

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales



Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Mecánica y de
Materiales

**DISEÑO DE UN ELEMENTO DE
PROTECCIÓN
DE ESPALDA PARA MOTOCICLISTAS**

Presentado por: D. Rubén Delgado López

Dirigido por: Dr. D. José Albelda Vitoria

Valencia, septiembre de 2016

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento al profesor Dr. D. José Albelda Vitoria por su ayuda y consejos en la elaboración de este trabajo final de máster. Además muy sinceramente, agradecer a mi familia por su apoyo en todo momento, sobre todo a mis padres Francisco y Dolores.

Rubén Delgado López



Resumen

El trabajo ha consistido en el modelado y diseño de un elemento de seguridad y protección para motociclistas tipo “espaldera” fabricado con un material compuesto reforzado con carbono y aramida, utilizando la norma UNE EN 1621-2 que establece los ensayos de impacto por caída libre de una masa que debe superar este tipo de componentes para que pueda ser utilizado en esta aplicación. Para la simulación de estos ensayos de impacto se ha utilizado el módulo de análisis dinámico explícito AUTODYN del programa ANSYS® WorkBench™.

La aplicación de la norma UNE EN 1621-2 establece que el componente debe superar un conjunto de ensayos de impacto por caída libre de una masa de 5 kilogramos y con una velocidad de impacto establecida. Estos ensayos deben realizarse en dos condiciones de temperatura y humedad. Como no se disponía de información del material a utilizar en esas condiciones se ha utilizado un modelo de degradación de propiedades extraído de la bibliografía.

El diseño se ha extendido a tres tamaños de espaldera con el fin de abarcar las tallas más usuales de este tipo de elementos de protección, lo que ha supuesto realizar un conjunto de 30 simulaciones de impacto.

El proceso de diseño ha consistido en modificar el espesor de los componentes hasta encontrar una geometría que satisface las prescripciones de la norma y que, por lo tanto, es capaz de disipar la cantidad de energía involucrada en el impacto del ensayo sin producirse fallo en la protección con el criterio de fallo utilizado.



DISEÑO DE UN ELEMENTO DE PROTECCIÓN
DE ESPALDA PARA MOTOCICLISTAS





Abstract

This final dissertation has consisted of modeling and design of a safety and protection element for motorcyclists type "back protector" made of a composite material reinforced with carbon and aramid fibers, using UNE EN 1621-2 which establishes the free fall of a mass impact tests that must overcome this kind of components which can be used in this application. For the simulation of these impact tests has been used explicit dynamic AUTODYN analysis module of ANSYS® Workbench™ program.

La aplicación de la norma UNE EN 1621-2 establece que el componente debe superar una serie de pruebas de impacto por caída libre de una masa de 5 kg y con una velocidad de impacto establecido. Estas pruebas deben realizarse en dos condiciones de temperatura y humedad. Como no había información disponible acerca de qué material utilizar en estas condiciones, se ha utilizado un modelo de degradación de propiedades extraídos de la literatura.

The design has been extended to three sizes of back protectors in order to cover the most common sizes of these types of protection elements, which has meant to perform a set of 30 simulations of impact.

The design process has consisted of modifying the thickness of the components to find a geometry that satisfies the requirements of the standard and, therefore, being able to dissipate the amount of energy involved in the impact of the trial without faulting the protection with the failure criterion used.



DISEÑO DE UN ELEMENTO DE PROTECCIÓN
DE ESPALDA PARA MOTOCICLISTAS





Resum

El treball ha consistit en el modelatge i disseny d'un element de seguretat i protecció per a motociclistes tipus "espaldera" fabricat amb un material compost reforçat amb carboni i aramida, utilitzant la norma UNE EN 1621-2 que estableix els assajos d'impacte per caiguda lliure d'una massa que ha de superar este tipus de components perquè puga ser utilitzat en esta aplicació. Per a la simulació d'estos assajos d'impacte s'ha utilitzat el mòdul d'anàlisi dinàmica explícit AUTODYN del programa ANSYS© WorkBench™.

L'aplicació de la norma UNE EN 1621-2 estableix que el component ha de superar un conjunt d'assajos d'impacte per caiguda lliure d'una massa de 5 quilograms i amb una velocitat d'impacte establida. Estos assajos han de realitzar-se en dos condicions de temperatura i humitat. Com no es disposava d'informació del material a utilitzar en eixes condicions s'ha utilitzat un model de degradació de propietats extret de la bibliografia.

El disseny s'ha estés a tres grandàries d'espallera a fi de comprendre les talles més usuals d'este tipus d'elements de protecció, la qual cosa ha suposat realitzar un conjunt de 30 simulacions d'impacte.

El procés de disseny ha consistit a modificar la grossària dels components fins a trobar una geometria que satisfà les prescripcions de la norma i que, per tant, és capaç de dissipar la quantitat d'energia involucrada en l'impacte de l'assaig sense produir-se fallada en la protecció amb el criteri de fallada utilitzat.



DISEÑO DE UN ELEMENTO DE PROTECCIÓN
DE ESPALDA PARA MOTOCICLISTAS





ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-----|
| 1. OBJETIVOS Y ANTECEDENTES..... | 2 |
| 1.1 Objetivos | 2 |
| 1.2 Antecedentes | 2 |
| 1.2.1 Introducción | 2 |
| 1.2.2 Materiales utilizados para la protección..... | 12 |
| 1.2.3 Metodología y alcance del TFM | 14 |
| 2. DESCRIPCIÓN DE MODELO Y RESTRICCIONES | 16 |
| 2.1 Normativa..... | 16 |
| 2.2 Modelos de material..... | 26 |
| 2.3 Criterios de fallo | 34 |
| 2.4 Problema de impacto y parámetros que influyen..... | 36 |
| 2.4.1 Problema de impacto..... | 36 |
| 2.4.2 Parámetros que influyen | 37 |
| 2.4.2.1 Propiedades del material | 37 |
| • Tipo y configuración de la fibra..... | 37 |
| • Estructura y superficie de los hilos | 38 |
| • Sensibilidad a la velocidad de deformación | 39 |
| • Tejido | 40 |
| • Resina | 41 |
| 2.4.2.2 Propiedades de la muestra a ensayar..... | 41 |
| 2.4.2.3 Características del percutor | 42 |
| 2.5 Análisis dinámico explícito e implícito..... | 47 |
| 3. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO..... | 52 |
| 3.1 Materiales. Propiedades..... | 52 |
| 3.2 Simplificaciones..... | 56 |
| 3.3 Generación geometría | 63 |
| 3.4 Mallado | 63 |
| 3.5 Condiciones de contorno | 66 |
| 3.5.1 Condiciones iniciales | 66 |
| 3.5.2 Condiciones de contacto entre superficies | 67 |
| 3.5.3 Model-Connections..... | 69 |
| 3.6 Post-Procesado | 79 |
| 4. RESULTADOS | 80 |
| 4.1 Introducción..... | 80 |
| 4.2 Resultados..... | 80 |
| 5. CONCLUSIONES | 114 |



| | |
|--|-----|
| 6. BIBLIOGRAFÍA..... | 115 |
| 7. ANEXOS..... | 117 |
| 7.1 Croquis de piezas estudiadas..... | 117 |
| 7.2 Propiedades piezas protección estudiadas..... | 120 |
| 7.3 Propiedades piezas de referencia..... | 121 |
| 7.3.1 Resumen Protección estudiada (GRANDE)..... | 121 |
| 7.3.2 Resumen Protección estudiada (MEDIANANO)..... | 123 |
| 7.3.3 Resumen Protección estudiada (PEQUEÑO)..... | 125 |
| 7.4 Manual de uso ANSYS® WORKBENCH™ (Explicit Dynamics)..... | 127 |
| 7.4.1 Módulos..... | 127 |
| 7.4.1.1 Introducción..... | 127 |
| 7.4.1.2 Engineering Data..... | 133 |
| 7.4.1.3 Geometry..... | 141 |
| 7.4.1.4 Model-Setup-Solution-Results..... | 145 |
| 7.4.1.4.1 Model-Geometry..... | 146 |
| 7.4.1.4.2 Model-Connections..... | 149 |
| 7.4.1.4.3 Model-Mesh..... | 152 |
| 7.4.1.4.4 Setup..... | 153 |
| 7.4.1.4.5 Solution..... | 160 |
| 7.5 Informe ejemplo (ANSYS® WORKBENCH™)..... | 168 |



LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Imagen 1 Coste de los accidentes de tráfico (2001) | 3 |
| Imagen 2 Heridos Leves 2001-2012..... | 9 |
| Imagen 3 Heridos Graves 2001-2012 | 10 |
| Imagen 4 Fallecidos 2001-2012 | 10 |
| Imagen 5 Protección de espalda (espuma forrada) | 13 |
| Imagen 6 Protección de espalda (placas PP forrada) | 13 |
| Imagen 7 Protector de espalda integral | 17 |
| Imagen 8 Proporciones relativas | 18 |
| Imagen 9 Percutor de barra. Geometría. | 21 |
| Imagen 10 Yunque. Geometría | 22 |
| Imagen 11 Posición impactos | 23 |
| Imagen 12 Compuestos según refuerzo. Partículas, fibras y laminados..... | 30 |
| Imagen 13 Compuestos por Fibras..... | 31 |
| Imagen 14 Curvas σ - ϵ de kevlar 49 a distintas velocidades de deformación .40 | |
| Imagen 15 Curvas F- ϵ para distintos penetradores en fibra de carbono..... | 43 |
| Imagen 16 Tipo de daño producido según la velocidad del percutor | 47 |
| Imagen 17 Ventana principal de trabajo | 53 |
| Imagen 18 Posición elementos ensayo..... | 57 |
| Imagen 19 % reducción (módulos de tensión en función del tiempo) | 60 |
| Imagen 20 Módulo de Young (E) vs Tiempo. Epoxi-Fibras de Acrilato | 61 |
| Imagen 21 Tensión límite de fibras de vidrio en ambiente seco y húmedo | 61 |
| Imagen 22 Elementos para mallado | 64 |
| Imagen 23 Mallado de las piezas a simular | 65 |
| Imagen 24 Ejemplo de calidad mallado tipo utilizado..... | 66 |
| Imagen 25 σ_{VM} espaldera pequeña e=2mm | 82 |
| Imagen 26 σ_{TM} espaldera pequeña e=2mm | 82 |
| Imagen 27 FS espaldera pequeña e=2mm | 83 |
| Imagen 28 σ_{VM} espaldera pequeña e=3mm | 84 |
| Imagen 29 σ_{TM} espaldera pequeña e=3mm | 85 |
| Imagen 30 FS espaldera pequeña e=3mm | 85 |
| Imagen 31 Ensayo a temperatura ambiente - σ_{VM} | 89 |
| Imagen 32 Ensayo a temperatura ambiente - σ_{TM} | 90 |
| Imagen 33 Ensayo en condiciones de humedad - σ_{TM} | 91 |
| Imagen 34 Ensayo en condiciones de humedad - σ_{TM} | 92 |
| Imagen 35 σ_{VM} máximas en geometría..... | 93 |
| Imagen 36 σ_{VM} | 94 |



| | |
|---|-----|
| Imagen 37 σ_{TM} máximas en geometría..... | 95 |
| Imagen 38 σ_{TM} | 96 |
| Imagen 39 Factor de seguridad Max-Min en Geometría..... | 97 |
| Imagen 40 Gráfico temporal de Factor de Seguridad..... | 98 |
| Imagen 41 Conservación de la energía..... | 99 |
| Imagen 42 Resumen de energía en impacto | 100 |
| Imagen 43 Δt de cada ciclo | 101 |
| Imagen 44 FS Impacto 1 (a-f)..... | 103 |
| Imagen 45 FS Impacto 2 (g-l)..... | 104 |
| Imagen 46 FS Impacto 3 (m-r) | 105 |
| Imagen 47 FS Impacto 4 (a-e)..... | 106 |
| Imagen 48 FS Impacto 5 (y-ad)..... | 107 |
| Imagen 49 FS Impacto 1 (1-6) | 109 |
| Imagen 50 FS Impacto 2 (7-12) | 110 |
| Imagen 51 FS Impacto 3 (13-18)..... | 111 |
| Imagen 52 FS Impacto 4 (19-24)..... | 112 |
| Imagen 53 FS Impacto 5 (25-30)..... | 113 |
| Imagen 54 Pantalla inicial ANSYS WORKBENCH R16.2®..... | 127 |



LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Fallecidos (2001-2012)..... | 5 |
| Tabla 2 Heridos Graves (2001-2012) | 7 |
| Tabla 3 Heridos Leves (2001-2012)..... | 9 |
| Tabla 4 Zona mínima de protección para el protector de espalda..... | 17 |
| Tabla 5 Dimensiones (mm) de nuestro protector de espalda integral | 18 |
| Tabla 6 Niveles de rendimiento | 19 |
| Tabla 7 Posiciones impactos percutor | 24 |
| Tabla 8 Materiales y sus efectos en EXPLICIT DYNAMICS (ANSYS®) | 54 |
| Tabla 9 Calidad del mallado, en función de la “calidad” de la forma..... | 64 |
| Tabla 10 Resultados fallo espaldera e=2mm..... | 81 |
| Tabla 11 Resultados fallo espaldera e=3mm..... | 84 |
| Tabla 12 Resultados ensayo condiciones ambiente..... | 87 |
| Tabla 13 Resumen ensayo en condiciones de humedad..... | 88 |



1. OBJETIVOS Y ANTECEDENTES

1.1 Objetivos

El principal objetivo del presente trabajo final de máster es estudiar el comportamiento frente a impactos mecánicos según norma UNE-EN 1621-2 “Ropa de protección frente a impactos mecánicos para motociclistas. Parte 2: Protectores de espalda para motociclistas. Requisitos y métodos de ensayo”.

En concreto se va a estudiar el protector de espalda integral según define la norma anterior, “Dispositivo de protección que se lleva en la espalda, destinado a reducir la gravedad de las lesiones producidas por impactos en la zona central de la espalda y los omoplatos”.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Introducción

Debido a la proliferación de normativa aplicable a este sector, no quedando exento como otros muchos, se hace necesario estudiar y buscar soluciones que sean óptimas para todas las partes intervinientes, ya sea la parte administrativa (normas y reglamentos de obligado cumplimiento), los fabricantes que deben buscar productos atractivos que cumplan los requisitos normativos y sean fabricables desde el punto de vista económico e industrial y para el mercado que absorberá esta producción que deben tener también su punto de vista económico y en este caso, el más importante quizás, de protección.

Este trabajo se ha decidido tratarlo por dos motivos principales, o puntos de vista. El primero desde el punto de vista económico que tal y como apunta un artículo de J.M.M [12] se comenta que los accidentes de tráfico tuvieron un coste de entre 11.450 y 15.390 millones de euros (2001). Casi la mitad de este

coste se destina a daños materiales y pérdidas por producción (20%). Además se estima un coste por tipo de víctima, ya sea esta mortal (36.300 euros) o herido grave (251.500 euros).

Desglosando estos datos se tiene que del 41 al 55% se deben a daños materiales. Después se encuentra los costes de producción, lo que deja de producir el accidentado en función de su edad hasta su teórica jubilación, oscila entre el 15 al 20%. Posteriormente tenemos los costes administrativos que repercuten del 9,6 al 13%. Y por último tenemos los gastos hospitalarios (del 1,1 al 1,5%) y de rehabilitación (del 1,4 al 1,9%). En la imagen siguiente ilustramos lo comentado anteriormente.

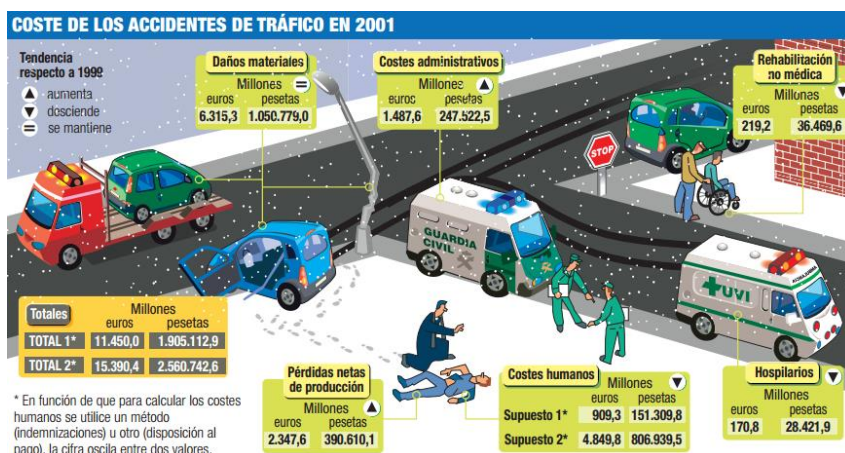


Imagen 1 Coste de los accidentes de tráfico (2001)

Vistos estos datos, aunque no muy actuales, sirven para darnos cuenta de que la magnitud de no intervenir e intentar prevenir daños en los accidentes. En las tablas y gráficos siguientes se muestran datos de la evolución de los accidentes de tráfico.



| Accidentes. Serie 2004-2012 | | | | | | | | | | | | |
|---|------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Accidentes de tráfico | | | | | | | | | | | | |
| Conductores y pasajeros muertos (1) por ubicación, vehículo y periodo. | | | | | | | | | | | | |
| Unidades: Número de fallecidos | | | | | | | | | | | | |
| | 2012 | 2011 (3) | 2010 | 2009 | 2008 | 2007 | 2006 | 2005 | 2004 | 2003 | 2002 | 2001 |
| TOTAL | | | | | | | | | | | | |
| Bicicletas | 72 | 49 | 67 | 56 | 54 | 89 | 75 | 82 | 89 | 78 | 96 | 100 |
| Ciclomotores | 66 | 74 | 100 | 156 | 183 | 248 | 308 | 313 | 361 | 391 | 383 | 463 |
| Motocicletas | 303 | 348 | 386 | 438 | 495 | 632 | 481 | 472 | 400 | 367 | 401 | 370 |
| Turismos | 874 | 979 | 1.198 | 1.267 | 1.504 | 1.821 | 2.096 | 2.393 | 2.693 | 3.216 | 3.118 | 3.148 |
| Camiones - 3.501 kg. y furgonetas | 97 | 99 | 115 | 170 | 182 | 230 | 268 | 245 | 292 | 317 | 342 | 324 |
| Camiones +3.500 kg. | 50 | 73 | 70 | 69 | 81 | 92 | 135 | 140 | 150 | 159 | 173 | 150 |
| Autobuses | 3 | 3 | 4 | 21 | 27 | 15 | 35 | 26 | 4 | 27 | 15 | 50 |
| Otros | 62 | 55 | 67 | 67 | 72 | 105 | 93 | 91 | 69 | 57 | 43 | 66 |
| INTERURBANA (2) | | | | | | | | | | | | |
| Bicicletas | 53 | 37 | 49 | 43 | 43 | 67 | 55 | 59 | 68 | 63 | 78 | 78 |
| Ciclomotores | 42 | 37 | 54 | 88 | 105 | 141 | 175 | 174 | 186 | 220 | 210 | 269 |
| Motocicletas | 208 | 251 | 279 | 325 | 359 | 471 | 368 | 358 | 304 | 266 | 293 | 263 |
| Turismos | 801 | 904 | 1.114 | 1.166 | 1.381 | 1.695 | 1.942 | 2.245 | 2.467 | 2.976 | 2.875 | 2.903 |
| Camiones - 3.501 kg. y furgonetas | 93 | 92 | 112 | 161 | 173 | 225 | 262 | 233 | 268 | 298 | 322 | 311 |
| Camiones +3.500 kg. | 50 | 71 | 68 | 69 | 81 | 92 | 135 | 138 | 146 | 157 | 170 | 144 |
| Autobuses | 1 | 3 | 2 | 20 | 26 | 14 | 34 | 25 | 4 | 24 | 14 | 47 |
| Otros | 50 | 50 | 57 | 57 | 62 | 90 | 79 | 72 | 58 | 52 | 40 | 59 |
| URBANA | | | | | | | | | | | | |
| Bicicletas | 19 | 12 | 18 | 13 | 11 | 22 | 20 | 23 | 21 | 15 | 18 | 22 |
| Ciclomotores | 24 | 37 | 46 | 68 | 78 | 107 | 133 | 139 | 175 | 171 | 173 | 194 |
| Motocicletas | 95 | 97 | 107 | 113 | 136 | 161 | 113 | 114 | 96 | 101 | 108 | 107 |
| Turismos | 73 | 75 | 84 | 101 | 123 | 126 | 154 | 148 | 226 | 240 | 243 | 245 |



| | | | | | | | | | | | | |
|--|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Camiones - 3.501 kg. y furgonetas | 4 | 7 | 3 | 9 | 9 | 5 | 6 | 12 | 24 | 19 | 20 | 13 |
| Camiones +3.500 kg. | 0 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 4 | 2 | 3 | 6 |
| Autobuses | 2 | 0 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 3 | 1 | 3 |
| Otros | 12 | 5 | 10 | 10 | 10 | 15 | 14 | 19 | 11 | 5 | 3 | 7 |

Notas:

- 1) El cómputo de muertos se realiza a 30 días.
- 2) La denominación 'Interurbana' se utiliza desde 2011, hasta entonces era 'En carretera'.
- 3) A partir de 2011 se ha utilizado una nueva metodología para el cálculo de fallecidos a 30 días.

Fuente:

Instituto Nacional de
Estadística

Tabla 1 Fallecidos (2001-2012)



Accidentes. Serie 2004-2012

Accidentes de tráfico

Conductores y pasajeros heridos por ubicación, vehículo, tipo de herido y periodo.

Unidades: Número de heridos

| | HERIDOS GRAVES | | | | | | | | | | | |
|---|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 2012 | 2011 | 2010 | 2009 | 2008 | 2007 | 2006 | 2005 | 2004 | 2003 | 2002 | 2001 |
| TOTAL | | | | | | | | | | | | |
| Bicicletas | 572 | 589 | 467 | 489 | 440 | 464 | 483 | 448 | 470 | 474 | 502 | 468 |
| Ciclomotores | 771 | 958 | 1.014 | 1.464 | 2.023 | 2.555 | 3.185 | 3.347 | 3.452 | 3.965 | 4.239 | 4.604 |
| Motocicletas | 2.459 | 2.618 | 2.530 | 3.035 | 3.099 | 3.478 | 3.152 | 2.677 | 2.140 | 2.161 | 2.240 | 2.031 |
| Turismos | 3.929 | 4.345 | 4.989 | 5.701 | 7.130 | 8.437 | 9.710 | 10.530 | 11.083 | 14.443 | 13.941 | 14.199 |
| Camiones - 3.501 kg. y furgonetas | 378 | 463 | 515 | 645 | 963 | 1.135 | 1.274 | 1.205 | 1.078 | 1.527 | 1.505 | 1.453 |
| Camiones +3.500 kg. | 160 | 204 | 199 | 235 | 339 | 426 | 501 | 497 | 521 | 549 | 568 | 595 |
| Autobuses | 43 | 65 | 77 | 123 | 91 | 95 | 187 | 153 | 91 | 226 | 144 | 136 |
| Otros | 216 | 189 | 245 | 278 | 341 | 393 | 431 | 376 | 255 | 193 | 173 | 173 |
| INTERURBANA (1) | | | | | | | | | | | | |
| Bicicletas | 304 | 304 | 258 | 268 | 235 | 267 | 294 | 234 | 270 | 272 | 309 | 272 |
| Ciclomotores | 279 | 374 | 406 | 605 | 873 | 1.125 | 1.403 | 1.300 | 1.321 | 1.798 | 1.749 | 1.882 |
| Motocicletas | 1.252 | 1.377 | 1.431 | 1.619 | 1.783 | 2.092 | 1.893 | 1.591 | 1.222 | 1.366 | 1.386 | 1.247 |
| Turismos | 3.240 | 3.692 | 4.325 | 4.808 | 6.217 | 7.352 | 8.490 | 9.206 | 9.500 | 12.572 | 11.933 | 12.179 |
| Camiones - 3.501 kg. y furgonetas | 337 | 416 | 461 | 578 | 899 | 1.055 | 1.181 | 1.121 | 988 | 1.401 | 1.350 | 1.330 |
| Camiones +3.500 kg. | 158 | 198 | 189 | 229 | 332 | 421 | 496 | 483 | 507 | 532 | 547 | 571 |
| Autobuses | 12 | 23 | 25 | 75 | 61 | 45 | 129 | 125 | 53 | 174 | 105 | 102 |
| Otros | 145 | 141 | 174 | 198 | 249 | 315 | 337 | 285 | 191 | 163 | 143 | 134 |



| URBANA | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Bicicletas | 268 | 285 | 209 | 221 | 205 | 197 | 189 | 214 | 200 | 202 | 193 | 196 |
| Ciclomotores | 492 | 584 | 608 | 859 | 1.150 | 1.430 | 1.782 | 2.047 | 2.131 | 2.167 | 2.490 | 2.722 |
| Motocicletas | 1.207 | 1.241 | 1.099 | 1.416 | 1.316 | 1.386 | 1.259 | 1.086 | 918 | 795 | 854 | 784 |
| Turismos | 689 | 653 | 664 | 893 | 913 | 1.085 | 1.220 | 1.324 | 1.583 | 1.871 | 2.008 | 2.020 |
| Camiones - 3.501 kg. y furgonetas | 41 | 47 | 54 | 67 | 64 | 80 | 93 | 84 | 90 | 126 | 155 | 123 |
| Camiones +3.500 kg. | 2 | 6 | 10 | 6 | 7 | 5 | 5 | 14 | 14 | 17 | 21 | 24 |
| Autobuses | 31 | 42 | 52 | 48 | 30 | 50 | 58 | 28 | 38 | 52 | 39 | 34 |
| Otros | 71 | 48 | 71 | 80 | 92 | 78 | 94 | 91 | 64 | 30 | 30 | 39 |

Notas:

1) La denominación 'Interurbana' se utiliza desde 2011, hasta entonces era 'En carretera'.

Fuente:

Instituto Nacional de Estadística

Tabla 2 Heridos Graves (2001-2012)



| Accidentes. Serie 2004-2012 | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Accidentes de tráfico | | | | | | | | | | | | |
| Conductores y pasajeros heridos por ubicación, vehículo, tipo de herido y periodo. | | | | | | | | | | | | |
| Unidades: Número de heridos | | | | | | | | | | | | |
| | HERIDOS LEVES | | | | | | | | | | | |
| | 2012 | 2011 | 2010 | 2009 | 2008 | 2007 | 2006 | 2005 | 2004 | 2003 | 2002 | 2001 |
| TOTAL | | | | | | | | | | | | |
| Bicicletas | 4.362 | 3.712 | 2.962 | 2.773 | 2.362 | 2.104 | 1.883 | 1.753 | 1.840 | 1.649 | 1.580 | 1.569 |
| Ciclomotores | 7.065 | 7.946 | 8.918 | 10.768 | 13.420 | 16.278 | 16.980 | 16.232 | 17.731 | 18.625 | 19.730 | 21.800 |
| Motocicletas | 16.295 | 16.369 | 15.817 | 15.739 | 15.017 | 15.495 | 12.867 | 9.987 | 8.411 | 7.975 | 8.058 | 8.716 |
| Turismos | 61.338 | 59.461 | 63.580 | 64.465 | 64.969 | 69.703 | 69.637 | 64.256 | 69.826 | 76.349 | 72.052 | 71.724 |
| Camiones - 3.501 kg. y furgonetas | 4.528 | 4.439 | 5.108 | 5.151 | 5.921 | 6.708 | 6.659 | 5.728 | 5.948 | 6.377 | 6.155 | 6.002 |
| Camiones +3.500 kg. | 743 | 910 | 937 | 971 | 1.186 | 1.608 | 1.716 | 1.558 | 1.667 | 1.635 | 1.641 | 1.546 |
| Autobuses | 1.337 | 1.621 | 1.594 | 1.741 | 1.884 | 1.651 | 2.466 | 1.966 | 1.759 | 2.050 | 1.735 | 1.811 |
| Otros | 919 | 873 | 941 | 971 | 1.118 | 1.153 | 1.166 | 1.152 | 673 | 622 | 526 | 560 |
| INTERURBANA (1) | | | | | | | | | | | | |
| Bicicletas | 1.192 | 1.119 | 881 | 826 | 686 | 728 | 632 | 509 | 559 | 499 | 503 | 492 |
| Ciclomotores | 1.106 | 1.283 | 1.466 | 1.777 | 2.297 | 3.011 | 2.913 | 2.431 | 2.670 | 2.590 | 2.750 | 3.257 |
| Motocicletas | 3.898 | 4.117 | 4.192 | 4.194 | 3.903 | 4.451 | 3.422 | 2.289 | 1.988 | 1.651 | 1.640 | 1.784 |
| Turismos | 36.530 | 35.589 | 39.341 | 40.830 | 41.632 | 46.674 | 45.883 | 40.445 | 43.602 | 47.618 | 43.229 | 43.549 |
| Camiones - 3.501 kg. y furgonetas | 3.196 | 3.209 | 3.783 | 3.924 | 4.630 | 5.323 | 5.250 | 4.505 | 4.481 | 4.708 | 4.475 | 4.347 |
| Camiones +3.500 kg. | 688 | 855 | 891 | 904 | 1.141 | 1.531 | 1.643 | 1.453 | 1.559 | 1.477 | 1.514 | 1.440 |
| Autobuses | 246 | 410 | 411 | 431 | 526 | 387 | 1.089 | 864 | 528 | 856 | 754 | 684 |
| Otros | 587 | 561 | 630 | 616 | 747 | 775 | 779 | 745 | 388 | 359 | 280 | 392 |
| URBANA | | | | | | | | | | | | |
| Bicicletas | 3.170 | 2.593 | 2.081 | 1.947 | 1.676 | 1.376 | 1.251 | 1.244 | 1.281 | 1.150 | 1.077 | 1.077 |
| Ciclomotores | 5.959 | 6.663 | 7.452 | 8.991 | 11.123 | 13.267 | 14.067 | 13.801 | 15.061 | 16.035 | 16.980 | 18.543 |
| Motocicletas | 12.397 | 12.252 | 11.625 | 11.545 | 11.114 | 11.044 | 9.445 | 7.698 | 6.423 | 6.324 | 6.418 | 6.932 |
| Turismos | 24.808 | 23.872 | 24.239 | 23.635 | 23.337 | 23.029 | 23.754 | 23.811 | 26.224 | 28.731 | 28.823 | 28.175 |
| Camiones - 3.501 kg. y furgonetas | 1.332 | 1.230 | 1.325 | 1.227 | 1.291 | 1.385 | 1.409 | 1.223 | 1.467 | 1.669 | 1.680 | 1.655 |
| Camiones +3.500 kg. | 55 | 55 | 46 | 67 | 45 | 77 | 73 | 105 | 108 | 158 | 127 | 106 |



| | | | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|
| Autobuses | 1.091 | 1.211 | 1.183 | 1.310 | 1.358 | 1.264 | 1.377 | 1.102 | 1.231 | 1.194 | 981 | 1.127 |
| Otros | 332 | 312 | 311 | 355 | 371 | 378 | 387 | 407 | 285 | 263 | 246 | 168 |

Notas:

1) La denominación 'Interurbana' se utiliza desde 2011, hasta entonces era 'En carretera'.

Fuente:

Instituto Nacional de Estadística

Tabla 3 Heridos Leves (2001-2012)

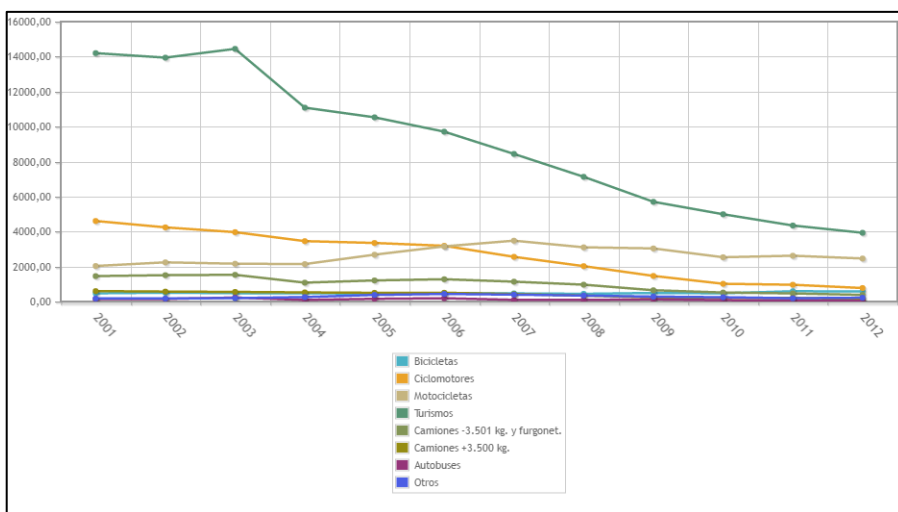


Imagen 2 Heridos Leves 2001-2012

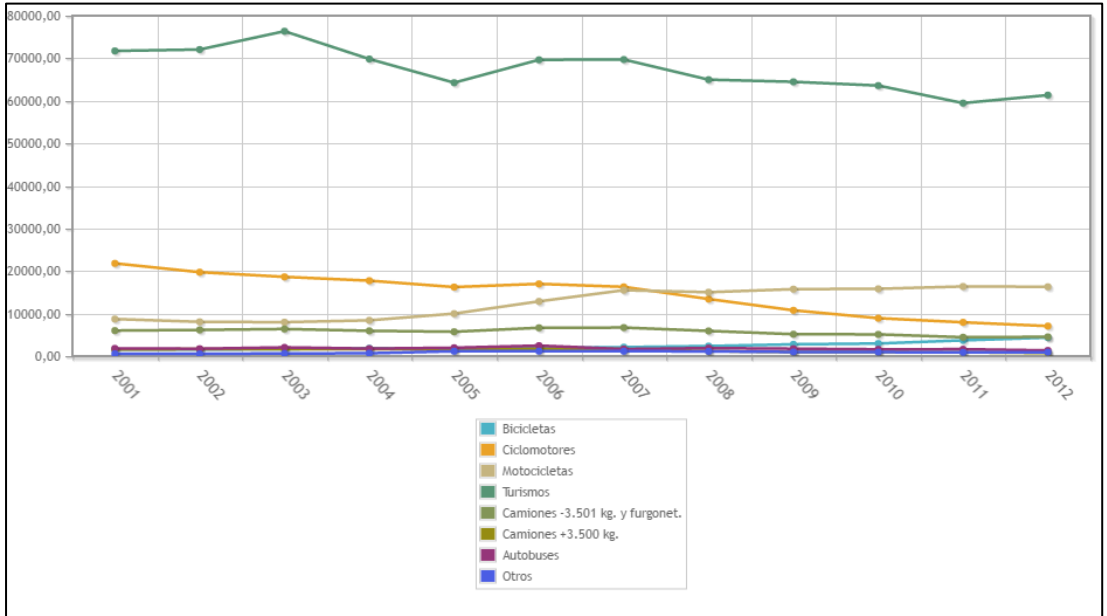


Imagen 3 Heridos Graves 2001-2012

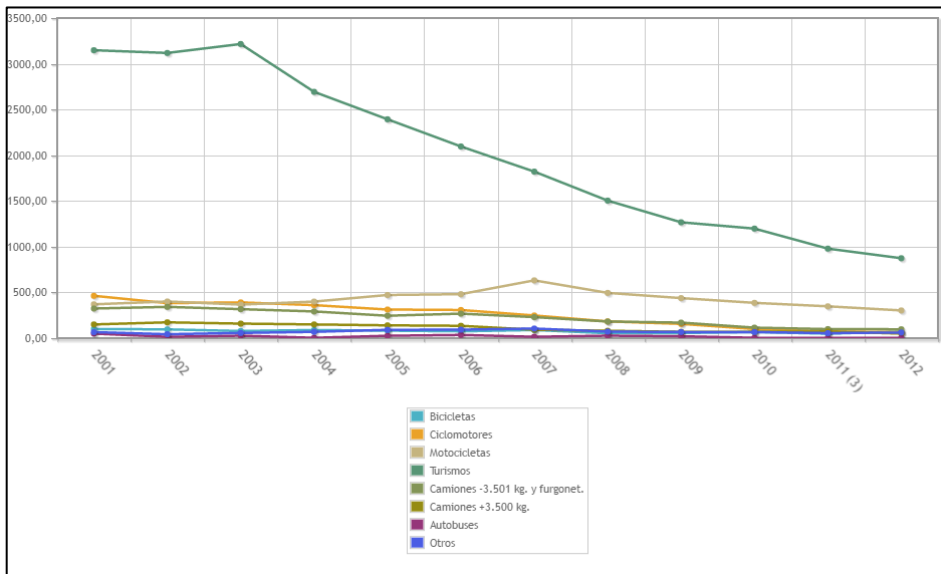


Imagen 4 Fallecidos 2001-2012



Con lo anterior podemos ver que parece ser que excepto en motocicletas, se reducen el número de accidentados. Por ello es importante hacer hincapié en este tipo de transporte.

Además complementamos con los datos de otro artículo [13], más enfocado en motocicletas, en el que se concluyen los siguientes puntos:

- Los conductores de moto son culpables solamente en el 25% de los accidentes en los que se ven implicados con otros vehículos. En este aspecto no existen apenas diferencias en función del sexo del conductor.

- Entre las causas de los accidentes en los que los motoristas son culpables, destacan la velocidad inadecuada y la falta de experiencia en el manejo de la motocicleta.

- Entre las causas de los accidentes no provocados por los motoristas, destacan los registrados por circulación en paralelo con otros vehículos, donde las motos no suelen ser vistas debido al llamado “ángulo muerto” del espejo retrovisor, alcances traseros a las motos por parte de otros vehículos y distracción de los conductores de otros vehículos.

- Un 8% de los conductores de moto se ven implicados al menos en un accidente al año con otro vehículo, frente a más de un 19% en el caso de los turismos.

- En el 72% de los accidentes de moto se producen heridos, mientras que en los coches esta cifra es del 11,5%.

- Si bien el uso del casco está ampliamente extendido, cerca del 80% de los motoristas circulan con deficiencias en el equipamiento (ropa o calzado inadecuado).



- Al igual que en la conducción de automóviles, los dos primeros años de conducción de motocicletas son los que registran las mayores cifras de siniestralidad.
- Los jóvenes hasta 30 años son los conductores de motos que registran mayores tasas de siniestralidad: un 15% de los conductores de moto de entre 25 y 30 años se ven implicados en un accidente al año con otro vehículo.
- Los meses con mayor tasa de accidentes de moto son junio, julio, octubre y noviembre.
- Las comunidades autónomas donde se registran más accidentes de moto, en proporción al parque de motocicletas, son Galicia, Comunidad Valenciana, Cataluña, Andalucía y Baleares.

Visto lo anterior, comentamos a continuación el segundo punto de vista. Tal y como se comentó en un artículo referenciado anteriormente, es muy complicado valorar los costes humanos, es decir, valorar el sufrimiento individual y familiar que se produce en cada accidente, es imposible.

Por ello es necesario hacer todo lo posible para proteger y protegernos ante los accidentes.

Por ello se estudia en el presente trabajo diversos tamaños de piezas (3 tamaños) para poder efectuar una primera correlación entre el tamaño y el impacto.

1.2.2 Materiales utilizados para la protección

Actualmente las protecciones de espalda para motoristas están realizadas con materiales tipo espuma “foam” con cierta forma para adaptarse ergonómicamente y principalmente tanto al individuo que portará esta

protección como en la prenda de vestir tipo chaqueta donde se incorporará, estando previamente forrada mediante algún tipo de tejido o material.



Imagen 5 Protección de espalda (espuma forrada)

También se pueden encontrar protecciones realizadas mediante placas articuladas tipo sándwich principalmente fabricadas con polipropileno extruido, incorporando interiormente en la mayoría de los casos algún tipo de



material tipo espuma.

Imagen 6 Protección de espalda (placas PP forrada)



Estas protecciones generalmente y lo más habitual es que sean flexibles.

En el presente estudio nos vamos a centrar en estudiar una protección más rígida fabricada mediante un material compuesto de una resina tipo EPOXI reforzada por fibras largas orientadas aleatoriamente de KEVLAR®.

Se opta por esta solución debido a la facilidad de fabricación y de estudio, ya que al considerar este tipo de composición podemos suponer que el material tratado tendrá un comportamiento isótropo. Esto se ha considerado de esta forma porque es complicado encontrar información en el mercado de propiedades mecánicas, físicas,... de materiales y que pueda ser utilizado en el programa informático utilizado (ANSYS WORKBENCH®).

Más adelante se justificará las simplificaciones realizadas, así como la obtención de las diferentes propiedades mecánicas mínimas del compuesto utilizado.

1.2.3 Metodología y alcance del TFM

La metodología que se seguirá para la realización de este trabajo ha sido la siguiente:

- Descripción del modelo y restricciones
- Procedimiento de cálculo
- Resultados
- Conclusiones

El alcance de este trabajo consiste en realizar una comparativa entre varios tamaños de la misma protección, para poder extrapolar dichos resultados. Esta comparativa se realizará mediante el análisis de los resultados de simulaciones



cuyo objetivo es comprobar sí 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 trabajo llegar a una solución alternativa que garantice la protección de los potenciales consumidores de este tipo de recursos, ya que sería necesaria otro tipo de forma de la pieza estudiada y realizar ensayos reales que en estos momentos quedan fuera del alcance del alumno firmante del presente estudio.

No obstante se intenta de forma teórica realizar los ensayos mínimos necesarios según la normativa aplicable a este tipo de elementos (comentada anteriormente), a saber:

→ Ensayo de impacto a temperatura ambiente

En esta modelización se utilizan las propiedades mecánicas del compuesto a estudiar, calculadas de forma aproximada.

→ Ensayo de impacto en condiciones de humedad tras un envejecimiento hidrolítico

En esta modelización se utilizan las propiedades mecánicas del compuesto a estudiar, calculadas de forma aproximada. En este caso mediante diversa literatura se ha intentado evaluar también de forma aproximada y mediante diversos métodos la degradación en las propiedades de los materiales empleados.

De esta forma se intenta cumplir la normativa y tener un punto de partida analizando ambos ensayos de forma teórica, siendo esto lo mínimo obligatorio.

De todo ello se intentará justificar en la medida de lo posible.



2. DESCRIPCIÓN DE MODELO Y RESTRICCIONES

2.1 Normativa

Anteriormente se ha ido comentando distintos aspectos normativos que son de obligado cumplimiento. Esta norma es la UNE-EN 1621-2-2014 [1]. Al no tener disponibilidad de ensayos se ha recurrido como primer contacto a simulaciones mediante programas informáticos como ANSYS WORKBENCH®, aunque se ha intentado ser lo más real posible al modelar el problema.

Se intentará resumir en la medida de lo posible la norma UNE EN 1621-2 desde el punto de vista de la información necesaria para este estudio, la cual tiene dos grandes bloques de nuestro interés, como los requisitos y los métodos y equipos de ensayo.

En el primer bloque “Requisitos” se especifican temas relacionados con:

- Dimensiones mínimas de las zonas de protección

Aquí se especifica que las dimensiones de los protectores estarán relacionadas con la longitud cintura-hombro del usuario. La figura siguiente nos muestra las proporciones mínimas de la protección de espalda integral y la tabla 1 el porcentaje de la medida de cintura-hombro.

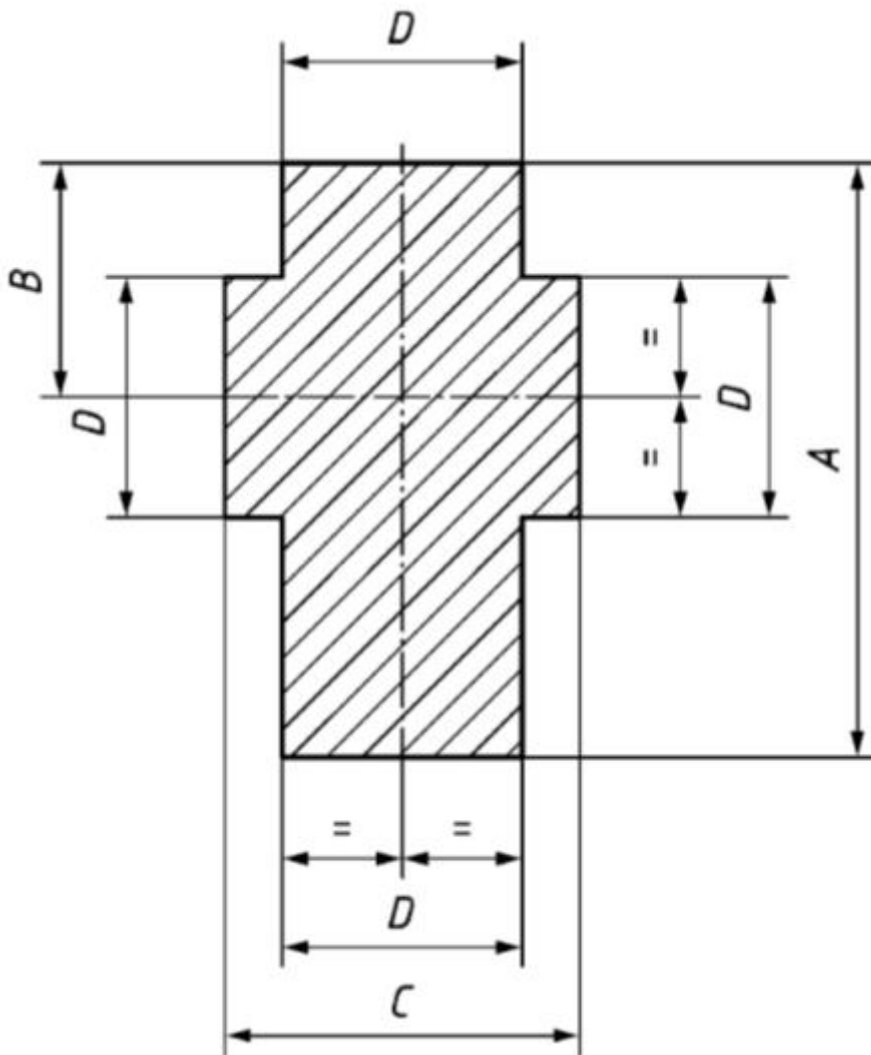


Imagen 7 Protector de espalda integral

Tabla 4 Zona mínima de protección para el protector de espalda

| Dimensiones de la figura 2 | | | | | |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| A | B | C | D | E | F |
| 72% | 29% | 44% | 29% | 32% | 25% |

Siendo en nuestro caso las dimensiones cintura-hombro de 3 tamaños estudiados para poder intentar ver una relación entre estos tamaños y los ensayos aplicados. Interesando que sea indiferente el tamaño con la carga aplicada en el impacto. Los tamaños escogidos están para usuarios de menor altura hasta una altura mayor, pasando por una altura intermediana. Tal y como se aprecia en la siguiente tabla y con ayuda de la siguiente imagen.

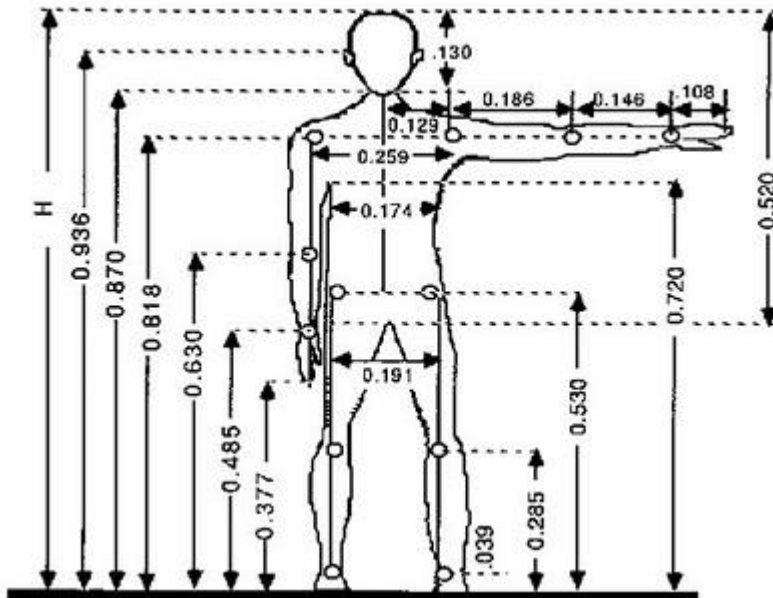


Imagen 8 Proporciones relativas

Quedando por lo tanto nuestras medidas como sigue en la siguiente tabla

Tabla 5 Dimensiones (mm) de nuestro protector de espalda integral

| Dimensiones | Altura (mm) | 1800 | 2000 | 1600 |
|-------------|---------------------|------|--------|--------|
| | Cintura-Hombro (mm) | | 518,00 | 575,55 |



| | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| A (mm) | 373,20 | 372,96 | 414,40 | 331,52 |
| B (mm) | 150,30 | 150,22 | 166,91 | 133,53 |
| C (mm) | 231,00 | 231,03 | 256,70 | 205,36 |
| D (mm) | 150,30 | 150,22 | 166,91 | 133,53 |

- Atenuación de impactos

Aquí la norma indica que se deben conseguir unos niveles máximos de fuerza transmitida según el nivel de protección buscado

Tabla 6 Niveles de rendimiento

| Nivel 1 | Nivel 2 |
|--|---|
| valor medio: ≤ 18 kN golpe aislado: ≤ 24 kN | valor medio: ≤ 9 kN golpe aislado: ≤ 12 kN |

Para la homologación hay diferentes normas a la hora de realizar las pruebas para calibrar su nivel de protección, si es que alcanza un mínimo para poder ser homologada según los estándares de la CE.

La energía que se aplica para las pruebas es de 50 julios y para establecer a qué nivel pertenece la protección se mide cuál es la tasa mediana de transferencia de fuerzas en KN en un impacto. El nivel 1 es el de menor protección y el 2 el de mayor. Cada uno establece un nivel de fuerza que la espaldera no debe superar para obtener la homologación correspondiente. 18 KN (kilonewton) para el nivel 1 y 9 KN para los de nivel 2. Y hay que hacer otra aclaración. El nivel 1 significa que se trata de un producto para uso urbano y en ella se suelen encuadrar productos con



menor protección pero con ventajas como la ligereza y la comodidad. El nivel 2 corresponde a productos para carretera y por tanto la seguridad es mayor aunque probablemente también el peso.

Pero aquí hay un problema, y es que según información médica no se aconseja una transferencia de fuerza de más de 4KN, es decir que la máxima protección de 9KN es más del doble de lo recomendado por los médicos. Dicen que 4 KN es el máximo soportado por los huesos del tórax antes de romperse y es la fuerza máxima que transmiten las protecciones de hípica o artes marciales. ¿Esto quiere decir que vamos desprotegidos aunque nos compremos una espaldera homologada con nivel 2?. Rotundamente no pero sí podríamos ir más seguros si los fabricantes estuviesen obligados a cumplir con esta cifra en las pruebas de impacto. Aunque no parece muy lógico que se fabriquen protecciones con menor transferencia de energía para montar a caballo o para hacer artes marciales cuando la violencia de un impacto en moto suele ser muy superior debido a la velocidad.

No obstante, después de la información anterior se diseñará según norma.

En el segundo bloque “Métodos y equipos de ensayo” se especifican temas relacionados con:

→ Equipo

Se simulará lo que indica la norma, es decir, soltar una masa para que caiga, siguiendo un recorrido vertical guiado, sobre la muestra colocada

en un yunque de ensayo. El centro de la masa del peso de caída debe quedar sobre el centro del yunque.

El percutor de barra dispondrá con la siguiente configuración

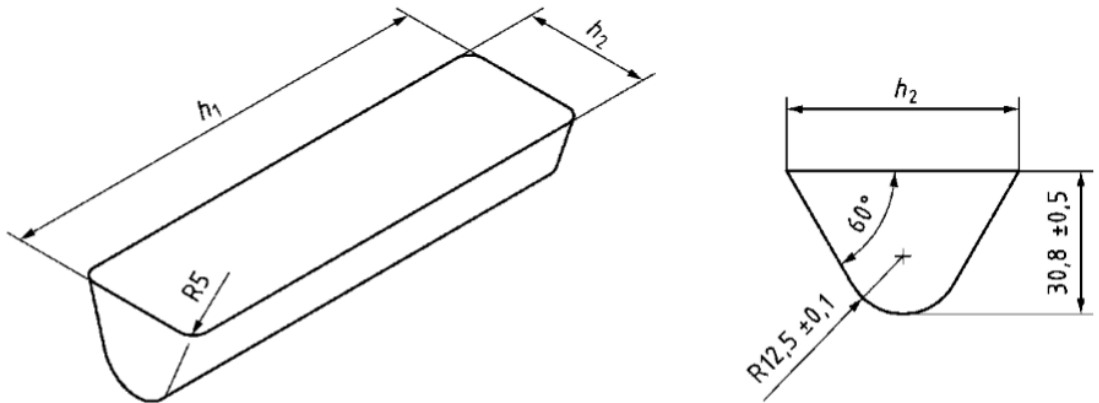


Imagen 9 Percutor de barra. Geometría.

Teniendo la masa guiada y el percutor en conjunto una masa de 5 kg y su energía cinética en el impacto debe ser de 50 J.

El yunque debe poseer una configuración como la siguiente

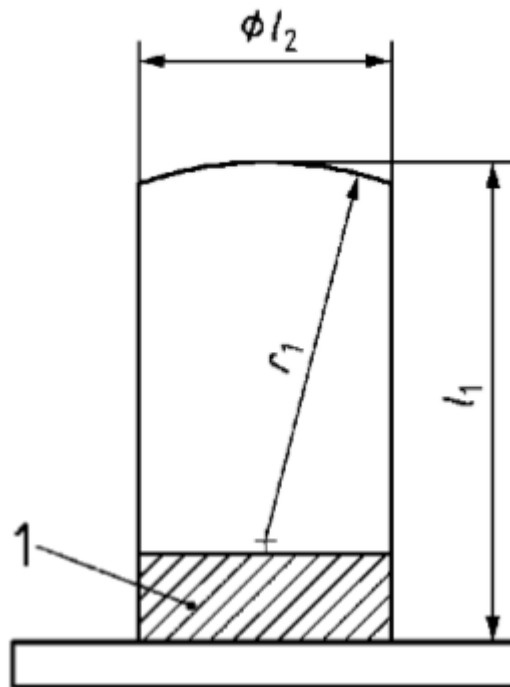


Imagen 10 Yunque. Geometría.

Ambos elementos, tanto percutor como yunque se prepararán de acero pulido o similar.

→ Número de ensayos

Se deben efectuar cinco impactos sobre cada muestra de ensayo. 3 impactos se distribuirán aleatoriamente y dos impactos sobre las zonas que visualmente se identifiquen como las más débiles. Los centros de impacto deben quedar a más de 5 cm entre ellos.

