

Proyecto Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Estudio del fenómeno de Spring-back en piezas de  
material compuesto

Autor: Jose María Delgado Bastarreche

Tutor: Enrique Graciani Díaz

**Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2017





Proyecto Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

# **Estudio del fenómeno de Spring-Back en piezas de material compuesto**

Autor:  
Jose María Delgado Bastarreche

Tutor:  
Enrique Graciani Díaz  
Profesor titular

Grupo de Elasticidad y Resistencia de los Materiales  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2016



Proyecto Fin de Grado: Estudio del fenómeno de Spring-back en piezas de material compuesto.

Autor: Jose María Delgado Bastarreche  
Tutor: Enrique Graciani Díaz

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

*A todo aquel que me acompañó  
durante estos fantásticos años.*

# Agradecimientos

---

Agradecer en primer lugar a Don Enrique Graciani Díaz, tutor de este proyecto y profesor anteriormente, por su gran ayuda, su completa implicación y por supuesto, por estar siempre disponible en su despacho o por correo para resolver cualquier duda durante todo el desarrollo del proyecto. Gracias al grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales por los medios y el apoyo prestado.

A mi familia, por apoyarme y animarme siempre que lo he necesitado.

A mis amigos, con los que he podido desconectar y olvidarme del estrés.

A los amigos forjados en la universidad, que han pasado conmigo estos duros años.

Al grupo de Materiales con los que he pasado dos años geniales.

# Resumen

---

El uso de los materiales compuestos en la industria es cada vez mayor debido a sus propiedades y a su gran versatilidad. El sector que más utiliza estos materiales es el aeroespacial, en el cual la tolerancia dimensional es mínima. A pesar del auge en su uso, todavía no se conoce a la perfección su comportamiento y por tanto su verdadero potencial. Esta es la razón de que sean objeto de estudio en la mayoría de proyectos del Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales.

Este proyecto surge para resolver un fenómeno que aparece en la fabricación mediante el curado de piezas de material compuesto que contienen zonas curvas o codos en su geometría. El Spring-back supone un serio problema en el proceso de fabricación con materiales compuestos, pues produce deformaciones durante el curado de la pieza que pueden sobrepasar las tolerancias dimensionales.

Para llevar a cabo este estudio, se realizarán modelos numéricos mediante elementos finitos tipo *Solid* con el programa comercial MSC Nastran-Patran. Se espera poder modelar este fenómeno correctamente y que se pueda resolver en un tiempo pequeño, aumentando el tamaño de los elementos en ciertas zonas.





# Abstract

---

The use of composite materials in the industry is growing due to their properties and great versatility. More than any other sector, the aerospace sector utilizes these materials, where the dimensional tolerance is minimal. Despite the rise in their use, neither their behavior or potential is perfectly understood. This is the reason why they are object of study in most of the projects of the Elasticity and Resistance of Materials Group.

This project has been created to solve a phenomenon that appears in manufacturing during the process of curing pieces of composite materials which contain curved areas or corners in their geometry. The Spring-back is a serious problem in the fabrication process of composite materials, because it produces deformations during the curing of the piece that can exceed the dimensional tolerances.

To carry out this project, we will make numerical models using finite elements *Solid* type with the commercial program MSC Nastran-Patran will be developed. It's expected to be able to model correctly this phenomenon and solve it in a short time, increasing the size of the elements in certain areas.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>vii</b>
<b>Resumen</b>	<b>viii</b>
<b>Abstract</b>	<b>x</b>
<b>Índice</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>xii</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Fenómeno Spring-back	2
<b>2 Objetivos del proyecto</b>	<b>4</b>
<b>3 Antecedentes</b>	<b>5</b>
3.1 Comportamiento esperado. Soluciones analíticas	5
3.2 Estudio experimental previo	6
<b>4 Estudio numérico</b>	<b>8</b>
4.1 Descripción del modelo	8
4.1.1 Tipo de elemento	8
4.1.2 Cargas y condiciones de contorno	9
4.1.3 Propiedades anisótropas	10
4.2 Probeta 0°	14
4.2.1 Creación del modelo	14
4.2.2 Mallado	23
4.2.3 Análisis y resultados	24
4.2.4 Remallado	30
4.3 Probeta 90°	34
4.4 Probeta [90°, 45°, -45°, 0°] <i>S</i>	37
<b>5 Conclusiones</b>	<b>42</b>
<b>6 Referencias</b>	<b>44</b>

# Índice de tablas

---

Tabla 1. Resultados obtenidos experimentalmente [1].	7
Tabla 2. Coeficientes de térmicos en función de la orientación.	13
Tabla 3. Coeficientes térmicos probeta $0^\circ$ .	18
Tabla 4. Resultados del ángulo de cierre probeta $0^\circ$ .	29
Tabla 5. Comparación de datos obtenidos del cálculo probeta $0^\circ$ .	33
Tabla 6. Coeficientes térmicos probeta $90^\circ$ .	34
Tabla 7. Resultados desplazamiento X probeta $90^\circ$ .	37
Tabla 8. Coeficientes térmicos probetas $45^\circ$ y $-45^\circ$ .	38
Tabla 9. Resultados del ángulo de cierre probeta $90^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ S$ .	40
Tabla 10. Comparación de datos obtenidos del cálculo probeta $[90^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]S$ .	41

# Índice de figuras

Figura 1. Spring-back en chapa metálica [2]	2
Figura 2. Dibujo aclarativo Spring-back.	3
Figura 3. Tipos de elementos [3].	8
Figura 4. Condiciones de contorno.	10
Figura 5. Ejes del elemento [5].	11
Figura 6. Longitud alas.	14
Figura 7. Crear volumen 1.	15
Figura 8. Primer ala.	16
Figura 9. Arco exterior.	16
Figura 10. Sistema de coordenadas elementos.	17
Figura 11. Propiedades probeta 0°.	18
Figura 12. Crear propiedades probeta 0°.	19
Figura 13. Condición de contorno de temperatura.	20
Figura 14. Desplazamiento en X primeras condiciones de contorno.	20
Figura 15. Deformada primeras condiciones de contorno.	21
Figura 16. Nuevas condiciones de contorno.	21
Figura 17. Desplazamiento en X nuevas condiciones de contorno.	22
Figura 18. Deformada nuevas condiciones de contorno.	22
Figura 19. Deformada con nuevo largo.	23
Figura 20. Malla de 0.2 mm.	24
Figura 21. Condiciones de contorno del caso de carga.	24
Figura 22. Cuadro de Output Request.	25
Figura 23. Deformada modelo 0° con longitud elemento 0.2 mm.	26
Figura 24. Desplazamiento en X modelo 0° con longitud de elemento 0.2 mm.	26
Figura 25. Desplazamiento en Y modelo 0° con longitud de elemento 0.2 mm.	27
Figura 26. Desplazamiento en Z modelo 0° con longitud de elemento 0.2 mm.	27
Figura 27. Parte de lista desplazamientos X/localización Z.	28
Figura 28. Desplazamientos X frente a localización Z de modelo 0.2 mm.	29
Figura 29. Mesh Seed uniforme 0.4 mm.	30
Figura 30. Mesh Seed One Way Bias 0.2-0.4 mm.	31
Figura 31. Desplazamientos X frente a localización Z de todos los modelos probeta 0°.	32
Figura 32. Mallado 12.8 mm y 1.6 mm en la curva.	34
Figura 33. Deformada modelo 90°.	35
Figura 34. Desplazamiento en X modelo 90°.	36
Figura 35. Desplazamiento en Y modelo 90°.	36
Figura 36. Desplazamiento en Z modelo 90°.	36
Figura 37. Dividir sólidos.	37
Figura 38. Geometría con ocho sólidos.	38

Figura 39. Distribución láminas.	39
Figura 40. Condiciones de contorno $u_y$ en la curva.	39
Figura 41. Deformada modelo $90^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ S$ .	40
Figura 42. Desplazamientos X frente a localización Z de todos los modelos probeta $90^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ S$ .	41

# 1 INTRODUCCIÓN

---

En este proyecto se va a estudiar la deformación de una serie de probetas de material compuesto en forma de L, debida al enfriamiento de éstas tras su curado en autoclave. Es una continuación del proyecto “Estudio de deformaciones por enfriamiento tras el curado en piezas de material compuesto” [1], en el que se obtuvieron unos resultados del estudio numérico que no fueron los esperados, los cuáles se intentarán mejorar en este proyecto. El estudio experimental que se realizó en dicho proyecto se comparará con los resultados que se obtengan en los modelos del presente proyecto.

