^e = \\ &= [k^e] \{a^e\} + \{s_0\} - \{p^e\} \end{aligned}$$

Donde  $[k^e]$  es la matriz de rigidez del elemento,  $\{s_0\}$  son las fuerzas térmicas y  $\{p^e\}$  la resultante de fuerzas volumétricas y superficiales en el elemento.

### 3.1.1.2- Integración del sistema de ecuaciones para el medio continuo

Una vez calculadas las matrices de rigidez de cada uno de los elementos y las resultantes de fuerzas equivalentes en los mismos, es necesario generar las matrices de transformación de coordenadas locales del elemento a coordenadas globales del medio continuo [8].

Se obtienen así las matrices de rigidez y los vectores de fuerzas equivalentes en ejes globales. Mediante un proceso de ensamblado, se constituirá el sistema completo de ecuaciones con los desplazamiento en los nodos como incógnitas, que se resolverá eliminando los grados de libertad dependientes como consecuencia de las diferentes ligaduras (i.e. los nodos comunes a uno y otro elemento tendrán los mismos desplazamientos).

A partir de sus soluciones y mediante la ecuación  $\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} = [D] \{\gamma\} - [D] \{\eta\}$  se recuperará el campo de esfuerzos en cada elemento.



### 3.1.1.3- Formulación básica, dinámica implícita. Ansys® [10]

La ecuación básica del movimiento, resuelta por un análisis dinámico transitorio implícito es:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$

donde **m** es la matriz de masas, **c** es la matriz de amortiguación, **k** es la matriz de rigidez y **F(t)** es el vector de fuerzas.

En un instante dado, **t**, esta ecuación puede considerarse como un conjunto de ecuaciones de equilibrio “estático” que también toman en cuenta las fuerzas de inercia y amortiguación. El método HHT (Hilber-Hughes-Taylor), variante del de Newmark, es el empleado por Ansys® para resolver esas ecuaciones. El incremento de tiempo entre varios instantes de tiempo sucesivos se llama, paso de tiempo de integración.

Para problemas lineales:

- La integración implícita del tiempo es incondicionalmente estable para ciertos parámetros de integración.
- El paso de tiempo variará sólo para satisfacer los requisitos de precisión.

Para problemas no lineales:

- La solución se obtiene mediante una serie de aproximaciones lineales (método de Newton-Raphson), por lo que cada paso de tiempo puede tener muchas iteraciones de equilibrio.
- La solución requiere la inversión de la matriz de rigidez equivalente dinámica no lineal.
- Pequeños pasos iterativos de tiempo pueden ser necesarios para lograr la convergencia.
- Se proporcionan herramientas de convergencia, pero no se garantiza la convergencia de problemas altamente no lineales.

### 3.1.1.4- Formulación básica, dinámica explícita. Ansys® [10]

Las ecuaciones básicas resueltas por un análisis explícito dinámico expresan la conservación de la masa, impulso y energía en coordenadas de Lagrange. Estos, junto con un modelo de material y un conjunto de condiciones iniciales y de contorno, definen la solución completa del problema.



Para formulaciones de Lagrange, la malla se mueve y distorsiona con el modelo material, por lo que automáticamente se cumple la conservación de la masa. La densidad en cualquier momento puede determinarse a partir del volumen actual de la zona y su masa inicial, mediante la ecuación:

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V}$$

Las ecuaciones en derivadas parciales que expresan la conservación del momento se refieren a la aceleración para el tensor de tensiones  $\sigma_{ij}$ :

$$\rho \ddot{x} = b_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}$$

$$\rho \ddot{y} = b_y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z}$$

$$\rho \ddot{z} = b_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}$$

La conservación de energía es expresada mediante la ecuación:

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx} \dot{\epsilon}_{zx})$$

Para cada paso de tiempo, estas ecuaciones se resuelven explícitamente para cada elemento en el modelo, basado en los valores de entrada al final del paso de tiempo anterior.

Sólo se aplica la conservación de masas y momentos. Sin embargo, en simulaciones explícitas bien planteadas, masas, momentos y energía deben de conservarse. La conservación de la energía es controlada constantemente por el proceso, controlando la calidad de la solución (en contraposición a tolerancias convergentes en la dinámica transitoria implícita).

El algoritmo de cálculo dinámico explícito utiliza un esquema de integración de tiempo de diferencia central (método de Leapfrog). Después de que las fuerzas se han calculado en los nodos (resultante de las tensiones internas, de contacto o de las condiciones de contorno), se derivan las aceleraciones nodales dividiendo la fuerza por la masa:

$$\ddot{x}_i = \frac{F_i}{m} + b_i$$



donde  $x_i$  son las componentes de aceleración de los nodos ( $i=1,2,3$ ),  $F_i$  son las fuerzas actuantes en los nodos,  $b_i$  son las componentes de aceleración del elemento y  $m$  es la masa del nodo.

Con las aceleraciones para un instante determinado  $n - \frac{1}{2}$ , las velocidades para un instante  $n + \frac{1}{2}$  se hallan mediante la ecuación:

$$\dot{x}_i^{n+1/2} = \dot{x}_i^{n-1/2} + \ddot{x}_i^n \Delta t^n$$

Finalmente las posiciones se actualizan para un tiempo  $n+1$  por integración de las velocidades:

$$x_i^{n+1} = x_i^n + \dot{x}_i^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2}$$

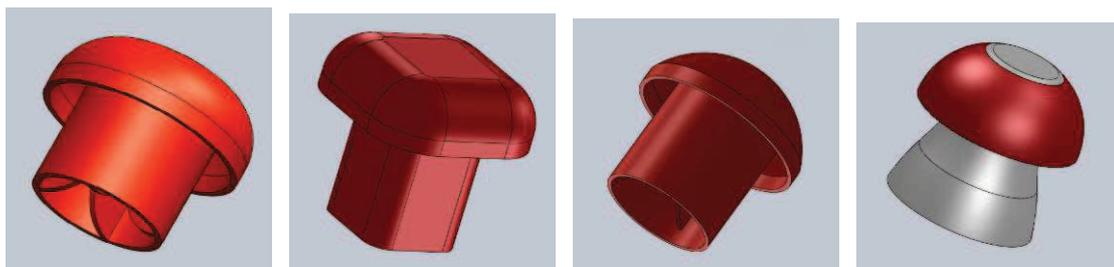
### 3.1.2- Modelización en SolidWorks®

Para la simulación con Ansys®, de los casos que más adelante se expondrán, se requiere de la modelización de los diseños sobre los cuales se desea realizar la simulación.

Mediante el uso de la herramienta SolidWorks®, se puede desarrollar una modelización en 3D de una manera más completa y sencilla, que mediante el empleo del módulo de diseño DesignModeler incluido en Ansys®, como herramienta sencilla de modelización. Este programa es un completo marco de diseño en 3D orientado al uso profesional para la industria.

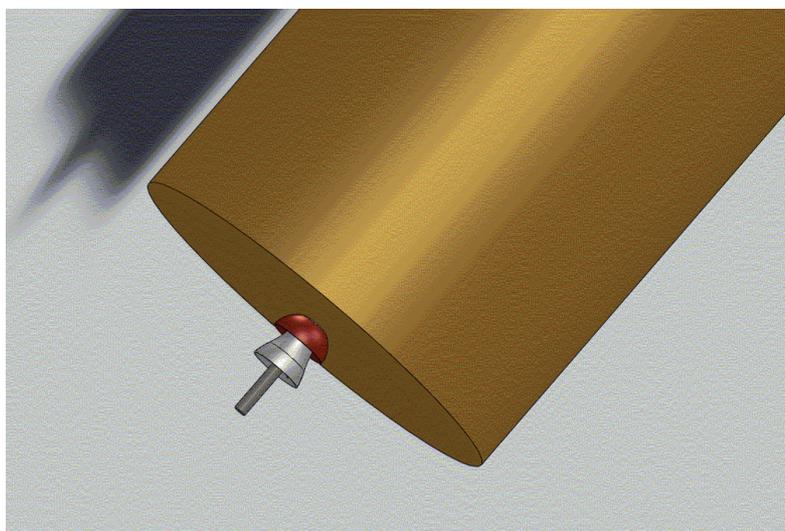
A partir de tres de los diseños habitualmente empleados en construcción y del modelo estudiado en este proyecto, se han realizado las siguientes modelizaciones en 3D mostradas en la figura 3.3, las cuales sirven para representar gráficamente los diseños a ensayo, así como para importarlos desde Ansys® e incorporarlos como modelos de cálculo.





*Figura 3.3 Diseño setas ensayadas: seta 1, seta 2, seta 3 y seta proyecto, respectivamente.*

Estos diseños, junto con una barra de 12 mm de diámetro y un cilindro de gelatina balística, de unas dimensiones tales que su peso alcance los 115 kg aproximadamente, han sido el modelo empleado para realizar las simulaciones de caída de un cuerpo blando desde la altura deseada, figura 3.4. Estos modelos pretenden simular el problema real existente con este tipo de elementos y conseguir unas garantías razonables de que los daños producidos en el cuerpo humano son lo suficientemente atenuados para evitar accidentes de gravedad considerable e incluso mortales.



*Figura 3.4 Diseño del montaje del conjunto seta-gelatina empleado para las simulaciones.*

### 3.1.3- Caracterización de los materiales empleados

El inicio del proceso de modelización de los modelos de simulación comienza con un proyecto nuevo en la ventana de trabajo (Explicit Dynamics). Este consta de 7 apartados, el primero es el propio proyecto. El segundo apartado, es el que se trata en este punto, Engineering Data (figura 3.5). La caracterización de los materiales que se van a emplear en el proyecto, es decir de los materiales que forman cada una de las partes de cada modelo: seta, barra y gelatina.

- *Setas protectoras*: los materiales de los que están formadas las setas protectoras son: los tres ejemplos tomados del mercado son de polietileno de baja densidad; mientras que la *seta* objeto de este proyecto está formada por tres partes distintas, un núcleo de policarbonato, un alojamiento de polipropileno y un exterior (en las figuras de color rojo) de polietileno de alta densidad.
- La *barra*: que simula la ferralla de construcción, se modelizará con un acero estructural de la propia tabla de materiales de Ansys<sup>®</sup>, ya que el comportamiento de la barra de acero frente al resto de materiales hace que no sea necesaria la utilización de las propiedades exactas de un acero corrugado de obra.
- La gelatina balística: que simula el comportamiento del cuerpo humano, frente a la penetración durante el choque de la *seta*. El uso de gelatina balística surge del extendido uso de la misma como medio de estudio de las heridas provocadas por armas de fuego y blancas, en la bibliografía forense.



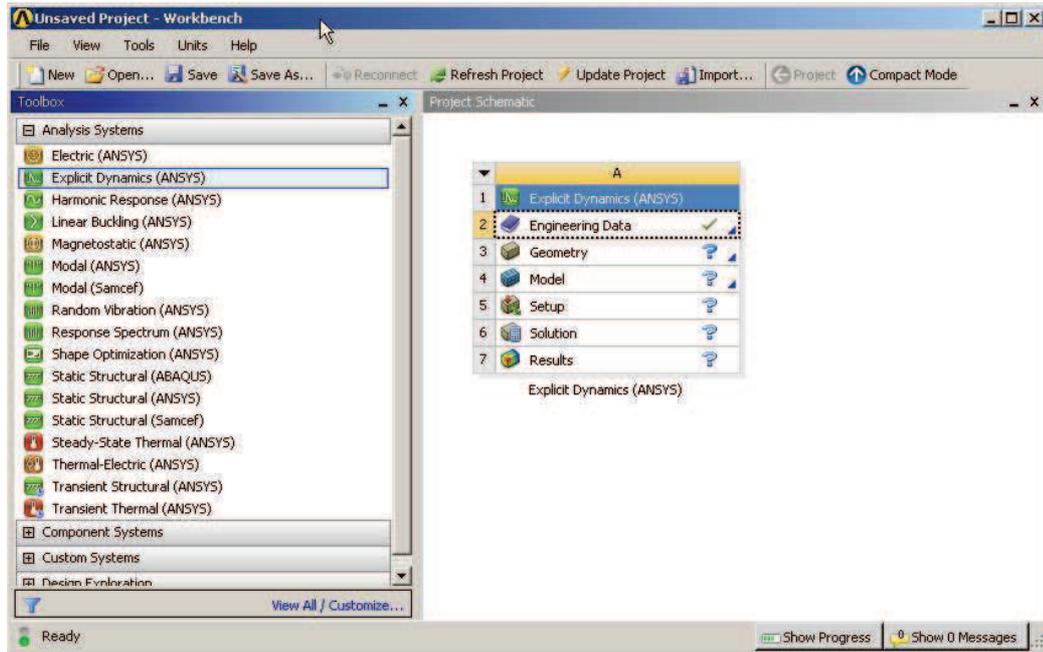


Figura 3.5 Ventana de trabajo, elección de la herramienta Explicit Dynamics (ANSYS®)

Una vez identificados los materiales que se van a emplear en el cálculo, se deberán conocer sus propiedades mecánicas. Dentro de las cuales se puede seleccionar, dependiendo del comportamiento mecánico que van a desarrollar en el proceso, aquellas propiedades del material que intervienen en las ecuaciones que analizan este comportamiento (figura 3.6).

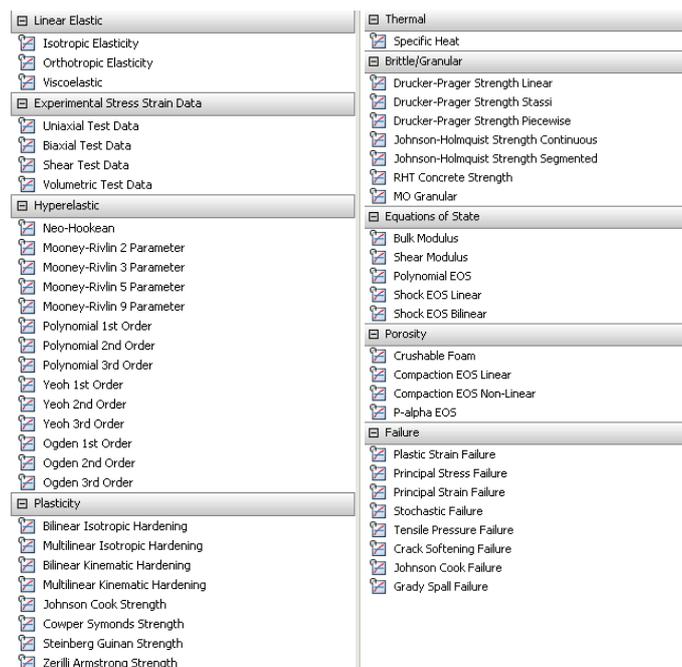


Figura 3.6 Propiedades de los materiales seleccionables para la simulación.

En nuestro caso el comportamiento de los materiales vendrá definido por el impacto al cual van a ser sometidos y las propias características según el tipo de materiales. Ansys® habilita una serie de modelos de materiales en función de una clasificación general de un grupo de propiedades comunes, además de considerar la respuesta del material según las propiedades del problema dinámico simulado.

Class of Material	Material Effects
Metals	Elasticity Plasticity Isotropic Strain Hardening Kinematic Strain Hardening Isotropic Strain Rate Hardening Isotropic Thermal Softening Ductile Fracture Brittle Fracture (Fracture Energy based) Dynamic Failure (Spall)
Concrete / Rock	Elasticity Porous Compaction Plasticity Strain Hardening Strain Rate Hardening in Compression Strain Rate Hardening in Tension Pressure Dependent Plasticity Lode Angle Dependent Plasticity Shear Damage / Fracture Tensile Damage / Fracture
Soil / Sand	Elasticity Porous Compaction Plasticity Pressure Dependent Plasticity Shear Damage / Fracture Tensile Damage / Fracture
Rubbers / Polymers	Elasticity Viscoelasticity Hyperelasticity
Orthotropic	Orthotropic Elasticity

Figura 3.7 Clasificación de materiales y efectos en Explicit Dynamics(ANSYS®)

### Impact Response of Materials

Solution	Impact Velocity (m/s)	Strain Rate (/s)	Effect
Implicit		$< 10^{-5}$	Static / Creep
	$< 50$	$10^{-5} - 10^{-1}$	Elastic
	50 - 1000	$10^{-1} - 10^1$	Elastic-Plastic (material strength significant)
	1000 - 3000	$10^5 - 10^6$	Primarily Plastic (pressure equals or exceeds material strength)
	3000 - 12000	$10^6 - 10^8$	Hydrodynamic (pressure many times material strength)
Explicit	$> 12000$	$> 10^8$	Vaporization of colliding solids

Figura 3.8 Respuesta de los materiales en función del impacto (velocidad y velocidad de deformación)



El comportamiento de los materiales con los que están realizadas las *setas protectoras* de los modelos, se considerará elástico-plástico y en el caso de la gelatina balística según el modelo plástico de Johnson-Cook. Los valores de las características de estos comportamientos, necesarios en las simulaciones, proceden de los valores indicados por el fabricante del material (se adjuntan dichas características en el Anexo 3). Esta información ha sido completada o modificada empleando valores a partir de la página [www.matweb.com](http://www.matweb.com), donde se recogen valores representativos de innumerables materiales, por material y fabricante, tomando el valor más favorable resistientemente (si no es resistente con este valor, tanto lo hará con cualquier otro). Los valores de la gelatina balística proceden del estudio “*Material properties for numerical simulations for human, ballistic soap and gelatin*”, donde se recogen las propiedades de partes del cuerpo humano y gelatina balística para su uso en simulaciones numéricas [11].

En las tablas 3.1 y 3.2, se resumen las propiedades introducidas para cada material, en el modelo de simulación. Varios valores de las características mecánicas expresados en las ecuaciones constitutivas de Lamé-Hooke, están relacionadas entre ellas, siendo necesario conocer dos de ellas para poder calcular el resto. En fondo gris, aparecen los valores calculados automáticamente por Ansys®. En el caso de la gelatina balística el comportamiento plástico de la misma se representa mediante el modelo Johnson Cook, según la siguiente fórmula:

$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon_p^C) \cdot (1 + D \cdot \ln(\dot{\varepsilon}_p))$$

*Tabla 3.1: Propiedades mecánicas de los materiales.*

<b>Material</b>	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Young's Modulus, E (Pa)	Poisson's ratio	Bulk Modulus (Pa)	Shear Modulus (Pa)	Yield Strength (Pa)
Acero	7850	2·10 <sup>11</sup>	0'3	1'667·10 <sup>11</sup>	7'69·10 <sup>10</sup>	-
HDPE	959	9'33·10 <sup>8</sup>	0'37	1'196·10 <sup>9</sup>	3'405·10 <sup>8</sup>	2'6·10 <sup>7</sup>
PP	905	1'13·10 <sup>9</sup>	0'45	3'767·10 <sup>9</sup>	3'897·10 <sup>8</sup>	4'3·10 <sup>7</sup>
PC	1190	2'3·10 <sup>9</sup>	0'37	2'833·10 <sup>9</sup>	8'066·10 <sup>8</sup>	5'8·10 <sup>7</sup>



Tabla 3.2: Propiedades mecánicas de la gelatina balística.

Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Young's Modulus, E (Pa)	Initial Yield Stress, A (Pa)	Hardening constant, B	Hardening exponent, C	Strain rate constant, D	Bulk Modulus, K (Pa)
Gelatina balística	1060	2'145·10 <sup>7</sup>	1'64·10 <sup>6</sup>	6'86	1'73	0'0346	3'00·10 <sup>9</sup>

### 3.1.4- Geometrías

Las geometrías empleadas son las recogidas en el Anexo 1, donde se recoge el diseño de cada uno de los modelos que se han empleado en las simulaciones. Siendo modelizaciones realizadas a partir de productos reales existentes en el mercado. Dichos modelos ya han sido mostrados en el apartado 2.1 de este proyecto, donde se recogen las modelizaciones realizadas en SolidWorks®.

### 3.1.5- Modelos

Dentro del proyecto de Workbench, es en el apartado “modelo” donde se introducen todas las condiciones de contorno así como las acciones que van a intervenir en el proceso simulado, figura 3.9.

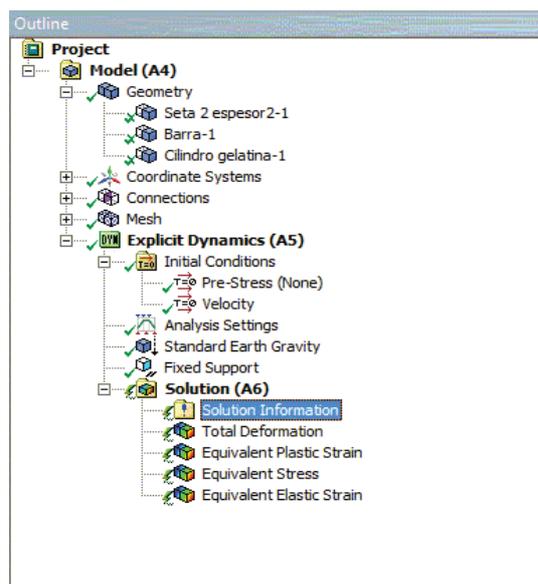


Figura 3.9 Resumen de las configuraciones del modelo de cálculo.



## **Geometría**

Siguiendo el esquema de la figura 3.9, a partir de la geometría del modelo introducido, se descuelgan cada una de las partes que componen el modelo. Seleccionando cada una de ellas elegimos de qué material está constituido y algunas propiedades básicas sobre su comportamiento, como por ejemplo si se comporta como rígido o flexible. El resto de las propiedades serán las atribuidas anteriormente a cada material.

## **Sistemas de coordenadas**

La siguiente opción se corresponde con la elección de sistemas de coordenadas. Por ejemplo, en el caso de requerir configuraciones de mallado específicas con respecto a un punto, se definirán cuantos sistemas de referencia necesitamos, que emplearemos como punto de referencia. Si bien no es necesaria la creación de sistemas de coordenadas relativos, sin embargo, sí simplifica la elección de puntos de referencia.

## **Conexiones**

En el apartado de conexiones, se establecerán las relaciones existentes entre los diferentes sólidos que conforman el diseño a modelizar. En el caso de estudio existirán conexiones entre barra - *seta* y *seta* – gelatina, y en el caso del modelo del proyecto, entre las partes de la *seta*. Estas conexiones se refieren al comportamiento o interferencias entre los elementos. En las simulaciones realizadas y como medio para reducir los largos periodos de cálculo, se han caracterizado las conexiones sin rozamiento entre ellas. Para realizar un cálculo más preciso sería necesario introducir, en la base de materiales particular del sistema, las características de rozamiento dinámico entre las superficies en contacto, para simular el rozamiento existente entre ellas.

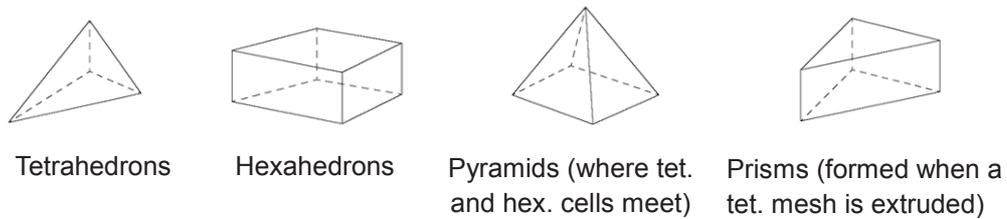
## **Mallado**

Dentro del apartado Modelo, el mallado va a ser una de las tareas más determinante a la hora de obtener resultados y que estos sean representativos. El mallado de la figura debe ser homogéneo, representativo a la figura, lo suficiente fino y “suave” para no obtener resultados incoherentes. De la obtención de un



mallado eficiente, se obtendrá un buen resultado y menores tiempos de procesado.

Los elementos de mallado más empleados para el mallado de piezas en 3D, son los siguientes:



La calidad del mallado de la pieza puede evaluarse mediante el elemento *Skewness*, que es una medida de la distorsión relativa de un elemento comparado con una forma ideal (tetraedro, pirámide, hexaedro,...), figura 3.10

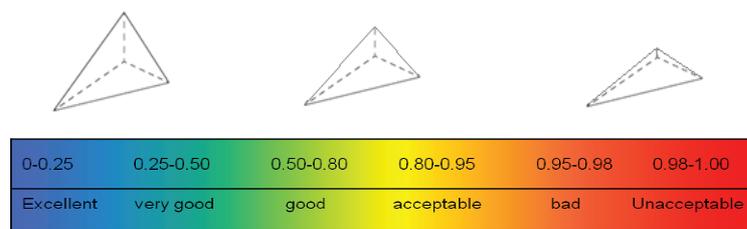


Figura 3.10 Escala de la calidad del mallado, en función de la “calidad” de la forma.

También en función de la forma de la pieza el mallado más eficiente será aquel que se adapta más regularmente a la forma del objeto. Siendo recomendable el uso de mallados con hexaedros en formas tridimensionales por el menor número de nodos que se producen, con el consecuente ahorro en el cálculo.

El mallado realizado ha partido de un mallado automático de la pieza al que se han añadido elementos particulares de mejora como la separación en partes de las piezas y la elección de tipos particulares de formas de mallado lo más acordes para la pieza.

Para el bloque de gelatina se ha elegido el método de mallado “sweep”, con un “body sizing” tipo “sphere of influence” definida en la zona de contacto con la *seta*, para afinar el mallado en dicha zona (figura 3.11).



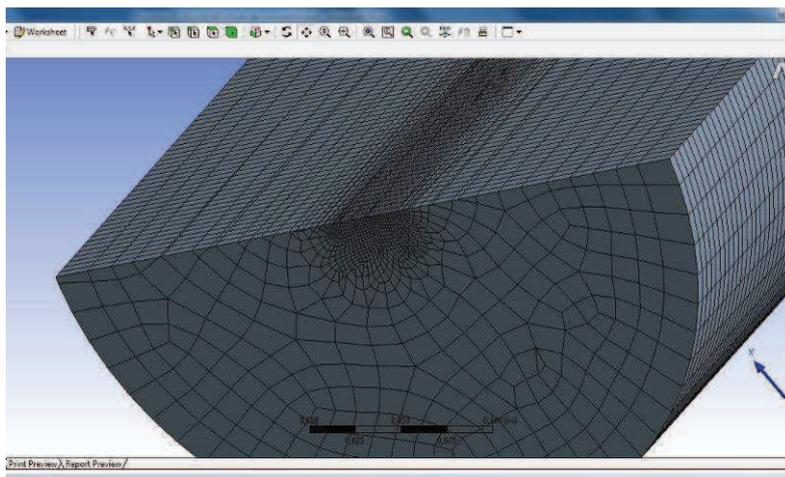


Figura 3.11 Mallado del elemento de gelatina, con ajuste del mallado en zona de impacto.

Para los diferentes tipos de protectores se han empleado varios métodos, como “edge sizing”, haciendo que el mallado se ajuste a las aristas de los elementos, así con “refinement”, para afinar el mallado en las zonas singulares y en la zona central donde se van a concentrar las tensiones.

### **Condiciones iniciales**

Con el modelo introducido, las características de los materiales y el mallado de la pieza, sólo nos queda introducir al sistema las condiciones iniciales y los parámetros que queremos que Ansys® nos simule. En este caso son los siguientes:

- Para disminuir el tiempo de cálculo, los elementos del modelo se han diseñado en contacto, por lo cual la velocidad inicial del bloque de gelatina balística será aquella que poseería la misma si cayera desde la altura deseada de cálculo.
- A la barra de acero se le impondrá la condición de que la parte inferior de la misma sea un elemento fijo, sin libertad de movimiento.
- A todos los elementos se les aplicará la fuerza de la gravedad, que en el caso de la gelatina se sumará a la velocidad inicial generada por la caída.

Estos valores son los considerados en el apartado 3.2 de este proyecto, donde se justifican los condicionantes que se deben tener en cuenta en los ensayos a realizar y simulaciones.

### **Condiciones de salida**

Por último se eligen los valores de los resultados que se desea que Ansys® nos devuelva como resultado de los cálculos realizados; es decir, las tensiones y las deformaciones que soporta el modelo durante el proceso simulado.

El objetivo de la simulación es alcanzar un estado estable o en aquellos modelos en los que se espera que la *seta* no consiga soportar las tensiones, reproducir el momento en el que se produce el fallo y la barra de acero atraviesa el protector.

## **3.2- Ensayos en laboratorio**

### **3.2.1- Ensayos de impacto**

El estudio de la respuesta mecánica de los elementos de protección se ha realizado con dos tipos de objeto de impacto. Un ensayo mediante el empleo de un cuerpo rígido y otro con el empleo de un cuerpo blando, como simulación del impacto del cuerpo humano. Se adjunta en el Anexo 3 el Informe Técnico IT090065 donde se recoge este estudio.

#### **Ensayos de impacto mediante choque por cuerpo rígido**

Este ensayo ha consistido en el impacto mediante caída libre de un cuerpo rígido sobre las protecciones dispuestas en las armaduras de acero, y desde una altura predeterminada, con la finalidad de comprobar la resistencia de estos dispositivos frente a la penetración contra los elementos de acero.

El cuerpo rígido que se ha empleado para este ensayo, consiste en una esfera de acero, de 500 mm de diámetro y 100 kg de peso. Para el manejo y control de la esfera de ensayo, así como la aplicación de la energía cinética de impacto, se ha empleado una grúa torre (figura 3.12) y un sistema de



parametrización, ya que permite la realización y control de todos estos parámetros de ensayo.

Este ensayo es eminentemente más restrictivo que el realizado mediante choque por cuerpo blando, ya que en este caso, la masa rígida transmite el total de la energía cinética a la protección, resultando más agresivo que en el caso por cuerpo blando, en lo que se refiere a la integridad de la protección.

En todos los impactos, el cuerpo rígido se ha colocado centrado sobre las cuatro armaduras con sus correspondientes protecciones ya instaladas, con objeto de garantizar una caída vertical y centrada sobre las protecciones, situación que no siempre ha sido posible por las variaciones que introduce el propio sistema instantáneo de liberación de la masa rígida de ensayo, habiéndose detectado en algunos casos, que de las cuatro protecciones, casi todo el impacto se ha transmitido a una única protección de las cuatro previstas. También se llevaron a cabo pruebas con la protección sobre una sola armadura, y realizando el impacto sobre ésta.



*Figura 3.12: Disposición de impacto con cuerpo rígido.*

## **Ensayos de impacto mediante choque por cuerpo blando**

Este ensayo ha consistido en el impacto mediante caída libre de un cuerpo blando sobre las protecciones dispuestas en las armaduras de acero, y desde una altura predeterminada, con la finalidad de comprobar la resistencia de estos dispositivos frente a la penetración contra los elementos de acero.

El cuerpo blando que se ha empleado para este ensayo, consiste en un saco esférico cónico de 50 kg de peso. Para el manejo y control del saco de ensayo, así como la aplicación de la energía cinética de impacto, se ha empleado la grúa torre y su sistema de parametrización, ya que permite la realización y control de todos estos parámetros de ensayo.

Este ensayo es menos restrictivo que el realizado mediante choque por cuerpo rígido, ya que en este caso, la masa de ensayo tiene gran capacidad de deformación, participando en mayor grado de la absorción de energía durante el impacto.

En todos los impactos el cuerpo blando se ha colocado centrado sobre las cuatro armaduras con sus correspondientes protecciones ya instaladas, con objeto de garantizar una caída vertical y centrada sobre las protecciones, situación que no siempre ha sido posible por las variaciones que introduce el propio sistema instantáneo de liberación de la masa rígida de ensayo, habiéndose detectado en algunos casos, que de las cuatro protecciones, casi todo el impacto se ha transmitido a una única protección de las cuatro previstas.





Figura 3.13: Preparación de impacto con cuerpo blando.

### Disposición de las armaduras y elementos de protección a ensayar

En la figura 3.14 se muestran algunas de las distribuciones empleadas para los ensayos. El resto son variaciones en la altura y diámetros de las barras de acero corrugado empleadas.

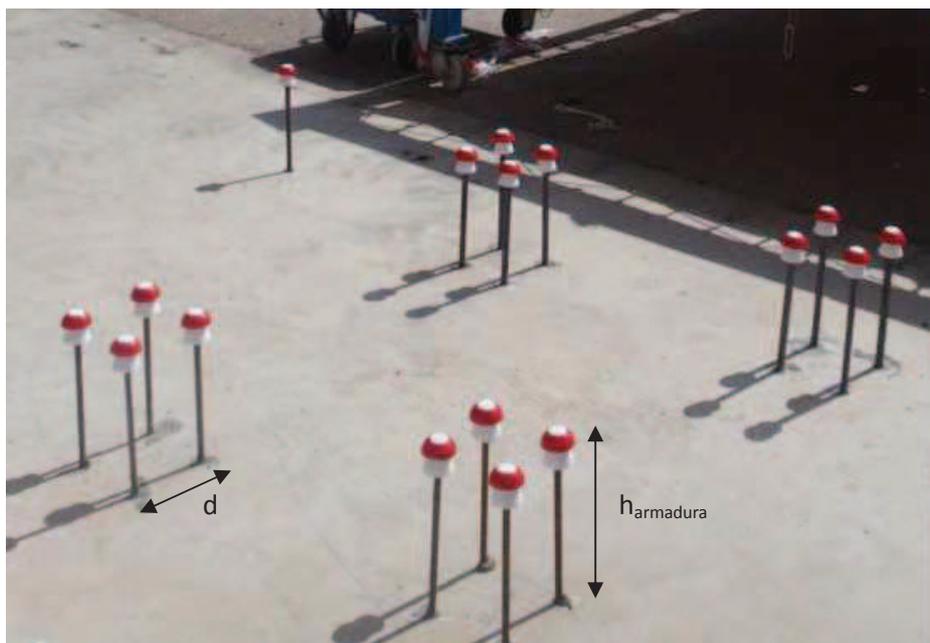


Figura 3.14: Diferentes disposiciones de armaduras antes de los ensayos.