Se ha procedido a identificar los impactos para la simulación según la figura siguiente

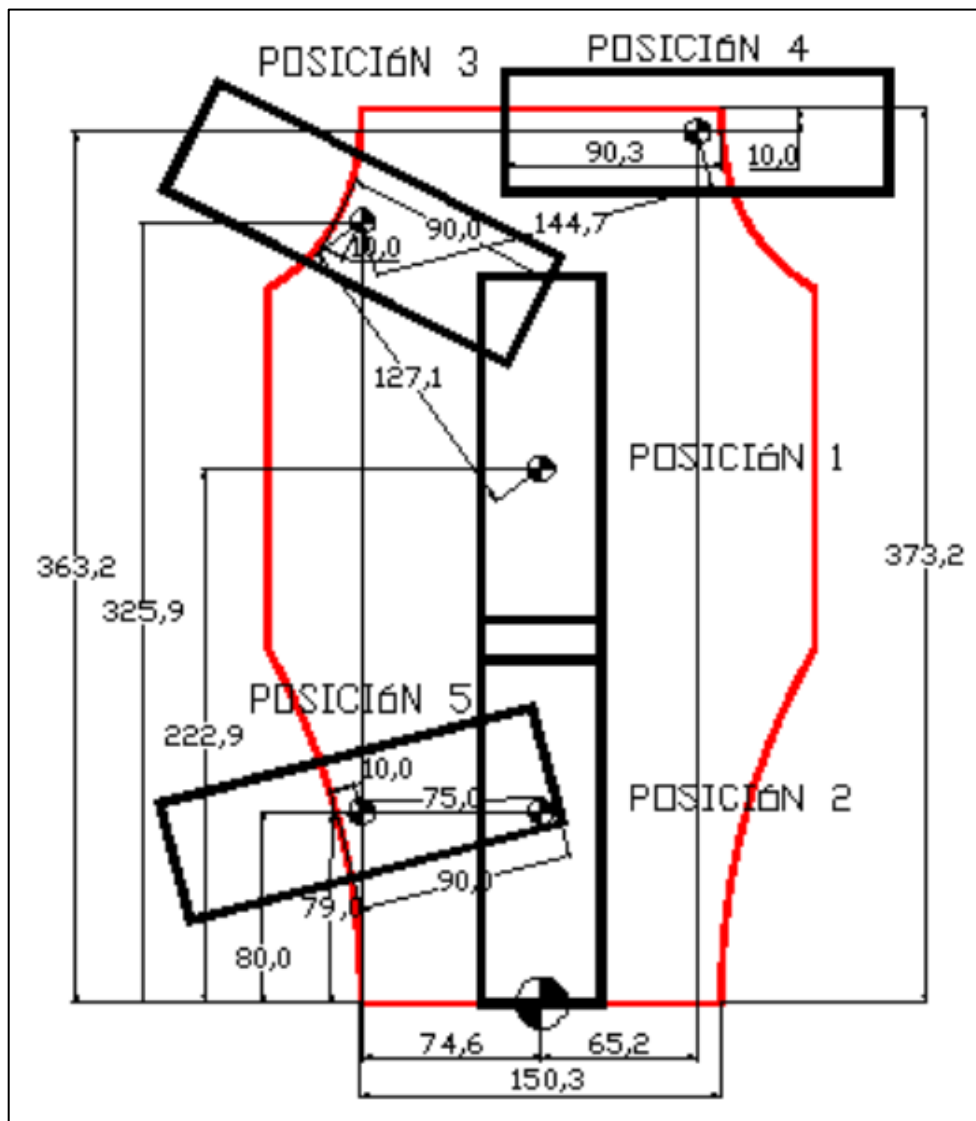


Imagen 11 Posición impactos

Según la figura anterior se tendrá entonces un total de 30 simulaciones, 5 impactos en cada una de las piezas a ensayar, teniendo en cuenta que como se explicó anteriormente serán 3 tamaños a ensayar, lo que hacen 15 simulaciones



o ensayos. Además es obligatorio realizar dos ensayos, uno en condiciones normales y otro con materiales envejecidos (se tratará más adelante).

Para los impactos anteriores se deben cumplir varios condicionantes

- 1) al menos 9 cm del eje longitudinal del percutor deben impactar dentro de la zona de la plantilla
- 2) al menos el punto central del percutor de barra debe estar separado un centímetro del borde de la zona de protección
- 3) los centros de los impactos deben estar separados entre sí más de 50 mm

Tabla 7 Posiciones impactos percutor

| POSICIÓN PERCUTOR | CENTRO GEOMÉTRICO PERCUTOR | | CONDICIÓN 1 | CONDICIÓN 2 | CONDICIÓN 3 |
|----------------------|----------------------------------|--------|----------------|----------------|----------------|
| | X (mm) | Y (mm) | | | |
| 1 | 0 | 222,9 | SI | SI | SI |
| 2 | 0 | 79 | SI | SI | SI |
| 3 | -74,6 | 325,9 | SI | SI | SI |
| 4 | 65,2 | 363,2 | SI | SI | SI |
| 5 | -74,6 | 80 | SI | SI | SI |



Como se observa en la tabla siguiente podemos ver que se cumplen las condiciones marcadas por la normativa, siendo válidas para el resto de tamaños de las protecciones ensayadas, ya que lo anterior se refiere al tamaño medio de espaldera ensayada.

- Ensayos

Obligatoriamente se deben realizar 2 ensayos

- Ensayo de impacto a temperatura ambiente

Las muestras se deben acondicionar durante al menos 48 h en un ambiente con una temperatura de 23 ± 2 °C y una humedad relativa de 50 ± 5 %, además de otras consideraciones secundarias (ver norma).

- Ensayo de impacto en condiciones de humedad tras un envejecimiento hidrolítico.

Resistencia a condiciones de humedad tras un envejecimiento hidrolítico: se almacenan las muestras durante $72\pm 0,5$ h en una caja cerrada sobre la superficie de una masa de agua mantenida a una temperatura de 70 ± 2 °C. Después se extrae la muestra, se cierra herméticamente en una bolsa impermeable al vapor de agua y se expone a una temperatura ambiente de 23 ± 2 °C durante otro periodo de $24\pm 0,5$ h. Después se extrae la muestra de la bolsa y en los 5 min siguientes se inician los ensayos de impacto.

En nuestro caso como no se puede disponer de elementos físicos se procede a recabar información de artículos y diversa literatura [2] [3] [4] y se llega a la conclusión que debemos mermar las propiedades de los materiales ensayados en un 15%. Este punto se calculará y describirá con más detalle posteriormente, en el apartado 3.2 “Simplificaciones”.



2.2 Modelos de material.

Comenzaremos por entender que es un material compuesto, ya que al no haber una definición ampliamente aceptada, partiremos de la definición que creemos más cercana a la ingeniería. Entonces se entiende por material compuesto aquel sistema material integrado por una mezcla o combinación de dos o más micro o macro constituyentes, que se diferencian en forma y composición química y que son insolubles entre sí. Lo que se debe conseguir es que las propiedades del conjunto son mejores que las propiedades de sus constituyentes por separado.

Las propiedades de un material compuesto, entonces, dependen de las propiedades de los constituyentes, de la geometría y de la distribución de estos. Uno de los parámetros más importantes es la fracción de volumen. La distribución del refuerzo es una medida de homogeneidad, mientras que su orientación afecta a la anisotropía del sistema.

Las ventajas de este tipo de materiales son:

- Alta relación resistencia-peso.
- Elevada rigidez.
- Alta resistencia a fatiga.
- Alta resistencia a corrosión.
- Alta resistencia dieléctrica.
- Alta flexibilidad.
- Mejoran las superficies aerodinámicas.
- Posibilidad de construir formas más o menos complejas.
- Excelentes propiedades mecánicas.
- Facilidad de fabricación (alta variedad de acabados).
- Estabilidad dimensional.



Naturalmente, en un material compuesto no pueden ser mejoradas todas estas propiedades, sino que algunas son mejoradas en detrimento de las restantes.

En los materiales compuestos podemos identificar dos fases: una discontinua y más rígida, que se denomina refuerzo, y otra menos rígida, continua, que se denomina matriz. Las funciones del refuerzo son absorber las tensiones e incrementar la rigidez y la resistencia. Y las de la matriz transmitir tensiones entre los elementos del refuerzo, mantener el refuerzo en su posición y protegerlo del medio ambiente.

La resistencia de un material compuesto depende de las fibras utilizadas, su disposición y de la interfase Fibra/Matriz. Los factores condicionantes a la hora de la elección de la fibra y matriz son:

- Una buena humectación.
- Que no haya reacción química entre fibra y matriz.
- Coeficientes de dilatación lo más parecidos posible.

Los principales procesos de fabricación de materiales compuestos son:

- Moldeo por centrifugación.
- Sustrato composite.
- Moldeo por compresión.
- Laminación continua.
- Enrollamiento de filamentos.
- Moldeo manual.
- Moldeo por inyección.
- Pultrusión.
- Moldeo por transferencia de resina (RTM).
- Aspersión.
- Bolsa de vacío

A continuación vamos a dar algunas de las clasificaciones más comunes:



Según el tipo de matriz o refuerzo, obtenemos distintas clasificaciones de los materiales compuestos.

- Según el tipo de matriz: distinguimos entre materiales compuestos con matriz polimérica, metálica o cerámica. Sus características más importantes se describen a continuación:

- ◊ Matriz polimérica: se caracteriza por su baja densidad, alta tenacidad, alta resistencia a la corrosión, baja resistencia mecánica, bajo coste, rapidez y sencillez de conformado. También hay que tener en cuenta a la hora de trabajar con este tipo de matrices, la influencia que tienen las condiciones medioambientales sobre los polímeros, tales como humedad, temperatura y radiación.

Existen dos tipos de matrices poliméricas: termoestables y termoplásticas. Las termoestables se caracterizan por estar formadas por cadenas reticuladas que hacen que la estructura adquiera una disposición permanente, provocando que la reacción sea irreversible y el polímero no pueda reciclarse. Ejemplos de este tipo de polímeros son el poliéster, resinas epoxi, fenólicas, etc.

Por otro lado, las termoplásticas están formadas por moléculas unidas por fuerzas débiles, lo que les confiere la propiedad de reblandecerse y poder ser moldeadas por la acción del calor, endureciéndose al enfriar, siendo todo ello reversible. Algunos ejemplos son el polipropileno, poliamida, polietileno...

Suelen emplearse como refuerzo fibras de vidrio, carbono, boro...

- ◊ Matriz metálica: se caracteriza por dar una mayor capacidad resistente al material compuesto junto a una buena rigidez y tenacidad a fractura, una anisotropía poco pronunciada y un buen comportamiento a altas temperaturas,



aunque hay que tener en cuenta la posible reactividad entre la matriz y el refuerzo. Este tipo de matrices están limitadas por su alta densidad y su dificultad de procesado y mecanizado.

Existen tres tipos: aleaciones de aluminio, titanio y cobre. La elección del refuerzo depende del valor de la temperatura de fusión de la matriz.

◊ Matriz cerámica: ofrece una gran resistencia a esfuerzos mecánicos y a altas temperaturas sin modificar su capacidad resistente. Por el contrario, su tenacidad es muy baja, al igual que sus conductividades térmica y eléctrica. Presentan altas resistencias a compresión, no así a tracción, por lo que lo más común es añadir fibras con alta resistencia a tracción. A veces, bajo niveles de carga tensionales capaces de romper la cerámica, se suelen utilizar refuerzos con Estudio del mecanizado de materiales compuestos un alto módulo de elasticidad, ya que la elongación de la matriz no es suficiente para transferir una significativa cantidad de carga al refuerzo.

Existen tres tipos: alúmina, carburo de silicio y nitruro de silicio. Como refuerzos, se suelen utilizar materiales cerámicos y metálicos.

- Según el tipo de refuerzo: tenemos materiales compuestos con refuerzos discontinuos (partículas, plaquetas o fibras cortas) o con refuerzos continuos (fibras largas, tejidos o laminados).

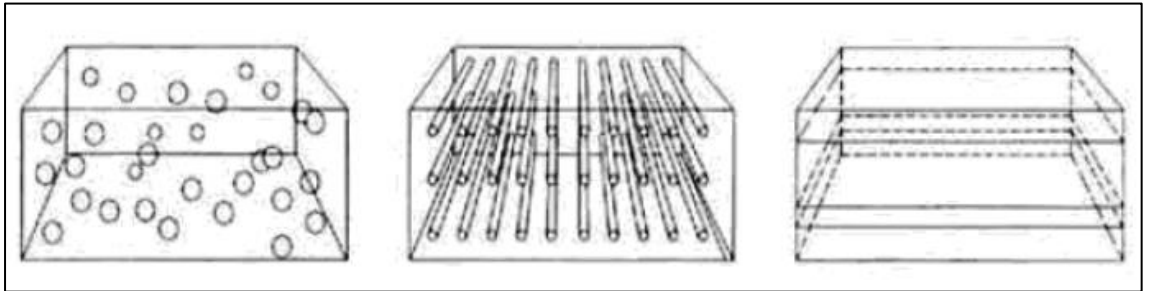


Imagen 12 Compuestos según refuerzo. Partículas, fibras y laminados.

◊ Materiales con refuerzos discontinuos: un material se considera una partícula o plaqueta, cuando todas sus dimensiones son iguales. Y se considera fibra discontinua o fibra corta cuando tienen una longitud mayor que su sección transversal. Sus características son las siguientes.

- Partículas: el aumento de propiedades no es muy elevado, el comportamiento mecánico suele ser isótropo, son los materiales menos costosos y de más fácil fabricación de todos los materiales compuestos y en materiales cerámicos pueden incrementar diferentes propiedades mediante varios mecanismos (dureza, tenacidad, resistencia mecánica...).

Las partículas cerámicas incrementan la rigidez y la temperatura de servicio de las matrices metálicas. Y las partículas dúctiles aumentan la tenacidad de fractura en matrices frágiles.

- Plaquetas: el aumento de propiedades no es elevado, alcanzan mayores grados de compactación que las partículas y al ser aproximadamente bidimensional presentan igual resistencia en su plano.

- Fibras cortas: la longitud de estas influye en las propiedades del material. Los materiales que poseen fibras tienen naturaleza anisótropa con excelentes propiedades en la dirección de las fibras.

◊ Materiales con refuerzos continuos: un material se considera fibra continua o fibra larga cuando tienen una longitud mucho mayor que su sección transversal. Laminado, cuando están formados por dos o más láminas que tienen dos de sus dimensiones mayores que la tercera. Y tejido o estructuras sándwich, cuando la matriz forma un esqueleto que es relleno de un segundo material. Sus características más destacadas son las siguientes.

- Fibras largas: aumentar la longitud de las fibras no influye en las propiedades del material.

- Laminados: cada lámina puede ser un material (fibra corta, fibra larga o tejido de dos dimensiones). Los laminados se forman a partir de la repetición de un número finito de láminas con diferentes orientaciones.

- Tejidos: presentan una elevada rigidez y resistencia a esfuerzos de flexión y una alta capacidad de aislamiento.

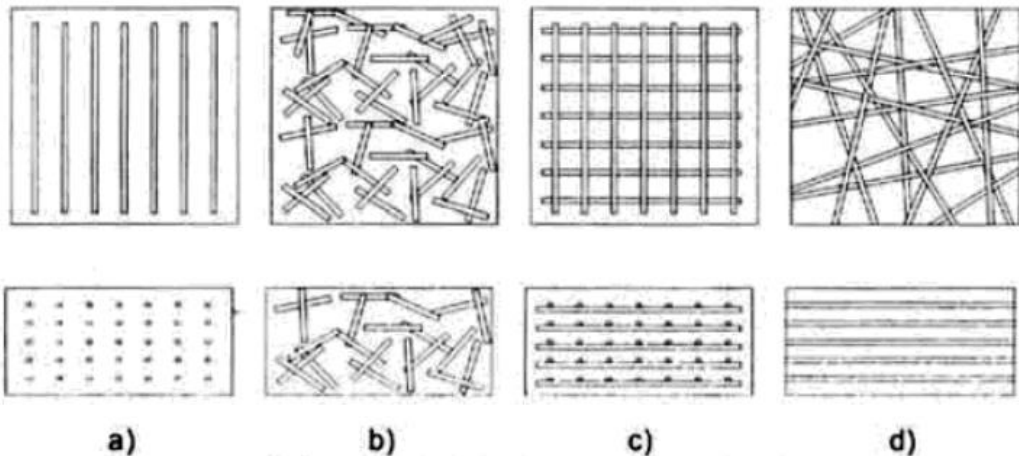


Imagen 13 Compuestos por Fibras.

a) Unidireccional b) Corta aleatoria c) Tejido d) Fibra larga aleatoria o Mat



En el presente trabajo nos vamos a centrar en los materiales compuestos tipo MAT, como el indicado en la figura anterior (fig. 13 d)), está compuesta por fibras aleatoriamente orientada. Se considera que existe isotropía (mismas propiedades en todas las direcciones).

Para este tipo de materiales, según indicamos en el apartado “3.2 Simplificaciones” indicamos, desde el punto de vista micromecánico, las ecuaciones según Chen a emplear para calcular sus propiedades.

No obstante vamos a indicar, según el tipo de láminas con fibra larga (unidireccional, tejido y aleatorias) algunas propuestas para calcular sus propiedades [

- Unidireccionales

$$E_1 = V_f E_f + (1 - V_f) E_m$$
$$E_2 = \frac{E_m / (1 + V_m^2) (1 + 0,85 V_f^2)}{(1 - V_f)^{1,25} + \left(\frac{E_m}{E_f} \right) \left(\frac{V_f}{(1 + V_m^2)} \right)}$$
$$G_{12} = \frac{G_m (1 + 0,6 V_f^{0,5})}{\left[(1 - V_f)^{1,25} + \left(\frac{V_f}{(1 - V_m^2)} \right) \right]^{1,25}}$$
$$\nu_{12} = V_f \nu_f + (1 - V_f) \nu_m$$

Siendo

E_f y E_m Módulo Elástico de la Fibra y Matriz

ν_f y ν_m Coeficiente de Poisson de la Fibra y Matriz



G_m Módulo de Young

V_f y V_m Volúmenes de la Fibra y Matriz

- Tejido

- Equilibrado. Se considera que el módulo longitudinal en la dirección 1 coincide en la dirección 2.

$$E_1 = E_2 = V_f \left(\frac{E_f}{2} + \frac{3}{2} E_m \right) + E_m$$

$$G_{12} = \frac{E_m(4V_f + 1)}{3}$$

$$\nu_{12} = \frac{G_{12}}{E_1}$$

- No Equilibrado. Se considera que el módulo longitudinal en la dirección 1 es diferente en la dirección 2. Es decir, se usan ecuaciones diferentes en función de la dirección longitudinal y transversal.

$$E_{VR} = \frac{1}{\lambda} [C_C E_L + (1 - C_C) E_T]$$

$$E_{TR} = \frac{1}{\lambda} [C_C E_T + (1 - C_C) E_L]$$

$$V_{UR} = \frac{V_{LT}}{C_C + (1 - C_C) \frac{E_L}{E_T}}$$

Siendo

$$\lambda = 1 - V_{LT} V_{TL}$$

$$C_C = \left[\frac{(N_f T)_L}{(N_f T)_L + (N_f T)_T} \right]$$



N_f Número de hilos por centímetro

T Título del hilo en T_{ex}

Lo expuesto anteriormente ha intentado ser un resumen de lo complicado y de las diversas teorías para llegar a “estimar” las propiedades mecánicas de los diferentes modelos de materiales compuestos que existen, no siendo tema de este trabajo profundizar en los distintos tipos de modelos que existen, teorías de cálculo de las propiedades,...

2.3 Criterios de fallo

Los criterios de fallo son teorías que se aplican para determinar si los esfuerzos a los que se somete una pieza que se está diseñando van a originar un fallo catastrófico. Son de especial interés en los materiales compuestos debido a la existencia de criterios múltiples de análisis y a sus variadas disposiciones.

Vamos a introducir de forma resumida algunos grupos en los que podríamos encuadrar los distintos tipos de fallo, además de indicar que estos pueden ser clasificados en dos grupos: criterios de fallo independientes y criterios de fallo polinomiales.

El primer criterio se conoce como de máximo esfuerzo, queriéndose decir que los esfuerzos en las direcciones principales del material deben ser menores que los esfuerzos máximos de resistencia, aplicando un factor de seguridad [5].

Este criterio pertenece a los criterios de fallo independientes. La premisa básica presente en la predicción de fallo usando el criterio de esfuerzo máximo es el mismo que el usado por los materiales isótropos. En este criterio se asume que el fallo del compuesto ocurrirá si cualquiera de las siguientes condiciones se satisface:



$$\sigma_1 > X_T \quad \sigma_4 > R$$

$$\sigma_2 > Y_T \quad \sigma_5 > S$$

$$\sigma_3 > Z_T \quad \sigma_6 > T$$

Donde $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ son los componentes de los esfuerzos normales, $\sigma_4, \sigma_5, \sigma_6$ son los esfuerzos, X_T, Y_T, Z_T son las resistencias normales del compuesto en las direcciones 1, 2, 3 y R, S, T son las resistencias cortantes en los planos 23, 13 y 12 respectivamente.

Cuando $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ son de naturaleza compresiva deben ser comparadas con X_c, Y_c, Z_c que son las resistencias normales en compresión a lo largo de las direcciones 1, 2, 3 respectivamente.

La experiencia del diseñador le dice qué criterio usar, de acuerdo al material, el esquema de trabajo y el contexto de la aplicación. El software de elementos finitos analiza los esfuerzos en las direcciones principales y muestra valores comparables con los máximos para cada material.

Comentar que por la naturaleza de nuestro material empleado, epoxi como resina y fibras largas aleatoriamente distribuidas, vamos a utilizar el criterio de fallo de esfuerzo máximo, simplifícadamente como:

$$FS = \frac{\sigma_L}{\sigma_e} \geq 1$$

Siendo entonces FS el factor de seguridad, σ_L es el límite de rotura o fallo y σ_e sería las tensiones producidas en el modelo ensayado, pudiendo ser Von Mises o Máxima Tensión.



2.4 Problema de impacto y parámetros que influyen

2.4.1 Problema de impacto

Normalmente, a excepción de cuando se trata temas como “fatiga”, se asume que las cargas que actúan sobre cualquier elemento se aplican gradualmente, es decir, sin impacto. Se asume, que para cargas estáticas (sin impacto) el ratio de aplicación de la carga es tan pequeño que la aceleración será también pequeña, por lo que el efecto de esa aceleración puede ser despreciado.

Sin embargo las cargas suelen ser dinámicas (con impacto) y se dice que un elemento está sometido a cargas dinámicas cuando las cargas ocasionan en alguna parte del elemento una aceleración, de manera que la magnitud de la misma no puede despreciarse.

Dentro de los “Problemas de impacto” pueden darse dos situaciones:

- Cargas de impacto a alta velocidad

Este tipo de cargas o situaciones generan aceleraciones de gran magnitud y provoca situaciones que en el presente estudio no se tendrán en cuenta debido fundamentalmente a dos razones.

1.- Se produce deformación plástica, particularmente en los puntos de impacto. Por esta razón es muy difícil determinar la magnitud de la carga de impacto y aunque se conociera es difícil establecer una relación entre la carga de impacto y el estado de esfuerzos y deformaciones en cualquier punto del elemento, porque la carga de impacto produce ondas de deformación del material y los esfuerzos y las deformaciones en cualquier punto del elemento dependen de la propagación de esas ondas de propagación.



2.- Si alguna parte del elemento está deformado plásticamente, es necesario que la relación esfuerzo-deformación para ese material sea conocida. En el presente estudio es impensable conocer dicha relación.

- Cargas de impacto a baja velocidad

Durante los impactos a baja velocidad el ratio de aplicación de las cargas es tan reducido, que las ondas de deformación desarrolladas dentro del elemento son muy pequeñas y pueden ser despreciadas y el material del elemento posee básicamente las mismas propiedades que presentaría en el caso estático. Bajo estas condiciones el efecto de las cargas de impacto puede considerarse equivalente al efecto de una carga aplicada estáticamente y puede estudiarse con un enfoque cuasiestático.

A continuación veremos algunos parámetros que influyen en el problema de impacto como puede ser la fibra y la resina, la velocidad de deformación,...

2.4.2 Parámetros que influyen

2.4.2.1 Propiedades del material

- *Tipo y configuración de la fibra*

- ◊ Tipo

El material de fabricación de las fibras es determinante para el comportamiento a impacto. Normalmente se prefiere la utilización los materiales que presenten una alta absorción de energía específica; esto es un alto módulo elástico, alta deformación hasta ruptura y baja densidad. Es importante la velocidad del sonido en la fibra, dependiente de su rigidez y densidad, pues influirá haciendo que la energía se distribuya por la placa de



forma más o menos rápida. Una alta velocidad de la onda distribuye la energía en un área mayor disminuyendo las deformaciones.

◊ Configuración

La mayoría de los materiales compuestos utilizados actualmente se construyen con fibras unidireccionales o con tejidos, en pocos casos se utilizan tejidos en la dirección del espesor. En el caso de los laminados a base de tejidos, se observa que éstos presentan una mayor resistencia a la fractura interlaminar. El patrón ondulado debido al tejido provoca que las fisuras tengan un área mayor y por tanto necesiten mayor energía para avanzar.

Los materiales con tejido tridimensional tienen una mejor tolerancia al daño, puesto que tienen mayor resistencia ante la delaminación debido a las fibras orientadas en la dirección del espesor.

• *Estructura y superficie de los hilos*

◊ Estructura

Los hilos de altas prestaciones se confeccionan mediante la agrupación de filamentos enredándolos o retorciéndolos. Retorcer los filamentos produce una alteración de la rigidez y resistencia del hilo. Así en un estudio de Rao y Farris con varios materiales se obtuvo que el ángulo óptimo de torsión que maximiza la resistencia esté en torno a 7°.

◊ Superficie

En los materiales compuestos rígidos, el tratamiento de los hilos tiene una influencia fundamental en la adhesión con la matriz. Una buena adhesión favorece la resistencia ante impactos con baja energía, reduciendo la delaminación producida principalmente por modo I. En impactos de alta



energía donde se quiere parar la masa que provoca el impacto suele ser más favorable que se produzca mayor delaminación para una mejor disipación de la energía. En protecciones flexibles construidas sólo con tejidos, la fricción entre los hilos es muy importante, pues éstos tienen una mayor movilidad, especialmente cuando las condiciones de contorno lo favorecen.

- *Sensibilidad a la velocidad de deformación*

Las propiedades mecánicas de los polímeros de alta resistencia son sensibles a la velocidad de deformación, provocando fenómenos de relajación y fluencia. Algunos investigadores han estudiado estas propiedades, ya que la información obtenida de test estáticos o cuasi-estáticos no es suficiente para caracterizar el material ante un impacto.

En un trabajo de Wang y Xia [6] se estudia el comportamiento del Kevlar 49 a distintas velocidades de deformación como se puede ver en la siguiente figura. Se observa que la rigidez aumenta al aumentar la velocidad de deformación.

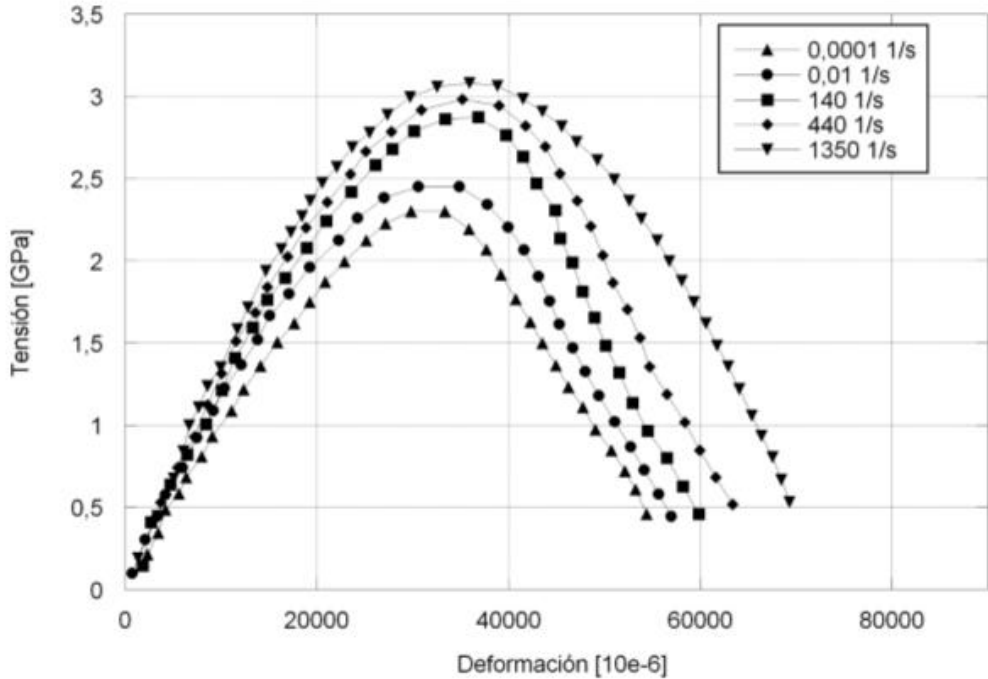


Imagen 14 Curvas σ - ϵ de kevlar 49 a distintas velocidades de deformación

Para materiales como fibra de vidrio, polietileno y aramida (KEVLAR), su sensibilidad a la velocidad de deformación dificulta la generalización del comportamiento del material ante distintas velocidades de impacto. En un estudio realizado por Zhou [7], se obtienen diferencias entre ensayos de penetración estáticos y dinámicos. Se encontró que los parámetros del material no eran acertados si no se utilizaba algún factor corrector dependiente de la velocidad de deformación.

- *Tejido*

Las propiedades en el tejido serán distintas a las de los hilos generalmente. Al tejer los hilos aparece ondulado, fricción e interacción de los hilos que



afectan al comportamiento ante carga. En mayor o menor medida el proceso de tejido disminuye las propiedades de las fibras.

En cuanto a la geometría del tejido se ha observado que los tejidos equilibrados (con fibras iguales y en igual número en ambas direcciones) absorben más energía que los no equilibrados.

- *Resina*

La resina puede influir aumentando la rigidez a flexión de la placa, modificando su límite de referencia. Los dos tipos principales de matriz, termoplástica o termoestable, tienen un comportamiento distinto frente al impacto, siendo la resina termoplástica menos rígida. La tenacidad de la resina es importante, influye sobre la delaminación. Las resinas frágiles experimentan una delaminación instantánea con muy poco crecimiento, por el contrario las resinas tenaces sufren un crecimiento de la delaminación lento y controlado.

2.4.2.2 Propiedades de la muestra a ensayar

En cuanto a las dimensiones la influencia del elemento a ensayar es importante principalmente en su aplicación a ensayos, para asegurarse de que se reproducen las condiciones adecuadamente.

Para los impactos a baja velocidad las dimensiones determinan la cantidad de energía que podrá almacenar durante el impacto, ya que toda la placa se verá afectada provocando una deformación global. En cambio para los impactos a alta velocidad el efecto de las dimensiones prácticamente desaparece porque el daño queda localizado en una zona muy pequeña. A velocidades menores se observa que las placas de menor tamaño ofrecen más resistencia que las mayores.



Y en cuanto al espesor hay una influencia muy distinta en protecciones flexibles frente a las rígidas. En el primer caso el espesor se suele indicar con el número de capas. Se observa experimentalmente que la absorción de energía específica al aumentar el número de capas decrece, posiblemente porque la interacción entre las capas produce grandes tensiones en las primeras capas. En una investigación de Cunniff [8] sobre protecciones flexibles de múltiples capas, encontró que velocidades muy elevadas (impactos a altas velocidades) las capas frontales del material tenían muy poca influencia en la absorción de energía del percutor o masa, debido al fallo instantáneo por la enorme deformación sufrida al inicio del impacto. En las protecciones rígidas el espesor no sólo tiene importancia en cuanto a su límite último, sino que la relación entre el espesor y la forma y tamaño del percutor influye en el mecanismo principal de penetración. Se ha observado que con paneles de mayor espesor el daño producido por la penetración inicial del percutor es mayor al haber una menor flexión del panel.

2.4.2.3 Características del percutor

◊ Forma del percutor

En las protecciones la forma del percutor influye directamente en la absorción de energía y los mecanismos de fallo de las fibras. En un estudio con tejido de Kevlar y percutores de distinta forma, se llega a la conclusión de que a baja velocidad los percutores más puntiagudos tenían una deceleración mayor, mientras que a altas velocidades deceleraban antes los percutores más romos.

Estos resultados muestran que los mecanismos de fallo cambian conjuntamente con la velocidad y la forma del percutor. En estudios con distintas formas de percutor (hemisférico, plano, ojival y cilíndrico) se ha

observado que la forma hemisférica tiene la mayor pérdida de energía porque estira las fibras hasta su rotura. El percutor de frente plano tiende a cortar las fibras disipando menos energía. Los percutores puntiagudos atraviesan el material mediante la penetración entre las fibras, separándolas. En un estudio de Lim [9] se observa que el efecto de la forma del percutor en paneles de tejido disminuye con el incremento del número de capas. En los paneles de material compuesto rígidos la forma del percutor tiene una influencia muy importante, en la figura siguiente se ve claramente la diferencia en la evolución de la fuerza aplicada respecto al desplazamiento en un ensayo estático de CFRP, y se observa que el percutor plano necesita un pico de fuerza de mayor valor.

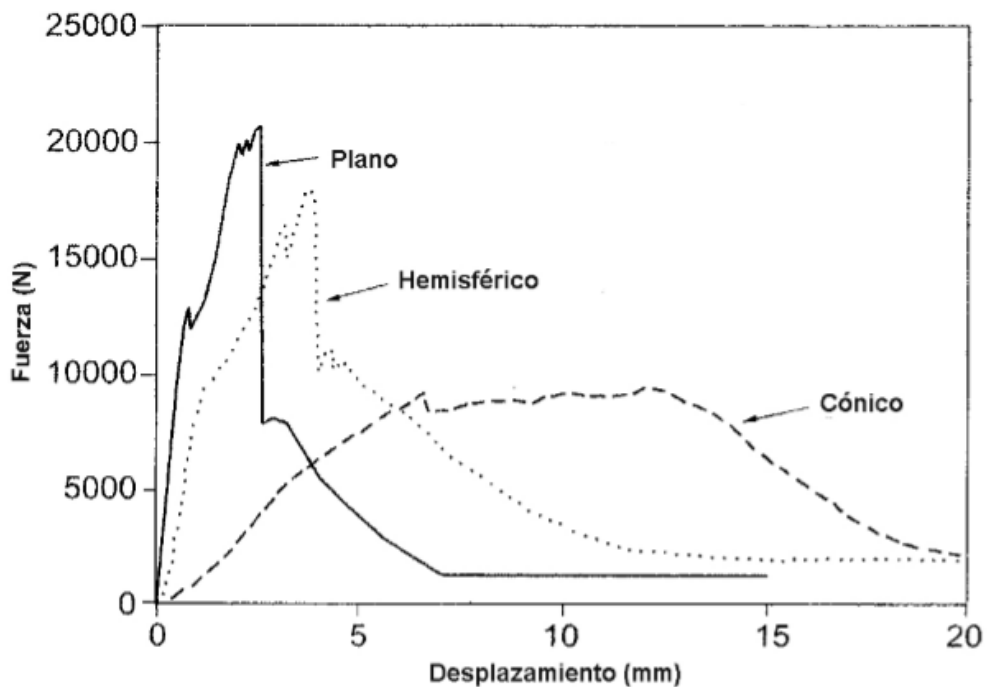


Imagen 15 Curvas F- ϵ para distintos penetradores en fibra de carbono



En general los percutores menos afilados realizan una penetración inicial seguida de un efecto similar a cizalladura plástica que forma un tapón. El mecanismo que domina en el caso de percutores planos es parecido al que se produce en el impacto sobre metales, con la diferencia de que en materiales poliméricos compuestos no es deformación plástica a cortadura, sino fractura de las fibras y la matriz. Así pues las analogías con el comportamiento de metales son difíciles de realizar. Se ha observado que en el caso de percutores de punta cónica el comportamiento de éstos es distinto en función de la rigidez del material en el plano del laminado. En materiales como Kevlar o Spectra el percutor penetra formando un orificio similar al que se produce en un material dúctil, mientras en laminados de carbono o fibra de vidrio el percutor tiene que atravesar las capas rígidas del laminado. Los percutores de punta hemisférica muestran un comportamiento similar a los percutores de punta plana, con unas fuerzas de contacto ligeramente menores.

◊ Resistencia del percutor

La deformación local del percutor supone un mecanismo de pérdida de energía. Es importante cuando la resistencia del material del percutor es suficientemente baja como para permitir una deformación muy grande. Parece que es más importante la diferencia de resistencia entre ambos materiales, y no tanto la resistencia absoluta. Si un panel es suficientemente resistente respecto al material del percutor, de forma que cause en el percutor una deformación extensa, se incrementará el área efectiva del percutor reduciéndose la presión sobre el objetivo.

◊ Masa del percutor



En impactos sobre materiales compuestos es muy importante la relación entre la masa del percutor y el laminado, pues aparecen distintas respuestas en el panel en función de ésta relación. Los percutores muy pequeños producen en el panel una respuesta balística, dominada por las ondas en la dirección del espesor y con una duración del impacto generalmente corta. Percutores con una masa moderadamente pequeña producen una respuesta en la que dominan las ondas de flexión y cortadura. Percutores con masas bastante mayores a la de la placa producen una respuesta cuasiestática con la máxima carga, deflexión y deformaciones en fase. Un trabajo más detallado sobre este tema se puede encontrar en el estudio de Olsson [11].

◊ Velocidad del percutor

La velocidad de impacto influye en el comportamiento de los compuestos. El daño sufrido por la placa será de distinto tipo, los impactos a alta velocidad suelen provocar una mayor proporción de fallo por cortadura en lugar de estiramiento de las fibras. Existe una división sugerida en un trabajo de Lim según la velocidad para el tipo de impacto que sufre el objetivo.

- Velocidades bajas: El percutor no penetra el material, por lo que la energía disipada es igual a la energía cinética del percutor.
- Velocidad crítica: En el estudio de Lim se denomina velocidad crítica a aquella en la que la deflexión transversal producida por el percutor tiene tiempo de propagarse por la placa. Se suele producir, en esta zona, un gran estiramiento de las fibras hasta producirse su rotura.
- Velocidad alta: En este tipo de impactos el panel es atravesado rápidamente por el percutor, la deformación no se extiende más allá de la



zona cercana al impacto. La energía absorbida es pequeña y se vuelve aproximadamente constante con la velocidad.

Los daños que se muestran en la figura siguiente están divididos de una forma ligeramente diferente a la clasificación anterior. En este caso la velocidad baja se debe interpretar como una velocidad muy baja y provoca un patrón característico de delaminación en una zona cónica. La deformación correspondiente a velocidad alta se muestra cuando la velocidad de impacto es muy superior.

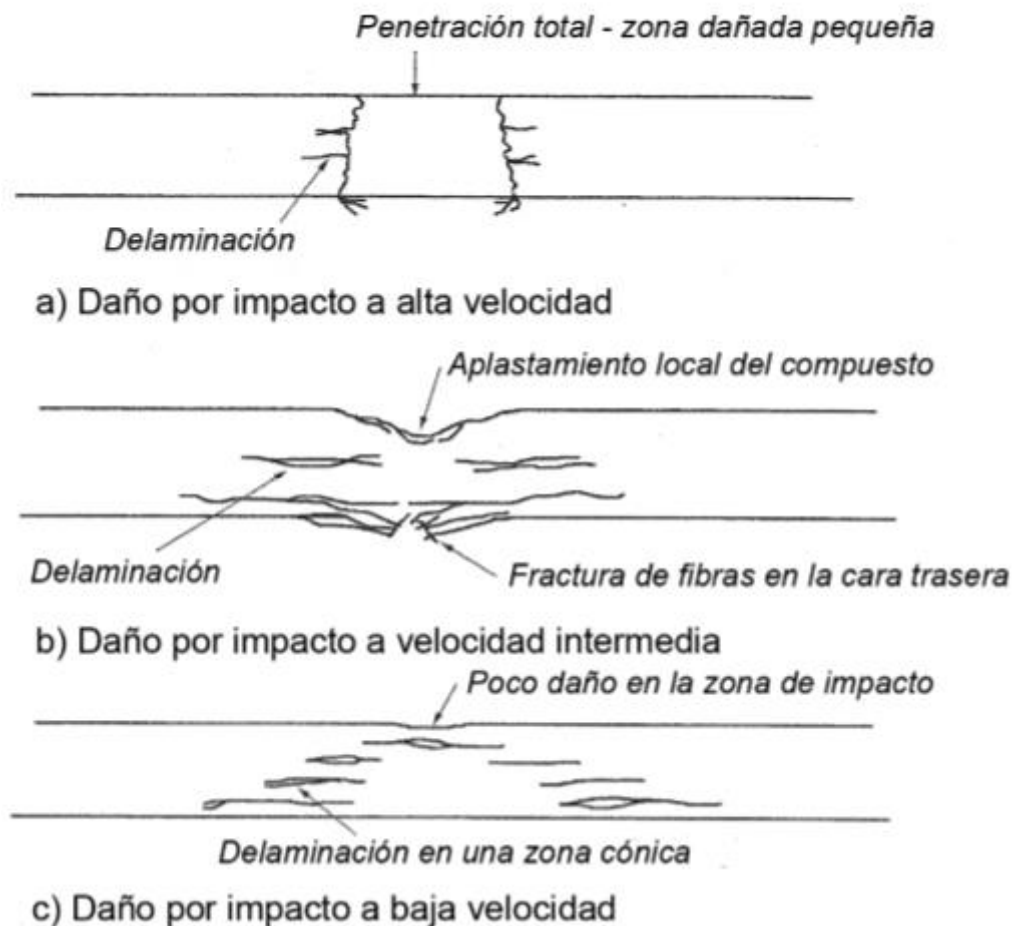


Imagen 16 Tipo de daño producido según la velocidad del percutor

2.5 Análisis dinámico explícito e implícito

El método implícito es aplicable a problemas estructurales débilmente no lineales mientras que en problemas de conformado de material, es posible emplear uno u otro método. En problemas altamente no lineales como impactos, se debe emplear el método explícito debido a que el tiempo de análisis es mucho más corto y los efectos dinámicos son más importantes y la solución es más inestable.



El tiempo de integración o tiempo entre dos secuencias de sucesos (tiempo de iteración) es la mayor diferencia entre ambos métodos. Para el implícito, el tiempo de la iteración puede ser arbitrariamente grande, y aun así mantener la estabilidad de la solución y obtener convergencia. Si se emplea el método implícito para problemas no lineales, puede suceder que no se obtenga convergencia debido a que los tiempos de paso se hacen excesivamente pequeños. El método explícito es estable siempre y cuando el tiempo de la iteración sea menor al tiempo crítico que se encuentra a partir de la frecuencia natural más alta de la estructura. Dado que los tiempos de iteración son tan pequeños, el método explícito es útil para problemas transitorios de muy corta duración.

A continuación se presenta las diferentes formulaciones empleadas por el paquete informático utilizado (ANSYS®).

Formulación dinámica explícita

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 σ_{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:

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

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 $n - 1/2$, las velocidades para un instante $n + 1/2$ 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:

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

Formulación dinámica implícita

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 amortiguamiento. 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. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

3.1 Materiales. Propiedades.

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, tal y como se aprecia en la figura siguiente.

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: espaldera, percutor y yunque.

- Espaldera: el material del que está formada es un material compuesto por una resina tipo epoxi y de fibras largas con disposición aleatoria. Este formato le da a nuestro componente un comportamiento casi isótropo.

- Percutor y yunque: Se modelizará con un acero de la propia tabla de materiales de ANSYS®, ya que el comportamiento de estos elementos de acero frente al resto de materiales hace que no sea necesaria la utilización de las propiedades exactas según marca la norma.

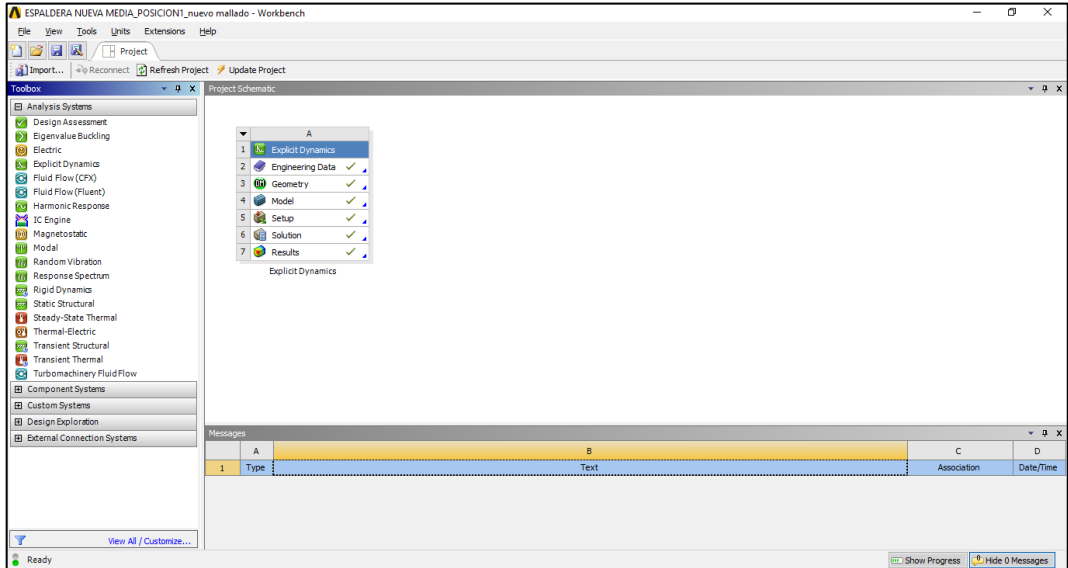


Imagen 17 Ventana principal de trabajo

Una vez que conocemos los materiales que vamos a emplear en el cálculo se deben recopilar las propiedades mecánicas. Las propiedades mínimas que debemos conocer de nuestros materiales serán aquellas necesarias para que se puedan realizar los cálculos y estarán en función de los modelos que tiene implantado el programa informático, tal y como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 8 Materiales y sus efectos en EXPLICIT DYNAMICS (ANSYS®)

| Clase de Material | Efectos del Material |
|-------------------|---|
| Metales | Elasticidad Plasticidad Endurecimiento por Deformación Isótropa Endurecimiento por Deformación Cinemática Rápido Endurecimiento por Deformación Isótropa Ablandamiento Térmico Isótropo Fractura Dúctil Fractura Frágil (basado en Energía de la Fractura) Fallo dinámico (Ripio) |
| Hormigón/Roca | Elasticidad Compactación Porosa Plasticidad Endurecimiento por Deformación Rápido Endurecimiento por Deformación en Compresión Rápido Endurecimiento por Deformación en Tracción Plasticidad Dependiente de la Presión Plasticidad Dependiente del Ángulo de la Veta Daño por Cizalladura / Fractura Daño por Tracción / Fractura |
| Tierra/Arena | Elasticidad |



| | |
|-------------------|--|
| | Compactación Porosa Plasticidad Plasticidad Dependiente de la Presión Daño por Cizalladura / Fractura Daño por Tracción / Fractura |
| Cauchos/Polímeros | Elasticidad Viscoelasticidad Hiperelasticidad |
| Ortótropos | Elasticidad Ortótropa |

El comportamiento de los materiales con los que vamos a trabajar será elástico-plástico. Los valores necesarios en las simulaciones proceden de datos obtenidos por fabricantes especializados (se adjuntan fichas en el anexo correspondiente).

En la tabla siguiente se recogen las propiedades mecánicas introducidas por cada material. Varios valores de las propiedades mecánicas, al ser considerados materiales con comportamientos isótropos, se hacen necesarios dos de ellos, pudiéndose calcular el resto.

| MATERIAL | DENSITY (kg/m ³) | YOUNG'S MODULUS, E (Pa) | POISSON'S RATIO | BULK MODULUS (Pa) | SHEAR MODULUS (Pa) |
|-----------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|
| ACERO | 7860 | 2·10 ¹¹ | 0,3 | 1,667·10 ¹¹ | 7,69·10 ¹⁰ |
| PROTECTOR | 1400 | 45,9·10 ⁹ | 0,47588 | 3,1722·10 ¹¹ | 1,555·10 ¹⁰ |



Debido a que uno de los materiales ha sido personalizado, se ha introducido sus valores manualmente y estos valores se han calculado aproximadamente y mediante estimaciones que se presentan en el apartado siguiente.

3.2 Simplificaciones

La modelización del problema debe hacerse aplicando la mayor simplificación posible sin que se vean afectados los resultados, de forma que se ahorre tiempo de simulación o que se reduzca el tamaño de los elementos donde sea adecuado. A menudo los problemas presentan alguna simetría o alguna geometría real que no aporta nada al proceso de cálculo.

De los tres elementos introducidos en la simulación la espaldera se ha intentado respetar al máximo su geometría sin realizar ninguna simplificación. Además es una geometría estudiada bastante simple. De los otros elementos, el percutor y el yunque, se han realizado simplificaciones en el yunque, ya que por la metodología del proceso del programa informático se ha considerado que la cara de dicho elemento en contacto con la espaldera es el único elemento más fiel a la realidad, ya que tiene que poseer una forma de cúpula tal y como exige la normativa aplicable. En cuanto al percutor es una geometría tal y como exige la norma. Esto es así porque cuando impacta el percutor sobre la espaldera debe quedar la línea del percutor, por la forma que posee la cara de contacto del percutor, su parte central en el centro de la cúpula del yunque. Por lo tanto en la parte exterior de la espaldera impactará una línea y por la parte interior un punto.

En la siguiente figura se intenta aclarar lo comentado anteriormente:

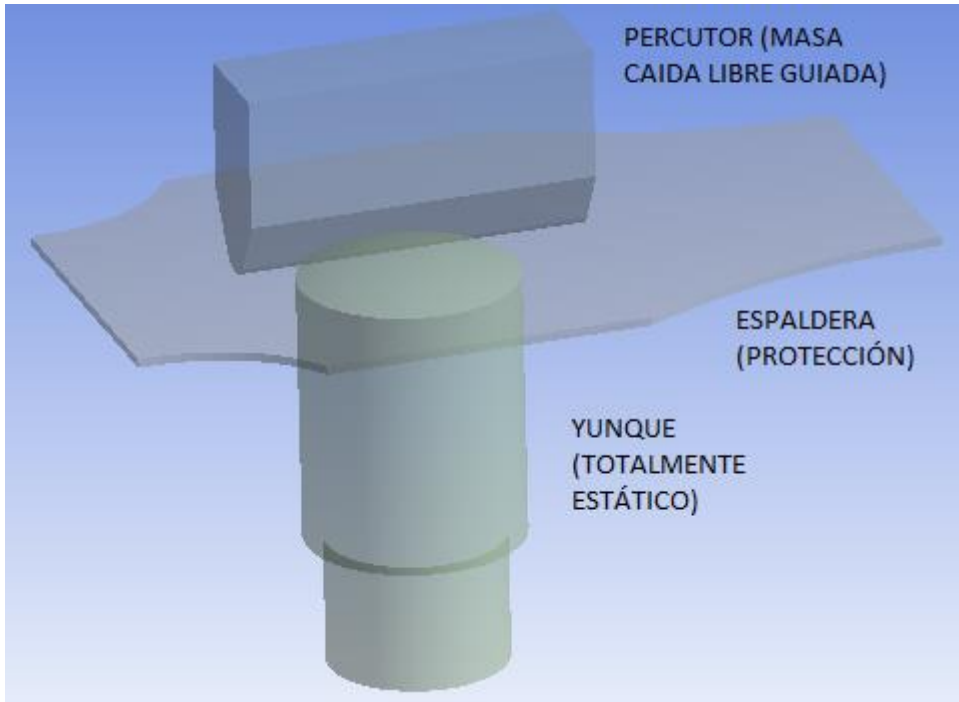


Imagen 18 Posición elementos ensayo

En cuanto a la obtención de las propiedades mecánicas del material llamado PROTECTOR se han hecho varias estimaciones.

Vamos a caracterizar estimando propiedades mecánicas de un material compuesto por epoxi y kevlar, procedentes de un compuesto comercial de un contenido de fibra en volumen de un 60% y unidireccional.

Para estimar las siguientes propiedades:

- Módulo de Young (E)
- Módulo de Poisson (ν)
- Módulo cizallamiento (G)

Vamos a considerar las siguientes fórmulas empíricas que en la práctica predice valores con bastante precisión:



$$E_r = \frac{3}{8} E_f + \frac{5}{8} E_m$$

$$G_r = \frac{1}{8} E_f + \frac{1}{4} E_m$$

$$\nu_r = \frac{E_r}{2G_r} - 1$$

Siendo:

E_m → *Módulo de Young de la matriz (epoxi)*

E_f → *Módulo de Young de la fibra (Kevlar)*

Quedando las propiedades con los siguientes resultados:

$$E_r = \frac{3}{8} 112,4 + \frac{5}{8} 6 = 45,90 \text{ GPa}$$

$$G_r = \frac{1}{8} 112,4 + \frac{1}{4} 6 = 15,55 \text{ GPa}$$

$$\nu_r = \frac{49,90}{2 * 15,55} - 1 = 0,47588$$

A continuación vamos a estimar el límite de rotura (rigidez) utilizando, por ejemplo, la Ec de Chen [10].

$$\sigma = \frac{2\tau_m}{\pi} \left[2 + \ln \frac{\xi \sigma_L \sigma_M}{\tau_m^2} \right]$$

Siendo

- τ_m = *Límite a cortadura de la matriz (epoxi)*
- σ_m = *Límite tracción de la matriz (epoxi)*



- $\sigma_L =$ Límite tracción de las fibras (Kevlar)
- $\xi =$ Factor de forma de las fibras

Teniendo las siguientes características

- $\tau_m = 30 \text{ MPa}$
- $\sigma_m = 82,74 \text{ MPa}$
- $\sigma_L = 75 \text{ GPa}$ ($V_f = 60\%$) $\rightarrow \sigma_L = 37,5 \text{ GPa}$ ($V_f = 35\%$)
- $\xi = 1$ (Fibras largas orientación aleatoria)

Podemos calcular lo siguiente

$$\sigma = \frac{2\tau_m}{\pi} \left[2 + \ln \frac{\xi \sigma_L \sigma_m}{\tau_m^2} \right] = \frac{2 * 30}{\pi} \left[2 + \ln \frac{1 * 37,5 * 10^3 * 82,74}{30^2} \right] = 193,763 \text{ MPa}$$

También se presentan a continuación los valores estimados de las propiedades mecánicas para el material PROTECTOR en el caso del ensayo en que el material será envejecido y por lo tanto sus valores serán minorizados.