Las probetas que se fabricaron en el proyecto anterior y que por tanto deben ser las que se modelen en este son de fibra de carbono, cuyas propiedades se especificarán más adelante. Se hicieron tres probetas, con distintas secuencias de apilado para ver cómo cambiaban las deformaciones en función de éstas. Es interesante el estudio de probetas con diferentes orientaciones de las fibras ya que los materiales compuestos tienen la capacidad de variar su comportamiento mecánico en función de en qué orientación se coloquen éstas.

De hecho no solo varían su comportamiento mecánico por la orientación de las fibras, en concreto, si se modifican parámetros como la proporción fibra-matriz, el número de láminas o la longitud de las fibras se consigue también variar las propiedades del material resultante. Ésta es una de las razones por las que su uso en la industria es cada vez mayor, se puede diseñar un material diferente para cada aplicación que requiera unas propiedades diferentes, solo variando ciertos parámetros a la hora de su fabricación. Dicha versatilidad lleva asociada un desconocimiento, esto sumado a la relativa modernidad de los materiales compuestos provoca que a la hora del diseño se utilicen coeficientes de seguridad elevados y no se aproveche al máximo la capacidad del material.

Uno de los grandes problemas de los materiales compuestos es su producción, debido a la modernidad y la complejidad estos materiales. Muchas veces la fabricación debe ser manual, lo que repercute en el coste de producción del material por los largos tiempos de producción. Si la fabricación no es a mano, se requiere de máquinas y útiles de un alto coste también. Otro de los problemas de la producción del material compuesto en el que se centra este proyecto es el fenómeno conocido como Spring-back, que se produce debido al enfriamiento tras el curado y que produce una deformación en la pieza curada difícil de controlar.

## 1.1 Fenómeno Spring-back

Los materiales compuestos son usados en la industria automovilística, en el deporte y cada vez más en la vida cotidiana, pero dónde su uso ha crecido a una velocidad más rápida es en la industria aeroespacial, debido a su baja densidad y a su alta resistencia específica, lo que es muy interesante para esta industria.

Dada la necesidad de cumplir con los requisitos aerodinámicos, en la industria aeronáutica hay una muy baja tolerancia dimensional en muchas de las piezas que se incluyen dentro del montaje del avión. Esto hace que surja una preocupación con las deformaciones producidas en las piezas curadas, es decir, con el Spring-back.

El término Spring-back o recuperación elástica, en español, no es algo propio de los materiales compuestos, surge del conformado de chapa metálica. Cuando se sometía la chapa a deformación plástica como embutición o doblado, se notó que al retirar la carga la pieza tendía a volver a su posición inicial, esto se debe a que recupera su parte de deformación elástica (ver Figura 1). Se ha investigado mucho sobre cómo compensar o predecir este efecto en los metales, con lo que es posible determinar a priori la forma final de la pieza, pero en los materiales compuestos el fenómeno tiene distintas causas y no es posible, a día de hoy, determinar de forma sencilla y fiable la forma final de la pieza con precisión suficiente.

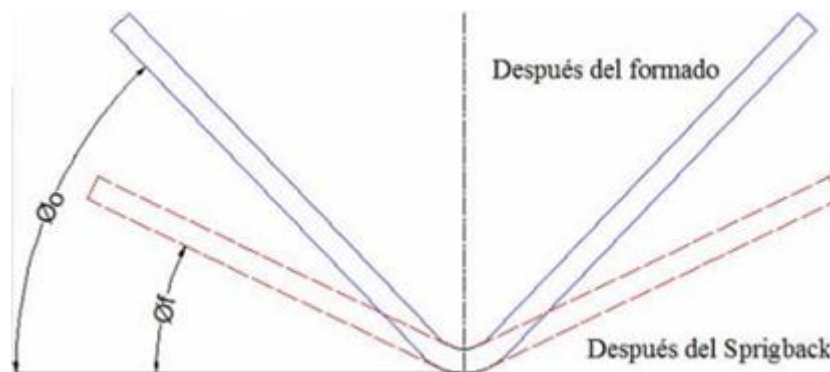


Figura 1. Spring-back en chapa metálica [2]

El Spring-back en materiales compuestos se debe fundamentalmente a tres fenómenos:

- Las contracciones químicas durante el curado de la resina
- Las deformaciones termoelásticas durante el enfriamiento tras el curado
- La interacción entre el material y el molde

En este proyecto nos vamos a centrar en la segunda, se van a estudiar probetas de perfil en L y se verá que disminuirá el ángulo para dejar de ser recto, es decir, se cerrarán, siendo difícil de predecir el ángulo final obtenido.

Las probetas se curaron a una temperatura de  $180^{\circ}\text{C}$  y la temperatura del ambiente se puede suponer como  $25^{\circ}\text{C}$  con lo que la variación de temperatura que es lo realmente importante sería de  $\Delta T = -155^{\circ}\text{C}$ . Esto provoca sus deformaciones correspondientes, que si fueran en un material isótropo, como el acero, provocarían un cambio en el tamaño de la pieza, no en la forma. Pero en materiales compuestos es diferente, ya que son anisótropos y no se deforman igual en todas las direcciones.



Al ser anisótropos, los materiales compuestos tienen coeficientes de expansión térmica diferentes para cada dirección, esto es lo que realmente provoca el cambio de forma de las probetas. Sucede en codos o zonas curvas, dado que en esa zona el radio interior será menor que el radio exterior, la magnitud de esta diferencia viene dada por el espesor de la pieza. Al tener las fibras longitudes diferentes, a una misma variación de temperatura, tendrán diferentes deformaciones, las fibras del radio interior se deformarán menos que las del radio exterior. Esto sumado a que el coeficiente de expansión térmica en el espesor es diferente al del que lleva la dirección de las fibras, provoca un cambio en la forma de la pieza, para poder compatibilizar dichas deformaciones, tal como se esquematiza en la Figura 2.

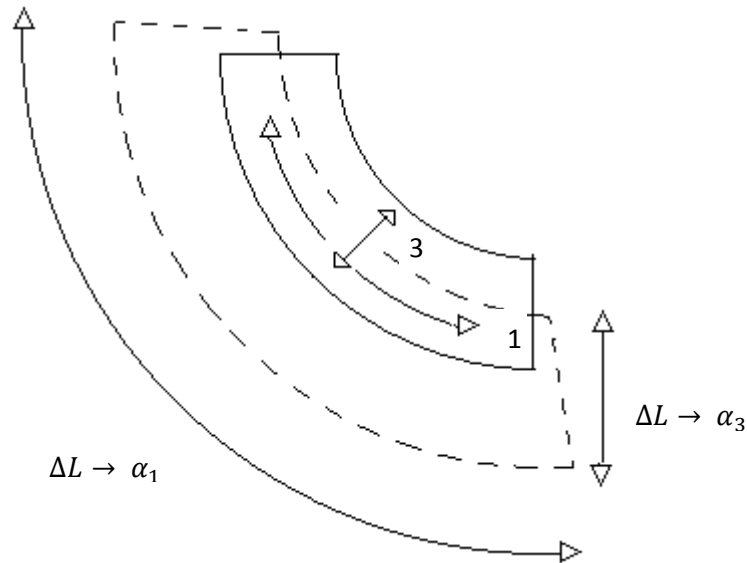


Figura 2. Dibujo aclarativo Spring-back.

## 2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

---

Como se ha dicho anteriormente, en la industria aeroespacial hay una preocupación en torno al fenómeno Spring-back, debido a que las grandes estructuras de compuestos requieren uniones de en las que es deseable reducir al mínimo las tolerancias dimensionales.

Hasta ahora, se han enfrentado a este problema mediante métodos experimentales, prácticamente individuales para cada pieza de estudio, en función de la forma y las propiedades de ésta. Se conseguía saber la deformación fabricando la pieza y posteriormente midiendo sus desplazamientos. Esto acarrea unos costes de ensayos enormes que se están intentando reducir mediante otros métodos para hallar las deformaciones, ya no experimentales.