### 3.2.2- Resistencia a cizalladura

Realizando un planteamiento del problema de manera inversa, en vez de estudiar todas las variables que pueden influir en el impacto y reproducirlas en un laboratorio, y por el contrario pensando en el mínimo exigible que corresponde con eliminar los esfuerzos causados por la energía cinética en el momento del impacto. Podemos realizar un ensayo de carga para determinar qué carga es capaz de soportar el elemento ensayado. Este ensayo es un escenario fácil de reproducir en laboratorio, mediante una prensa multiensayos que ejerza una presión al protector colocado sobre una barra de diámetro conocido, pudiendo calcular la resistencia del protector a ser atravesado por la barra.

Para realizar este ensayo, se ha tomado como ejemplo, el descrito para comprobar el comportamiento mecánico a cizalladura mediante punzonamiento, con un montaje similar al empleado en el ensayo de la norma “*Standard Test Method for Shear Strength of Plastics by Punch Tool*” ASTM D732-2 [13], que se representa en la figura 3.15.

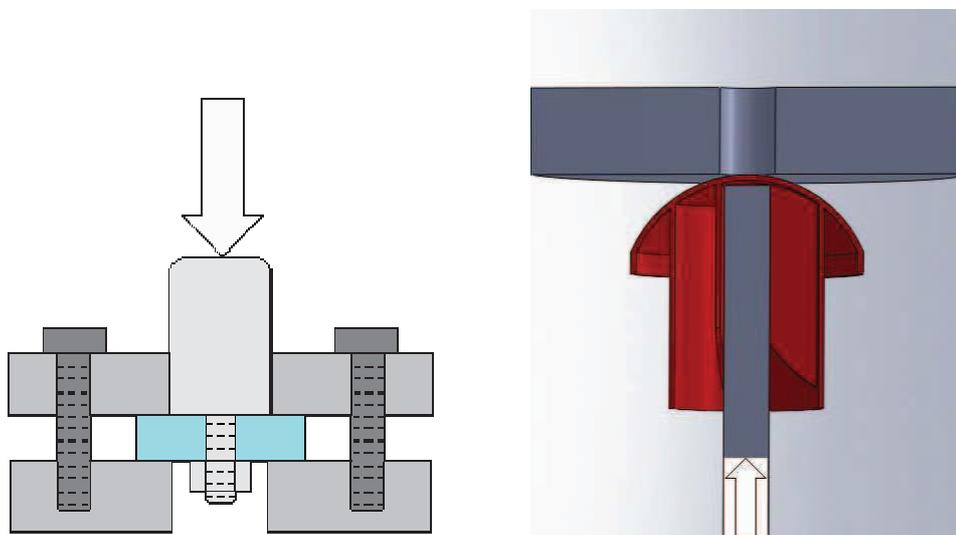


Figura 3.15: Montaje para ensayo de probeta a cortadura, montaje con seta.

Mediante este montaje podemos obtener resultados de la resistencia máxima que pueden soportar los modelos recogidos en este proyecto y así obtener un valor mínimo de dicha resistencia, de manera fácil y rápida. Los ensayos se han realizado con las setas tipo 1, 2 y 3 (modelos habituales de mercado) y con el modelo reforzado con núcleo de policarbonato, realizando dichos ensayos con



protectores nuevos y con protectores que han sido expuestos a la intemperie durante seis meses. Si bien no se han realizado ensayos completos sobre el comportamiento frente a la exposición a la intemperie, como ya se indicaba, sí se ha aprovechado la sencillez de este ensayo para realizar una valoración inicial de la posible influencia de la exposición a la intemperie sobre estos protectores.



## **4- RESULTADOS EXPERIMENTALES**

### **4.1- Resultados de las simulaciones**

Después de definir las simulaciones en el apartado anterior, se procede a la presentación de los resultados obtenidos para cada uno de los montajes calculados.

Los resultados obtenidos en las simulaciones se compararán con los resultados de los ensayos mecánicos, de forma que se pueda dar una validez a los comportamientos registrados en las simulaciones realizadas.

En las tablas 4.1 a 4.4 se recoge un resumen de las propiedades físicas de cada uno de los elementos ensayados, así como una caracterización del mallado empleado para cada montaje.



## SETA 1



Tabla 4.1: Propiedades montaje con seta 1.

Model (A4) > Geometry > Parts			
Object Name	Barra-1	Cilindro gelatina-1	Seta 1-1
State	Meshed		
Graphics Properties			
Visible	Yes		
Transparency	1		
Definition			
Suppressed	No		
Stiffness Behavior	Flexible		
Coordinate System	Default Coordinate System		
Reference Temperature	By Environment		
Material			
Assignment	Structural Steel	Gelatina	Polietileno
Bounding Box			
Length X	1,2e-002 m	0,4 m	5,3e-002 m
Length Y	1,2e-002 m	0,4 m	5,3e-002 m
Length Z	0,1 m	0,664 m	4,3e-002 m
Properties			
Volume	1,131e-005 m <sup>3</sup>	8,3441e-002 m <sup>3</sup>	1,7501e-005 m <sup>3</sup>
Mass	8,8781e-002 kg	115, kg	1,6696e-002 kg
Centroid X	-7,2693e-004 m	-7,1409e-004 m	-7,2497e-004 m
Centroid Y	-8,0032e-004 m	-8,1664e-004 m	-8,0009e-004 m
Centroid Z	-1,3568e-018 m	0,3837 m	3,4912e-002 m
Moment of Inertia Ip1	7,4408e-005 kg·m <sup>2</sup>	4,6522 kg·m <sup>2</sup>	5,0439e-006 kg·m <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip2	7,4409e-005 kg·m <sup>2</sup>	4,6518 kg·m <sup>2</sup>	5,0446e-006 kg·m <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip3	1,5822e-006 kg·m <sup>2</sup>	1,9828 kg·m <sup>2</sup>	5,393e-006 kg·m <sup>2</sup>
Statistics			
Nodes	238	80727	3808
Elements	160	77560	11375
Mesh Metric	Skewness		
Min	0,287486071726683	6,05575325207052E-03	1,11763013353785E-02
Max	0,495576652817009	0,727709030717387	0,684499533904797
Average	0,380826966143167	0,230429016420982	0,293121459922898
Standard Deviation	6,29503112177027E-02	0,127820894411774	0,140337630916819

## SETA 2

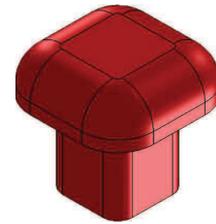


Tabla 4.2. Propiedades montaje con seta 2.

Model (A4) > Geometry > Parts			
Object Name	Barra-1	Seta 2-1	Cilindro gelatina-1
State	Meshed		
Graphics Properties			
Visible	Yes		
Transparency	1		
Definition			
Suppressed	No		
Stiffness Behavior	Flexible		
Coordinate System	Default Coordinate System		
Reference Temperature	By Environment		
Material			
Assignment	Structural Steel	Polietileno	Gelatina
Bounding Box			
Length X	1,2e-002 m	6,4137e-002 m	0,4 m
Length Y	0,1 m	5,5e-002 m	0,664 m
Length Z	1,2e-002 m	6,4137e-002 m	0,4 m
Properties			
Volume	1,131e-005 m <sup>3</sup>	2,5241e-005 m <sup>3</sup>	8,3441e-002 m <sup>3</sup>
Mass	8,8781e-002 kg	2,408e-002 kg	115, kg
Centroid X	-1,0825e-002 m	-1,017e-002 m	-1,0804e-002 m
Centroid Y	2,4149e-002 m	5,5902e-002 m	0,40815 m
Centroid Z	-1,2668e-003 m	-1,4012e-003 m	-1,2668e-003 m
Moment of Inertia Ip1	7,3923e-005 kg·m <sup>2</sup>	1,051e-005 kg·m <sup>2</sup>	4,6518 kg·m <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip2	7,3923e-005 kg·m <sup>2</sup>	8,7558e-006 kg·m <sup>2</sup>	1,9828 kg·m <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip3	1,5619e-006 kg·m <sup>2</sup>	1,0512e-005 kg·m <sup>2</sup>	4,6522 kg·m <sup>2</sup>
Statistics			
Nodes	1089	1332	45262
Elements	832	3995	42720
Mesh Metric	Skewness		
Min	1,23264370511785E-02	1,93329208459342E-02	2,00748767790136E-02
Max	0,366842425800456	0,996833557943447	0,718062453326662
Average	0,249038570060834	0,559128437380694	0,250019370975139
Standard Deviation	9,50345233169495E-02	0,20823342291311	0,148060272797326



### SETA 3



Tabla 4.3 Propiedades montaje con seta 3.

Model (A4) > Geometry > Parts			
Object Name	Barra-1	Seta 3 espesor 12-1	Cilindro gelatina-1
State	Meshed		
Graphics Properties			
Visible	Yes		
Transparency	1		
Definition			
Suppressed	No		
Stiffness Behavior	Flexible		
Coordinate System	Default Coordinate System		
Reference Temperature	By Environment		
Material			
Assignment	Polietileno	Structural Steel	Gelatina
Bounding Box			
Length X	5,4e-002 m	1,2e-002 m	0,4 m
Length Y	5,4e-002 m	1,e-001 m	0,664 m
Length Z	5,4e-002 m	1,2e-002 m	0,4 m
Properties			
Volume	1,4057e-005 m <sup>3</sup>	1,131e-005 m <sup>3</sup>	8,3441e-002 m <sup>3</sup>
Mass	1,341e-002 kg	8,8781e-002 kg	115, kg
Centroid X	1,3214e-003 m	1,3224e-003 m	1,3434e-003 m
Centroid Y	8,0132e-002 m	5,0359e-002 m	0,43439 m
Centroid Z	-2,1804e-006 m	6,2288e-007 m	3,234e-018 m
Moment of Inertia Ip1	4,7199e-006 kg·m <sup>2</sup>	7,4409e-005 kg·m <sup>2</sup>	4,6518 kg·m <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip2	4,3407e-006 kg·m <sup>2</sup>	1,5822e-006 kg·m <sup>2</sup>	1,9828 kg·m <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip3	4,7189e-006 kg·m <sup>2</sup>	7,4408e-005 kg·m <sup>2</sup>	4,6522 kg·m <sup>2</sup>
Statistics			
Nodes	5295	1122	39345
Elements	15649	864	36840
Mesh Metric	Skewness		
Min	8,8246576729677E-03	6,74121961458911E-02	2,31148243596237E-02
Max	0,688322271075654	0,416509466040744	0,608740811021731
Average	0,323999788751726	0,272902162409625	0,205352845123879
Standard Deviation	0,11559769791835	8,14627781772174E-02	0,116759879037321

## SETA PROYECTO



Tabla 4.4: Propiedades montaje con seta proyecto.

### Model (A4) > Geometry > Parts

Object Name	<i>Seta proye blanco-1</i>	<i>Seta proye exterior-1</i>	<i>Seta proye interior-1</i>	<i>Barra-1</i>	<i>Cilindro gelatina-1</i>
State	Meshed				
<b>Graphics Properties</b>					
Visible	Yes				
Transparency	1				
<b>Definition</b>					
Suppressed	No				
Stiffness Behavior	Flexible				
Coordinate System	Default Coordinate System				
Reference Temperature	By Environment				
<b>Material</b>					
Assignment	Polipropileno	Polietileno	Policarbonato	Structural Steel	Gelatina
<b>Bounding Box</b>					
Length X	5,1286e-002 m	6,7855e-002 m	2,9343e-002 m	1,4805e-002 m	0,55798 m
Length Y	5,573e-002 m	2,2944e-002 m	2,4e-002 m	0,1 m	0,3 m
Length Z	5,1272e-002 m	6,7816e-002 m	2,9285e-002 m	1,4805e-002 m	0,55816 m
<b>Properties</b>					
Volume	6,7931e-006 m <sup>3</sup>	5,5831e-006 m <sup>3</sup>	5,6263e-006 m <sup>3</sup>	1,131e-005 m <sup>3</sup>	3,7699e-002 m <sup>3</sup>
Mass	6,3516e-003 kg	5,3262e-003 kg	6,7516e-003 kg	8,8781e-002 kg	115, kg
Centroid X	-5,7815e-003 m	-5,7817e-003 m			
Centroid Y	-2,6315e-003 m	1,4274e-002 m	1,659e-002 m	-2,9874e-002 m	0,17663 m
Centroid Z	-3,7176e-009 m	-4,5654e-012 m	-3,0633e-010 m	-3,1675e-020 m	6,9826e-018 m
Moment of Inertia Ip1	2,9555e-006 kg·m <sup>2</sup>	1,4338e-006 kg·m <sup>2</sup>	7,5077e-007 kg·m <sup>2</sup>	7,3923e-005 kg·m <sup>2</sup>	2,0042 kg·m <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip2	2,1127e-006 kg·m <sup>2</sup>	2,4668e-006 kg·m <sup>2</sup>	7,8968e-007 kg·m <sup>2</sup>	7,3923e-005 kg·m <sup>2</sup>	2,2879 kg·m <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip3	2,9556e-006 kg·m <sup>2</sup>	1,434e-006 kg·m <sup>2</sup>	7,5077e-007 kg·m <sup>2</sup>	1,5619e-006 kg·m <sup>2</sup>	2,0042 kg·m <sup>2</sup>
<b>Statistics</b>					
Nodes	6676	1344	7611	792	78438
Elements	23092	640	36027	544	75400
Mesh Metric	Skewness				
Min	1,4200430575E-02	6,4801811628E-02	3,4165840956E-05	8,4776743489E-03	1,6364256515E-02
Max	0,99619376014	0,71524494452	0,99991829432	0,39817082935	0,74452939941
Average	0,38221648000	0,36555205979	0,26973810217	0,25143180608	0,24054724658
Standard Deviation	0,18860021310	0,19161958044	0,16057418796	0,12455518400	0,14024966582



El objeto de la simulación es comprobar como la energía cinética de la caída se transforma en tensiones sobre el modelo simulado y cómo evoluciona el modelo frente a estas tensiones. Se estudiará si el protector es capaz de soportar las tensiones del impacto, o por el contrario, si se produce el fallo del mismo, con la consiguiente penetración de la barra. Por otra parte, cómo se comporta la gelatina balística frente a las tensiones transmitidas por el protector, si el protector penetra en la gelatina o si se produce la detención del proceso sin llegar a una penetración.

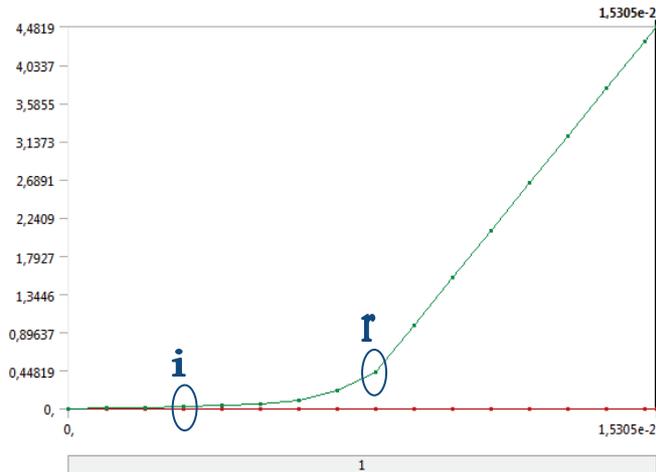
En las gráficas 4.1 a 4.14 y tablas 4.5 a 4.18, se recogen los resultados de las deformaciones y tensiones a lo largo de cada una de las simulaciones, y para cada uno de los modelos simulados.





SETA 1

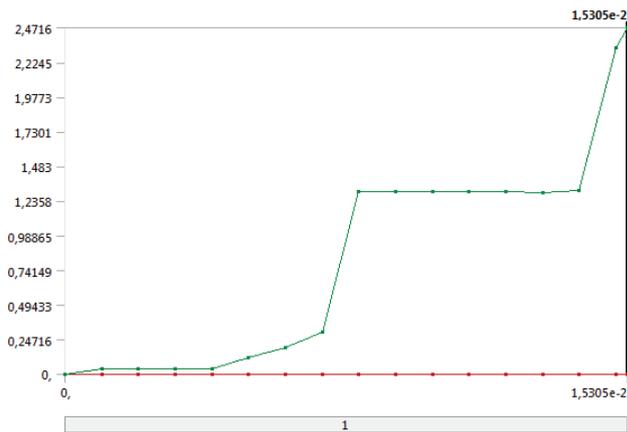
Tabla 4.5: Deformación total



Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]
0,		0,
1,0001e-003		1,0111e-002
2,e-003		2,0306e-002
3,0001e-003		3,0515e-002
4,0001e-003		4,0755e-002
5,e-003		5,0818e-002
6,e-003		9,4525e-002
7,e-003		0,21406
8,e-003	0,	0,42571
9,e-003		0,98089
1,e-002		1,536
1,1e-002		2,0915
1,2e-002		2,6468
1,3e-002		3,2021
1,4e-002		3,7572
1,5e-002		4,3124
1,5305e-002		4,4819

Gráfica 4.1: Deformación total

Tabla 4.6: Deformación plástica equivalente.

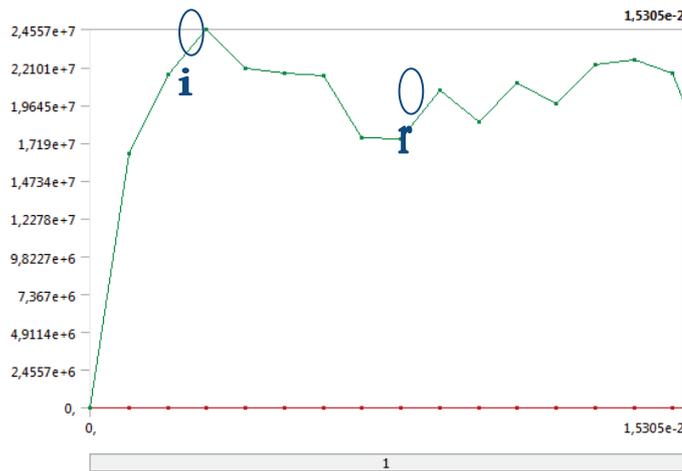


Time [s]	Minimum [m/m]	Maximum [m/m]
0,		0,
1,0001e-003		
2,e-003		3,7402e-002
3,0001e-003		
4,0001e-003		4,2544e-002
5,e-003		0,1231
6,e-003		0,18717
7,e-003		0,30207
8,e-003	0,	1,3044
9,e-003		1,3003
1,e-002		1,3036
1,1e-002		1,3048
1,2e-002		1,3052
1,3e-002		1,2943
1,4e-002		1,3123
1,5e-002		2,3247
1,5305e-002		2,4716

Gráfica 4.2: Deformación plástica equivalente.



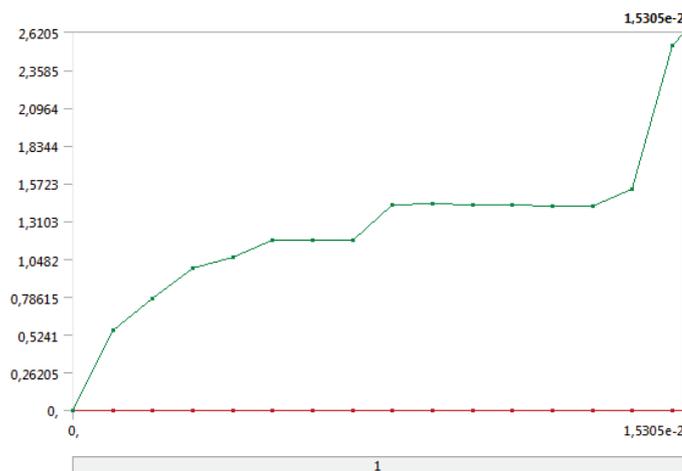
Tabla 4.7: Tensión equivalente.



Gráfica 4.3: Tensión equivalente.

Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]
0,		0,
1,0001e-003		1,6511e+007
2,e-003		2,1627e+007
3,0001e-003		2,4557e+007
4,0001e-003		2,2066e+007
5,e-003		2,1724e+007
6,e-003		2,1578e+007
7,e-003		1,7562e+007
8,e-003	0,	1,742e+007
9,e-003		2,0599e+007
1,e-002		1,859e+007
1,1e-002		2,1094e+007
1,2e-002		1,9713e+007
1,3e-002		2,2237e+007
1,4e-002		2,2619e+007
1,5e-002		2,171e+007
1,5305e-002		1,9727e+007

Tabla 4.8: Deformación elástica equivalente



Gráfica 4.4: Deformación elástica equivalente.

Time [s]	Minimum [m/m]	Maximum [m/m]
0,		0,
1,0001e-003		0,55945
2,e-003		0,77452
3,0001e-003		0,98704
4,0001e-003		1,0577
5,e-003		
6,e-003		1,178
7,e-003		
8,e-003	0,	1,4261
9,e-003		1,4283
1,e-002		1,4246
1,1e-002		1,4264
1,2e-002		1,4165
1,3e-002		1,4168
1,4e-002		1,5321
1,5e-002		2,5318
1,5305e-002		2,6205

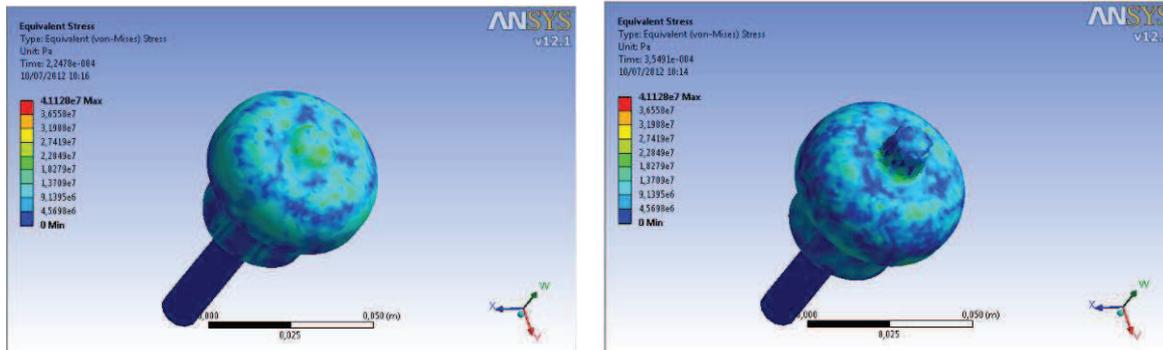
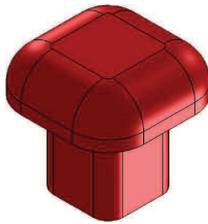


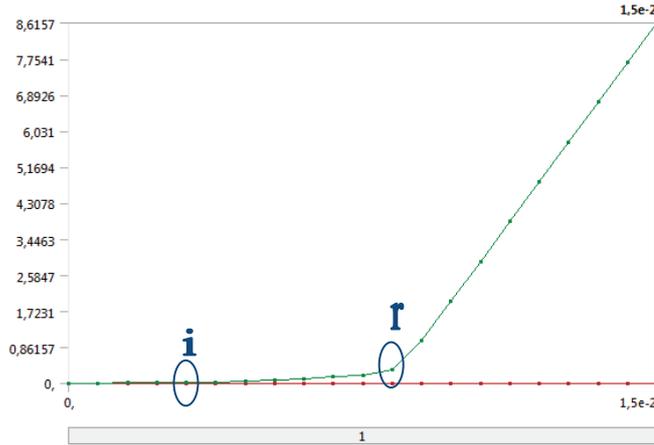
Figura 4.1: Tensiones en el momento de inicio de deformación y en rotura.

De las gráficas 4.1 y 4.3 se observa que las tensiones van aumentando rápidamente en la zona de punzonamiento hasta alcanzar un valor máximo, en el cual se acelera la deformación con pequeños descensos de la tensión, marcado con una *i*, fase de comportamiento elástico. A partir de este valor la deformación aumenta rápidamente mientras que en las tensiones se produce un pequeño descenso, hasta alcanzar el punto *r*, en este intervalo se ha producido la deformación plástica del protector, hasta alcanzar la tensión máxima a la que se produce la rotura. Después de este punto las deformaciones suben casi verticalmente, una vez producida la penetración de la barra, las deformaciones aumentan rápidamente en la gelatina. Las tensiones en la seta disminuyen y la gelatina continua desplazándose, empujando la seta según penetra la barra. Los desplazamientos son contabilizados como deformaciones, por eso el rápido aumento de las mismas al desplazarse la gelatina después de la rotura.





SETA 2

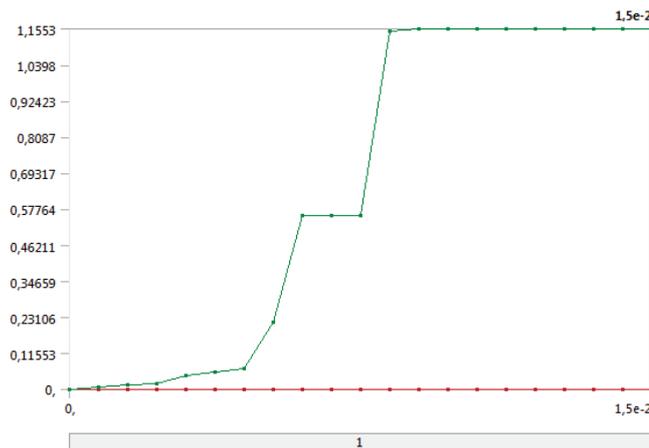


Gráfica 4.5: Deformación total

Tabla 4.9: Deformación total.

Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]
0,		0,
7,5002e-004		7,5964e-003
1,5e-003		1,504e-002
2,25e-003		2,2596e-002
3,0001e-003		3,02e-002
3,75e-003		3,7906e-002
4,5001e-003		4,5633e-002
5,25e-003		7,1776e-002
6,e-003	0,	0,11348
6,75e-003		0,15554
7,5e-003		0,19773
8,25e-003		0,33586
9,e-003		1,0238
9,75e-003		1,9725
1,05e-002		2,9218
1,125e-002		3,8711
1,2e-002		4,8205
1,275e-002		5,7697
1,35e-002		6,7189
1,425e-002		7,665
1,5e-002		8,6157

Tabla 4.10: Deformación plástica equivalente.

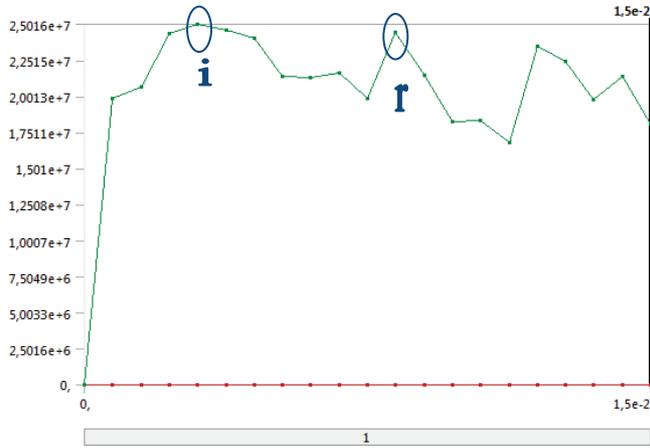


Gráfica 4.6: Deformación plástica equivalente.

Time [s]	Minimum [m/m]	Maximum [m/m]
0,		0,
7,5002e-004		9,0545e-003
1,5e-003		1,3248e-002
2,25e-003		2,015e-002
3,0001e-003		4,4241e-002
3,75e-003		5,7444e-002
4,5001e-003		6,6523e-002
5,25e-003		0,21658
6,e-003		0,55846
6,75e-003		0,55719
7,5e-003	0,	0,55732
8,25e-003		1,1492
9,e-003		
9,75e-003		
1,05e-002		
1,125e-002		1,1544
1,2e-002		
1,275e-002		
1,35e-002		
1,425e-002		1,1553
1,5e-002		1,1551



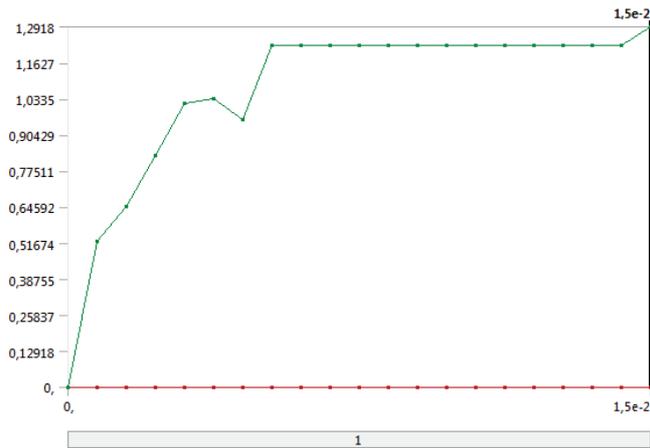
Tabla 4.11: Tensión equivalente.



Gráfica 4.7: Tensión equivalente

Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]
0,		0,
7,5002e-004		1,9862e+007
1,5e-003		2,0657e+007
2,25e-003		2,4373e+007
3,0001e-003		2,5016e+007
3,75e-003		2,4578e+007
4,5001e-003		2,4054e+007
5,25e-003		2,1415e+007
6,e-003		2,1321e+007
6,75e-003		2,1631e+007
7,5e-003	0,	1,9849e+007
8,25e-003		2,4488e+007
9,e-003		2,1502e+007
9,75e-003		1,8267e+007
1,05e-002		1,8336e+007
1,125e-002		1,684e+007
1,2e-002		2,3461e+007
1,275e-002		2,2439e+007
1,35e-002		1,978e+007
1,425e-002		2,1359e+007
1,5e-002		1,8079e+007

Tabla 4.12: Deformación elástica equivalente.



Gráfica 4.8: Deformación elástica equivalente.

Time [s]	Minimum [m/m]	Maximum [m/m]
0,		0,
7,5002e-004		0,52175
1,5e-003		0,64655
2,25e-003		0,82914
3,0001e-003		1,0177
3,75e-003		1,0338
4,5001e-003		0,95999
5,25e-003		
6,e-003		
6,75e-003		
7,5e-003		
8,25e-003		
9,e-003		
9,75e-003		
1,05e-002		
1,125e-002		
1,2e-002		
1,275e-002		
1,35e-002		
1,425e-002		
		1,2249
		1,2918



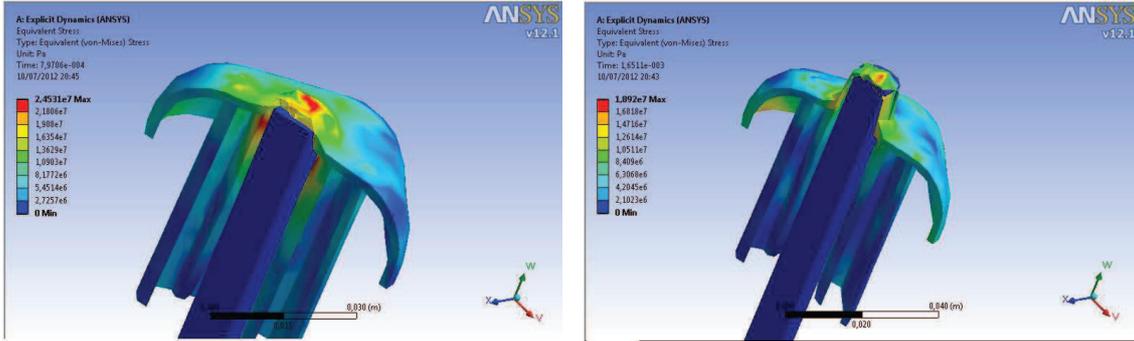


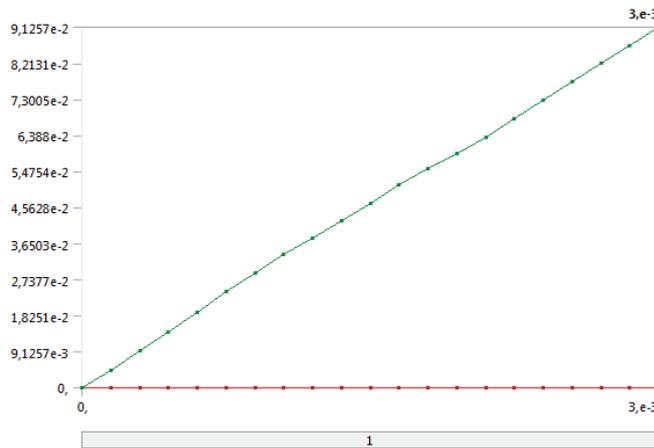
Figura 4.2: Tensiones en el momento de inicio de deformación y en rotura.

De manera similar al caso anterior y con la misma simbología de inicio de la deformación plástica y rotura, las tensiones van aumentando rápidamente en la zona de punzonamiento hasta alcanzar un valor máximo, en el cual se produce la deformación plástica de la seta, con variaciones de la tensión, hasta alcanzar la rotura de la misma. Una vez se produce la rotura, la deformación aumenta casi verticalmente al penetrar fácilmente en la gelatina.



SETA 3

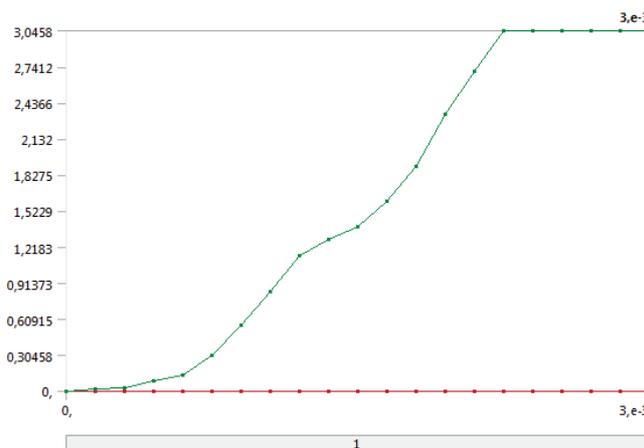
Tabla 4.13: Deformación total.