Este punto se ha realizado estimando una merma del 15%, tomando como referencia un estudio sobre los efectos del envejecimiento hidrolítico en materiales compuestos epoxi-kevlar, entre otros, de las propiedades mecánicas [2] y [4]. En estos estudios, según las siguientes gráficas (13, 14 y 15)

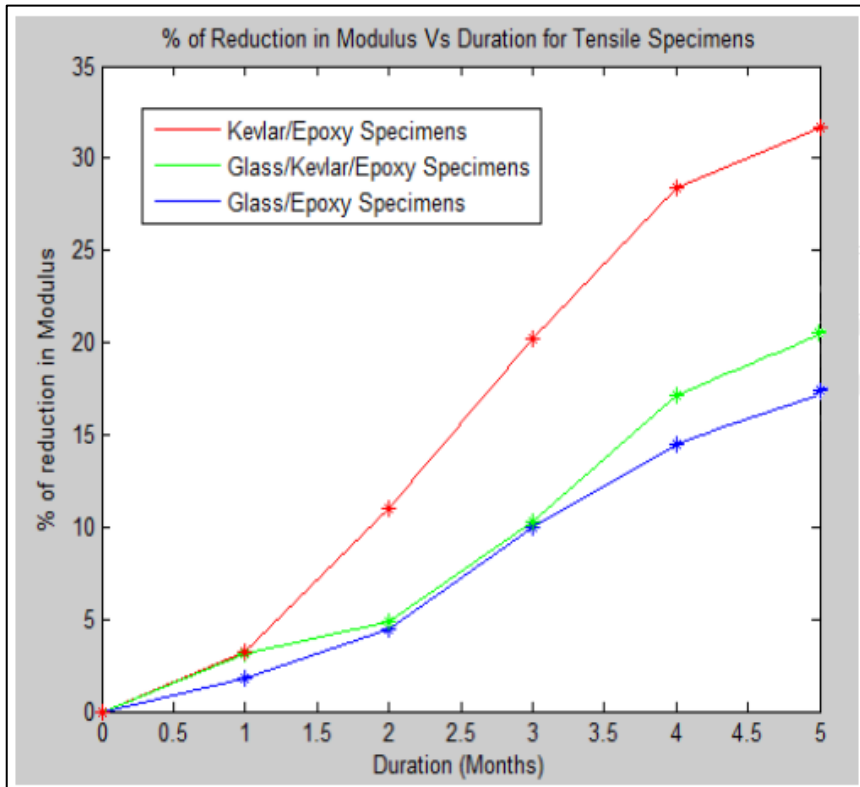


Imagen 19 % reducción (módulos de tensión en función del tiempo)

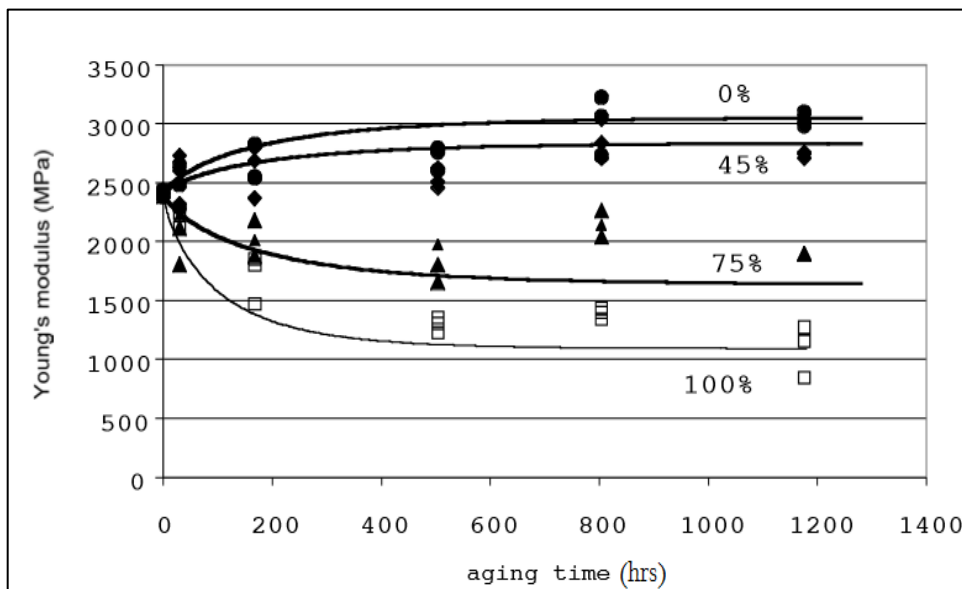


Imagen 20 Módulo de Young (E) vs Tiempo. Epoxi-Fibras de Acrilato

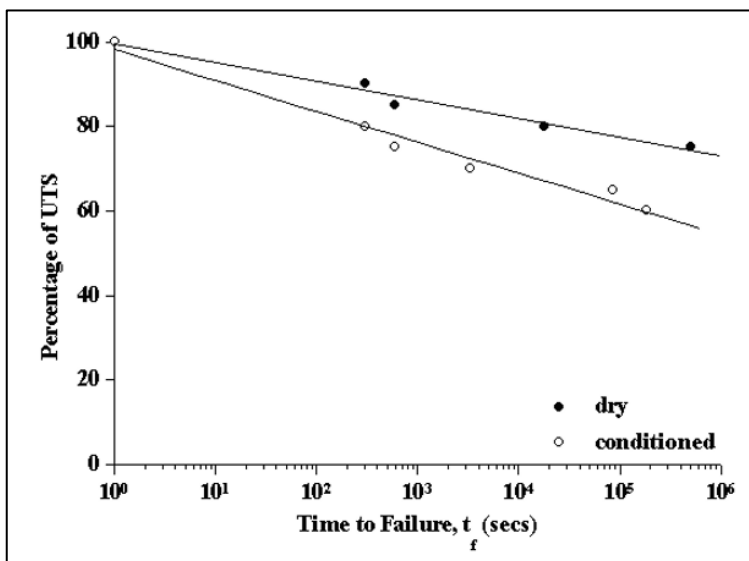


Imagen 21 Tensión límite de fibras de vidrio en ambiente seco y húmedo



Podemos observar que, al ser resultados muy experimentales y no poder obtener datos más fiables (al no ser objeto del presente trabajo) hemos decidido una solución a este problema de compromiso.

La tabla más aproximada a los datos que necesitamos es la tabla 13, al ser ensayos para kevlar/epoxi, que nos arrojaría una merma en las propiedades mecánicas del 2-3%, pero como otros estudios para materiales similares arrojan otros datos como se puede ver en las tablas 14 (del 35-40% aprox) y 15 (del 15-20% aprox). Por lo que se opta, como ya se ha comentado del 15%.

A partir de aquí podemos calcular todas las propiedades para nuestro material "PROTECTOR".

Quedando entonces las propiedades con los siguientes resultados:

$$E_r = 27,03 \text{ GPa}$$

$$G_r = 9,248 \text{ GPa}$$

$$\nu_r = 0,4614$$

A continuación vamos a estimar el límite de rotura (rigidez) utilizando, por ejemplo, la Ec de Chen. Con los nuevos valores estimados:

$$\sigma = \frac{2\tau_m}{\pi} \left[2 + \ln \frac{\xi \sigma_L \sigma_M}{\tau_m^2} \right]$$

Siendo

- τ_m = Límite a cortadura de la matriz (epoxi)
- σ_m = Límite tracción de la matriz (epoxi)
- σ_L = Límite tracción de las fibras (Kevlar)
- ξ = Factor de forma de las fibras



Teniendo las siguientes características

- $\tau_m = 30 \text{ MPa}$
- $\sigma_m = 82,74 \text{ MPa}$
- $\sigma_L = 75 \text{ GPa}$ ($V_f = 60\%$) \rightarrow $\sigma_L = 37,5 \text{ GPa}$ ($V_f = 35\%$)
- $\xi = 1$ (*Fibras largas orientación aleatoria*)

Podemos calcular lo siguiente

$$\sigma = 193,763 \cdot 0.85 = 164,7 \text{ MPa}$$

3.3 Generación geometría

Las geometrías empleadas son las definidas en el Anexo correspondiente, donde se recoge el diseño de cada uno de los modelos que se han empleado en las simulaciones.

Dichas modelizaciones han sido realizadas a partir de productos reales existentes en el mercado y/o aplicándoles las simplificaciones anteriormente argumentadas. Dichos modelos han sido realizados por un programa informático vectorial de diseño en 3D, en concreto se ha optado por SolidWorks®.

3.4 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 mostrados en la siguiente figura:

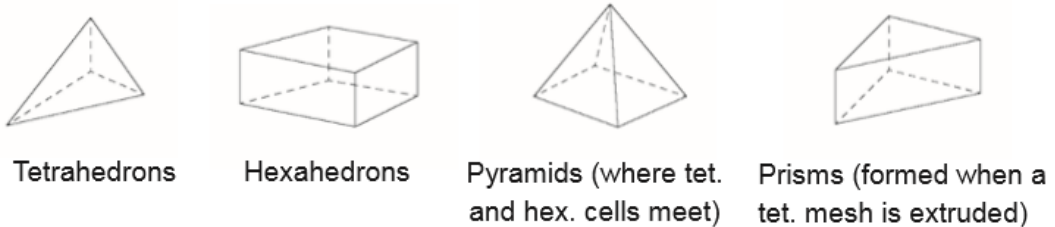


Imagen 22 Elementos para mallado

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,...), tal y como se aprecia en la siguiente tabla:

Tabla 9 Calidad del mallado, en función de la “calidad” de la forma

| Value of Skewness | Cell Quality |
|--------------------------|--------------|
| 1 | degenerate |
| 0.9 — <1 | bad (sliver) |
| 0.75 — 0.9 | poor |
| 0.5 — 0.75 | fair |
| 0.25 — 0.5 | good |
| >0 — 0.25 | excellent |
| 0 | equilateral |

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 la geometría “YUNQUE” se ha elegido el método de mallado “sweep” según el método “MULTIZONE”, forzando a que intente utilizar elementos tipo hexaedro, por las razones que se indican anteriormente.

En la siguiente figura se muestra el mallado que se ha utilizado en cada uno de los casos de estudio.

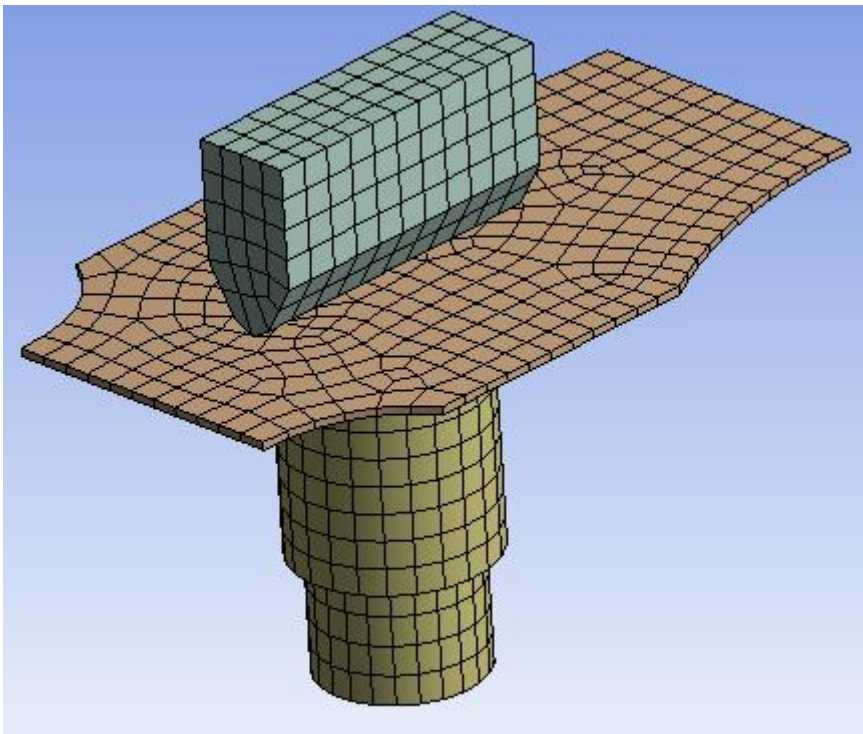


Imagen 23 Mallado de las piezas a simular

A continuación se muestra en la siguiente figura la calidad de los mallados por los que se ha optado, y como se puede ver, se alcanza un grado de calidad más que aceptable, no siendo representativos por ser muy pocos elementos, los que empobrecen la calidad del mallado.

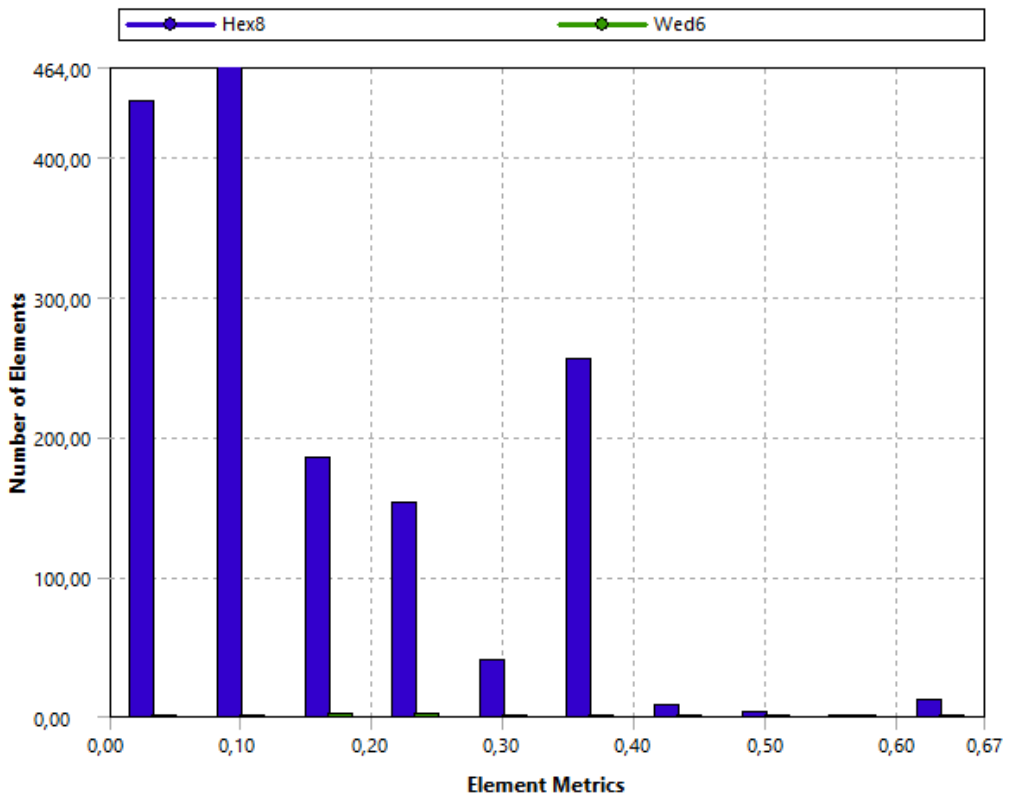


Imagen 24 Ejemplo de calidad mallado tipo utilizado

3.5 Condiciones de contorno

3.5.1 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, el percutor se ha diseñado a una distancia de 1 mm de su objetivo, por lo cual la velocidad inicial de dicho percutor será aquella que poseería la misma si cayera desde la altura deseada de cálculo, siendo según normativa de 1 m.

Dicha velocidad será aproximadamente de 4,42 m/s, obteniéndose mediante la física clásica como sigue:

Para la caída de una masa libre y guiada empleamos la siguiente fórmula

$$v(m/s) = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 1} = 4.42 \text{ m/s}$$

Según indica la norma este cálculo debería corregirse al tenerse en cuenta que el percutor no está en las condiciones iniciales a 1 m desde la caída y además la distancia del sensor debería incorporarse para modificar dicha distancia. Pero estas correcciones son despreciables y no variará el sentido del estudio.

- Al yunque se le impondrá la condición de que la parte superior de la misma (la cara en forma de cúpula) sea un elemento fijo, sin libertad de movimiento.

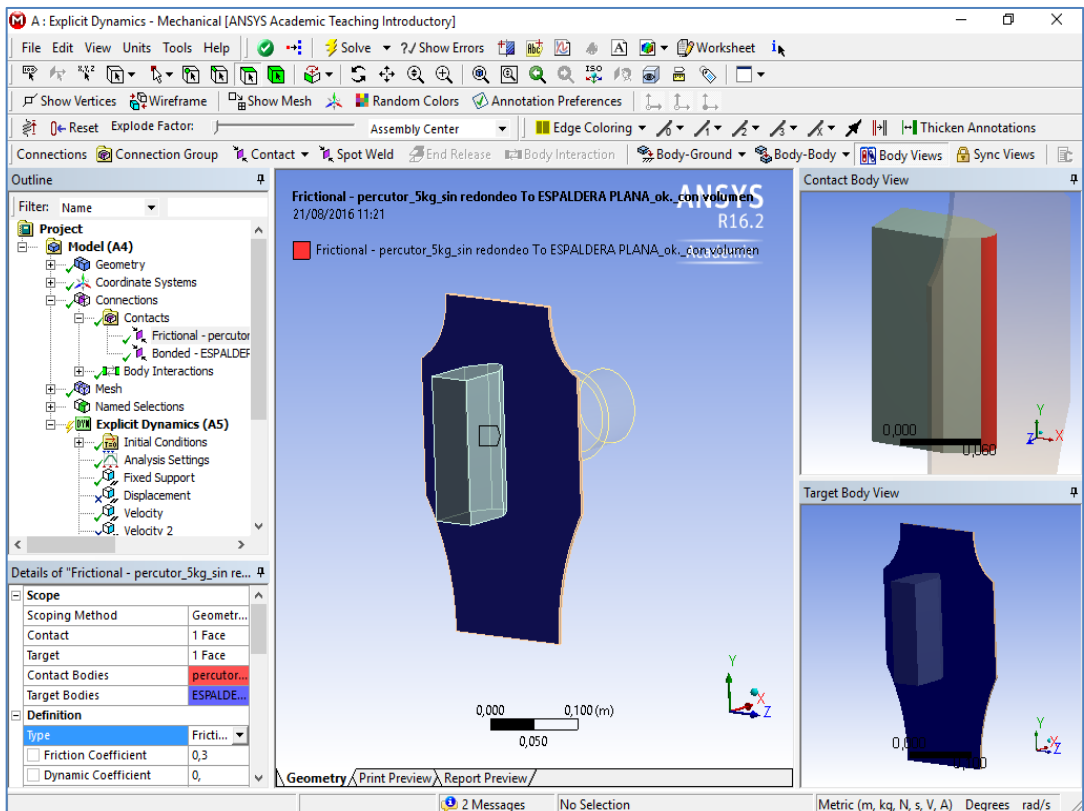
3.5.2 Condiciones de contacto entre superficies

Vamos a definir qué contactos vamos a tener en nuestro estudio.

Como se comentó anteriormente podemos tener varios tipos de contactos y para llegar a ellos deberemos entrar en ANSYS® Mechanical™, desde el escritorio de ANSYS® WORKBENCH™ en el módulo "Model". Aunque se puede acceder desde cualquier módulo, como se comentó anteriormente.

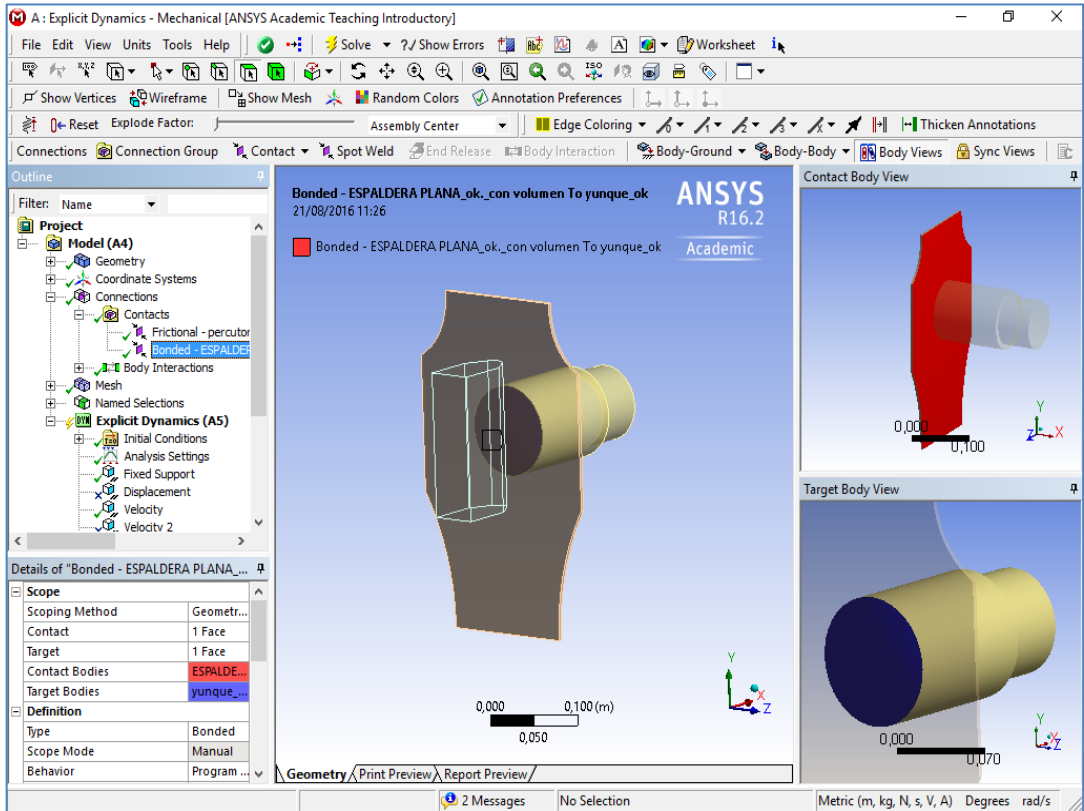
Los contactos que hemos definidos son:

◊ Frictional: se elige este tipo de contacto porque cuando se produce el impacto hay algo de fricción entre las superficies. No obstante en este caso podríamos haber elegido “Frictionless”, debido principalmente a que en el instante después del impacto no hay rozamiento entre las superficies. Además de algún parámetro a definir distinto, como coeficiente de fricción,... no obstante arroja resultados similares.



◊ Bonded: debido principalmente a que debemos soportar nuestra muestra a ensayar de alguna forma y se ha decidido que el punto de unión entre la

muestra (espaldera) y el soporte (yunque) quede de alguna forma adherido por este punto y el resto del elemento ensayado tenga todos sus grados de libertad (movimientos).



Se ha decidido hacerlo de esta forma para intentar tener más control del comportamiento previsto de los elementos. Pero se puede recurrir a técnicas automáticas de detección de contactos, que se dejan al lector y a su curiosidad.

3.5.3 Model-Connections

En el apartado correspondiente se indican las condiciones de nuestro estudio, pero aquí se indicarán unos mínimos para poder asignar las condiciones de contacto entre las piezas.



A continuación se introduce algunos conceptos básicos sobre los contactos entre superficies:

Los contactos entre superficies pueden definirse de diferentes maneras en ANSYS®. Las diferencias incluyen cómo las superficies de contacto son representadas, cómo se interpreta la penetración del contacto y qué rasgos y limitaciones específicas existen en los diferentes algoritmos. Para algunos modelos de contacto, se emplean segmentos para definir las superficies de contacto de los cuerpos. El programa automáticamente identifica y define los segmentos para cada superficie.

Otros modelos permiten que cualquier superficie entre en contacto con cualquier otra, e incluye contactos de superficies con sí misma. En realidad, este tipo de contacto es el más sencillo de definir y es muy empleado cuando las superficies de contacto no se conocen previamente como en la simulación de un choque completo de automóvil.

Cuando un nodo o segmento de contacto (slave) penetra un segmento blanco (master), se crea una fuerza restaurativa (penalidad) que lo empuja de vuelta a través del límite de la superficie. La penalidad rígida de contacto es automáticamente calculada en base a las propiedades mecánicas de las superficies de contacto. Por esto es necesario usar valores realistas del módulo de elasticidad cuando se definen materiales rígidos.

◊ Planteamiento dinámico de las superficies de contacto.

El principio de los trabajos virtuales corresponde a discretizar el principio de D'Alembert. La relación ampliada de las fuerzas sobre un cuerpo corresponde a la ecuación siguiente. En esta se encuentra un nuevo término, f_{cont} , que representa las fuerzas de contacto que recaen en el cuerpo. Las fuerzas de



contacto son dependientes de los desplazamientos y las velocidades de los elementos.

$$M\ddot{x} + Kx = f_{ext} + f_{int}(x) + f_{cont}(x, x)$$

La fuerza de contacto aplicada sobre un nodo es proporcional a la penetración de la superficie en contacto

$$f_{cont_i} = k_{int} * \delta_i$$

El factor k_{int} denota la rigidez de la interfase, que se calcula en base a la rigidez individual de las superficies en contacto. La rigidez del contacto se define como en la ecuación siguiente

$$k_{int} = \lambda * \frac{k_m * k_s}{k_m + k_s}$$

El factor λ representa el factor de rigidez, k_m y k_s son la rigidez específica para las superficies penetradas y penetrantes. La rigidez de las superficies en un elemento SHELL es igual a la multiplicación del espesor del SHELL por el módulo de elasticidad E (ecuación 24). La rigidez de la interfase puede ser vista como un sistema con dos resortes en serie

$$k_i = h_i * E_i$$

◊ Generalidades de las superficies de contacto.

Se permite un variado rango de condiciones de contacto entre superficies:

- El final de la superficie puede determinarse al especificar la fricción dependiente de la velocidad, junto con los valores límites de esfuerzo cortante.



- Los contactos erosivos admiten que la superficie de contacto se establezca al interior de ciertos elementos, a medida que los elementos de la superficie exterior fallan.

- El contacto entre márgenes permite que la margen de un elemento SHELL detecten la margen de otro elemento SHELL.

El definir contactos en ANSYS requiere simplemente que se indiquen las superficies en contacto (no siempre necesario), el tipo de contacto entre ellas y cualquier otro parámetro específico en relación al tipo de contacto. Con tantos modelos de contactos disponibles, no es siempre fácil definir el mejor contacto para el sistema físico en prueba. Es apropiado entender los diferentes algoritmos y las familias de contactos que disponibles para seleccionar el modelo de contacto adecuado.

Un algoritmo de contacto es el método por el cual el código procesa las superficies de contacto. Existen tres algoritmos de contacto diferentes disponibles:

- Contacto de superficie simple.
- Contacto de nodos a superficies.
- Contacto de superficie a superficie.

Una familia de contactos es un conjunto de tipos de contacto con propiedades similares especializadas. Existen diez familias disponibles. El programa soporta 24 combinaciones entre los algoritmos y las familias, pero existe algún traslape:

- Contacto general o básico.
- Contacto automático.



- Contacto rígido.
- Contacto enlazado.
- Contacto enlazado con falla.
- Contacto erosivo.
- Contacto de margen.
- Contacto Drawbead.
- Contacto de formación.
- Contacto bidimensional.
- ◊ Algoritmo de contacto de superficie simple.

El algoritmo de contacto de superficie simple establece contacto cuando una superficie externa de un cuerpo hace contacto con ella misma o con una superficie externa de otro cuerpo. Este algoritmo es el más general de los tipos de contacto debido a que el programa busca automáticamente todas las superficies externas en un modelo para determinar si ocurre penetración.

Al incluirse todas las superficies externas, no se requiere definir superficies slave y master. El contacto de superficie simple puede ser muy poderoso por ella misma o en problemas de grandes deformaciones cuando las áreas en contacto no se conocen previamente, este es el caso de muchas aplicaciones de choques o impacto. El contacto simple sólo causa un ligero incremento en el tiempo de CPU en comparación con limitar las superficies de contacto. En muchos casos, el algoritmo libera el contacto si un nodo penetra más del 40% del espesor del elemento contactado. Esto puede causarse por:

- Partes excesivamente delgadas.



- Materiales suaves con bajos valores de rigidez.
- El contacto entre los cuerpos ocurre a muy altas velocidades.

Las condiciones anteriores pueden resultar en que los nodos excedan la condición del 40%. En tal caso, el algoritmo asume que las superficies ya no están en contacto, por lo que el material pasa de largo. Los nodos se atrapan dentro de una superficie blanco. El algoritmo de superficie simple no almacena los resultados globales de fuerzas de contacto resultantes. Si se requieren de estas fuerzas, es necesario usar contactos de nodo-superficie o superficie-superficie.

◊ Algoritmo de contacto nodo-superficie.

El algoritmo de nodo-superficie establece contacto cuando un nodo penetra una superficie objetivo. Es el algoritmo más rápido ya que es asimétrico y sólo se tratan los nodos que contactan la superficie blanco. Debe especificarse los componentes nodales y las partes de las superficies penetrante y blanco, respectivamente. Este algoritmo es eficiente cuando las áreas en contacto son pequeñas y se conocen de antemano, así mismo cuando los nodos contactan cuerpos rígidos.

El algoritmo de contacto nodo-superficie exige de algunas consideraciones generales.

- Las superficies planas o convexas debe ser los blancos y las superficies cóncavas las contactantes.
- Las mallas burdas se deben atribuir a las superficies objetivo y las mallas finas a las superficies de contacto.



- Para el contacto “Drawbead”, el “bead” es siempre la superficie nodal de contacto y la hoja, el blanco.

- ◊ Algoritmo de contacto superficie-superficie.

El algoritmo superficie-superficie establece contacto cuando la superficie de un cuerpo penetra la superficie de otro. Es completamente simétrico, por lo que la selección de superficie “slave” y “master” es completamente arbitraria. Es necesario definir componentes nodales y partes para establecer las superficies de contacto y objetivo. Los nodos pueden pertenecer a más de una superficie de contacto. Este es un algoritmo general y se emplea comúnmente para cuerpos con grandes áreas de contacto y las superficies de contacto se conocen de antemano. El contacto superficie-superficie es más eficiente para cuerpos que experimentan grandes deslizamiento como un bloque descendiendo por una superficie.

- ◊ Familias de contactos.

La familia general o básica de contactos establece contacto sólo a un lado de elementos SHELL. Para elementos Solid, ANSYS crea los segmentos blanco con las normales exteriores, entonces el contacto deseado es siempre reconocido. La fuerza restaurativa continua incrementándose a medida que los nodos penetran la superficie objetivo. Esta fuerza no se elimina hasta que los nodos no pasan cierto porcentaje del espesor del elemento.

La familia automática considera contacto a ambos lados de los elementos SHELL. La orientación de la superficie de contacto se determina automáticamente. La fuerza de restauración se incrementa hasta cierto punto



(mayor que para las otras familias), ya que el contacto requiere detectarse por cualquiera de los lados del SHELL.

La familia de contactos rígidos es similar a la familia de contactos generales excepto en que la fuerza de restauración no es lineal, sino definida por el usuario mediante una curva de fuerza-deflexión. Estos contactos se emplean para dinámica multi-cuerpo. El contacto de un cuerpo rígido con uno deformable debe ser definido por los contactos general, automático o erosivo. Este contacto no se emplea comúnmente ya que las penalidades para cuerpos deformables son válidas para cuerpos rígidos.

La familia de contactos enlazados se emplea para conectar mallas. Los nodos de contacto se unen a las superficies objetivo, siendo ambos inicialmente coplanares. Las superficies objetivos se deforman y fuerzan a los nodos de contacto a seguir esta deformación. No se emplea para cuerpos rígidos por la formulación basada en restricciones, y sólo se emplea con elementos Solid debido a que únicamente se afectan los grados de libertad traslacionales.

La familia de enlace con falla se emplea generalmente para simular contactos entre superficies soldadas por puntos o pernadas. Una vez que las condiciones de falla son alcanzadas, comienza la separación o deslizamiento de las superficies. El contacto erosivo ocurre cuando los elementos sólidos del exterior fallan y los elementos interiores asumen la tarea de la resistencia a la penetración. El contacto erosivo se emplea con modelos de materiales sometidos a fallo.

La familia de contacto entre márgenes es necesario cuando son los cantos de los elementos SHELL chocan (las normales de la superficie son ortogonales a la dirección del impacto). La opción selecciona automáticamente todos los bordes



de los elementos y los convierte en componentes “slave”. La familia de “Drawbead” (embutido, estampado, forja) se emplea cuando se debe tener especial cuidado en las restricciones del blanco. El contacto “Drawbead” simula la presencia de fuerzas friccionales y flectoras que restringen y aseguran el contacto entre el metal y el dado por la profundidad de la operación.

La familia de contacto de formación se usa en aplicaciones de formación de metal. Para este caso, la herramienta y el dado son definidos como las superficies blanco y la pieza a trabajar, como la superficie de contacto. Para modelos que se basan en el elemento PLANE162, sólo es posible establecer contacto bidimensional. El contacto 2D define al modelo completo como la superficie de contacto, y soporta coeficientes de fricción estáticos y dinámicos, coeficiente de decaimiento exponencial y nacimiento y muerte de elementos.

Además deberemos seleccionar el tipo de contacto, pudiéndose elegir entre:

- ◊ Bonded (Unión): Esta es la configuración predeterminada y se aplica a todas las zonas de contacto (superficies, sólidos, líneas, caras, aristas). Si se unen zonas de contacto, entonces no se desliza o se permite la separación entre las caras o bordes. Se debe asimilar a superficies pegadas. Este tipo de contacto permite una solución lineal ya que el contacto longitud / área no va a cambiar durante la aplicación de la carga. Si el contacto se determina en el modelo matemático, los huecos se cerrarán y se tendrá en cuenta cualquier penetración inicial.

- ◊ No separation (Sin Separación): Esta configuración de contactos es similar al caso de servidumbre. Sólo se aplica a las regiones de caras (3D) para sólidos o bordes (para placas 2D). No se permite la separación de las geometrías en contacto.



◊ Frictionless (sin fricción): Modelo de ajuste unilateral de contacto estándar, es decir, la presión normal es igual a cero si se produce la separación. Por lo tanto se pueden formar huecos en el modelo entre los órganos en función de la carga. Esta solución es no lineal debido a que el área de contacto puede cambiar a medida que se aplica la carga. Se supone un coeficiente de fricción cero, lo que permite el libre deslizamiento. El modelo debe estar bien delimitado al utilizar este ajuste. Los resortes serán débiles y se añaden al conjunto para ayudar a estabilizar el modelo con el fin de lograr una solución razonable.

◊ Rough: Similar a la configuración sin fricción, este ajuste es similar contacto de fricción áspero donde no hay deslizamiento. Sólo se aplica a las regiones de caras (3D) para sólidos o bordes (para placas 2D). De manera predeterminada, no se realiza el cierre automático de las diferencias. Este caso corresponde a un coeficiente de fricción infinita entre los cuerpos de contacto. [No es compatible con análisis explícitos dinámicos.]

◊ Frictional (Fricción): En esta configuración, las dos geometrías en contacto puede llevar a esfuerzos cortantes hasta una cierta magnitud a través de su interfaz antes de que comiencen deslizamientos relativos entre sí. Este estado se conoce como "adhesión". El modelo define una tensión de corte equivalente a la que se desliza sobre la geometría y comienza como una fracción de la presión de contacto. Una vez que se supera la tensión de corte, las dos geometrías se deslizarán con relación a otra. El coeficiente de fricción puede ser cualquier valor no negativo. [No es compatible con la dinámica rígida. Fricción por deslizamiento forzado se debe utilizar en su lugar.]

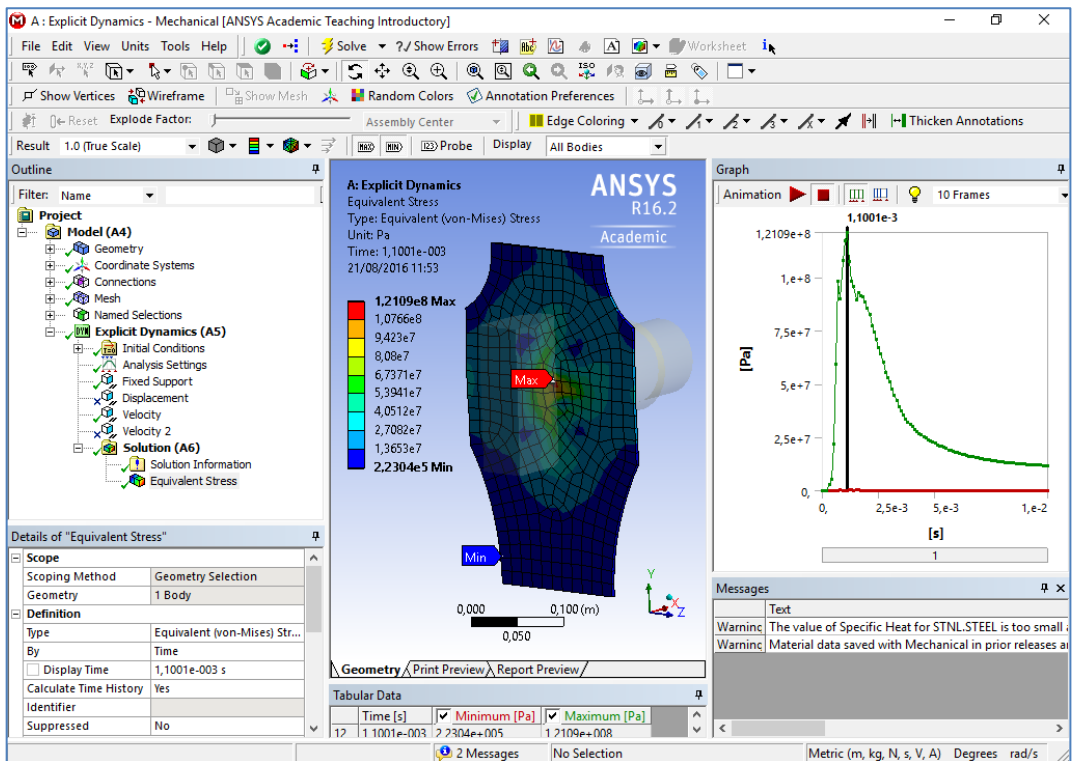
◊ Forced Frictional Sliding (Fricción por deslizamiento forzado): En esta configuración, una fuerza de resistencia se aplica tangente en cada punto de

contacto. La fuerza tangente es proporcional a la fuerza de contacto normal. Esta configuración es similar a la fricción, excepto que no hay un estado de "adhesión". [Sólo se admite para la Dinámica rígida]

3.6 Post-Procesado

Aquí vamos a profundizar un poco más sobre qué resultados queremos extraer del cálculo, no tanto en su interpretación ya que se realizará en el apartado siguiente.

Indicar que para acceder a la información que nos interesa, deberemos seleccionar que elemento debe arrojar esta información.





4. RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tras realizar algunas simulaciones mediante ANSYS® WORKBENCH™ de un impacto bajo normativa que pretende reproducir las condiciones lo más fiel posible. El ensayo que se pretende reproducir es el utilizado para obtener la validez de un elemento de protección (espaldera para motorista) y por la naturaleza del trabajo se pretende dar una respuesta más global que un simple ejercicio de validación estructural y de diseño de la pieza. La valoración de la conveniencia de elemento estudiado se hará respecto y principalmente, tal y como se comentó anteriormente, en función del factor de seguridad comparando las tensiones aparecidas en la pieza ensayada (Von Mises o Tensión Principal Máxima) respecto de la tensión de rotura o fallo del material. Estos ensayos consisten, como también se comentó anteriormente, en disponer una pieza del material de protección e impactarla de forma perpendicular, en caída libre desde 1 m de altura y guiada con el percutor modelado según indicaciones de la normativa que le aplica.

4.2 Resultados

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 elemento de protección estudiado (espaldera) es capaz de soportar las tensiones del impacto, o por el contrario, sí se produce el fallo del mismo, con la consiguiente penetración de la barra.



En la imagen 7 y tabla 4 del apartado “2.1 Normativa (Resumen)” se indican las posiciones de los impactos, así como el cumplimiento de las condiciones marcadas e impuestas.

Vamos a explicar a continuación por qué y cómo se llegó al espesor de diseño adoptado como suficiente (4 mm). Se comenzó realizando los ensayos con muestras de poco espesor, 2 mm, pero en el momento en que se producía el fallo, teniéndose que cumplir la siguiente condición, se pasaba a un tamaño mayor de espesor y cumplir la siguiente expresión

$$FS = \frac{\sigma_{VM}}{\sigma_L} > 1$$

En el momento que no se cumplía la condición anterior se optaba por aumentar el espesor incrementalmente en intervalos de 1 mm, llegando a 4 mm de espesor para la protección.

Como podemos ver en la tabla y gráficos siguientes para la espaldera de 2 mm de espesor e impacto en posición 1 del percutor

Tabla 10 Resultados fallo espaldera e=2mm

| TAMAÑO ESPALDERA POSICIÓN IMPACTO | PEQUEÑA (e=2mm) | | | |
|--|------------------------|------------------------|---------|---------------------|
| | σ_{VM} (MPa) | σ_{TM} (MPa) | FS | σ_L (MPa) |
| 1 | 226,29 | 132,51 | 0,85626 | 194 |

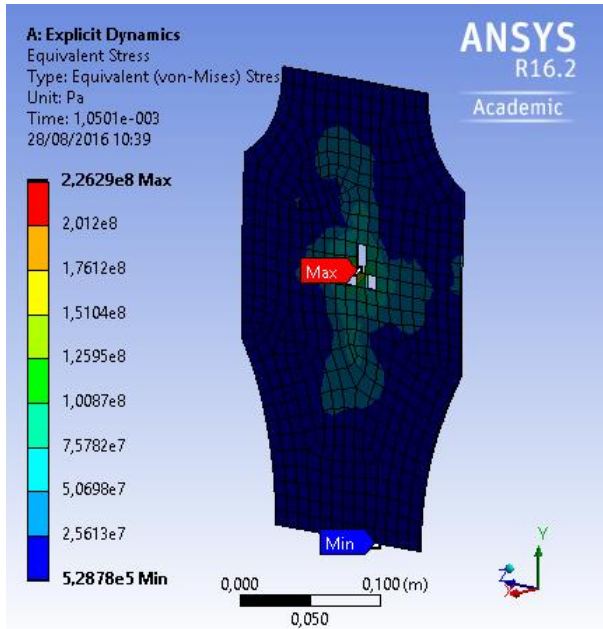


Imagen 25 σ_{VM} espaldera pequeña e=2mm

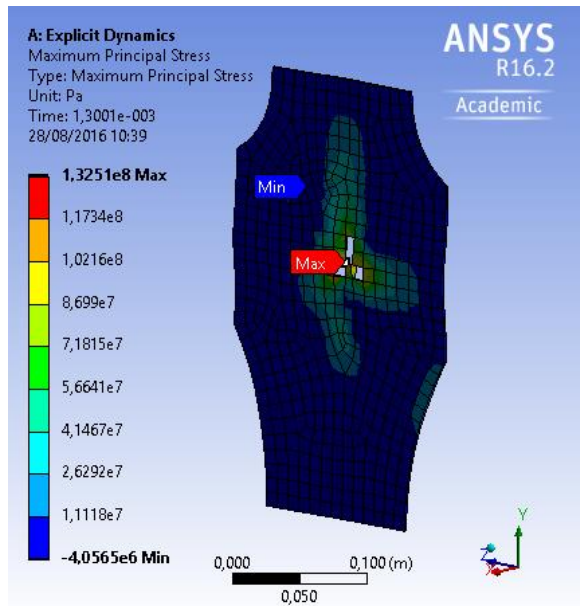


Imagen 26 σ_{TM} espaldera pequeña e=2mm

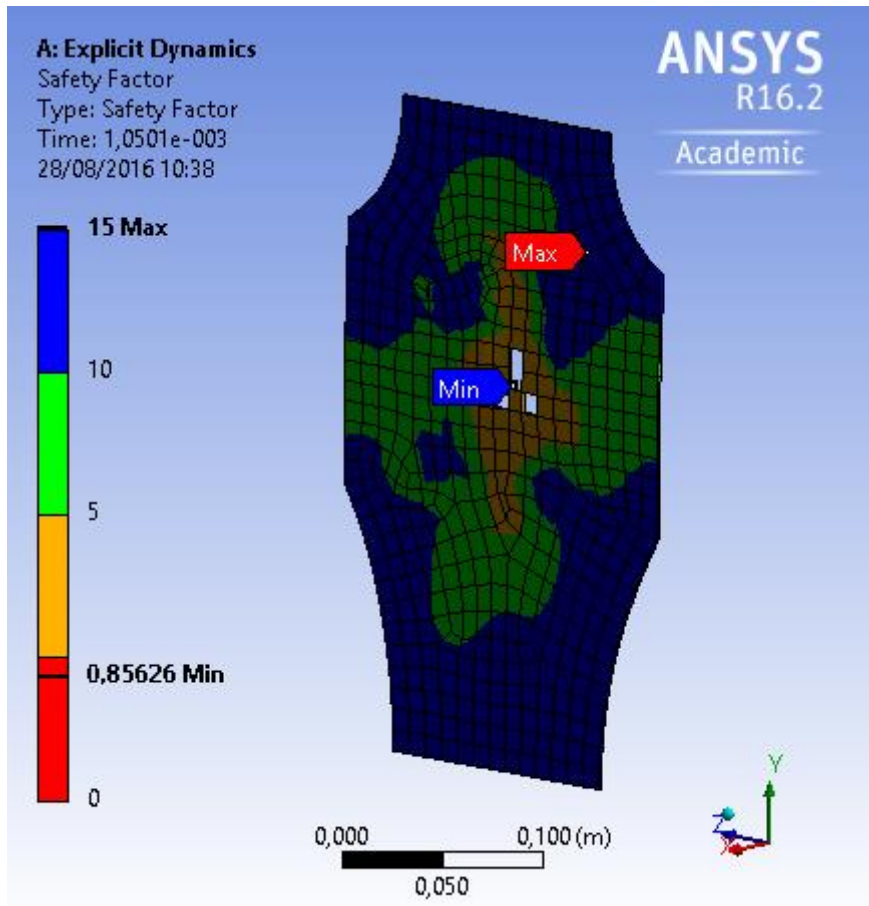


Imagen 27 FS espaldera pequeña e=2mm

Se aprecia que se produce fallo en la zona central, zona de impacto y donde era de esperar, con FS < 1. Por lo que, como se describió anteriormente, se decide aumentar en 1 mm el espesor.

Como podemos ver en la tabla y gráficos siguientes para la espaldera de 3 mm de espesor e impacto en posición 1 del percutor.

Tabla 11 Resultados fallo espaldera e=3mm

| POSICIÓN IMPACTO | TAMAÑO ESPALDERA | PEQUEÑA (e=3mm) | | | |
|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------|---------------------|
| | | σ_{VM} (MPa) | σ_{TM} (MPa) | FS | σ_L (MPa) |
| 1 | | 199,33 | 132,33 | 0,97 | 194 |

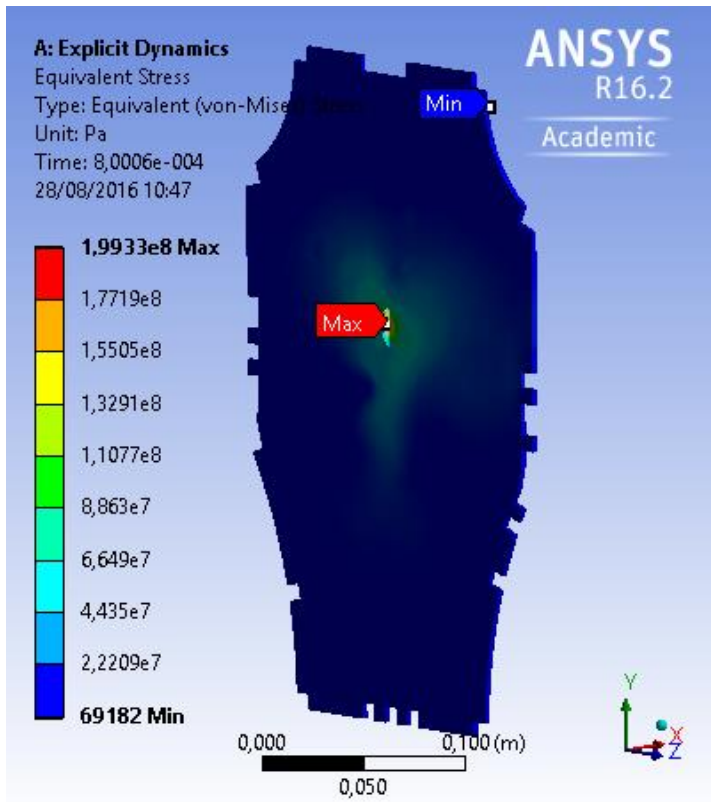


Imagen 28 σ_{VM} espaldera pequeña e=3mm

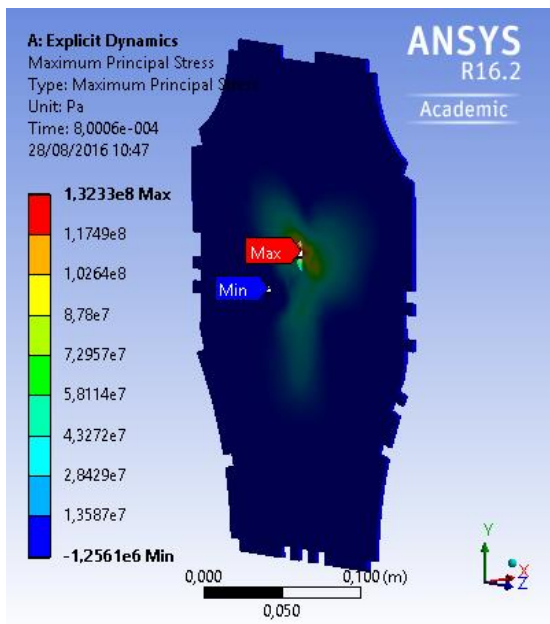


Imagen 29 σ_{TM} espaldera pequeña e=3mm

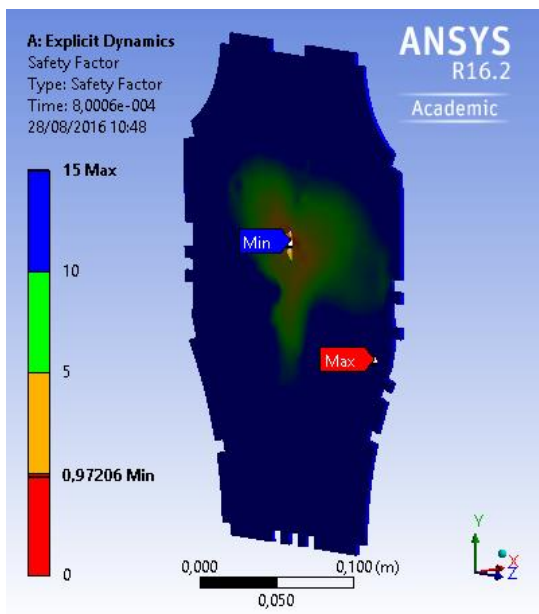


Imagen 30 FS espaldera pequeña e=3mm



Se aprecia que se produce fallo en la zona central, zona de impacto y donde era de esperar, con $FS < 1$. Por lo que, como se describió anteriormente, se decide aumentar en 1 mm el espesor.

A partir del estudio de los distintos espesores presentados, ya que se comenzó los ensayos por la espaldera pequeña y posiciones correlativos de 1 a 5, se realizó primero el ensayo en la posición 1 del percutor y como se observa al haber fallo el material se acometió con incrementos de espesor, llegando hasta los 4 mm de espesor.

A continuación se presentan los resultados de la protección con espesor de 4 mm, que como se puede apreciar en la protección de menor tamaño (pequeña) y con impacto del percutor en posición 1 tenemos el factor de seguridad menor.

Primeramente se van a presentar los resultados que se han obtenido.