El objetivo principal del proyecto es, por tanto, desarrollar una herramienta de simulación que permita calcular el Spring-back en piezas de material compuesto a través de un análisis numérico con elementos finitos empleando elementos sólidos. A pesar de que ésta deformación depende de muchos factores, como el método de fabricación de la pieza, el volumen de fibras y matriz, el material del molde o la presión de curado, proyecto se centra en la variación de temperatura y en la forma de la pieza.

Los resultados que salgan de la simulación se compararán con los obtenidos experimentalmente en el proyecto anterior, ya que las propiedades y la geometría de las probetas que se van a introducir en el programa se cogerán de las que se fabricaron. Es probable que los resultados no se ajusten correctamente a los experimentales. Debido, por un lado a que los modelos solo incluyen parte de los fenómenos causantes del Spring-back y, por otro, a que la fabricación de las probetas y las medidas del ángulo de cierre no fueron lo suficientemente cuidadosas.

El otro objetivo del proyecto es averiguar cuánto y en qué zonas se puede aumentar el tamaño de los elementos de la malla de elementos finitos, sin que se pierda precisión en los resultados. Se va a partir de una malla fina en la cual los elementos tendrán un factor de forma adecuado para hallar la deformación de la probeta, estos van a ser los resultados base que se irán comparando con el modelo para una malla con elementos más grandes. Esto no va a ser útil solo en estas probetas, serán de gran importancia las conclusiones que se saquen, para aplicarlas a piezas más complejas y grandes, dado que éstas no pueden tener una malla fina ya que si no la cantidad de elementos sería demasiado grande y conllevaría un tiempo de cálculo enorme.

## 3 ANTECEDENTES

**E**n este capítulo se va a predecir el comportamiento que tendrán las probetas en función de la secuencia de apilado con las que están fabricadas, por medio de un cálculo analítico del cierre de éstas. También se cogerá cierta información del proyecto [1], en el que se fabricaron las probetas que se van a modelar en este proyecto.

### 3.1 Comportamiento esperado. Soluciones analíticas

Como ya se ha explicado antes, se espera que se cierren las probetas, es decir que disminuyan el ángulo recto que forman las alas entre ellas. En el modelo que se va a diseñar las probetas no van a cerrarse exactamente, es decir, no va a haber un movimiento de ambas alas acercándose, sino que se dejará un ala fija y será la otra la que se cierre. Al fin y al cabo el valor que interesa es el ángulo de cierre, da igual que solo se mueva un ala o las dos, esa variación de ángulo se designará como  $\Delta\beta$ .

Se van a modelar tres secuencias de apilado:

- $[0^\circ]_8$
- $[90^\circ]_8$
- $[90^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_S$

Siendo la dirección  $0^\circ$  la perpendicular al largo de la probeta y que sigue la curva de la probeta.

Para materiales homogéneos con comportamiento ortótropo hay una forma analítica de calcular el ángulo de variación de las probetas, mediante la fórmula:

$$\Delta\beta = (\alpha_x - \alpha_z) * \beta * \Delta T$$

Siendo:

- $\alpha_x$  y  $\alpha_z$  son los coeficientes de expansión térmica en la dirección longitudinal (siguiendo la curva de la probeta) y en la dirección del espesor, respectivamente.

- Dichos coeficientes de expansión térmica equivalentes pueden calcularse a partir de la secuencia de apilado y los coeficientes de expansión térmica en la dirección de las fibras ( $\alpha_1$ ), en la perpendicular ( $\alpha_2$ ) y en la del espesor ( $\alpha_3$ ).
- $\beta$  es el ángulo inicial de la probeta, es decir,  $\frac{\pi}{2}$  rad o  $90^\circ$ , dependiendo de cómo se quiera el valor de  $\Delta\beta$ .
- Y la  $\Delta T = -155^\circ\text{C}$  como ya se ha dicho.

Aplicando la fórmula sale:

- $\Delta\beta = 0.37665^\circ$  para la probeta de  $0^\circ$
- $\Delta\beta = 0^\circ$  para la probeta de  $90^\circ$
- $\Delta\beta = 0.3172^\circ$  para la probeta de  $[90^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_S$

Según los cálculos analíticos, la probeta de  $90^\circ$  no se cerrará, porque la fórmula se anula dada la igualdad de los coeficientes  $\alpha_x (= \alpha_2)$  y  $\alpha_z (= \alpha_3)$ .

Este valor y el experimental se compararán con los que se obtengan de forma numérica en este proyecto.

### 3.2 Estudio experimental previo

Se coge toda la información relacionada con las probetas de [1], dónde se detalla el proceso completo de fabricación de éstas, pero solo se necesita cierta información para este proyecto.

El material empleado consiste en un prepreg de fibras de carbono de 7-8  $\mu\text{m}$  de diámetro embebidas en una matriz termoendurecible de resina epoxi.

El espesor de las láminas es de 0.2 mm, de modo que el espesor del laminado será de 1.6 mm. Las propiedades de cada lámina en ejes de ortotropía, siendo la dirección 1 la de las fibras, la 2 la perpendicular a las fibras en el plano de la lámina y la 3 la perpendicular al plano de la lámina son:

$$E_{11} = 125 \text{ GPa}$$

$$E_{22} = 8 \text{ GPa}$$

$$E_{33} = E_{22}$$

$$G_{12} = 4.28 \text{ GPa}$$

$$G_{23} = G_{12}$$

$$G_{31} = G_{12}$$

$$v_{12} = 0.3 \quad v_{13} = v_{12} \quad v_{23} = \frac{E_{22}}{2G_{23}} - 1 \quad v_{32} = v_{23} \quad v_{21} = \frac{v_{12}E_{22}}{E_{11}} \quad v_{31} = v_{21}$$

$$\alpha_1 = -1 * 10^{-6} \text{ C}^{-1} \quad \alpha_2 = 26 * 10^{-6} \text{ C}^{-1} \quad \alpha_3 = \alpha_2 \quad T_0 = 180 \text{ C} \quad T = 25 \text{ C}$$

El prepreg se corta en láminas de 200x120 mm. Para luego darle la geometría en forma de L que se va a estudiar, ahora con dimensiones 200x60x60 mm.

Tras conseguir la forma deseada de la probeta se lleva a cabo el proceso de curado en el autoclave, con su respectiva preparación previa, que no es de importancia en este proyecto.

En el momento de retirar la pieza del molde es cuando se produce la contracción o Spring-back. Una vez las probetas fuera del molde, se procede a la medida del ángulo y se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 1:

Estudio experimental	$\Delta\beta$
$[0^\circ]_8$	0.35845°
$[90^\circ]_8$	0.62645°
$[90^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_5$	0.60637°

Tabla 1. Resultados obtenidos experimentalmente [1].

## 4 ESTUDIO NUMÉRICO

A lo largo de este capítulo se desarrollará un estudio de las tres probetas con las diferentes orientaciones descritas en el apartado anterior, analizando los resultados que se obtienen del cálculo en función del mallado que se le aplique a cada una. También se va a explicar cómo se ha realizado el modelo paso por paso. Antes de empezar el estudio numérico se exponen los motivos de utilizar el tipo de elemento usado, las condiciones de contorno y las propiedades que tendrá el modelo.

### 4.1 Descripción del modelo

#### 4.1.1 Tipo de elemento

Para el estudio de cada problema mediante el método de los elementos finitos (MEF) se plantea la cuestión de qué tipo de elemento utilizar para modelar la pieza o estructura. Esto depende básicamente de las dimensiones que tenga y las tensiones a las que esté sometida.

Para problemas donde hay una dimensión mucho mayor que las otras dos se utilizan elementos unidireccionales (1D) o tipo Beam, esto se puede dar en problemas de barras. En las situaciones que hay dos dimensiones mucho mayores que la otra se utilizan elementos bidimensionales (2D), como puede ser el tipo Shell. Y para problemas donde las tres dimensiones son del mismo orden de magnitud se usan elementos tridimensionales (3D), el más típico es el tipo Solid que es el que se usará en este proyecto (ver Figura 3).



Figura 3. Tipos de elementos [3].