Gráfica 4.9: Deformación total

Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]
0,		0,
1,5005e-004		1,5759e-003
3,0004e-004		3,1157e-003
4,5001e-004		4,6171e-003
6,0006e-004		6,1276e-003
7,5006e-004		7,617e-003
9,0004e-004		9,1127e-003
1,05e-003		1,0606e-002
1,2e-003		1,2121e-002
1,35e-003		1,3628e-002
1,5e-003	0,	1,5124e-002
1,65e-003		1,6621e-002
1,8e-003		1,8117e-002
1,95e-003		1,9598e-002
2,1e-003		2,1071e-002
2,25e-003		2,2545e-002
2,4e-003		2,4045e-002
2,55e-003		2,5553e-002
2,7e-003		2,7055e-002
2,85e-003		2,8537e-002
3,e-003		2,9995e-002

Tabla 4.14: Deformación plástica equivalente.

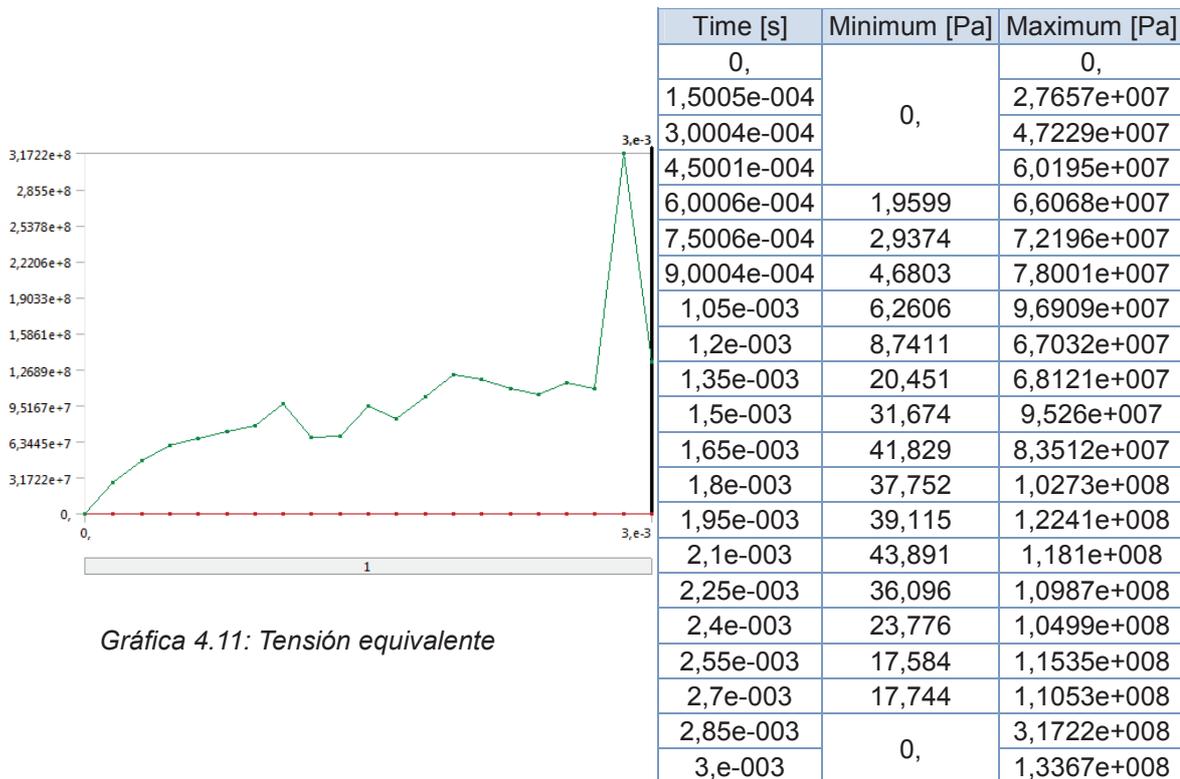


Gráfica 4.10: Deformación plástica equivalente.

Time [s]	Minimum [m/m]	Maximum [m/m]
0,		0,
1,5005e-004		1,845e-002
3,0004e-004		3,1135e-002
4,5001e-004		8,8021e-002
6,0006e-004		0,14129
7,5006e-004		0,30529
9,0004e-004		0,55748
1,05e-003		0,84152
1,2e-003		1,1422
1,35e-003		1,2838
1,5e-003	0,	1,3951
1,65e-003		1,6059
1,8e-003		1,9029
1,95e-003		2,3384
2,1e-003		2,7004
2,25e-003		
2,4e-003		3,0458
2,55e-003		
2,7e-003		
2,85e-003		3,0455
3,e-003		



Tabla 4.15: Tensión equivalente.



Gráfica 4.11: Tensión equivalente

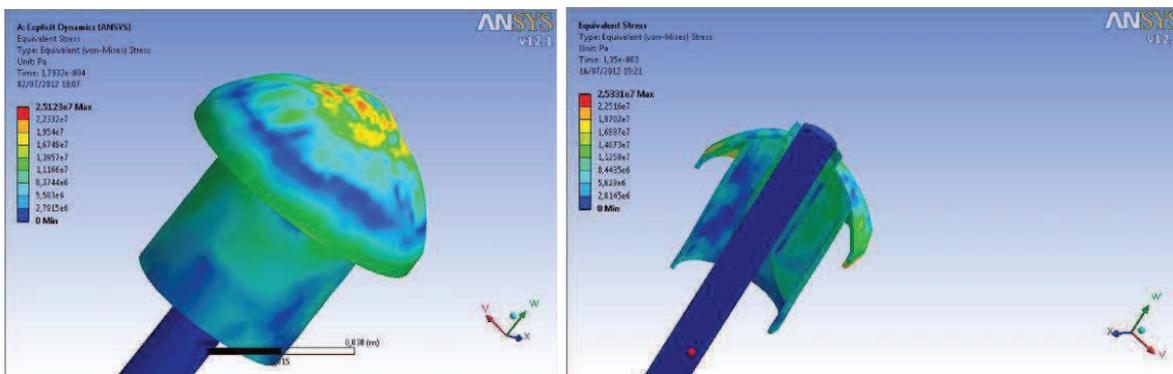


Figura 4.3: Tensiones en el momento de inicio de deformación y en rotura.

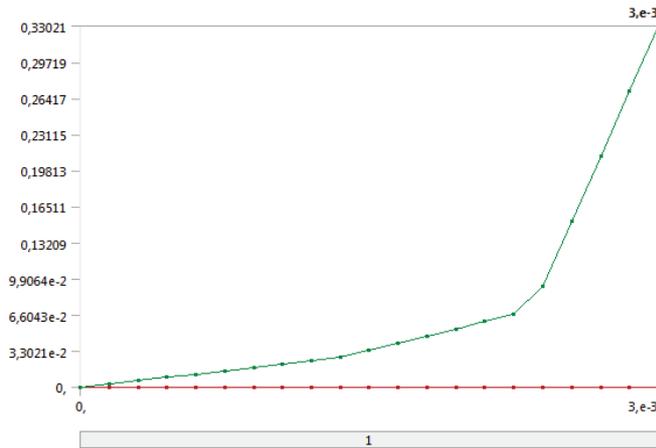
En el caso de la seta 3, casi desde un inicio se produce una rápida deformación de la delgada pared de la misma. No se puede apreciar un inicio y fin en la gráfica de deformación total, no existe casi variación entre la curva de deformación de la propia seta y la gelatina. Estos puntos si se pueden ver en la figura 4.2.



## SETA PROYECTO

Tabla 4.16: Deformación total.

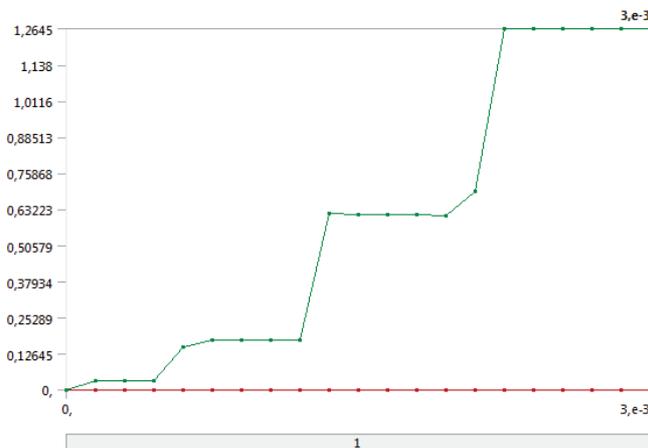
Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]
0,		0,
1,5e-004		3,0099e-003
3,0001e-004		6,0241e-003
4,5e-004		9,052e-003
6,e-004		1,2107e-002
7,5001e-004		1,515e-002
9,0002e-004		1,8225e-002
1,05e-003		2,1197e-002
1,2e-003		2,421e-002
1,35e-003		2,7224e-002
1,5e-003	0,	3,3534e-002
1,65e-003		4,0152e-002
1,8e-003		4,6771e-002
1,95e-003		5,3391e-002
2,1e-003		6,0012e-002
2,25e-003		6,6633e-002
2,4e-003		9,2189e-002
2,55e-003		0,15168
2,7e-003		0,21119
2,85e-003		0,27071
3,e-003		0,33021



Gráfica 4.12: Deformación total

Tabla 4.17: Deformación plástica equivalente.

Time [s]	Minimum [m/m]	Maximum [m/m]
0,		0,
1,5e-004		3,174e-002
3,0001e-004		3,152e-002
4,5e-004		
6,e-004		0,14975
7,5001e-004		0,1747
9,0002e-004		0,17434
1,05e-003		0,17418
1,2e-003		0,1734
1,35e-003		0,61724
1,5e-003	0,	0,61496
1,65e-003		0,61281
1,8e-003		0,61216
1,95e-003		0,61182
2,1e-003		0,6949
2,25e-003		1,2639
2,4e-003		
2,55e-003		
2,7e-003		
2,85e-003		
3,e-003		1,2645

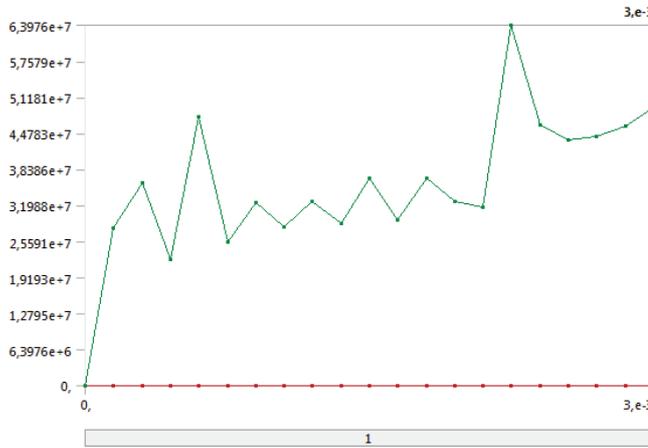


Gráfica 4.13: Deformación plástica equivalente.



Tabla 4.18: Tensión equivalente.

Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]
0,		0,
1,5e-004		2,799e+007
3,0001e-004		3,603e+007
4,5e-004		2,2339e+007
6,e-004		4,7757e+007
7,5001e-004		2,5603e+007
9,0002e-004		3,2479e+007
1,05e-003		2,8205e+007
1,2e-003		3,2622e+007
1,35e-003		2,8879e+007
1,5e-003	0,	3,6758e+007
1,65e-003		2,9443e+007
1,8e-003		3,6856e+007
1,95e-003		3,2696e+007
2,1e-003		3,1732e+007
2,25e-003		6,3976e+007
2,4e-003		4,6342e+007
2,55e-003		4,361e+007
2,7e-003		4,4147e+007
2,85e-003		4,6144e+007
3,e-003		4,9288e+007



Gráfica 4.14: Tensión equivalente.

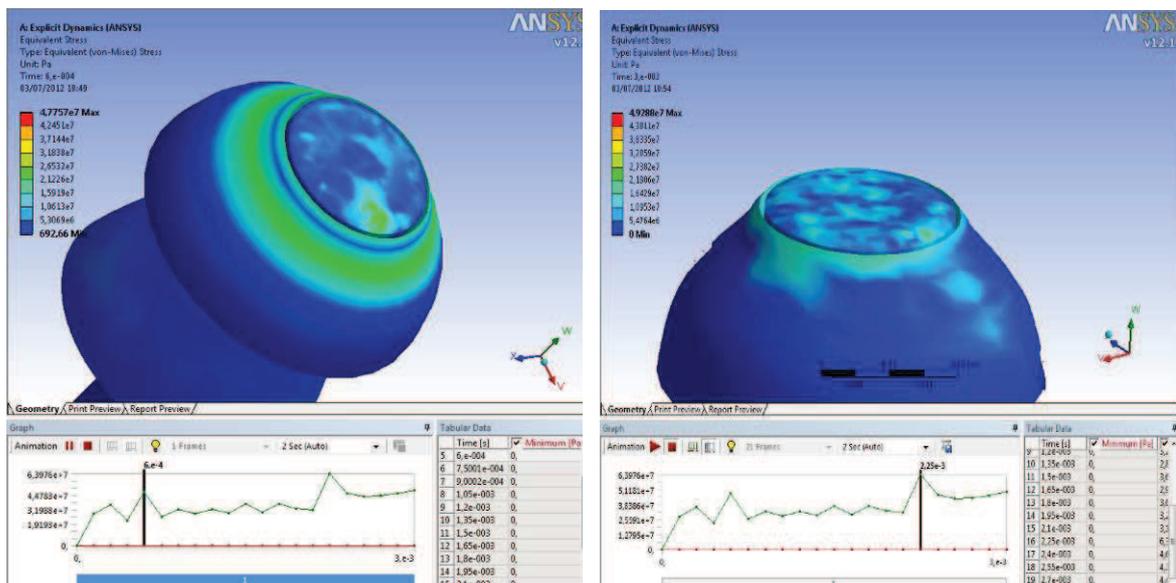


Figura 4.4: Tensiones en varios momentos de deformación del elemento exterior.

En el caso de la seta de proyecto, el refuerzo es capaz de resistir las tensiones que le transmite el impacto. Esto no ocurre en la parte exterior, que va deformándose disminuyendo la superficie que se opone a la penetración en el bloque de gelatina balística, ver figura 4.4. El exterior de la seta no es capaz de



resistir los esfuerzos y disminuye sustancialmente la superficie sobre la que se reparte la energía del impacto, se reduce casi a la parte blanca.

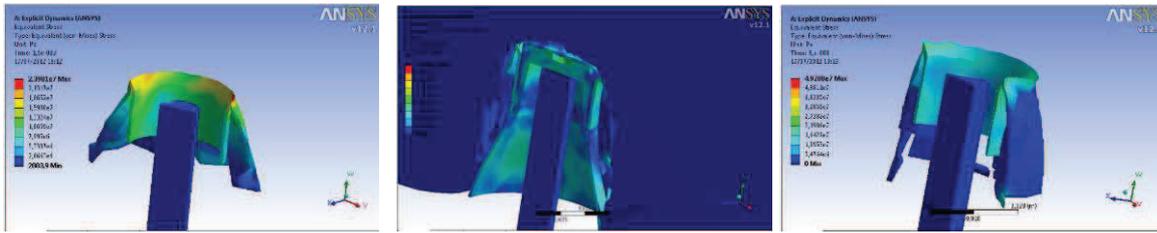


Figura 4.5: Evolución de la deformación del elemento exterior y penetración en la gelatina balística.



## 4.2- Resultados de los ensayos en laboratorio

### 4.2.1- Resultados de ensayos de impacto

Los resultados de los ensayos de impacto son del único protector que ha sido sometido a este ensayo, la *seta* con refuerzo de policarbonato.

#### Ensayos de impacto mediante choque por cuerpo rígido

##### Ensayo 1 ( $H_{caída} = 1\text{ m}$ ; $\varnothing_{armadura} = 12\text{ mm}$ ; $h_{armadura} = 150\text{ mm}$ )

Tras el impacto realizado para una energía cinética de caída de 1000 J, los protectores de armadura con el refuerzo de policarbonato resisten perfectamente este nivel de carga dinámica aplicada, sin que se produzca perforación de la armadura a través de las piezas plásticas, figura 4.5.



*Figura 4.5: Impacto cuerpo rígido desde 1m. Los protectores resisten.*

##### Ensayo 2 ( $H_{caída} = 2\text{ m}$ ; $\varnothing_{armadura} = 12\text{ mm}$ ; $h_{armadura} = 300\text{ mm}$ )

En el segundo ensayo realizado, aumentando al doble la carga dinámica aplicada, que en términos de energía cinética acumulada durante la caída supone un impacto de 2000 J, nuevamente se comprueba que las protecciones son capaces de resistir dicho nivel de impacto, ya que en ninguna de las cuatro protecciones afectadas, se ha detectado una perforación de las armaduras de acero sobre la parte superior de las piezas ni lateralmente. Observándose únicamente fisuras en la parte superior de las piezas justo en su zona de contacto con la esfera de impacto, resultando únicamente una afección superficial sobre la

pieza blanca de polipropileno, pero en ningún momento una penetración total de la pieza completa atravesando el refuerzo interior de policarbonato.

**Ensayo 3 ( $H_{caída} = 2 \text{ m}$ ;  $\varnothing_{armadura} = 16 \text{ mm}$ ;  $h_{armadura} = 300 \text{ mm}$ )**

Comportamiento similar al caso anterior, a pesar de que en este ensayo las armaduras empleadas son de diámetro 16mm y la superficie de contacto para resistir el mismo nivel de impacto es superior.

**Ensayo 4 ( $H_{caída} = 3 \text{ m}$ ;  $\varnothing_{armadura} = 12 \text{ mm}$ ;  $h_{armadura} = 100 \text{ mm}$ )**

A pesar del importante nivel de impacto aplicado, energía de caída de 3000 julios, con objeto de evaluar si las piezas plásticas objeto de ensayo, disponen de un factor de seguridad respecto a la máxima altura de caída que debería permitirse y que sería de 2m, nuevamente se ha comprobado que no se produce penetración total de las armaduras a través de las protecciones. Esta situación puede verse beneficiada, teniendo en cuenta que parte de la energía de impacto es absorbida por la propia deformación que sufren las armaduras de acero, ya que tienen una esbeltez considerable, debido a que se han previsto con una longitud efectiva de 30cm respecto a la base de hormigón, precisamente teniendo en cuenta este efecto.

**Ensayo 5 ( $H_{caída} = 3 \text{ m}$ ;  $\varnothing_{armadura} = 16 \text{ mm}$ ;  $h_{armadura} = 100 \text{ mm}$ )**

En este nuevo ensayo, sí que se produce penetración total de las armaduras de acero sobre las protecciones plásticas. La importante magnitud de impacto aplicado, se ve reflejado en el estado final de las propias armaduras de acero, como evidencian las imágenes incluidas en el reportaje fotográfico del informe.

**Ensayo 6 ( $H_{caída}=2'5 \text{ m}$ ;  $\varnothing_{armadura}=16 \text{ mm}$ ;  $h_{armadura}= 100 \text{ mm}$ )**

Para una altura de caída de 2'5 m, y para el diámetro de armadura  $\varnothing 16 \text{ mm}$ , las protecciones no han sido capaces de absorber el nivel de impacto aplicado, detectándose una penetración total de las armaduras a través de la protección, y roturas longitudinales totales de las protecciones.



## Ensayos de impacto mediante choque por cuerpo blando

### Ensayo 1 ( $H_{caída} = 4\text{ m}$ ; $\varnothing_{armadura} = 12\text{ mm}$ ; $h_{armadura} = 150\text{ mm}$ )

Para una energía cinética de impacto de 2000 J, que correspondería a la caída de una persona sobre las protecciones desde una altura aproximada de 2 m (valor límite a priori para estas protecciones) se detecta el siguiente comportamiento:

De las cuatro protecciones afectadas en el impacto, y teniendo en cuenta la dificultad de aplicación de la carga perfectamente centrada sobre las cuatro, son tres de ellas, a las que principalmente se les transmiten los esfuerzos dinámicos, comprobándose en todos los casos, que no existe penetración de las armaduras sobre la protección de termoplástico, pero sí que se produce la perforación de la lona superficial del saco de impacto, introduciéndose completamente una de las protecciones plásticas en el interior del saco esferocónico.

Desplazamiento relativo de la pieza blanca de polipropileno sobre la pieza roja de polietileno provocando esta situación un efecto mayor de punzonamiento sobre el cuerpo blando.

### Ensayo 2 ( $H_{caída} = 4\text{ m}$ ; $\varnothing_{armadura} = 16\text{ mm}$ ; $h_{armadura} = 150\text{ mm}$ )

Del mismo modo que en el caso anterior, pero en esta ocasión con armaduras de acero de diámetro nominal  $\varnothing 16\text{ mm}$ , se observa un comportamiento similar, sin que se produzca una perforación de los elementos de acero sobre las protecciones plásticas, pero sí nuevamente una penetración en el saco de impacto de dos de las cuatro protecciones plásticas, motivado por el nivel de impacto aplicado y por el desplazamiento relativo que sufren las piezas rojas de polietileno respecto a las blancas de polipropileno aumentando el efecto de punzonamiento, figura 4.6.





Figura 4.6: Impacto cuerpo blando desde 4m. Estado del protector después del impacto.

### **Ensayo 3 ( $H_{caída} = 2\text{ m}$ ; $\varnothing_{armadura} = 16\text{ mm}$ ; $h_{armadura} = 150\text{ mm}$ )**

En este caso para una altura de caída de 2 m del saco esferocónico de 50 kg, que correspondería a una caída de 1m para una masa de 100 kg, que podría ser una situación habitual de caída al mismo nivel en una obra, teniendo en cuenta que el centro de gravedad de una persona se sitúa aproximadamente a 1m respecto al nivel inferior. Se ha comprobado que todas las protecciones que han sufrido este nivel de impacto han resistido sin que se produzca una perforación de las armaduras de acero ni fisuras parciales, pero se ha vuelto a producir la penetración de una protección en su totalidad en el interior del saco de impacto.

### **Ensayo 4 ( $H_{caída} = 5\text{ m}$ ; $\varnothing_{armadura} = 16\text{ mm}$ ; $h_{armadura} = 150\text{ mm}$ )**

Por último, realizando un ensayo para una magnitud de energía cinética de caída de 2500 J, situación por encima del límite máximo ( $\leq 2\text{ m}$  de caída) previstos para estas protecciones, se observa el siguiente comportamiento estructural:

Penetración completa en el saco de impacto de dos de las cuatro piezas en la zona de influencia del impacto, quedando igual que en los casos anteriores, las protecciones plásticas incrustadas en el interior de la masa.

No perforación de las protecciones plásticas por las armaduras de acero, teniendo en cuenta, la capacidad de absorber esfuerzos dinámicos que le confiere el refuerzo interior de policarbonato, y que parte del impacto es absorbido por la propia deformabilidad que presenta el cuerpo blando.



#### 4.2.2- Resultados de ensayos de cizalladura

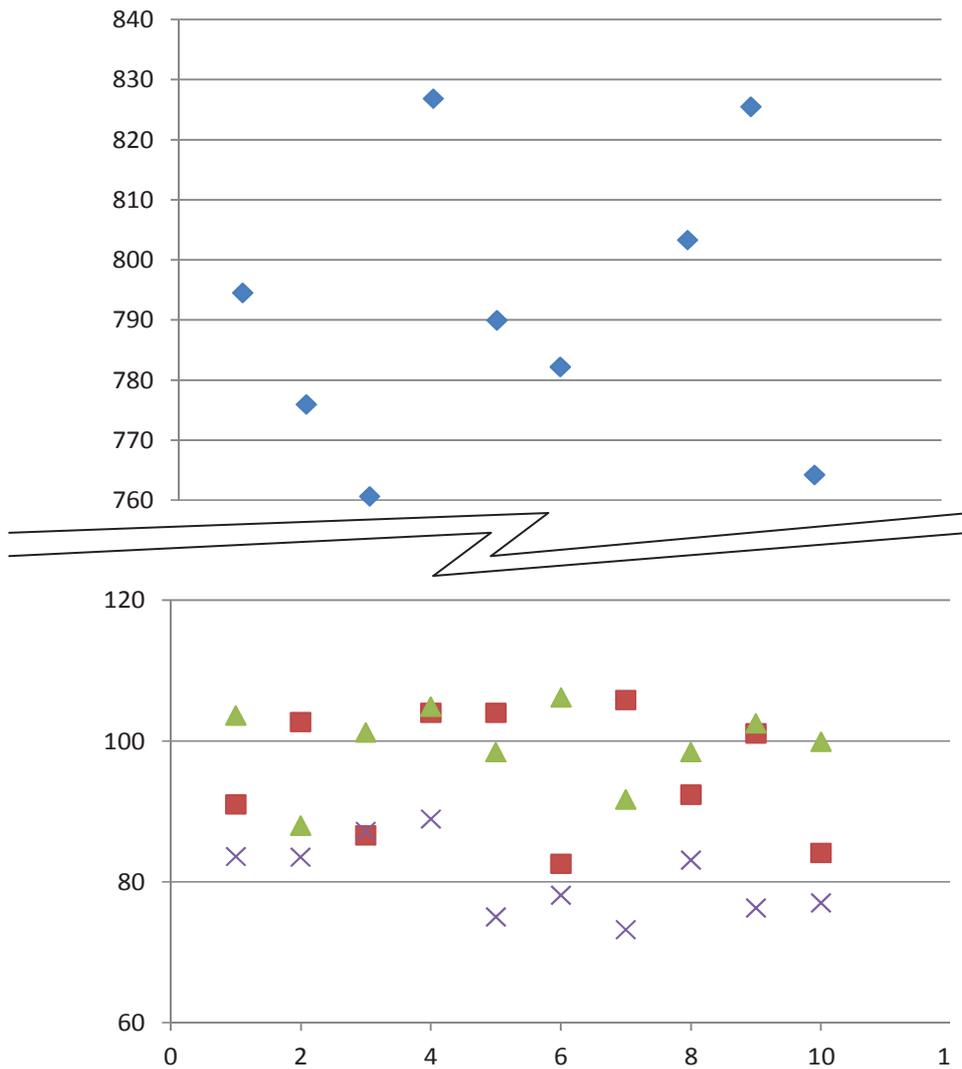
En laboratorio se obtienen los resultados de los ensayos realizados según el modelo indicado en el apartado 3.3.2, quedando resumidos en las tablas 4.19 y 4.21. Ensayos sobre probetas nuevas y ensayos sobre probetas expuestas a la intemperie durante 6 meses.

En la tabla 4.19 se recogen los valores de la resistencia alcanzada para los tres tipos de *seta* y *seta de proyecto*, en perfecto estado y sin ningún tipo de uso.

Tabla 4.19. Resultados ensayos cizalladura. Setas nuevas.

Nº muestra	Seta 1	Seta 2	Seta 3	Seta proyecto
	Carga máxima (kg)			
1	91'0	103'6	83'6	794'5
2	102'7	88'0	83'5	775'9
3	86'6	101'2	87'2	760'6
4	104'0	104'9	88'9	826'8
5	104'0	98,4	75'0	789'9
6	82'6	106'2	78'1	782'2
7	105'8	91'7	73'2	756'3
8	92'4	98'4	83'1	803'3
9	101'1	102'5	76'3	825'5
10	84'1	99'9	77'0	764'2

En la gráfica 4.15 se representan los valores de dichas roturas, donde se refleja la diferencia entre las que emplean un núcleo de policarbonato como refuerzo, frente al resto que obtienen resultados dentro del mismo rango. La gráfica se presenta con una escala partida para poder visualizarla adecuadamente, dada la variación en comparación con la *seta* reforzada.



Gráfica 4.15 (Resistencia kg). ■ seta 1, ▲ seta 2, X seta 3 y ◆ seta proyecto.

Para realizar un estudio estadístico de los valores obtenidos eliminar de cada uno de los modelos los valores de resistencia más alta y más baja. A partir de los valores restantes, calculamos los valores de resistencia media y la desviación:

- valor medio 
$$\bar{r} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n},$$

- desviación 
$$s_{\bar{r}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2}{n-1}}$$



- coeficiente de variación  $C_v = \frac{\bar{r}}{s_{\bar{r}}}$

En la tabla 4.20 se recogen los valores calculados a partir de los datos de la tabla 4.19, según la formulación anterior.

Tabla 4.20. Valor medio, desviación y coef. de variación. Setas nuevas.

	Seta 1	Seta 2	Seta 3	Seta proyecto
$\bar{r}$	95'74	100'08	80'48	787'1
$s_{\bar{r}}$	8'16	4'12	4'41	21'3
$C_v$	0'085	0'041	0'055	0'027

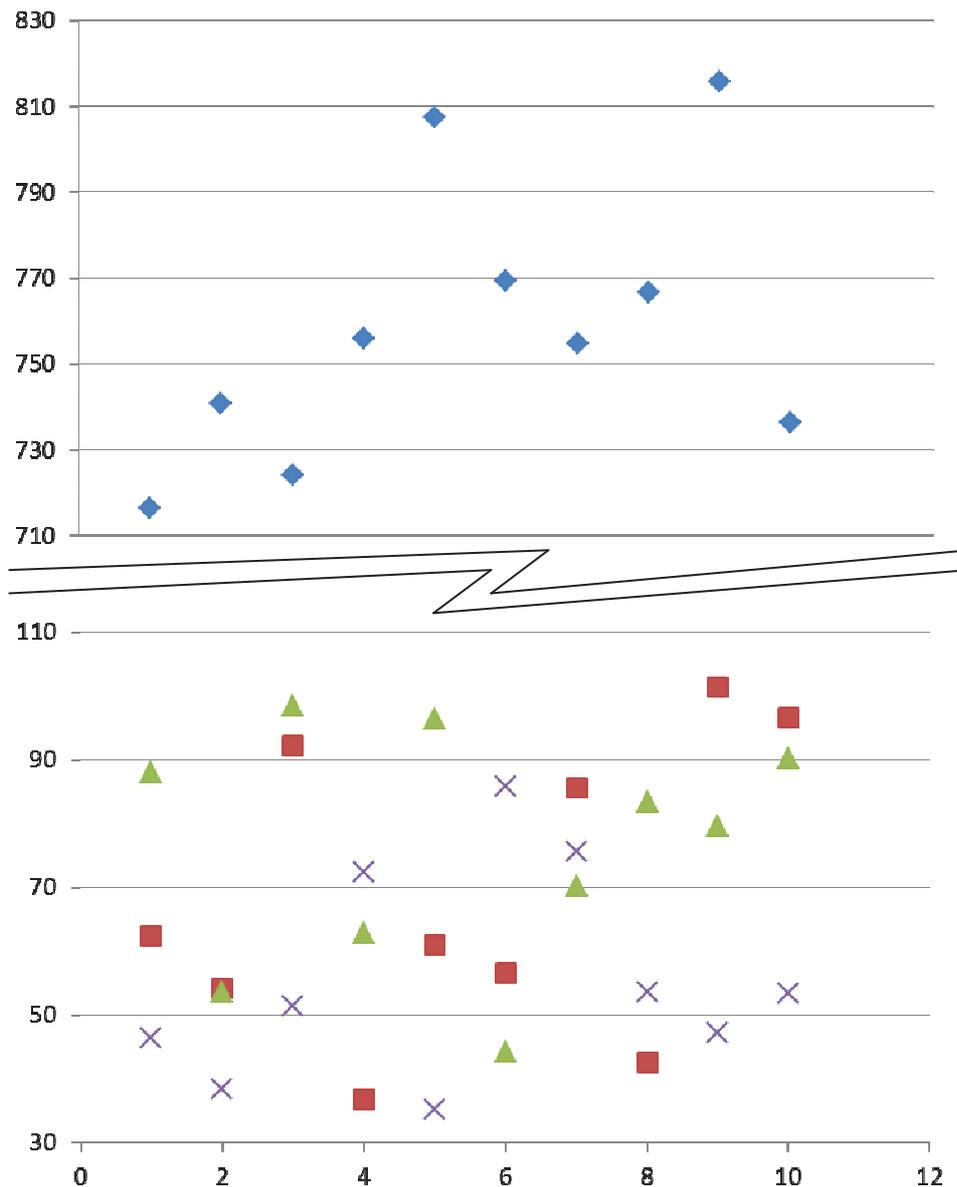
Los valores de la tabla 4.21 son los resultados de los ensayos realizados con muestras que han sido expuestas a la intemperie durante un periodo de 6 meses, y después en laboratorio han sido ensayadas de manera análoga.

Tabla 4.21. Resultados ensayos cizalladura. Setas 6 meses intemperie.

Nº muestra	Seta 1	Seta 2	Seta 3	Seta proyecto
	Carga máxima (kg)			
1	62'4	88'0	46'4	716'3
2	54'1	53'5	38'3	740'6
3	92'1	98'4	51'3	724'2
4	36'8	62'7	72'4	755'9
5	61'0	96'3	35'0	807'2
6	56'6	44'2	85'7	769'3
7	85'6	70'2	75'5	754'8
8	42'6	83'4	53'5	766'6
9	101'3	79'5	47'1	815'5
10	96'5	90'1	53'4	736'4

Igualmente estos valores se han representado gráficamente en la gráfica 4.16 para visualmente poder interpretar la variación de datos obtenida.





Gráfica 4.16 (Resistencia kg). ■ seta 1, ▲ seta 2, X seta 3 y ◆ seta proyecto.

Igualmente, se calculan los valores de la media, la desviación y el coeficiente de variación, con los resultados de la tabla 4.22:

Tabla 4.22. Valor medio, desviación y coef. de variación. Setas expuestas intemperie.