Tabla 12 Resultados ensayo condiciones ambiente

| TAMAÑO ESPALDERA \ POSICIÓN IMPACTO | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---------------------|----------------|---------------------|--------|--------|--------|
| | | PEQUEÑA | σ_{VM} (MPa) | 176,21 | 169,01 | 152,92 |
| σ_{TM} (MPa) | 94,63 | | 168,87 | 130,34 | 145,02 | 85,65 |
| FS | 1,09 | | 1,1462 | 1,2671 | 1,1906 | 1,4438 |
| σ_L (MPa) | 194 | | | | | |
| MEDIANA | σ_{VM} (MPa) | 121,01 | 152,85 | 134,73 | 93,09 | 95,52 |
| | σ_{TM} (MPa) | 95 | 137,63 | 119,4 | 89,11 | 62,69 |
| | FS | 1,6002 | 1,2676 | 1,4382 | 2,0816 | 2,0285 |
| | σ_L (MPa) | 194 | | | | |
| GRANDE | σ_{VM} (MPa) | 84 | 112,85 | 82,67 | 53,91 | 82,55 |
| | σ_{TM} (MPa) | 87,07 | 65,38 | 62,8 | 35,84 | 58 |
| | FS | 2,3068 | 1,717 | 2,344 | 3,6 | 2,3471 |
| | σ_L (MPa) | 194 | | | | |

Tabla 13 Resumen ensayo en condiciones de humedad

| TAMAÑO ESPALDERA \ POSICIÓN IMPACTO | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---------------------|----------------|---------------------|--------|--------|--------|
| | | PEQUEÑA | σ_{VM} (MPa) | 140,04 | 132,17 | 121,93 |
| σ_{TM} (MPa) | 79,543 | | 135 | 94,81 | 88,63 | 57,14 |
| FS | 1,1782 | | 1,2484 | 1,3532 | 1,7106 | 1,9881 |
| σ_L (MPa) | 165 | | | | | |
| MEDIANA | σ_{VM} (MPa) | 105,1 | 112,07 | 100,41 | 71,62 | 80,27 |
| | σ_{TM} (MPa) | 76,23 | 103,86 | 84,72 | 66,9 | 50,94 |
| | FS | 1,57 | 1,4723 | 1,6433 | 2,3038 | 2,0556 |
| | σ_L (MPa) | 165 | | | | |
| GRANDE | σ_{VM} (MPa) | 54,06 | 87,43 | 62,83 | 50,37 | 65,87 |
| | σ_{TM} (MPa) | 55,63 | 52,91 | 47,36 | 32,99 | 48,41 |
| | FS | 3,0352 | 1,8872 | 3,0838 | 3,2758 | 2,5049 |
| | σ_L (MPa) | 165 | | | | |

Además presentamos en forma de gráfica los resultados anteriores

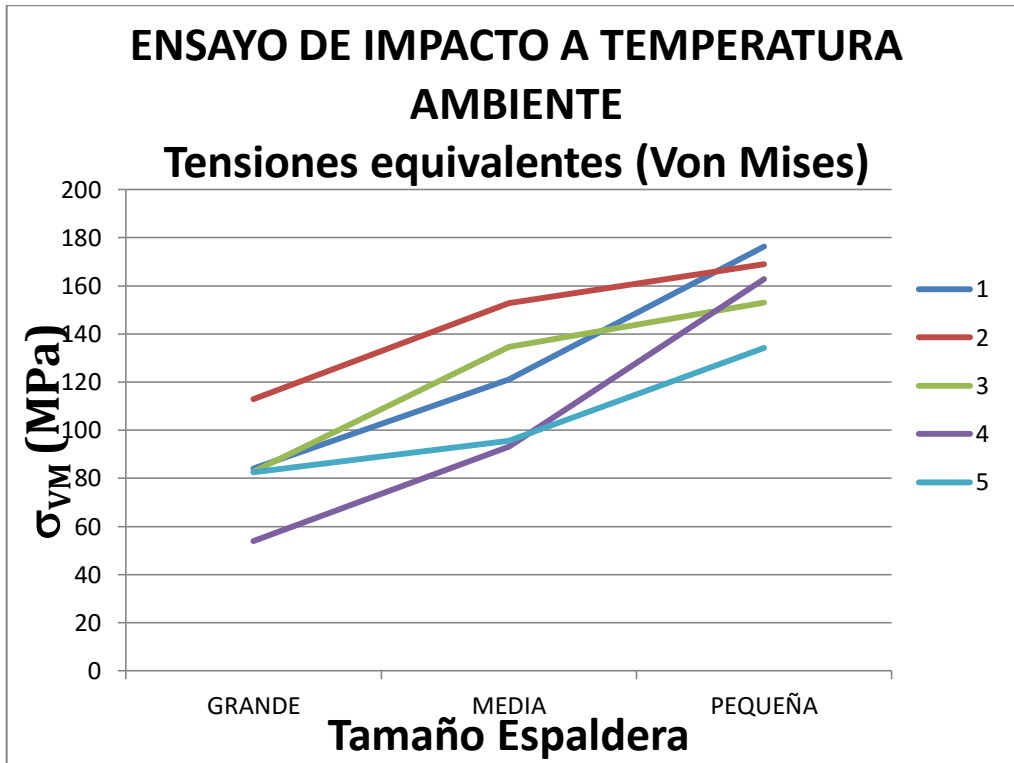


Imagen 31 Ensayo a temperatura ambiente - σ_{VM}

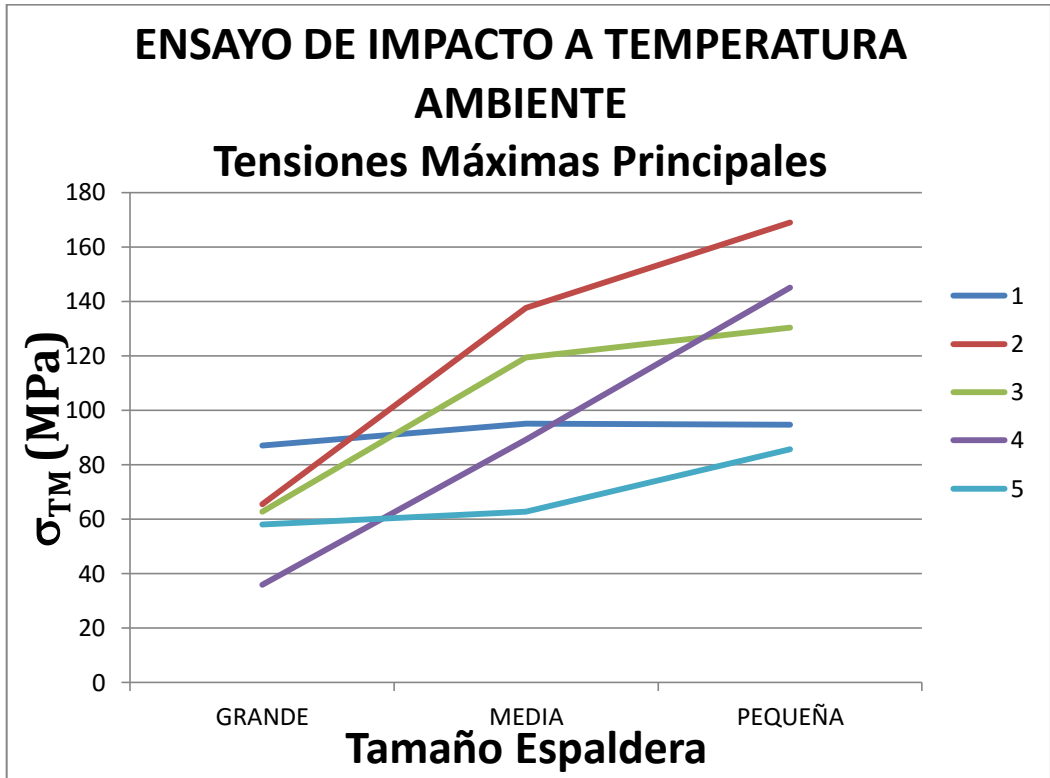


Imagen 32 Ensayo a temperatura ambiente - σ_{TM}

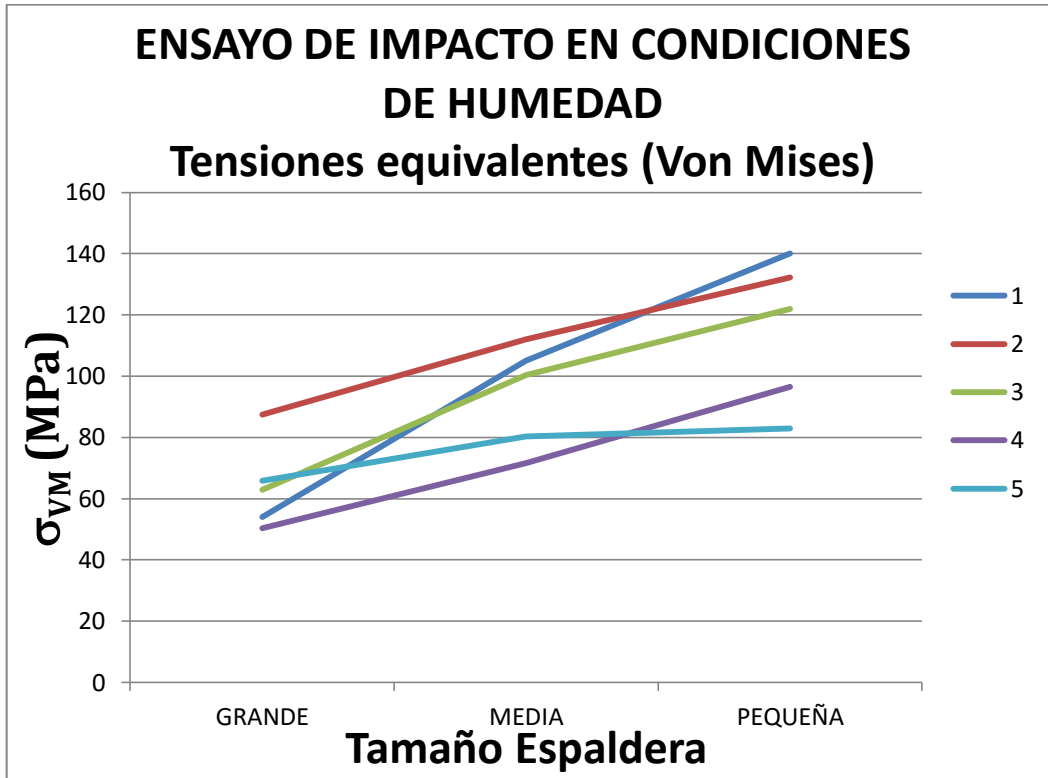


Imagen 33 Ensayo en condiciones de humedad - σ_{VM}

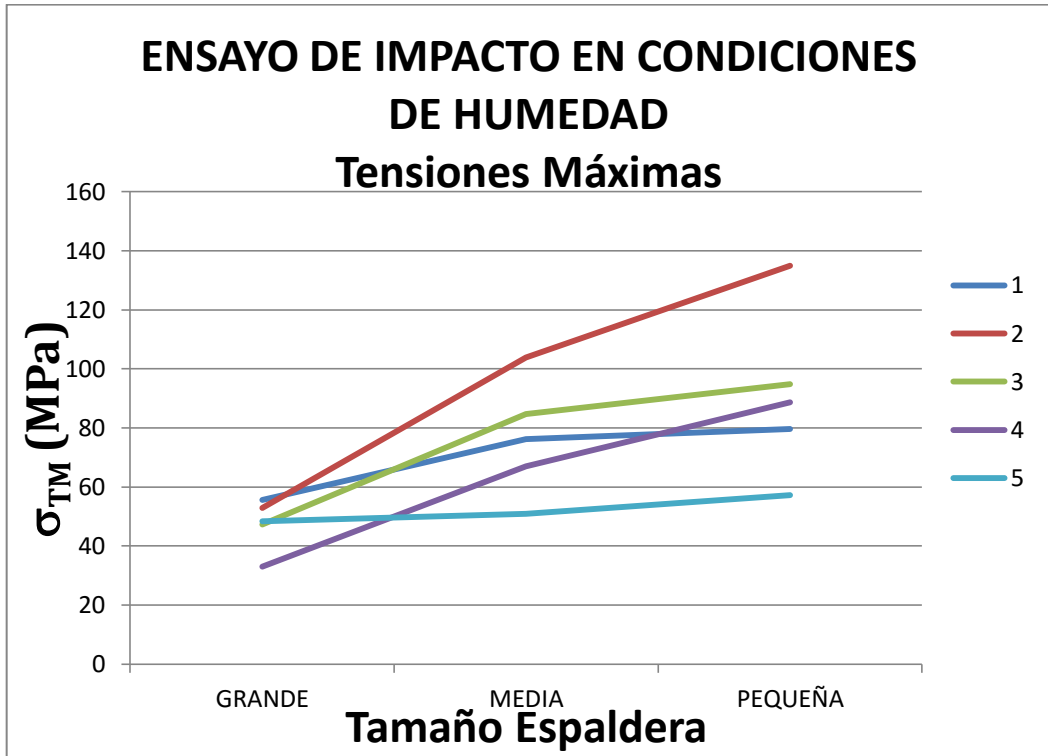


Imagen 34 Ensayo en condiciones de humedad - σ_{TM}

Como se puede ver en la primera tabla de las anteriores tablas el ensayo de la protección pequeña en la posición 1 del impacto del percutor tenemos el valor mínimo del FS, siendo este de 1,09. En todos los demás casos cumple dichas condición con más holgura.

En las tablas anteriores se han presentado las tensiones equivalentes de Von Mises, las Tensiones Principales Máximas y el factor de seguridad comparando la tensión de rotura o última del material ensayado. Se puede observar que en el factor de seguridad se ha utilizado las tensiones equivalentes de Von Mises al ser estas mayores.

Como podemos ver en los gráficos anteriores todos los ensayos tienen una tendencia creciente, tanto en el tipo de tensiones elegidas como por el tipo de ensayo. Creyendo que los ensayos realizados arrojan algo de coherencia en los resultados.

A continuación vamos a presentar de donde se han obtenido los datos anteriores, pero solamente de un caso, siendo el caso seleccionando la muestra de tamaño medio, del ensayo a condiciones ambientales y para el impacto en posición 1.

- Tensión equivalente de Von Mises

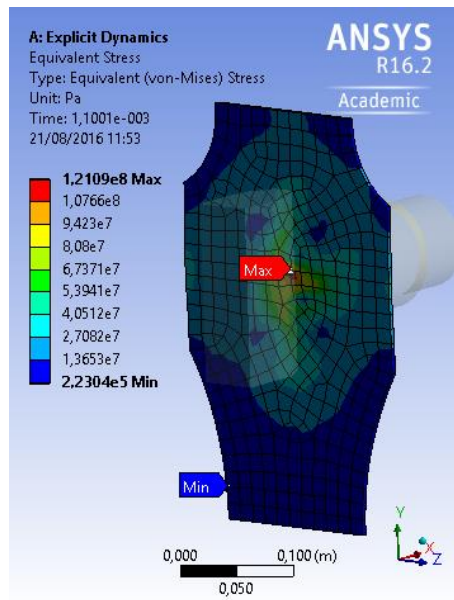


Imagen 35 σ_{VM} máximas en geometría

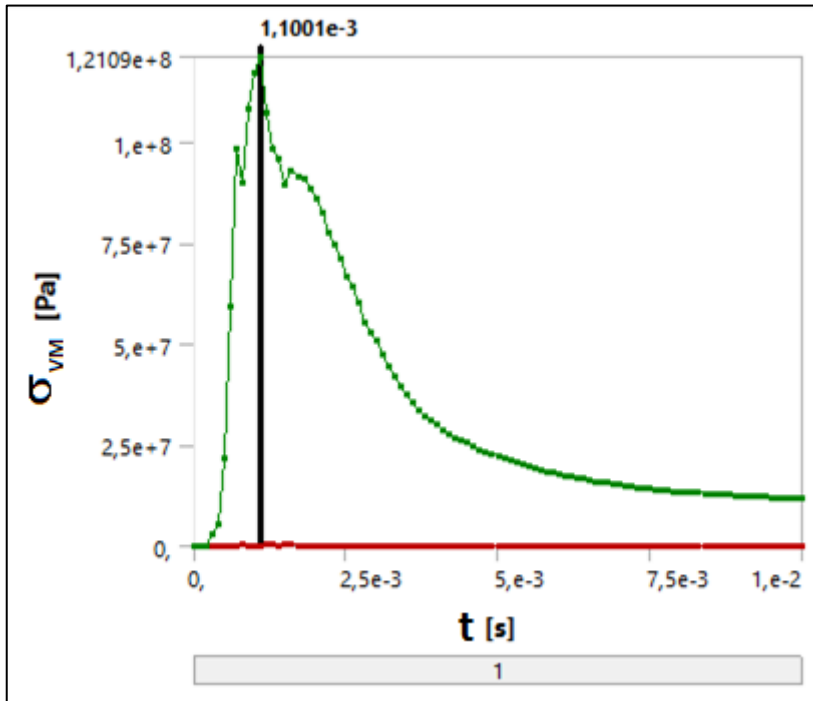


Imagen 36 σ_{VM}

Aquí podemos observar que la tensión máxima equivalente de Von Mises se produce una vez alcanzada la protección ensayada, siendo de $121,09 \cdot 10^6$ MPa en el instante 1,1 ms, comenzando la tensión del impacto representativa en el instante 0,25 ms y observándose que posteriormente al máximo de la tensión estas caen por el efecto de la no actuación de ningún evento, ya que se ha dejado de aplicar cualquier tipo de esfuerzo, fuerza, impacto,... en la protección.

- Tensión Principal Máxima

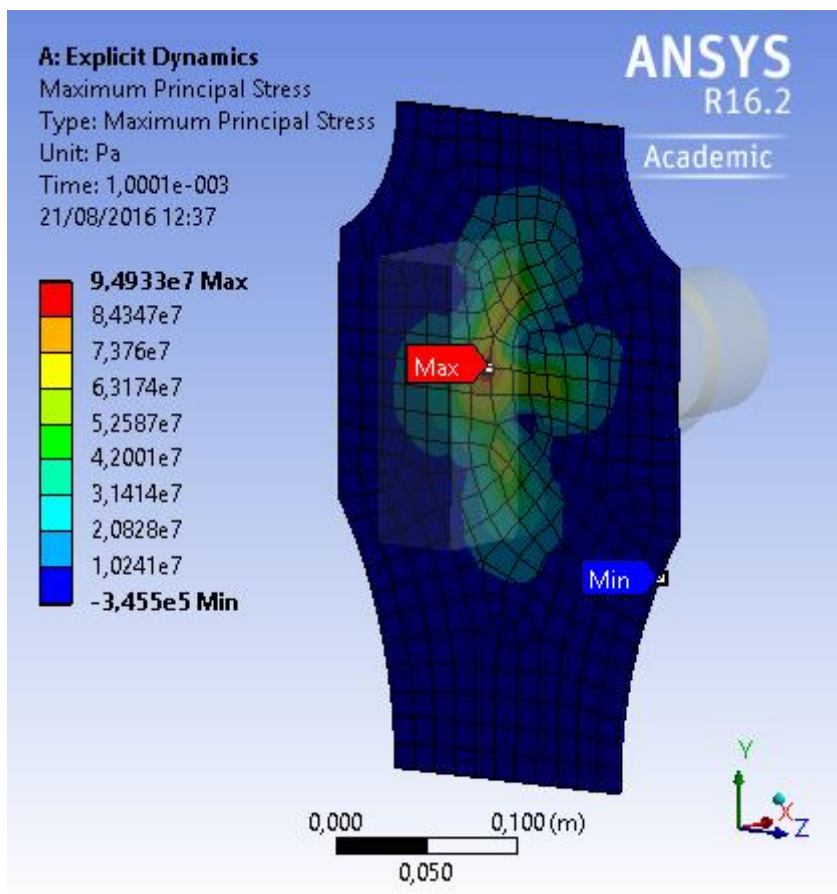


Imagen 37 σ_{TM} máximas en geometría

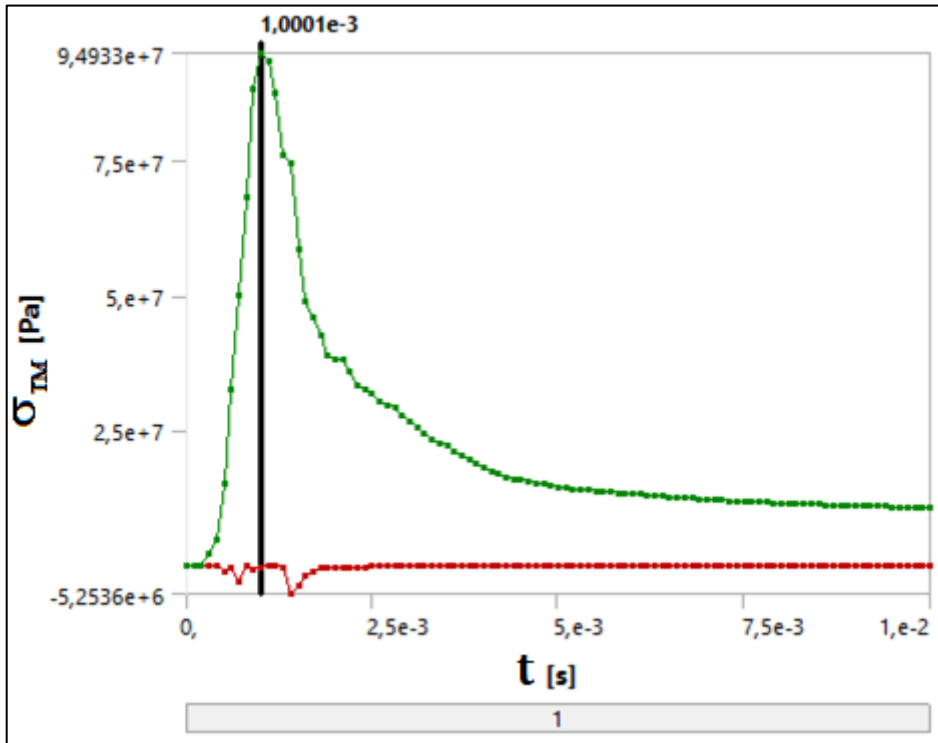


Imagen 38 σ_{TM}

Aquí podemos observar que la tensión principal máxima se produce una vez alcanzada por el impacto la protección ensayada, siendo de $94,933 \cdot 10^6$ MPa en el instante 1,1 ms, comenzando la tensión del impacto representativa en el instante 0,25 ms y observándose que posteriormente al máximo de la tensión estas caen por el efecto de la no actuación de ningún evento, ya que se ha dejado de aplicar cualquier tipo de esfuerzo, fuerza, impacto,... en la protección.

- Factor de Seguridad

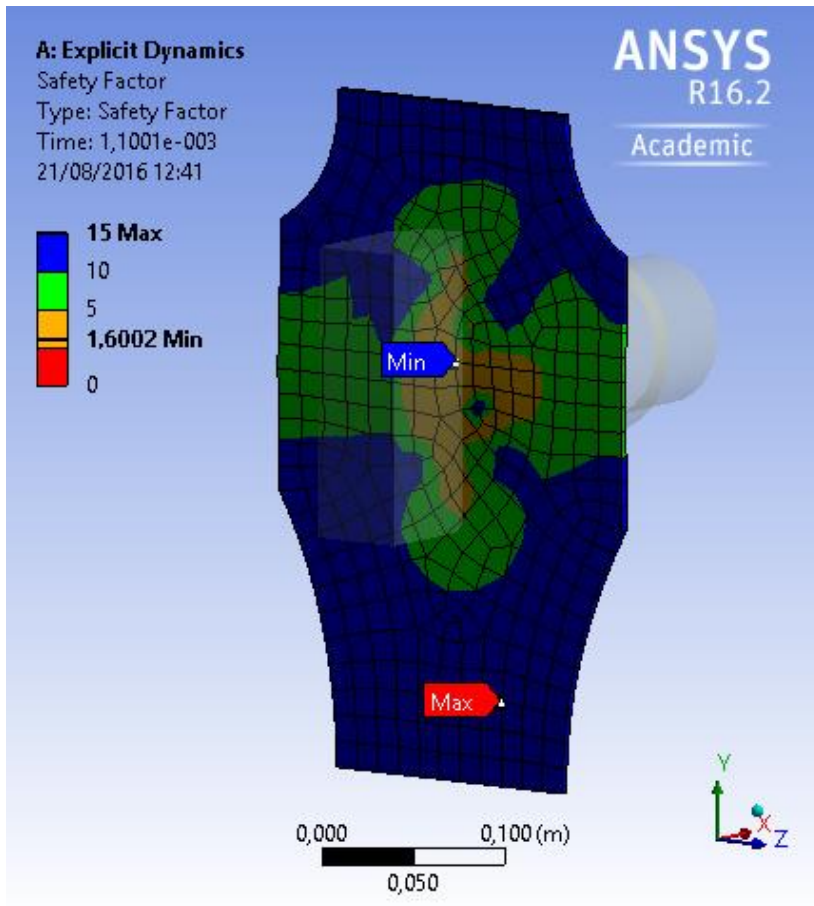


Imagen 39 Factor de seguridad Max-Min en Geometría

Como se comentó anteriormente, el factor de seguridad se obtendrá como resultado de comparar la tensión principal máxima o equivalente de Von Mises contra la tensión última o de rotura propia del material. Pero al ser más restrictivo, al ser mayor la tensión equivalente de Von Mises, se empleará este valor.

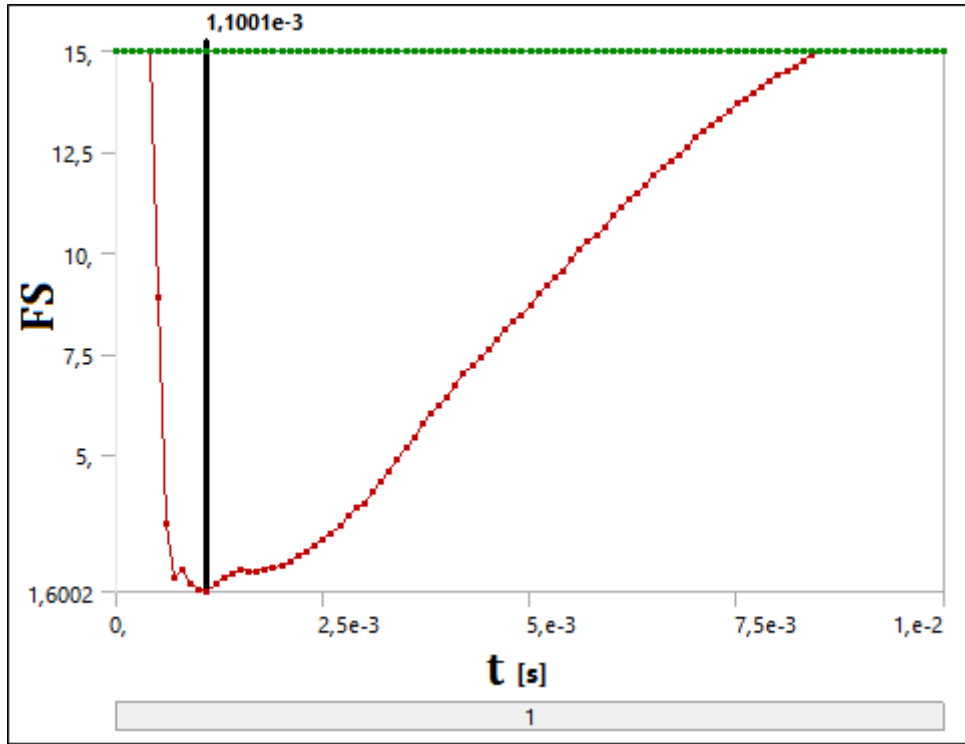


Imagen 40 Gráfico temporal de Factor de Seguridad

Aquí también podemos observar que el factor de seguridad mínimo se alcanza, como es obvio, siendo de 1,6002 en el instante 1,1 ms, comenzando a ser representativo el factor de seguridad en el instante 0,45 ms y observándose que posteriormente al mínimo estos aumentan por el efecto de la no actuación de ningún evento, ya que se ha dejado de aplicar cualquier tipo de esfuerzo, fuerza, impacto,... en la protección.

Además de los datos propios del cálculo y relacionados con el material debemos tener presente, por ejemplo y como mínimo el error, lo que sería “Energy Error”, que como observamos tiene un valor constante lo que implica que no se desvían los cálculos en cada ciclo de cálculo lo suficiente como para que sea representativo y el Δt utilizado es válido.

Además de la energía aplicada en el impacto que, como dice la norma que aplica UNE EN 1621-2, debe ser como mínimo de $(50 \pm 1.5 \text{ J})$.

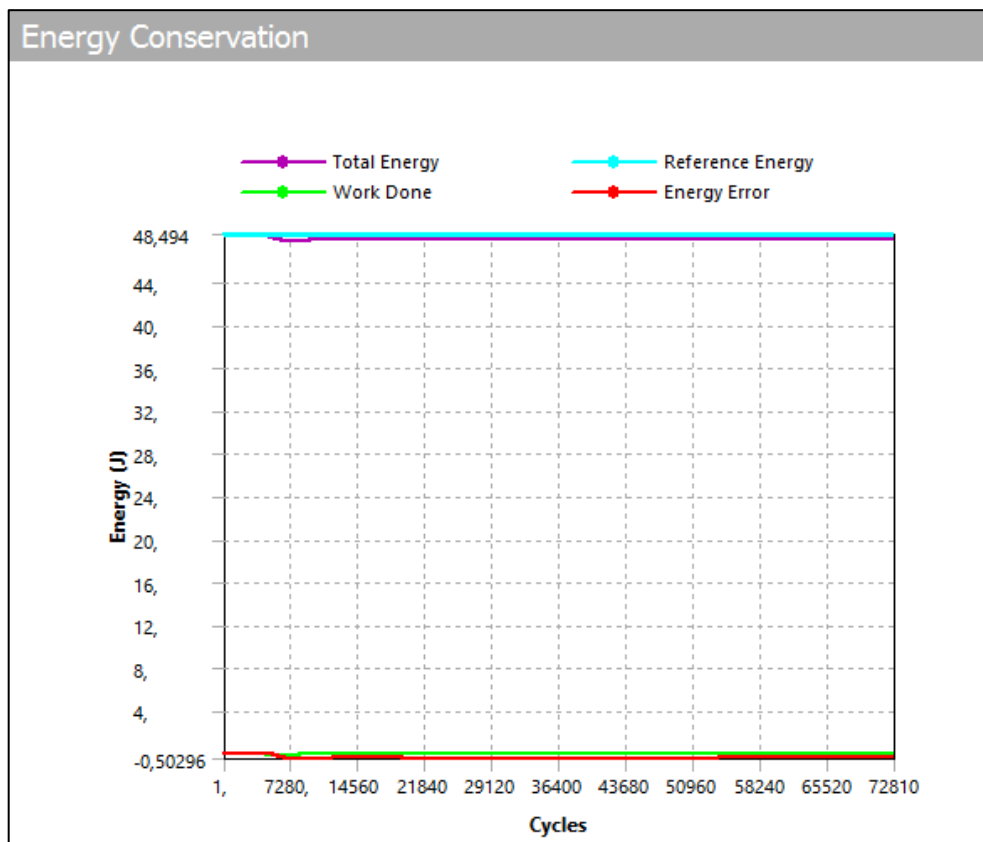


Imagen 41 Conservación de la energía

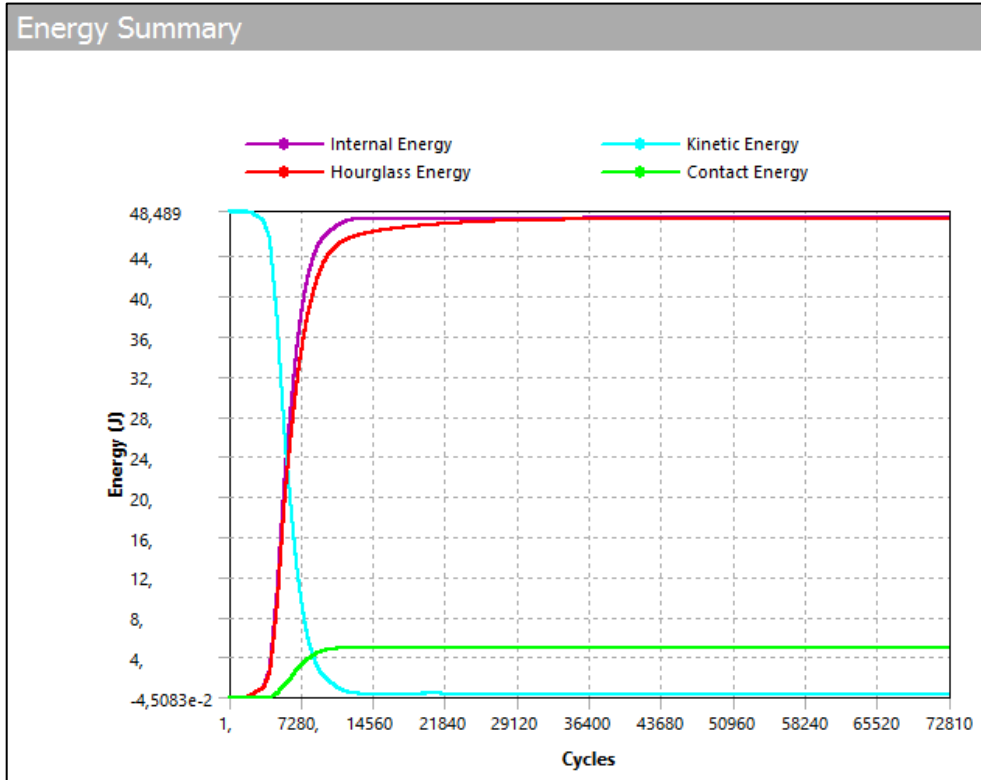


Imagen 42 Resumen de energía en impacto

De este gráfico podemos observar que toda la energía cinética del percutor es transferida en el impacto, cumpliéndose la conservación de la energía y que la energía "Hourglass" al no ser superior al 5% de la energía interna nos indica que no es necesario controles o propiedades adicionales para definir nuestro modelo.

Además podemos obtener otra información importante, como es que está relacionado la imagen 34 con la siguiente imagen

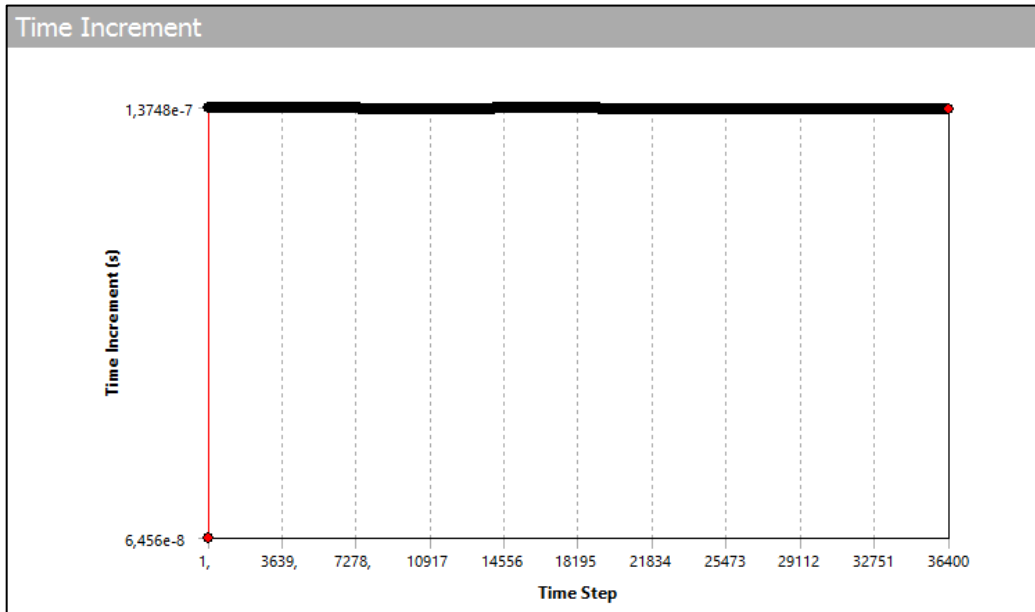


Imagen 43 Δt de cada ciclo

Primero indicar que es un indicador de calidad del ensayo que sea estable el Δt para cada ciclo y después indicar que cada ciclo posee un $\Delta t = 1,3748 \cdot 10^{-7}$ s, por lo que como hemos indicado anteriormente la σ_{VM} máxima se produce en el instante $1,1001 \cdot 10^{-3}$ s esta se produce en el ciclo

$$\frac{1,1001 \cdot 10^{-3}}{1,3748 \cdot 10^{-7}} = 8.006,55 \text{ ciclo}$$

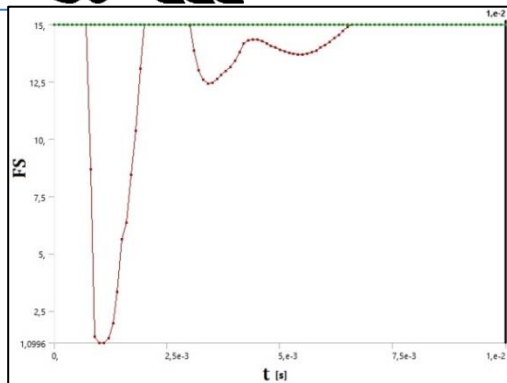
donde nos indica que se produce el mayor cambio de la energía, de su forma cinética a energía interna.

De los 30 ensayos realizados se obtienen resultados, que en parte se han presentado anteriormente, pero otros se pueden extraer, son similares a los presentados, cumpliendo lo expuesto. No obstante vamos a presentar los gráficos de los factores de seguridad desde el punto de vista del tiempo, para que podamos discernir cuando comienza el impacto, que casi instantáneamente

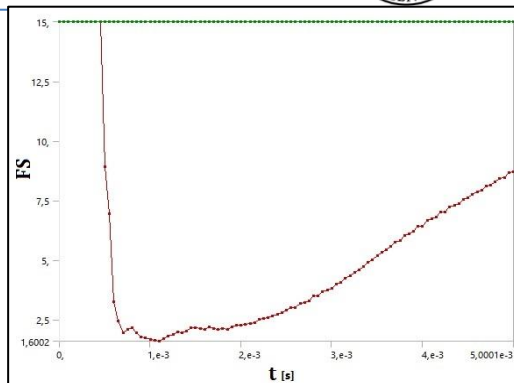


alcanzamos el máximo de la tensión equivalente de Von Mises (que como se dijo anteriormente era mayor que la tensión principal y por lo tanto escogemos esta información al ser más restrictiva) y que se produce un aumento del factor de seguridad (una disminución de la σ_{VM}) al no transmitirse ningún tipo de esfuerzo a la protección ensayada.

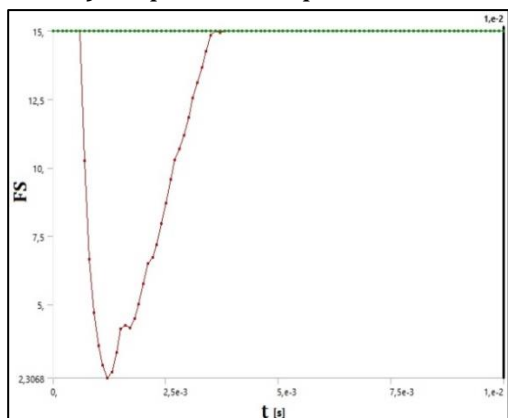
Estos resultados se van a presentar en forma de gráficos. Con estos resultados podremos observar que la información más representativa se encuentra en un espacio de tiempo muy pequeño (figuras desde la 44 a la 48) y también como intuir como se debería producir grietas o fallos en el material, indicado por las zonas de la protección con menor factor de seguridad (figuras de la 49 a 53).



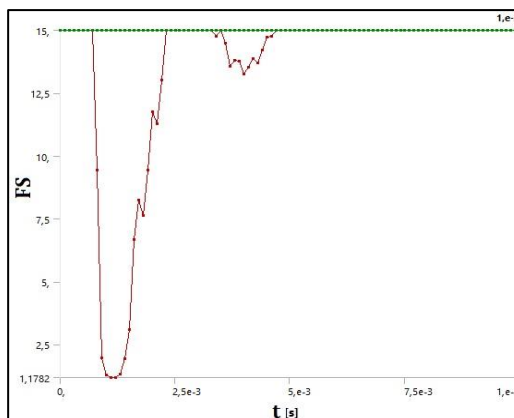
1) Espaldera Pequeña Nueva



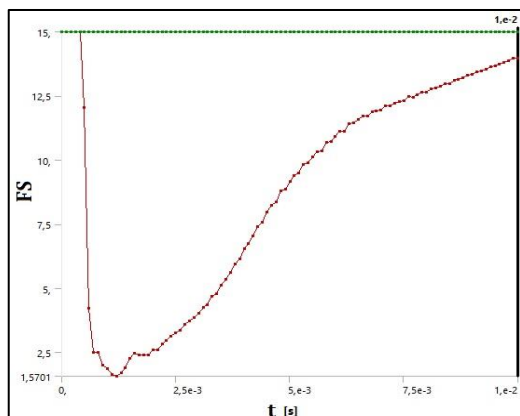
2) Espaldera Mediana Nueva



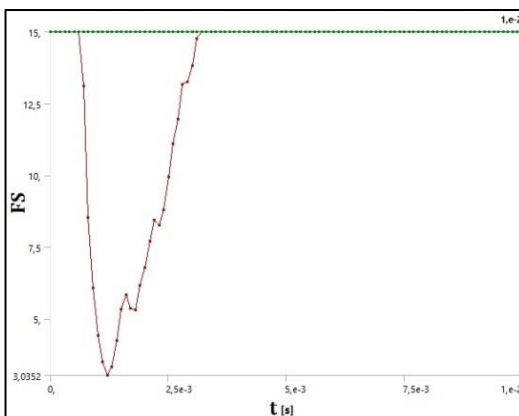
3) Espaldera Grande Nueva



4) Espaldera Pequeña Envejecida

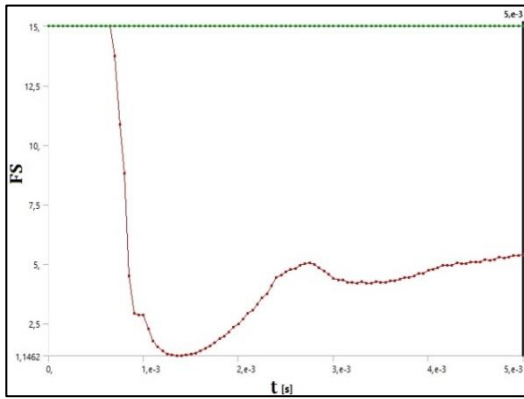


5) Espaldera Mediana Envejecida

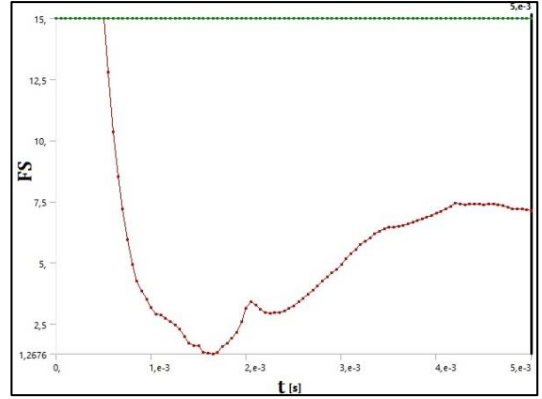


6) Espaldera Grande Envejecida

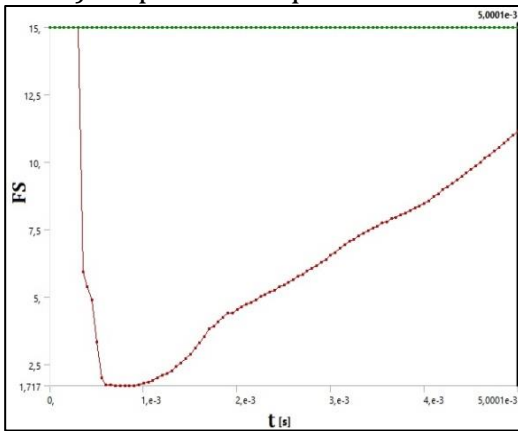
Imagen 44 FS Impacto 1 (1-6)



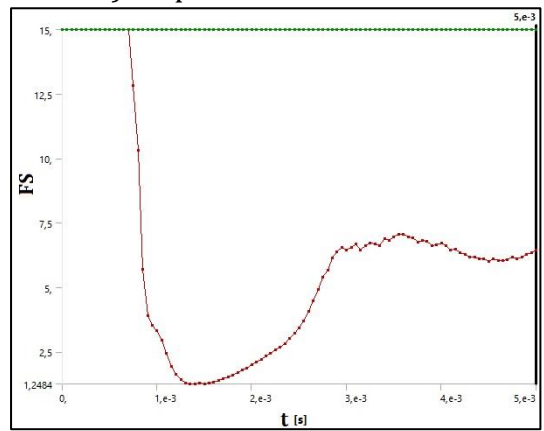
7) Espaldera Pequeña Nueva



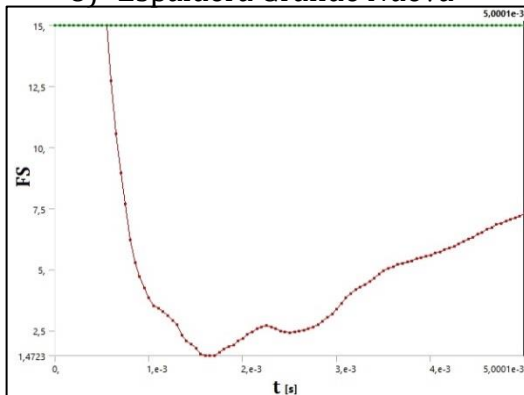
9) Espaldera Mediana Nueva



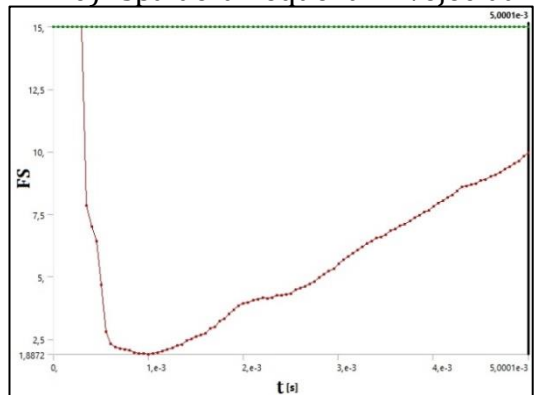
8) Espaldera Grande Nueva



10) Espaldera Pequeña Envejecida

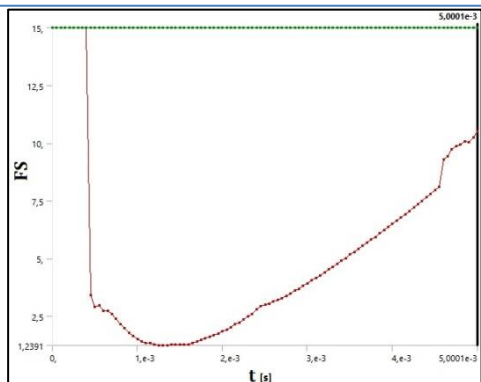


11) Espaldera Mediana Envejecida

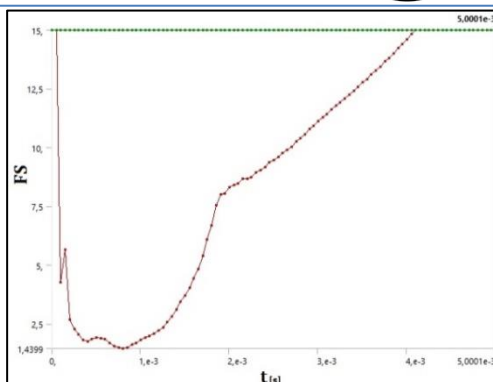


12) Espaldera Grande Envejecida

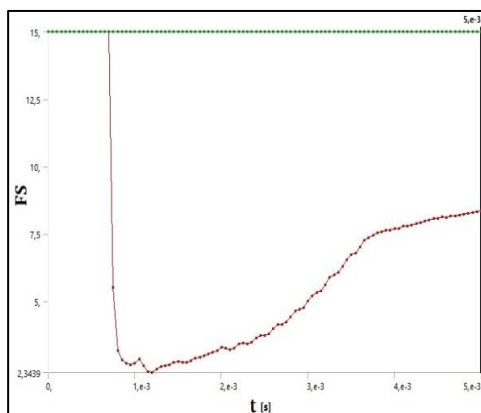
Imagen 45 FS Impacto 2 (7-12)



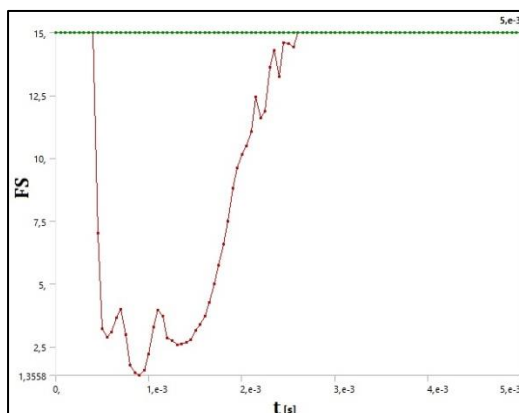
13)Espaldera Pequeña Nueva



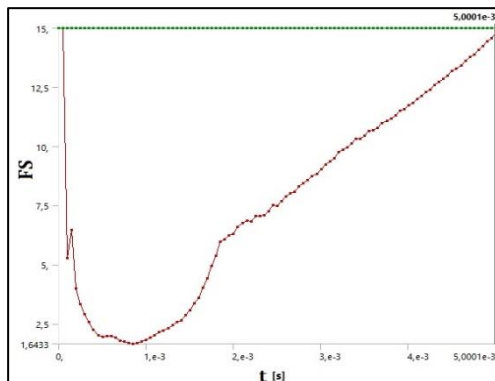
14)Espaldera Mediana Nueva



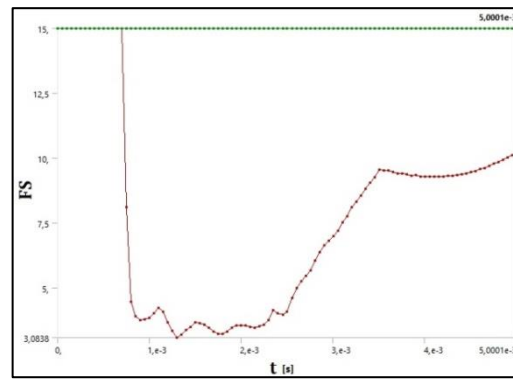
15)Espaldera Grande Nueva



16)Espaldera Pequeña Envejecida

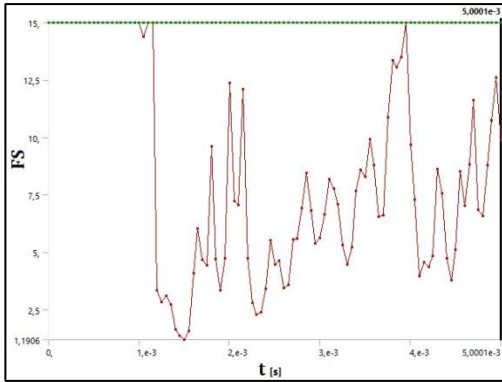


17)Espaldera Mediana Envejecida

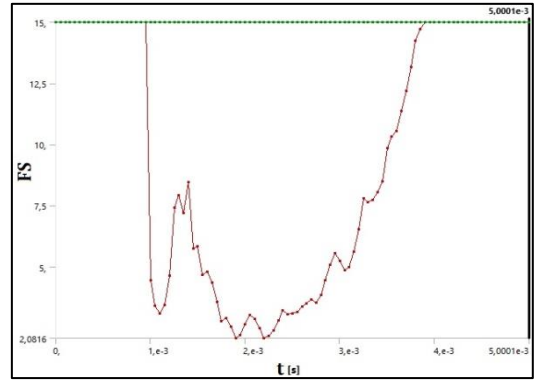


18)Espaldera Grande Envejecida

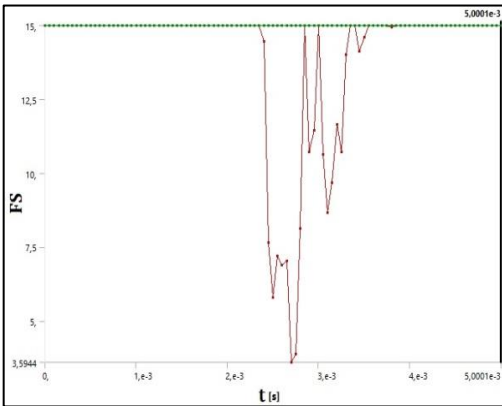
Imagen 46 FS Impacto 3 (13-18)



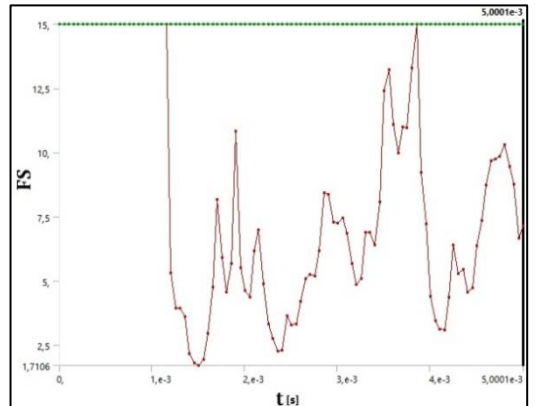
19) Espaldera Pequeña Nueva



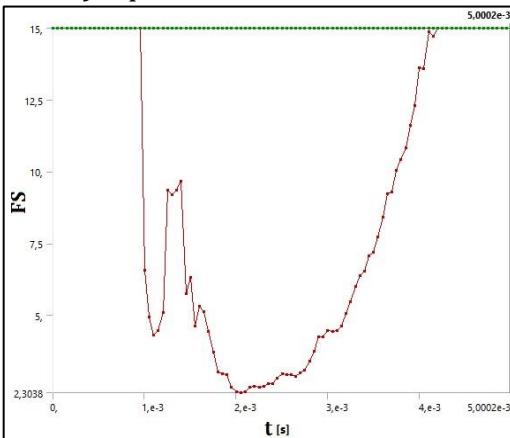
20) Espaldera Mediana Nueva



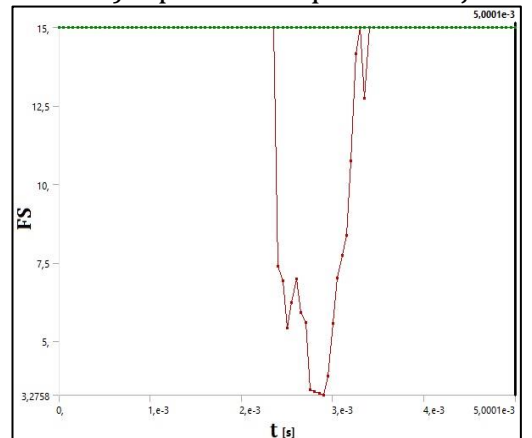
21) Espaldera Grande Nueva



22) Espaldera Pequeña Envejecida

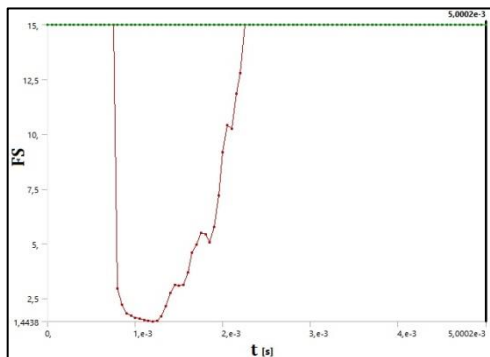


23) Espaldera Mediana Nueva

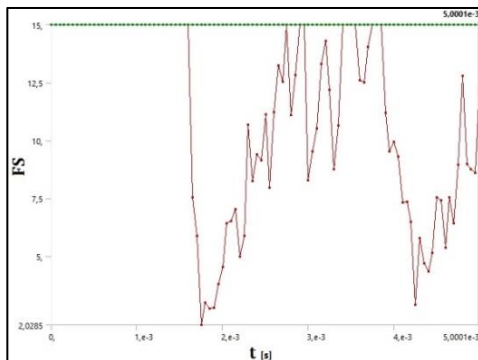


24) Espaldera Grande Envejecida

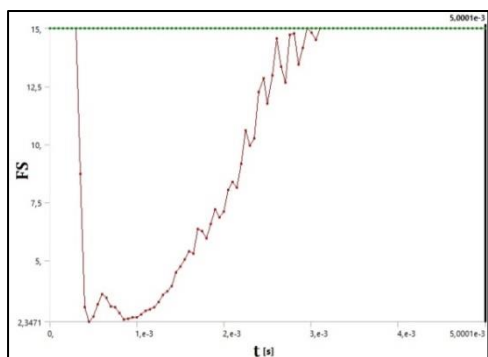
Imagen 47 FS Impacto 4 (19-24)



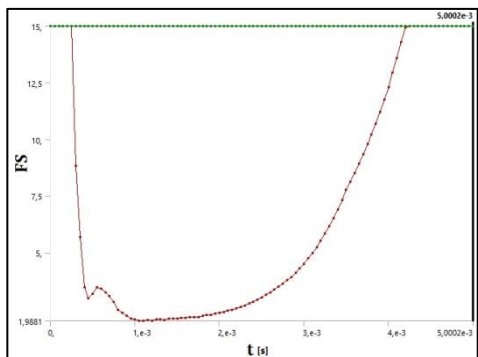
25) Espaldera Pequeña Nueva



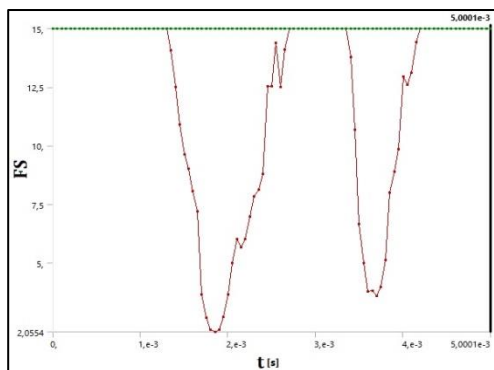
26) Espaldera Mediana Nueva



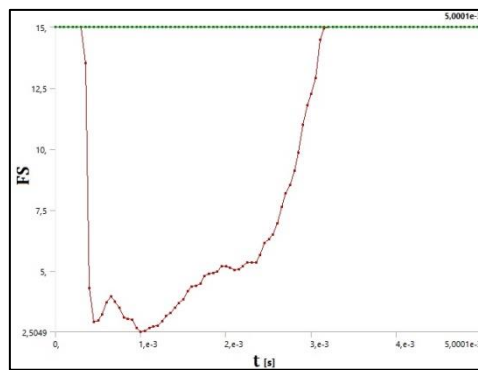
27) Espaldera Grande Nueva



28) Espaldera Pequeña Envejecida



29) Espaldera Mediana Envejecida



30) Espaldera Grande Envejecida

Imagen 48 FS Impacto 5 (25-30)

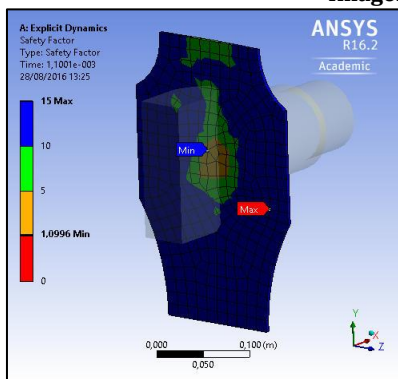


Como se dijo anteriormente vamos a mostrar las imágenes (de la 42 a 47) donde se podrá ver como se propagaría la grieta en caso de producirse esta.

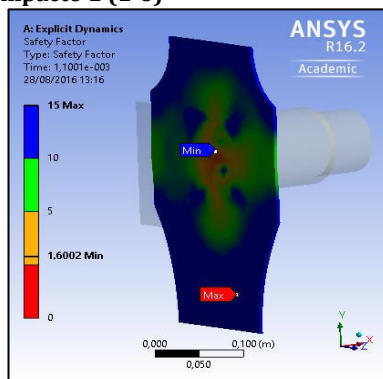
En cada una de las imágenes se aprecia, que como se dijo anteriormente, los Factores de Seguridad marcan que parte del material fallará con más seguridad y si se analiza cada una de las imágenes esta progresión estará marcada por la geometría que se aplica tanto del percutor como del yunque.

El percutor impacta con una superficie curva, por lo tanto impacta como si de una línea se tratase y el yunque al tener su superficie en contacto con la superficie exterior de la espaldera en forma de cúpula se puede asimilar a un punto o a una superficie circular pequeña, entonces se observa que la espaldera romperá (aparecerán grietas) a lo largo de la longitud del percutor.