Según las dimensiones de las probetas, en la cual dos dimensiones (200x60 milímetros) son mucho mayores que el espesor (1.6 milímetros), sin cargas de fuerza o presión y teniendo en cuenta que uno de los objetivos del proyecto es reducir el tiempo de cálculo, el tipo de elemento ideal sería el Shell, ya que un elemento Shell representaría el laminado completo, lo que reduciría muchísimo el número de elementos del modelo. Pero este problema en principio no es posible modelarlo con elementos Shell.

Esto se debe, como se explicó antes, a que en el tramo curvo de la probeta, al tener ésta cierto espesor, hace que el radio interior y exterior sean diferentes, por lo que sumado a que el coeficiente de expansión térmica en la dirección del espesor sea diferente y que estén sometidos a la misma temperatura, provoca una variación en el ángulo de la probeta. Los elementos tipo Shell no permiten modelar esto.

Por ese motivo se van a utilizar elementos tipo Solid, que sí tienen en cuenta la deformación de la pieza en dirección del espesor y con los que se puede modelar el fenómeno que se va a estudiar en este proyecto. El problema que hay con los elementos Solid es el elevado número de elementos del modelo de elementos finitos, ya que dentro del espesor, en cada lámina hay que emplear, como mínimo, un elemento, con lo que habrá ocho elementos en el espesor del laminado. Debido a esto, el tiempo de cálculo será enorme en las primeras pruebas, antes de reducir el número de elementos.

#### 4.1.2 Cargas y condiciones de contorno

En las probetas que se van a estudiar solo hay aplicada una variación de temperatura, que es lo que provocará las tensiones en las piezas. Ésta variación de temperatura es debida a la diferencia entre la temperatura a la que ocurre el curado de la pieza en el autoclave, que alcanza temperaturas de 180°C, con la temperatura ambiente ( $T = 25^\circ\text{C}$ ). Por tanto, la variación de temperatura aplicada  $\Delta T = -155^\circ\text{C}$ .

En cuanto a las condiciones de contorno, la probeta no debería tener ninguna restricción para que pueda deformarse libremente. Aún así se deben restringir los movimientos como sólido rígido para que el programa pueda resolver problema. Al ser los elementos utilizados sólidos, solo se pueden limitar los desplazamientos en las tres direcciones, esto es:

- $u_x = 0$
- $u_y = 0$
- $u_z = 0$

Como se dijo antes, se va a dejar que se cierre solo un ala de las dos, la vertical, por lo que el desplazamiento en el eje X debe estar permitido en todo ese ala y también hay que impedir que se cierre el ala del plano XY, para eso se debe impedir el desplazamiento en dirección Z en algún punto de ese ala.

Por comodidad, se va a probar inicialmente impidiendo las tres traslaciones en el extremo del ala horizontal según se aprecia en la Figura 4:

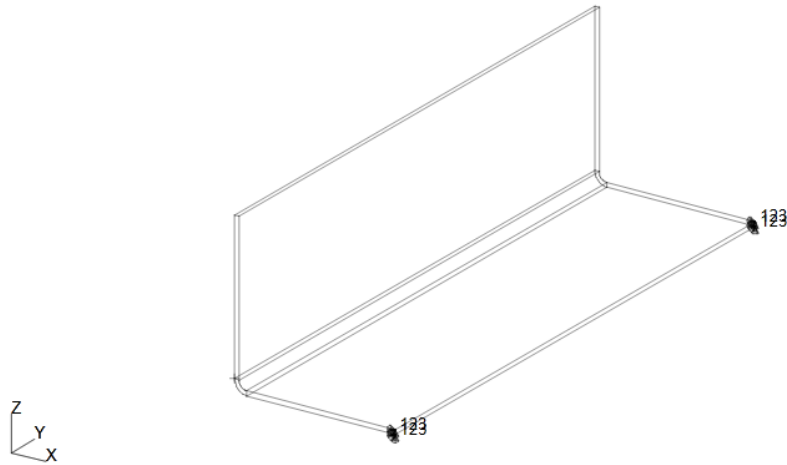


Figura 4. Condiciones de contorno.

Posteriormente se verá que esta forma de impedir los movimientos no es la más adecuada, y se modificará.

#### 4.1.3 Propiedades anisótropas

Para llegar a definir la Ley de Comportamiento de un material compuesto se parte de la de un material elástico lineal en 3-D según viene en [4].

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \quad (i,j,k,l \text{ de } 1 \text{ a } 3) \quad 81 \text{ constantes}$$

Como los tensores de tensión y deformación son simétricos puede simplificarse la expresión.

$$\sigma_i = C_{ij}\varepsilon_j \quad (i,j \text{ de } 1 \text{ a } 6) \quad 36 \text{ constantes}$$

Teniendo en cuenta que  $C_{ij} = C_{ji}$  se reduce el número de constantes a 21.

En la reducción de constantes a 9 entra ya el material con el que se trabaja, esta reducción se debe al número de planos de simetría elástica que tiene el material. Un plano de simetría elástica (PSE) es un concepto local, un material tiene un PSE en un punto cuando la estructura interna respecto a ese plano es simétrica en ese punto.

Una lámina de fibra de carbono, debido a que tiene fibras no isotropas, tiene 3 PSE, lo que provoca que ciertas constantes tengan que tomar el valor 0 y se llegue finalmente a tener 9 constantes. Estas 9 constantes definen el material ortótropo, según la Ley de Comportamiento:

$$\begin{vmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{vmatrix}$$



Se pueden sacar varias conclusiones de aquí, viendo los elementos nulos en la matriz se deduce que no hay acoplamiento entre tensiones normales y deformaciones tangenciales, ni entre tensiones tangenciales y deformaciones normales. Esto es en las direcciones de ortotropía claro. También se puede deducir que no hay acoplamiento entre tensiones tangenciales en un plano y deformaciones tangenciales en otro plano.

Para definir de forma sencilla las propiedades se va a emplear una malla con los elementos orientados según se muestra en la Figura 5. De esta forma, las propiedades se van a definir empleando los ejes del elemento, para las capas de  $0^\circ$  y  $90^\circ$  los ejes coinciden con los ejes de ortotropía, en la probeta de  $0^\circ$  por ejemplo, la dirección  $x$  como se ve en la imagen coincidirá con la dirección de las fibras y la  $y$  con la perpendicular a éstas, y para  $90^\circ$  al contrario, por lo que se podrán crear con propiedades ortótropas, lo que disminuye el número de constantes necesarias para que queden definidos. Sin embargo para las fibras de  $45^\circ$  y  $-45^\circ$  los ejes no coinciden con los de ortotropía, con lo que habrá que utilizar propiedades anisótropas para definir estos elementos.

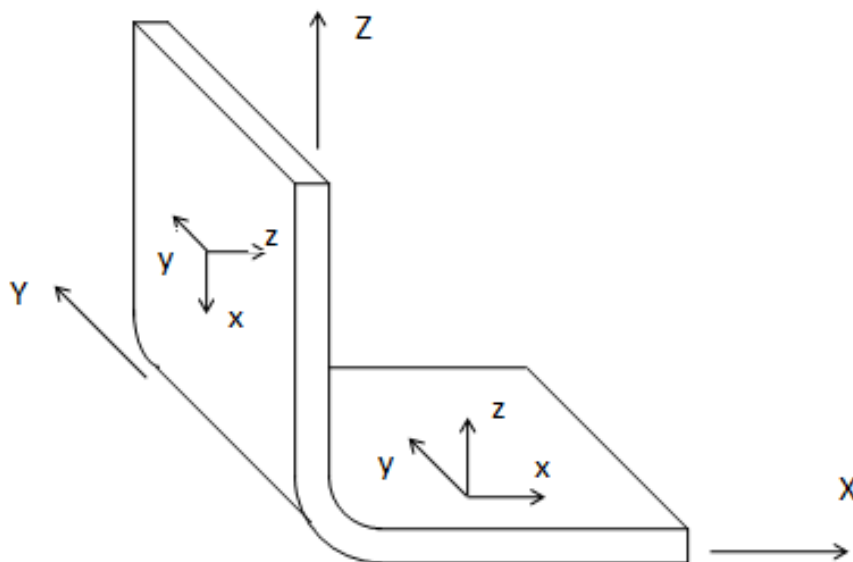


Figura 5. Ejes del elemento [5].