	Seta 1	Seta 2	Seta 3	Seta proyecto
$\bar{r}$	68'86	78'21	54'74	756'88
$s_{\bar{r}}$	16'83	14'80	12'85	25'46
$C_v$	0'244	0'189	0'235	0'034



En las imágenes de la figura 4.6, se muestran varios protectores después del ensayo de cizalladura descrito. En las imágenes se evidencia la deformación plástica que sufren antes de la rotura.



*Figura 4.6: Imágenes de setas después de la rotura.*

De ambos grupos de resultados podemos resumir:

- 1- Para las *setas* nuevas, los valores obtenidos de las identificadas como 1, 2 y 3, no alcanzan el valor de 115 kg, lo que pone en evidencia que sean capaces de soportar un impacto. En el caso de la *seta* con refuerzo alcanza valores muy superiores, lo que hace posible que sea capaz de soportar los impactos.
- 2- Para las *setas* expuestas a la intemperie, se detecta para los casos 1, 2 y 3 un descenso de la resistencia que indica que al menos es un problema que debería estudiarse con más detalle. Los resultados sin embargo tienen tal variación que sólo se puede afirmar que los efectos no han sido homogéneos. En el caso de la *seta* con refuerzo, al ser este interior se ha visto protegido, pudiendo concluir al menos que el comportamiento es mejor que las anteriores.

## 5- CONCLUSIONES

El objetivo del proyecto era comprobar el comportamiento que ofrecen los nuevos sistemas de protección frente a los actuales. Teniendo en cuenta los ensayos, podemos concluir que los actuales sistemas de protección formados por *setas* de polietileno no dan la garantía exigible por la ley, frente a los impactos. Sí podemos afirmar que la incorporación de un núcleo de policarbonato, acerca más esta solución a la esperada, quedando pendiente resolver el problema de la penetración en el cuerpo del conjunto barra-protector.

En cuanto a las simulaciones realizadas, la correspondencia comparadas con los ensayos de laboratorio, indican que en la actualidad se han convertido en una herramienta imprescindible para el estudio previo de soluciones, siendo capaces de identificar fallos en el diseño antes de pasar a la producción, con el consiguiente ahorro económico. Varias pruebas realizadas con diversos valores de los recogidos en las tablas de los materiales identifican que no estamos en valores que la elección de un material u otro dentro del rango que nos movemos, vaya a ser determinante para el resultado. Para un mayor rigor del proyecto habría sido necesario caracterizar experimentalmente de cada uno de los elementos.

Con los últimos resultados se ha evidenciado, que aun quedando fuera del alcance de este proyecto, el estudio de la degradación, es un tema muy importante al emplearse materiales que pueden sufrir una degradación considerable al estar expuestos a la intemperie.

Dentro de los avances que realiza la prevención en su lucha por evitar los accidentes laborales, y en especial los accidentes muy graves y mortales, podemos concluir que aún existen lagunas por resolver, como es el caso tratado en este proyecto.

En desarrollos futuros que culminen el estudio, se deben determinar aquellos requisitos exigibles a estos sistemas de protección y los usos para los cuales pueden ser destinados, apareciendo una normativa que establezca estos mínimos exigibles de manera que se garantice la seguridad de los trabajadores, no dando lugar a la actual situación en la que no existe una regulación que impida el uso de elementos sobre los cuales no exista una garantía de su comportamiento.



## 6- BIBLIOGRAFÍA

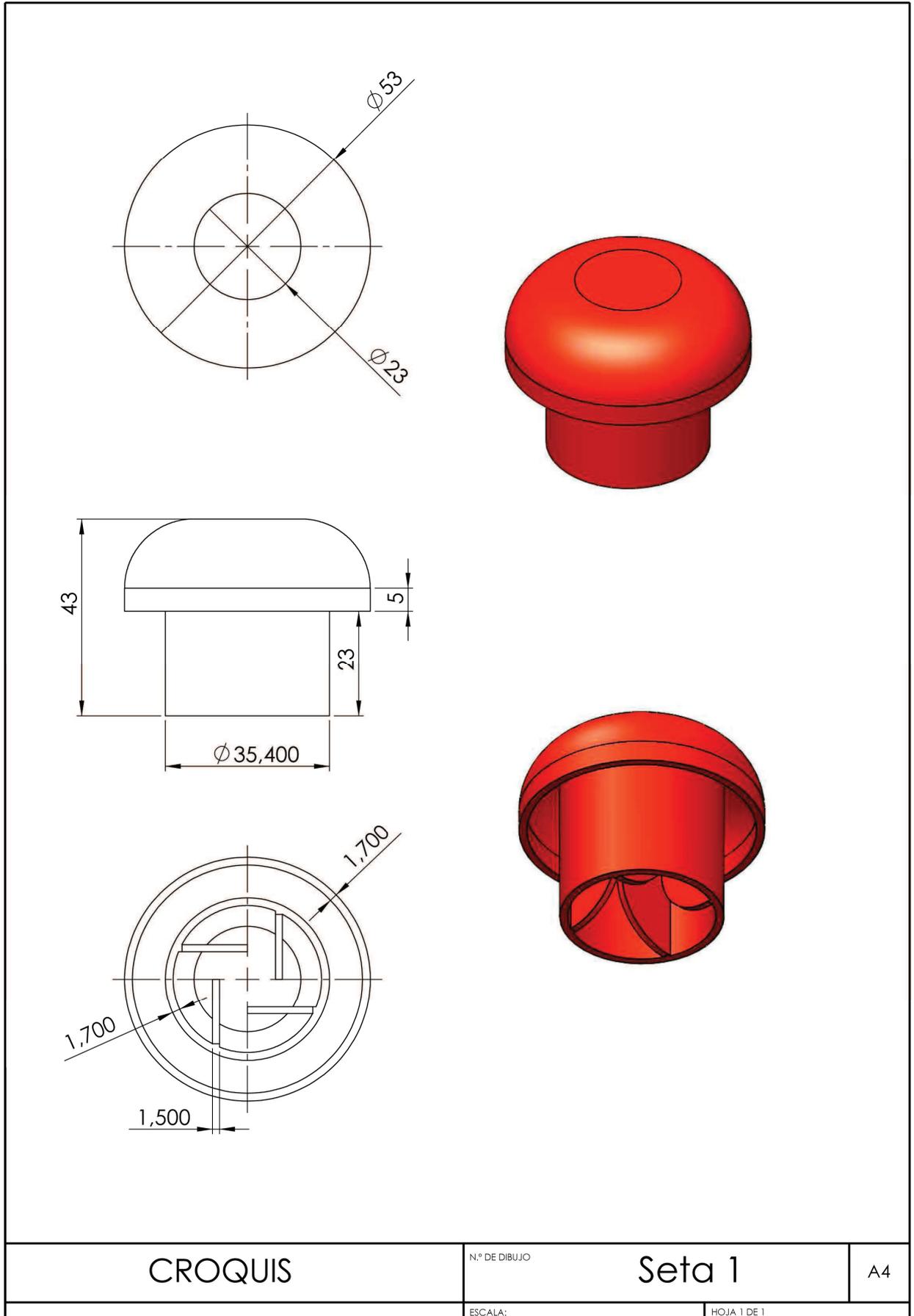
- [1] Engineering Plastics Material Selection. A design guide. Ed: Lanxes, Energizing Chemistry. Enero 2007
- [2] Fundamentos de manufactura moderna. Mikell P. Groover. Ed. Prentice Hall.
- [3] Catálogo Goodfellow, [www.goodfellow.com](http://www.goodfellow.com), marzo 2011
- [4] United States Department of Labor. Occupational Safety & Health Administration. [<http://www.osha.gov>]. Memorandum for Construction Coodinators. [[http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show\\_document?p\\_t\\_able=INTERPRETATIONS&p\\_id=22421](http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_t_able=INTERPRETATIONS&p_id=22421)].
- [5] CAL/OSHA Pocket guide for the construction industry ([www.cal-osha.com](http://www.cal-osha.com)). 12 de octubre de 2004.
- [6] Datos antropométricos de la población laboral española. Antonio Carmona Benjumea. CNMP Sevilla, INSHT.
- [7] “Teoría de la elasticidad”, Stephen P. Timoshenko, Goodier J.N. Ed. Urmo, 2ª Ed. 1975
- [8] “El método de los Elementos Finitos en el Análisis Estructural”, C. Martínez Arnaiz. Publicaciones ETSIA, 1998.
- [9] “Advanced Mechanics of Materials”, Richard J. Schmidt & Omar M. Sidebottom. John Wiley & Sons, Inc., 5ª Ed. 1993.
- [10] Ansys Explicit Dynamics Manual, 12.1. Ansys Inc.
- [11] Material properties for numerical simulations for human, ballistic soap and gelatin. D.S. Cronin. DRDC Valcartier, febrero 2010.
- [12] Informe Técnico AIDICO, IT090065.
- [13] Standard Test Method for Shear Strength of Plastics by Punch Tool. ASTM D 732-2. 10 de Abril 2002.



## **ANEXO 1.- CROQUIS DE LOS MODELOS ENSAYADOS**

A continuación se adjuntan croquis de las diversas modelizaciones realizadas de los modelos ensayados y empleados en la modelización FEA.





CROQUIS

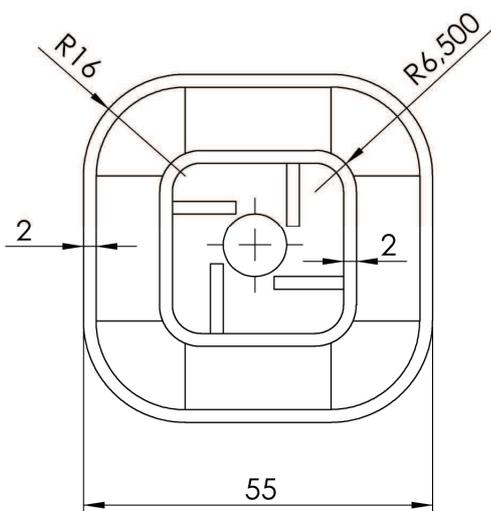
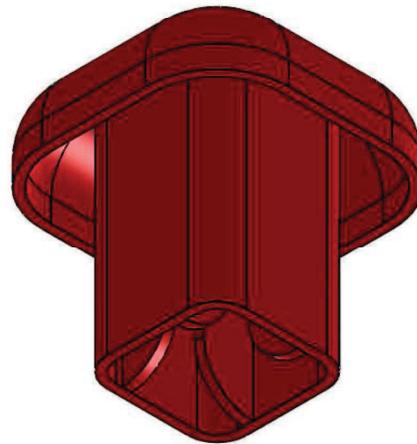
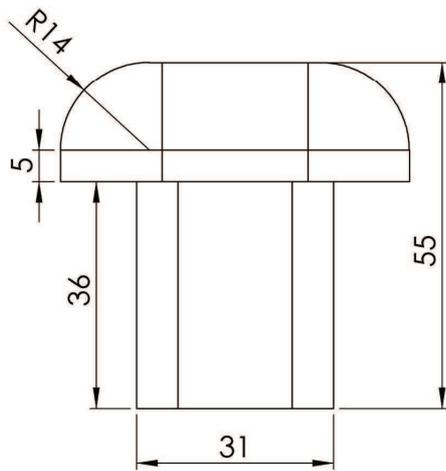
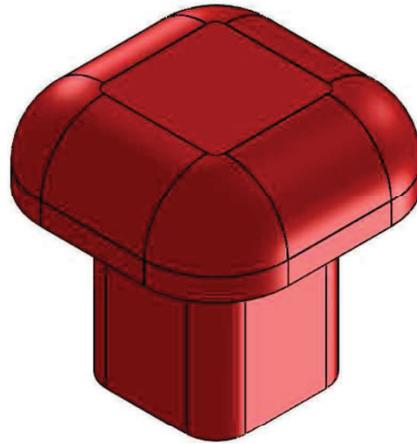
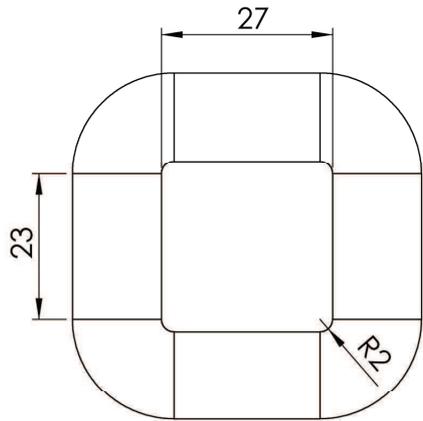
N.º DE DIBUJO

Seta 1

A4

ESCALA:

HOJA 1 DE 1



CROQUIS

N.º DE DIBUJO

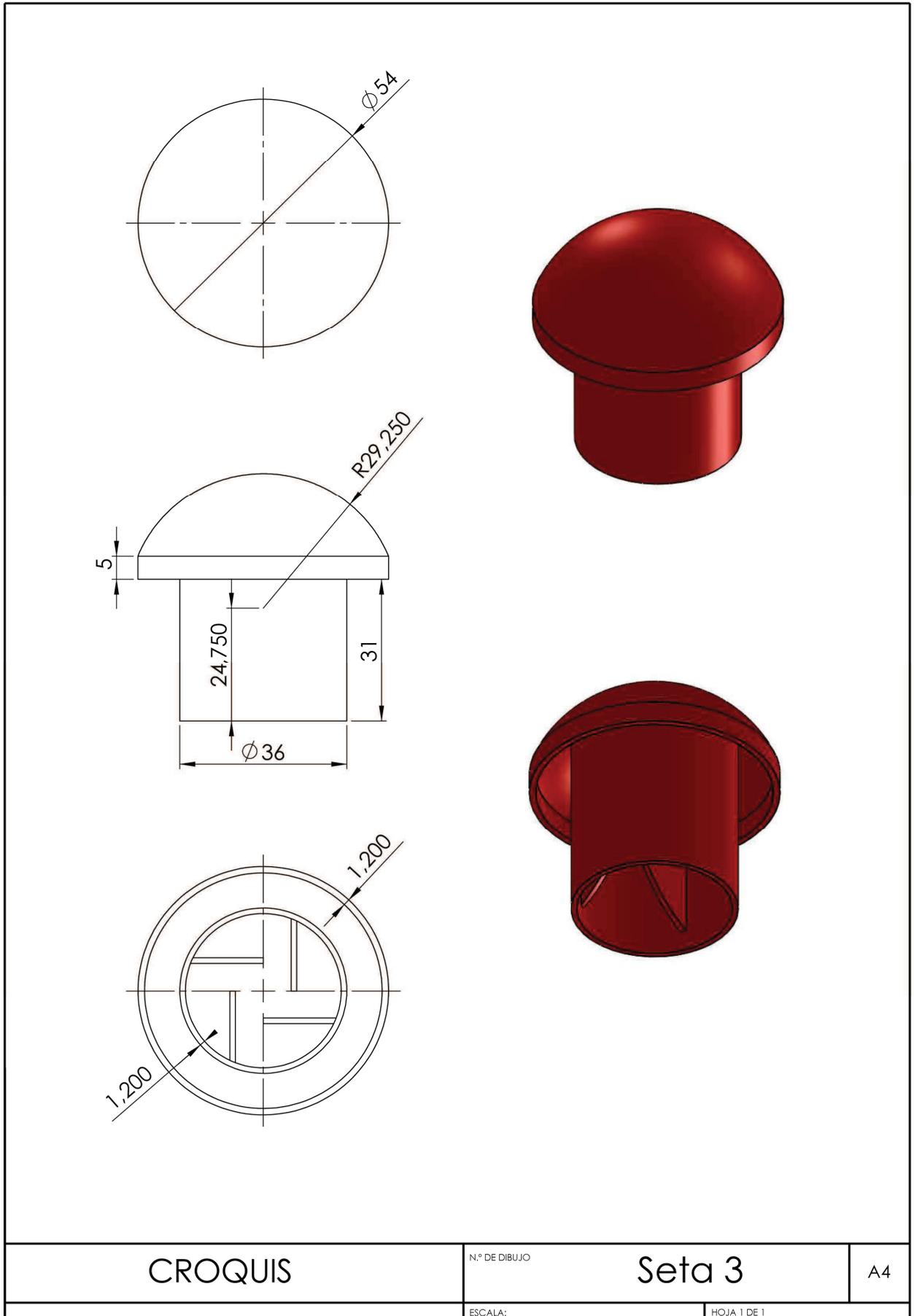
Seta 2

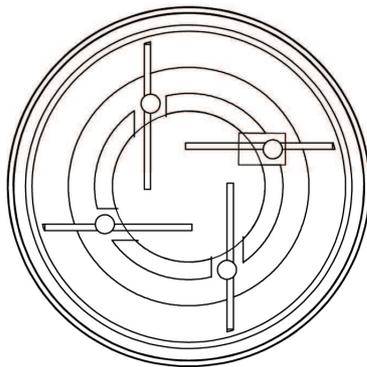
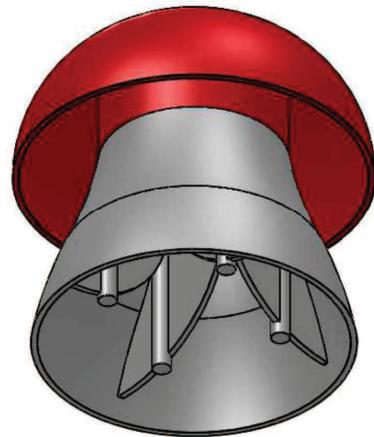
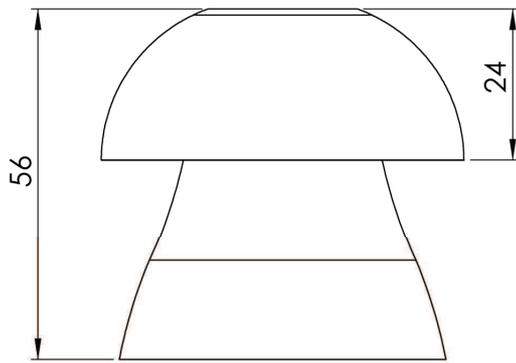
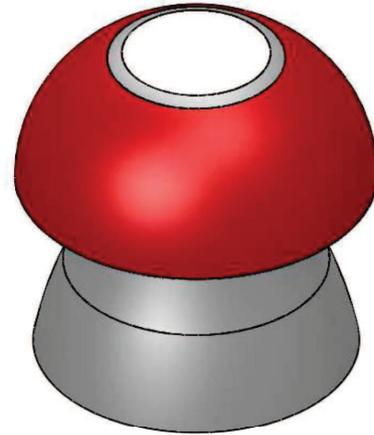
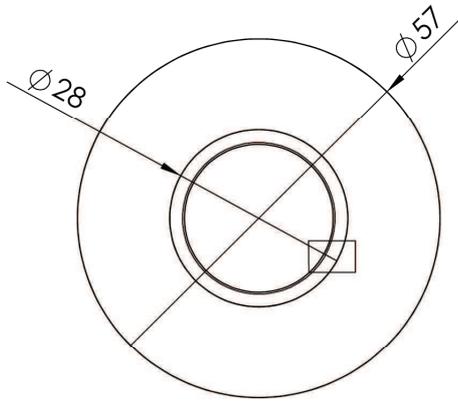
A4

ESCALA:

HOJA 1 DE 1







CROQUIS

N.º DE DIBUJO

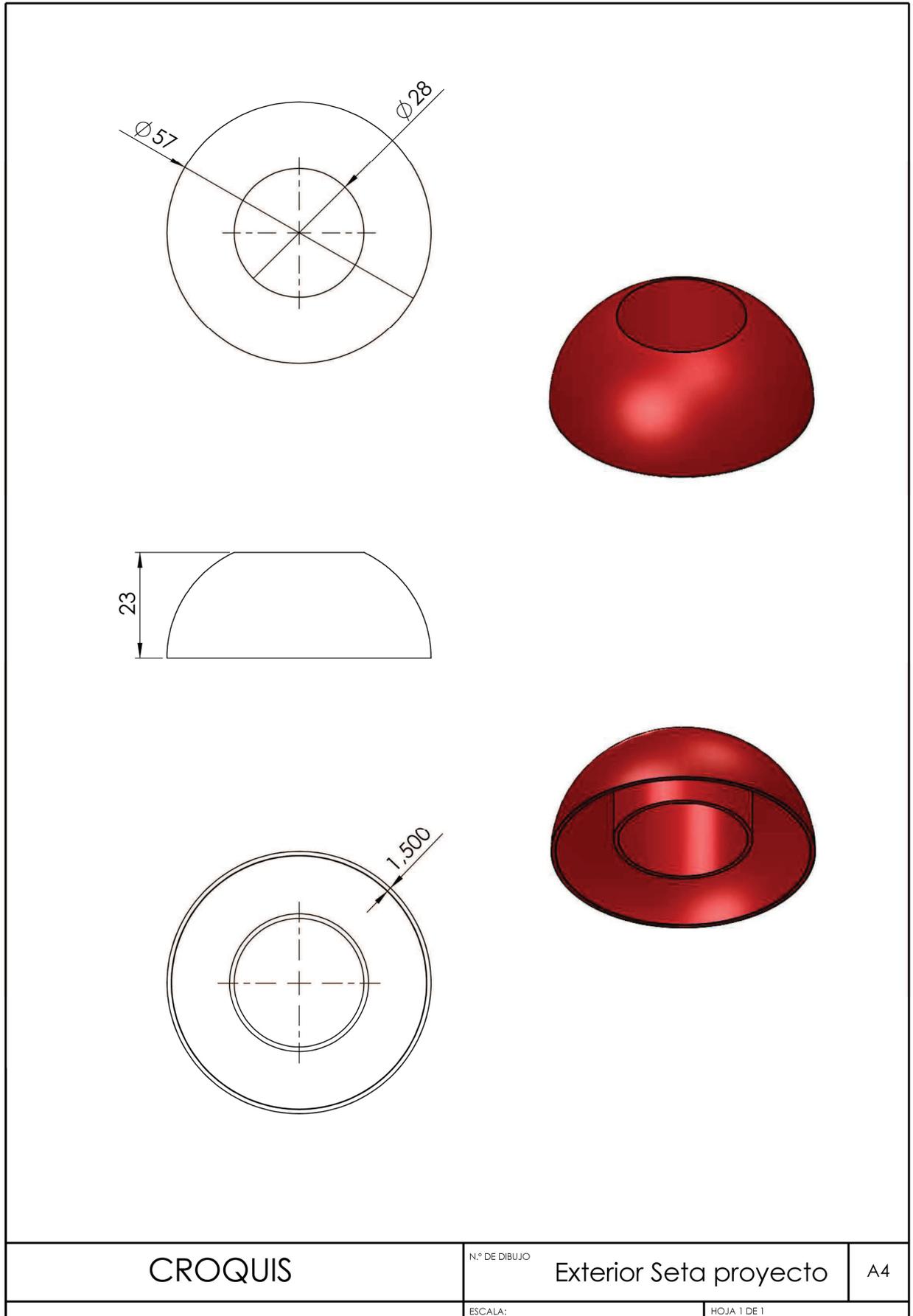
Seta proyecto

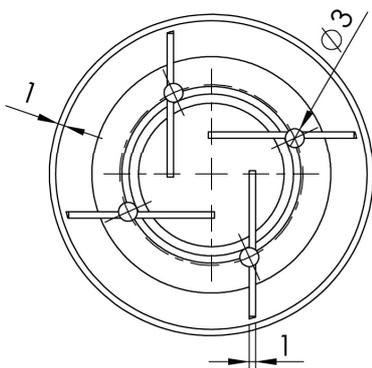
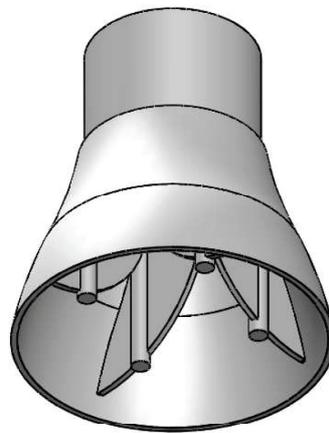
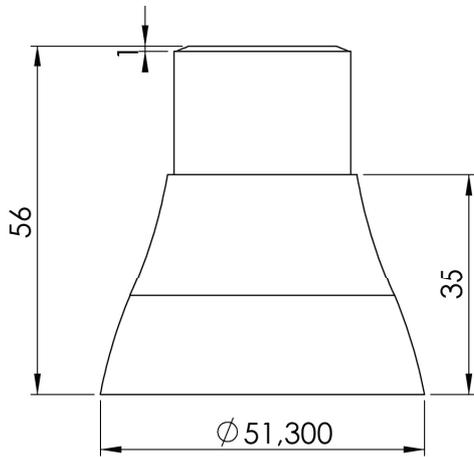
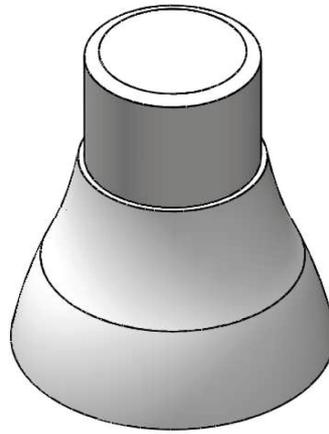
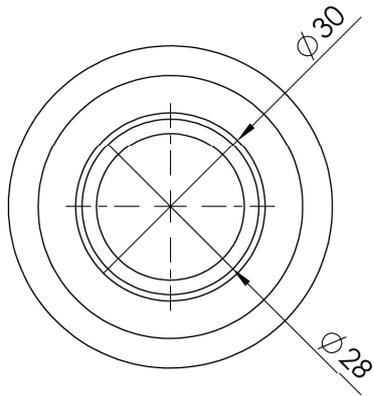
A4

ESCALA:

HOJA 1 DE 1







CROQUIS

N.º DE DIBUJO

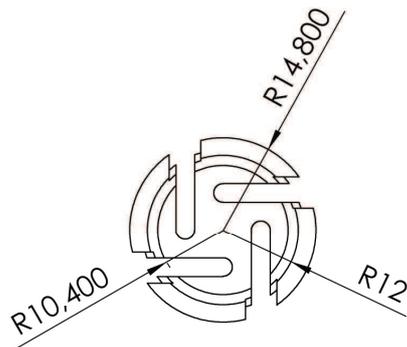
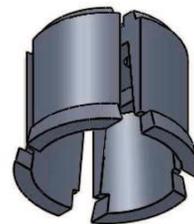
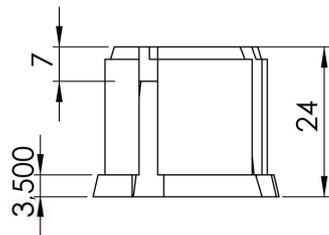
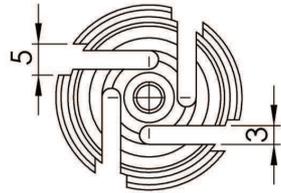
Interior Seta proyecto

A4

ESCALA:

HOJA 1 DE 1





CROQUIS

N.º DE DIBUJO

Núcleo Seta proyecto

A4

ESCALA:

HOJA 1 DE 1

## **ANEXO 2. – FICHAS DE CARÁCTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES**

Las características técnicas de los materiales empleados en las simulaciones se han obtenido de los datos de las fichas técnicas de los fabricantes del material base. Estas fichas técnicas se han completado con la base de datos de matweb, en la que se pueden encontrar, tanto los datos de las fichas técnicas de los fabricantes, como resúmenes de valores de los fabricantes cuyos datos poseen. En el caso de este proyecto han sido de gran utilidad los resúmenes de los fabricantes para un tipo de material, teniendo datos medios de la mayoría de las propiedades físicas, y así completando la falta de algunos datos que no son aportados por las fichas técnicas de algunos fabricantes.



## Poliétileno de alta densidad IE 59 U3

### Descripción:

La resina IE-59 U3 es un polietileno de alta densidad, homopolimero, producida por el proceso de solución, para moldeo por inyección. Confiere a los productos alta resistencia al impacto y buena rigidez, y asocia buena capacidad de procesamiento con resistencia al pandeo. Contiene aditivo antioxidante y estabilizador de luz.

### Aplicaciones:

Moldeo por inyección de cajas para pescado y partes técnicas de grandes dimensiones, que requieran alta resistencia mecánica y permanezcan expuestas a la intemperie. Indicada también para la producción de baldes industriales, contenedores de residuos, cajas de botellas, cajas en general y cascos protectores.

### Condiciones de procesamiento:

El polietileno de alta densidad IE-59 U3 ha sido desarrollada para ser inyectada en condiciones similares a las de los otros polietilenos de alta densidad con la misma fluidez.  
Rango de temperatura recomendado: 160 a 230 °C.

### Propiedades de control:

	Método ASTM	Unidades	Valores
Índice de fluidez (190 °C/2,16 kg)	D-1238	g/10 min	5,0
Densidad	D-792	g/cm <sup>3</sup>	0,959
Distribución del peso molecular	Braskem (1)	-	Estrecha
Longitud de flujo	Braskem (1)	cm	18

### Propiedades típicas:

Propiedades de referencia de la placa<sup>a</sup>

	Método ASTM	Unidades	Valores
Resistencia a la tracción de escurrimiento	D-638	MPa	28
Tensión de rotura	D-638	MPa	26
Módulo de flexión	D-790	MPa	1200
Dureza	D-2240	Shore D	57
Resistencia al impacto Izod	D-256	J/m	85
Resistencia a la rotura bajo tensión ambiental <sup>b</sup>	D-1693-B	h/50%F	3
Temperatura de deflexión térmica (0,45 MPa)	D-648	°C	74
Temperatura de reblandecimiento Vicat	D-1525	°C	129
Elongación máxima	D-882	%	>1000
Elongación de escurrimiento	D-882	%	12

(a) Placa moldeada por compresión por el método ASTM D-1928, procedimiento C.

(b) Condiciones: 10% de Igepal, placa de 2 mm con entalladura de 0,3 mm, a 50 °C.  
(DM = dirección de la extrusión y DT = dirección transversal a la extrusión).

(1) Método Braskem - Disponible en la Gerencia de Desarrollo y Asistencia Técnica



**Polipropileno H 202HC**
**Subfamilia:**

Homopolímero

**Descripción:**

El H 202HC ES un homopolímero nucleado con un índice de fluidez especialmente diseñado para aplicaciones que necesitan altos niveles de rigidez y tenacidad así como una boa procesabilidad. Este producto exhibe una excelente resistencia química y propiedades de barrera.

**Aplicaciones:**

Muebles de jardín; electrodomésticos; compuestos; piezas inyectadas de alta rigidez.

**Proceso:**

Moldeo por inyección

**Propiedades de control:**

	Método ASTM	Unidad	Valores
Índice de Fluidez (230°C/2,16 kg)	D-1238-L	g/10 min	23

**Propiedades típicas<sup>a)</sup>:**

	Método ASTM	Unidad	Valores
Densidad	D-792A	g/cm <sup>3</sup>	0,905
Módulo de flexión, secante al 1%	D-790	MPa	2100
Resistencia a la tracción en el punto de fluencia	D-638	MPa	43
Elongación en el punto de fluencia	D-638	%	6
Dureza Rockwell (Escala R)	D-785-A	Escala R	110
Resistencia al impacto Izod a 23 °C	D-256-A	J/m	20
Temperatura de deflexión térmica a 0,455 MPa	D 648	°C	133
Temperatura de deflexión térmica a 1,820 MPa	D 648	°C	72
Temperatura de ablandamiento Vicat a 10 N	D 1525	°C	159

a) Pruebas en muestra moldeada por inyección según la norma ASTM D-4103.

**Observaciones Finales:**

1. Este resina cumple la regulación para polímeros de dietilas del capítulo 177.1520 del CFR 21 de la Food and Drug Administration (FDA), vigente a la fecha de publicación de esta especificación. Los aditivos usados están aprobados por la regulación correspondiente de la FDA.
2. La información de este documento se suministra de buena fe e indica valores típicos obtenidos en nuestros laboratorios y no debe ser considerada como absoluta ni constituye ninguna garantía. Solo las propiedades y valores que constan en el certificado de calidad constituyen la garantía del producto.
3. En algunas aplicaciones, Braskem ha desarrollado resinas a medida para cumplir requisitos específicos.
4. En caso de dudas sobre el uso o para discutir otras aplicaciones, contactar al área de servicios técnicos de Braskem.
5. Para obtener información acerca de seguridad, manipulación, protección individual, primeros auxilios y eliminación de residuos, consultar la Ficha de datos de seguridad de productos químicos (FDS/MSDS), Registro CAS n.º: 9003-07-0.
6. Los valores que constan en este documento pueden cambiar sin previa comunicación de Braskem.
7. Braskem no recomienda el uso de este producto para la fabricación de envases, jeringas o cualquier otro tipo de producto usado para almacenar o estar en contacto con soluciones parenterales, o que tengan contacto con el interior del cuerpo humano.





## Lexan\* Resin EXL1162T

Lexan\* EXL1162T polycarbonate (PC) siloxane copolymer resin is a transparent injection molding (IM) grade with extra release properties. This resin offers good low temperature (-20 C) ductility in combination with high flow characteristics and excellent processability with opportunities for shorter IM cycle times compared to standard PC resins. Lexan EXL1162T resin is a general purpose product available in transparent and opaque colors and may be an excellent candidate for a broad range of applications.