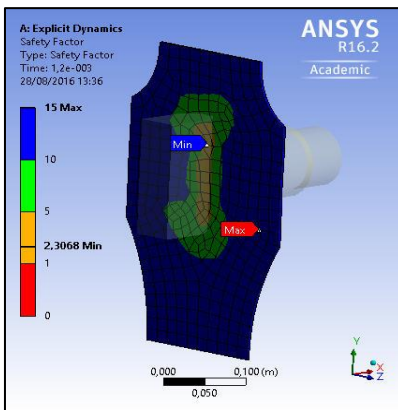
Imagen 49 FS Impacto 1 (1-6)



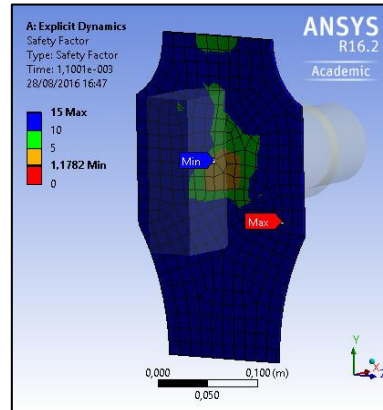
1) Espaldera Pequeña Nueva



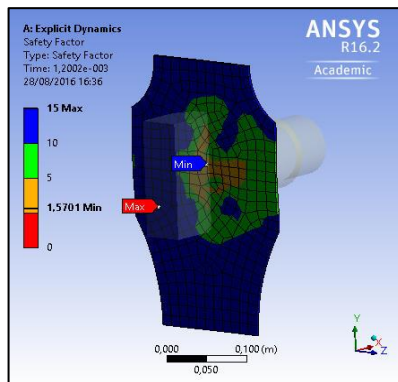
2) Espaldera Mediana Nueva



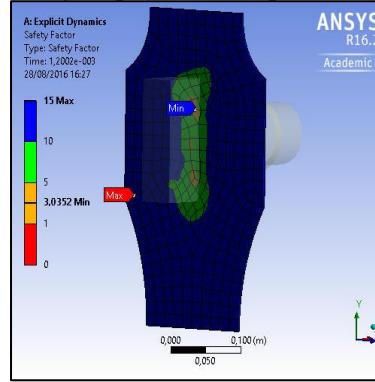
3) Espaldera Grande Nueva



4) Espaldera Pequeña Envejecida

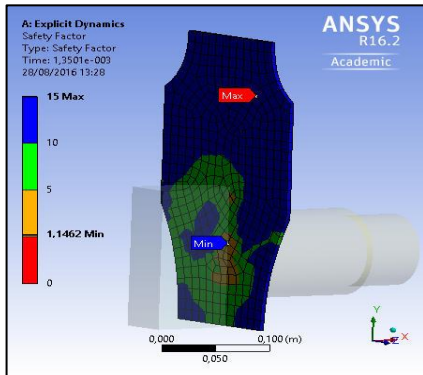


5) Espaldera Mediana Envejecida

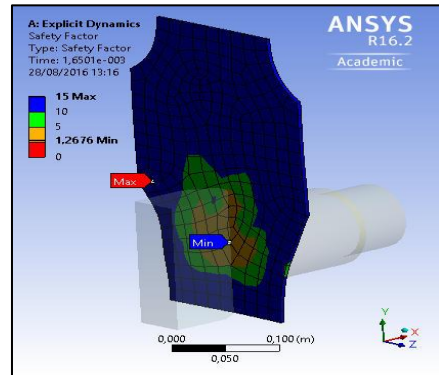


6) Espaldera Grande Envejecida

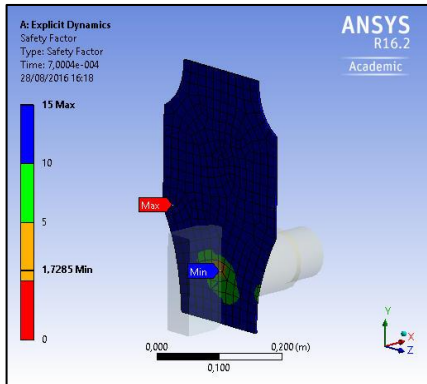
Imagen 50 FS Impacto 2 (7-12)



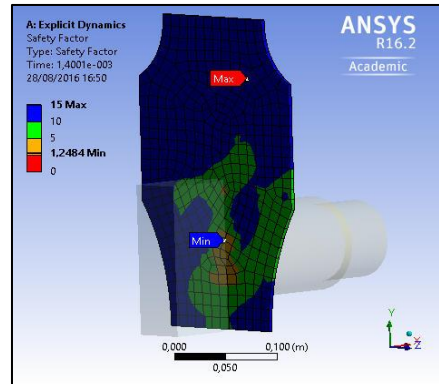
7) Espaldera Pequeña Nueva



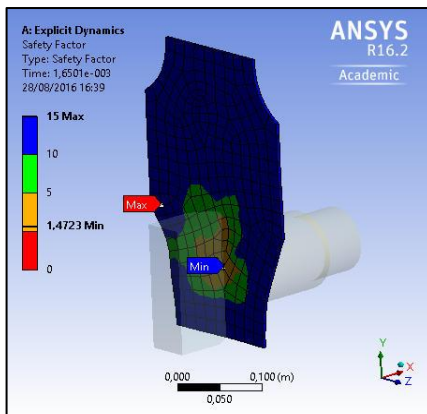
8) Espaldera Mediana Nueva



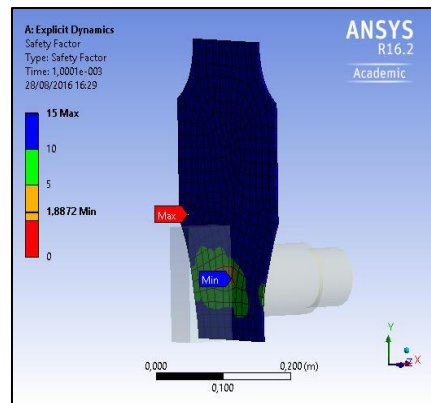
9) Espaldera Grande Nueva



10) Espaldera Pequeña Envejecida

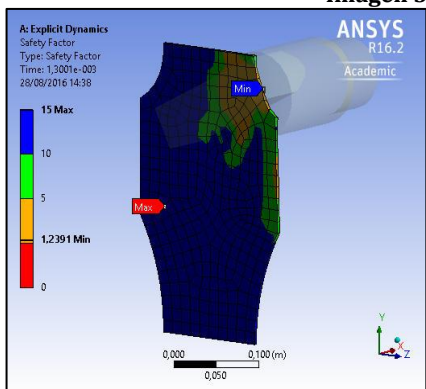


11) Espaldera Mediana Envejecida

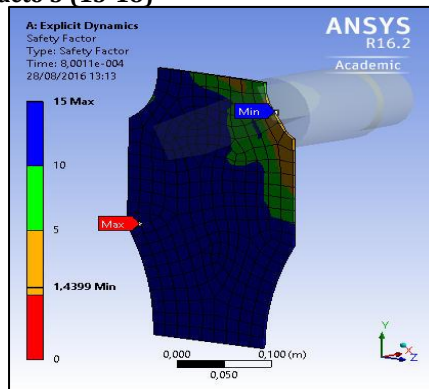


12) Espaldera Grande Envejecida

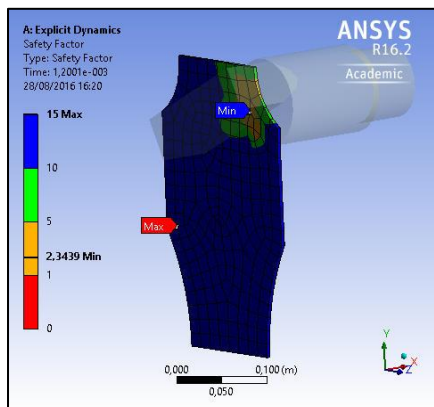
Imagen 51 FS Impacto 3 (13-18)



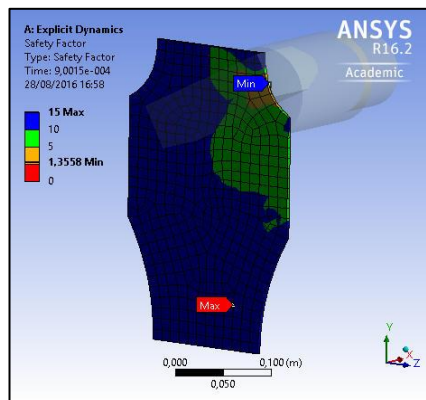
13) Espaldera Pequeña Nueva



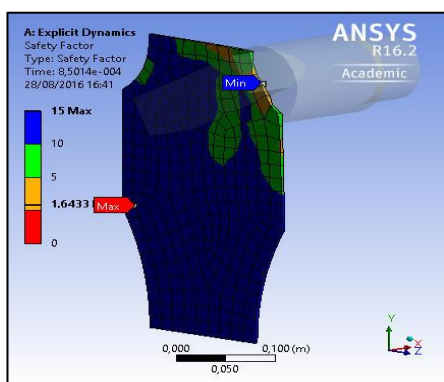
14) Espaldera Mediana Nueva



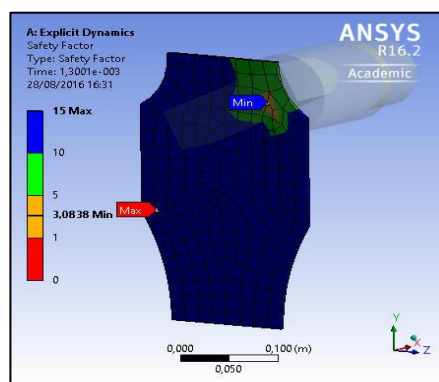
15) Espaldera Grande Nueva



16) Espaldera Pequeña Envejecida

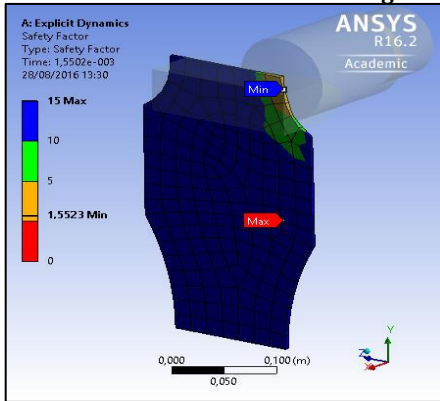


17) Espaldera Mediana Envejecida

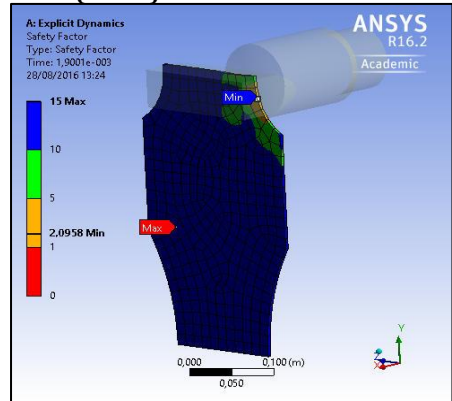


18) Espaldera Grande Envejecida

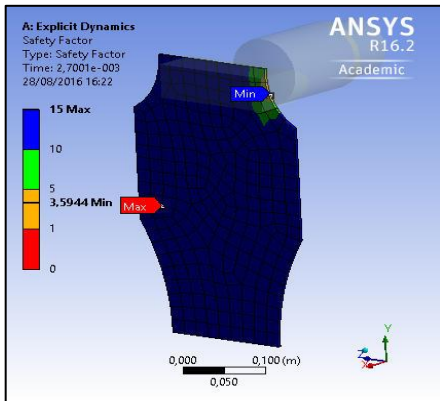
Imagen 52 FS Impacto 4 (19-24)



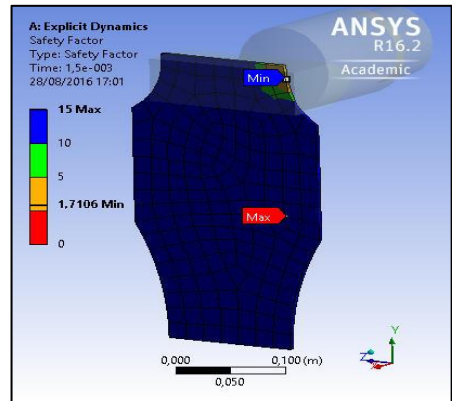
19) Espaldera Pequeña Nueva



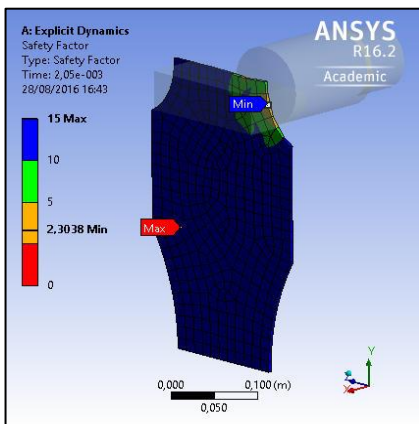
20) Espaldera Mediana Nueva



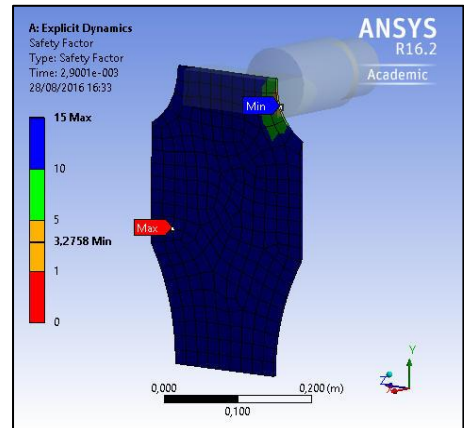
21) Espaldera Grande Nueva



22) Espaldera Pequeña Envejecida

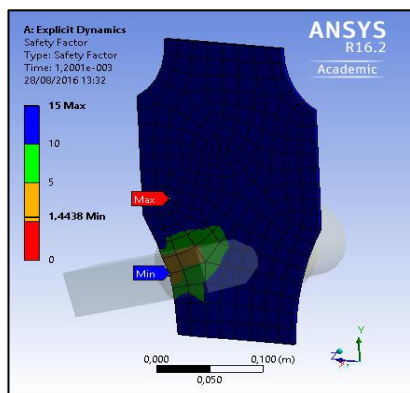


23) Espaldera Mediana Envejecida

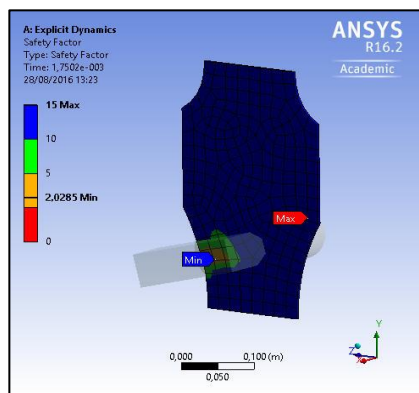


24) Espaldera Grande Envejecida

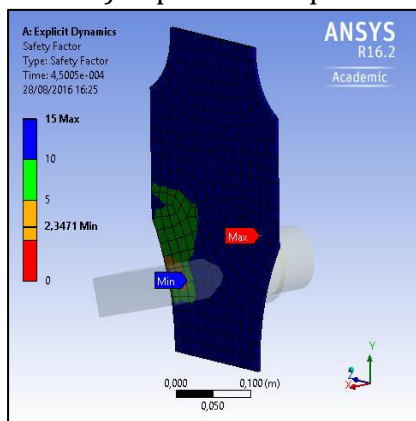
Imagen 53 FS Impacto 5 (25-30)



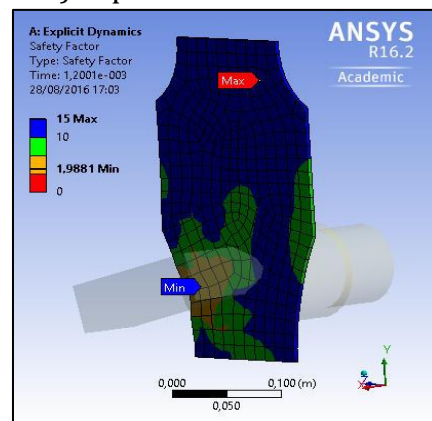
25) Espaldera Pequeña Nueva



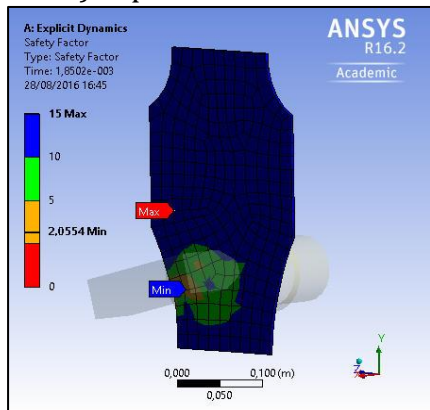
26) Espaldera Mediana Nueva



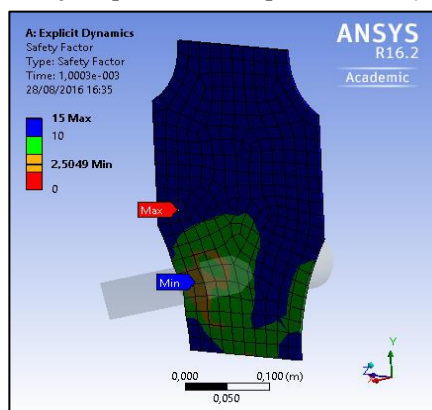
27) Espaldera Grande Nueva



28) Espaldera Pequeña Envejecida



29) Espaldera Mediana Envejecida



30) Espaldera Grande Envejecida



5. CONCLUSIONES

El objetivo del presente estudio es intentar comprobar si es viable utilizar materiales compuestos en elementos de protección, y en el caso que nos ocupa, en una espaldera para motociclistas.

Según los resultados se puede concluir que sí que es posible utilizar este tipo de materiales, debido a que con un espesor bastante reducido se obtiene un elemento rígido que pueda absorber la energía cinética en caso de impacto.

En cuanto a las simulaciones realizadas comentamos que los métodos numéricos utilizados, además de ser en la actualidad una herramienta imprescindible para el estudio previo de soluciones, son capaces de identificar fallos en el diseño antes de pasar a la producción, con el consiguiente ahorro económico. Por otro lado, la resistencia a impacto de la espaldera no depende prácticamente de su tamaño.

Sería interesante extender este trabajo añadiendo diversas formas, que se acoplen mejor a la anatomía, para que su ergonomía sea mayor y proporcionar al usuario mayor comodidad y calidad en su utilización.



6. BIBLIOGRAFÍA

[1] UNE-EN 1621-2-2014 "Ropa de protección frente a impactos mecánicos para motoristas. Parte 2: Protectores de espalda para motoristas. Requisitos y métodos de ensayo".

[2] Effects Of Hydrolytic Aging On Glass/Epoxy, Kevlar/Epoxy, And Hybrid (Glass/Kevlar/Epoxy) Composites. International Journal Of Engineering Research & Technology (IJERT) Vol. 2 Issue 5, May 2013. C. Ramesh, V. Arumugam, Joseph Stanley, Vijaya Kumar.

[3] Rapid Evaluation Of Thermal Aging Of Polymer Composites. Society Of Plastics Engineers. Plastics Research Online. 10.2417/spepro.005232. Wei Fan and Jia-lu Li

[4] Effects Of Aging On Epoxy-Based Rapid Tooling Materials. Xavier Ottemer and Jonathan S. Colton Center for Polymer Processing, Rapid Prototyping and Manufacturing Institute, and School of Mechanical Engineering Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332-0405 USA.

[5] BEER, Ferdinand P., JOHNSTON Jr. E. Russell. Mecánica de Materiales. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill, 1993. 738p. ISBN 0-07-837340-9.

[6] Wang, Y. y Xia, Y. M., "The Effects of Strain Rate on the Mechanical Behaviour of Kevlar Fibre Bundles: an Experimental and Theoretical Study." Composites: Part A. 1998, Vol. 29A, págs. 1411-1415.

[7] Zhou, Y., y otros., "Tensile Behavior of Carbon Fiber Bundles at Different Strain Rates." Materials Letters, 2010, Vol. 64, págs. 246-248.



[8] Cunniff, P. M., "Dimensionless Parameters for Optimization of TextileBased Body Armor Systems." 18th International Symposium on Ballistics. 1999, págs. 1303-1310.

[9] Lim, C. T., Tan, V. B. C. y Cheong, C. H., "Perforation of High-Strength Double-Ply Fabric System by Varying Shaped Projectiles." International Journal of Impact Engineering, 2002, Vol. 27, págs. 577-591.

[10] Mechanical Properties of Random Discontinuous Fiber Composites Manufactured from Wetlay Process. Yunkai Lu. Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.

[11] Olsson, R., "Mass Criterion for Wave Controlled Impact Response of Composite Plates." Composites: Part A, 2000, Vol. 31, págs. 879-887.

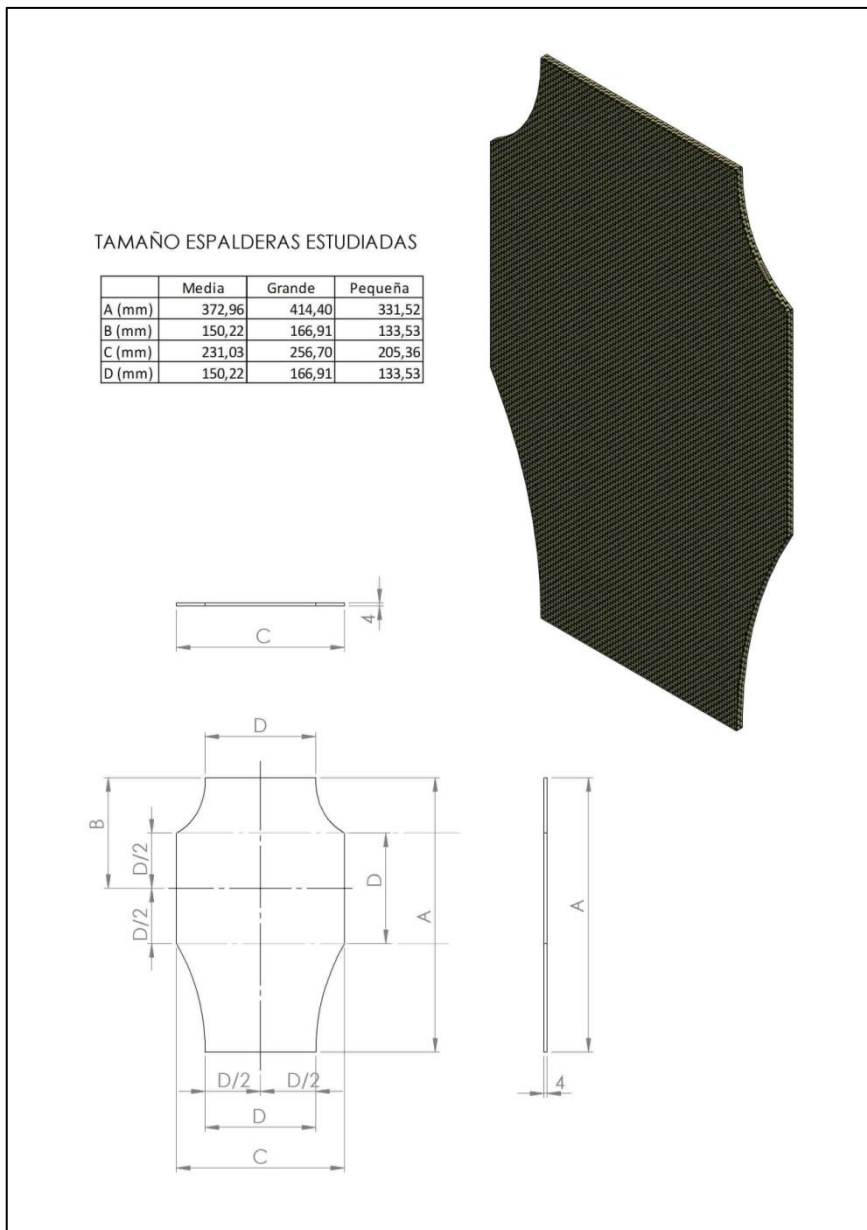
[12] Los accidentes nos cuestan 15.390 millones. J.M.M. Revista "Tráfico".

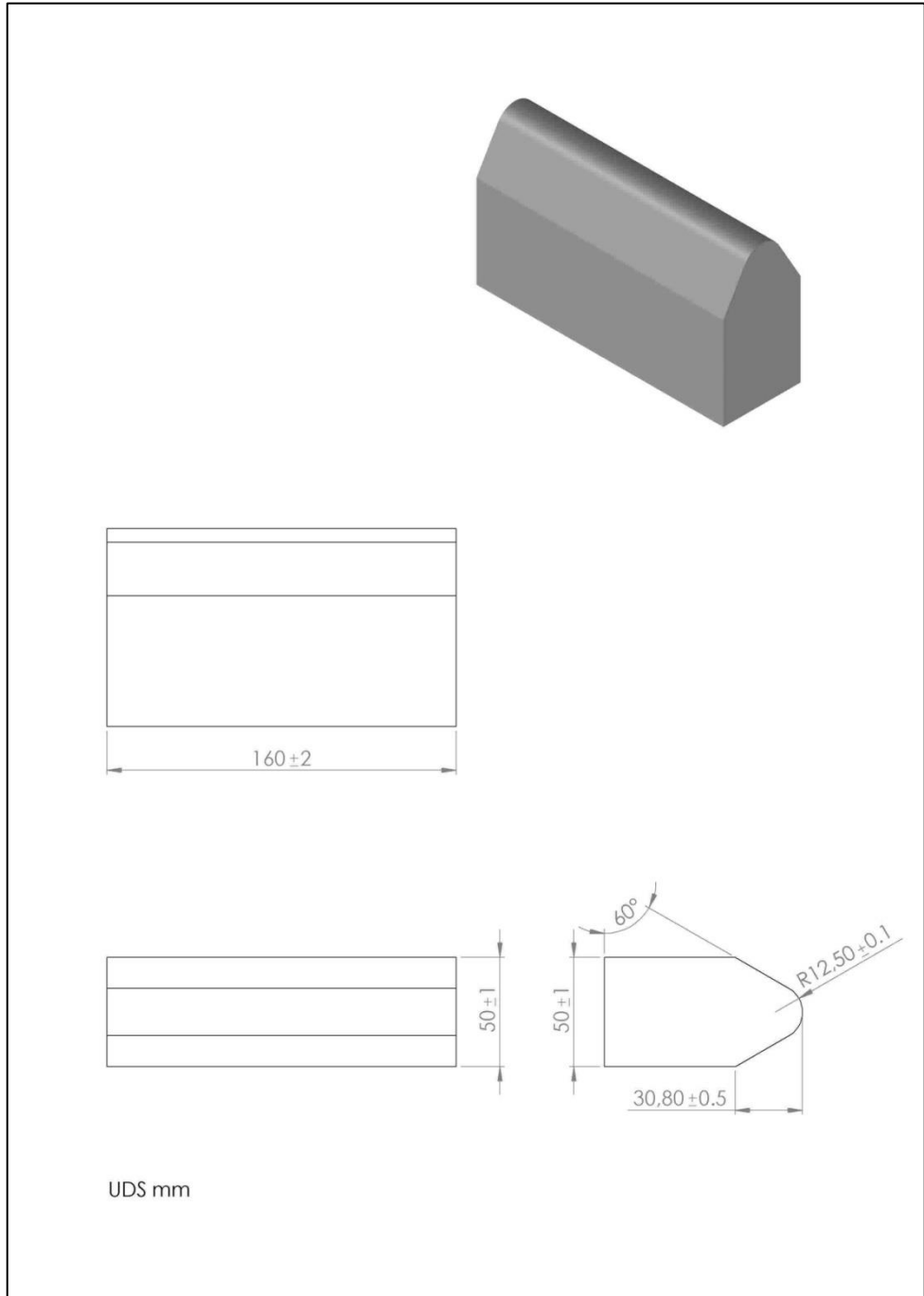
[13] Estudio de siniestralidad vial en motocicletas. Jesús Vegas Asensio. Mutua Madrileña.

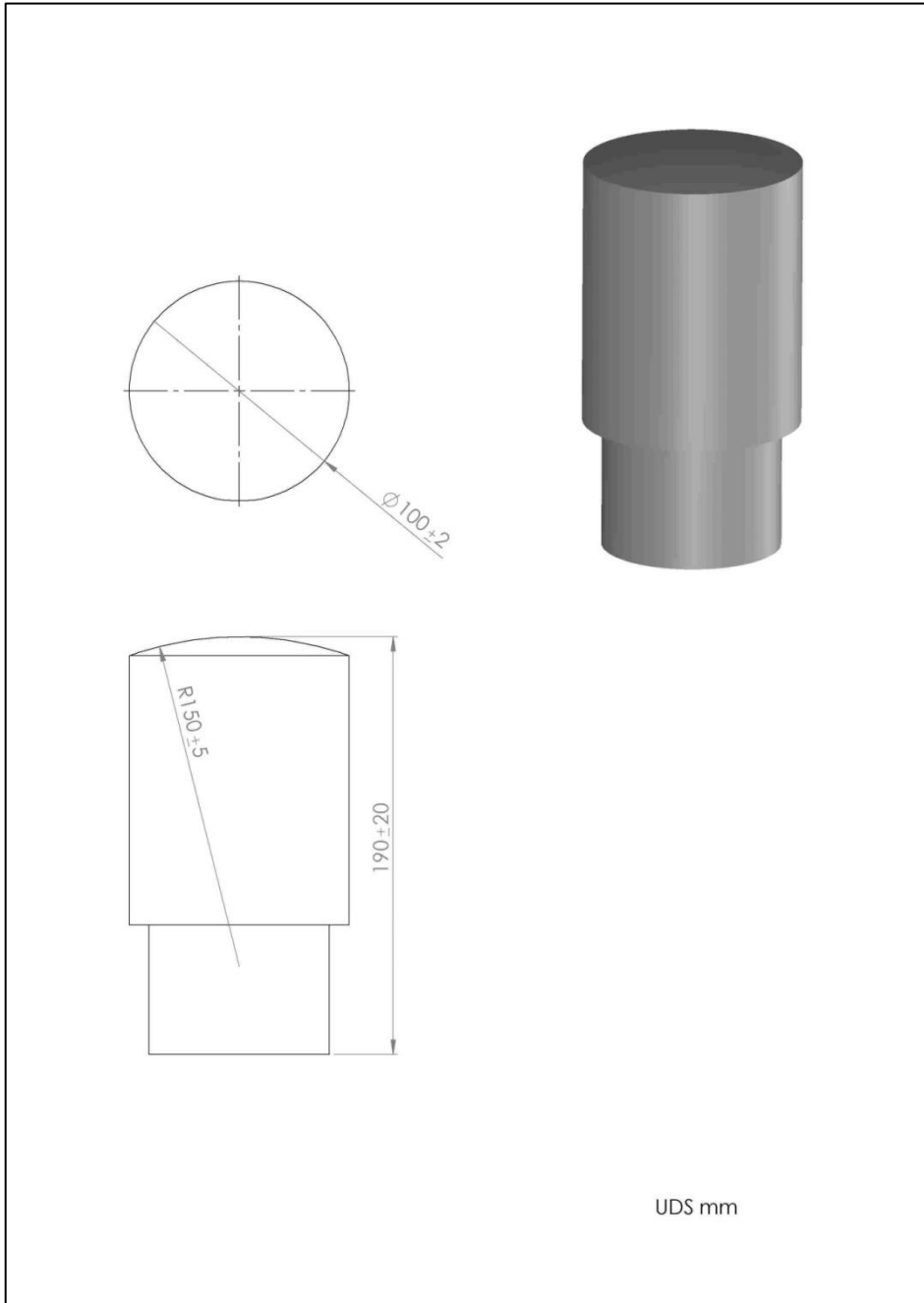
[14] El comportamiento de los materiales compuestos con fibra de carbono. Broulaye Bamba.

7. ANEXOS

7.1 Croquis de piezas estudiadas









7.2 Propiedades piezas protección estudiadas

COMPOSITE MATERIALS ENGINEERING SPECIALISTS IN CARBON FIBRE - IN LIQUIDATION - JULY 2009 -
FOR FINANCIAL / LEGAL ENQUIRIES THE LIQUIDATORS DETAILS CAN BE FOUND ON THE HOME PAGE
THE 'CONTACT' PAGE IS FOR TECHNICAL ENQUIRIES ONLY



PERFORMANCE COMPOSITES

CARBON FIBRE TUBES

FIBRE TYPES

FIBRE ANGLES

CARBON FIBRE PROFILES

EXAMPLE PROFILES

MECHANICAL PROPERTIES

MATERIALS & EQUIPMENT SUPPLIES

CONTACT

Mechanical Properties of Carbon Fibre Composite Materials, Fibre / Epoxy resin (120°C Cure)

Fibres @ 0° (UD), 0/90° (fabric) to loading axis, Dry, Room Temperature, Vf = 60% (UD), 50% (fabric)

| | Symbol | Units | Std CF Fabric | HMCF Fabric | E glass Fabric | Kevlar Fabric | Std CF UD | HMCF UD | M55** UD | E glass UD | Kevlar UD | Boron UD | Steel S97 | Al. L65 | Tit. 5173 |
|----------------------------|--------|----------|---------------|-------------|----------------|---------------|-----------|---------|----------|------------|-----------|----------|-----------|---------|-----------|
| Young's Modulus 0° | E1 | GPa | 70 | 85 | 25 | 30 | 135 | 175 | 300 | 40 | 75 | 200 | 207 | 72 | 110 |
| Young's Modulus 90° | E2 | GPa | 70 | 85 | 25 | 30 | 10 | 8 | 12 | 8 | 6 | 15 | 207 | 72 | 110 |
| In-plane Shear Modulus | G12 | GPa | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 2 | 5 | 80 | 25 | |
| Major Poisson's Ratio | v12 | | 0.10 | 0.10 | 0.20 | 0.20 | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.25 | 0.34 | 0.23 | | | |
| Ult. Tensile Strength 0° | Xt | MPa | 600 | 350 | 440 | 480 | 1500 | 1000 | 1600 | 1000 | 1300 | 1400 | 990 | 460 | |
| Ult. Comp. Strength 0° | Xc | MPa | 570 | 150 | 425 | 190 | 1200 | 850 | 1300 | 600 | 280 | 2800 | | | |
| Ult. Tensile Strength 90° | Yt | MPa | 600 | 350 | 440 | 480 | 50 | 40 | 50 | 30 | 30 | 90 | | | |
| Ult. Comp. Strength 90° | Yc | MPa | 570 | 150 | 425 | 190 | 250 | 200 | 250 | 110 | 140 | 280 | | | |
| Ult. In-plane Shear Stren. | S | MPa | 90 | 35 | 40 | 50 | 70 | 60 | 75 | 40 | 60 | 140 | | | |
| Ult. Tensile Strain 0° | ext | % | 0.85 | 0.40 | 1.75 | 1.60 | 1.05 | 0.55 | | 2.50 | 1.70 | 0.70 | | | |
| Ult. Comp. Strain 0° | exc | % | 0.80 | 0.15 | 1.70 | 0.60 | 0.85 | 0.45 | | 1.50 | 0.35 | 1.40 | | | |
| Ult. Tensile Strain 90° | eyt | % | 0.85 | 0.40 | 1.75 | 1.60 | 0.50 | 0.50 | | 0.35 | 0.50 | 0.60 | | | |
| Ult. Comp. Strain 90° | eyc | % | 0.80 | 0.15 | 1.70 | 0.60 | 2.50 | 2.50 | | 1.35 | 2.30 | 1.85 | | | |
| Ult. In-plane shear strain | es | % | 1.80 | 0.70 | 1.00 | 1.00 | 1.40 | 1.20 | | 1.00 | 3.00 | 2.80 | | | |
| Thermal Exp. Co-ef. 0° | Alpha1 | Strain/K | 2.10 | 1.10 | 11.60 | 7.40 | -0.30 | -0.30 | -0.30 | 6.00 | 4.00 | 18.00 | | | |
| Thermal Exp. Co-ef. 90° | Alpha2 | Strain/K | 2.10 | 1.10 | 11.60 | 7.40 | 28.00 | 25.00 | 28.00 | 35.00 | 40.00 | 40.00 | | | |
| Moisture Exp. Co-ef 0° | Beta1 | Strain/K | 0.03 | 0.03 | 0.07 | 0.07 | 0.01 | 0.01 | | 0.01 | 0.04 | 0.01 | | | |
| Moisture Exp. Co-ef 90° | Beta2 | Strain/K | 0.03 | 0.03 | 0.07 | 0.07 | 0.30 | 0.30 | | 0.30 | 0.30 | 0.30 | | | |
| Density | | g/cc | 1.60 | 1.60 | 1.90 | 1.40 | 1.60 | 1.60 | 1.65 | 1.90 | 1.40 | 2.00 | | | |

** Calculated figures

Fibres @ +/-45 Deg. to loading axis, Dry, Room Temperature, Vf = 60% (UD), 50% (fabric)

| | Symbol | Units | Std. CF | HM CF | E Glass | Std. CF fabric | E Glass fabric | Steel | Al |
|-------------------------|--------|----------|----------|----------|---------|----------------|----------------|--------|--------|
| Longitudinal Modulus | E1 | GPa | 17 | 17 | 12.3 | 19.1 | 12.2 | 207 | 72 |
| Transverse Modulus | E2 | GPa | 17 | 17 | 12.3 | 19.1 | 12.2 | 207 | 72 |
| In Plane Shear Modulus | G12 | GPa | 33 | 47 | 11 | 30 | 8 | 80 | 25 |
| Poisson's Ratio | v12 | | .77 | .83 | .53 | .74 | .53 | | |
| Tensile Strength | Xt | MPa | 110 | 110 | 90 | 120 | 120 | 990 | 460 |
| Compressive Strength | Xc | MPa | 110 | 110 | 90 | 120 | 120 | 990 | 460 |
| In Plane Shear Strength | S | MPa | 260 | 210 | 100 | 310 | 150 | | |
| Thermal Expansion Co-ef | Alpha1 | Strain/K | 2.15 E-6 | 0.9 E-6 | 12 E-6 | 4.9 E-6 | 10 E-6 | 11 E-6 | 23 E-6 |
| Moisture Co-ef | Beta1 | Strain/K | 3.22 E-4 | 2.49 E-4 | 6.9 E-4 | | | | |

** Calculated figures

These tables are for reference / information only and are NOT a guarantee of performance
1 GPa = 1000 MPa = 1000 N/mm² = 145,000 PSI

These tables relate to only 2 of the many fibre orientations possible. Most components are made using combinations of the above materials and with the fibre orientations being dictated by the performance requirements of the product. Performance Composites Ltd. can assist with the design of components where appropriate.



7.3 Propiedades piezas de referencia

7.3.1 Resumen Protección estudiada (GRANDE)

| | | | |
|----------------------------|--|--------------------------------------|-------------------------------|
| Object Name | <i>ESPALDERA PLANA_ok._con volumen</i> | <i>percutor_5kg_sin redondeo</i> | <i>yunque_ok</i> |
| State | Meshed | | |
| Graphics Properties | | | |
| Visible | Yes | | |
| Transparency | 1 | | |
| Definition | | | |
| Suppressed | No | | |
| Stiffness Behavior | Flexible | | |
| Coordinate System | Default Coordinate System | | |
| Reference Temperature | By Environment | | |
| Reference Frame | Lagrangian | | |
| Material | | | |
| Assignment | PROTECTOR | STNL.STEEL | |
| Nonlinear Effects | Yes | | |
| Thermal Strain Effects | Yes | | |
| Bounding Box | | | |
| Length X | 4,e-003 m | 9,0801e-002 m | 0,19 m |
| Length Y | 0,41518 m | 0,16 m | 1,e-001 m |
| Length Z | 0,25376 m | 5,e-002 m | 0,1 m |
| Properties | | | |
| Volume | 3,6132e-004 m ³ | 6,3608e-004 m ³ | 1,3071e-003 m ³ |
| Mass | 0,50585 kg | 4,9996 kg | 10,274 kg |
| Centroid X | 0,3752 m | 0,32176 m | 0,46698 m |
| Centroid Y | 1,2857e-002 m | 4,7958e-002 m | 4,795e-002 m |
| Centroid Z | -5,6878e-003 m | -5,6867e-003 m | -5,6828e-003 m |
| Moment of Inertia Ip1 | 8,4709e-003 kg·m ² | 1,1589e-002 kg·m ² | 1,1621e-002 kg·m ² |
| Moment of Inertia Ip2 | 2,1566e-003 kg·m ² | 3,7922e-003 kg·m ² | 3,295e-002 kg·m ² |
| Moment of Inertia Ip3 | 6,3156e-003 kg·m ² | 1,353e-002 kg·m ² | 3,2948e-002 kg·m ² |



| Statistics | | | |
|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Nodes | 744 | 319 | 895 |
| Elements | 335 | 200 | 688 |
| Mesh Metric | Skewness | | |
| Min | 1,3057293693791E-10 | 5,53849576027059E-02 | 2,51620665143106E-02 |
| Max | 0,489505020345394 | 0,6666666666449066 | 0,39647373933598 |
| Average | 0,143145569031098 | 0,205540666311859 | 0,162726039862581 |
| Standard Deviation | 0,119186520112266 | 0,183406103938678 | 0,110568716706038 |



7.3.2 Resumen Protección estudiada (MEDIANANO)

| | | | |
|----------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Object Name | ESPALDERA PLANA_ok._con volumen | percutor_5kg_sin redondeo | yunque_ok |
| State | Meshed | | |
| Graphics Properties | | | |
| Visible | Yes | | |
| Transparency | 1 | | |
| Definition | | | |
| Suppressed | No | | |
| Stiffness Behavior | Flexible | | |
| Coordinate System | Default Coordinate System | | |
| Reference Temperature | By Environment | | |
| Reference Frame | Lagrangian | | |
| Material | | | |
| Assignment | PROTECTOR | STNL.STEEL | |
| Nonlinear Effects | No | | |
| Thermal Strain Effects | No | | |
| Bounding Box | | | |
| Length X | 4,e-003 m | 9,0801e-002 m | 0,19 m |
| Length Y | 0,3732 m | 0,16 m | 1,e-001 m |
| Length Z | 0,2281 m | 5,e-002 m | 0,1 m |
| Properties | | | |
| Volume | 2,9194e-004 m ³ | 6,3608e-004 m ³ | 1,3071e-003 m ³ |
| Mass | 0,40871 kg | 4,9996 kg | 10,274 kg |
| Centroid X | 0,3752 m | 0,32176 m | 0,46698 m |
| Centroid Y | 1,6407e-002 m | 4,7959e-002 m | 4,795e-002 m |
| Centroid Z | -5,6877e-003 m | -5,6873e-003 m | -5,6828e-003 m |
| Moment of Inertia Ip1 | 5,5304e-003 kg·m ² | 1,1589e-002 kg·m ² | 1,1621e-002 kg·m ² |
| Moment of Inertia Ip2 | 1,4081e-003 kg·m ² | 3,7922e-003 kg·m ² | 3,295e-002 kg·m ² |
| Moment of Inertia Ip3 | 4,1234e-003 kg·m ² | 1,353e-002 kg·m ² | 3,2948e-002 kg·m ² |
| Statistics | | | |
| Nodes | 794 | 396 | 1206 |
| Elements | 358 | 253 | 944 |



| Mesh Metric | Skewness | | |
|--------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Min | 1,3057293693791E-10 | 7,00655596624211E-03 | 3,33847060379549E-03 |
| Max | 0,481231136376078 | 0,666666666449076 | 0,405245227670489 |
| Average | 0,132545455066237 | 0,138037763431058 | 0,168635898446431 |
| Standard Deviation | 0,115453905676189 | 0,159704392854248 | 0,130389765238988 |



7.3.3 Resumen Protección estudiada (PEQUEÑO)

| | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Object Name | ESPALDERA PLANA_ok_con volumen | percutor_5kg_sin redondeo | yunque_ok |
| State | Meshed | | |
| Graphics Properties | | | |
| Visible | Yes | | |
| Transparency | 1 | | |
| Definition | | | |
| Suppressed | No | | |
| Stiffness Behavior | Flexible | | |
| Coordinate System | Default Coordinate System | | |
| Reference Temperature | By Environment | | |
| Reference Frame | Lagrangian | | |
| Material | | | |
| Assignment | PROTECTOR | STNL.STEEL | |
| Nonlinear Effects | Yes | | |
| Thermal Strain Effects | Yes | | |
| Bounding Box | | | |
| Length X | 4,e-003 m | 9,0801e-002 m | 0,19 m |
| Length Y | 0,33215 m | 0,16 m | 1,e-001 m |
| Length Z | 0,20301 m | 5,e-002 m | 0,1 m |
| Properties | | | |
| Volume | 2,3124e-004 m ³ | 6,3608e-004 m ³ | 1,3071e-003 m ³ |
| Mass | 0,32374 kg | 4,9996 kg | 10,274 kg |
| Centroid X | 0,3752 m | 0,32176 m | 0,46698 m |
| Centroid Y | 1,9876e-002 m | 4,7959e-002 m | 4,795e-002 m |
| Centroid Z | -5,6876e-003 m | -5,6868e-003 m | -5,6828e-003 m |
| Moment of Inertia Ip1 | 3,47e-003 kg·m ² | 1,1589e-002 kg·m ² | 1,1621e-002 kg·m ² |
| Moment of Inertia Ip2 | 8,8363e-004 kg·m ² | 3,7922e-003 kg·m ² | 3,295e-002 kg·m ² |
| Moment of Inertia Ip3 | 2,5873e-003 kg·m ² | 1,353e-002 kg·m ² | 3,2948e-002 kg·m ² |
| Statistics | | | |
| Nodes | 730 | 546 | 1275 |
| Elements | 329 | 360 | 1000 |



| Mesh Metric | Skewness | | |
|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Min | 1,3057293693791E-10 | 2,23341235570174E-03 | 3,3384706040881E-03 |
| Max | 0,465741343810527 | 0,666666666449071 | 0,405245227670489 |
| Average | 0,136832365905301 | 0,165047568400737 | 0,168951317338644 |
| Standard Deviation | 0,111588797841616 | 0,167123216366582 | 0,131531578166721 |

7.4 Manual de uso ANSYS® WORKBENCH™ (Explicit Dynamics)

7.4.1 Módulos

7.4.1.1 Introducción

A continuación vamos a intentar explicar de forma sencilla los pasos a realizar a la hora de introducir los datos mínimos para poder ejecutar un caso de estudio y cálculo con el programa comercial ANSYS WORKBENCH R16.2®.

Indicar además que en posteriores apartados se explica los datos introducidos así como conceptos de cálculo mínimos necesarios para realizar al menos un cálculo en todas sus etapas.

Comenzaremos con la pantalla inicial del programa.

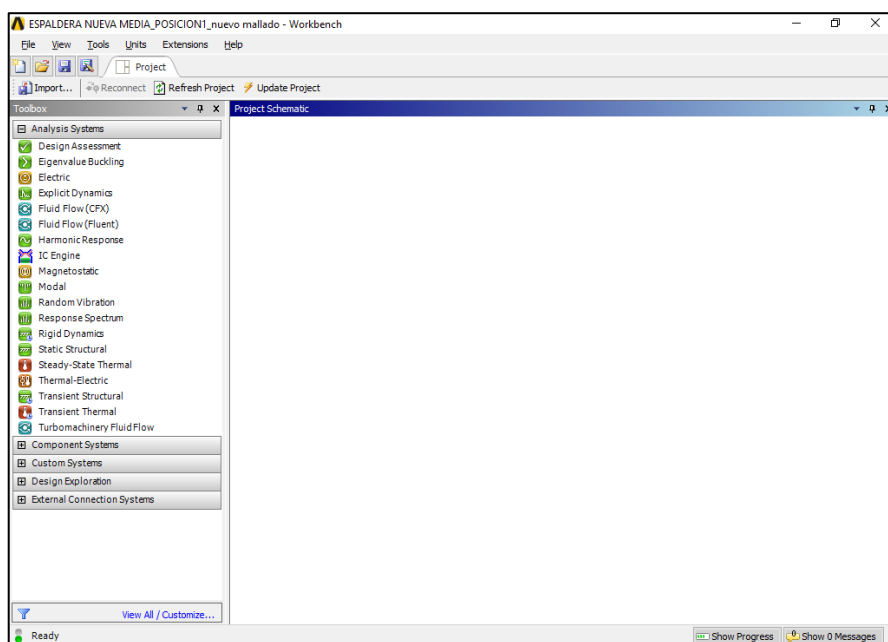


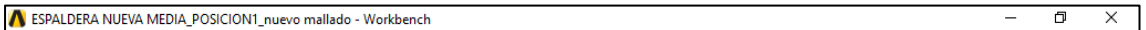
Imagen 54 Pantalla inicial ANSYS WORKBENCH R16.2®



Aquí podemos ver que al estar bajo entorno WINDOWS se hace familiar e intuitivo de utilizar.

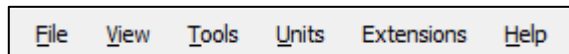
Como cualquier programa bajo este sistema operativo vemos que posee varias zonas separadas pero conectadas de fácil acceso, como son:

→ Barra de título



Donde se encuentra información relacionada con el archivo del proyecto con el que estamos trabajando actualmente, información sobre la plataforma o módulo sobre el que estamos trabajando así como los botones de control de la ventana como minimizar, maximizar y cerrar.

→ Barra de menús



Esta barra contiene acceso a los comandos necesarios del programa. Como todos estos tipos de programas, aunque cada uno con sus menús personalizados, tiene los siguientes:

- Archivo
- Vista
- Herramientas
- Unidades
- Extensiones
- Ayuda

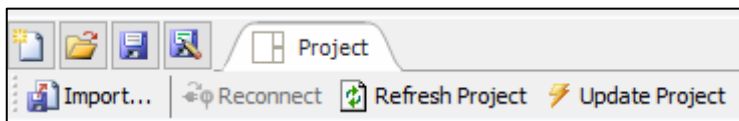
Cada uno de ellos es importante dedicar tiempo en configurar desde el inicio todas las configuraciones mínimas necesarias para que todo funcione



correctamente, como por ejemplo en el menú unidades es interesante seleccionar desde el principio las unidades con las que se va a trabajar.

No es objeto del presente trabajo explicar cada uno de los menú, submenús y comandos del presente programa informático. Dejo en manos del lector su curiosidad por investigar, siendo muy útil el menú ayuda en su submenú “ANSYS WORKBENCH Help”.

→ Barra de herramientas



Aquí tenemos acceso directo a distintos comandos a acciones de forma rápida y cómoda, como por ejemplo guardar, abrir,... Además en esta versión se han añadido pestañas de trabajo para tener abiertos varios proyectos como es tendencia en programas informáticos de estas características así como programas de diseño,...

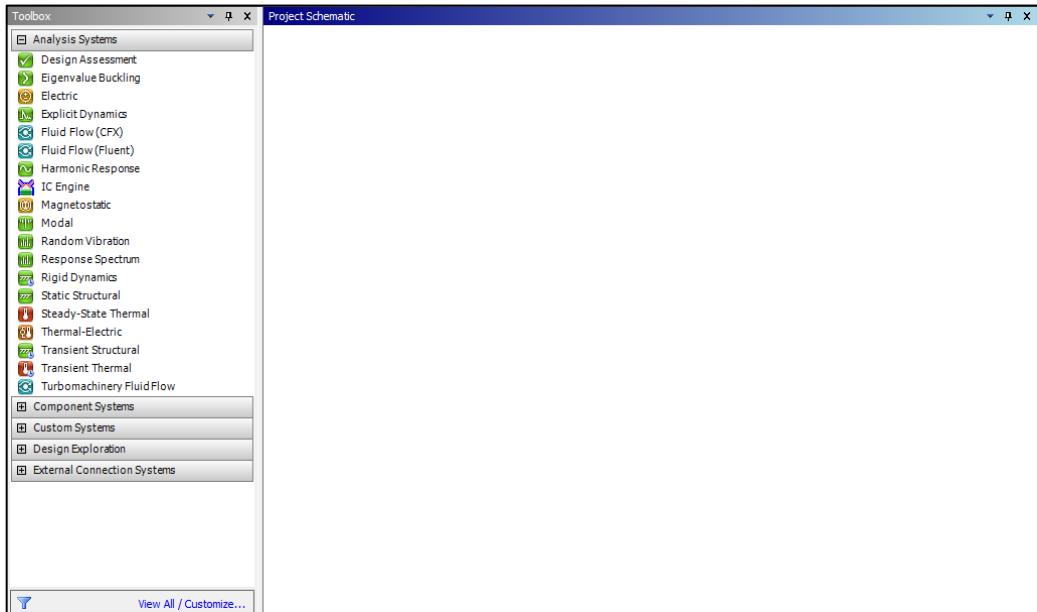
→ Barra de estado



Esta barra se encuentra en muchos programas y entendemos que es de mucha utilidad, ya que presenta información del estado del programa, como si está abriendo otro módulo, o si es necesaria introducir cierta información,...

Además indica y tiene algún botón de acceso rápido a distinta información, como progreso de una acción, mensajes de información o errores,...

→ Área de trabajo

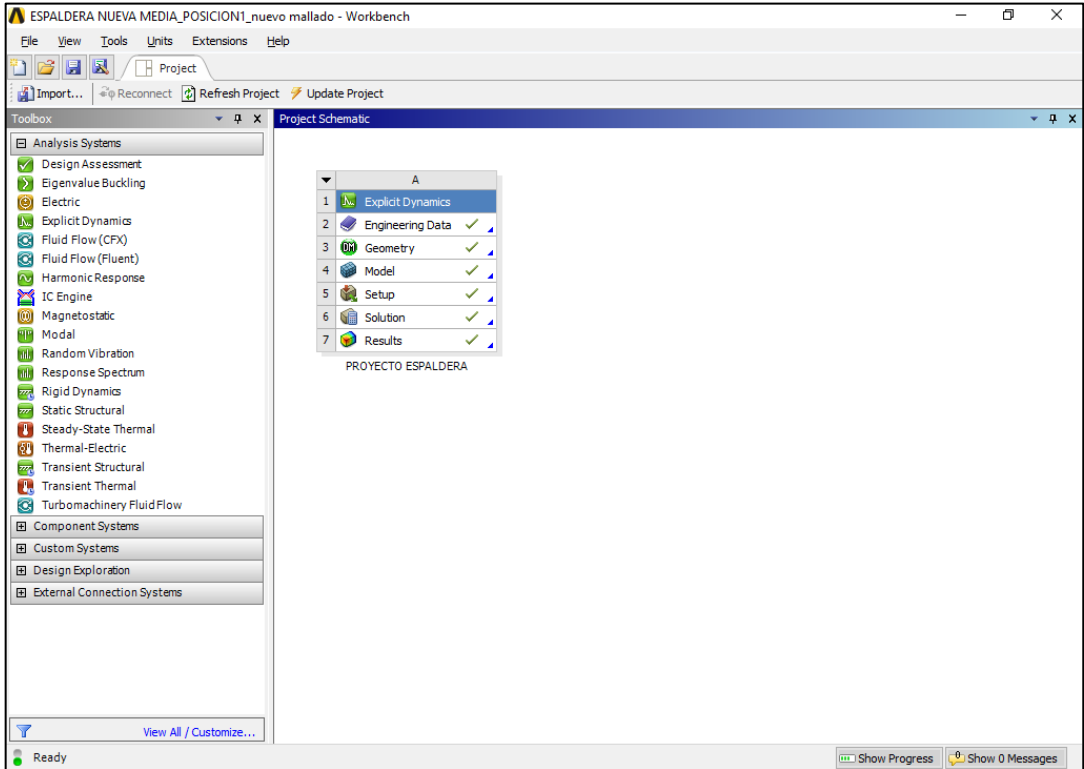


En este programa en concreto, como se ha indicado anteriormente funciona con menús flotantes que se pueden anclar, siendo habitual que comience con dos ventanas:

- Toolbox
- Project Schematic

La primera es donde se encuentran todas las opciones de proyectos que se pueden manejar, que es tan fácil como seleccionar la que necesitamos y arrastramos a la ventana “Project Schematic” o haciendo doble clic.

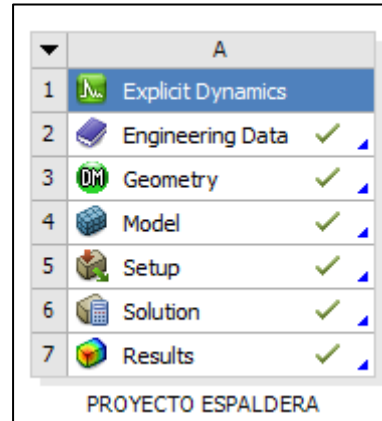
Nuestro proyecto con todos los pasos realizados y calculado quedaría como muestra la siguiente imagen



Como vemos cuando habilitamos el módulo que nos interesa, como en nuestro caso “Explicit Dynamics”, se nos presenta una tabla en la que nos informa de los pasos mínimos necesarios que debemos hacer para realizar un proyecto completo. En la literatura accesible que existe se puede observar que esto se puede complicar, hacer relaciones como se de BBDD se tratase para pasar información ya introducida en un módulo a otro proyecto que se empieza,...