Se pretende llegar a que el sistema de coordenadas de los elementos esté orientado como los sistemas  $xyz$  de la figura. El sistema  $XYZ$  es el global y la dirección  $X$  solo llevaría la dirección de las fibras en el ala que está en el plano  $XY$ , en el otro ala, la dirección de las fibras coincidiría con la  $Z$ , es por esto que no puede usarse como referencia.

Ahora se van a determinar las propiedades anisótropas equivalentes a partir de las ortótropas, según se explica en [4]:

Se parte de la Ley de Comportamiento a la que se llegó antes y sustituyendo las propiedades del material compuesto se llega a:

$$Q_A^0 = \begin{vmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 126.3663 & 2.277 & 2.277 & 0 & 0 & 0 \\ 2.277 & 8.0754 & -0.4845 & 0 & 0 & 0 \\ 2.277 & -0.4845 & 8.0754 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.28 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.28 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.28 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{vmatrix}$$

Hay que destacar una pequeña diferencia con [4], ésta es, que el orden de las componentes de los vectores de tensiones y deformaciones no es el mismo. En el proyecto se usa este ya que es el que utiliza Patran.

Calculada la matriz de rigidez de un material ortótropo en ejes principales, se va a utilizar para obtenerla en direcciones cualquiera, a través de:

$$Q_{xy} = T^{-1} Q_{12} R T R^{-1}$$

Donde 12 serían las direcciones de ortotropía y XY unas direcciones cualquiera.

Siendo T y R:

$$T = \begin{vmatrix} \cos^2 \theta & \text{sen}^2 \theta & 0 & 2 \cos \theta \text{sen} \theta & 0 & 0 \\ \text{sen}^2 \theta & \cos^2 \theta & 0 & -2 \cos \theta \text{sen} \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\cos \theta \text{sen} \theta & \cos \theta \text{sen} \theta & 0 & \cos^2 \theta - \text{sen}^2 \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \theta & \text{sen} \theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\text{sen} \theta & \cos \theta \end{vmatrix}$$

$$R = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{vmatrix}$$

De manera similar se calculan los coeficientes térmicos para cualquier dirección (ver Tabla 2).

$$\begin{vmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \\ \alpha_{xy}/2 \\ \alpha_{yz}/2 \\ \alpha_{zx}/2 \end{vmatrix} = T^{-1} \begin{vmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Con esto ya se pueden obtener las propiedades de las láminas que están en las probetas.

$$Q_A^{90} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 8.0754 & 2.277 & -0.4845 & 0 & 0 & 0 \\ 2.277 & 126.3663 & 2.277 & 0 & 0 & 0 \\ -0.4845 & 2.277 & 8.0754 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.28 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.28 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.28 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{vmatrix}$$

$$Q_A^{45} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 39.0290 & 30.4690 & 0.8963 & 29.5727 & 0 & 0 \\ 30.4690 & 39.0290 & 0.8963 & 29.5727 & 0 & 0 \\ 0.8963 & 0.8963 & 80.0754 & 1.3809 & 0 & 0 \\ 29.5727 & 29.5727 & 1.3809 & 32.4718 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.28 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.28 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{vmatrix}$$

$$Q_A^{-45} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 39.0290 & 30.4690 & 0.8963 & -29.5727 & 0 & 0 \\ 30.4690 & 39.0290 & 0.8963 & -29.5727 & 0 & 0 \\ 0.8963 & 0.8963 & 80.0754 & -1.3809 & 0 & 0 \\ -29.5727 & -29.5727 & -1.3809 & 32.4718 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.28 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.28 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{vmatrix}$$

Todos los valores están en megapascales (MPa).

	0°	90°	45°	-45°
$\alpha_x$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$1.25 * 10^{-5}$	$1.25 * 10^{-5}$
$\alpha_y$	$\alpha_2$	$\alpha_1$	$1.25 * 10^{-5}$	$1.25 * 10^{-5}$
$\alpha_z$	$\alpha_3$	$\alpha_3$	$\alpha_3$	$\alpha_3$
$\alpha_{xy}$	0	0	$-2.7 * 10^{-5}$	$2.7 * 10^{-5}$
$\alpha_{yz}$	0	0	0	0
$\alpha_{zx}$	0	0	0	0

Tabla 2. Coeficientes de térmicos en función de la orientación ( $K^{-1}$ ).

## 4.2 Probeta 0°

En este apartado se va a describir el proceso de creación del modelo en el programa Nastran-Patran. Se verá como la geometría y las condiciones de contorno varían de las de partida, en función de los resultados que se vayan obteniendo, para hacer el problema más fácil de resolver por el programa.

Como se dijo al principio este era uno de los objetivos del proyecto, por lo que el mallado también ha ido evolucionando y para hacer el problema resoluble en menos tiempo. Este proyecto en particular tiene una parte iterativa muy importante.

### 4.2.1 Creación del modelo

#### 4.2.1.1 Geometría

La geometría que se va a crear es la que tienen las probetas, lógicamente. Consiste en un perfil en L con alas de 60 mm, largo de 200 mm y espesor de 1.6 mm. El radio del molde es de 3 mm, que es el radio interior y el radio exterior es  $3+1.6=4.6\text{mm}$  con lo que la longitud recta de las alas será de 55.4 mm y no de 60 (ver Figura 6).

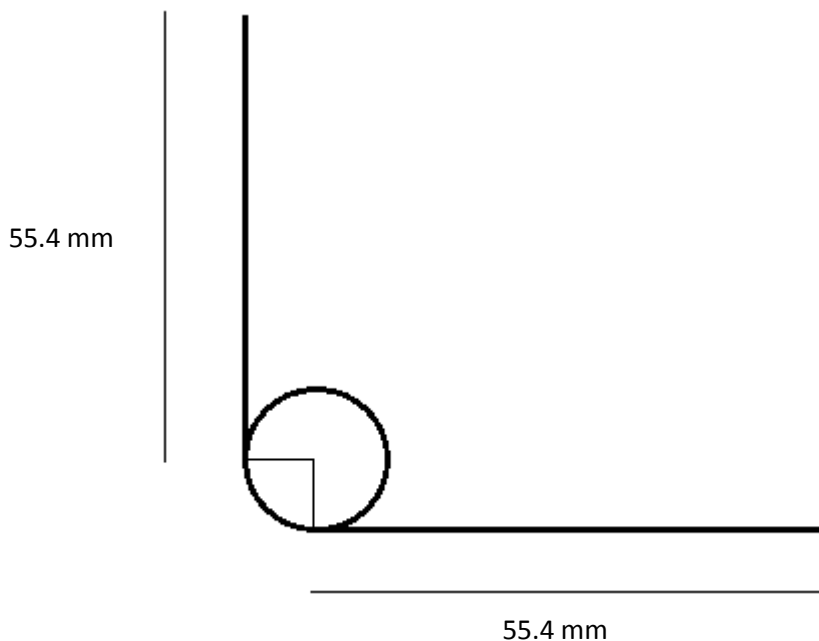


Figura 6. Longitud alas.

Anteriormente se explicó por qué era tan importante que los elementos tuvieran un sistema de coordenadas donde la dirección x fuera la misma que la de las fibras (en la probeta de 0°). Ahora se va a explicar el proceso de creación de la geometría para conseguir este sistema de coordenadas.

Se ha decidido crear la geometría en tres partes:

- Ala plano YZ
- Curva
- Ala plano XY

Para crear el primer volumen se empieza creando la curva superior de la parte de atrás del ala (ver Figura 7), mediante *Create > Curve > XYZ* y a partir de esta curva se va a crear la superficie en el plano YZ, con *Create > Surface > Glide*, pero para aplicar *Glide* es necesaria una curva de dirección, por lo que se crea otra curva perpendicular a la que se acaba de crear, es decir con dirección Z. Cuando ya está la superficie creada, el sólido se va a formar a partir de ella, mediante *Create > Solid > Normal* (ver Figura 8).