TYPICAL PROPERTIES <sup>1</sup>	TYPICAL VALUE	Unit	Standard
<b>MECHANICAL</b>			
Tensile Stress, yld, Type I, 50 mm/min	58	MPa	ASTM D 638
Tensile Stress, brk, Type I, 50 mm/min	57	MPa	ASTM D 638
Tensile Strain, yld, Type I, 50 mm/min	5.7	%	ASTM D 638
Tensile Strain, brk, Type I, 50 mm/min	117.9	%	ASTM D 638
Tensile Modulus, 50 mm/min	2260	MPa	ASTM D 638
Flexural Stress, yld, 1.3 mm/min, 50 mm span	94	MPa	ASTM D 790
Flexural Modulus, 1.3 mm/min, 50 mm span	2240	MPa	ASTM D 790
Tensile Stress, yield, 50 mm/min	57	MPa	ISO 527
Tensile Stress, break, 50 mm/min	56	MPa	ISO 527
Tensile Strain, yield, 50 mm/min	5.4	%	ISO 527
Tensile Strain, break, 50 mm/min	119.4	%	ISO 527
Tensile Modulus, 1 mm/min	2340	MPa	ISO 527
Flexural Stress, yield, 2 mm/min	89	MPa	ISO 178
Flexural Modulus, 2 mm/min	2140	MPa	ISO 178
Hardness, Rockwell L	89	-	ISO 2039-2
<b>IMPACT</b>			
Izod Impact, notched, 23°C	736	J/m	ASTM D 256
Izod Impact, notched, -30°C	618	J/m	ASTM D 256
Instrumented Impact Total Energy, 23°C	74	J	ASTM D 3763
Izod Impact, unnotched 80*10*3 +23°C	NB	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/1U
Izod Impact, unnotched 80*10*3 -30°C	NB	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/1U
Izod Impact, notched 80*10*3 +23°C	55	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/1A

(1) Typical values only. Variations within normal tolerances are possible for various colors. All values are measured after at least 48 hours storage at 23°C/50% relative humidity. All properties, except the melt volume and melt flow rates, are measured on injection molded samples. All samples tested under ISO test standards are prepared according to ISO 294.

(2) Only typical data for selection purposes. Not to be used for part or tool design.

(3) This rating is not intended to reflect hazards presented by this or any other material under actual fire conditions.

(4) Internal measurements according to UL standards.

(5) Measurements made from laboratory test coupon. Actual shrinkage may vary outside of range due to differences in processing conditions, equipment, part geometry and tool design. It is recommended that mold shrinkage studies be performed with surrogate or legacy tooling prior to cutting tools for new molded article.

Source GMD, last updated:

PLEASE CONTACT YOUR LOCAL SALES OFFICE FOR AVAILABILITY IN YOUR AREA.

DISCLAIMER: THE MATERIALS, PRODUCTS AND SERVICES OF SABIC INNOVATIVE PLASTICS HOLDING BV, ITS SUBSIDIARIES AND AFFILIATES ("SELLER"), ARE SOLD SUBJECT TO SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, WHICH CAN BE FOUND AT <http://www.sabic-ip.com> AND ARE AVAILABLE UPON REQUEST. ALTHOUGH ANY INFORMATION OR RECOMMENDATION CONTAINED HEREIN IS GIVEN IN GOOD FAITH, SELLER MAKES NO WARRANTY OR GUARANTEE, EXPRESS OR IMPLIED, (i) THAT THE RESULTS DESCRIBED HEREIN WILL BE OBTAINED UNDER END-USE CONDITIONS, OR (ii) AS TO THE EFFECTIVENESS OR SAFETY OF ANY DESIGN INCORPORATING SELLER'S PRODUCTS, SERVICES OR RECOMMENDATIONS, EXCEPT AS PROVIDED IN SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE. SELLER SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR ANY LOSS RESULTING FROM ANY USE OF ITS PRODUCTS OR SERVICES DESCRIBED HEREIN. Each user is responsible for making its own determination as to the suitability of Seller's products, services or recommendations for the user's particular use through appropriate end-use testing and analysis. Nothing in any document or oral statement shall be deemed to alter or waive any provision of Seller's Standard Conditions of Sale or this Disclaimer, unless it is specifically agreed to in a writing signed by Seller. No statement by Seller concerning a possible use of any product, service or design is intended, or should be construed, to grant any license under any patent or other intellectual property right of Seller or as a recommendation for the use of such product, service or design in a manner that infringes any patent or other intellectual property right. SABIC Innovative Plastics is a trademark of SABIC Holding Europe B.V.

\* Lexan is a trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV.

© 2012 SABIC Innovative Plastics Holding BV. All rights reserved.



## Lexan\* Resin EXL1162T

TYPICAL PROPERTIES <sup>1</sup>	TYPICAL VALUE	Unit	Standard
<b>IMPACT</b>			
Izod Impact, notched 80*10*3 -30°C	40	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/1A
Charpy 23°C, V-notch Edgew 80*10*3 sp=62mm	65	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA
Charpy -30°C, V-notch Edgew 80*10*3 sp=62mm	45	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eA
Charpy 23°C, Unnotch Edgew 80*10*3 sp=62mm	NB	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eU
Charpy -30°C, Unnotch Edgew 80*10*3 sp=62mm	NB	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 179/1eU
<b>THERMAL</b>			
Vicat Softening Temp, Rate A/50	138	°C	ASTM D 1525
HDT, 1.82 MPa, 3.2mm, unannealed	121	°C	ASTM D 648
CTE, -40°C to 95°C, flow	7.48E-05	1/°C	ASTM E 831
CTE, -40°C to 95°C, xflow	7.64E-05	1/°C	ASTM E 831
CTE, 23°C to 80°C, flow	7.48E-05	1/°C	ISO 11359-2
CTE, 23°C to 80°C, xflow	7.64E-05	1/°C	ISO 11359-2
Ball Pressure Test, 125°C +/- 2°C	pass	-	IEC 60695-10-2
Vicat Softening Temp, Rate B/50	138	°C	ISO 306
Vicat Softening Temp, Rate B/120	139	°C	ISO 306
HDT/Af, 1.8 MPa Flatw 80*10*4 sp=64mm	116	°C	ISO 75/Af
Relative Temp Index, Elec	130	°C	UL 746B
Relative Temp Index, Mech w/o impact	130	°C	UL 746B
<b>PHYSICAL</b>			
Specific Gravity	1.19	-	ASTM D 792
Mold Shrinkage, flow, 3.2 mm (5)	0.4 - 0.8	%	SABIC Method
Mold Shrinkage, xflow, 3.2 mm (5)	0.4 - 0.8	%	SABIC Method
Melt Flow Rate, 300°C/1.2 kgf	20	g/10 min	ASTM D 1238
Density	1.19	g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
Water Absorption, (23°C/sat)	0.12	%	ISO 62

(1) Typical values only. Variations within normal tolerances are possible for various colors. All values are measured after at least 48 hours storage at 23°C/50% relative humidity. All properties, except the melt volume and melt flow rates, are measured on injection molded samples. All samples tested under ISO test standards are prepared according to ISO 294.

(2) Only typical data for selection purposes. Not to be used for part or tool design.

(3) This rating is not intended to reflect hazards presented by this or any other material under actual fire conditions.

(4) Internal measurements according to UL standards.

(5) Measurements made from laboratory test coupon. Actual shrinkage may vary outside of range due to differences in processing conditions, equipment, part geometry and tool design. It is recommended that mold shrinkage studies be performed with surrogate or legacy tooling prior to cutting tools for new molded article.

Source GMD, last updated:

PLEASE CONTACT YOUR LOCAL SALES OFFICE FOR AVAILABILITY IN YOUR AREA.

DISCLAIMER: THE MATERIALS, PRODUCTS AND SERVICES OF SABIC INNOVATIVE PLASTICS HOLDING BV, ITS SUBSIDIARIES AND AFFILIATES ("SELLER"), ARE SOLD SUBJECT TO SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, WHICH CAN BE FOUND AT <http://www.sabic-ip.com> AND ARE AVAILABLE UPON REQUEST. ALTHOUGH ANY INFORMATION OR RECOMMENDATION CONTAINED HEREIN IS GIVEN IN GOOD FAITH, SELLER MAKES NO WARRANTY OR GUARANTEE, EXPRESS OR IMPLIED: (i) THAT THE RESULTS DESCRIBED HEREIN WILL BE OBTAINED UNDER END-USE CONDITIONS, OR (ii) AS TO THE EFFECTIVENESS OR SAFETY OF ANY DESIGN INCORPORATING SELLER'S PRODUCTS, SERVICES OR RECOMMENDATIONS. EXCEPT AS PROVIDED IN SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, SELLER SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR ANY LOSS RESULTING FROM ANY USE OF ITS PRODUCTS OR SERVICES DESCRIBED HEREIN. Each user is responsible for making its own determination as to the suitability of Seller's products, services or recommendations for the user's particular use through appropriate end-use testing and analysis. Nothing in any document or oral statement shall be deemed to alter or waive any provision of Seller's Standard Conditions of Sale or this Disclaimer unless it is specifically agreed to in a writing signed by Seller. No statement by Seller concerning a possible use of any product, service or design is intended, or should be construed, to grant any license under any patent or other intellectual property right of Seller or as a recommendation for the use of such product, service or design in a manner that infringes any patent or other intellectual property right. SABIC Innovative Plastics is a trademark of SABIC Holding Europe B.V.

\* Lexan is a trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV

©2012 SABIC Innovative Plastics Holding BV All rights reserved





### Lexan\* Resin EXL1162T

TYPICAL PROPERTIES <sup>1</sup>	TYPICAL VALUE	Unit	Standard
<b>PHYSICAL</b>			
Moisture Absorption (23°C / 50% RH)	0.09	%	ISO 62
Melt Volume Rate, MVR at 300°C/1.2 kg	19	cm <sup>3</sup> /10 min	ISO 1133
<b>OPTICAL</b>			
Light Transmission, 2.54 mm	82	%	ASTM D 1003
Haze, 2.54 mm	3	%	ASTM D 1003
<b>ELECTRICAL</b>			
Volume Resistivity	>1.E+15	Ohm-cm	ASTM D 257
Surface Resistivity	>1.E+15	Ohm	ASTM D 257
<b>FLAME CHARACTERISTICS</b>			
UL Recognized, 94HB Flame Class Rating (3)	1.5	mm	UL 94
Glow Wire Flammability Index 960°C, passes at	3	mm	IEC 60695-2-12
Glow Wire Ignitability Temperature, 0.8 mm	850	°C	IEC 60695-2-13
Glow Wire Ignitability Temperature, 3.0 mm	850	°C	IEC 60695-2-13

(1) Typical values only. Variations within normal tolerances are possible for various colors. All values are measured after at least 48 hours storage at 23°C/50% relative humidity. All properties, except the melt volume and melt flow rates, are measured on injection molded samples. All samples tested under ISO test standards are prepared according to ISO 294.

(2) Only typical data for selection purposes. Not to be used for part or tool design.

(3) This rating is not intended to reflect hazards presented by this or any other material under actual fire conditions.

(4) Internal measurements according to UL standards.

(5) Measurements made from laboratory test coupon. Actual shrinkage may vary outside of range due to differences in processing conditions, equipment, part geometry and tool design. It is recommended that mold shrinkage studies be performed with surrogate or legacy tooling prior to cutting tools for new molded article.

Source GMD, last updated:

PLEASE CONTACT YOUR LOCAL SALES OFFICE FOR AVAILABILITY IN YOUR AREA.

DISCLAIMER: THE MATERIALS, PRODUCTS AND SERVICES OF SABIC INNOVATIVE PLASTICS HOLDING BV, ITS SUBSIDIARIES AND AFFILIATES ("SELLER"), ARE SOLD SUBJECT TO SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, WHICH CAN BE FOUND AT <http://www.sabic-ip.com> AND ARE AVAILABLE UPON REQUEST. ALTHOUGH ANY INFORMATION OR RECOMMENDATION CONTAINED HEREIN IS GIVEN IN GOOD FAITH, SELLER MAKES NO WARRANTY OR GUARANTEE, EXPRESS OR IMPLIED, (i) THAT THE RESULTS DESCRIBED HEREIN WILL BE OBTAINED UNDER END-USE CONDITIONS, OR (ii) AS TO THE EFFECTIVENESS OR SAFETY OF ANY DESIGN INCORPORATING SELLER'S PRODUCTS, SERVICES OR RECOMMENDATIONS, EXCEPT AS PROVIDED IN SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE. SELLER SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR ANY LOSS RESULTING FROM ANY USE OF ITS PRODUCTS OR SERVICES DESCRIBED HEREIN. Each user is responsible for making its own determination as to the suitability of Seller's products, services or recommendations for the user's particular use through appropriate end-use testing and analysis. Nothing in any document or oral statement shall be deemed to alter or waive any provision of Seller's Standard Conditions of Sale or this Disclaimer unless it is specifically agreed to in a writing signed by Seller. No statement by Seller concerning a possible use of any product, service or design is intended, or should be construed, to grant any license under any patent or other intellectual property right of Seller or as a recommendation for the use of such product, service or design in a manner that infringes any patent or other intellectual property right. SABIC Innovative Plastics is a trademark of SABIC Holding Europe B.V.

\* Lexan is a trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV

©2012 SABIC Innovative Plastics Holding BV. All rights reserved



## Lexan\* Resin EXL1162T

PROCESSING PARAMETERS	TYPICAL VALUE	Unit
<b>Injection Molding</b>		
Drying Temperature	120	°C
Drying Time	3 - 4	hrs
Drying Time (Cumulative)	48	hrs
Maximum Moisture Content	0.02	%
Melt Temperature	295 - 315	°C
Nozzle Temperature	290 - 310	°C
Front - Zone 3 Temperature	295 - 315	°C
Middle - Zone 2 Temperature	280 - 305	°C
Rear - Zone 1 Temperature	215 - 295	°C
Mold Temperature	70 - 95	°C
Back Pressure	0.3 - 0.7	MPa
Screw Speed	40 - 70	rpm
Shot to Cylinder Size	40 - 60	%
Vent Depth	0.025 - 0.076	mm

• NOTE: Back Pressure, Screw Speed, Shot to Cylinder Size and Vent Depth are only mentioned as general guidelines. These may not apply or need adjustment in specific situations such as low shot sizes, thin wall molding and gas-assist molding.

(1) Typical values only. Variations within normal tolerances are possible for various colors. All values are measured after at least 48 hours storage at 23°C/50% relative humidity. All properties, except the melt volume and melt flow rates, are measured on injection molded samples. All samples tested under ISO test standards are prepared according to ISO 294.

(2) Only typical data for selection purposes. Not to be used for part or tool design.

(3) This rating is not intended to reflect hazards presented by this or any other material under actual fire conditions.

(4) Internal measurements according to UL standards.

(5) Measurements made from laboratory test coupon. Actual shrinkage may vary outside of range due to differences in processing conditions, equipment, part geometry and tool design. It is recommended that mold shrinkage studies be performed with surrogate or legacy tooling prior to cutting tools for new molded article.

Source GMD, last updated:

PLEASE CONTACT YOUR LOCAL SALES OFFICE FOR AVAILABILITY IN YOUR AREA.

DISCLAIMER: THE MATERIALS, PRODUCTS AND SERVICES OF SABIC INNOVATIVE PLASTICS HOLDING BV, ITS SUBSIDIARIES AND AFFILIATES ("SELLER"), ARE SOLD SUBJECT TO SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, WHICH CAN BE FOUND AT <http://www.sabic-ip.com> AND ARE AVAILABLE UPON REQUEST. ALTHOUGH ANY INFORMATION OR RECOMMENDATION CONTAINED HEREIN IS GIVEN IN GOOD FAITH, SELLER MAKES NO WARRANTY OR GUARANTEE, EXPRESS OR IMPLIED, (i) THAT THE RESULTS DESCRIBED HEREIN WILL BE OBTAINED UNDER END-USE CONDITIONS, OR (ii) AS TO THE EFFECTIVENESS OR SAFETY OF ANY DESIGN INCORPORATING SELLER'S PRODUCTS, SERVICES OR RECOMMENDATIONS. EXCEPT AS PROVIDED IN SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, SELLER SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR ANY LOSS RESULTING FROM ANY USE OF ITS PRODUCTS OR SERVICES DESCRIBED HEREIN. Each user is responsible for making its own determination as to the suitability of Seller's products, services or recommendations for the user's particular use through appropriate end-use testing and analysis. Nothing in any document or oral statement shall be deemed to alter or waive any provision of Seller's Standard Conditions of Sale or this Disclaimer unless it is specifically agreed to in a writing signed. Seller. No statement Seller concerning a possible use of any product, service or design is intended, or should be construed, to grant any license under any patent or other intellectual property right of Seller or as a recommendation for the use of such product, service or design in a manner that infringes any patent or other intellectual property right. SABIC Innovative Plastics is a trademark of SABIC Holding Europe B.V.

\* Lexan is a trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV.

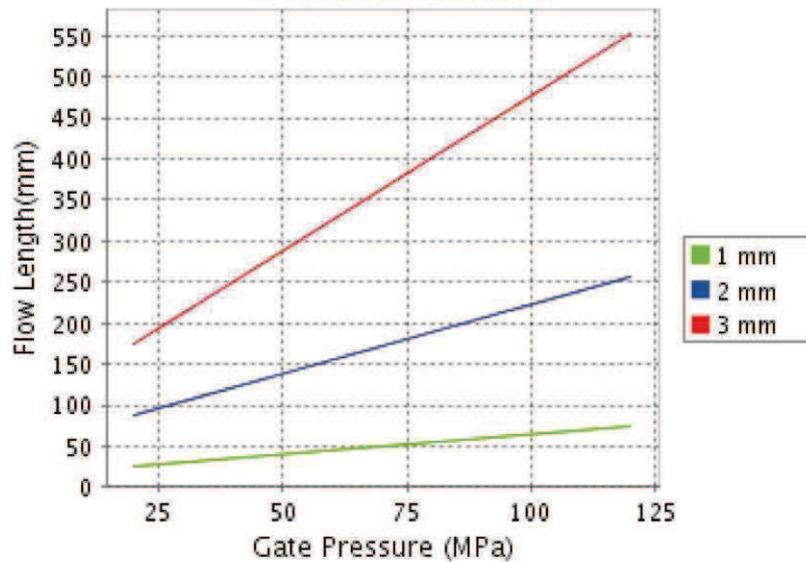
©2012 SABIC Innovative Plastics Holding BV. All rights reserved.





Lexan\* Resin EXL1162T

**CALCULATED FLOW LENGTH INDICATION**  
**Moldflow® Radial Flow Analysis**  
**Lexan® EXL1162T**  
**Melt Temperature : 305°C**  
**Mold Temperature : 85°C**



**Note: Technical support is recommended if Gate Pressure is greater than 80 MPa. Contact your local representative.**

**® Moldflow is a registered trademark of the Moldflow Corporation.**

(1) Typical values only. Variations within normal tolerances are possible for various colors. All values are measured after at least 48 hours storage at 23°C/50% relative humidity. All properties, except the melt volume and melt flow rates, are measured on injection molded samples. All samples tested under ISO test standards are prepared according to ISO 296.

(2) Only typical data for selection purposes. Not to be used for part or tool design.

(3) This rating is not intended to reflect hazards presented by this or any other material under actual fire conditions.

(4) Internal measurements according to UL standards.

(5) Measurements made from laboratory test coupon. Actual shrinkage may vary outside of range due to differences in processing conditions, equipment, part geometry and tool design. It is recommended that mold shrinkage studies be performed with surrogate or legacy tooling prior to cutting tools for new molded article.

Source GMD, last updated:

PLEASE CONTACT YOUR LOCAL SALES OFFICE FOR AVAILABILITY IN YOUR AREA.

DISCLAIMER : THE MATERIALS, PRODUCTS AND SERVICES OF SABIC INNOVATIVE PLASTICS HOLDING BV, ITS SUBSIDIARIES AND AFFILIATES ("SELLER"), ARE SOLD SUBJECT TO SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, WHICH CAN BE FOUND AT <http://www.sabic-ip.com> AND ARE AVAILABLE UPON REQUEST. ALTHOUGH ANY INFORMATION OR RECOMMENDATION CONTAINED HEREIN IS GIVEN IN GOOD FAITH, SELLER MAKES NO WARRANTY OR GUARANTEE, EXPRESS OR IMPLIED, (i) THAT THE RESULTS DESCRIBED HEREIN WILL BE OBTAINED UNDER END-USE CONDITIONS, OR (ii) AS TO THE EFFECTIVENESS OR SAFETY OF ANY DESIGN INCORPORATING SELLER'S PRODUCTS, SERVICES OR RECOMMENDATIONS, EXCEPT AS PROVIDED IN SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE. SELLER SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR ANY LOSS RESULTING FROM ANY USE OF ITS PRODUCTS OR SERVICES DESCRIBED HEREIN. Each user is responsible for making its own determination as to the suitability of Seller's products, services or recommendations for the user's particular use through appropriate end-use testing and analysis. Nothing in any document or oral statement shall be deemed to alter or waive any provision of Seller's Standard Conditions of Sale or this Disclaimer, unless it is specifically agreed to in a writing signed by Seller. No statement by Seller concerning a possible use of any product, service or design is intended, or should be construed, to grant any license under any patent or other intellectual property right of Seller or as a recommendation for the use of such product, service or design in a manner that infringes any patent or other intellectual property right. SABIC Innovative Plastics is a trademark of SABIC Holding Europe B.V.

\* Lexan is a trademark of SABIC Innovative Plastics IP BV

©2012 SABIC Innovative Plastics Holding BV. All rights reserved



**HDPE, injection molded (overview of materials)**

Physical Properties	Metric	English	Comments
Bulk Density	0.529 - 0.625 g/cc	0.0191 - 0.0226 lb/in <sup>3</sup>	Average value: 0.603 g/cc Grade Count:14
Density	0.924 - 1.05 g/cc	0.0334 - 0.0379 lb/in <sup>3</sup>	Average value: 0.954 g/cc Grade Count:377
Volatiles	0.00000900 - 0.100 %	0.00000900 - 0.100 %	Average value: 0.0667 % Grade Count:3
Apparent Bulk Density	0.590 - 0.610 g/cc	0.0213 - 0.0220 lb/in <sup>3</sup>	Average value: 0.595 g/cc Grade Count:17
Water Absorption	0.000 - 0.0500 %	0.000 - 0.0500 %	Average value: 0.0152 % Grade Count:27
Moisture Absorption at Equilibrium	0.0100 - 0.0500 %	0.0100 - 0.0500 %	Average value: 0.0136 % Grade Count:11
Particle Size	5.00 - 1200 µm	5.00 - 1200 µm	Average value: 614 µm Grade Count:4
 scosity	32000 - 200000 cP	32000 - 200000 cP	Average value: 89000 cP Grade Count:7
	@Temperature 190 - 190 °C	@Temperature 374 - 374 °F	
	32000 - 200000 cP	32000 - 200000 cP	Average value: 89000 cP Grade Count:7
	@Shear Rate 300 - 5000 1/s	@Shear Rate 300 - 5000 1/s	
Viscosity Measurement	280 - 460	280 - 460	Average value: 350 Grade Count:5
Environmental Stress Crack Resistance	1.00 - 3000 hour	1.00 - 3000 hour	Average value: 182 hour Grade Count:91
 scosity	2.00 - 500 hour	2.00 - 500 hour	Average value: 122 hour Grade Count:16
	@Temperature 50.0 - 50.0 °C	@Temperature 122 - 122 °F	
 scosity	2.00 - 10.0 hour	2.00 - 10.0 hour	Average value: 122 hour Grade Count:12
	@Temperature 50.0 - 50.0 °C	@Temperature 122 - 122 °F	
	2.00 - 10.0 hour	2.00 - 10.0 hour	Average value: 122 hour Grade Count:12
	@Thickness 1.90 - 2.00 mm	@Thickness 0.0748 - 0.0787 in	
Oxidative Induction Time (OIT)	20.0 - 100 min	20.0 - 100 min	Average value: 47.5 min Grade Count:4
Linear Mold Shrinkage	0.0100 - 0.0300 cm/cm	0.0100 - 0.0300 in/in	Average value: 0.0187 cm/cm Grade Count:12
Linear Mold Shrinkage, Transverse	0.0130 - 0.0300 cm/cm	0.0130 - 0.0300 in/in	Average value: 0.0173 cm/cm Grade Count:3
Melt Flow	0.0250 - 1610 g/10 min	0.0250 - 1610 g/10 min	Average value: 29.2 g/10 min Grade Count:354
Base Resin Melt Index	2.00 - 20.0 g/10 min	2.00 - 20.0 g/10 min	Average value: 7.00 g/10 min Grade Count:8
Spiral Flow	15.5 - 53.8 cm	6.10 - 21.2 in	Average value: 33.4 cm Grade Count:40
Ash	0.0300 - 0.0600 %	0.0300 - 0.0600 %	Average value: 0.0475 % Grade Count:4
Collected Volatile Condensable Material	0.0500 - 1.00 %	0.0500 - 1.00 %	Average value: 0.472 % Grade Count:23

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell R	33.0 - 52.0	33.0 - 52.0	Average value: 46.3 Grade Count:4
Hardness, Shore D	55.0 - 76.0	55.0 - 76.0	Average value: 64.7 Grade Count:188
Ball Indentation Hardness	35.0 - 45.0 MPa	5080 - 6530 psi	Average value: 41.4 MPa Grade Count:9
Tensile Strength, Ultimate	10.0 - 43.0 MPa	1450 - 6240 psi	Average value: 21.6 MPa Grade Count:139
Film Tensile Strength at Yield, MD	21.0 - 35.0 MPa	3050 - 5080 psi	Average value: 28.9 MPa Grade Count:5
Film Tensile Strength at Yield, TD	23.0 - 37.5 MPa	3340 - 5440 psi	Average value: 31.1 MPa Grade Count:5
Film Elongation at Break, MD	595 - 900 %	595 - 900 %	Average value: 709 % Grade Count:5
Film Elongation at Break, TD	650 - 950 %	650 - 950 %	Average value: 860 % Grade Count:5
Tensile Strength, Yield	11.0 - 43.0 MPa	1600 - 6240 psi	Average value: 26.2 MPa Grade Count:316
Elongation at Break	3.20 - 2080 %	3.20 - 2080 %	Average value: 514 % Grade Count:275
Elongation at Yield	6.60 - 44.0 %	6.60 - 44.0 %	Average value: 10.4 % Grade Count:74
Modulus of Elasticity	0.565 - 1.57 GPa	81.9 - 228 ksi	Average value: 0.960 GPa Grade Count:56
Flexural Modulus	0.280 - 1.81 GPa	40.6 - 263 ksi	Average value: 1.09 GPa Grade Count:267
Flexural Yield Strength	13.8 - 40.7 MPa	2000 - 5900 psi	Average value: 25.4 MPa Grade Count:17
Compressive Yield Strength	4.00 - 31.7 MPa	580 - 4600 psi	Average value: 14.2 MPa Grade Count:10
Secant Modulus	0.750 - 1.54 GPa	109 - 224 ksi	Average value: 1.08 GPa Grade Count:27
Izod Impact, Unnotched	2.45 - 5340 J/cm	4.59 - 10000 ft-lb/in	Average value: 2.45 J/cm Grade Count:3
Charpy Impact Unnotched	1.60 J/cm <sup>2</sup> - NB	7.61 ft-lb/in <sup>2</sup> - NB	Average value: 1.60 J/cm <sup>2</sup> Grade Count:12
Charpy Impact, Notched	0.200 - 11.0 J/cm <sup>2</sup>	0.952 - 52.4 ft-lb/in <sup>2</sup>	Average value: 2.79 J/cm <sup>2</sup> Grade Count:33
 scosity	0.280 - 0.440 J/cm <sup>2</sup>	1.33 - 2.09 ft-lb/in <sup>2</sup>	Average value: 0.382 J/cm <sup>2</sup> Grade Count:4
	@Temperature -30.0 - -30.0 °C	@Temperature -22.0 - -22.0 °F	
Tensile Impact Strength	34.0 - 349 kJ/m <sup>2</sup>	16.2 - 166 ft-lb/in <sup>2</sup>	Average value: 226 kJ/m <sup>2</sup> Grade Count:21
Falling Dart Impact	31.2 - 176 J	23.0 - 130 ft-lb	Average value: 125 J Grade Count:3
Coefficient of Friction	0.0700 - 0.300	0.0700 - 0.300	Average value: 0.195 Grade Count:4
Tensile Creep Modulus, 1 hour	400 - 570 MPa	58000 - 82700 psi	Average value: 473 MPa Grade Count:3
Tensile Creep Modulus, 1000 hours	270 - 400 MPa	39200 - 58000 psi	Average value: 327 MPa Grade Count:3
Tear Strength Test	23.5 - 30.0	23.5 - 30.0	Average value: 28.4 Grade Count:4
Eimendorf Tear Strength, MD	0.600 - 1.60 g/micron	15.2 - 40.6 g/mil	Average value: 0.940 g/micron Grade Count:5
Eimendorf Tear Strength, TD	1.70 - 23.0 g/micron	43.2 - 584 g/mil	Average value: 10.5 g/micron Grade Count:5
Dart Drop	1.50 - 2.00 g/micron	38.1 - 50.8 g/mil	Average value: 1.67 g/micron Grade Count:4
Abrasion	85.0 - 350	85.0 - 350	Average value: 215 Grade Count:7
Film Tensile Strength at Break, MD	35.6 - 55.0 MPa	5160 - 7980 psi	Average value: 47.1 MPa Grade Count:5
Film Tensile Strength at Break, TD	28.0 - 50.0 MPa	4060 - 7250 psi	Average value: 42.2 MPa Grade Count:5
Tangent Modulus	1170 - 1280 MPa	170000 - 185000 psi	Average value: 1230 MPa Grade Count:5
Izod Impact, Notched	0.196 - 5340 J/cm	0.367 - 10000 ft-lb/in	Average value: 0.791 J/cm Grade Count:132
 scosity	0.448476 - 5338.47 J/cm	0.840179 - 10001.1 ft-lb/in	Average value: 1.82 J/cm Grade Count:29
	@Temperature -40.0 - -18.0 °C	@Temperature -40.0 - -0.40 °F	
Izod Impact, Notched (ISO)	11.0 - 80.1 kJ/m <sup>2</sup>	5.23 - 38.1 ft-lb/in <sup>2</sup>	Average value: 38.4 kJ/m <sup>2</sup> Grade Count:11

Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	1.00e+6 - 1.00e+17 ohm-cm	1.00e+6 - 1.00e+17 ohm-cm	Average value: 9.31e+15 ohm-cm Grade Count:24
Surface Resistance	100 - 1.00e+15 ohm	100 - 1.00e+15 ohm	Average value: 4.51e+14 ohm Grade Count:23
Dielectric Constant	1.00 - 5.00	1.00 - 5.00	Average value: 2.63 Grade Count:25
Dielectric Strength	18.7 - 150 kV/mm	475 - 3810 kV/in	Average value: 49.2 kV/mm Grade Count:26
Dissipation Factor	0.0000400 - 0.00100	0.0000400 - 0.00100	Average value: 0.000309 Grade Count:24
Comparative Tracking Index	600 V	600 V	Average value: 600 V Grade Count:17

Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	20.0 - 225 µm/m-°C	11.1 - 125 µin/in-°F	Average value: 140 µm/m-°C Grade Count:32
Thermal Conductivity	0.288 - 0.400 W/m-K	2.00 - 2.78 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	Average value: 0.386 W/m-K Grade Count:8
Melting Point	121 - 137 °C	250 - 279 °F	Average value: 132 °C Grade Count:87
Crystallization Temperature	112 - 117 °C	234 - 243 °F	Average value: 115 °C Grade Count:26
Maximum Service Temperature, Air	70.0 - 120 °C	158 - 248 °F	Average value: 95.3 °C Grade Count:12
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	47.2 - 87.8 °C	117 - 190 °F	Average value: 72.1 °C Grade Count:100
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	37.6 - 80.0 °C	99.7 - 176 °F	Average value: 46.2 °C Grade Count:41
Vicat Softening Point	67.0 - 194 °C	153 - 381 °F	Average value: 122 °C Grade Count:215
Minimum Service Temperature, Air	-200 - -60.0 °C	-328 - -76.0 °F	Average value: -137 °C Grade Count:7
Brittleness Temperature	-180 - -60.0 °C	-292 - -76.0 °F	Average value: -75.0 °C Grade Count:136
Flammability, UL94	HB	HB	Grade Count:32
Oxygen Index	17.0 - 20.0 %	17.0 - 20.0 %	Average value: 19.1 % Grade Count:10
Shrinkage	0.960 - 3.50 %	0.960 - 3.50 %	Average value: 1.77 % Grade Count:5

Optical Properties	Metric	English	Comments
Yellow Index	4.00 - 5.00 %	4.00 - 5.00 %	Average value: 4.06 % Grade Count:17

Processing Properties	Metric	English	Comments
Processing Temperature	82.2 - 280 °C	180 - 536 °F	Average value: 210 °C Grade Count:43
Rear Barrel Temperature	149 - 232 °C	300 - 450 °F	Average value: 223 °C Grade Count:17
Middle Barrel Temperature	154 - 243 °C	310 - 470 °F	Average value: 233 °C Grade Count:17
Front Barrel Temperature	160 - 246 °C	320 - 475 °F	Average value: 236 °C Grade Count:17
Nozzle Temperature	160 - 246 °C	320 - 475 °F	Average value: 237 °C Grade Count:17
Mold Temperature	10.0 - 65.6 °C	50.0 - 150 °F	Average value: 32.3 °C Grade Count:12
Drying Temperature	37.8 - 80.0 °C	100 - 176 °F	Average value: 53.9 °C Grade Count:3
Dry Time	1.00 - 3.00 hour	1.00 - 3.00 hour	Average value: 2.00 hour Grade Count:3
Injection Pressure	2.76 - 103 MPa	400 - 15000 psi	Average value: 62.4 MPa Grade Count:8