Los pasos mínimos necesarios en nuestro caso (aunque en el resto de módulos son muy parecidos) serían los siguientes, como se puede ver en la figura siguiente

- Explicit Dynamics
- Engineering Data
- Geometry
- Model
- Setup
- Solution
- Results



Indicar en este punto que los triángulos dan información rápida y los ticks verdes indican que ese paso está completo y resuelto. Puede aparecer en varios estados:

- Tick verde: Completo y resuelto
- Interrogante: Falta información
- Flechas verdes: Es necesario refrescar y actualizar el proyecto
- Rayo dorado: Es necesario actualizar el proyecto
- Círculo rojo con aspa blanca: Errores que deben ser subsanados

A partir de aquí, para nuestro caso y estudio, solo nos hacen falta dos programas más que comprenden dos partes bien diferenciadas del proyecto, aunque la tabla de nuestro proyecto nos indica que son 7.

→ Design Modeler: módulo o programa que nos sirve para introducir o hacer nuestra geometría a estudiar. Recomendamos realizar la geometría en un



programa externo de diseño 3D como SolirWorks, Inventor,... al ser estos más potentes para realizar las geometrías. Nosotros vamos a explicar, suponiendo que ya tenemos las geometrías hechas con otro programa y guardadas en archivo independiente.

→ ANSYS® Mechanical™: con este módulo o programa podemos tener acceso a todos los demás módulos o pasos, como “Model”, “Setup”, “Solution” y “Results”. Una vez en este módulo asignamos material, sistema de coordenadas y mallamos las piezas. Posteriormente se asignan las condiciones de contorno, como iniciales y asignamos los casos que tenemos que estudiar para poder obtener resultados.

Ahora vamos a comenzar a explicar cada paso para introducir información.

7.4.1.2 Engineering Data

Comenzamos con el módulo “Engineering Data”. Ciclamos dos veces y se nos habilita una nueva pestaña y se abren ciertas ventanas nuevas para poder asignar materiales a nuestro proyecto y tenerlos accesibles en el módulo correspondiente, siendo este el módulo “Model”.

La imagen siguiente nos muestra una vista con los materiales escogidos para el presente estudio:

- PROTECTOR: material en el que se han introducido manualmente sus propiedades
- STNL.STEEL: este es un material escogido de la propia biblioteca de la que dispone ANSYS®.

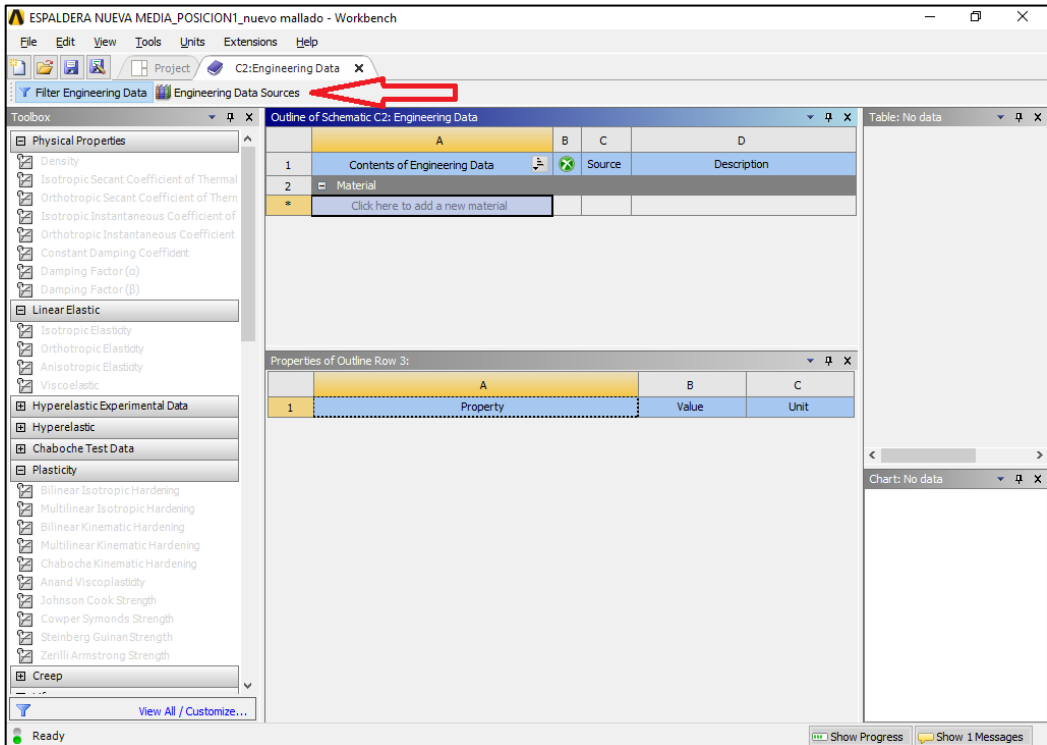


The screenshot shows the ANSYS Workbench Engineering Data interface. The 'Outline of Schematic A2: Engineering Data' pane displays a table of materials. Row 3 is selected, showing 'mi_material' with a source of 'D:\W...'. Row 4 shows 'STNL.STEEL' with a source of 'AFATL-TR-84-59, June 1984, Matuska D.A. HULL Users Manual'. The 'Properties of Outline Row 3: mi_material' pane shows a table of material properties:

| Property | Value | Unit |
|----------------------|--------------|--------------------|
| Density | 1,4 | g cm ⁻³ |
| Isotropic Elasticity | | |
| Derive from | Shear Mod... | |
| Young's Modulus | 45900 | MPa |
| Poisson's Ratio | 0,47588 | |
| Bulk Modulus | 3,172E+11 | Pa |
| Shear Modulus | 1,555E+10 | Pa |
| Field Variables | | |
| Temperature | Yes | |
| Shear Angle | No | |
| Degradation Factor | No | |

The 'Table of Properties R1' pane shows a table with columns A and B. Row 1 is 'Temperature (C)' and row 2 is 'Density'. The 'Chart of Properties R1' pane shows a graph of Density (kg m⁻³) vs Temperature (C). The density is constant at 1.4 kg m⁻³ across the temperature range from -1 to 1 C.

Para seleccionar un material se debe abrir la biblioteca seleccionando el botón “Engineering Data Source”



A lo que accedemos a una nueva composición de ventanas, siendo:

- “Engineering Data Source”: donde se encuentran los grupos de materiales
- “Outline of Favorites”: donde se encuentran los materiales de cada grupo
- “Properties of Outline”: las propiedades de cada uno de los materiales de la biblioteca

Además puede haber otras ventanas que muestran información de las propiedades de cada material, como “Table of Properties” o “Chart of Properties”.



Para seleccionar un material de la biblioteca debemos seleccionar el grupo que necesitamos, por ejemplo “Explicit Materials”

The screenshot shows the ANSYS Workbench Engineering Data Sources window. The 'Explicit Materials' group is selected. The 'Outline of Explicit Materials' table shows the following data:

| A | B | C | D | E |
|-----|--------------------------------|-----|--------|--|
| 1 | Contents of Explicit Materials | Add | Source | Description |
| 170 | STNL.STEEL | | Exp | AFATL-TR-84-59, June 1984, Matuska D. A. HULL Users Manual |
| 171 | STRONTIUM | | Exp | LA-4167-MS, May 1 1969, Selected Hugoniot |
| 172 | STRONTIUM | | Exp | LA-4167-MS, May 1 1969, Selected |

The 'Properties of Outline Row 170: STNL.STEEL' table shows the following data:

| A | B | C |
|---|---------------------------------|--------------|
| 1 | Property | Value Unit |
| 2 | Density | 7860 kg m^-3 |
| 3 | Multilinear Isotropic Hardening | Tabular |
| 4 | Scale | 1 |
| 5 | Offset | 0 Pa |

The 'Chart of Properties' shows Density (kg m^-3) vs Temperature (C). The density is constant at 7860 kg m^-3 for temperatures between 15 and 35 C.

Con lo que la ventana “Outline of Explicit Materials” se ha completado con todos los materiales que posee. Si hubiésemos escogidos cualquier otro grupo, como “General Non-linear Materials” la ventana sería la misma pero con sus materiales y se llamaría “Outline of General Non-linear Materials”.

Entonces ahora seleccionamos el material que necesitamos, en nuestro caso “STNL.STEEL”, con lo que la ventana “Properties of Outline” nos muestra las propiedades de este material y como es de la biblioteca sólo nos queda añadirlo a nuestro proyecto, clicando en el más dorado que tiene a la derecha.



| A | B | C | D |
|---|------------------------------|----------|--|
| 1 | Data Source | Location | Description |
| 2 | Favorites | | Quick access list and default items |
| 3 | General Materials | | General use material samples for use in various analyses. |
| 4 | General Non-linear Materials | | General use material samples for use in non-linear analyses. |
| 5 | Explicit Materials | | Material samples for use in an explicit analysis. |
| 6 | Hyperelastic Materials | | Material stress-strain data samples for curve fitting. |
| 7 | Magnetic B-H Curves | | B-H Curve samples specific for use in a magnetic analysis. |
| 8 | Thermal Materials | | Material samples specific for use in a thermal analysis. |

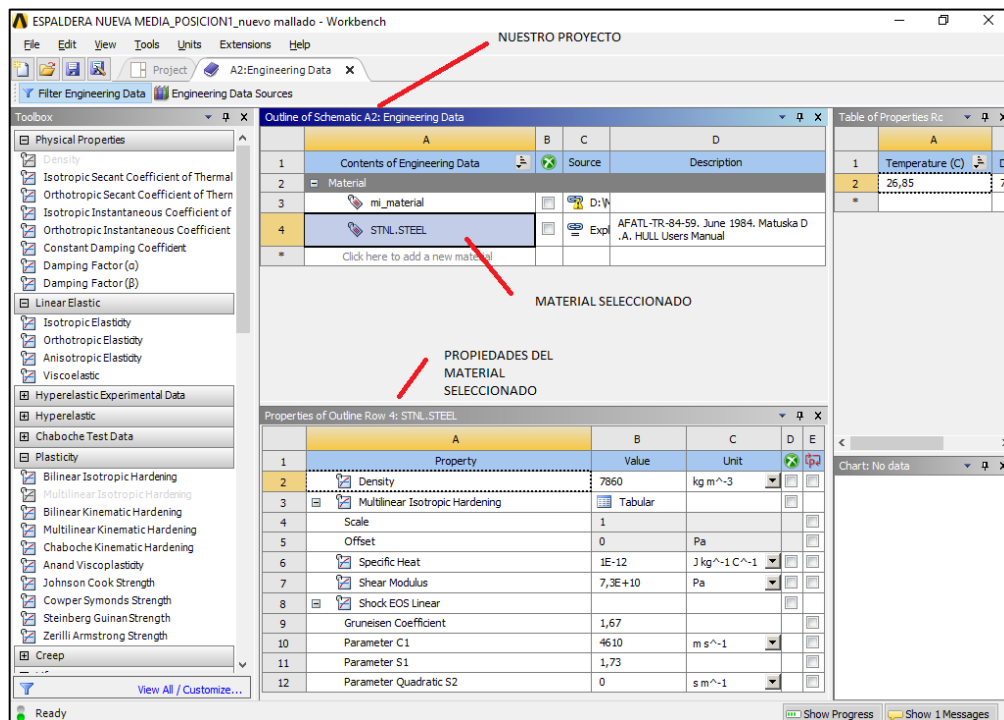
| A | B | C | D | E |
|-----|--------------------------------|-----|--------|---|
| 1 | Contents of Explicit Materials | Add | Source | Description |
| 170 | STNL STEEL | | Exp | AP 4167-MS, May 1 1969, Selected Hugoniot |
| 171 | STRONTIUM | | Exp | LA-4167-MS, May 1 1969, Selected Hugoniot |

| A | B | C |
|---|---------------------------------|---------|
| 1 | Property | Value |
| 2 | Density | 7860 |
| 3 | Multilinear Isotropic Hardening | Tabular |
| 4 | Scale | 1 |
| 5 | Offset | 0 |

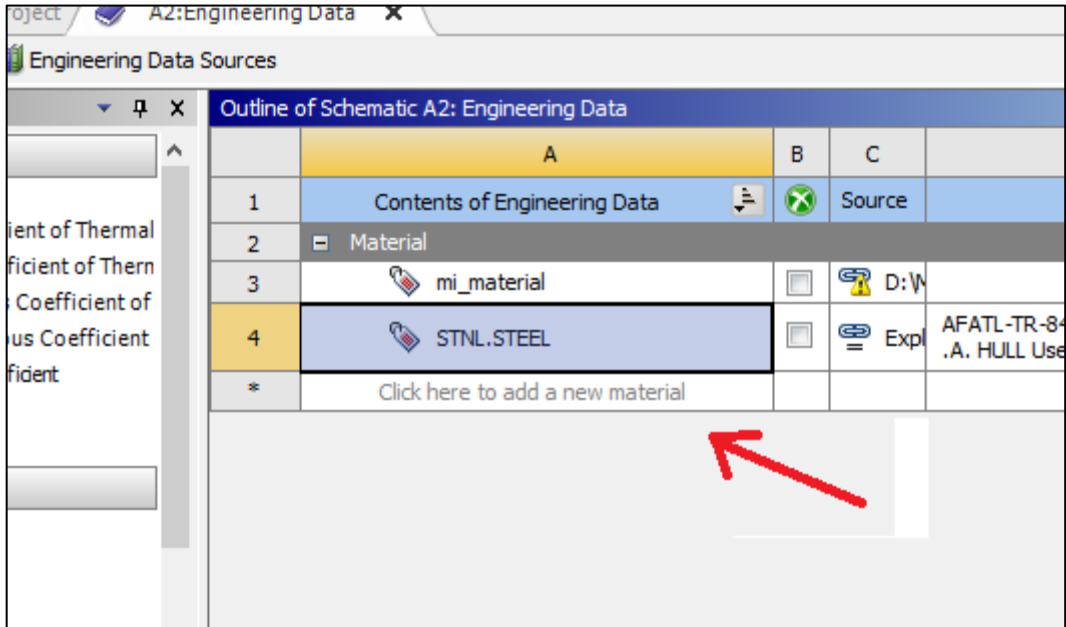
| A | | |
|---|-----------------|----|
| 1 | Temperature (C) | De |
| 2 | 25,85 | 78 |

| A | | |
|---|-------------------|-----|
| 1 | Density [kg m^-3] | 1.1 |
| 2 | Temperature [C] | 15 |

Ahora si deseccionamos el botón “Engineering Data Source” volvemos, dentro de la pestaña todavía de selección de materiales, a nuestros materiales de nuestro proyecto, además de presentarnos propiedades de este material seleccionado.



Para crear un material desde cero el procedimiento varía algo, pero en esencia es lo mismo. Se debe clicar en la sección que indica “Click here to add a new material”



Entonces se nos habilita este espacio y escribimos el nombre de nuestro material. Nosotros hemos llamado en nuestro estudio este material como “PROTECTOR”. Seleccionamos nuestro material para que se nos habilite la ventana “Properties of Outline”. En principio estará vacía, por lo que debemos seleccionar en la ventana Toolbox las propiedades que necesitamos y hacemos doble click o las arrastramos hasta la ventana “Properties of Outline” de nuestro material.

Una vez tenemos nuestras propiedades, introducimos los datos de nuestro material. En la imagen siguiente tenemos nuestros materiales ya listos para poder asignar a nuestras piezas. Además se pueden observar las propiedades de nuestro material.



ESPALDERA NUEVA MEDIA_POSICION1_nuevo mallado - Workbench

File Edit View Tools Units Extensions Help

Project A2:Engineering Data

Filter Engineering Data Engineering Data Sources

Toolbox

- Physical Properties
 - Density
 - Isotropic Secant Coefficient of Thermal
 - Orthotropic Secant Coefficient of Thern
 - Isotropic Instantaneous Coefficient of
 - Orthotropic Instantaneous Coefficient
 - Constant Damping Coefficient
 - Damping Factor (α)
 - Damping Factor (β)
 - Linear Elastic
 - Isotropic Elasticity
 - Orthotropic Elasticity
 - Anisotropic Elasticity
 - Viscoelastic
 - Hyperelastic Experimental Data
 - Hyperelastic
 - Chaboche Test Data
 - Plasticity
 - Bilinear Isotropic Hardening
 - Multilinear Isotropic Hardening
 - Bilinear Kinematic Hardening
 - Multilinear Kinematic Hardening
 - Chaboche Kinematic Hardening
 - Anand Viscoplasticity
 - Johnson Cook Strength
 - Cowper Symonds Strength
 - Steinberg Guinan Strength
 - Zerilli Armstrong Strength
 - Creep

View All / Customize...

Ready Show Progress Show 1 Messages

| | A | B | C | D |
|---|----------------------------------|--------|-------------|---|
| 1 | Contents of Engineering Data | Source | Description | |
| 2 | Material | | | |
| 3 | mi_material | | | |
| 4 | STNL_STEEL | | | AFATL-TR-84-59, June 1984, Matuska D .A. HULL Users Manual |
| * | Click here to add a new material | | | |

| | A | B | C | D | E |
|----|----------------------|---------------------|--------------------|---|---|
| 1 | Property | Value | Unit | | |
| 2 | Density | 1,4 | g cm^{-3} | | |
| 3 | Isotropic Elasticity | | | | |
| 4 | Derive from | Shear Mod... | | | |
| 5 | Young's Modulus | 45900 | MPa | | |
| 6 | Poisson's Ratio | 0,47588 | | | |
| 7 | Bulk Modulus | $3,1722\text{E}+11$ | Pa | | |
| 8 | Shear Modulus | $1,555\text{E}+10$ | Pa | | |
| 9 | Field Variables | | | | |
| 10 | Temperature | Yes | | | |
| 11 | Shear Angle | No | | | |
| 12 | Degradation Factor | No | | | |

| | A | B | C | D |
|---|-----------------|---|---|---|
| 1 | Temperature (C) | | | |
| 2 | | | | |
| * | | | | |

Chart of Properties Rc

Density ($\cdot 10^3$) [kg m^{-3}]

Temperature [C]

Ahora ya podemos cerrar la pestaña "Engineering Data"

ESPALDERA NUEVA MEDIA_POSICION1_nuevo mallado - Workbench

File Edit View Tools Units Extensions Help

Project A2:Engineering Data

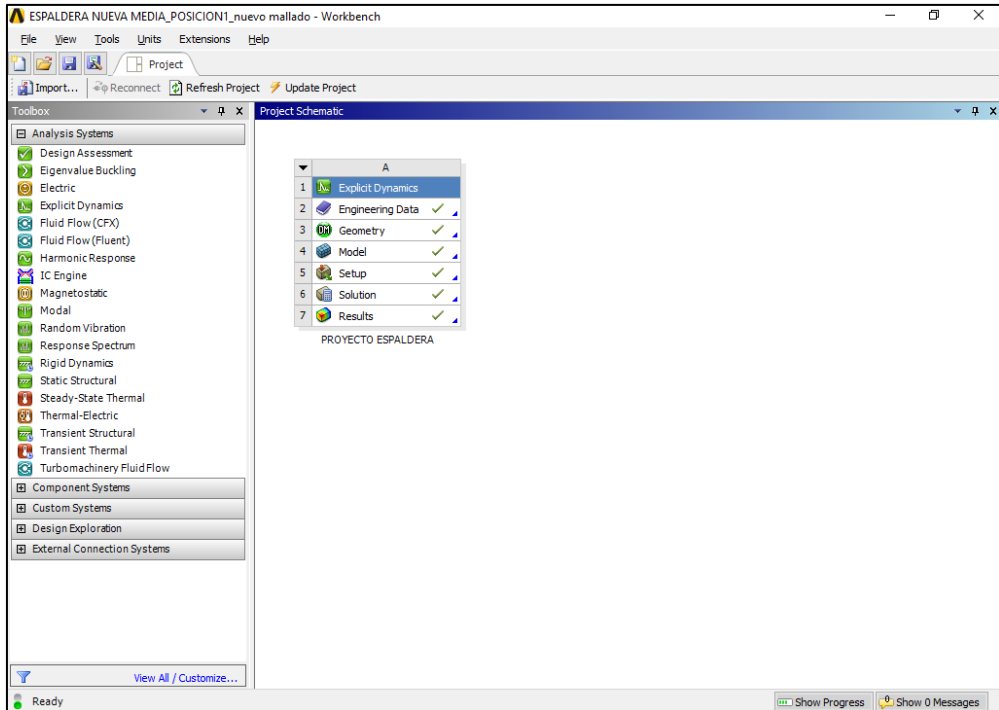
Filter Engineering Data Engineering Data Sources

Toolbox

- Physical Properties
 - Density
 - Isotropic Secant Coefficient of Thermal
 - Orthotropic Secant Coefficient of Thern
 - Isotropic Instantaneous Coefficient of
 - Orthotropic Instantaneous Coefficient
 - Constant Damping Coefficient
 - Damping Factor (α)
 - Damping Factor (β)
 - Linear Elastic
 - Isotropic Elasticity

| | A | B | C | D |
|---|----------------------------------|--------|-------------|---|
| 1 | Contents of Engineering Data | Source | Description | |
| 2 | Material | | | |
| 3 | mi_material | | | |
| 4 | STNL_STEEL | | | AFATL-TR-84-59, June 1984, Matuska D .A. HULL Users Manual |
| * | Click here to add a new material | | | |

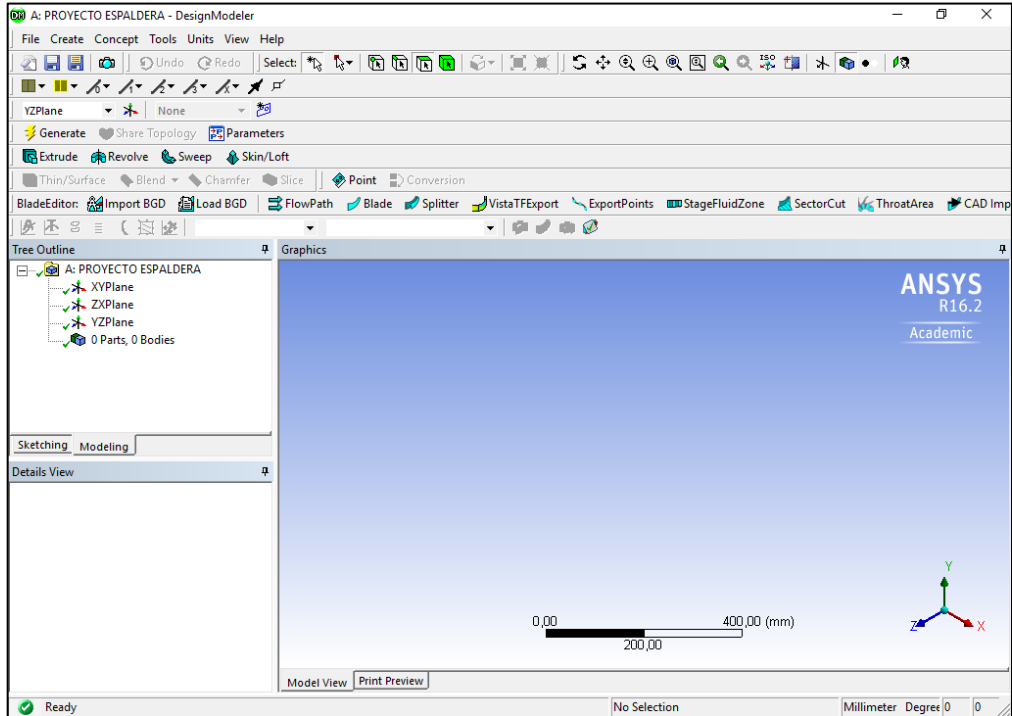
Y volver a nuestro proyecto.



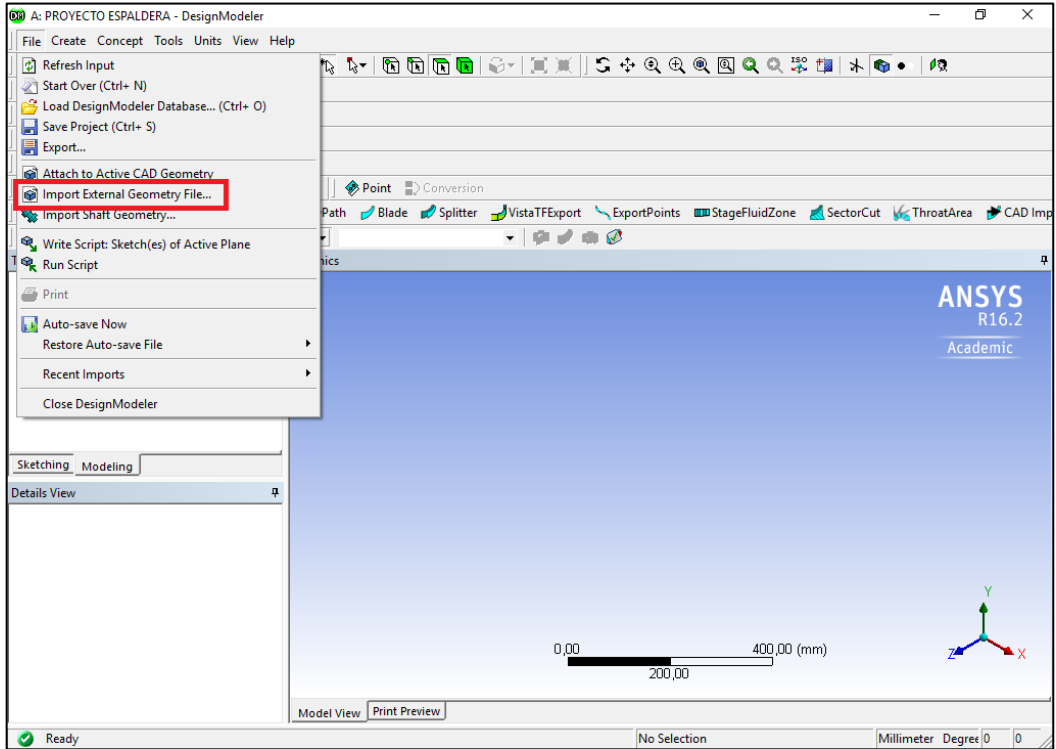
7.4.1.3 Geometry

Vamos a importar la geometría ya realizada. Recomendamos extensión parasolid *.x_t.

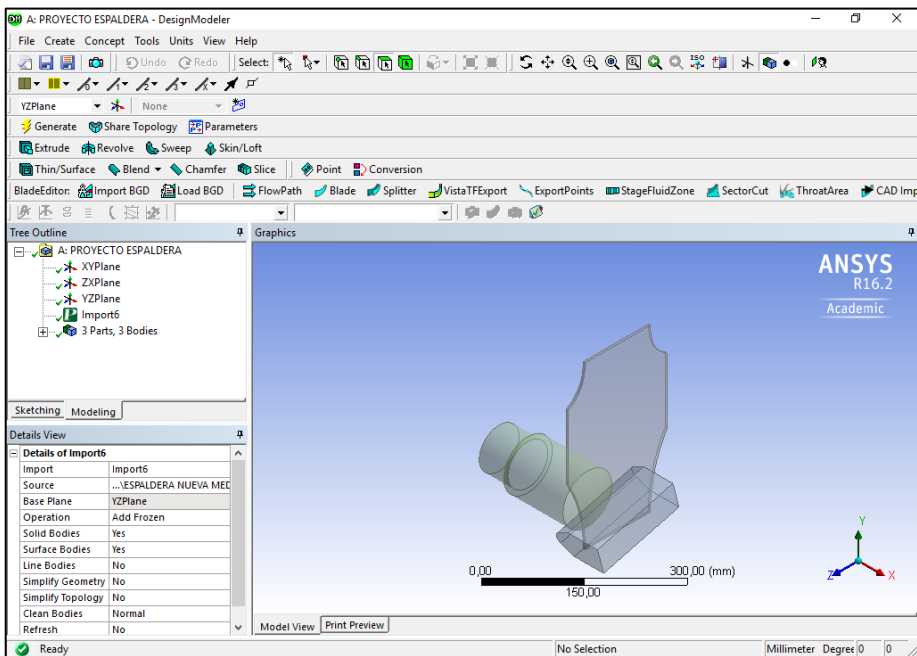
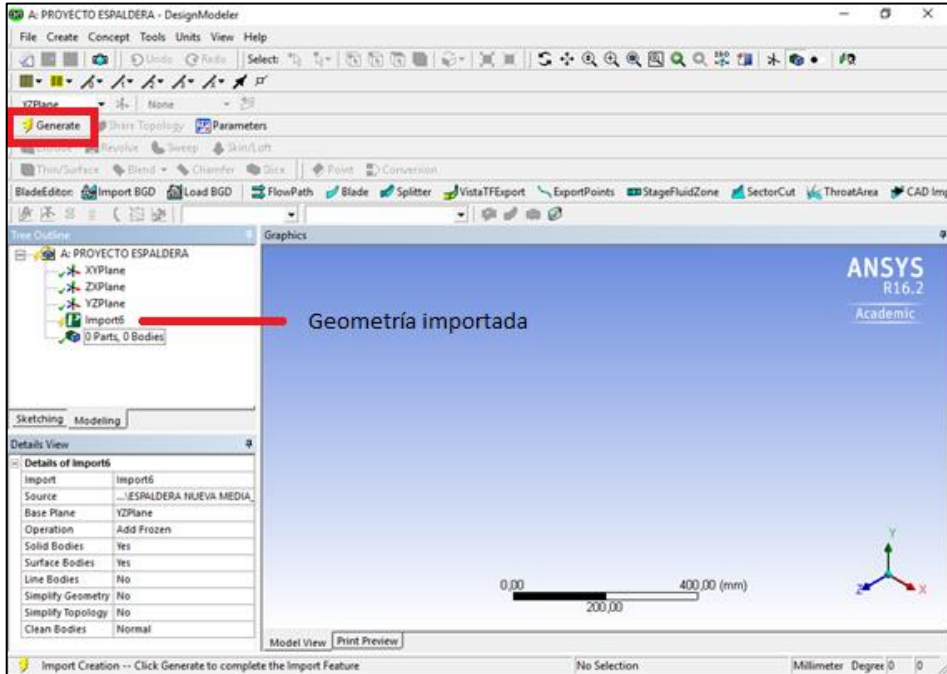
Para ello clicamos dos veces en la celda “Geometry” y se nos abre el programa “Design Modeler”



Aquí debemos ir al menú “File” y seleccionamos la opción “Import External Geometry File ...”



Y seleccionamos el archivo previamente guardado. Una vez seleccionado nos aparece un nuevo elemento en el árbol de la izquierda indicando que hemos importado un archivo, pero que necesita ser generado. Para ello clicamos sobre el botón “Generate”. Aparecerá nuestra geometría si todo se ha realizado paso a paso.





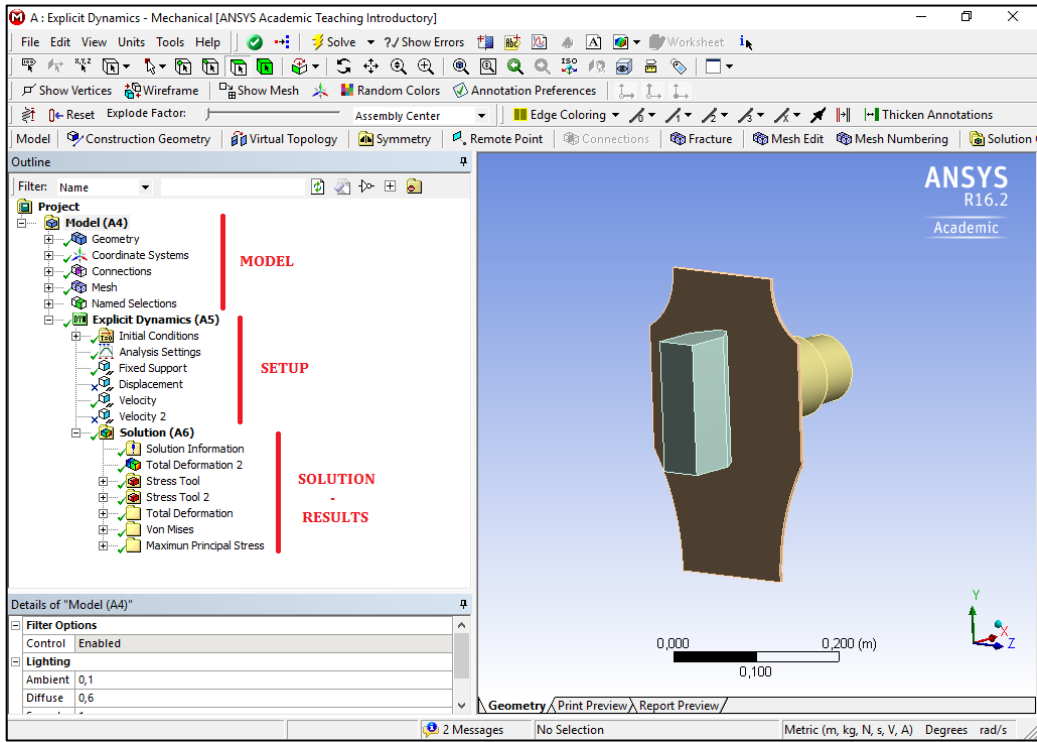
Vemos que en el árbol de la izquierda ha pasado de tener nuestra geometría importada un rayo (que indica que hay que refrescar) a tener un tick verde que indica que todo va bien.

Ya podemos cerrar este módulo, ya que, en principio no lo vamos a utilizar más. Aunque recomendamos no cerrar ningún módulo ya que al refrescar en cada paso se actualiza todo el proyecto y se puede trabajar con más fluidez al pasar de un módulo a otro cuando lo necesitemos.

7.4.1.4 Model-Setup-Solution-Results

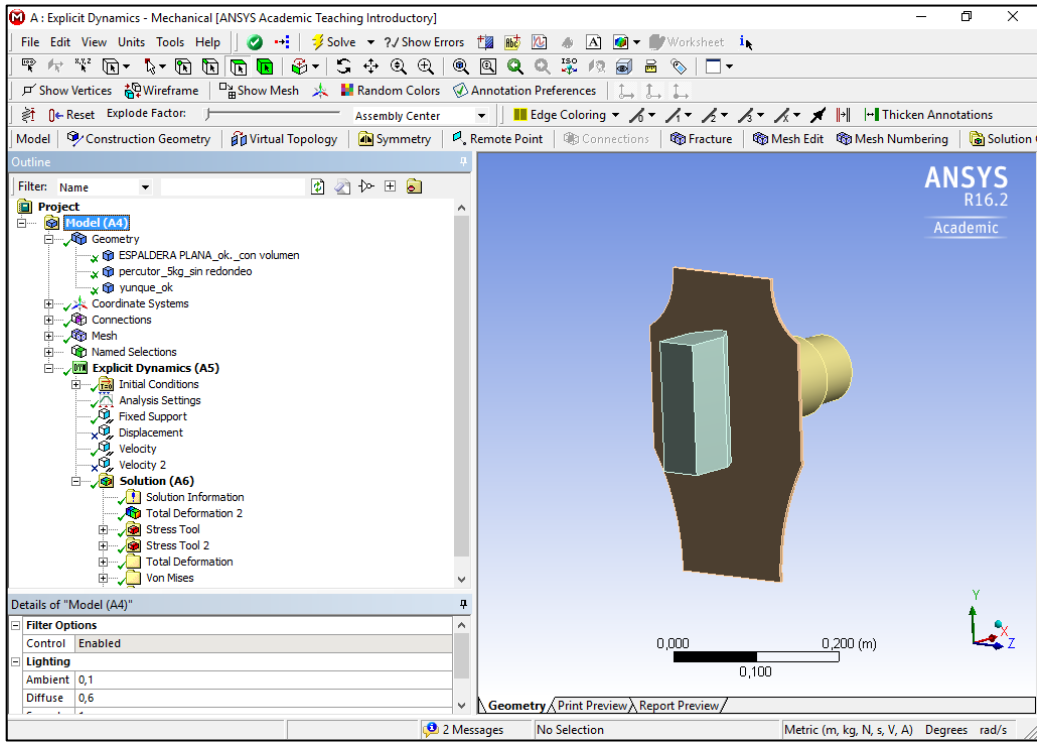
Ahora abrimos haciendo click en el paso “Model” y se nos abre el programa ANSYS® Mechanical™. Como podemos ver en la siguiente imagen y se explicó en apartados anteriores aquí tenemos acceso a todo el resto del proyecto.

Indicar, ya que creemos que es importante, cuando debemos introducir información, por ejemplo en “Model” – “Geometry” nos indica el programa en amarillo lo mínimo que necesita para poder trabajar. El resto de opciones son automáticas al considerar el programa unas condiciones de estudio ya “pre-programadas”, pero que pueden ser modificadas si es necesario.



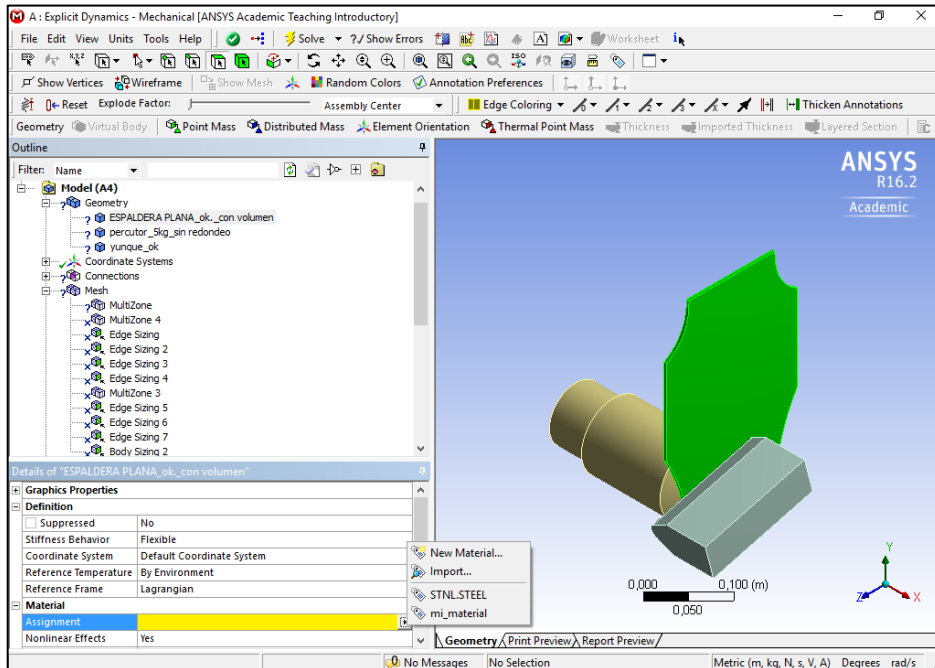
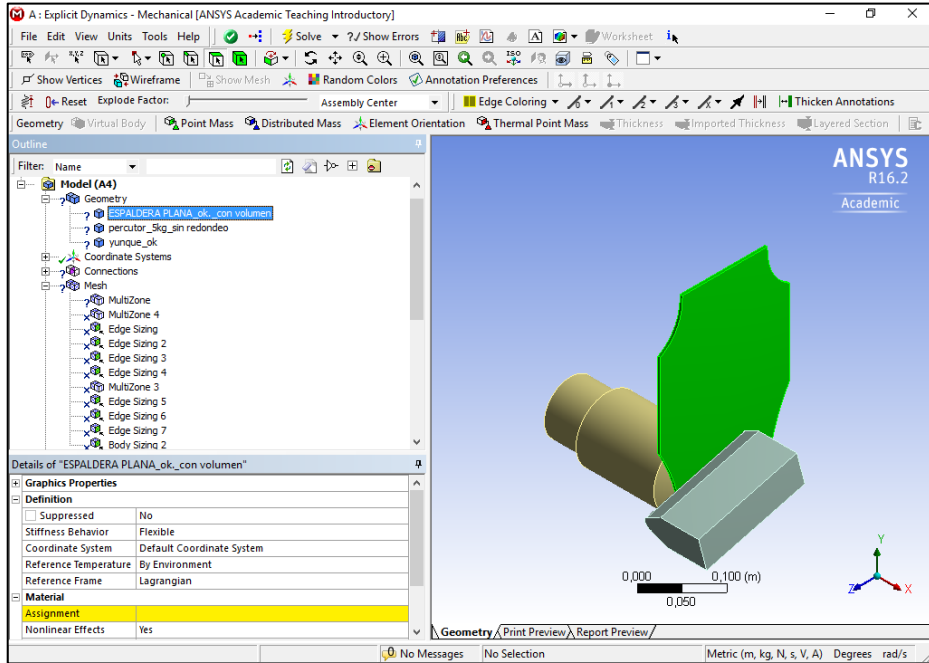
7.4.1.4.1 Model-Geometry

Lo mínimo será indicar el material y el mallado de las piezas del estudio. En apartados posteriores se indicarán las características de nuestro estudio.

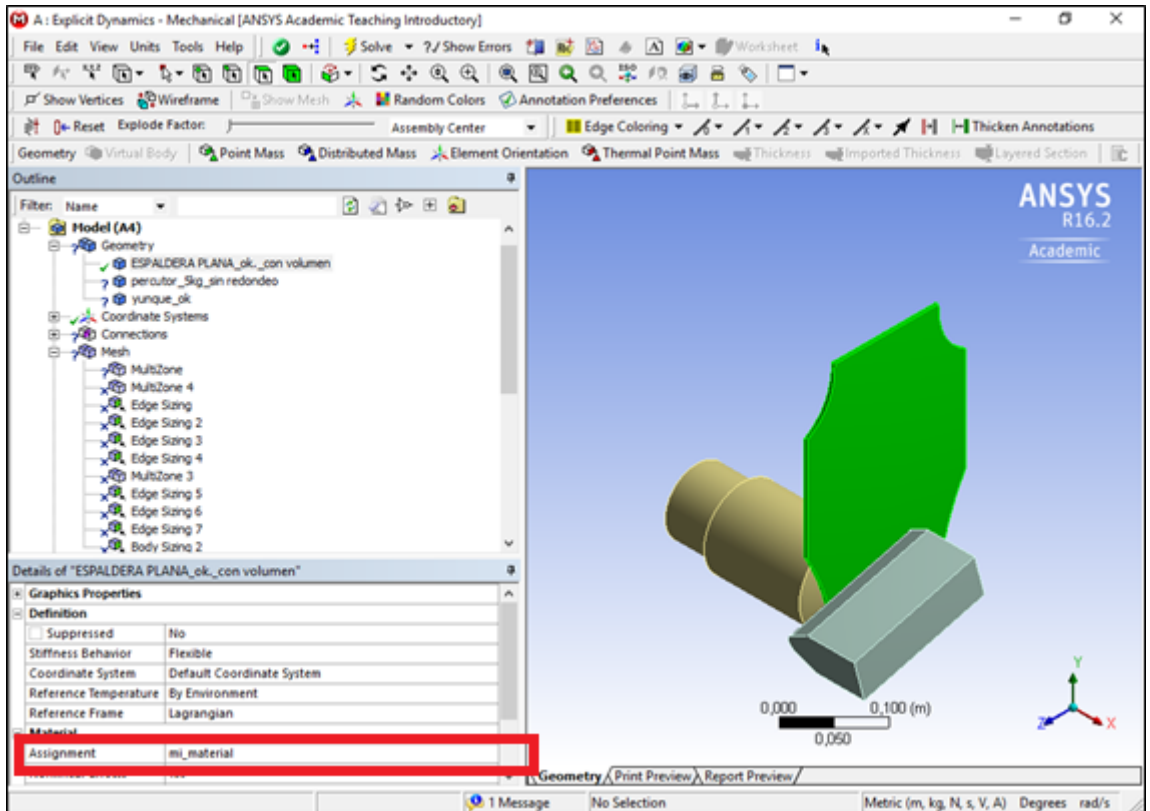


Como podemos ver en la imagen anterior en la sección geometría nos han aparecido los elementos o piezas a las que vamos a ejecutar cálculos. Debemos seleccionar cualquiera de ella, entonces se nos habilitará en la ventana “Details of “Model (A4)”” todas las características de nuestra pieza y será aquí donde deberemos asignarle material.

Como vemos en la imagen siguiente vemos que nos pide solamente que le asignemos material a nuestra pieza, que en este caso la resalta en verde. Seleccionamos y se nos habilita una lista desplegable donde aparecerán nuestros materiales que creamos con anterioridad.

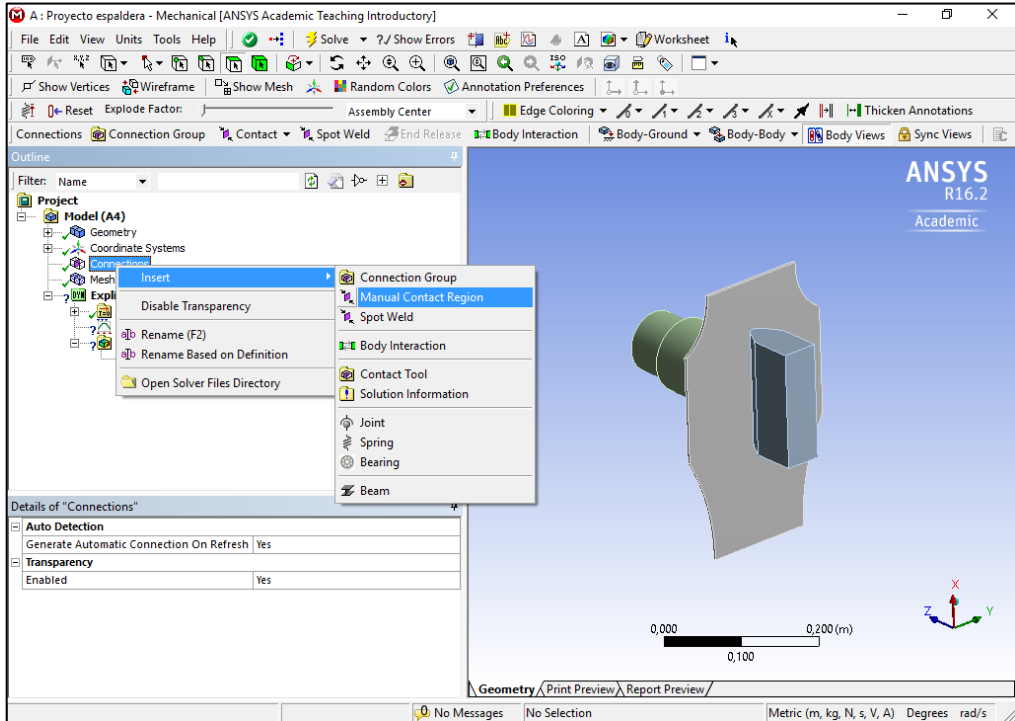


Seleccionamos nuestro material o el que se necesite y pasará a blanco, indicando que ya tiene lo mínimo de este paso.

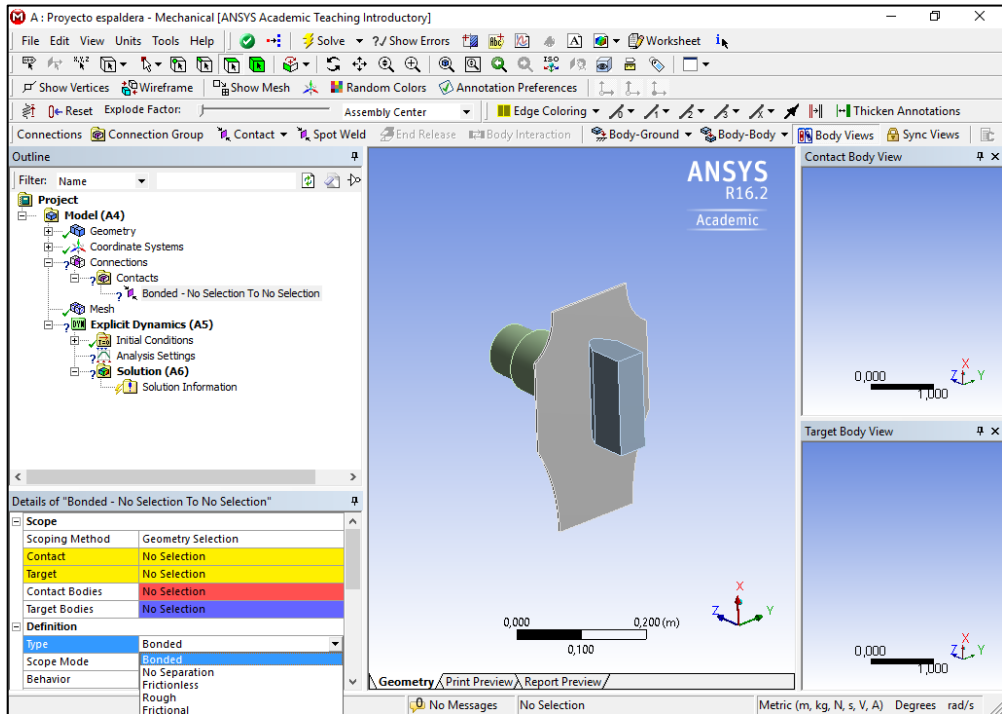


7.4.1.4.2 Model-Connections

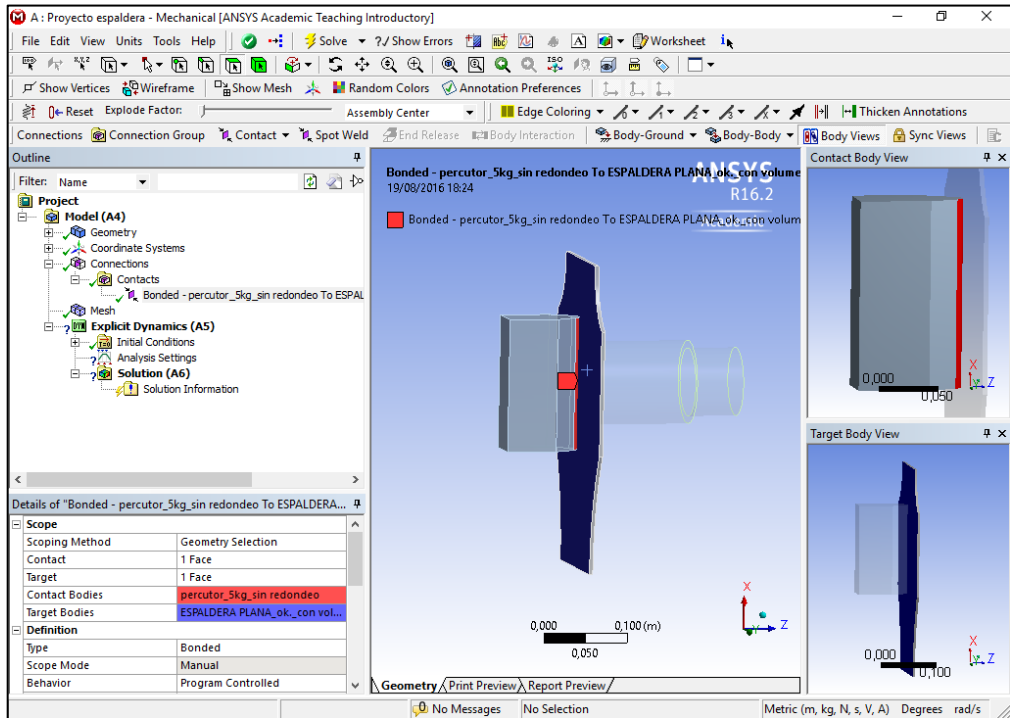
Para asignar las condiciones de contorno seleccionamos “Connections” y elegimos la opción “Manual Region Contact” según muestra la imagen siguiente. Esta es una forma manual de seleccionar que líneas, superficies o cuerpos están y entran en contacto y como se debe comportar dichos contactos. También es posible que automáticamente el programa informático selecciones los contactos, pero esta es una forma más controlada de realizarlo.



Una vez seleccionada esta opción debemos elegir que superficie realiza el contacto y que superficie recibe el contacto, esto se llama “Contact” y “Target”

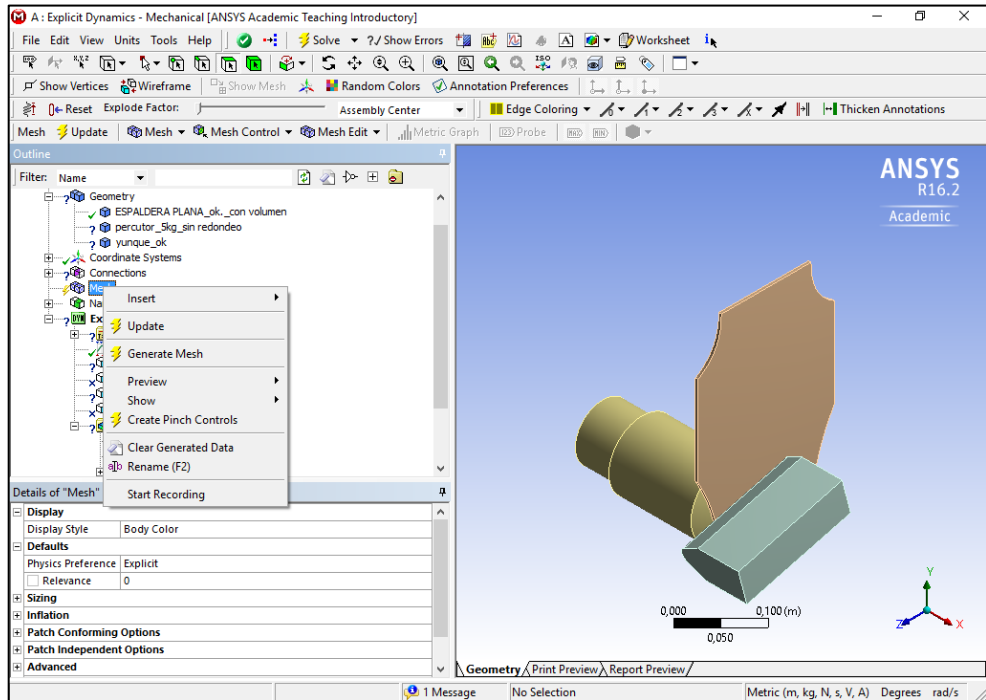


Ahora estamos en condiciones de seguir con la introducción de datos en el programa como vemos en la siguiente imagen. Se aprecia además que ya no tenemos ningún campo en amarillo, por lo que el programa tiene lo mínimo, pero comentar que podemos variar cualquier opción propuesta automáticamente.



7.4.1.4.3 Model-Mesh

A continuación vamos a crear la malla. Hacemos click con botón derecho en “Mesh” se selecciona la opción “Generate Mesh”.



Y automáticamente se nos genera una malla, que aun no siendo la mejor nos debe servir de referencia.

Dejamos la explicación más exhaustiva ya que no es propósito del presente trabajo entrar en opciones más en profundidad. Aunque en el apartado correspondiente se explican algunos conceptos interesantes sobre la calidad del mallado.

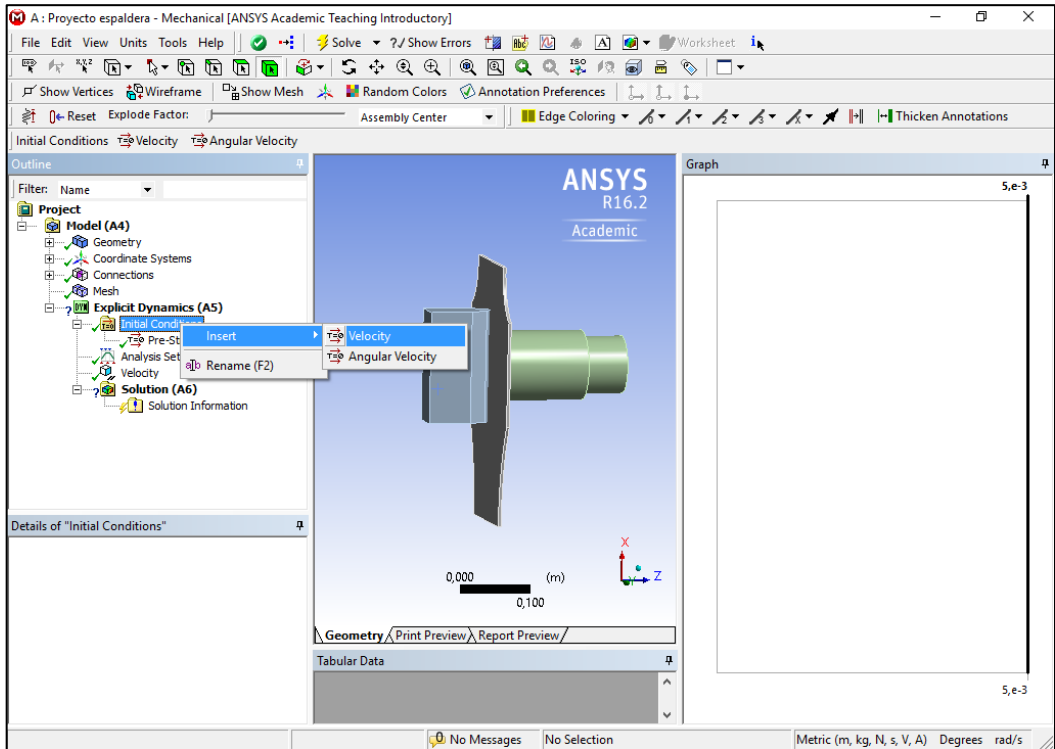
Ahora estamos en condiciones de empezar con el siguiente módulo.