The figure displays four sequential dialog boxes from a CAD application, illustrating the steps to create a volume:

- Top Left:** *Create Curve (XYZ)*. Action: Create, Object: Curve, Method: XYZ. Curve ID List: 1. Refer. Coordinate Frame: Coord 0. Vector Coordinates List: <0 200 0>. Auto Execute: unchecked. Origin Coordinates List: [0 0 55.4].
- Top Right:** *Create Curve (XYZ)*. Action: Create, Object: Curve, Method: XYZ. Curve ID List: 2. Refer. Coordinate Frame: Coord 0. Vector Coordinates List: <0 0 55.4>. Auto Execute: unchecked. Origin Coordinates List: [0 0 0].
- Bottom Left:** *Create Surface (Glide)*. Action: Create, Object: Surface, Method: Glide. Surface ID List: 2. Option: 1 Director Curve. Glide Input Options: Fixed Glide (selected), Normal Project Glide (unchecked). Sweep Parameters: Scale Factor: 1.0. Auto Execute: unchecked. Director Curve List: Curve 2. Base Curve List: Curve 1.
- Bottom Right:** *Create Solid (Normal)*. Action: Create, Object: Solid, Method: Normal. Solid ID List: 2. Thickness Input Options: Constant Thickness (selected), Varying Thicknesses (unchecked). Thickness: -1.6. Flip Surface Normal: unchecked. Auto Execute: unchecked. Surface List: Surface 1.

Figura 7. Crear volumen 1.

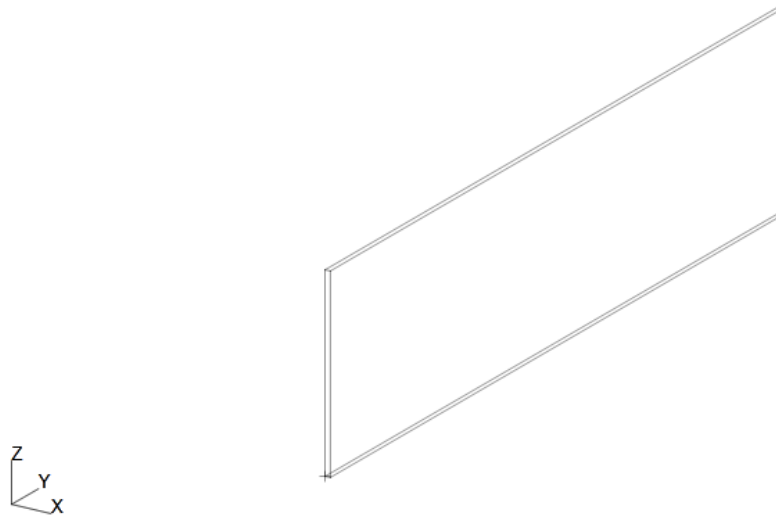


Figura 8. Primer ala.

En la parte curva el procedimiento es similar, se va a aplicar *Glide* también pero ahora dos veces, por lo que se tienen que crear los dos arcos primero para que sirvan de curva dirección para el *Glide*. Para crear el arco, *Create > Curve > 2D ArcAngles* donde hay que introducir el radio, el centro y los ángulos entre los que va (ver Figura 9).

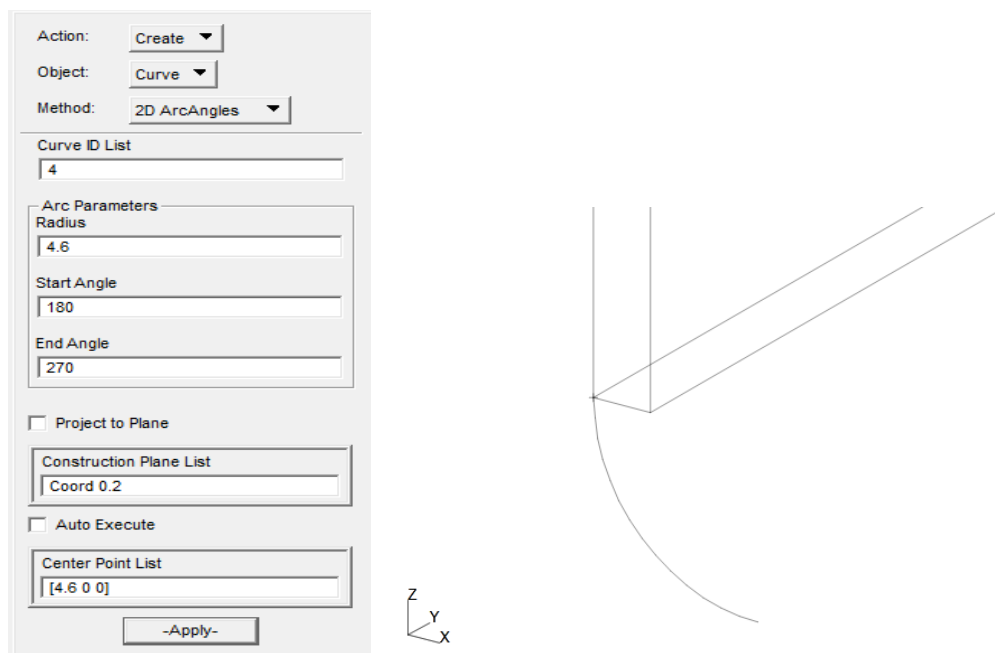


Figura 9. Arco exterior.

Para el arco interior se hace lo mismo pero con un radio de 3 mm. Una vez se tienen los dos arcos, ya se puede hacer *Glide* dos veces y formar el volumen de la curva.

El otro ala que falta sigue el mismo procedimiento que para el primer ala, solo que primero se crea la superficie de abajo y luego el sólido.

Lo que hay que comprobar ahora es que realmente los elementos tengan el sistema de coordenadas que se deseaba. Para ello primero habría que mallar, con lo que se hace un mallado de prueba solo para asegurar que el sistema de coordenadas es el correcto. Se representan los sistemas de coordenadas en *Show > Element > Coord. Sys.* y pinchando en el elemento que se desee.

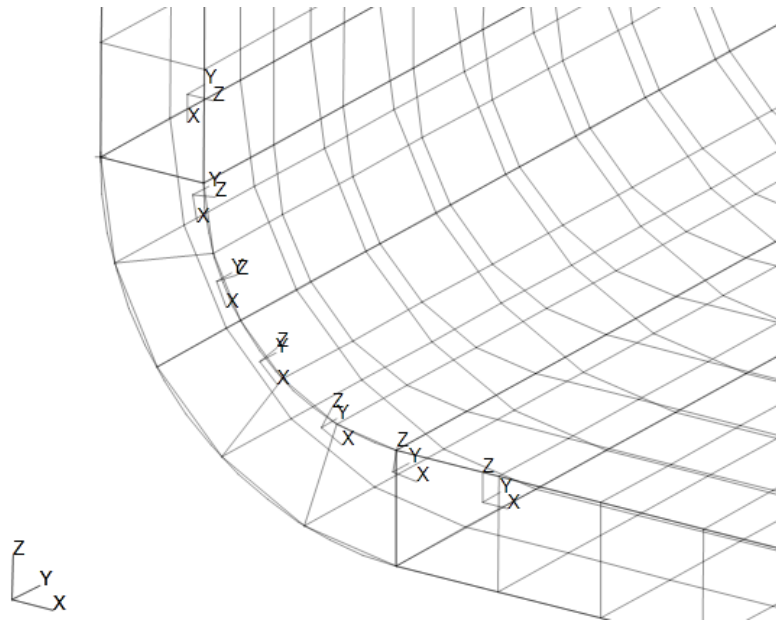


Figura 10. Sistema de coordenadas elementos.

En la Figura 10 se pueden ver los tres sólidos creados, y como hay continuidad entre los elementos y que la dirección x seguiría la de las fibras, por lo tanto el mallado es correcto.

#### 4.2.1.2 Material

En este apartado se va a explicar cómo crear el material y qué información se necesita para crearlo. Como se está creando la probeta de 0°, se van a necesitar sus propiedades de rigidez:

$$Q_A^0 = \begin{vmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 126.3663 & 2.277 & 2.277 & 0 & 0 & 0 \\ 2.277 & 8.0754 & -0.4845 & 0 & 0 & 0 \\ 2.277 & -0.4845 & 8.0754 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.28 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.28 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.28 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{vmatrix}$$

y sus propiedades térmicas (ver Tabla 3).

$\alpha_x$	$\alpha_y$	$\alpha_z$	$\alpha_{xy}$	$\alpha_{yz}$	$\alpha_{zx}$
$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	0	0	0

Tabla 3. Coeficientes térmicos probeta 0°.