Polycarbonate			
Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.200 - 1.210 g/cm <sup>3</sup>	0.0370 - 0.0381 lb/in <sup>3</sup>	Average value: 0.0376 g/cc Grade Count:544
Filler Content	20.0 - 70.0 %	20.0 - 70.0 %	Average value: 36.7 % Grade Count:3
Water Absorption	0.000 - 1.00 %	0.000 - 1.00 %	Average value: 0.0709 % Grade Count:123
Moisture Absorption at Equilibrium	0.100 %	0.100 %	Average value: 0.100 % Grade Count:58
Water Absorption at Saturation	0.0100 %	0.0100 %	Average value: 0.0100 % Grade Count:6
Particle Size	5.00 - 2500 µm	5.00 - 2500 µm	Average value: 741 µm Grade Count:11
Viscosity Measurement	80.0 - 500000	80.0 - 500000	Average value: 171000 Grade Count:3
Linear Moist Shrinkage	0.000 - 0.0250 cm/cm	0.000 - 0.0250 in/in	Average value: 0.0126 cm/cm Grade Count:178
Linear Moist Shrinkage, 6.35 mm section	0.0050 cm/cm	0.0050 in/in	Average value: 0.0250 cm/cm Grade Count:5
Linear Moist Shrinkage, Transverse	0.0100 - 0.0155 cm/cm	0.0100 - 0.0155 in/in	Average value: 0.0134 cm/cm Grade Count:5
Melt Flow	0.200 - 2000 g/10 min	0.200 - 2000 g/10 min	Average value: 26.7 g/10 min Grade Count:740
Base Resin Melt Index	0.500 - 50.0 g/10 min	0.500 - 50.0 g/10 min	Average value: 15.1 g/10 min Grade Count:17
Ash	0.0500 - 20.0 %	0.0500 - 20.0 %	Average value: 1.16 % Grade Count:23
Collected Volatile Condensable Material	0.0500 - 3.00 %	0.0500 - 3.00 %	Average value: 0.391 % Grade Count:29
<b>Mechanical Properties</b>			
Hardness, Rockwell R	20.0 - 117	20.0 - 117	Average value: 87.2 Grade Count:374
Hardness, Shore D	47.0 - 83.0	47.0 - 83.0	Average value: 70.6 Grade Count:81
Ball Indentation Hardness	82.0 - 100 MPa	8890 - 15400 psi	Average value: 85.5 MPa Grade Count:15
Tensile Strength, Ultimate	9.00 - 90.0 MPa	1310 - 11800 psi	Average value: 33.0 MPa Grade Count:137
	10.0 - 23.0 MPa	1450 - 3340 psi	Average value: 16.0 MPa Grade Count:1
Film Elongation at Break, MD	50.0 - 520 %	50.0 - 520 %	Average value: 259 % Grade Count:3
Tenacity	0.200 - 0.44 N/tex	2.30 - 5.00 g/denier	Average value: 0.306 N/tex Grade Count:5
Tensile Strength, Yield	12.0 - 959 MPa	1740 - 82500 psi	Average value: 32.8 MPa Grade Count:583
Elongation at Break	3.00 - 900 %	3.00 - 900 %	Average value: 149 % Grade Count:275
Elongation at Yield	3.50 - 35.0 %	3.50 - 35.0 %	Average value: 0.42 % Grade Count:496
Modulus of Elasticity	0.00600 - 0.25 GPa	1.16 - 1200 ksi	Average value: 1.00 GPa Grade Count:190
Poisson's Modulus	0.0280 - 0.69 GPa	3.77 - 999 ksi	Average value: 1.46 GPa Grade Count:534
	0.350 - 0.600 GPa	50.9 - 86.6 ksi	Average value: 0.493 GPa Grade Count:1
Flexural Yield Strength	30.0 - 180 MPa	3580 - 26100 psi	Average value: 46.0 MPa Grade Count:51
Compressive Yield Strength	24.0 - 82.0 MPa	3500 - 8000 psi	Average value: 39.3 MPa Grade Count:5
Compressive Modulus	1.30 GPa	200 ksi	Average value: 1.30 GPa Grade Count:6
Shear Modulus	0.580 - 0.920 GPa	84.6 - 133 ksi	Average value: 0.797 GPa Grade Count:10
Secant Modulus	1.00 - 1.20 GPa	150 - 185 ksi	Average value: 1.20 GPa Grade Count:4
Notch Impact, Unnotched	0.198 J/cm <sup>2</sup> -180	0.267 ft-lb/in <sup>2</sup> -180	Average value: 0.34 J/cm Grade Count:58
Notch Impact, Unnotched, Low Temp	2.14 - 5340 J/cm <sup>2</sup>	4.00 - 10000 ft-lb/in <sup>2</sup>	Average value: 10.9 J/cm Grade Count:12
Notch Impact, Notched, Low Temp (IG)	1.10 - 5.20 kJ/m <sup>2</sup>	0.523 - 2.47 ft-lb/in <sup>2</sup>	Average value: 2.00 kJ/m <sup>2</sup> Grade Count:6
Charpy Impact Unnotched	0.200 J/cm <sup>2</sup> -180	1.43 ft-lb/in <sup>2</sup> -180	Average value: 0.05 J/cm <sup>2</sup> Grade Count:103
	0.700 J/cm <sup>2</sup> -180	3.31 ft-lb/in <sup>2</sup> -180	Average value: 4.58 J/cm <sup>2</sup> Grade Count:90
Charpy Impact, Notched	0.200 - 9.00 J/cm <sup>2</sup>	0.950 - 45.2 ft-lb/in <sup>2</sup>	Average value: 1.26 J/cm <sup>2</sup> Grade Count:90
	0.130 - 1.70 J/cm <sup>2</sup>	0.019 - 0.09 ft-lb/in <sup>2</sup>	Average value: 0.323 J/cm <sup>2</sup> Grade Count:71
Gardner Impact	0.904 - 40.7 J	0.667 - 30.0 ft-lb	Average value: 10.3 J Grade Count:59
	1.9960 - 36.1952 J	1.47500 - 26.6667 ft-lb	Average value: 20.2 J Grade Count:27
Falling Dart Impact	15.0225 - 20.9529 J	11.0800 - 17.6667 ft-lb	Average value: 30.2 J Grade Count:6
	15.0225 - 20.9529 J	11.0800 - 17.6667 ft-lb	Average value: 20.2 J Grade Count:6
Falling Dart Impact	4.98 - 20.0 J	3.67 - 20.7 ft-lb	Average value: 10.0 J Grade Count:5
Coefficient of Friction	0.280	0.250	Average value: 0.250 Grade Count:6
Tensile Creep Modulus, 1 hour	550 - 700 MPa	79000 - 102000 psi	Average value: 627 MPa Grade Count:7
Tensile Creep Modulus, 1000 hours	220 - 440 MPa	31900 - 63000 psi	Average value: 349 MPa Grade Count:7
Tear Strength	30.2 - 226 kN/m	115 - 1290 psi	Average value: 115 kN/m Grade Count:3
Compression Set	16.0 - 85.0 %	16.0 - 85.0 %	Average value: 31.6 % Grade Count:5
Film Tensile Strength at Break, MD	3.10 - 152 MPa	450 - 22000 psi	Average value: 70.1 MPa Grade Count:3
Tangent Modulus	1000 - 3200 MPa	187000 - 470000 psi	Average value: 1910 MPa Grade Count:5
Notch Impact, Notched	0.0490 J/cm <sup>2</sup> -180	0.2746 ft-lb/in <sup>2</sup> -180	Average value: 0.779 J/cm Grade Count:503
	0.267 - 0.380 J/cm <sup>2</sup>	0.500 - 0.712 ft-lb/in <sup>2</sup>	Average value: 0.323 J/cm Grade Count:2
Notch Impact, Notched, Low Temp	0.100 - 0.900 J/cm <sup>2</sup>	0.107 - 1.70 ft-lb/in <sup>2</sup>	Average value: 0.445 J/cm Grade Count:27
	1.00 - 1.35 J/cm <sup>2</sup>	1.87 - 2.53 ft-lb/in <sup>2</sup>	Average value: 1.17 J/cm Grade Count:2
Notch Impact, Notched (IG)	1.00 - 1.35 J/cm <sup>2</sup>	1.87 - 2.53 ft-lb/in <sup>2</sup>	Average value: 1.17 J/cm Grade Count:2
	3.00 - 21.0 kJ/m <sup>2</sup>	0.950 - 9.96 ft-lb/in <sup>2</sup>	Average value: 4.73 kJ/m <sup>2</sup> Grade Count:17
<b>Electrical Properties</b>			
Electrical Resistivity	1000 - 1.00e+18 ohm-cm	1000 - 1.00e+18 ohm-cm	Average value: 1.51e+17 ohm-cm Grade Count:55
Surface Resistance	100 - 1.00e+15 ohm	100 - 1.00e+15 ohm	Average value: 1.44e+14 ohm Grade Count:73
Static Decay	0.0100 - 2.00 sec	0.0100 - 2.00 sec	Average value: 0.372 sec Grade Count:5
Dielectric Constant	2.20 - 2.30	2.20 - 2.30	Average value: 2.30 Grade Count:64
Dielectric Strength	23.6 - 140 kV/mm	600 - 3500 kV/in	Average value: 127 kV/mm Grade Count:55
Dielectric Factor	0.0000700 - 0.00300	0.0000700 - 0.00300	Average value: 0.000410 Grade Count:61
Arc Resistance	80.0 - 136 sec	80.0 - 136 sec	Average value: 104 sec Grade Count:3
Comparative Tracking Index	300 V	300 V	Average value: 600 V Grade Count:60
<b>Thermal Properties</b>			
CTE, linear	15.0 - 185 µm/m-°C	10.0 - 103 µm/m-°F	Average value: 114 µm/m-°C Grade Count:109
Melting Point	61.0 - 100 °C	142 - 256 °F	Average value: 159 °C Grade Count:129
Crystallization Temperature	110 - 115 °C	230 - 239 °F	Average value: 111 °C Grade Count:5
Maximum Service Temperature, Air	85.0 - 125 °C	149 - 257 °F	Average value: 79.4 °C Grade Count:27
Deflection Temperature at 0.45 MPa (50 psi)	13.0 - 230 °C	55.4 - 450 °F	Average value: 120 °C Grade Count:593
Deflection Temperature at 1.8 MPa (254 psi)	37.0 - 149 °C	98.6 - 300 °F	Average value: 84.4 °C Grade Count:207
Heat Softening Point	35.0 - 150 °C	95.0 - 310 °F	Average value: 118 °C Grade Count:212
UL RTI, Electrical	85.0 - 221 °C	149 - 430 °F	Average value: 140 °C Grade Count:4
UL RTI, Mechanical with Impact	85.0 - 221 °C	149 - 430 °F	Average value: 140 °C Grade Count:6
UL RTI, Mechanical without impact	85.0 - 221 °C	149 - 430 °F	Average value: 140 °C Grade Count:6
Flammability, UL94	HB - V-0	HB - V-0	Grade Count:71
Oxygen Index	24.0 - 30.0 %	24.0 - 30.0 %	Average value: 28.3 % Grade Count:8
Shrinkage	1.50 - 2.00 %	1.50 - 2.00 %	Average value: 1.59 % Grade Count:7
<b>Optical Properties</b>			
Haze	0.200 - 91.0 %	0.200 - 91.0 %	Average value: 33.6 % Grade Count:43
Gloss	81.0 - 160 %	81.0 - 160 %	Average value: 87.7 % Grade Count:10
Yellow Index	0.000000 - 2.44 %	0.000000 - 2.44 %	Average value: 0.426 % Grade Count:10
<b>Processing Properties</b>			
Processing Temperature	87.8 - 320 °C	190 - 608 °F	Average value: 206 °C Grade Count:91
Rear Barrel Temperature	177 - 274 °C	350 - 525 °F	Average value: 211 °C Grade Count:18
Middle Barrel Temperature	191 - 274 °C	375 - 525 °F	Average value: 217 °C Grade Count:22
Front Barrel Temperature	198 - 274 °C	390 - 525 °F	Average value: 227 °C Grade Count:18
Nozzle Temperature	204 - 243 °C	400 - 470 °F	Average value: 225 °C Grade Count:17
Mold Temperature	5.00 - 30.0 °C	41.0 - 176 °F	Average value: 43.2 °C Grade Count:54
Ejection Temperature	20.7 - 54.4 °C	69.3 - 130 °F	Average value: 40.6 °C Grade Count:4
Drying Temperature	55.6 - 100 °C	150 - 212 °F	Average value: 75.6 °C Grade Count:19
Dry Time	1.00 - 4.00 hour	1.00 - 4.00 hour	Average value: 2.48 hour Grade Count:25
Moisture Content	0.0500 - 1.00 %	0.0500 - 1.00 %	Average value: 0.620 % Grade Count:16
Injection Pressure	3.76 - 103 MPa	400 - 15000 psi	Average value: 56.6 MPa Grade Count:27
Hold Pressure	2.07 - 8.27 MPa	300 - 1200 psi	Average value: 5.17 MPa Grade Count:9
Back Pressure	0.172 - 1.03 MPa	24.9 - 150 psi	Average value: 0.600 MPa Grade Count:10



## Polycarbonates, Impact

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	1.02 - 1.23 g/cc	0.0368 - 0.0444 lb/in <sup>3</sup>	Average value: 1.19 g/cc Grade Count:38
	1.02 - 1.02 g/cc @Temperature: 20 - 30 °C	0.0368 - 0.0368 lb/in <sup>3</sup> @Temperature: 50 - 57.2 °F	Average value: 1.02 g/cc Grade Count:6
Water Absorption	0.120 - 0.400 %	0.120 - 0.400 %	Average value: 0.272 % Grade Count:16
Moisture Absorption at Equilibrium	0.120 - 0.340 %	0.120 - 0.340 %	Average value: 0.151 % Grade Count:10
Water Absorption at Saturation	0.350 %	0.350 %	Average value: 0.350 % Grade Count:4
Linear Mold Shrinkage	0.00500 - 0.00900 cm/cm	0.00500 - 0.00900 in/in	Average value: 0.00630 cm/cm Grade Count:30
Linear Mold Shrinkage, Transverse	0.00500 - 0.00900 cm/cm	0.00500 - 0.00900 in/in	Average value: 0.00740 cm/cm Grade Count:6
Melt Flow	5.00 - 35.0 g/10 min	5.00 - 35.0 g/10 min	Average value: 15.0 g/10 min Grade Count:32
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell M	53.0 - 71.0	53.0 - 71.0	Average value: 59.0 Grade Count:3
Hardness, Rockwell R	117 - 122	117 - 122	Average value: 119 Grade Count:7
Tensile Strength, Ultimate	51.7 - 85.0 MPa	7500 - 9570 psi	Average value: 57.5 MPa Grade Count:15
Tensile Strength, Yield	45.6 - 68.0 MPa	7200 - 9860 psi	Average value: 58.0 MPa Grade Count:31
Elongation at Break	10.0 - 130 %	10.0 - 130 %	Average value: 81.8 % Grade Count:29
Elongation at Yield	4.80 - 10.0 %	4.80 - 10.0 %	Average value: 6.11 % Grade Count:15
Modulus of Elasticity	2.00 - 2.60 GPa	290 - 377 ksi	Average value: 2.21 GPa Grade Count:16
Flexural Modulus	1.96 - 2.43 GPa	284 - 352 ksi	Average value: 2.18 GPa Grade Count:27
Flexural Yield Strength	68.9 - 98.0 MPa	10000 - 14200 psi	Average value: 85.5 MPa Grade Count:24
Impact, Unnotched	8340 J/m - NB	10000 ft-lb/in - NB	Grade Count:3
Charpy Impact Unnotched	NB	NB	Grade Count:13
	NB - NB	NB - NB	Grade Count:6
	@Temperature: -30.0 - -30.0 °C	@Temperature: -22.0 - -22.0 °F	
Gardner Impact	36.0 - 36.2 J	26.6 - 26.7 ft-lb	Average value: 36.2 J Grade Count:5
Dart Drop, Total Energy	39.3 - 57.0 J	29.0 - 42.0 ft-lb	Average value: 45.1 J Grade Count:3
Falling Dart Impact	59.6561 - 59.6561 J	44.0001 - 44.0001 ft-lb	Average value: 59.7 J Grade Count:1
	@Temperature: -20.0 - -20.0 °C	@Temperature: -3.0 - -3.0 °F	
Puncture Energy	50.0 - 55.0 J	36.9 - 40.6 ft-lb	Average value: 52.5 J Grade Count:6
	55.0 - 60.0 J	40.6 - 44.3 ft-lb	Average value: 57.5 J Grade Count:6
	@Temperature: -30.0 - -30.0 °C	@Temperature: -22.0 - -22.0 °F	
Impact, Notched	3.20 - 8.30 J/m	6.00 - 15.5 ft-lb/in	Average value: 6.59 J/m Grade Count:28
	3.74 - 5.34 J/m	7.01 - 10.0 ft-lb/in	Average value: 3.70 J/m Grade Count:5
	@Temperature: -50.0 - -17.8 °C	@Temperature: -58.0 - 3.0 °F	
	0.900 - 5.34 J/m	1.69 - 10.0 ft-lb/in	Average value: 3.70 J/m Grade Count:5
	@Temperature: -60.0 - 0.00 °C	@Temperature: -76.0 - 32.0 °F	
	0.900 - 5.34 J/m	1.69 - 10.0 ft-lb/in	Average value: 3.70 J/m Grade Count:5
	@Thickness: 0.17 - 0.20 mm	@Thickness: 0.125 - 0.125 in	
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	10.0 - 6.00e+16 ohm-cm	10.0 - 6.00e+16 ohm-cm	Average value: 7.34e+15 ohm-cm Grade Count:14
Surface Resistance	10000 - 1.00e+16 ohm	10000 - 1.00e+16 ohm	Average value: 7.47e+14 ohm Grade Count:14
Dielectric Constant	2.80 - 3.20	2.80 - 3.20	Average value: 3.06 Grade Count:9
Dielectric Strength	24.0 - 35.0 kV/mm	610 - 890 kV/in	Average value: 32.2 kV/mm Grade Count:10
Dissipation Factor	0.000400 - 0.0120	0.000400 - 0.0120	Average value: 0.00590 Grade Count:8
Comparative Tracking Index	180 - 250 V	180 - 250 V	Average value: 226 V Grade Count:9
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	65.0 - 70.2 µm/m-°C	36.1 - 39.0 µm/in-°F	Average value: 68.7 µm/m-°C Grade Count:12
CTE, linear, Transverse to Flow	68.4 - 70.0 µm/m-°C	38.0 - 38.9 µm/in-°F	Average value: 69.6 µm/m-°C Grade Count:8
Specific Heat Capacity	1.70 - 1.77 J/g-°C	0.406 - 0.423 BTU/lb-°F	Average value: 1.72 J/g-°C Grade Count:8
Thermal Conductivity	0.173 - 0.214 W/m-K	1.20 - 1.49 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F	Average value: 0.180 W/m-K Grade Count:8
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	105 - 142 °C	221 - 288 °F	Average value: 131 °C Grade Count:22
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	95.0 - 138 °C	205 - 280 °F	Average value: 124 °C Grade Count:34
Vicat Softening Point	110 - 155 °C	230 - 311 °F	Average value: 145 °C Grade Count:21
UL RTI, Electrical	75.0 - 125 °C	167 - 267 °F	Average value: 90.0 °C Grade Count:4
UL RTI, Mechanical with Impact	75.0 - 115 °C	167 - 239 °F	Average value: 87.5 °C Grade Count:4
UL RTI, Mechanical without Impact	75.0 - 125 °C	167 - 267 °F	Average value: 90.0 °C Grade Count:4
Flammability, UL94	HB - 5VA	HB - 5VA	Grade Count:25
Oxygen Index	26.0 - 36.0 %	26.0 - 36.0 %	Average value: 31.0 % Grade Count:8
Glow Wire Test	750 - 960 °C	1380 - 1750 °F	Average value: 798 °C Grade Count:4
Optical Properties	Metric	English	Comments
Transmission, Visible	0.000 - 90.0 %	0.000 - 90.0 %	Average value: 50.3 % Grade Count:3
Processing Properties	Metric	English	Comments
Processing Temperature	230 - 332 °C	446 - 630 °F	Average value: 287 °C Grade Count:21
Rear Barrel Temperature	230 - 269 °C	446 - 500 °F	Average value: 261 °C Grade Count:11
Middle Barrel Temperature	235 - 304 °C	455 - 580 °F	Average value: 270 °C Grade Count:11
Front Barrel Temperature	240 - 316 °C	464 - 600 °F	Average value: 279 °C Grade Count:11
Nozzle Temperature	260 - 299 °C	500 - 560 °F	Average value: 278 °C Grade Count:9
Mold Temperature	40.0 - 120 °C	104 - 248 °F	Average value: 82.0 °C Grade Count:18
Ejection Temperature	130 °C	266 °F	Average value: 130 °C Grade Count:6
Injection Velocity	200 mm/sec	7.87 in/sec	Average value: 200 mm/sec Grade Count:6
Drying Temperature	70.0 - 124 °C	158 - 255 °F	Average value: 114 °C Grade Count:12
Dry Time	3.00 - 5.00 hour	3.00 - 5.00 hour	Average value: 3.57 hour Grade Count:7
Moisture Content	0.0200 %	0.0200 %	Average value: 0.0200 % Grade Count:3
Dew Point	-28.9 - -17.8 °C	-20.0 - 0.00 °F	Average value: -21.5 °C Grade Count:3
Injection Pressure	88.9 - 138 MPa	10000 - 20000 psi	Average value: 97.7 MPa Grade Count:3
Back Pressure	0.300 - 1.21 MPa	43.5 - 175 psi	Average value: 0.711 MPa Grade Count:6
Screw Speed	40.0 - 75.0 rpm	40.0 - 75.0 rpm	Average value: 60.0 rpm Grade Count:3



### ANEXO 3.- INFORME TÉCNICO AIDICO, IT 090065

Se adjunta informe técnico realizado por AIDICO, sobre *setas* con núcleo de policarbonato.

	Informe nº IT090065
Página 1 de 18	

## INFORME TÉCNICO

**Ensayos dinámicos de resistencia mediante choque por cuerpo rígido y blando, en protecciones de termoplástico sobre armaduras de acero en obra.**

<b>NÚMERO</b> Number	<b>INFORME TÉCNICO Nº IT090065</b>
<b>FECHA DE EMISIÓN</b> Date of issue	<b>25 de mayo de 2009</b>
<b>PÁGINA</b> Page	<b>1 de 18</b>

<b>MUESTRA DE ENSAYO</b> Test specimen	Identificación según peticionario: Protección de terminaciones de armaduras de acero en obra Nº Albarán: 50969 Fecha recepción: 03/03/2009
<b>SOLICITANTE</b> Applicant	<b>INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL JUGUETE (AIJU)</b> Avenida de la industria, 23 03440 IBI Alicante
<b>FECHA/S DE ENSAYO</b> Date/s of test	<b>27/03/2009</b>

**SIGNATARIO/S**  
**AUTORIZADO/S**  
Authorized signatory/ies

Fdo.: Da. Sara Bresó Grancha  
Técnico Lab. Elementos de  
Seguridad

Fdo.: D. Carlos Lozano Martínez  
Responsable Lab. Elementos de  
Seguridad

Este informe de ensayo no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito de AIDICO



## ÍNDICE

### **1. OBJETO Y ALCANCE**

### **2. NORMATIVA DE REFERENCIA**

### **3. DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS**

### **4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ENSAYO**

- 4.1. Ensayo de impacto mediante choque por cuerpo rígido**
- 4.2. Ensayo de impacto mediante choque por cuerpo blando**

### **5. RESULTADOS Y DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO RESISTENTE DE LAS PIEZAS PLÁSTICAS EN LOS DIFERENTES ENSAYOS**

- 5.1. Ensayo de impacto mediante choque por cuerpo rígido**
- 5.2. Ensayo de impacto mediante choque por cuerpo blando**

### **6. REPORTAJE FOTOGRÁFICO**



## 1.-OBJETO Y ALCANCE

El presente informe resume los ensayos dinámicos de resistencia, realizados sobre piezas fabricadas en material termoplástico, que pretenden emplearse en las obras de construcción como "Protección de terminaciones de armadura de acero en obra", con la doble función de proteger a los trabajadores de posibles cortes, pinchazos, golpes, etc, así como de ser capaces de resistir el impacto que le produciría un trabajador que se precipita sobre estos elementos de acero desde una altura igual o inferior a 2m.

La empresa peticionaria de estas pruebas, ha sido el Instituto Tecnológico del Juguete (AIJU), solicitando a AIDICO, a través del *Laboratorio de Elementos de Seguridad*, la realización de una serie de ensayos dinámicos de impacto, con objeto de evaluar el comportamiento mecánico de estas "protecciones de terminaciones de armadura en obra", reproduciendo en la medida de lo posible, las condiciones reales de utilización en obra, que incluye la posibilidad de que estos elementos se vean sometidos a una serie de acciones, que pueden ser de carácter estático (trabajadores que se apoyan en estos elementos, o material depositado sobre los mismos) o de carácter dinámico (trabajador que caminado junto a estos elementos tropieza y cae sobre los protección de terminaciones de armadura en obra).

Por lo que, teniendo en cuenta la funcionalidad de estos dispositivos de seguridad, desde el *Laboratorio de Elementos de Seguridad* de AIDICO, se han planteado los siguientes ensayos, con objeto de evaluar la capacidad resistente de estos elementos:

- **Ensayo dinámico de resistencia mediante impacto con cuerpo rígido;** Ensayo no normalizado, realizando impactos mediante cuerpo rígido (masa esférica metálica de 100kg y Ø500mm), con diferentes energías cinéticas de impacto.
- **Ensayo dinámico de resistencia mediante impacto con cuerpo blando;** Ensayo no normalizado, realizando impactos mediante choque por cuerpo blando (saco esférico de 50kg), aplicando diferentes energías cinéticas de impacto.

Los ensayos se han llevado a cabo en las instalaciones del *Laboratorio de Elementos de Seguridad de AIDICO*, ya que se trata de un laboratorio especializado en la verificación experimental de los Medios de Protección Colectiva, Medios Auxiliares, y diferentes dispositivos de seguridad empleados en las Obras de Construcción, ya que cuenta con la Infraestructura y Equipamiento necesarios para la realización de este tipo de ensayos.

Con los *Ensayos dinámicos de caída mediante choque por cuerpo rígido y blando* se ha evaluado el comportamiento de estas *protecciones de terminaciones de armadura de acero en obra* frente a las acciones dinámicas, teniendo en cuenta, que estos elementos están expuestos a la situación de caída de un trabajador sobre ellos.

Los ensayos realizados y descritos en el presente informe sólo dan información sobre la capacidad dinámica de resistencia de estas piezas de termoplástico, no habiéndose realizado ensayos ni siendo objeto del presente informe la evaluación de otras propiedades, tales como:

- Comportamiento frente al envejecimiento (condiciones de durabilidad)
- Resistencia estática de las protecciones frente a un posible desalojo de las mismas de los diferentes diámetros de armaduras, frente a una acción dinámica puntual ascendente.

El presente documento referencia las condiciones y resultados de ensayo que se indican, con las consideraciones y limitaciones que expresamente se puedan señalar en el mismo.

## 2.- NORMATIVA DE REFERENCIA

En relación a la normativa técnica de producto de aplicación sobre las "Protecciones de terminaciones de armadura en obra", no existe en estos momentos, ningún documento normativo a nivel nacional ni armonizado a nivel europeo, que establezca las especificaciones de producto y los requisitos técnicos que deben cumplir estos dispositivos de protección. Esta situación junto con el uso estandarizado de estos elementos en las obras de construcción, han motivado que recientemente se haya creado dentro del comité técnico de normalización AEN/CTN 81 "Prevención y medios de protección personal y colectiva en el trabajo", un grupo de trabajo (AEN81/SC2/GT08), que está elaborando el borrador de proyecto de norma española, en el que se están recogiendo las diferentes especificaciones, requisitos técnicos y método de evaluación de conformidad para estas protecciones.

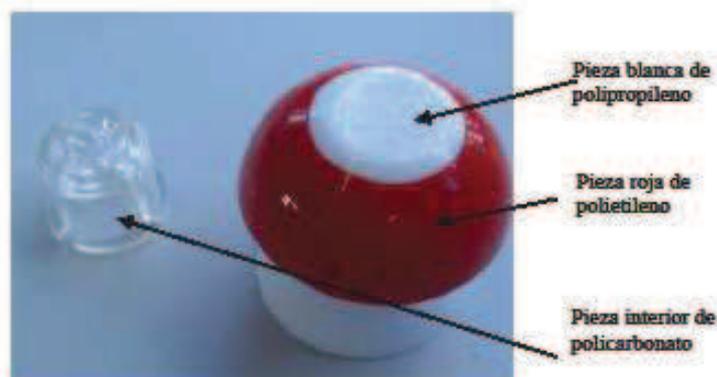
Por lo que, teniendo en cuenta, esta ausencia en el Marco Reglamentario y Normativo sobre este tipo de protecciones fabricadas en materiales termoplásticos, desde el Laboratorio de Elementos de Seguridad de AIDICO, las pruebas experimentales (ensayos) se plantearon, con objeto de verificar el comportamiento mecánico-resistente de estas piezas cuando sobre ellas se aplica un acción dinámica, como puede ser el impacto de una persona contra estos elementos.

Los ensayos a los que han sido sometidas estas piezas, "ensayos dinámicos de resistencia mediante impactos con cuerpo blando y rígido", se han llevado a cabo, en la medida de lo posible, reproduciendo las condiciones reales de utilización en obra, con las limitaciones que expresamente pueden entenderse por realizarse en ambiente de laboratorio.

## 3.- DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LAS PROTECCIONES

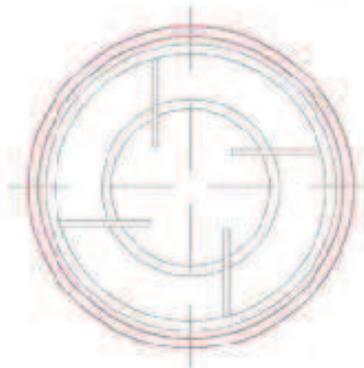
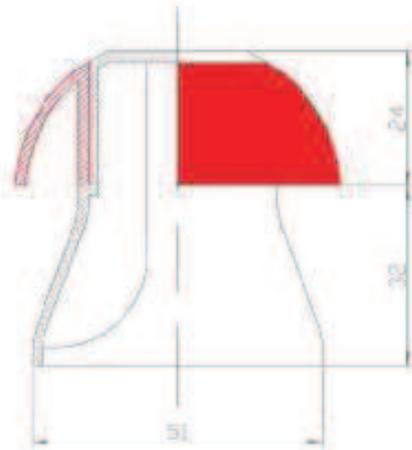
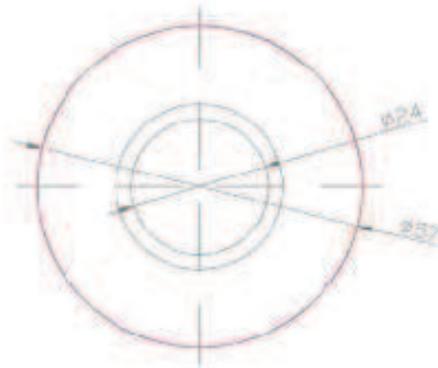
Las muestras fueron suministradas al Laboratorio de Elementos de Seguridad, con anterioridad a la fecha de ensayo, siendo recepcionadas y almacenadas debidamente en las instalaciones del laboratorio.

Estas protecciones están compuestas por tres piezas distintas, fabricadas a partir de materiales de diferente naturaleza termoplástica, cuya composición final se trata de una pieza conjunta que le debe conferir las propiedades que se buscan. La carcasa exterior de la protección, está formada por dos piezas, la pieza blanca es de polipropileno, y la roja de polietileno, integrándose finalmente una pieza de refuerzo interior fabricada de policarbonato, confiriéndole esta última la capacidad resistente frente a impactos.



Fotografía 1: Descripción de la protección

En el siguiente croquis se reflejan las características geométricas de las protecciones suministradas:



## 4.- DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE ENSAYO

Teniendo en cuenta la funcionalidad en obra de estos dispositivos de protección, tratándose de piezas destinadas a evitar o reducir los daños en los trabajadores, provocados por caídas fortuitas sobre los diferentes elementos de hormigón armado en los que se encuentran previstas y sobresaliendo las armaduras de acero, desde el *Laboratorio de Elementos de Seguridad* de AIDICO, se planificaron los siguientes ensayos y en el orden indicado:

- ❖ Ensayo dinámico de impacto mediante choque por cuerpo rígido.
- ❖ Ensayo dinámico de impacto mediante choque por cuerpo blando.

Para llevar a cabo estos ensayos se realizaron los siguientes trabajos que son comunes para ambos tipos de ensayos:

- ❖ Selección de armaduras pasivas de acero corrugado, para los diámetros nominales más empleados en las obras de construcción:  $\varnothing 12\text{mm}$  y  $\varnothing 16\text{mm}$ .
- ❖ Colocación de armaduras en disposición de cuadrícula, insertándolas tanto en viga prefabricada de hormigón, como en la solera de hormigón de la estructura exterior del Laboratorio de Elementos de Seguridad, para diferentes longitudes de armadura; 100-150-300mm.
- ❖ Selección diferentes energías cinéticas de caída sobre las protecciones de armaduras, con objeto de evaluar la capacidad de resistencia dinámica de estos elementos de seguridad, hasta una altura máxima de caída de 2m (energía 2000 Julios).
- ❖ Reportaje fotográfico y valoración comportamiento mecánico de las protecciones para las diferentes energías de caída, tanto en el caso del choque por cuerpo rígido como por cuerpo blando.

A los efectos de los ensayos realizados, y teniendo en cuenta la distribución de la masa en un cuerpo humano, y que ésta dispone de cierta capacidad de deformabilidad en su impacto contra este tipo de piezas, el comportamiento real de estas piezas plásticas, se ajustan con mayor similitud a las pruebas realizadas mediante choque por cuerpo blando (saco esferocónico).