7.4.1.4.4 Setup

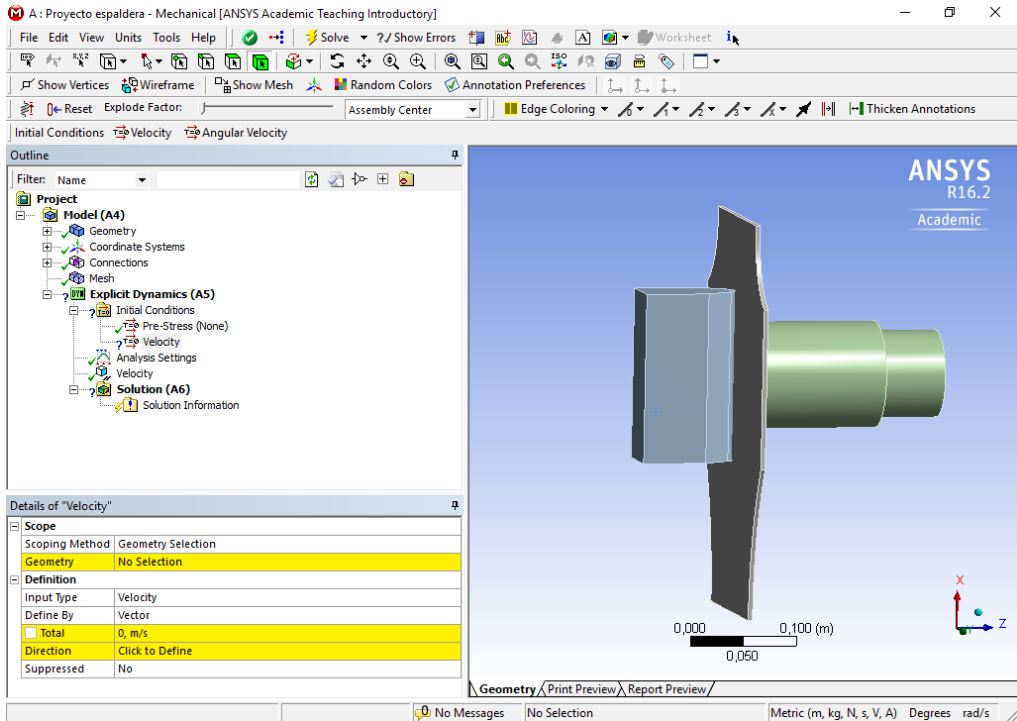
En este módulo introduciremos las condiciones de contorno, iniciales,...

Empezaremos indicando la velocidad inicial del percutor va a llevar a 1 mm del objetivo. En “Explicit Dynamics (A5)”, en la opción “Initial Conditions” y

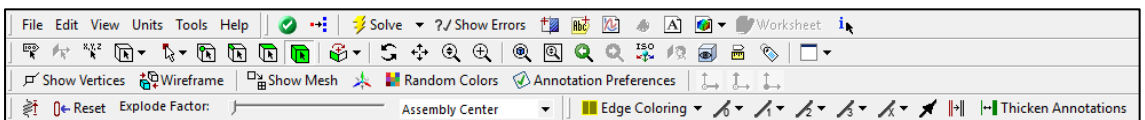
botón derecho seleccionamos “Velocity”, como mostramos en la siguiente imagen



Veremos que nos pide diversa información

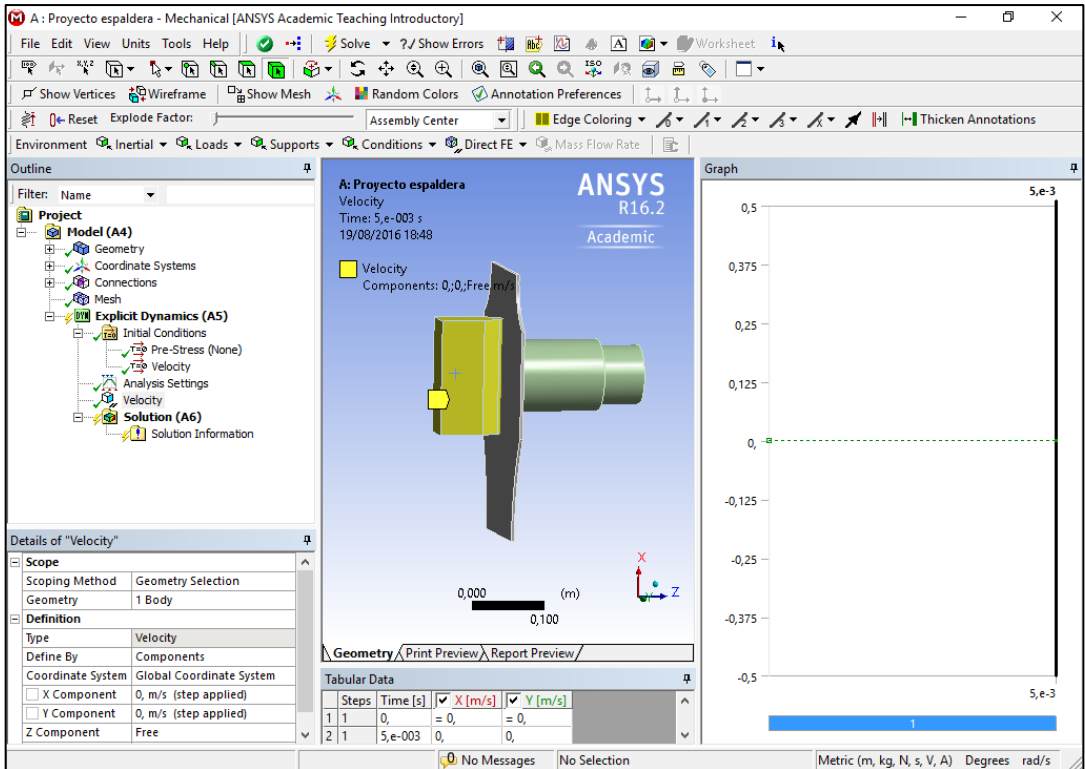


Como que geometría se le aplicará esta velocidad inicial. Indicar que en este programa “ANSYS® Mechanical™, como hemos comentado anteriormente y muchos programas tienen, la barra de herramientas es muy importante, ya que variará los botones en función de donde nos encontremos, aunque algunos son fijos, como los que nos interesa indicar ahora, que son los del tipo de selección que queremos:

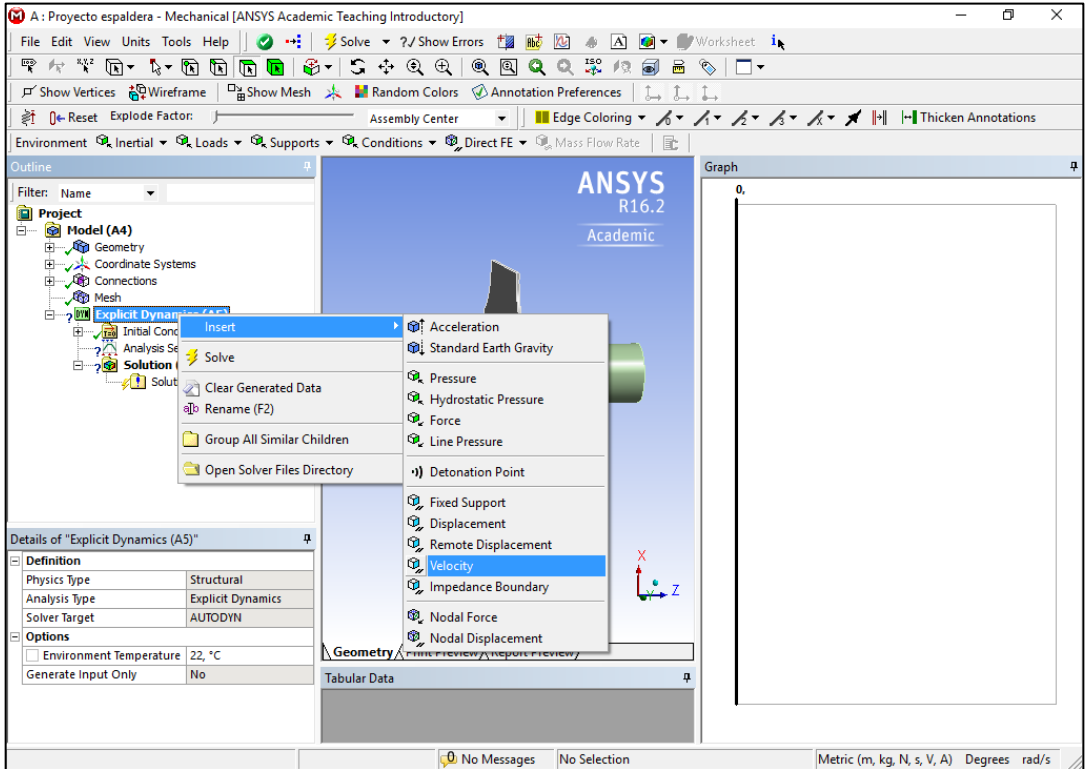


Con estos botones podremos seleccionar vértices, líneas o aristas, cara o planos y cuerpos. Esto es interesante ya que ahorra tiempo.

Con el botón Cuerpo (“Body”) seleccionamos, en nuestro caso, la pieza percutor e introducimos los datos que nos pide. Veremos en “Details of Velocity” que ya tenemos introducidos todos los datos.

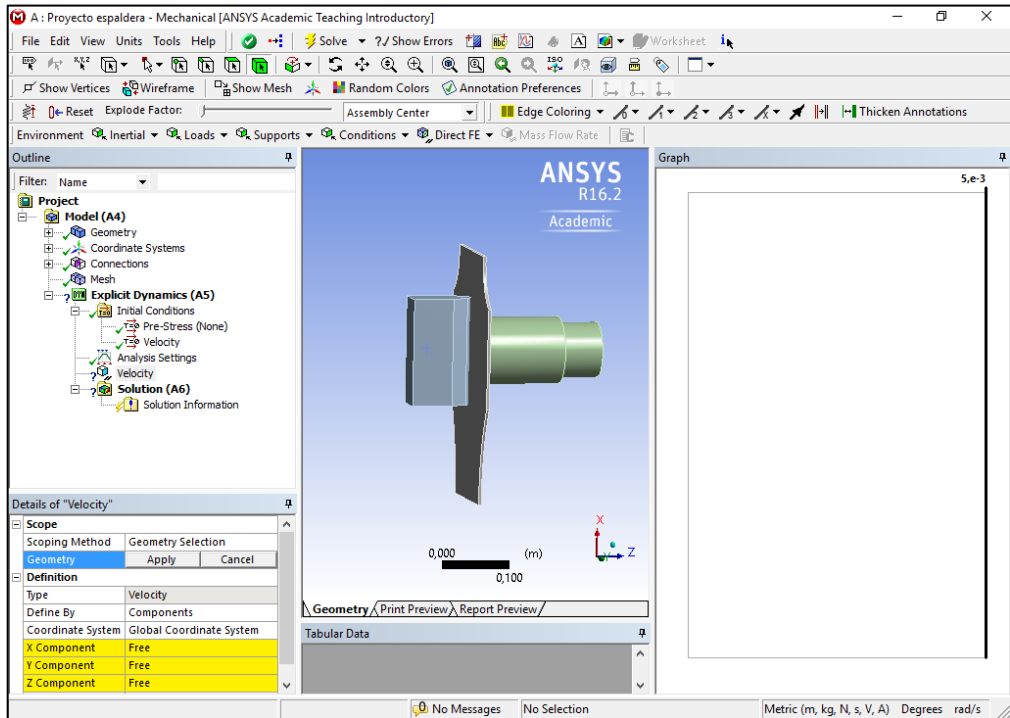


Para definir ahora qué condiciones deben tener las piezas durante todo el cálculo hay que añadir condiciones en “Explicit Dynamics (A5)”, como mostramos en la siguiente figura.

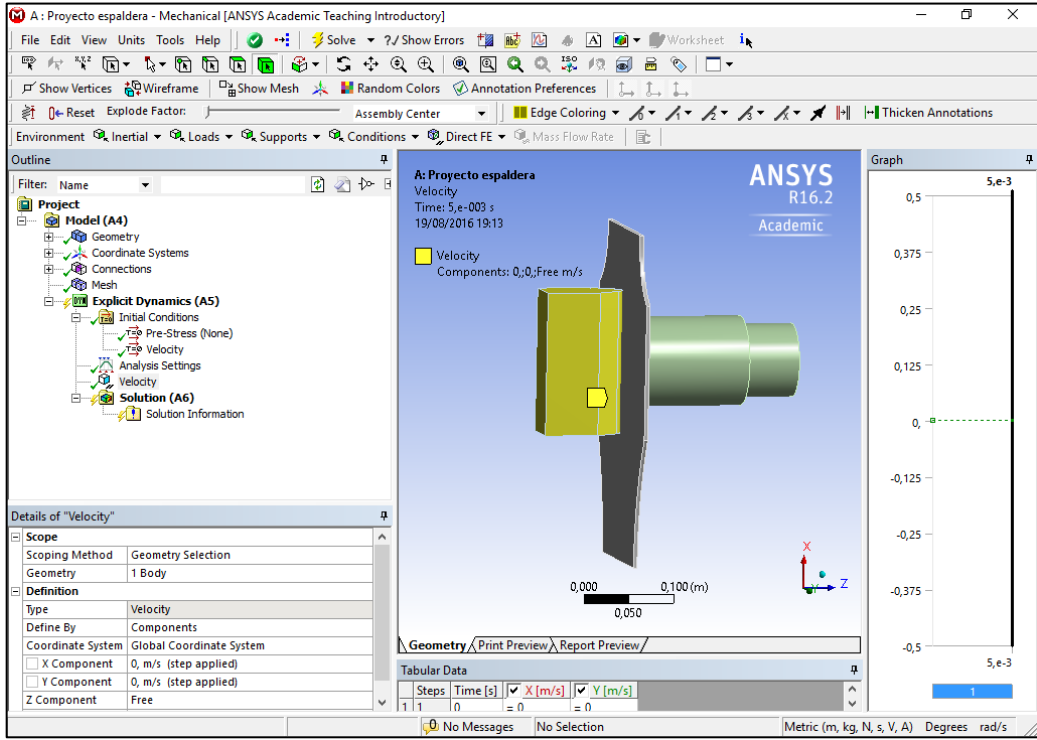


En nuestro caso vamos a frozar a que nuestra pieza “percutor” tenga movimiento sólo en el eje apropiado, ya que es una carga guiada, como mostramos en la figura anterior.

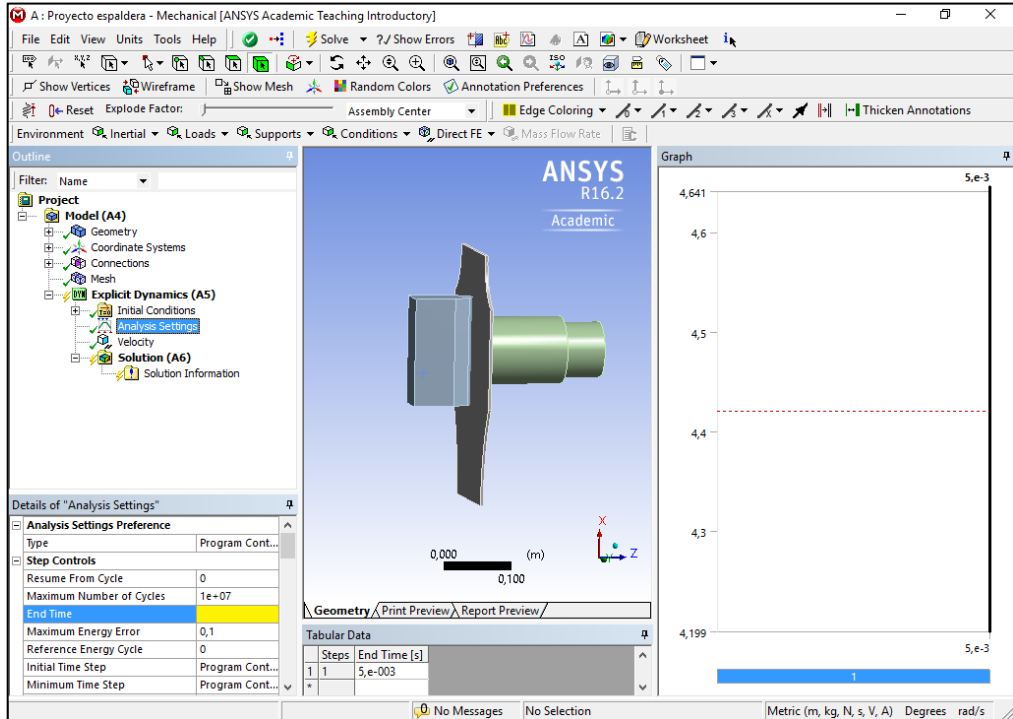
Aquí también tendremos que indicar a que cuerpo o cuerpos se le aplica esta condición y que ejes restringiremos su movimiento y cuál queda libre, como mostramos en la figura siguiente.



Aplicamos a la pieza “percutor” e indicamos que en Z tenga movimiento libre “Free” y el resto con movimiento 0.



Ahora se procede a ajustar las opciones de “Analysis Settings” y como vimos anteriormente sólo nos exige, como mínimo, la introducción del tiempo final “End Time”, que como vemos está en amarillo.



Introducimos el tiempo que vamos a necesitar y veremos en el árbol de la izquierda que el estado de “Analysis Settings” ha pasado a tener un tick verde. Como se ha comentado se pueden aplicar cambios a los que propone el programa pero hay que tener muy claro que cambiar y porqué. Generalmente lo que se propone suele ser bastante acertado.

Ahora estamos en condiciones de acudir a los siguientes módulos.

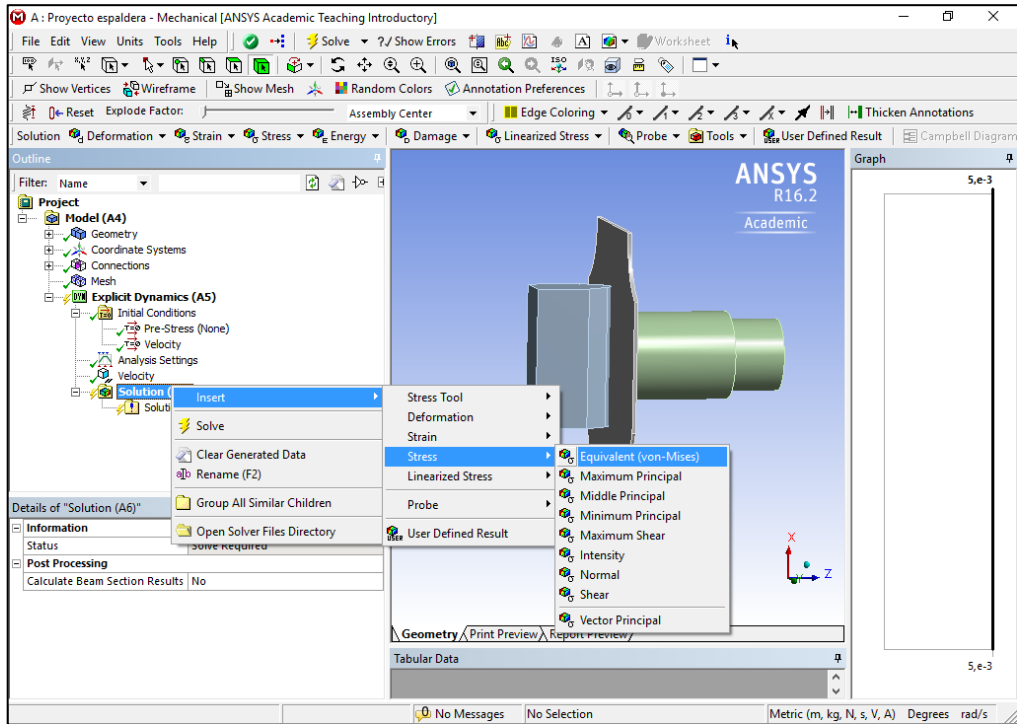
7.4.1.4.5 Solution

Aquí sólo vamos a indicarle que soluciones le vamos a recurrir, como pueden ser:

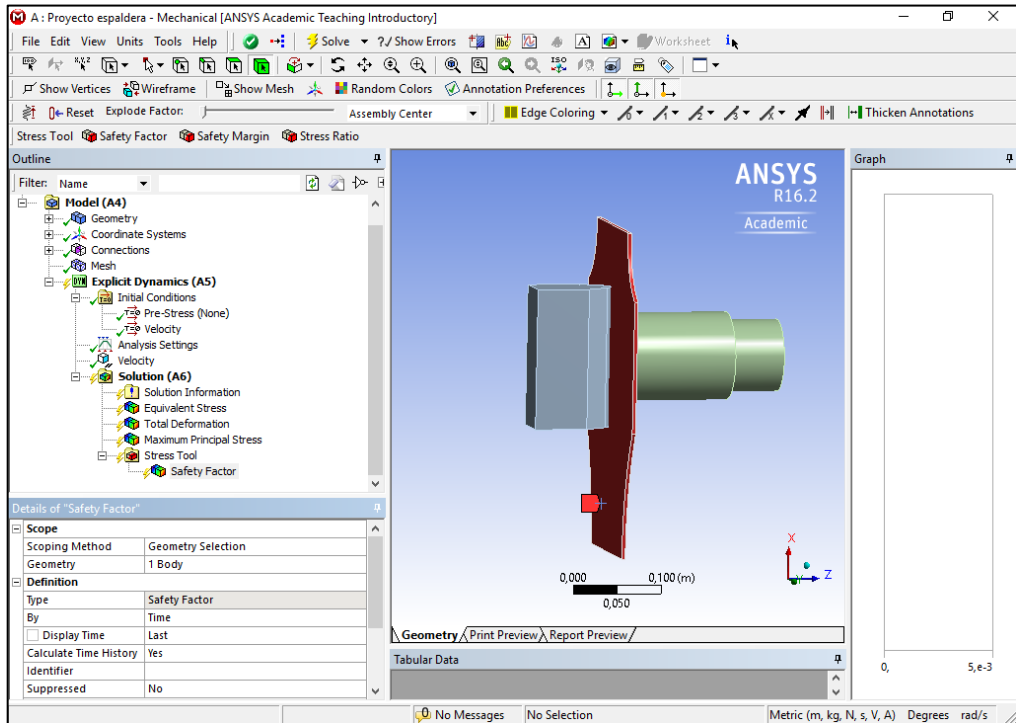
- ➔ Tensiones
- ➔ Deformaciones

→ Desplazamientos

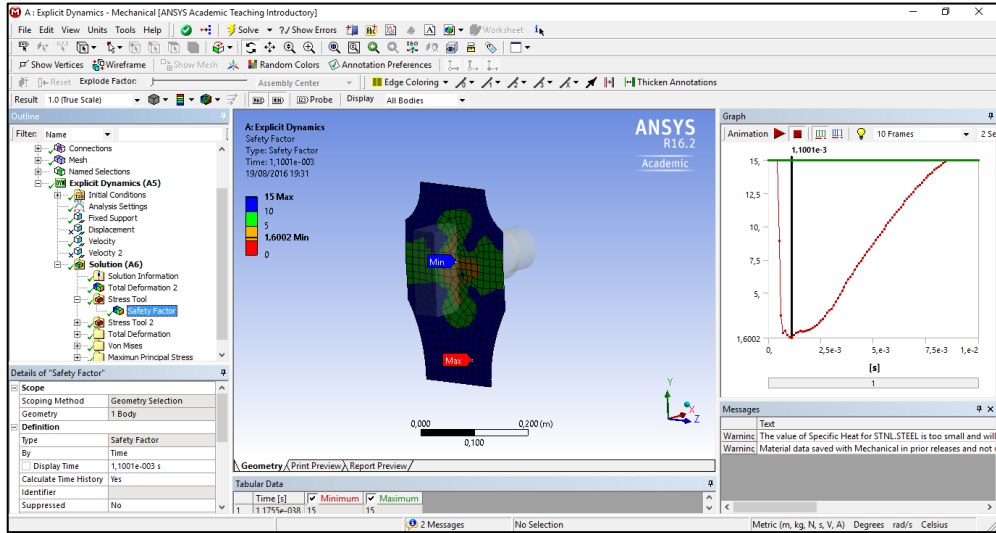
→ ...



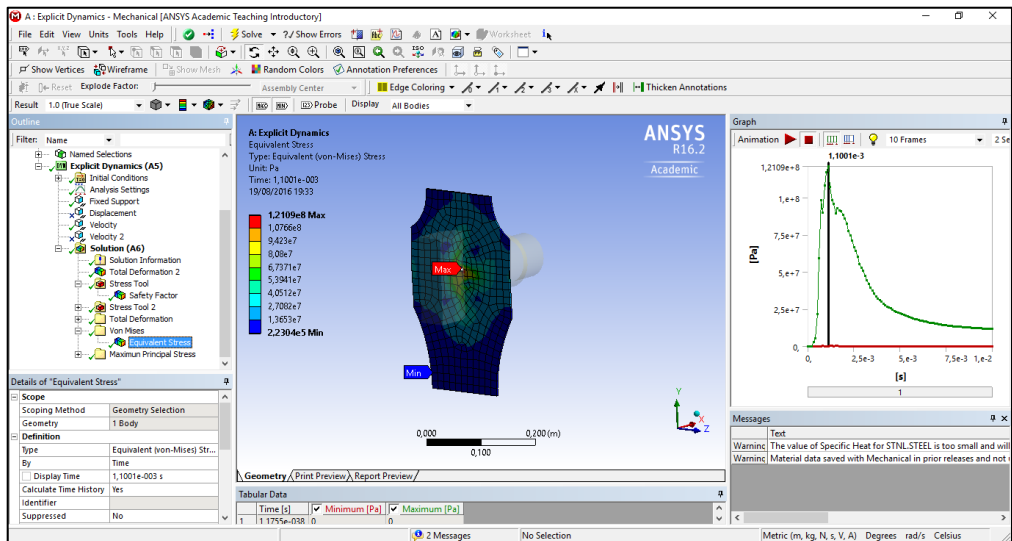
Nosotros vamos a seleccionar tensiones de Von Mises, tensión máxima principal y deformaciones totales. Estos análisis se irán añadiendo de forma automática en nuestro árbol de la izquierda. Además solicitaremos un análisis de factor de seguridad comparando la tensión de fallo de nuestro material comparada contra tensiones de Von Mises o Máxima Tensión. En este paso le indicaremos que personalizaremos la tensión de fallo e introduciremos el valor en este paso. Si esto lo hubiésemos hecho en “Engineering Data” como propiedad de nuestro material no haría falta.



Ahora estamos en disposición de resolver y que el programa informático nos ofrezca soluciones, las que nos interese. Para ello presionamos sobre el botón "Solve" o con el menú contextual (flotante) con el botón derecho sobre "Solution (A6)" accedemos también al botón "Solve". Una vez que se ha completado todo el proceso de cálculo veremos en el árbol de la izquierda todo con ticks verdes.



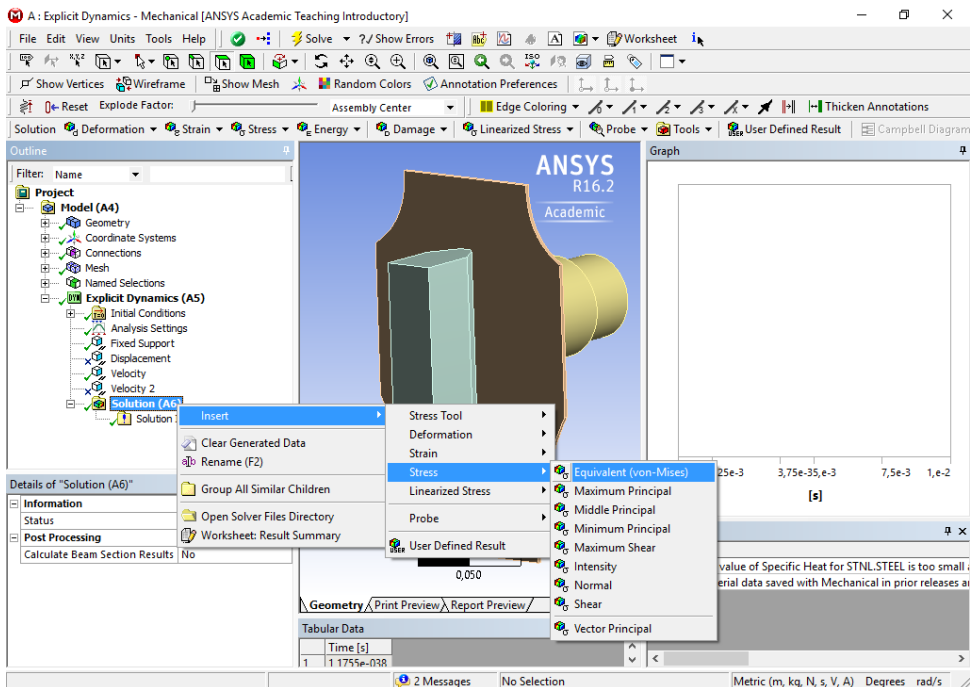
En la figura anterior se presenta la información obtenida referente al factor de seguridad en nuestra pieza de estudio, comparando la tensión de rotura de nuestro material contra las tensiones aplicadas. Además en la siguiente figura presentamos las tensiones de Von Mises aplicadas en nuestra pieza de estudio.



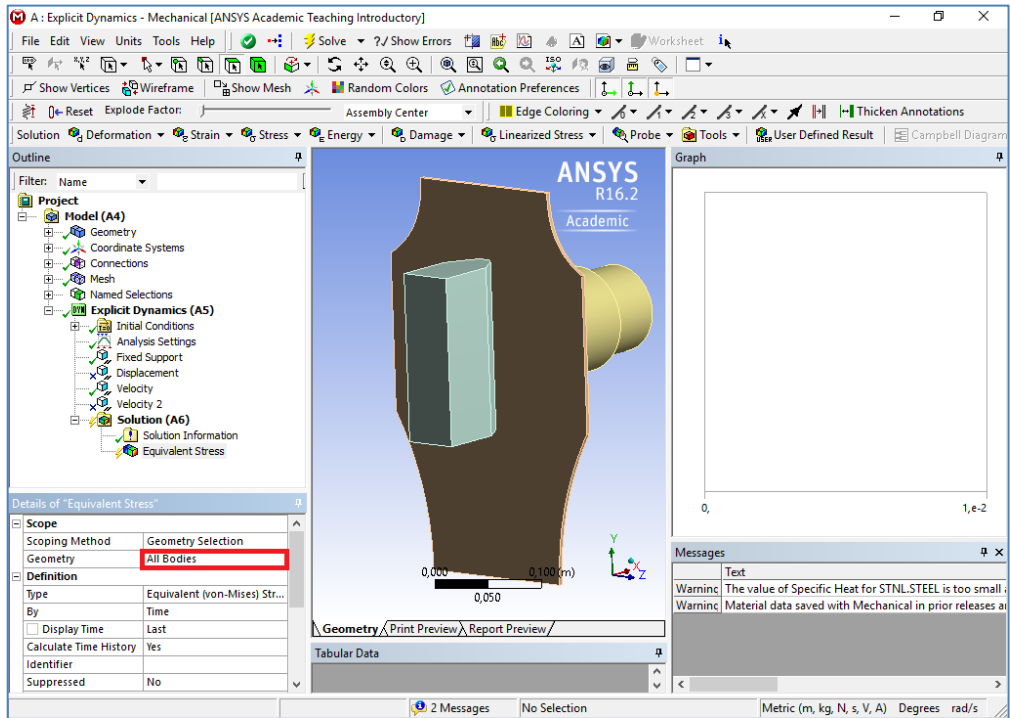
Como vemos obtenemos mucha información de lo que necesitamos, como una gráfica que nos proporciona información sobre el instante donde ocurre, por ejemplo, la máxima tensión y poder estudiarlo con más profundidad.

Vamos a hacer a continuación unos comentarios de como obtener resultados sólo de las piezas que nos interesen. En nuestro caso nos interesa los datos de la muestra ensayada (espaldera) y para ello procederemos de la siguiente forma.

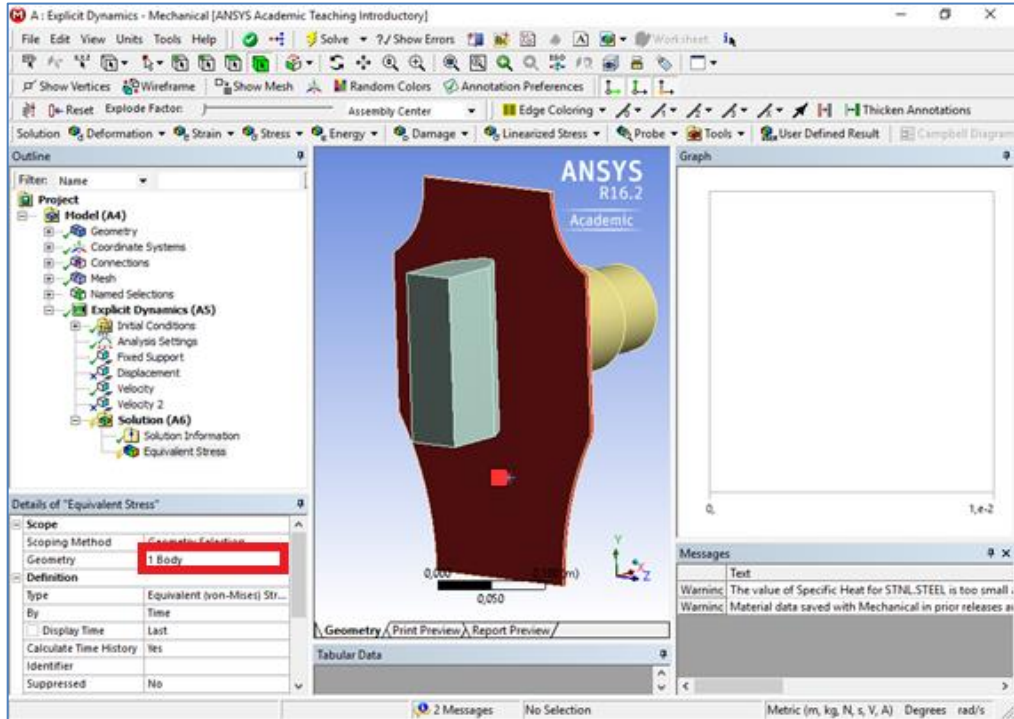
Como se explicó anteriormente se selecciona “Solution (A6)” y con botón derecho se accede al menú contextual o flotante y seleccionamos la opción que necesitamos, por ejemplo tensiones equivalentes de Von Mises.



Y una vez que lo tenemos en nuestro árbol de tareas vemos que podemos seleccionar nuestro cuerpo o pieza, en “Scope” de la ventana “Details of “Equivalent Stress””

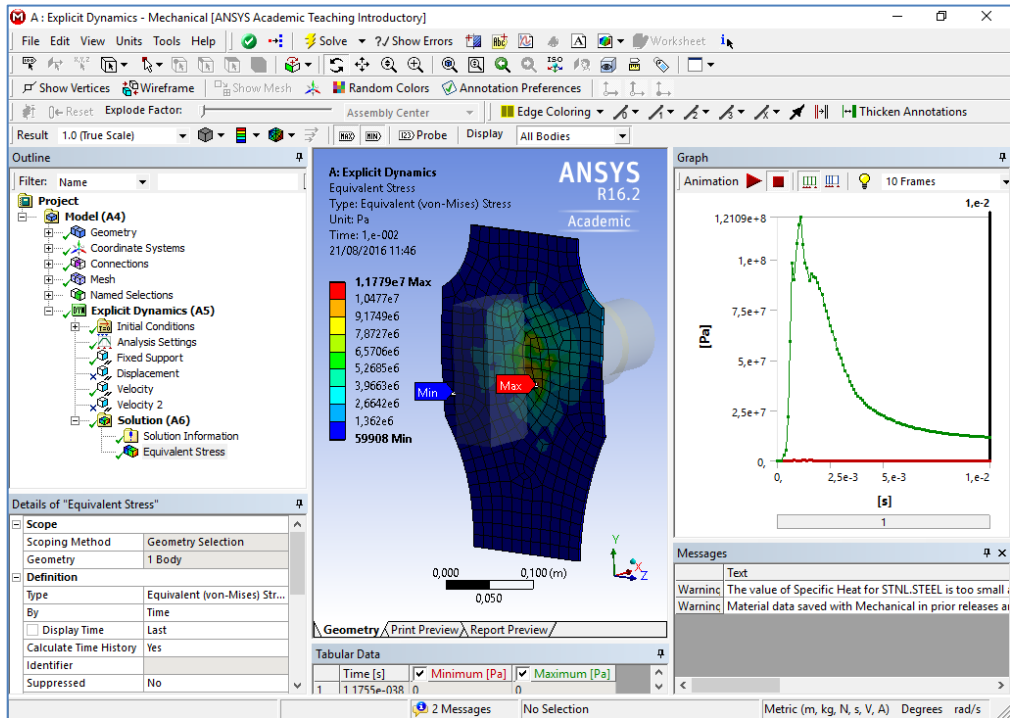


Y una vez seleccionado el cuerpo que nos interesa estamos en disposición, una vez calculado obtendremos la información que realmente nos interesa.



Como vemos en la imagen siguiente tenemos varia información que nos interés, como:

- ◊ La geometría que visualmente vemos donde se producen los puntos más característicos en un instante determinado.
- ◊ Gráfico donde en todo el espacio temporal del cálculo se nos presenta la información y podremos ver donde se producen los puntos más característicos



Y para ver la geometría en el instante de los puntos más característicos sólo debemos en el gráfico seleccionar el instante necesario y en “Details of “Equivalent Stress”, en “Display Time” indicamos ese valor, y como vemos nos indica en el árbol de tareas un rayo amarillo que con botón derecho y en menú contextual o flotante seleccionamos “Retrieve This Result” y por lo tanto actualizamos, coincidiendo el máximo valor de la geometría con el del gráfico.

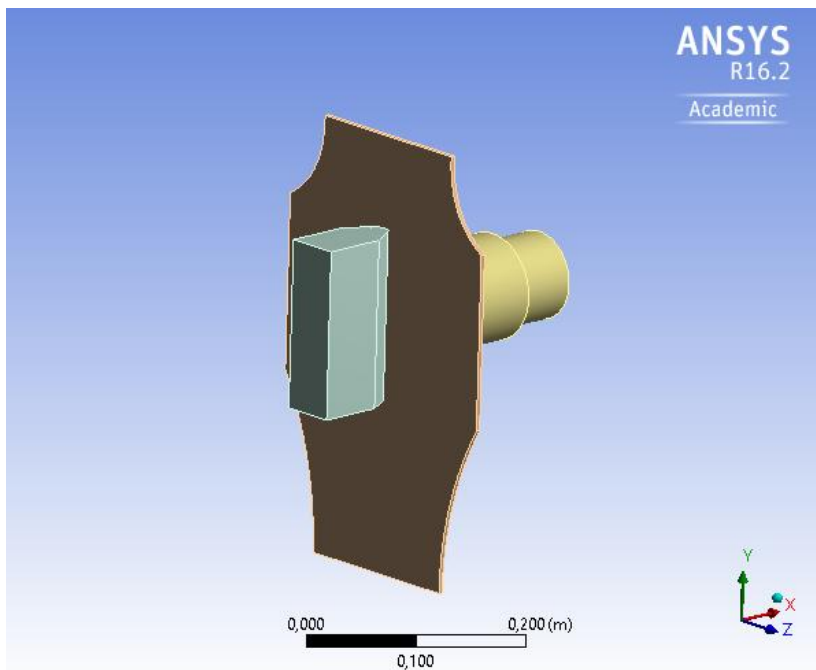
Hasta aquí este “manual” muy simple para que no ocurra como al estudiante y redactor del presente estudio al no tener una referencia sencilla para poder abordar este gran y muy extenso programa informático.

7.5 Informe ejemplo (ANSYS® WORKBENCH™)



Project

| | |
|------------------------------|----------------------------|
| First Saved | Monday, July 18, 2016 |
| Last Saved | Wednesday, August 10, 2016 |
| Product Version | 16.2 Release |
| Save Project Before Solution | No |
| Save Project After Solution | No |





Contents

- Units
- Model (A4)
 - Geometry
 - Parts
 - Coordinate Systems
 - Connections
 - Contacts
 - Contact Regions
 - Body Interactions
 - Body Interaction
 - Mesh
 - Mesh Controls
 - Named Selections
 - Explicit Dynamics (A5)
 - Initial Conditions
 - Initial Condition
 - Analysis Settings
 - Loads
 - Solution (A6)
 - Solution Information
 - Total Deformation 2
 - Stress Tool
 - Safety Factor
 - Stress Tool 2
 - Safety Margin
 - Total Deformation
 - Total Deformation
 - Von Mises
 - Equivalent Stress
 - Maximun Principal Stress
 - Maximum Principal Stress
- Material Data
 - PROTECTOR
 - STNL.STEEL



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 |
| Definition | |
| Source | D:\Mis Documentos\TFM\PROYECTO ESPALDERA_KEVLAR-EPOXY\NUEVA\ESPALDERA MEDIANA\POSICION 1\ESPALDERA NUEVA MEDIANA_POSICION1_nuevo mallado_files\dp0\SYS\DM\SYS.agdb |
| Type | DesignModeler |
| Length Unit | Millimeters |
| Element Control | Program Controlled |
| Display Style | Body Color |
| Bounding Box | |
| Length X | 0,2858 m |
| Length Y | 0,3732 m |
| Length Z | 0,2281 m |
| Properties | |
| Volume | 2,2351e-003 m ³ |
| Mass | 15,682 kg |
| Scale Factor Value | 1, |
| Statistics | |
| Bodies | 3 |
| Active Bodies | 3 |
| Nodes | 2396 |



| | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Elements | 1555 |
| Mesh Metric | Skewness |
| Min | 1,3057293693791E-10 |
| Max | 0,666666666449076 |
| Average | 0,155348627135178 |
| Standard Deviation | 0,133382617025873 |
| Basic Geometry Options | |
| Parameters | Yes |
| Parameter Key | DS |
| Attributes | No |
| Named Selections | No |
| Material Properties | No |
| Advanced Geometry Options | |
| Use Associativity | Yes |
| Coordinate Systems | No |
| Reader Mode Saves Updated File | No |
| Use Instances | Yes |
| Smart CAD Update | No |
| Compare Parts On Update | No |
| Attach File Via Temp File | Yes |
| Temporary Directory | C:\Users\Ruben\AppData\Local\Temp |
| Analysis Type | 3-D |
| Decompose Disjoint Geometry | Yes |
| Enclosure and Symmetry Processing | Yes |

TABLE 3
Model (A4) > Geometry > Parts

| | | | |
|-------------|--|--------------------------------------|------------------|
| Object Name | <i>ESPALDERA PLANA_ok._con volumen</i> | <i>percutor_5kg_sin redondeo</i> | <i>yunque_ok</i> |
|-------------|--|--------------------------------------|------------------|



| | | | |
|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| State | Meshed | | |
| Graphics Properties | | | |
| Visible | Yes | | |
| Transparency | 1 | | |
| Definition | | | |
| Suppressed | No | | |
| Stiffness Behavior | Flexible | | |
| Coordinate System | Default Coordinate System | | |
| Reference Temperature | By Environment | | |
| Reference Frame | Lagrangian | | |
| Material | | | |
| Assignment | PROTECTOR | STNL.STEEL | |
| Nonlinear Effects | No | | |
| Thermal Strain Effects | No | | |
| Bounding Box | | | |
| Length X | 4,e-003 m | 9,0801e-002 m | 0,19 m |
| Length Y | 0,3732 m | 0,16 m | 1,e-001 m |
| Length Z | 0,2281 m | 5,e-002 m | 0,1 m |
| Properties | | | |
| Volume | 2,9194e-004 m ³ | 6,3608e-004 m ³ | 1,3071e-003 m ³ |
| Mass | 0,40871 kg | 4,9996 kg | 10,274 kg |
| Centroid X | 0,3752 m | 0,32176 m | 0,46698 m |
| Centroid Y | 1,6407e-002 m | 4,7959e-002 m | 4,795e-002 m |
| Centroid Z | -5,6877e-003 m | -5,6873e-003 m | -5,6828e-003 m |
| Moment of Inertia Ip1 | 5,5304e-003 kg·m ² | 1,1589e-002 kg·m ² | 1,1621e-002 kg·m ² |
| Moment of Inertia Ip2 | 1,4081e-003 kg·m ² | 3,7922e-003 kg·m ² | 3,295e-002 kg·m ² |
| Moment of Inertia Ip3 | 4,1234e-003 kg·m ² | 1,353e-002 kg·m ² | 3,2948e-002 kg·m ² |
| Statistics | | | |
| Nodes | 794 | 396 | 1206 |
| Elements | 358 | 253 | 944 |
| Mesh Metric | Skewness | | |
| Min | 1,3057293693791E-10 | 7,00655596624211E-03 | 3,33847060379549E-03 |
| Max | 0,481231136376078 | 0,6666666666449076 | 0,405245227670489 |



| | | | |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Average | 0,132545455066237 | 0,138037763431058 | 0,168635898446431 |
| Standard Deviation | 0,115453905676189 | 0,159704392854248 | 0,130389765238988 |

Coordinate Systems

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

| | |
|----------------------------|---------------------------------|
| Object Name | <i>Global Coordinate System</i> |
| State | Fully Defined |
| Definition | |
| Type | Cartesian |
| Coordinate System ID | 0, |
| Origin | |
| Origin X | 0, m |
| Origin Y | 0, m |
| Origin Z | 0, m |
| Directional Vectors | |
| X Axis Data | [1, 0, 0,] |
| Y Axis Data | [0, 1, 0,] |
| Z Axis Data | [0, 0, 1,] |



Connections

TABLE 5
Model (A4) > Connections

| | |
|--|--------------------|
| Object Name | <i>Connections</i> |
| State | Fully Defined |
| Auto Detection | |
| Generate Automatic Connection On Refresh | Yes |
| Transparency | |
| Enabled | Yes |

TABLE 6
Model (A4) > Connections > Contacts

| | |
|-----------------------|--------------------|
| Object Name | <i>Contacts</i> |
| State | Fully Defined |
| Definition | |
| Connection Type | Contact |
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | All Bodies |
| Auto Detection | |
| Tolerance Type | Slider |
| Tolerance Slider | 0, |
| Tolerance Value | 1,3062e-003 m |
| Use Range | No |
| Face/Face | No |
| Face/Edge | No |
| Edge/Edge | No |
| Priority | Include All |
| Group By | Bodies |
| Search Across | Bodies |
| Statistics | |
| Connections | 2 |
| Active Connections | 2 |



TABLE 7
Model (A4) > Connections > Contacts > Contact Regions

| | | |
|-------------------------------|--|--|
| Object Name | <i>Frictionless - percutor_5kg_sin redondeo To ESPALDERA PLANA_ok._con volumen</i> | <i>Bonded - ESPALDERA PLANA_ok._con volumen To yunque_ok</i> |
| State | Fully Defined | |
| Scope | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | |
| Contact | 1 Face | |
| Target | 1 Face | |
| Contact Bodies | percutor_5kg_sin redondeo | ESPALDERA PLANA_ok._con volumen |
| Target Bodies | ESPALDERA PLANA_ok._con volumen | yunque_ok |
| Definition | | |
| Type | Frictionless | Bonded |
| Scope Mode | Manual | |
| Behavior | Program Controlled | |
| Trim Contact | Program Controlled | |
| Suppressed | No | |
| Maximum Offset | | 1,e-007 m |
| Breakable | | No |
| Advanced | | |
| Formulation | Augmented Lagrange | Program Controlled |
| Detection Method | Nodal-Normal To Target | Program Controlled |
| Normal Stiffness | Manual | Program Controlled |
| Normal Stiffness Factor | 0,1 | |
| Update Stiffness | Each Iteration | Program Controlled |
| Stabilization Damping Factor | 0, | |
| Thermal Conductance | Program Controlled | |
| Electric Conductance | Program Controlled | |
| Pinball Region | Program Controlled | |
| Time Step Controls | None | |
| Restitution Factor | 1 | |
| Elastic Slip Tolerance | | Program Controlled |
| Geometric Modification | | |



| | | |
|-----------------------------|------------------------|--|
| Interface Treatment | Add Offset, No Ramping | |
| Offset | 0, m | |
| Contact Geometry Correction | None | |
| Target Geometry Correction | None | |

TABLE 8
Model (A4) > Connections > Body Interactions

| | |
|----------------------|--------------------------|
| Object Name | <i>Body Interactions</i> |
| State | Fully Defined |
| Advanced | |
| Contact Detection | Trajectory |
| Formulation | Penalty |
| Body Self Contact | Program Controlled |
| Element Self Contact | Program Controlled |
| Tolerance | 0,2 |

TABLE 9
Model (A4) > Connections > Body Interactions > Body Interaction

| | | |
|----------------------|-------------------------|---------------------------|
| Object Name | <i>Body Interaction</i> | <i>Body Interaction 2</i> |
| State | Suppressed | |
| Scope | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | |
| Geometry | All Bodies | |
| Definition | | |
| Type | Frictional | Bonded |
| Friction Coefficient | 0,3 | |
| Dynamic Coefficient | 0, | |
| Decay Constant | 0, | |
| Suppressed | Yes | |
| Maximum Offset | | 1,e-007 m |
| Breakable | | No |

Mesh

TABLE 10
Model (A4) > Mesh



| | |
|--|----------------------|
| Object Name | Mesh |
| State | Solved |
| Display | |
| Display Style | Body Color |
| Defaults | |
| Physics Preference | Explicit |
| Relevance | 0 |
| Sizing | |
| Use Advanced Size Function | Off (Part Size Seed) |
| Relevance Center | Coarse |
| Element Size | 1,5e-002 m |
| Initial Size Seed | Part |
| Smoothing | High |
| Transition | Slow |
| Span Angle Center | Coarse |
| Minimum Edge Length | 4,e-003 m |
| Inflation | |
| Use Automatic Inflation | None |
| Inflation Option | Smooth Transition |
| Transition Ratio | 0,272 |
| Maximum Layers | 5 |
| Growth Rate | 1,2 |
| Inflation Algorithm | Pre |
| View Advanced Options | No |
| Patch Conforming Options | |
| Triangle Surface Mesher | Program Controlled |
| Patch Independent Options | |
| Topology Checking | No |
| Advanced | |
| Number of CPUs for Parallel Part Meshing | 4 |
| Shape Checking | Explicit |
| Element Midside Nodes | Dropped |
| Straight Sided Elements | |
| Number of Retries | Default (4) |
| Extra Retries For Assembly | Yes |
| Rigid Body Behavior | Full Mesh |
| Mesh Morphing | Disabled |
| Defeaturing | |
| Pinch Tolerance | Please Define |
| Generate Pinch on Refresh | No |
| Automatic Mesh Based Defeaturing | On |



| Defeaturing Tolerance | Default |
|-----------------------|-------------|
| Statistics | |
| Nodes | 2396 |
| Elements | 1555 |
| Mesh Metric | Skewness |
| Min | 1,3057e-010 |
| Max | 0,66667 |
| Average | 0,15535 |
| Standard Deviation | 0,13338 |

TABLE 11
Model (A4) > Mesh > Mesh Controls

| | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|--------------------|-------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Object Name | MultiZone | MultiZone 4 | Edge Sizing | Edge Sizing 2 | Edge Sizing 3 | Edge Sizing 4 | MultiZone 3 | Edge Sizing 5 | Edge Sizing 6 | Edge Sizing 7 | Body Sizing 2 |
| State | Fully Defined | Suppressed | | | | | | | | | |
| Scope | | | | | | | | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | | | | | | | | |
| Geometry | 1 Body | | No Selection | | | | 1 Edge | | 1 Body | | |
| Definition | | | | | | | | | | | |
| Suppressed | No | Yes | | | | | | | | | |
| Method | MultiZone | | | | | | MultiZone | | | | |
| Mapped Mesh Type | Hexa | Hexa/Prism | | | | | Hexa | | | | |
| Surface Mesh Method | Uniform | | | | | | Uniform | | | | |
| Free Mesh Type | Not Allowed | Tetra | | | | | Not Allowed | | | | |
| Element Midside Nodes | Use Global Setting | Dropped | | | | | Use Global Setting | | | | |
| Src/Trg Selection | Automatic | | | | | | | | | | |
| Source | Program | | | | | Geomet | | | | | |



| | | | | | | | | |
|------------------------|--------------------|---------------|---------------------|----|------|---|---------------------|--------------|
| Scoping Method | Controlled | | | | | | ry Selection | |
| Source | Program Controlled | | | | | | | |
| Sweep Size Behavior | Sweep Element Size | | | | | | Sweep Element Size | |
| Sweep Element Size | Default | | | | | | Default | |
| Active | No, Suppressed | | | | | | | |
| Type | | | Number of Divisions | | | | Number of Divisions | Element Size |
| Number of Divisions | | | 30 | 20 | 40 | 8 | 2 | |
| Behavior | | | Soft | | Hard | | Soft | Hard |
| Bias Type | | | | | | | No Bias | |
| Element Size | | | | | | | | 1,e-002 m |
| Advanced | | | | | | | | |
| Preserve Boundaries | Protected | | | | | | Protect ed | |
| Mesh Based Defeaturing | Off | | | | | | Off | |
| Minimum Edge Length | 0,25761 m | 2,6181e-002 m | | | | | 0, m | |
| Write ICEM CFD Files | No | | | | | | No | |

Named Selections

TABLE 12
Model (A4) > Named Selections > Named Selections

| | |
|----------------|--------------------|
| Object Name | <i>Percutor</i> |
| State | Suppressed |
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |



| | |
|------------------------------|--------------|
| Geometry | No Selection |
| Definition | |
| Send to Solver | Yes |
| Visible | Yes |
| Program Controlled Inflation | Exclude |
| Statistics | |
| Type | Manual |
| Total Selection | No Selection |
| Suppressed | 0 |
| Used by Mesh Worksheet | No |

Explicit Dynamics (A5)

TABLE 13
Model (A4) > Analysis

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

TABLE 14
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Initial Conditions

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

TABLE 15
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Initial Conditions > Initial Condition

| | | |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Object Name | <i>Pre-Stress (None)</i> | <i>Velocity</i> |
| State | Fully Defined | |
| Definition | | |
| Pre-Stress Environment | None | |
| Pressure Initialization | From Deformed State | |
| Input Type | | Velocity |
| Define By | | Components |
| Coordinate System | | Global Coordinate System |
| X Component | | 4,42 m/s |
| Y Component | | 0, m/s |
| Z Component | | 0, m/s |
| Suppressed | | No |
| Scope | | |
| Scoping Method | | Geometry Selection |
| Geometry | | 1 Body |