Las propiedades del material que se van a definir como anisótropas, aunque en este caso sean ortótropas, con lo que habrá que rellenar algunos campos con ceros, ya que como se vio antes, al ser ortótropo el material, se puede definir solo con 9 constantes y no con 21 que sería para un material anisótropo.

Para crear el material: *Create > 3d Anisotropic > Manual Input*, también se le debe dar un nombre al material, como por ejemplo “*Carbono\_0*”, se pulsa en *Input Properties* para introducir las propiedades del material (ver Figura 11).

Stiffness 11 =	126.36636
Stiffness 12 =	2.277256
Stiffness 13 =	2.277256
Stiffness 14 =	0.
Stiffness 15 =	0.
Stiffness 16 =	0.
Stiffness 22 =	8.0754242
Stiffness 23 =	-0.48457101
Stiffness 24 =	0.
Stiffness 25 =	0.
Stiffness 26 =	0.
Stiffness 33 =	8.0754242
Stiffness 34 =	0.
Stiffness 35 =	0.
Stiffness 36 =	0.
Stiffness 44 =	4.2800002
Stiffness 45 =	0.
Stiffness 46 =	0.
Stiffness 55 =	4.2800002
Stiffness 56 =	0.
Stiffness 66 =	4.2800002
Density =	
Thermal Expan. Coeff 11 =	-1E-006
Thermal Expan. Coeff 22 =	2.6E-005
Thermal Expan. Coeff 33 =	2.6E-005
Thermal Expan. Coeff 12 =	0.
Thermal Expan. Coeff 31 =	0.
Thermal Expan. Coeff 23 =	0.
Structural Damping Coeff =	
Reference Temperature =	180.

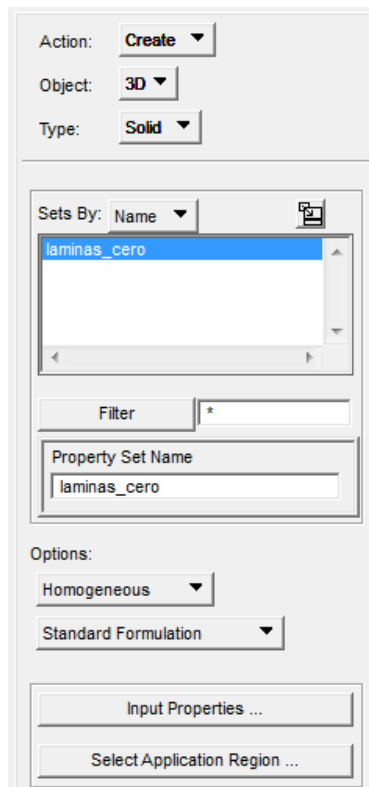
Figura 11. Propiedades probeta 0°.

Como se ve, también se introduce el dato de “*Reference Temperature*”, esto es la temperatura desde la que parte el material, la temperatura a la que sale del autoclave, la temperatura de curado de la pieza.

#### 4.1.2.3 Propiedades

Se explicó anteriormente que primero se tenía que crear un material para la orientación de 0° y ya está hecho, también era necesario que el sistema de coordenadas de los elementos fuera continuo y la dirección x fuera la de las fibras, también se ha conseguido, por lo que solo queda por rellenar los campos del módulo “*Properties*”.





El material es 3D, ya se definió antes como *3d Anisotropic* y *Solid*, como se ha dicho ya se van a usar elementos tipo *Solid* (ver Figura 12).

Se le debe poner un nombre al material, aquí se ha decidido ponerle "*laminas\_cero*", pero valdría cualquiera. En *Options* hay tres opciones para seleccionar:

- *Homogeneous*
- *Laminate*
- *Gasket*

Lo primero que se pasa por la cabeza es seleccionar *Laminate*, pero ya ha explicado que en este proyecto no se va a hacer de esta forma, sino que las propiedades ya se le dan al material al crearlo. Por tanto se selecciona *Homogeneous*.

Figura 12. Crear propiedades probeta 0°.

En *Input Properties* se selecciona el material, que ya está creado, en este caso es "*Carbono\_0*", y también se debe indicar que la orientación del material es la de los elementos, esto se hace escribiendo *Elemental*.

En *Select Application Region* se le debe asignar una región a las propiedades del material, ya sean los elementos o la geometría. Se escoge la geometría porque ésta no va a cambiar mientras que los elementos probablemente se modificarán en algún momento, lo que conllevaría la eliminación de la propiedad y habría que volver a crearla. Se dice que los elementos cambiarán porque en este proyecto se va a ir aumentando el tamaño de elemento y a ir comparando los resultados con los anteriores.

Con todo esto, se asigna la propiedad a los tres sólidos que se crearon, las dos alas y la parte curva. Al asignarlo a estos, por mucho que cambie la malla, la propiedad seguirá en los tres sólidos.

#### 4.2.1.4 Condiciones de contorno

Como ya se dijo, hay solo dos condiciones de contorno, la de temperatura y la de desplazamiento para impedir los movimientos como sólido rígido.

Por un lado, la condición de temperatura es muy fácil de aplicar. Se selecciona *Create > Temperature > Nodal* dentro del módulo *Load BCs* y se le pone un nombre a la condición de contorno. En *Input Data* se escribe 25, indicando la temperatura ambiente, ya que la temperatura de curado se introdujo ya en la definición del material, con lo que se obtendría la

variación de temperatura deseada,  $\Delta T = -155^\circ\text{C}$ . Y al igual que se hacía con las propiedades, se le debe asignar a la geometría, a los tres sólidos (ver Figura 13).

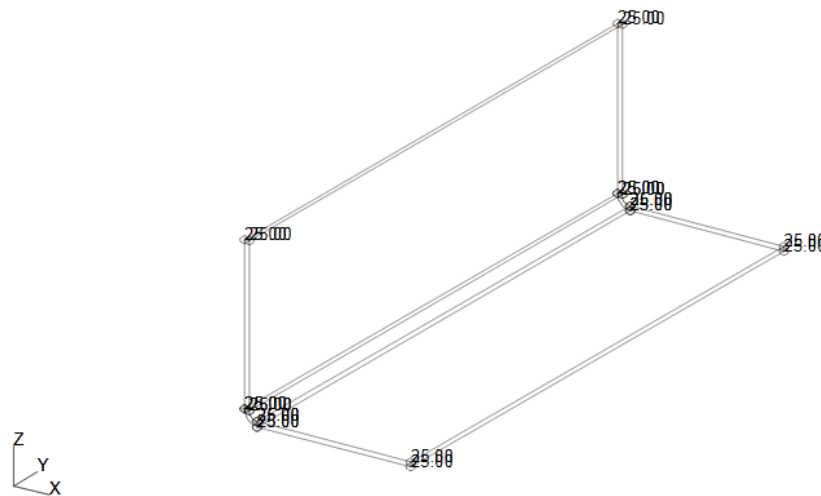


Figura 13. Condición de contorno de temperatura.

Para la condición de desplazamiento se empezó proponiendo el empotramiento de la superficie del espesor del largo como se puede ver en la Figura 6, pero ya se advirtió que esa condición no era la correcta y que se modificaría. En este apartado se va a ver por qué no es la condición adecuada y cuál será la nueva condición. Esto se puede saber adelantando un poco en el proceso, probando el modelo en el programa y viendo los resultados que salen con esta condición.

Para crear las condición de contorno, se selecciona *Load BCs*, dentro del módulo, *Create > Displacement > Nodal*, se le da un nombre a la condición "empotramiento" en este caso por ejemplo y se le pone el valor 0 a los desplazamientos que se quieran impedir,  $u_x$ ,  $u_y$  y  $u_z$ .

Se hace la prueba con menos elementos en el espesor, para que el tiempo de cálculo sea pequeño. De los resultados que se obtienen se puede deducir que estas condiciones de contorno impiden más movimientos de los que deberían (los de sólido rígido). Se ve mucho más claro en imágenes, con lo que se va a explicar a partir de ellas.