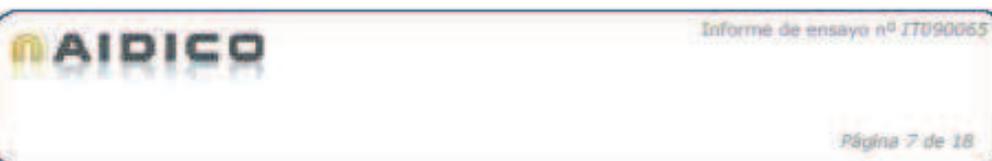
### 4.1 Ensayos de impacto mediante choque por cuerpo rígido

Este ensayo ha consistido en el impacto mediante caída libre de un cuerpo rígido sobre las protecciones dispuestas en las armaduras de acero, y desde una altura predeterminada, con la finalidad de comprobar la resistencia de estos dispositivos frente a la penetración contra los elementos de acero.

El cuerpo rígido que se ha empleado para este ensayo, consiste en una esfera de acero, de 500mm de diámetro y 100kg de peso. Para el manejo y control de la esfera de ensayo, así como la aplicación de la energía cinética de impacto, se ha empleado la grúa torre y su sistema de parametrización, ya que permite la realización y control de todos estos parámetros de ensayo.

Este ensayo es eminentemente más restrictivo que el realizado mediante choque por cuerpo blando, ya que en este caso, la masa rígida no dispone de capacidad de deformabilidad alguna, transmitiéndose la energía de impacto con mayor agresividad que en el caso por cuerpo blando. En todos los impactos el cuerpo rígido se ha colocado centrado sobre las cuatro armaduras con sus correspondientes protecciones ya instaladas, con objeto de garantizar una caída vertical y centrada





sobre las protecciones, situación que no siempre ha sido posible por las variaciones que introduce el propio sistema instantáneo de liberación de la masa rígida de ensayo, habiéndose detectado en algunos casos, que de las cuatro protecciones, casi todo el impacto se ha transmitido a una única protección de las cuatro previstas. También se llevaron a cabo pruebas con la protección sobre una sola armadura, y realizando el impacto sobre ésta, sin embargo, y debido a la complejidad de garantizar la perfecta verticalidad en el impacto, tal y como se ha indicado anteriormente para la disposición de cuatro protecciones, estos ensayos no han resultado significativos, para la evaluación final del comportamiento resistente de estas piezas plásticas.

A continuación se indica una tabla resumen donde se pueden distinguir las seis disposiciones que se ensayaron, y la variación de algunos parámetros de ensayo, tales como "altura de caída", "diámetro armadura", "longitud armadura" y "número de armaduras de acero".

	ALTURA DE CAÍDA	DIÁMETRO ARMADURA	ALTURA DE ARMADURA	Nº DE ARMADURAS	ENERGIA DE IMPACTO
Ensayo 1	1m	12mm	150mm	4	1000J
Ensayo 2	2m	12mm	300mm	4	2000J
Ensayo 3	2m	16mm	300mm	4	2000J
Ensayo 4	3m	12mm	100mm	4	3000J
Ensayo 5	3m	16mm	100mm	4	3000J
Ensayo 6	2,5m	16mm	100mm	4	2500J



Cuerpo rígido:  
Esfera de acero de 100 kg de masa y 50cm de diámetro

Fotografía 2: Disposición Ensayo Cuerpo Rígido

## 4.2 Ensayos de impacto mediante choque por cuerpo blando

Este ensayo ha consistido en el impacto mediante caída libre de un cuerpo blando sobre las protecciones dispuestas en las armaduras de acero, y desde una altura predeterminada, con la finalidad de comprobar la resistencia de estos dispositivos frente a la penetración contra los elementos de acero.

El cuerpo blando que se ha empleado para este ensayo, consiste en un saco esférico de 50kg de peso. Para el manejo y control del saco de ensayo, así como la aplicación de la energía cinética de impacto, se ha empleado la grúa torre y su sistema de parametrización, ya que permite la realización y control de todos estos parámetros de ensayo.

Este ensayo es menos restrictivo que el realizado mediante choque por cuerpo rígido, ya que en este caso, la masa de ensayo tiene gran capacidad de deformación, participando en mayor grado de la absorción de energía durante el impacto.

En todos los impactos el cuerpo blando se ha colocado centrado sobre las cuatro armaduras con sus correspondientes protecciones ya instaladas, con objeto de garantizar una caída vertical y centrada sobre las protecciones, situación que no siempre ha sido posible por las variaciones que introduce el propio sistema instantáneo de liberación de la masa rígida de ensayo, habiéndose detectado en algunos casos, que de las cuatro protecciones, casi todo el impacto se ha transmitido a una única protección de las cuatro previstas.

A continuación se indica una tabla resumen donde se pueden distinguir las cuatro disposiciones que se ensayaron, y la variación de algunos parámetros de ensayo, tales como "altura de caída", "diámetro armadura".

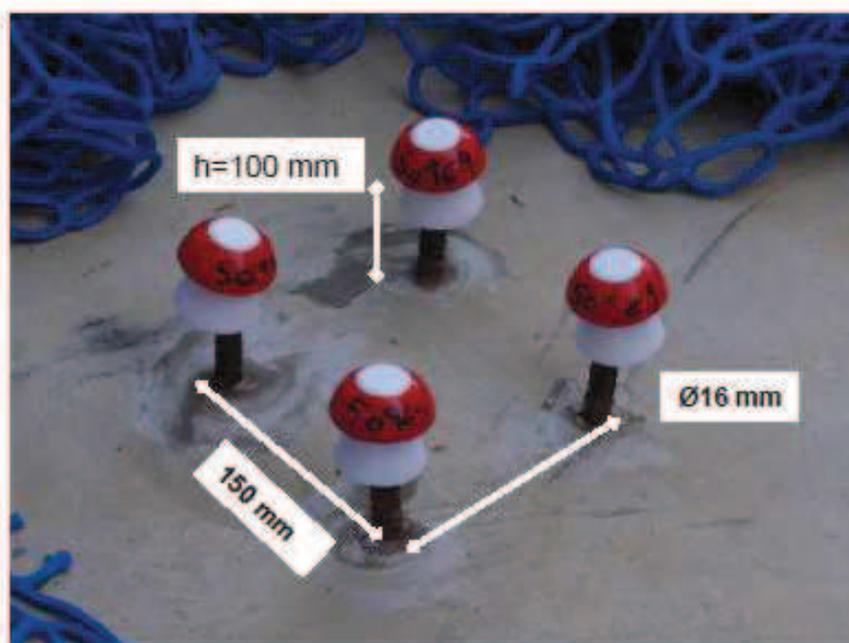
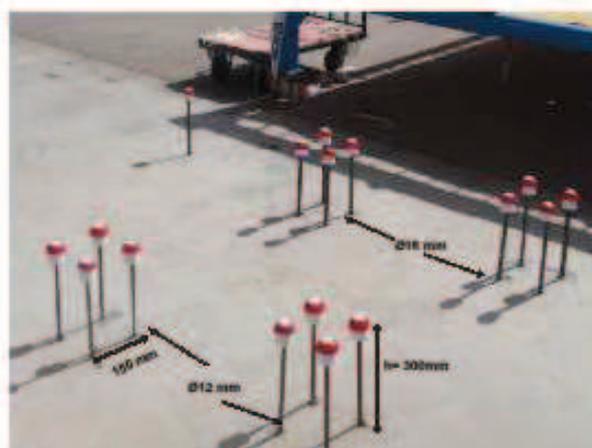
	ALTURA DE CAÍDA	DIÁMETRO ARMADURA	ALTURA DE ARMADURA	Nº DE ARMADURAS	ENERGIA DE IMPACTO
Ensayo 1	4m	12mm	150mm	4	2000J
Ensayo 2	4m	16mm	150mm	4	2000J
Ensayo 3	2m	16mm	150mm	4	1000J
Ensayo 4	5m	16mm	150mm	4	2500J



Cuerpo blando:  
Saco esférico de 50 kg de masa

Fotografía 3: Disposición ensayo mediante choque por cuerpo blando

### Ejemplos disposiciones de ensayo



## 5.- RESULTADOS Y DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO RESISTENTE DE LAS PIEZAS PLÁSTICAS EN LOS DIFERENTES ENSAYOS

A continuación se realiza una descripción y evaluación, del comportamiento estructural detectado en las protecciones de armaduras de acero fabricadas en termoplástico inyectado a partir de los materiales: polietileno, polipropileno y policarbonato, para cada uno de los ensayos dinámicos de resistencia aplicados, y con las disposiciones que expresamente se señalan, realizando la diferenciación fundamental de ensayo mediante impacto por cuerpo rígido y cuerpo blando.

### 5.1 Ensayo dinámico de impacto mediante choque por cuerpo rígido

**Ensayo 1 ( $H_{caída}=1m$ ;  $\varnothing_{armadura}=12mm$ ;  $h_{armadura}=150mm$ )**

Tras el impacto realizado para una energía cinética de caída de 1000 julios, los protectores de armadura con el refuerzo de policarbonato resisten perfectamente este nivel de carga dinámica aplicada, sin que se produzca perforación de la armadura a través de las piezas plásticas.

**Ensayo 2 ( $H_{caída}=2m$ ;  $\varnothing_{armadura}=12mm$ ;  $h_{armadura}=300mm$ )**

En el segundo ensayo realizado, aumentando al doble la carga dinámica aplicada, que en términos de energía cinética acumulada durante la caída supone un impacto de 2000 julios, nuevamente se comprueba que las protecciones son capaces de resistir dicho nivel de impacto, ya que en ninguna de las cuatro protecciones afectadas, se ha detectado una perforación de las armaduras de acero sobre la parte superior de las piezas ni lateralmente. Observándose únicamente fisuras en la parte superior de las piezas justo en su zona de contacto con la esfera de impacto, resultando únicamente una afección superficial sobre la pieza blanca de polipropileno, pero en ningún momento una penetración total de la pieza completa atravesando el refuerzo interior de policarbonato.

**Ensayo 3 ( $H_{caída}=2m$ ;  $\varnothing_{armadura}=16mm$ ;  $h_{armadura}=300mm$ )**

Comportamiento similar al caso anterior, a pesar de que en este ensayo las armaduras empleadas son de diámetro 16mm y la superficie de contacto para resistir el mismo nivel de impacto es superior.

**Ensayo 4 ( $H_{caída}=3m$ ;  $\varnothing_{armadura}=12mm$ ;  $h_{armadura}=100mm$ )**

A pesar del importante nivel de impacto aplicado, energía de caída de 3000 julios, con objeto de evaluar si las piezas plásticas objeto de ensayo, disponen de un factor de seguridad respecto a la máxima altura de caída que debería permitirse y que sería de 2m, nuevamente se ha comprobado que no se produce penetración total de las armaduras a través de las protecciones. Esta situación se ve beneficiada, teniendo en cuenta que parte de la energía de impacto es absorbida por la propia deformación que sufren las armaduras de acero, ya que tienen una esbeltez considerable, debido a que se han previsto con una longitud efectiva de 30cm respecto a la base de hormigón, precisamente teniendo en cuenta este efecto.

**Ensayo 5 ( $H_{caída}=3m$ ;  $\varnothing_{armadura}=16mm$ ;  $h_{armadura}=100mm$ )**

En este nuevo ensayo, sí que se produce penetración total de las armaduras de acero sobre las protecciones plásticas. La importante magnitud de impacto aplicado, se ve reflejado en el estado final de las propias armaduras de acero, como evidencian las imágenes incluidas en el reportaje fotográfico del presente informe.



**Ensayo 6 ( $H_{caída}=2.5m$ ;  $\varnothing_{armadura}=16mm$ ;  $h_{armadura}=100mm$ )**

Para una altura de caída de 2.5m, y para el diámetro de armadura  $\varnothing 16mm$ , las protecciones no han sido capaces de absorber el nivel de impacto aplicado, detectándose una penetración total de las armaduras a través de la protección, y roturas longitudinales totales de las protecciones.

**5.2 Ensayo dinámico de impacto mediante choque por cuerpo blando****Ensayo 1 ( $H_{caída}=4m$ ;  $\varnothing_{armadura}=12mm$ ;  $h_{armadura}=150mm$ )**

Para una energía cinética de impacto de 2000 julios, que correspondería a la caída de una persona sobre las protecciones desde una altura aproximada de 2m (valor límite a priori para estas protecciones) se detecta el siguiente comportamiento:

- De las cuatro protecciones afectadas en el impacto, y teniendo en cuenta la dificultad de aplicación de la carga perfectamente centrada sobre las cuatro, son tres de ellas, a las que principalmente se les transmiten los esfuerzos dinámicos, comprobándose en todos los casos, que no existe penetración de las armaduras sobre la protección de termoplástico, pero sí que se produce la perforación de la lona superficial del saco de impacto, introduciéndose completamente una de las protecciones plásticas en el interior del saco esférico.
- Desplazamiento relativo de la pieza blanca de polipropileno sobre la pieza roja de polietileno provocando esta situación un efecto mayor de punzonamiento sobre el cuerpo blando.

**Ensayo 2 ( $H_{caída}=4m$ ;  $\varnothing_{armadura}=16mm$ ;  $h_{armadura}=150mm$ )**

Del mismo modo que en el caso anterior, pero en esta ocasión con armaduras de acero de diámetro nominal  $\varnothing 16mm$ , se observa un comportamiento similar, sin que se produzca una perforación de los elementos de acero sobre las protecciones plásticas, pero sí nuevamente una penetración en el saco de impacto de dos de las cuatro protecciones plásticas, motivado por el nivel de impacto aplicado y por el desplazamiento relativo que sufren las piezas rojas de polietileno respecto a las blancas de polipropileno aumentando el efecto de punzonamiento.

**Ensayo 3 ( $H_{caída}=2m$ ;  $\varnothing_{armadura}=16mm$ ;  $h_{armadura}=150mm$ )**

En este caso para una altura de caída de 2m del saco esférico de 50kg, que correspondería a una caída de 1m para una masa de 100kg, que podría ser una situación habitual de caída al mismo nivel en una obra, teniendo en cuenta que el centro de gravedad de una persona se sitúa aproximadamente a 1m respecto al nivel inferior. Se ha comprobado que todas las protecciones que han sufrido este nivel de impacto han resistido sin que se produzca una perforación de las armaduras de acero ni fisuras parciales, pero se ha vuelto a producir la penetración de una protección en su totalidad en el interior del saco de impacto.



**Ensayo 4 ( $H_{caída}=5m$ ;  $\varnothing_{armadura}=16mm$ ;  $h_{armadura}=150mm$ )**

Por último realizando un ensayo para una magnitud de energía cinética de caída de 2500 julios, situación por encima del límite máximo ( $\pm 2m$  de caída) previstos para estas protecciones, se observa el siguiente comportamiento estructural:

- Penetración completa en el saco de impacto de dos de las cuatro piezas en la zona de influencia del impacto, quedando al que en los casos anteriores, las protecciones plásticas incrustadas en el interior de la masa.
- No perforación de las protecciones plásticas por las armaduras de acero, teniendo en cuenta, la capacidad de absorber esfuerzos dinámicos que le confiere el refuerzo interior de policarbonato, y que parte del impacto es absorbido por la propia deformabilidad que presenta el cuerpo blando.



## 6.- REPORTAJE FOTOGRÁFICO

### 6.1 Ensayo dinámico de impacto mediante choque por cuerpo rígido

Ensayo 1 ( $H_{caída}=1m$ ;  $\varnothing_{armadura}=12mm$ ;  $h_{armadura}=150mm$ )

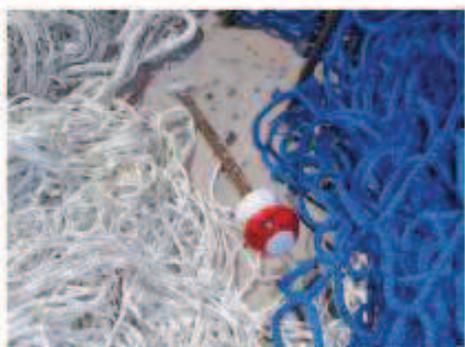


Fotografía 4: Disposición inicial de ensayo.



Fotografía 5: Esfera de ensayo en posición inicial.

Ensayo 2 ( $H_{caída}=2m$ ;  $\varnothing_{armadura}=12mm$ ;  $h_{armadura}=300mm$ )



Fotografía 6: Detalle del estado final de una de las protecciones tras sufrir el impacto



Fotografía 7: Ejemplo protección en buen estado tras el impacto

**Ensayo 3 ( $H_{\text{caída}}=2m$ ,  $\phi_{\text{armadura}}=16mm$ ,  $h_{\text{armadura}}=300mm$ )**



**Fotografía 8:** Estado de las protecciones tras el ensayo. Las protecciones permanecen íntegras tras impacto.



**Fotografía 9:** Detalle de las fisuras parciales apreciadas en una de las protecciones tras impacto.

**Ensayo 4 ( $H_{\text{caída}}=3m$ ,  $\phi_{\text{armadura}}=12mm$ ,  $h_{\text{armadura}}=100mm$ )**



**Fotografía 10:** Disposición inicial de ensayo.



**Fotografía 11:** Detalle de las protecciones tras el impacto.

Ensayo 5 ( $H_{caída} = 3m$ ;  $\varnothing_{armadura} = 16mm$ ;  $h_{armadura} = 100mm$ )



Fotografía 12: Perforación de las protecciones tras el impacto.



Fotografía 13: Detalle del estado de una de las protecciones que ha sufrido el impacto

Ensayo 6 ( $H_{caída} = 2.5m$ ;  $\varnothing_{armadura} = 16mm$ ;  $h_{armadura} = 100mm$ )



Fotografía 14: Disposición inicial de ensayo.



Fotografía 15: Perforaciones totales y roturas longitudinales de las protecciones

**6.2 Ensayo dinámico de impacto mediante choque por cuerpo blando**

Ensayo 1 ( $H_{caída}=4m$ ;  $\varnothing_{armadura}=12mm$ ;  $h_{armadura}=150mm$ )



Fotografía 16: Disposición inicial de ensayo.



Fotografía 17: Estado de la protección que quedó introducida en el interior del saco. Desplazamiento relativo pieza blanca y roja.

Ensayo 2 ( $H_{caída}=4m$ ;  $\varnothing_{armadura}=16mm$ ;  $h_{armadura}=150mm$ )



Fotografía 18: Disposición final tras impacto.



Fotografía 19: Estado de las dos protecciones que quedaron en el interior del saco tras el impacto.

Ensayo 3 ( $H_{\text{caída}}=2\text{m}$ ;  $\varnothing_{\text{armadura}}=16\text{mm}$ ;  $h_{\text{armadura}}=150\text{mm}$ )



Fotografía 20: Estado de las protecciones tras el impacto.



Fotografía 21: La cuarta protección atraviesa el saco.

Ensayo 4 ( $H_{\text{caída}}=5\text{m}$ ;  $\varnothing_{\text{armadura}}=16\text{mm}$ ;  $h_{\text{armadura}}=150\text{mm}$ )



Fotografía 22: Disposición final de ensayo, varias protecciones incrustadas en el saco.



Fotografía 23: Detalle del estado de una de las protecciones que quedó en el interior del saco. No hay perforación de la armadura de acero a través de la pieza plástica.

*AIDICO responde únicamente de los resultados sobre los métodos de análisis empleados consignados en este documento y referidos, exclusivamente, a los materiales o muestras que se indican en el mismo y que queden en su poder, limitando a éstos la responsabilidad profesional y jurídica del centro. Salvo mención expresa, las muestras han sido libremente elegidas y enviadas por el solicitante.*

*Este documento resume los resultados obtenidos en las pruebas descritas anteriormente y solicitadas por la empresa peticionaria como autocontrol propio del producto, sin tener carácter alguno de certificación*

*Los resultados del presente Informe se consideran propiedad del peticionario y, sin autorización previa, AIDICO se abstendrá de comunicarlos a un tercero.*

*AIDICO no se hace responsable, en ningún caso, de la interpretación o uso indebido que pueda hacerse de este documento, cuya reproducción parcial sin la autorización escrita de AIDICO está totalmente prohibida.*



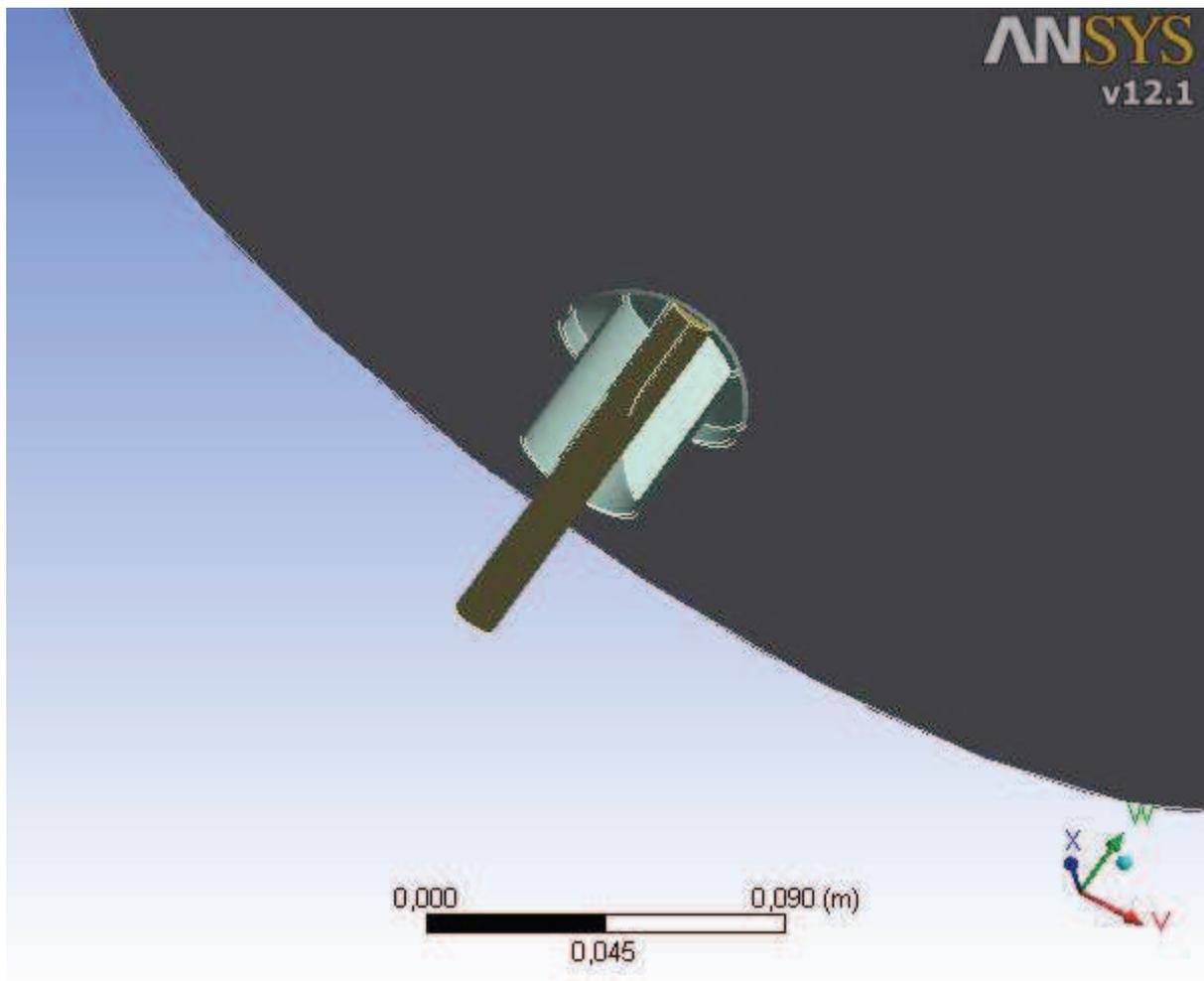
## ANEXO 4.- INFORMES DE LA MODELIZACIÓN

Se adjunta un ejemplo de informe de la modelización realizada en Ansys®.



### Project

First Saved	Sunday, February 13, 2011
Last Saved	Friday, April 20, 2012
Product Version	12.1 Release



# Contents

- [Units](#)
- [Model \(A4\)](#)
  - [Geometry](#)
    - [Parts](#)
  - [Coordinate Systems](#)
  - [Connections](#)
    - [Contact Regions](#)
    - [Body Interactions](#)
      - [Body Interaction](#)
  - [Mesh](#)
    - [Mesh Controls](#)
  - [Explicit Dynamics \(A5\)](#)
    - [Initial Conditions](#)
      - [Initial Condition](#)
    - [Analysis Settings](#)
    - [Standard Earth Gravity](#)
    - [Fixed Support](#)
    - [Solution \(A6\)](#)
      - [Solution Information](#)
        - [Internal Energy](#)
      - [Results](#)
- [Material Data](#)
  - [Polietileno](#)
  - [Structural Steel](#)
  - [Gelatina](#)

## Units

**TABLE 1**

Unit System	Metric (m, kg, N, s, V, A) Degrees rad/s Celsius
Angle	Degrees
Rotational Velocity	rad/s
Temperature	Celsius

## Model (A4)

### Geometry

**TABLE 2**  
**Model (A4) > Geometry**

Object Name	<i>Geometry</i>
State	Fully Defined
<b>Definition</b>	
Source	C:\Users\Wsobri\Documents\Montaje seta 3_files\dp0\SYS\DM\SYS.agdb
Type	DesignModeler
Length Unit	Meters



Display Style	Part Color
<b>Bounding Box</b>	
Length X	0,4 m
Length Y	0,76603 m
Length Z	0,4 m
<b>Properties</b>	
Volume	8,3466e-002 m <sup>3</sup>
Mass	100,23 kg
Scale Factor Value	1,
<b>Statistics</b>	
Bodies	3
Active Bodies	3
Nodes	45762
Elements	53353
Mesh Metric	Skewness
Min	8,8246576729677E-03
Max	0,688322271075654
Average	0,241247145931089
Standard Deviation	0,127884665742324
<b>Preferences</b>	
Import Solid Bodies	Yes
Import Surface Bodies	Yes
Import Line Bodies	No
Parameter Processing	Yes
Personal Parameter Key	DS
CAD Attribute Transfer	No
Named Selection Processing	No
Material Properties Transfer	No
CAD Associativity	Yes
Import Coordinate Systems	No
Reader Save Part File	No
Import Using Instances	Yes
Do Smart Update	No
Attach File Via Temp File	Yes
Temporary Directory	C:\Users\Feanor\AppData\Roaming\Ansys\v121
Analysis Type	3-D
Mixed Import Resolution	None
Enclosure and Symmetry Processing	Yes

**TABLE 3**  
**Model (A4) > Geometry > Parts**

Object Name	Seta 3 espesor 12-1	Barra-1	Cilindro gelatina-1
State	Meshed		
<b>Graphics Properties</b>			
Visible	Yes		
Transparency	1		
<b>Definition</b>			
Suppressed	No		
Stiffness Behavior	Flexible		
Coordinate System	Default Coordinate System		
Reference Temperature	By Environment		



Material			
Assignment	Polietileno	Structural Steel	Gelatina
Bounding Box			
Length X	5,4e-002 m	1,2e-002 m	0,4 m
Length Y	5,4e-002 m	1,e-001 m	0,664 m
Length Z	5,4e-002 m	1,2e-002 m	0,4 m
Properties			
Volume	1,4057e-005 m <sup>3</sup>	1,131e-005 m <sup>3</sup>	8,3441e-002 m <sup>3</sup>
Mass	1,341e-002 kg	8,8781e-002 kg	100,13 kg
Centroid X	1,3214e-003 m	1,3224e-003 m	1,3434e-003 m
Centroid Y	8,0132e-002 m	5,0359e-002 m	0,43439 m
Centroid Z	-2,1804e-006 m	6,2288e-007 m	3,234e-018 m
Moment of Inertia Ip1	4,7199e-006 kg·m <sup>2</sup>	7,4409e-005 kg·m <sup>2</sup>	4,6518 kg·m <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip2	4,3407e-006 kg·m <sup>2</sup>	1,5822e-006 kg·m <sup>2</sup>	1,9828 kg·m <sup>2</sup>
Moment of Inertia Ip3	4,7189e-006 kg·m <sup>2</sup>	7,4408e-005 kg·m <sup>2</sup>	4,6522 kg·m <sup>2</sup>
Statistics			
Nodes	5295	1122	39345
Elements	15649	864	36840
Mesh Metric	Skewness		
Min	8,8246576729677E-03	6,74121961458911E-02	2,31148243596237E-02
Max	0,688322271075654	0,416509466040744	0,608740811021731
Average	0,323999788751726	0,272902162409625	0,205352845123879
Standard Deviation	0,11559769791835	8,14627781772174E-02	0,116759879037321

## Coordinate Systems

**TABLE 4**  
**Model (A4) > Coordinate Systems > Coordinate System**

Object Name	<i>Global Coordinate System</i>	<i>Coordinate System</i>
State	Fully Defined	
Definition		
Type	Cartesian	
Origin		
Origin X	0, m	1,3214e-003 m
Origin Y	0, m	0,12013 m
Origin Z	0, m	-2,1804e-006 m
Define By	Global Coordinates	
Location	Defined	
Directional Vectors		
X Axis Data	[ 1, 0, 0, ]	
Y Axis Data	[ 0, 1, 0, ]	
Z Axis Data	[ 0, 0, 1, ]	
Principal Axis		
Axis	X	
Define By	Global X Axis	
Orientation About Principal Axis		
Axis	Y	
Define By	Default	
Transformations		
Base Configuration	Absolute	
Transformed Configuration	[ 1,3214e-003 0,12013 -2,1804e-006 ]	



## Connections

**TABLE 5**  
**Model (A4) > Connections**

Object Name	<i>Connections</i>
State	Fully Defined
<b>Auto Detection</b>	
Generate Contact On Update	Yes
Tolerance Type	Slider
Tolerance Slider	0,
Tolerance Value	2,3807e-003 m
Face/Face	Yes
Face/Edge	No
Edge/Edge	No
Priority	Include All
Group By	Bodies
Search Across	Bodies
<b>Transparency</b>	
Enabled	Yes

**TABLE 6**  
**Model (A4) > Connections > Contact Regions**

Object Name	<i>Frictionless - Seta 3 espesor 12-1 To Barra-1</i>	<i>Frictionless - Seta 3 espesor 12-1 To Cilindro gelatina-1</i>
State	Fully Defined	
<b>Scope</b>		
Scoping Method	Geometry Selection	
Contact	5 Faces	1 Face
Target	2 Faces	1 Face
Contact Bodies	Seta 3 espesor 12-1	
Target Bodies	Barra-1	Cilindro gelatina-1
<b>Definition</b>		
Type	Frictionless	
Scope Mode	Automatic	
Behavior	Symmetric	
Suppressed	No	

**TABLE 7**  
**Model (A4) > Connections > Body Interactions**

Object Name	<i>Body Interactions</i>
State	Fully Defined
<b>Advanced</b>	
Contact Detection	Trajectory
Formulation	Penalty
Body Self Contact	Yes
Element Self Contact	Yes
Tolerance	0,2



**TABLE 8**  
**Model (A4) > Connections > Body Interactions > Body Interaction**

Object Name	<i>Body Interaction</i>
State	Fully Defined
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	All Bodies
<b>Definition</b>	
Type	Frictionless
Suppressed	No

## Mesh

**TABLE 9**  
**Model (A4) > Mesh**

Object Name	<i>Mesh</i>
State	Solved
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Explicit
Relevance	0
<b>Sizing</b>	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Medium
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Medium
Minimum Edge Length	1,2076e-003 m
<b>Inflation</b>	
Use Automatic Tet Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
<b>Advanced</b>	
Shape Checking	Explicit
Element Midside Nodes	Dropped
Straight Sided Elements	
Number of Retries	Default (4)
Rigid Body Behavior	Full Mesh
Mesh Morphing	Disabled
<b>Pinch</b>	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate on Refresh	No
<b>Statistics</b>	
Nodes	45762
Elements	53353
Mesh Metric	Skewness
Min	8,8246576729677E-03



Max	0,688322271075654
Average	0,241247145931089
Standard Deviation	0,127884665742324

**TABLE 10**  
**Model (A4) > Mesh > Mesh Controls**

Object Name	Sweep Method	Patch Independent	Body Sizing
State	Fully Defined		
<b>Scope</b>			
Scoping Method	Geometry Selection		
Geometry	1 Body		
<b>Definition</b>			
Suppressed	No		
Method	Sweep	Tetrahedrons	
Element Midside Nodes	Use Global Setting		
Src/Trg Selection	Manual Source		
Source	1 Face		
Target	Program Controlled		
Free Face Mesh Type	Quad/Tri		
Type	Number of Divisions		Sphere of Influence
Sweep Num Divs	60		
Sweep Bias Type	No Bias		
Element Option	Solid		
Algorithm		Patch Independent	
Sphere Center			Coordinate System
Sphere Radius			4,e-002 m
Element Size			3,5e-003 m
<b>Advanced</b>			
Defined By		Max Element Size	
Max Element Size		2,5e-003 m	
Define Defeaturing Tolerance		No	
Curvature and Proximity Refinement		No	
Minimum Edge Length		1,2076e-003 m	
<b>Sphere</b>			
Origin X			1,3214e-003 m
Origin Y			0,12013 m
Origin Z			-2,1804e-006 m

## Explicit Dynamics (A5)

**TABLE 11**  
**Model (A4) > Analysis**

Object Name	<i>Explicit Dynamics (A5)</i>
State	Solved
<b>Definition</b>	
Physics Type	Structural
Analysis Type	Explicit Dynamics
Solver Target	AUTODYN
<b>Options</b>	
Environment Temperature	22, °C
Generate Input Only	No