TABLE 16
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Analysis Settings



| | |
|-------------------------------------|------------------------|
| Object Name | Analysis Settings |
| State | Fully Defined |
| Analysis Settings Preference | |
| Type | Program Controlled |
| Step Controls | |
| Resume From Cycle | 0 |
| Maximum Number of Cycles | 1e+07 |
| End Time | 1,e-002 s |
| Maximum Energy Error | 5,e-002 |
| 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 |
| Characteristic Dimension | Diagonals |
| Automatic Mass Scaling | No |
| Solver Controls | |
| Solve Units | mm, mg, ms |
| Beam Solution Type | Bending |
| Beam Time Step Safety Factor | 0,5 |
| Hex Integration Type | Exact |
| SHELL Sublayers | 1 |
| SHELL Shear Correction Factor | 0,8333 |
| SHELL BWC Warp Correction | Yes |
| SHELL Thickness Update | Nodal |
| Tet Integration | Average Nodal Pressure |
| SHELL Inertia Update | Recompute |



| | |
|---------------------------------|---------------------------|
| Density Update | Program Controlled |
| Minimum Velocity | 1,e-006 m s ⁻¹ |
| Maximum Velocity | 1,e+010 m s ⁻¹ |
| Radius Cutoff | 1,e-003 |
| Minimum Strain Rate Cutoff | 1,e-010 |
| Euler Domain Controls | |
| Domain Size Definition | Program Controlled |
| Display Euler Domain | Yes |
| Scope | All Bodies |
| X Scale factor | 1,2 |
| Y Scale factor | 1,2 |
| Z Scale factor | 1,2 |
| Domain Resolution Definition | Total Cells |
| Total Cells | 2,5e+05 |
| Lower X Face | Flow Out |
| Lower Y Face | Flow Out |
| Lower Z Face | Flow Out |
| Upper X Face | Flow Out |
| Upper Y Face | Flow Out |
| Upper Z Face | Flow Out |
| Euler Tracking | By Body |
| Damping Controls | |
| Linear Artificial Viscosity | 0,2 |
| Quadratic Artificial Viscosity | 1, |
| Linear Viscosity in Expansion | No |
| Artificial Viscosity For SHELLs | Yes |
| Hourglass Damping | AUTODYN Standard |
| Viscous Coefficient | 0,1 |
| Static Damping | 0, |
| Erosion Controls | |
| On Geometric Strain Limit | Yes |



| | |
|-----------------------------------|--|
| Geometric Strain Limit | 1,5 |
| On Material Failure | Yes |
| On Minimum Element Time Step | No |
| Retain Inertia of Eroded Material | No |
| Output Controls | |
| Save Results on | Equally Spaced Points |
| Result Number Of Points | 100 |
| Save Restart Files on | Equally Spaced Points |
| Restart Number Of Points | 1 |
| Save Result Tracker Data on | Cycles |
| Tracker Cycles | 1 |
| Output Contact Forces | Off |
| Analysis Data Management | |
| Solver Files Directory | D:\Mis Documentos\TFM\PROYECTO ESPALDERA_KEVLAR-EPOXY\NUEVA\ESPALDERA MEDIANA\POSICION 1\ESPALDERA NUEVA MEDIANA_POSICION1_nuevo mallado_files\dp0\SYS\MECH\ |
| Scratch Solver Files Directory | |

TABLE 17
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Loads

| | | | | |
|-------------------|----------------------|---------------------|-----------------|-------------------|
| Object Name | <i>Fixed Support</i> | <i>Displacement</i> | <i>Velocity</i> | <i>Velocity 2</i> |
| State | Fully Defined | Suppressed | Fully Defined | Suppressed |
| Scope | | | | |
| Scoping Method | Geometry Selection | | | |
| Geometry | 1 Face | No Selection | 1 Body | No Selection |
| Definition | | | | |
| Type | Fixed Support | Displacement | Velocity | |
| Suppressed | No | Yes | No | Yes |



| | | | |
|-------------------|--|--------------------------|-----------------------|
| Define By | | Components | |
| Coordinate System | | Global Coordinate System | |
| X Component | | Free | |
| Y Component | | 0, m (ramped) | 0, m/s (step applied) |
| Z Component | | 0, m (ramped) | 0, m/s (step applied) |

Solution (A6)

TABLE 18
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution

| | |
|--------------------------------|----------------------|
| Object Name | <i>Solution (A6)</i> |
| State | Solved |
| Information | |
| Status | Done |
| Post Processing | |
| Calculate Beam Section Results | No |

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

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

FIGURE 4
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Solution Information

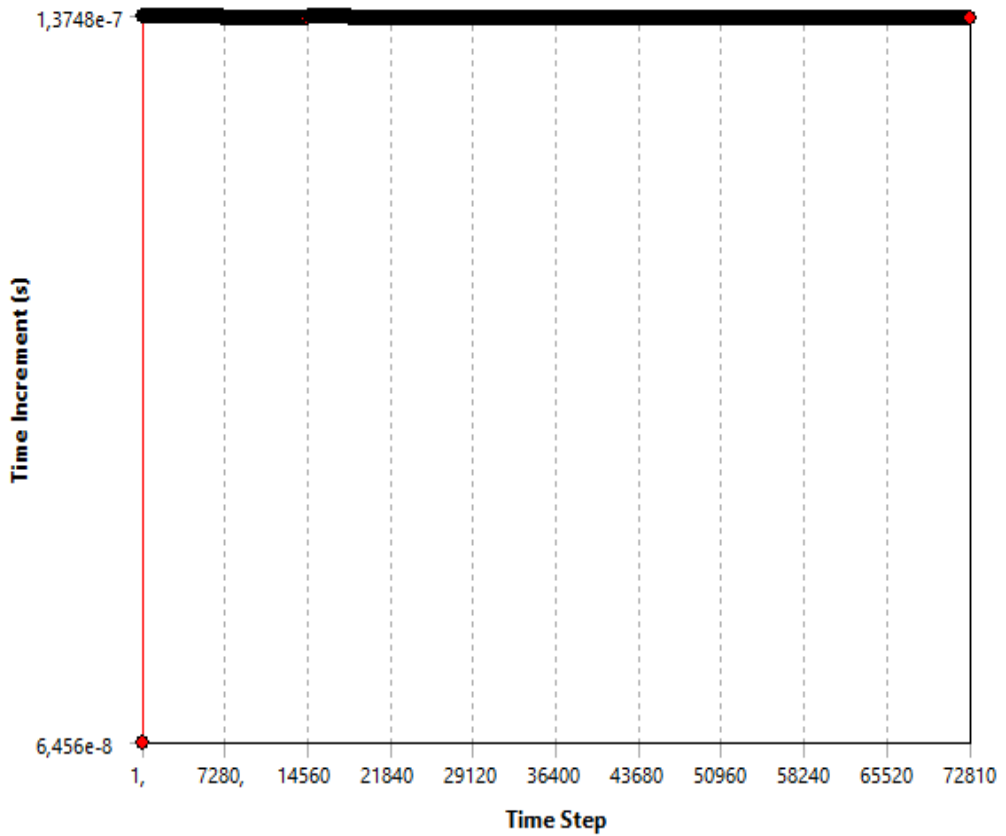


TABLE 20
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Results

| | |
|------------------------|---------------------|
| Object Name | Total Deformation 2 |
| State | Solved |
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | All Bodies |
| Definition | |
| Type | Total Deformation |
| By | Time |
| Display Time | Last |
| Calculate Time History | Yes |



| | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| Identifier | |
| Suppressed | No |
| Results | |
| Minimum | 0, m |
| Maximum | 1,1201e-002 m |
| Minimum Occurs On | yunque_ok |
| Maximum Occurs On | ESPALDERA PLANA_ok._con volumen |
| Minimum Value Over Time | |
| Minimum | 0, m |
| Maximum | 0, m |
| Maximum Value Over Time | |
| Minimum | 0, m |
| Maximum | 1,1201e-002 m |
| Information | |
| Time | 1,e-002 s |
| Set | 101 |

FIGURE 5
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Total Deformation 2

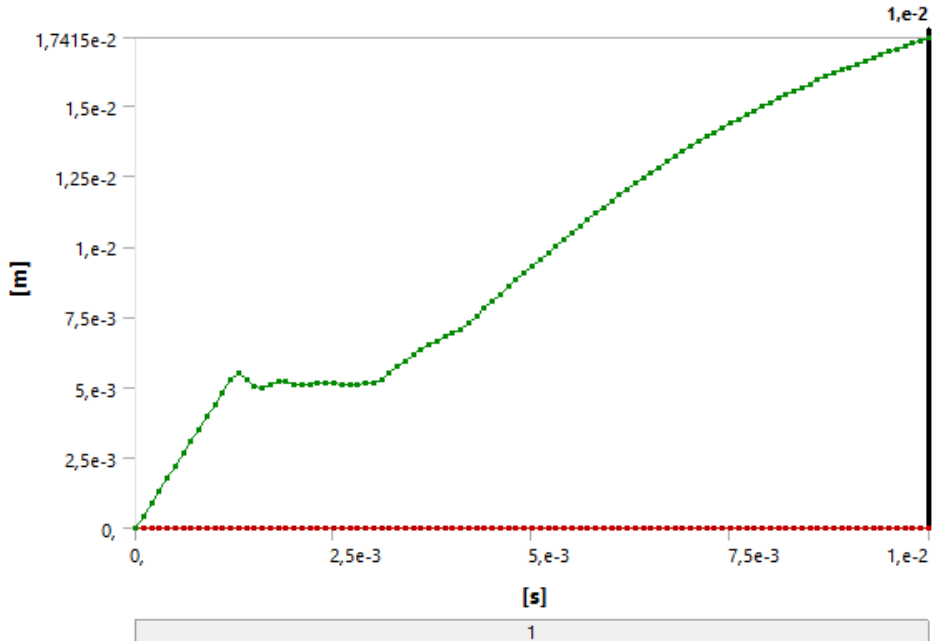


TABLE 21
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Total Deformation 2

| Time [s] | Minimum [m] | Maximum [m] |
|-------------|-------------|-------------|
| 1,1755e-038 | | 0, |
| 1,0006e-004 | | 4,4227e-004 |
| 2,0013e-004 | | 8,8459e-004 |
| 3,0007e-004 | | 1,3262e-003 |
| 4e-004 | | 1,766e-003 |
| 5,0007e-004 | | 2,204e-003 |
| 6e-004 | | 2,6312e-003 |
| 7,0007e-004 | | 3,0218e-003 |
| 8,0001e-004 | 0, | 3,3537e-003 |
| 9,0007e-004 | | 3,6295e-003 |
| 1,0001e-003 | | 3,8448e-003 |
| 1,1001e-003 | | 4,0074e-003 |
| 1,2001e-003 | | 4,1261e-003 |
| 1,3001e-003 | | 4,2065e-003 |
| 1,4001e-003 | | 4,8296e-003 |
| 1,5001e-003 | | 5,5359e-003 |



| | |
|-------------|-------------|
| 1,6001e-003 | 6,0462e-003 |
| 1,7e-003 | 6,2655e-003 |
| 1,8001e-003 | 6,2986e-003 |
| 1,9001e-003 | 6,2667e-003 |
| 2,0001e-003 | 6,1535e-003 |
| 2,1001e-003 | 5,9995e-003 |
| 2,2e-003 | 5,8489e-003 |
| 2,3001e-003 | 5,6844e-003 |
| 2,4001e-003 | 5,5219e-003 |
| 2,5e-003 | 5,3775e-003 |
| 2,6e-003 | 5,2369e-003 |
| 2,7e-003 | 5,1027e-003 |
| 2,8e-003 | 4,9786e-003 |
| 2,9001e-003 | 4,8576e-003 |
| 3,0001e-003 | 4,9564e-003 |
| 3,1001e-003 | 5,1164e-003 |
| 3,2e-003 | 5,2752e-003 |
| 3,3001e-003 | 5,4254e-003 |
| 3,4001e-003 | 5,5679e-003 |
| 3,5001e-003 | 5,7038e-003 |
| 3,6001e-003 | 5,8334e-003 |
| 3,7e-003 | 6,0023e-003 |
| 3,8001e-003 | 6,1778e-003 |
| 3,9001e-003 | 6,3477e-003 |
| 4,0001e-003 | 6,5127e-003 |
| 4,1001e-003 | 6,6727e-003 |
| 4,2e-003 | 6,8281e-003 |
| 4,3001e-003 | 6,9793e-003 |
| 4,4001e-003 | 7,1261e-003 |
| 4,5e-003 | 7,269e-003 |
| 4,6001e-003 | 7,4086e-003 |
| 4,7001e-003 | 7,5446e-003 |
| 4,8e-003 | 7,6774e-003 |
| 4,9001e-003 | 7,8073e-003 |
| 5,0001e-003 | 7,9341e-003 |
| 5,1e-003 | 8,058e-003 |
| 5,2001e-003 | 8,1793e-003 |
| 5,3001e-003 | 8,2977e-003 |
| 5,4e-003 | 8,4133e-003 |
| 5,5001e-003 | 8,5264e-003 |
| 5,6001e-003 | 8,6366e-003 |



| | |
|-------------|-------------|
| 5,7e-003 | 8,7441e-003 |
| 5,8001e-003 | 8,8489e-003 |
| 5,9001e-003 | 8,9509e-003 |
| 6,0001e-003 | 9,0501e-003 |
| 6,1e-003 | 9,1465e-003 |
| 6,2001e-003 | 9,2404e-003 |
| 6,3001e-003 | 9,3314e-003 |
| 6,4001e-003 | 9,4198e-003 |
| 6,5e-003 | 9,5055e-003 |
| 6,6001e-003 | 9,5887e-003 |
| 6,7001e-003 | 9,6692e-003 |
| 6,8001e-003 | 9,7472e-003 |
| 6,9e-003 | 9,8227e-003 |
| 7,0001e-003 | 9,896e-003 |
| 7,1001e-003 | 9,9667e-003 |
| 7,2001e-003 | 1,0035e-002 |
| 7,3e-003 | 1,0101e-002 |
| 7,4e-003 | 1,0165e-002 |
| 7,5001e-003 | 1,0227e-002 |
| 7,6001e-003 | 1,0287e-002 |
| 7,7001e-003 | 1,0344e-002 |
| 7,8e-003 | 1,04e-002 |
| 7,9001e-003 | 1,0453e-002 |
| 8,0001e-003 | 1,0505e-002 |
| 8,1001e-003 | 1,0554e-002 |
| 8,2001e-003 | 1,0602e-002 |
| 8,3e-003 | 1,0648e-002 |
| 8,4e-003 | 1,0693e-002 |
| 8,5001e-003 | 1,0735e-002 |
| 8,6001e-003 | 1,0776e-002 |
| 8,7001e-003 | 1,0816e-002 |
| 8,8e-003 | 1,0853e-002 |
| 8,9e-003 | 1,089e-002 |
| 9,0001e-003 | 1,0925e-002 |
| 9,1001e-003 | 1,0958e-002 |
| 9,2001e-003 | 1,099e-002 |
| 9,3001e-003 | 1,1021e-002 |
| 9,4e-003 | 1,105e-002 |
| 9,5e-003 | 1,1078e-002 |
| 9,6e-003 | 1,1105e-002 |
| 9,7001e-003 | 1,1131e-002 |

| | | |
|-------------|--|-------------|
| 9,8001e-003 | | 1,1155e-002 |
| 9,9001e-003 | | 1,1179e-002 |
| 1,e-002 | | 1,1201e-002 |

TABLE 22

Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Stress Safety Tools

| | |
|-------------------|-----------------------|
| Object Name | <i>Stress Tool</i> |
| State | Solved |
| Definition | |
| Theory | Max Equivalent Stress |
| Stress Limit Type | Custom Value |
| Stress Limit | 1,9376e+008 Pa |

TABLE 23

Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Stress Tool > Results

| | |
|----------------------------------|----------------------|
| Object Name | <i>Safety Factor</i> |
| State | Solved |
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 1 Body |
| Definition | |
| Type | Safety Factor |
| By | Time |
| Display Time | 1,1001e-003 s |
| Calculate Time History | Yes |
| Identifier | |
| Suppressed | No |
| Integration Point Results | |
| Display Option | Averaged |
| Average Across Bodies | No |
| Results | |
| Minimum | 1,6002 |
| Minimum Value Over Time | |
| Minimum | 1,6002 |
| Maximum | 15, |
| Maximum Value Over Time | |
| Minimum | 15, |
| Maximum | 15, |
| Information | |
| Time | 1,1001e-003 s |
| Set | 12 |

FIGURE 6

Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Stress Tool > Safety Factor

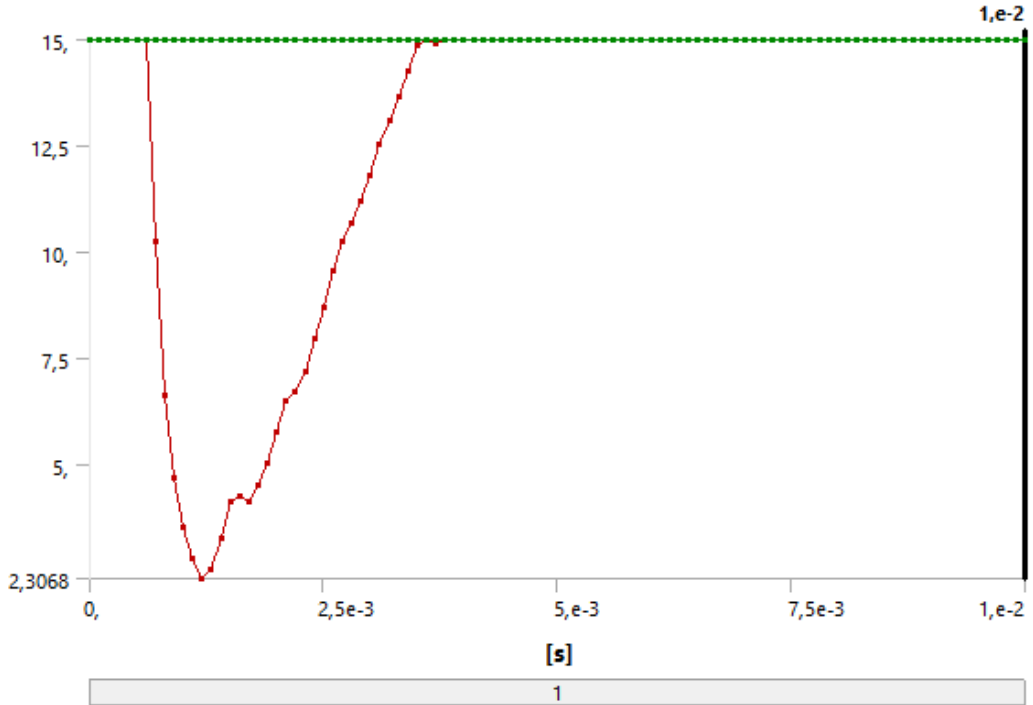


TABLE 24

Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Stress Tool > Safety Factor

| Time [s] | Minimum | Maximum |
|-------------|---------|---------|
| 1,1755e-038 | 15, | 15, |
| 1,0006e-004 | | |
| 2,0013e-004 | | |
| 3,0007e-004 | | |
| 4,e-004 | | |
| 5,0007e-004 | 8,9107 | 15, |
| 6,e-004 | 3,269 | |
| 7,0007e-004 | 1,9691 | |
| 8,0001e-004 | 2,1581 | |
| 9,0007e-004 | 1,7919 | |



| | |
|-------------|--------|
| 1,0001e-003 | 1,6542 |
| 1,1001e-003 | 1,6002 |
| 1,2001e-003 | 1,8051 |
| 1,3001e-003 | 1,9705 |
| 1,4001e-003 | 2,0257 |
| 1,5001e-003 | 2,1679 |
| 1,6001e-003 | 2,0862 |
| 1,7e-003 | 2,1157 |
| 1,8001e-003 | 2,1286 |
| 1,9001e-003 | 2,1858 |
| 2,0001e-003 | 2,2595 |
| 2,1001e-003 | 2,3483 |
| 2,2e-003 | 2,4998 |
| 2,3001e-003 | 2,6021 |
| 2,4001e-003 | 2,73 |
| 2,5e-003 | 2,8967 |
| 2,6e-003 | 3,0242 |
| 2,7e-003 | 3,2145 |
| 2,8e-003 | 3,4929 |
| 2,9001e-003 | 3,662 |
| 3,0001e-003 | 3,8047 |
| 3,1001e-003 | 4,0727 |
| 3,2e-003 | 4,3406 |
| 3,3001e-003 | 4,5967 |
| 3,4001e-003 | 4,8911 |
| 3,5001e-003 | 5,1714 |
| 3,6001e-003 | 5,4329 |
| 3,7e-003 | 5,7452 |
| 3,8001e-003 | 6,0201 |
| 3,9001e-003 | 6,21 |
| 4,0001e-003 | 6,4165 |
| 4,1001e-003 | 6,7192 |
| 4,2e-003 | 7,0065 |
| 4,3001e-003 | 7,2147 |
| 4,4001e-003 | 7,3844 |
| 4,5e-003 | 7,597 |
| 4,6001e-003 | 7,8485 |
| 4,7001e-003 | 8,0927 |
| 4,8e-003 | 8,2877 |
| 4,9001e-003 | 8,4711 |
| 5,0001e-003 | 8,7119 |



| | | |
|-------------|--------|--|
| 5,1e-003 | 8,9916 | |
| 5,2001e-003 | 9,2146 | |
| 5,3001e-003 | 9,3709 | |
| 5,4e-003 | 9,5606 | |
| 5,5001e-003 | 9,8267 | |
| 5,6001e-003 | 10,098 | |
| 5,7e-003 | 10,297 | |
| 5,8001e-003 | 10,457 | |
| 5,9001e-003 | 10,655 | |
| 6,0001e-003 | 10,908 | |
| 6,1e-003 | 11,139 | |
| 6,2001e-003 | 11,307 | |
| 6,3001e-003 | 11,46 | |
| 6,4001e-003 | 11,672 | |
| 6,5e-003 | 11,916 | |
| 6,6001e-003 | 12,116 | |
| 6,7001e-003 | 12,255 | |
| 6,8001e-003 | 12,407 | |
| 6,9e-003 | 12,619 | |
| 7,0001e-003 | 12,843 | |
| 7,1001e-003 | 13,013 | |
| 7,2001e-003 | 13,144 | |
| 7,3e-003 | 13,302 | |
| 7,4e-003 | 13,503 | |
| 7,5001e-003 | 13,69 | |
| 7,6001e-003 | 13,824 | |
| 7,7001e-003 | 13,941 | |
| 7,8e-003 | 14,09 | |
| 7,9001e-003 | 14,266 | |
| 8,0001e-003 | 14,414 | |
| 8,1001e-003 | 14,521 | |
| 8,2001e-003 | 14,626 | |
| 8,3e-003 | 14,764 | |
| 8,4e-003 | 14,911 | |
| 8,5001e-003 | | |
| 8,6001e-003 | | |
| 8,7001e-003 | | |
| 8,8e-003 | 15, | |
| 8,9e-003 | | |
| 9,0001e-003 | | |
| 9,1001e-003 | | |

| | | |
|-------------|--|--|
| 9,2001e-003 | | |
| 9,3001e-003 | | |
| 9,4e-003 | | |
| 9,5e-003 | | |
| 9,6e-003 | | |
| 9,7001e-003 | | |
| 9,8001e-003 | | |
| 9,9001e-003 | | |
| 1,e-002 | | |

TABLE 25

Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Stress Safety Tools

| | |
|-------------------|----------------------------|
| Object Name | <i>Stress Tool 2</i> |
| State | Solved |
| Definition | |
| Theory | Max Equivalent Stress |
| Stress Limit Type | Tensile Yield Per Material |

TABLE 26

Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Stress Tool 2 > Results

| | |
|----------------------------------|----------------------|
| Object Name | <i>Safety Margin</i> |
| State | Suppressed |
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | All Bodies |
| Definition | |
| Type | Safety Margin |
| By | Time |
| Display Time | Last |
| Calculate Time History | Yes |
| Identifier | |
| Suppressed | Yes |
| Integration Point Results | |
| Display Option | Unaveraged |
| Results | |
| Minimum | |
| Minimum Occurs On | |
| Information | |
| Time | |
| Set | 0 |

Total Deformation

TABLE 27

Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Total Deformation > Results

| | |
|--------------------------------|--------------------------|
| Object Name | <i>Total Deformation</i> |
| State | Solved |
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 1 Body |
| Definition | |
| Type | Total Deformation |
| By | Time |
| Display Time | Last |
| Calculate Time History | Yes |
| Identifier | |
| Suppressed | No |
| Results | |
| Minimum | 2,6298e-004 m |
| Maximum | 1,1201e-002 m |
| Minimum Value Over Time | |
| Minimum | 0, m |
| Maximum | 2,7265e-004 m |
| Maximum Value Over Time | |
| Minimum | 0, m |
| Maximum | 1,1201e-002 m |
| Information | |
| Time | 1,e-002 s |
| Set | 101 |

FIGURE 7

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

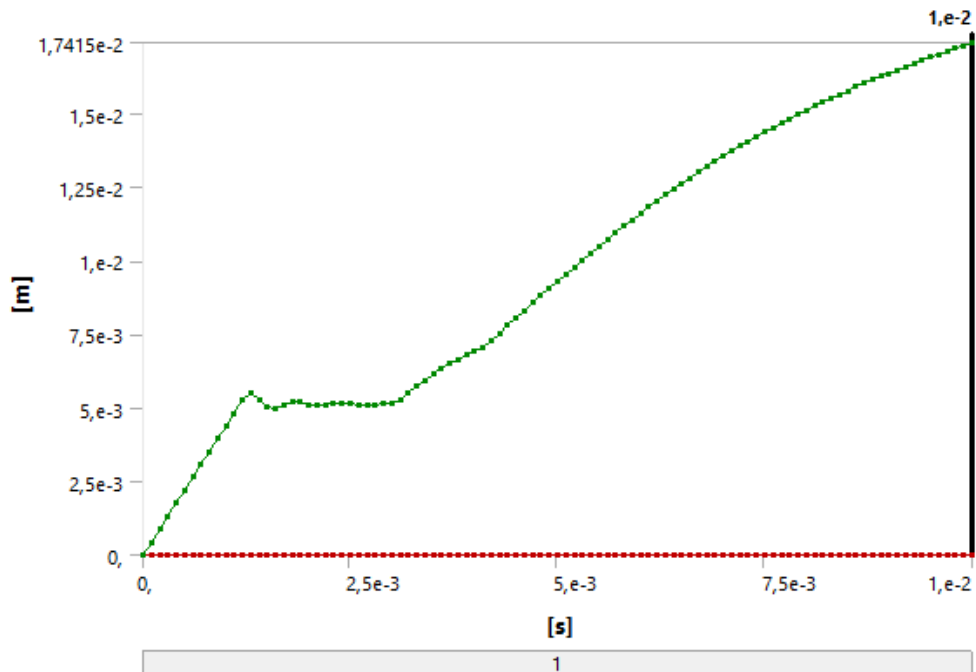




TABLE 28
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Total Deformation > Total Deformation

| Time [s] | Minimum [m] | Maximum [m] |
|-------------|-------------|-------------|
| 1,1755e-038 | 0, | 0, |
| 1,0006e-004 | | |
| 2,0013e-004 | | |
| 3,0007e-004 | 1,1358e-007 | 2,0109e-004 |
| 4,e-004 | 1,0663e-005 | 6,2967e-004 |
| 5,0007e-004 | 2,4605e-005 | 1,0544e-003 |
| 6,e-004 | 3,9175e-005 | 1,4982e-003 |
| 7,0007e-004 | 1,007e-004 | 1,9844e-003 |
| 8,0001e-004 | 1,4309e-004 | 2,3119e-003 |
| 9,0007e-004 | 1,4479e-004 | 2,5551e-003 |
| 1,0001e-003 | 2,1891e-004 | 2,8687e-003 |
| 1,1001e-003 | 2,1073e-004 | 3,0123e-003 |
| 1,2001e-003 | 1,9156e-004 | 3,1134e-003 |
| 1,3001e-003 | 1,9669e-004 | 3,9214e-003 |
| 1,4001e-003 | 1,6617e-004 | 4,8296e-003 |
| 1,5001e-003 | 1,8164e-004 | 5,5359e-003 |
| 1,6001e-003 | 1,8823e-004 | 6,0462e-003 |
| 1,7e-003 | 1,5072e-004 | 6,2655e-003 |
| 1,8001e-003 | 6,887e-005 | 6,2986e-003 |
| 1,9001e-003 | 5,3902e-005 | 6,2667e-003 |
| 2,0001e-003 | 1,578e-004 | 6,1535e-003 |
| 2,1001e-003 | 2,2611e-004 | 5,9995e-003 |
| 2,2e-003 | 2,7265e-004 | 5,8489e-003 |
| 2,3001e-003 | 2,5993e-004 | 5,6844e-003 |
| 2,4001e-003 | 2,4835e-004 | 5,5219e-003 |
| 2,5e-003 | 2,3664e-004 | 5,3775e-003 |
| 2,6e-003 | 2,2471e-004 | 5,2369e-003 |
| 2,7e-003 | 2,1377e-004 | 5,1027e-003 |
| 2,8e-003 | 2,033e-004 | 4,9786e-003 |
| 2,9001e-003 | 1,9342e-004 | 4,8576e-003 |
| 3,0001e-003 | 1,8479e-004 | 4,9564e-003 |
| 3,1001e-003 | 1,7721e-004 | 5,1164e-003 |
| 3,2e-003 | 1,7089e-004 | 5,2752e-003 |
| 3,3001e-003 | 1,6615e-004 | 5,4254e-003 |
| 3,4001e-003 | 1,6265e-004 | 5,5679e-003 |
| 3,5001e-003 | 1,6034e-004 | 5,7038e-003 |
| 3,6001e-003 | 1,5902e-004 | 5,8334e-003 |



| | | |
|-------------|-------------|-------------|
| 3,7e-003 | 1,5844e-004 | 6,0023e-003 |
| 3,8001e-003 | 1,5874e-004 | 6,1778e-003 |
| 3,9001e-003 | 1,5976e-004 | 6,3477e-003 |
| 4,0001e-003 | 1,6122e-004 | 6,5127e-003 |
| 4,1001e-003 | 1,6305e-004 | 6,6727e-003 |
| 4,2e-003 | 1,6512e-004 | 6,8281e-003 |
| 4,3001e-003 | 1,6725e-004 | 6,9793e-003 |
| 4,4001e-003 | 1,6947e-004 | 7,1261e-003 |
| 4,5e-003 | 1,7176e-004 | 7,269e-003 |
| 4,6001e-003 | 1,7403e-004 | 7,4086e-003 |
| 4,7001e-003 | 1,7626e-004 | 7,5446e-003 |
| 4,8e-003 | 1,7853e-004 | 7,6774e-003 |
| 4,9001e-003 | 1,8083e-004 | 7,8073e-003 |
| 5,0001e-003 | 1,831e-004 | 7,9341e-003 |
| 5,1e-003 | 1,8532e-004 | 8,058e-003 |
| 5,2001e-003 | 1,8755e-004 | 8,1793e-003 |
| 5,3001e-003 | 1,8979e-004 | 8,2977e-003 |
| 5,4e-003 | 1,9207e-004 | 8,4133e-003 |
| 5,5001e-003 | 1,9434e-004 | 8,5264e-003 |
| 5,6001e-003 | 1,9658e-004 | 8,6366e-003 |
| 5,7e-003 | 1,9878e-004 | 8,7441e-003 |
| 5,8001e-003 | 2,0099e-004 | 8,8489e-003 |
| 5,9001e-003 | 2,0318e-004 | 8,9509e-003 |
| 6,0001e-003 | 2,0533e-004 | 9,0501e-003 |
| 6,1e-003 | 2,0742e-004 | 9,1465e-003 |
| 6,2001e-003 | 2,095e-004 | 9,2404e-003 |
| 6,3001e-003 | 2,1156e-004 | 9,3314e-003 |
| 6,4001e-003 | 2,1358e-004 | 9,4198e-003 |
| 6,5e-003 | 2,1555e-004 | 9,5055e-003 |
| 6,6001e-003 | 2,1748e-004 | 9,5887e-003 |
| 6,7001e-003 | 2,1938e-004 | 9,6692e-003 |
| 6,8001e-003 | 2,2127e-004 | 9,7472e-003 |
| 6,9e-003 | 2,2314e-004 | 9,8227e-003 |
| 7,0001e-003 | 2,2497e-004 | 9,896e-003 |
| 7,1001e-003 | 2,2677e-004 | 9,9667e-003 |
| 7,2001e-003 | 2,2854e-004 | 1,0035e-002 |
| 7,3e-003 | 2,3031e-004 | 1,0101e-002 |
| 7,4e-003 | 2,3204e-004 | 1,0165e-002 |
| 7,5001e-003 | 2,3368e-004 | 1,0227e-002 |
| 7,6001e-003 | 2,3525e-004 | 1,0287e-002 |
| 7,7001e-003 | 2,3679e-004 | 1,0344e-002 |



| | | |
|-------------|-------------|-------------|
| 7,8e-003 | 2,3828e-004 | 1,04e-002 |
| 7,9001e-003 | 2,3972e-004 | 1,0453e-002 |
| 8,0001e-003 | 2,4109e-004 | 1,0505e-002 |
| 8,1001e-003 | 2,4243e-004 | 1,0554e-002 |
| 8,2001e-003 | 2,4374e-004 | 1,0602e-002 |
| 8,3e-003 | 2,4502e-004 | 1,0648e-002 |
| 8,4e-003 | 2,4626e-004 | 1,0693e-002 |
| 8,5001e-003 | 2,4746e-004 | 1,0735e-002 |
| 8,6001e-003 | 2,4864e-004 | 1,0776e-002 |
| 8,7001e-003 | 2,498e-004 | 1,0816e-002 |
| 8,8e-003 | 2,5093e-004 | 1,0853e-002 |
| 8,9e-003 | 2,5203e-004 | 1,089e-002 |
| 9,0001e-003 | 2,531e-004 | 1,0925e-002 |
| 9,1001e-003 | 2,5416e-004 | 1,0958e-002 |
| 9,2001e-003 | 2,5521e-004 | 1,099e-002 |
| 9,3001e-003 | 2,5623e-004 | 1,1021e-002 |
| 9,4e-003 | 2,5724e-004 | 1,105e-002 |
| 9,5e-003 | 2,5822e-004 | 1,1078e-002 |
| 9,6e-003 | 2,592e-004 | 1,1105e-002 |
| 9,7001e-003 | 2,6017e-004 | 1,1131e-002 |
| 9,8001e-003 | 2,6112e-004 | 1,1155e-002 |
| 9,9001e-003 | 2,6205e-004 | 1,1179e-002 |
| 1,e-002 | 2,6298e-004 | 1,1201e-002 |

Von Mises

TABLE 29
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Von Mises > Results

| | |
|------------------------|-------------------------------|
| Object Name | <i>Equivalent Stress</i> |
| State | Solved |
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 1 Body |
| Definition | |
| Type | Equivalent (von-Mises) Stress |
| By | Time |
| Display Time | 1,1001e-003 s |
| Calculate Time History | Yes |
| Identifier | |
| Suppressed | No |



| Integration Point Results | |
|----------------------------------|----------------|
| Display Option | Averaged |
| Average Across Bodies | No |
| Results | |
| Minimum | 2,2304e+005 Pa |
| Maximum | 1,2109e+008 Pa |
| Minimum Value Over Time | |
| Minimum | 0, Pa |
| Maximum | 3,9666e+005 Pa |
| Maximum Value Over Time | |
| Minimum | 0, Pa |
| Maximum | 1,2109e+008 Pa |
| Information | |
| Time | 1,1001e-003 s |
| Set | 12 |

FIGURE 8

Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Von Mises > Equivalent Stress

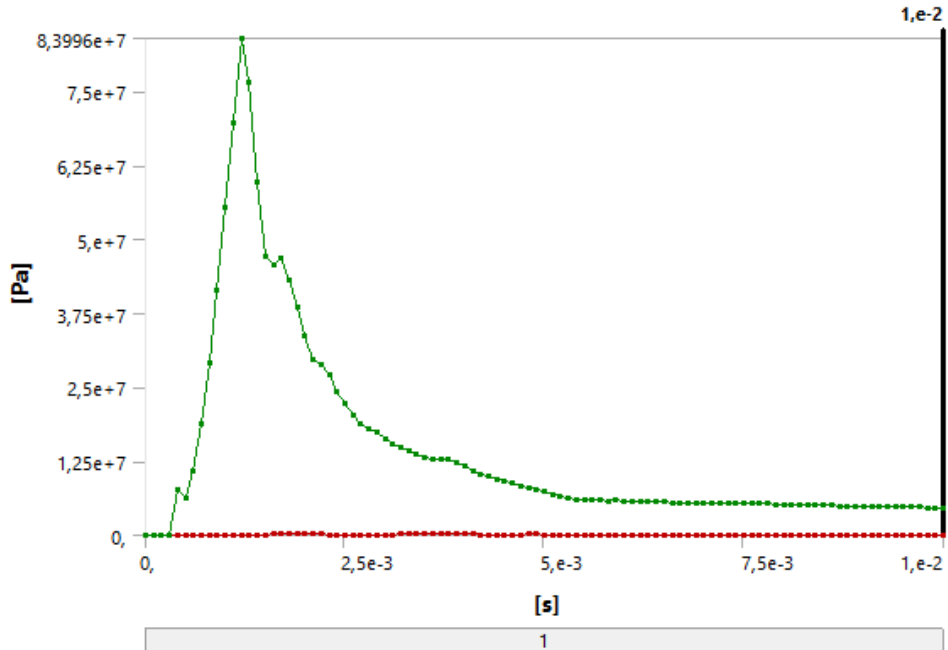


TABLE 30

Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Von Mises > Equivalent Stress

| Time [s] | Minimum [Pa] | Maximum [Pa] |
|-------------|--------------|--------------|
| 1,1755e-038 | | |
| 1,0006e-004 | 0, | 0, |
| 2,0013e-004 | | |
| 3,0007e-004 | 51043 | 2,7334e+006 |
| 4,e-004 | 24601 | 5,3297e+006 |
| 5,0007e-004 | 1,1598e+005 | 2,1745e+007 |
| 6,e-004 | 2,1993e+005 | 5,9273e+007 |
| 7,0007e-004 | 2,1076e+005 | 9,84e+007 |
| 8,0001e-004 | 3,9666e+005 | 8,9785e+007 |
| 9,0007e-004 | 80915 | 1,0813e+008 |
| 1,0001e-003 | 1,5802e+005 | 1,1713e+008 |
| 1,1001e-003 | 2,2304e+005 | 1,2109e+008 |
| 1,2001e-003 | 2,699e+005 | 1,0734e+008 |
| 1,3001e-003 | 3,6e+005 | 9,8333e+007 |



| | | |
|-------------|-------------|-------------|
| 1,4001e-003 | 2,2912e+005 | 9,5651e+007 |
| 1,5001e-003 | 3,2194e+005 | 8,9379e+007 |
| 1,6001e-003 | 2,6029e+005 | 9,2877e+007 |
| 1,7e-003 | 1,6479e+005 | 9,1582e+007 |
| 1,8001e-003 | 1,2808e+005 | 9,1027e+007 |
| 1,9001e-003 | 96799 | 8,8644e+007 |
| 2,0001e-003 | 87591 | 8,5754e+007 |
| 2,1001e-003 | 2,2988e+005 | 8,2512e+007 |
| 2,2e-003 | 1,8711e+005 | 7,751e+007 |
| 2,3001e-003 | 2,4256e+005 | 7,4464e+007 |
| 2,4001e-003 | 1,1492e+005 | 7,0976e+007 |
| 2,5e-003 | 81453 | 6,6891e+007 |
| 2,6e-003 | 93789 | 6,4071e+007 |
| 2,7e-003 | 63791 | 6,0277e+007 |
| 2,8e-003 | 77945 | 5,5473e+007 |
| 2,9001e-003 | 51546 | 5,2912e+007 |
| 3,0001e-003 | 41521 | 5,0928e+007 |
| 3,1001e-003 | 29451 | 4,7576e+007 |
| 3,2e-003 | 65617 | 4,4639e+007 |
| 3,3001e-003 | 61095 | 4,2153e+007 |
| 3,4001e-003 | 47905 | 3,9616e+007 |
| 3,5001e-003 | 33263 | 3,7468e+007 |
| 3,6001e-003 | 31411 | 3,5665e+007 |
| 3,7e-003 | 42544 | 3,3726e+007 |
| 3,8001e-003 | 42529 | 3,2186e+007 |
| 3,9001e-003 | 37897 | 3,1202e+007 |
| 4,0001e-003 | 45715 | 3,0198e+007 |
| 4,1001e-003 | 39347 | 2,8837e+007 |
| 4,2e-003 | 50123 | 2,7655e+007 |
| 4,3001e-003 | 59996 | 2,6857e+007 |
| 4,4001e-003 | 47138 | 2,6239e+007 |
| 4,5e-003 | 42618 | 2,5505e+007 |
| 4,6001e-003 | 45502 | 2,4688e+007 |
| 4,7001e-003 | 48034 | 2,3943e+007 |
| 4,8e-003 | 45604 | 2,338e+007 |
| 4,9001e-003 | 45832 | 2,2873e+007 |
| 5,0001e-003 | 54069 | 2,2241e+007 |
| 5,1e-003 | 63370 | 2,1549e+007 |
| 5,2001e-003 | 62577 | 2,1028e+007 |
| 5,3001e-003 | 53881 | 2,0677e+007 |
| 5,4e-003 | 49347 | 2,0267e+007 |



| | | |
|-------------|-------|-------------|
| 5,5001e-003 | 51049 | 1,9718e+007 |
| 5,6001e-003 | 55923 | 1,9188e+007 |
| 5,7e-003 | 54300 | 1,8818e+007 |
| 5,8001e-003 | 47767 | 1,8529e+007 |
| 5,9001e-003 | 43881 | 1,8185e+007 |
| 6,0001e-003 | 42633 | 1,7764e+007 |
| 6,1e-003 | 38885 | 1,7395e+007 |
| 6,2001e-003 | 31330 | 1,7137e+007 |
| 6,3001e-003 | 25499 | 1,6908e+007 |
| 6,4001e-003 | 24144 | 1,6601e+007 |
| 6,5e-003 | 25414 | 1,626e+007 |
| 6,6001e-003 | 22823 | 1,5992e+007 |
| 6,7001e-003 | 16852 | 1,5811e+007 |
| 6,8001e-003 | 14661 | 1,5617e+007 |
| 6,9e-003 | 15437 | 1,5355e+007 |
| 7,0001e-003 | 17025 | 1,5087e+007 |
| 7,1001e-003 | 18569 | 1,4889e+007 |
| 7,2001e-003 | 21379 | 1,4742e+007 |
| 7,3e-003 | 24536 | 1,4566e+007 |
| 7,4e-003 | 26366 | 1,435e+007 |
| 7,5001e-003 | 28912 | 1,4154e+007 |
| 7,6001e-003 | 32668 | 1,4016e+007 |
| 7,7001e-003 | 37038 | 1,3898e+007 |
| 7,8e-003 | 40017 | 1,3751e+007 |
| 7,9001e-003 | 41966 | 1,3582e+007 |
| 8,0001e-003 | 44487 | 1,3442e+007 |
| 8,1001e-003 | 48208 | 1,3344e+007 |
| 8,2001e-003 | 51960 | 1,3248e+007 |
| 8,3e-003 | 54511 | 1,3124e+007 |
| 8,4e-003 | 56156 | 1,2994e+007 |
| 8,5001e-003 | 58536 | 1,2892e+007 |
| 8,6001e-003 | 61822 | 1,2815e+007 |
| 8,7001e-003 | 64640 | 1,2731e+007 |
| 8,8e-003 | 66469 | 1,2627e+007 |
| 8,9e-003 | 67967 | 1,2527e+007 |
| 9,0001e-003 | 70206 | 1,245e+007 |
| 9,1001e-003 | 72875 | 1,2386e+007 |
| 9,2001e-003 | 74922 | 1,231e+007 |
| 9,3001e-003 | 76095 | 1,2223e+007 |
| 9,4e-003 | 77247 | 1,2145e+007 |
| 9,5e-003 | 78965 | 1,2085e+007 |



| | | |
|-------------|-------|-------------|
| 9,6e-003 | 71153 | 1,2028e+007 |
| 9,7001e-003 | 67258 | 1,1961e+007 |
| 9,8001e-003 | 65713 | 1,189e+007 |
| 9,9001e-003 | 62719 | 1,1829e+007 |
| 1,e-002 | 59908 | 1,1779e+007 |

Maximun Principal Stress

TABLE 31

Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Maximun Principal Stress > Results

| | |
|----------------------------------|---------------------------------|
| Object Name | <i>Maximum Principal Stress</i> |
| State | Solved |
| Scope | |
| Scoping Method | Geometry Selection |
| Geometry | 1 Body |
| Definition | |
| Type | Maximum Principal Stress |
| By | Time |
| Display Time | 1,0001e-003 s |
| Calculate Time History | Yes |
| Identifier | |
| Suppressed | No |
| Integration Point Results | |
| Display Option | Averaged |
| Average Across Bodies | No |
| Results | |
| Minimum | -3,455e+005 Pa |
| Maximum | 9,4933e+007 Pa |
| Minimum Value Over Time | |
| Minimum | -5,2536e+006 Pa |
| Maximum | 0, Pa |
| Maximum Value Over Time | |
| Minimum | 0, Pa |
| Maximum | 9,4933e+007 Pa |
| Information | |
| Time | 1,0001e-003 s |
| Set | 11 |

FIGURE 9
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Maximum Principal Stress > Maximum Principal Stress

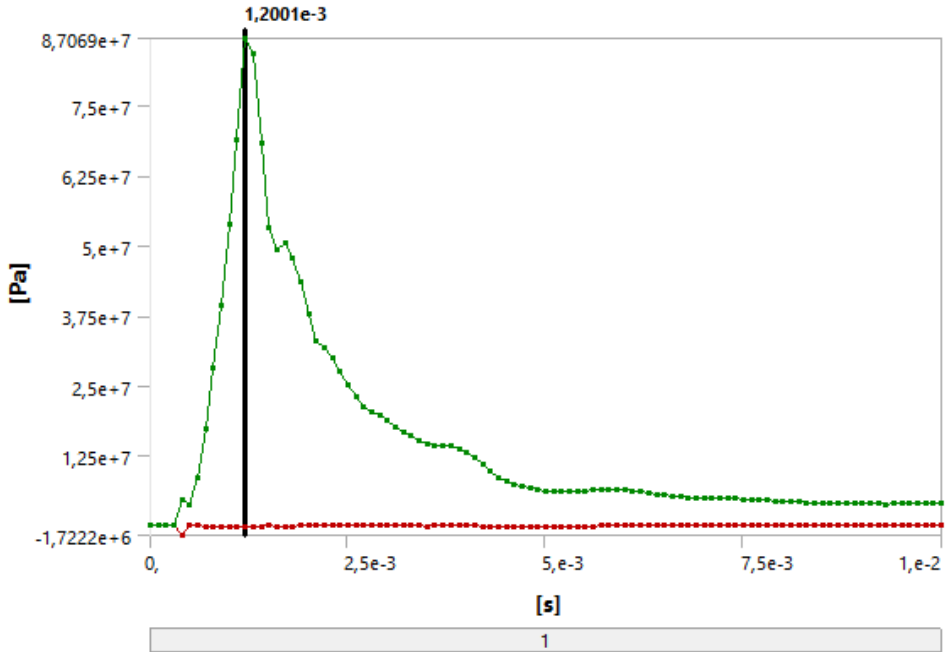


TABLE 32
Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Solution (A6) > Maximum Principal Stress > Maximum Principal Stress

| Time [s] | Minimum [Pa] | Maximum [Pa] |
|-------------|--------------|--------------|
| 1,1755e-038 | | |
| 1,0006e-004 | 0, | 0, |
| 2,0013e-004 | | |
| 3,0007e-004 | -79550 | 2,0057e+006 |
| 4,e-004 | -57635 | 4,6391e+006 |
| 5,0007e-004 | -1,2419e+006 | 1,5204e+007 |
| 6,e-004 | -5,2755e+005 | 3,2423e+007 |
| 7,0007e-004 | -2,8574e+006 | 4,9893e+007 |
| 8,0001e-004 | -2,2398e+005 | 6,8302e+007 |
| 9,0007e-004 | -7,242e+005 | 8,8209e+007 |
| 1,0001e-003 | -3,455e+005 | 9,4933e+007 |
| 1,1001e-003 | -1,8017e+005 | 9,3603e+007 |
| 1,2001e-003 | -1,5484e+005 | 8,7543e+007 |
| 1,3001e-003 | -3,9548e+005 | 7,589e+007 |



| | | |
|-------------|--------------|-------------|
| 1,4001e-003 | -5,2536e+006 | 7,4682e+007 |
| 1,5001e-003 | -3,7221e+006 | 5,8433e+007 |
| 1,6001e-003 | -1,9503e+006 | 4,8907e+007 |
| 1,7e-003 | -1,0176e+006 | 4,5921e+007 |
| 1,8001e-003 | -5,3186e+005 | 4,2445e+007 |
| 1,9001e-003 | -4,2127e+005 | 3,8975e+007 |
| 2,0001e-003 | -3,2292e+005 | 3,8302e+007 |
| 2,1001e-003 | -3,5869e+005 | 3,8246e+007 |
| 2,2e-003 | -3,022e+005 | 3,5977e+007 |
| 2,3001e-003 | -2,5295e+005 | 3,322e+007 |
| 2,4001e-003 | -2,7647e+005 | 3,274e+007 |
| 2,5e-003 | -1,9191e+005 | 3,1812e+007 |
| 2,6e-003 | -1,1129e+005 | 3,0417e+007 |
| 2,7e-003 | -1,2557e+005 | 2,9631e+007 |
| 2,8e-003 | -1,3898e+005 | 2,9183e+007 |
| 2,9001e-003 | -1,427e+005 | 2,7839e+007 |
| 3,0001e-003 | -1,4529e+005 | 2,6473e+007 |
| 3,1001e-003 | -1,4456e+005 | 2,554e+007 |
| 3,2e-003 | -1,4173e+005 | 2,4296e+007 |
| 3,3001e-003 | -1,3822e+005 | 2,321e+007 |
| 3,4001e-003 | -1,3479e+005 | 2,2713e+007 |
| 3,5001e-003 | -1,3011e+005 | 2,2189e+007 |
| 3,6001e-003 | -1,2454e+005 | 2,1249e+007 |
| 3,7e-003 | -1,1964e+005 | 2,0428e+007 |
| 3,8001e-003 | -1,1558e+005 | 1,9704e+007 |
| 3,9001e-003 | -1,1167e+005 | 1,8941e+007 |
| 4,0001e-003 | -1,0673e+005 | 1,8214e+007 |
| 4,1001e-003 | -1,0131e+005 | 1,7555e+007 |
| 4,2e-003 | -96202 | 1,6937e+007 |
| 4,3001e-003 | -91372 | 1,6369e+007 |
| 4,4001e-003 | -86399 | 1,5988e+007 |
| 4,5e-003 | -81426 | 1,5742e+007 |
| 4,6001e-003 | -76898 | 1,549e+007 |
| 4,7001e-003 | -73342 | 1,5271e+007 |
| 4,8e-003 | -70325 | 1,4983e+007 |
| 4,9001e-003 | -67044 | 1,4615e+007 |
| 5,0001e-003 | -63558 | 1,4357e+007 |
| 5,1e-003 | -60613 | 1,4257e+007 |
| 5,2001e-003 | -58383 | 1,4136e+007 |
| 5,3001e-003 | -56300 | 1,3962e+007 |
| 5,4e-003 | -54073 | 1,3859e+007 |



| | | |
|-------------|--------|-------------|
| 5,5001e-003 | -51888 | 1,381e+007 |
| 5,6001e-003 | -50029 | 1,371e+007 |
| 5,7e-003 | -48323 | 1,3543e+007 |
| 5,8001e-003 | -46490 | 1,3385e+007 |
| 5,9001e-003 | -44477 | 1,3281e+007 |
| 6,0001e-003 | -42653 | 1,3234e+007 |
| 6,1e-003 | -41173 | 1,3172e+007 |
| 6,2001e-003 | -39801 | 1,3042e+007 |
| 6,3001e-003 | -38025 | 1,2881e+007 |
| 6,4001e-003 | -36411 | 1,277e+007 |
| 6,5e-003 | -35200 | 1,2697e+007 |
| 6,6001e-003 | -33981 | 1,26e+007 |
| 6,7001e-003 | -23985 | 1,2475e+007 |
| 6,8001e-003 | -16157 | 1,2373e+007 |
| 6,9e-003 | -15857 | 1,2311e+007 |
| 7,0001e-003 | -15376 | 1,2251e+007 |
| 7,1001e-003 | -15004 | 1,2157e+007 |
| 7,2001e-003 | -14891 | 1,2046e+007 |
| 7,3e-003 | -15159 | 1,1961e+007 |
| 7,4e-003 | -15399 | 1,1914e+007 |
| 7,5001e-003 | -15546 | 1,187e+007 |
| 7,6001e-003 | -15686 | 1,1802e+007 |
| 7,7001e-003 | -15832 | 1,1721e+007 |
| 7,8e-003 | -15933 | 1,1658e+007 |
| 7,9001e-003 | -15954 | 1,1618e+007 |
| 8,0001e-003 | -15921 | 1,157e+007 |
| 8,1001e-003 | -15937 | 1,1501e+007 |
| 8,2001e-003 | -16014 | 1,1435e+007 |
| 8,3e-003 | -16077 | 1,139e+007 |
| 8,4e-003 | -16035 | 1,1355e+007 |
| 8,5001e-003 | -15937 | 1,1306e+007 |
| 8,6001e-003 | -15864 | 1,1243e+007 |
| 8,7001e-003 | -15828 | 1,1187e+007 |
| 8,8e-003 | -15764 | 1,1147e+007 |
| 8,9e-003 | -15657 | 1,1111e+007 |
| 9,0001e-003 | -15540 | 1,1063e+007 |
| 9,1001e-003 | -15454 | 1,1009e+007 |
| 9,2001e-003 | -15369 | 1,0963e+007 |
| 9,3001e-003 | -15244 | 1,0928e+007 |
| 9,4e-003 | -15071 | 1,0891e+007 |
| 9,5e-003 | -14935 | 1,0844e+007 |



| | | |
|-------------|--------|-------------|
| 9,6e-003 | -14804 | 1,0797e+007 |
| 9,7001e-003 | -14677 | 1,0757e+007 |
| 9,8001e-003 | -14503 | 1,0723e+007 |
| 9,9001e-003 | -14323 | 1,0686e+007 |
| 1,e-002 | -14153 | 1,0642e+007 |



Material Data

PROTECTOR

TABLE 33
PROTECTOR > Constants

| | |
|---------|--------------------------|
| Density | 1400, kg m ⁻³ |
|---------|--------------------------|

TABLE 34
PROTECTOR > Isotropic Elasticity

| Temperature C | Young's Modulus Pa | Poisson's Ratio | Bulk Modulus Pa | Shear Modulus Pa |
|---------------|--------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| | 4,59e+010 | 0,47588 | 3,1722e+011 | 1,555e+010 |

STNL.STEEL

TABLE 35
STNL.STEEL > Constants

| | |
|---------------|--|
| Density | 7860, kg m ⁻³ |
| Specific Heat | 1,e-012 J kg ⁻¹ C ⁻¹ |

TABLE 36
STNL.STEEL > Shock EOS Linear

| Gruneisen Coefficient | Parameter C1 m s ⁻¹ | Parameter S1 | Parameter Quadratic S2 s m ⁻¹ |
|-----------------------|--------------------------------|--------------|--|
| 1,67 | 4610, | 1,73 | 0, |

TABLE 37
STNL.STEEL > Shear Modulus

| | |
|------------------|----------|
| Shear Modulus Pa | 7,3e+010 |
|------------------|----------|

TABLE 38
STNL.STEEL > Multilinear Isotropic Hardening

| Stress Pa | Plastic Strain m m ⁻¹ | Temperature C |
|-----------|----------------------------------|---------------|
| 6,89e+008 | 0, | 0, |
| 1,e+009 | 0,3 | 0, |
| 1,e+009 | 1,e+020 | 0, |