**TABLE 12**  
**Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Initial Conditions**

Object Name	<i>Initial Conditions</i>
State	Fully Defined

**TABLE 13**  
**Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Initial Conditions > Initial Condition**

Object Name	<i>Pre-Stress (None)</i>	<i>Velocity</i>
State	Fully Defined	
<b>Definition</b>		
Pre-Stress Environment	None	
Input Type		Velocity
Define By		Components
Coordinate System		Global Coordinate System
X Component		0, m/s
Y Component		-10, m/s
Z Component		0, m/s
Suppressed		No
<b>Scope</b>		
Scoping Method		Geometry Selection
Geometry		1 Body

**TABLE 14**  
**Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Analysis Settings**

Object Name	<i>Analysis Settings</i>
State	Fully Defined
<b>Step Controls</b>	
Resume From Cycle	0
Maximum Number of Cycles	1e+07
End Time	3,e-003 s
Maximum Energy Error	0,1
Reference Energy Cycle	0
Initial Time Step	Program Controlled
Minimum Time Step	Program Controlled
Maximum Time Step	Program Controlled
Time Step Safety Factor	0,9
Automatic Mass Scaling	No
<b>Solver Controls</b>	
Precision	Single
Solve Units	mm, mg, ms
Beam Solution Type	Truss
Beam Time Step Safety Factor	0,9
Hex Integration Type	Exact
Shell Sublayers	3
Shell Shear Correction Factor	0,8333
Shell BWC Warp Correction	Yes
Shell Thickness Update	Nodal
Tet Pressure Integration	Average Nodal
Shell Inertia Update	Recompute
Density Update	Program Controlled
Minimum Velocity	1,e-006 m/s



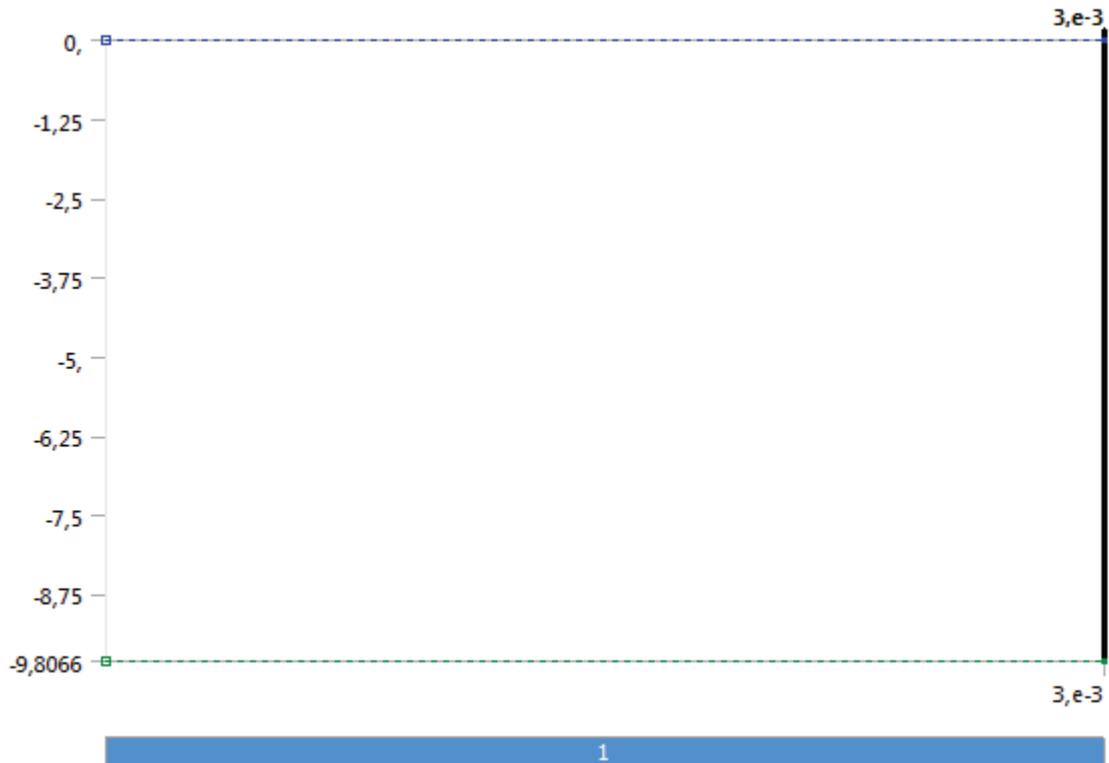
Maximum Velocity	1,e+010 m/s
Radius Cutoff	1,e-003
<b>Damping Controls</b>	
Linear Artificial Viscosity	0,2
Quadratic Artificial Viscosity	1.
Linear Viscosity in Expansion	No
Hourglass Damping	AUTODYN Standard
Viscous Coefficient	0,1
Static Damping	0.
<b>Erosion Controls</b>	
On Geometric Strain Limit	Yes
Geometric Strain Limit	1,5
On Material Failure	No
On Minimum Element Time Step	No
Retain Inertia of Eroded Material	Yes
<b>Output Controls</b>	
Save Results on	Equally Spaced Time Points
Number of points	20
Save Restart Files on	Equally Spaced Time Points
Number of points	5
Save Result Tracker Data on	Cycles
Cycles	1
Save Solution Output on	Cycles
Cycles	100
<b>Analysis Data Management</b>	
Solver Files Directory	D:\Xeon\Proye final\Proye\Montaje seta 3 definitivo_files\dp0\SYS\MECH\
Scratch Solver Files Directory	

**TABLE 15**  
**Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Accelerations**

Object Name	Standard Earth Gravity
State	Fully Defined
<b>Scope</b>	
Geometry	All Bodies
<b>Definition</b>	
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	-0, m/s <sup>2</sup>
Y Component	-9,8066 m/s <sup>2</sup>
Z Component	-0, m/s <sup>2</sup>
Suppressed	No
Direction	-Y Direction



**FIGURE 1**  
**Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Standard Earth Gravity**



**TABLE 16**  
**Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Loads**

Object Name	<i>Fixed Support</i>
State	Fully Defined
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
<b>Definition</b>	
Type	Fixed Support
Suppressed	No

## **Solution (A6)**

**TABLE 17**  
**Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution**

Object Name	<i>Solution (A6)</i>
State	Solved

**TABLE 18**  
**Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Solution Information**

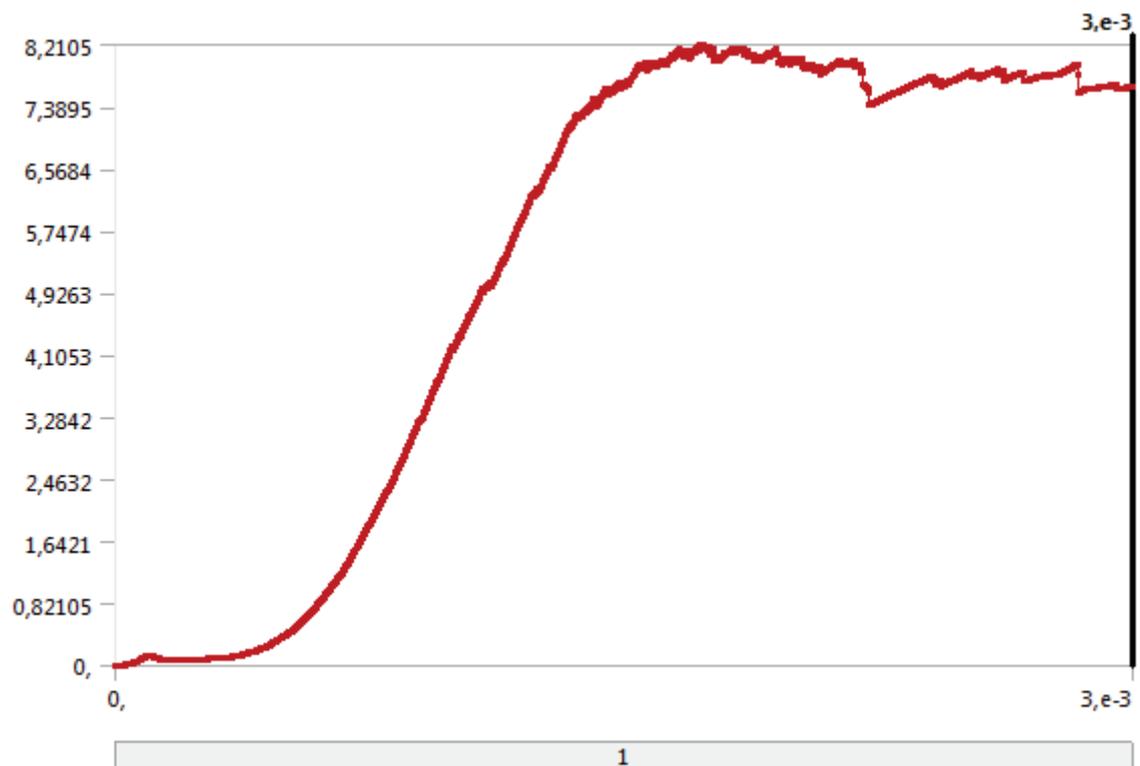
Object Name	<i>Solution Information</i>
State	Solved
<b>Solution Information</b>	
Solution Output	Solver Output
Update Interval	2,5 s
Display Points	All
Display Filter During Solve	Yes



**TABLE 19**  
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Solution Information > Result Charts

Object Name	<i>Internal Energy</i>
State	Solved
<b>Definition</b>	
Location Method	Geometry Selection
Type	Internal Energy
<b>Scope</b>	
Geometry	1 Body
<b>Results</b>	
Minimum	0, J
Maximum	8,2105 J
<b>Filter</b>	
Type	None

**FIGURE 2**  
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Solution Information > Internal Energy



**TABLE 20**  
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Results

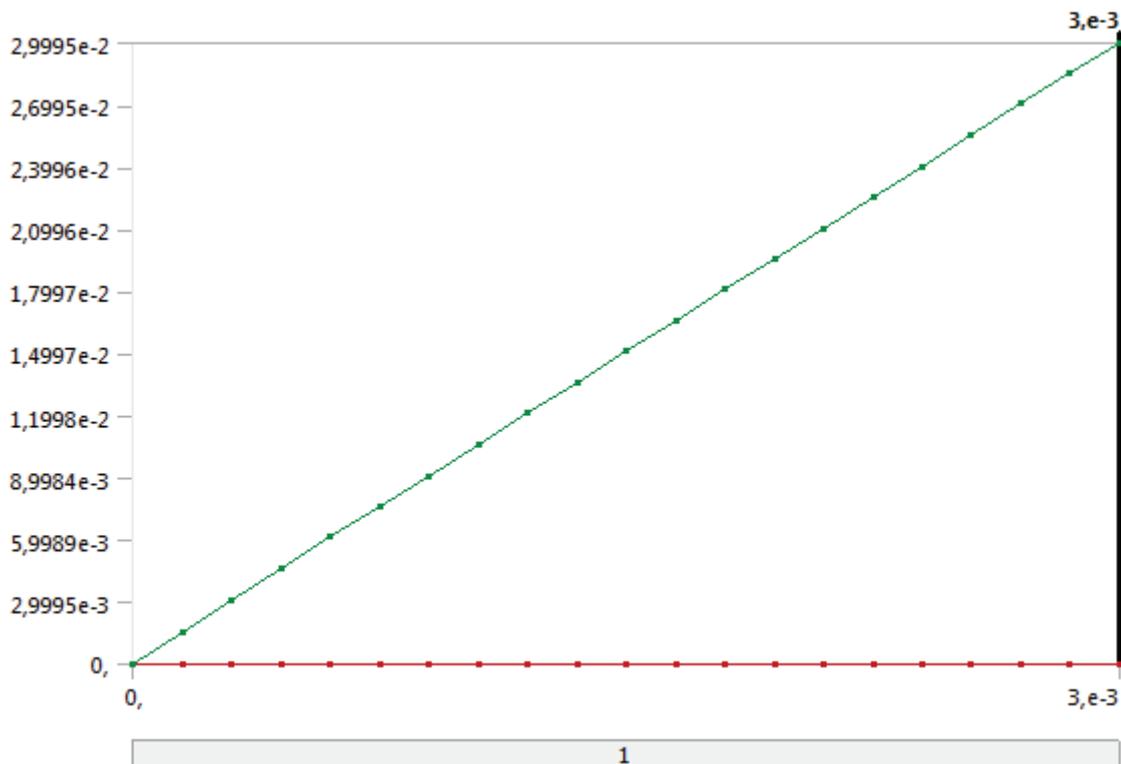
Object Name	<i>Total Deformation</i>	<i>Equivalent Plastic Strain</i>	<i>Equivalent Stress</i>	<i>Shear Elastic Strain</i>	<i>Shear Stress</i>
State	Solved				
<b>Scope</b>					
Scoping Method	Geometry Selection				
Geometry	All Bodies				



Definition					
Type	Total Deformation	Equivalent Plastic Strain	Equivalent (von-Mises) Stress	Shear Elastic Strain	Shear Stress
By	Time				
Display Time	Last				2,812e-003 s
Calculate Time History	Yes				
Identifier					
Orientation				XY Plane	
Coordinate System				Global Coordinate System	
Results					
Minimum	0, m	0, m/m	0, Pa	-1,9649 m/m	-3,3697e+007 Pa
Maximum	2,9995e-002 m	3,0455 m/m	1,3367e+008 Pa	1,8685 m/m	2,9243e+007 Pa
Minimum Occurs On	Barra-1	Seta 3 espesor 12-1	Cilindro gelatina-1	Seta 3 espesor 12-1	Barra-1
Maximum Occurs On	Cilindro gelatina-1	Seta 3 espesor 12-1	Barra-1	Seta 3 espesor 12-1	Barra-1
Minimum Value Over Time					
Minimum	0, m	0, m/m	0, Pa	-1,9708 m/m	-3,3697e+007 Pa
Maximum	0, m	0, m/m	43,891 Pa	0, m/m	0, Pa
Maximum Value Over Time					
Minimum	0, m	0, m/m	0, Pa	0, m/m	0, Pa
Maximum	2,9995e-002 m	3,0458 m/m	3,1722e+008 Pa	1,8909 m/m	2,9243e+007 Pa
Information					
Time	3,e-003 s				2,85e-003 s
Set	21				20
Integration Point Results					
Display Option	Averaged				



**FIGURE 3**  
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Total Deformation

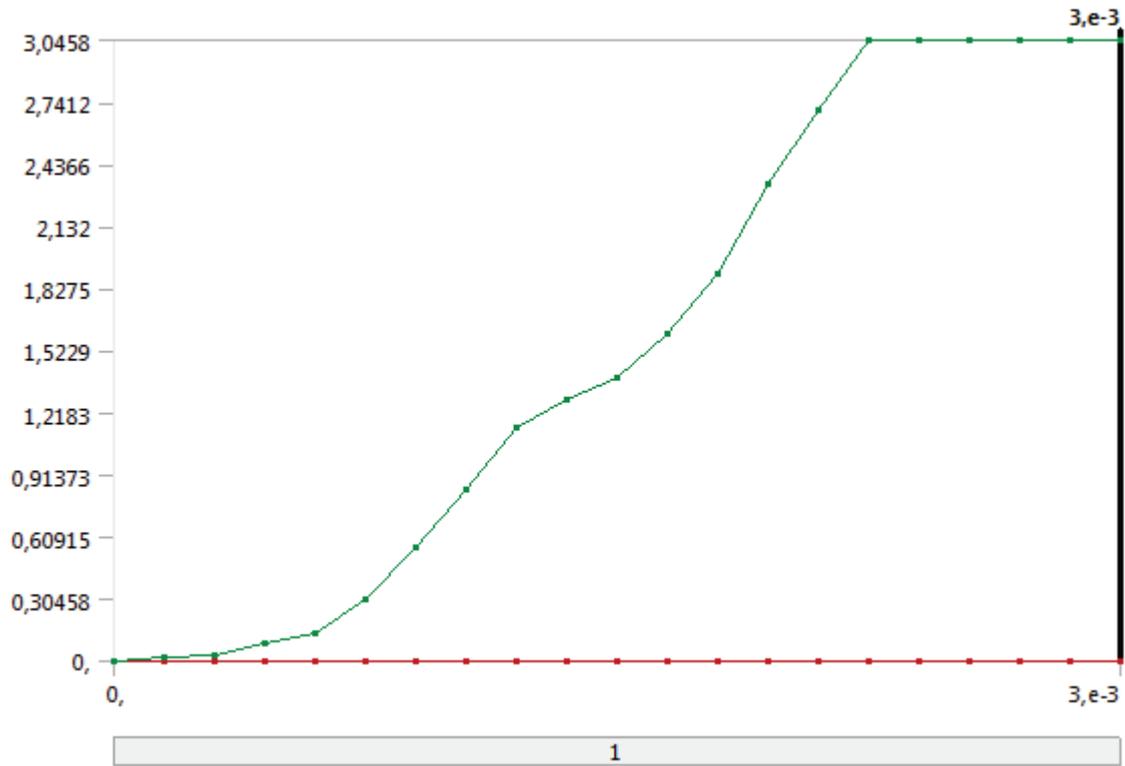


**TABLE 21**  
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Total Deformation

Time [s]	Minimum [m]	Maximum [m]
0,		0,
1,5005e-004		1,5759e-003
3,0004e-004		3,1157e-003
4,5001e-004		4,6171e-003
6,0006e-004		6,1276e-003
7,5006e-004		7,617e-003
9,0004e-004		9,1127e-003
1,05e-003		1,0606e-002
1,2e-003		1,2121e-002
1,35e-003		1,3628e-002
1,5e-003	0,	1,5124e-002
1,65e-003		1,6621e-002
1,8e-003		1,8117e-002
1,95e-003		1,9598e-002
2,1e-003		2,1071e-002
2,25e-003		2,2545e-002
2,4e-003		2,4045e-002
2,55e-003		2,5553e-002
2,7e-003		2,7055e-002
2,85e-003		2,8537e-002
3,0e-003		2,9995e-002



**FIGURE 4**  
**Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Equivalent Plastic Strain**

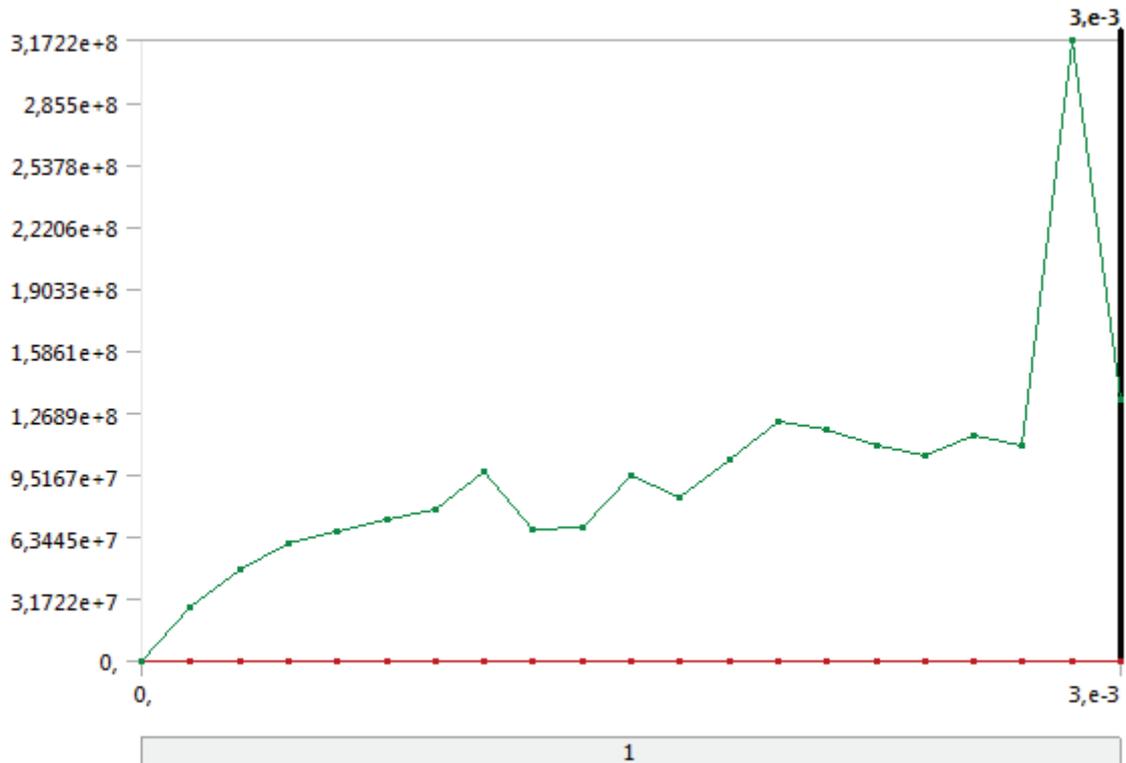


**TABLE 22**  
**Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Equivalent Plastic Strain**

Time [s]	Minimum [m/m]	Maximum [m/m]
0,		0,
1,5005e-004		1,845e-002
3,0004e-004		3,1135e-002
4,5001e-004		8,8021e-002
6,0006e-004		0,14129
7,5006e-004		0,30529
9,0004e-004		0,55748
1,05e-003		0,84152
1,2e-003		1,1422
1,35e-003		1,2838
1,5e-003	0,	1,3951
1,65e-003		1,6059
1,8e-003		1,9029
1,95e-003		2,3384
2,1e-003		2,7004
2,25e-003		3,0458
2,4e-003		3,0458
2,55e-003		3,0458
2,7e-003		3,0458
2,85e-003		3,0458
3,e-003		3,0458



**FIGURE 5**  
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress

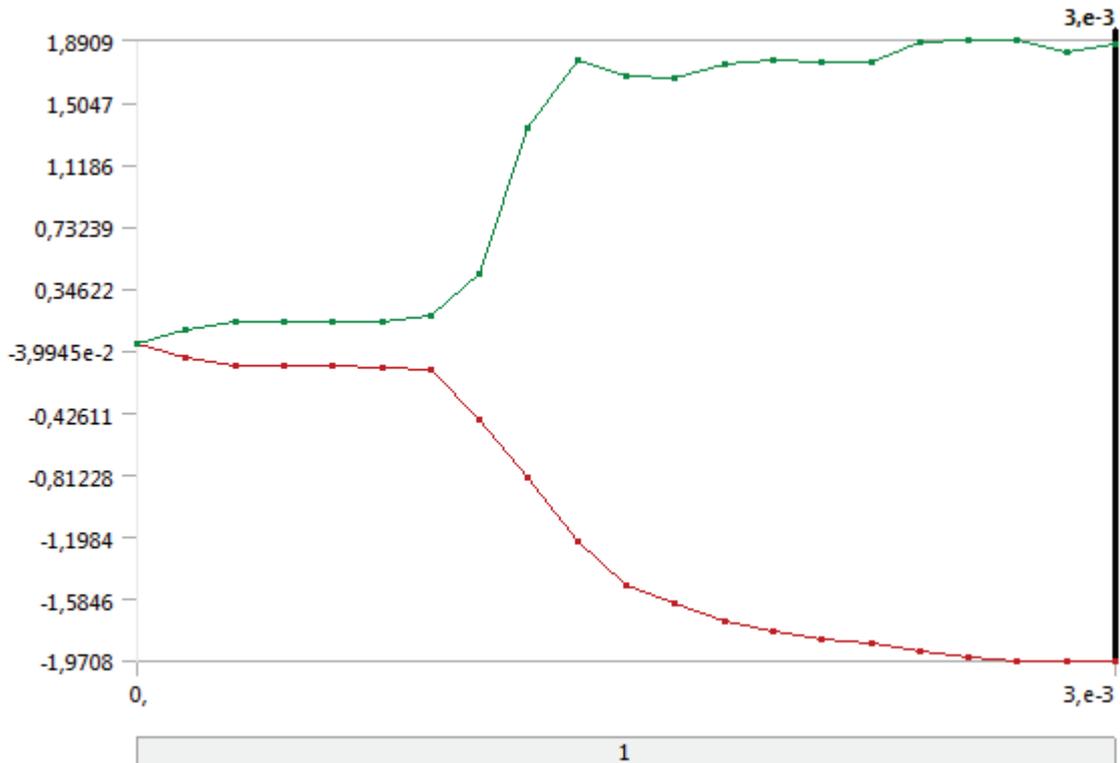


**TABLE 23**  
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress

Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]
0,		0,
1,5005e-004	0,	2,7657e+007
3,0004e-004		4,7229e+007
4,5001e-004		6,0195e+007
6,0006e-004		1,9599
7,5006e-004	2,9374	7,2196e+007
9,0004e-004	4,6803	7,8001e+007
1,05e-003	6,2606	9,6909e+007
1,2e-003	8,7411	6,7032e+007
1,35e-003	20,451	6,8121e+007
1,5e-003	31,674	9,526e+007
1,65e-003	41,829	8,3512e+007
1,8e-003	37,752	1,0273e+008
1,95e-003	39,115	1,2241e+008
2,1e-003	43,891	1,181e+008
2,25e-003	36,096	1,0987e+008
2,4e-003	23,776	1,0499e+008
2,55e-003	17,584	1,1535e+008
2,7e-003	17,744	1,1053e+008
2,85e-003	0,	3,1722e+008
3,e-003		1,3367e+008



**FIGURE 6**  
**Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Shear Elastic Strain**

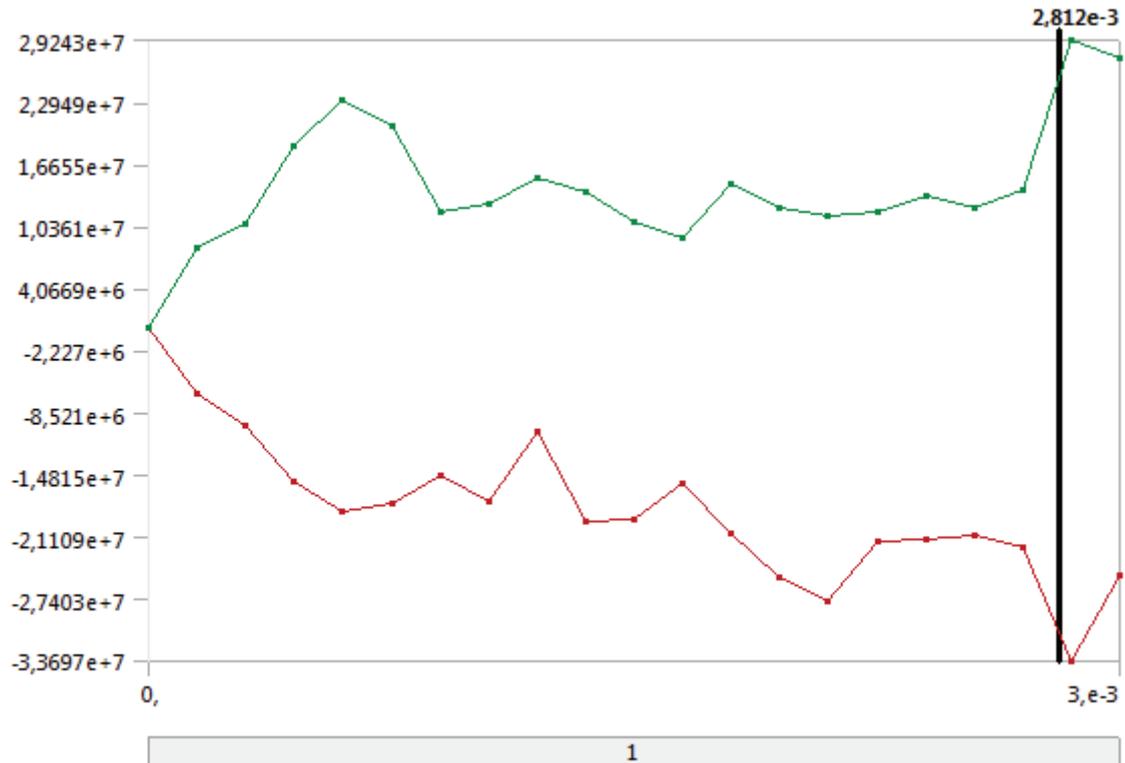


**TABLE 24**  
**Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Shear Elastic Strain**

Time [s]	Minimum [m/m]	Maximum [m/m]
0,	0,	0,
1,5005e-004	-8,7067e-002	8,4576e-002
3,0004e-004	-0,12915	0,13563
4,5001e-004	-0,13775	0,14427
6,0006e-004	-0,13857	0,14136
7,5006e-004	-0,14271	0,1366
9,0004e-004	-0,15951	0,17999
1,05e-003	-0,46474	0,43321
1,2e-003	-0,825	1,3458
1,35e-003	-1,2243	1,7618
1,5e-003	-1,4974	1,6669
1,65e-003	-1,6119	1,6602
1,8e-003	-1,7237	1,7436
1,95e-003	-1,7878	1,7723
2,1e-003	-1,8334	1,7567
2,25e-003	-1,8649	1,7531
2,4e-003	-1,9042	1,8785
2,55e-003	-1,9437	1,8909
2,7e-003	-1,9708	1,8885
2,85e-003	-1,9696	1,8142
3,0e-003	-1,9649	1,8685



**FIGURE 7**  
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Shear Stress



**TABLE 25**  
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Shear Stress

Time [s]	Minimum [Pa]	Maximum [Pa]
0,	0,	0,
1,5005e-004	-6,5396e+006	8,166e+006
3,0004e-004	-9,8546e+006	1,0638e+007
4,5001e-004	-1,5404e+007	1,8526e+007
6,0006e-004	-1,8497e+007	2,3267e+007
7,5006e-004	-1,7681e+007	2,0483e+007
9,0004e-004	-1,4876e+007	1,1825e+007
1,05e-003	-1,7428e+007	1,2656e+007
1,2e-003	-1,0335e+007	1,5331e+007
1,35e-003	-1,9507e+007	1,3959e+007
1,5e-003	-1,925e+007	1,0739e+007
1,65e-003	-1,5592e+007	9,2282e+006
1,8e-003	-2,0751e+007	1,4661e+007
1,95e-003	-2,5114e+007	1,2255e+007
2,1e-003	-2,7621e+007	1,1404e+007
2,25e-003	-2,1545e+007	1,1743e+007
2,4e-003	-2,1386e+007	1,3551e+007
2,55e-003	-2,0925e+007	1,2261e+007
2,7e-003	-2,2171e+007	1,4075e+007
2,85e-003	-3,3697e+007	2,9243e+007
3,e-003	-2,4931e+007	2,7323e+007



# Material Data

## Polietileno

**TABLE 26**  
**Polietileno > Constants**

Density	954 kg m <sup>-3</sup>
---------	------------------------

**TABLE 27**  
**Polietileno > Isotropic Elasticity**

Temperature C	Young's Modulus Pa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus Pa	Shear Modulus Pa
	9.33e+008	0.37	1.1962e+009	3.4051e+008

**TABLE 28**  
**Polietileno > Bilinear Isotropic Hardening**

Yield Strength Pa	Tangent Modulus Pa
2.6e+007	0

## Structural Steel

**TABLE 29**  
**Structural Steel > Constants**

Density	7850 kg m <sup>-3</sup>
Coefficient of Thermal Expansion	1.2e-005 C <sup>-1</sup>
Specific Heat	434 J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
Thermal Conductivity	60.5 W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
Resistivity	1.7e-007 ohm m

**TABLE 30**  
**Structural Steel > Compressive Ultimate Strength**

Compressive Ultimate Strength Pa
0

**TABLE 31**  
**Structural Steel > Compressive Yield Strength**

Compressive Yield Strength Pa
2.5e+008

**TABLE 32**  
**Structural Steel > Tensile Yield Strength**

Tensile Yield Strength Pa
2.5e+008

**TABLE 33**  
**Structural Steel > Tensile Ultimate Strength**

Tensile Ultimate Strength Pa
4.6e+008

**TABLE 34**  
**Structural Steel > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion**

Reference Temperature C
22



**TABLE 35**  
**Structural Steel > Alternating Stress Mean Stress**

Alternating Stress Pa	Cycles	Mean Stress Pa
3.999e+009	10	0
2.827e+009	20	0
1.896e+009	50	0
1.413e+009	100	0
1.069e+009	200	0
4.41e+008	2000	0
2.62e+008	10000	0
2.14e+008	20000	0
1.38e+008	1.e+005	0
1.14e+008	2.e+005	0
8.62e+007	1.e+006	0

**TABLE 36**  
**Structural Steel > Strain-Life Parameters**

Strength Coefficient Pa	Strength Exponent	Ductility Coefficient	Ductility Exponent	Cyclic Strength Coefficient Pa	Cyclic Strain Hardening Exponent
9.2e+008	-0.106	0.213	-0.47	1.e+009	0.2

**TABLE 37**  
**Structural Steel > Isotropic Elasticity**

Temperature C	Young's Modulus Pa	Poisson's Ratio	Bulk Modulus Pa	Shear Modulus Pa
	2.e+011	0.3	1.6667e+011	7.6923e+010

**TABLE 38**  
**Structural Steel > Isotropic Relative Permeability**

Relative Permeability
10000

## Gelatina

**TABLE 39**  
**Gelatina > Constants**

Density	1200 kg m <sup>-3</sup>
Specific Heat	4138 J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>

**TABLE 40**  
**Gelatina > Isotropic Elasticity**

Temperature C	Young's Modulus Pa	Poisson's Ratio Pa	Bulk Modulus Pa	Shear Modulus Pa
	2.145e+007	0.49881	3.e+009	7.1557e+006

**TABLE 41**  
**Gelatina > Johnson Cook Strength**

Initial Yield Stress Pa	Hardening Constant Pa	Hardening Exponent	Strain Rate Constant	Thermal Softening Exponent	Melting Temperature C	Reference Strain Rate (/sec)
1.64e+006	6.86	1.73	3.46e-002	1	50	1