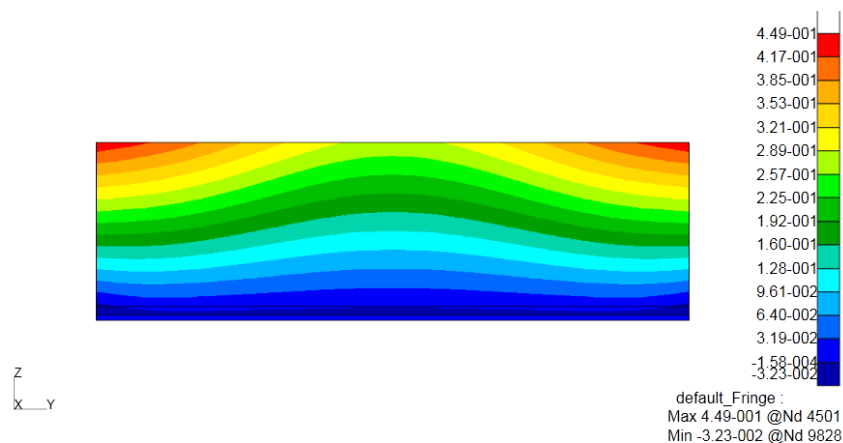


Figura 14. Desplazamiento en X primeras condiciones de contorno.

En la figura 14 está representado el desplazamiento en dirección X, y se puede ver como varía en el centro de la probeta, sin embargo debería ser uniforme por toda la probeta, es decir, para que se vea más claro, las líneas que están representadas deberían ser horizontales y paralelas entre ellas.

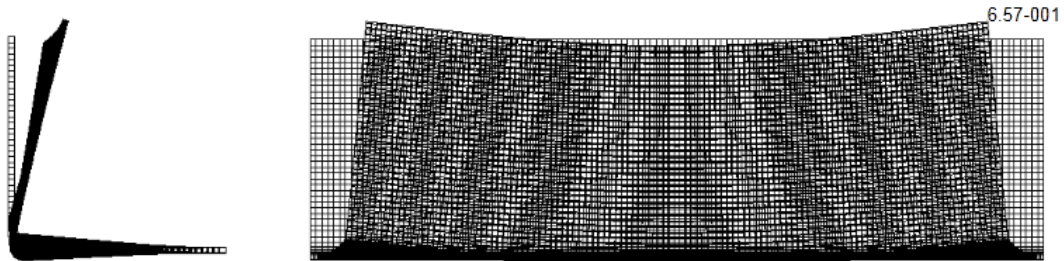


Figura 15. Deformada primeras condiciones de contorno.

Aquí (ver Figura 15) se ve de forma más visual cómo quedaría la probeta, su deformada. Y también se aprecia que no es uniforme en el largo de la probeta. Como se ha deducido de los desplazamientos en dirección X.

Por todo esto, se decide probar unas condiciones de contorno diferentes que permitan que la probeta se deforme libremente, con lo que en teoría, llevará a unos desplazamientos y a una deformada uniformes.

Para estas nuevas condiciones no se va a empotrar una cara directamente, sino que se va a ir impidiendo cada desplazamiento en ciertas partes del modelo. Primero, para impedir el desplazamiento en X, se va a imponer  $u_x = 0$  en la cara que anteriormente estaba empotrada. Para el desplazamiento en la dirección Y, se impone  $u_y = 0$  en toda la superficie lateral del perfil. Y por último, para impedir el desplazamiento en Z, basta con que cualquier punto de la geometría tenga  $u_z = 0$ . Se escoge la esquina de abajo donde las otras dos condiciones coinciden. El procedimiento empleado para crear estas condiciones en el programa, es igual al que se describió anteriormente, salvo que se deben crear tres condiciones, una por cada desplazamiento a impedir, y asignársela a la superficie que se desee imponer la condición.

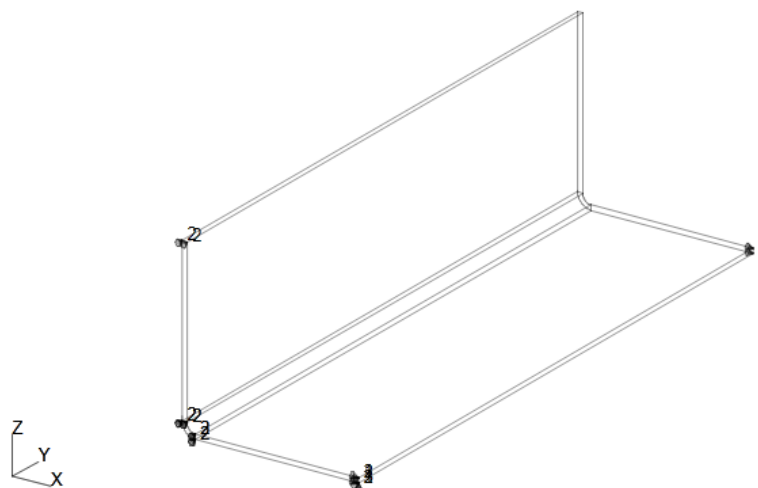


Figura 16. Nuevas condiciones de contorno.

Una vez aplicadas estas condiciones en el modelo (ver Figura 16), se debe hacer la prueba para cerciorar que estas condiciones son las correctas. En las imágenes (ver Figuras 17 y 18) se observa claramente que cumplen las condiciones que se explicaron antes, por lo que estas condiciones son la que se usarán en este proyecto.

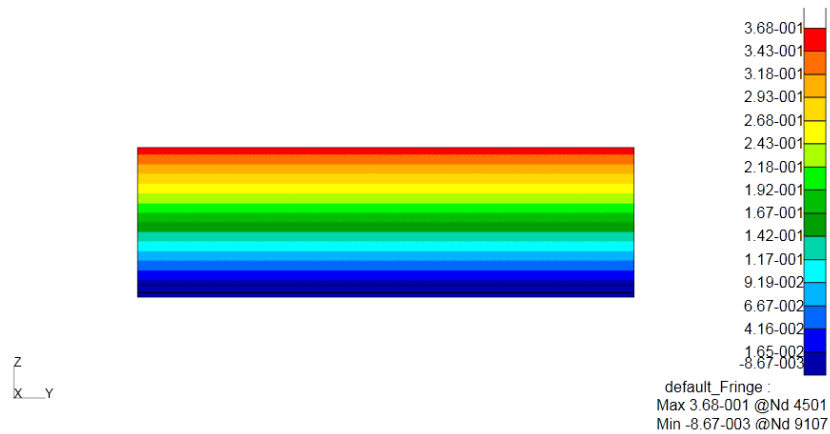


Figura 17. Desplazamiento en X nuevas condiciones de contorno.

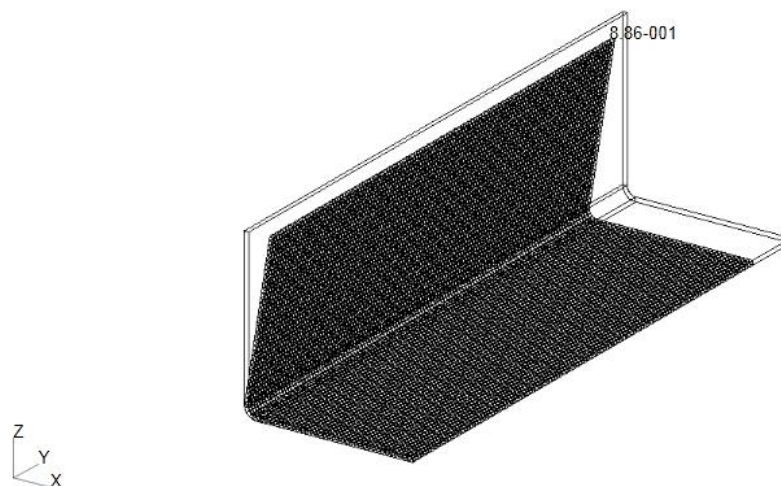


Figura 18. Deformada nuevas condiciones de contorno.

Ya se ha comprobado que estas condiciones de contorno son adecuadas para el modelo. Ahora se va a probar qué ocurre al reducir el largo del modelo con el objetivo de reducir el número de elementos en una gran cantidad.

El largo actual es de 200 mm, se hacen varias pruebas reduciendo poco a poco el largo, hasta que se llega a un largo de 50 mm sin que cambien nada los resultados. Se ha conseguido reducir los elementos en un 75% aproximadamente, lo que disminuirá muchísimo el tiempo de cálculo del programa y será muy útil cuando se haga una malla muy pequeña. Así es como queda la nueva longitud de la probeta, y se comprueba que la deformada es similar a la anterior (ver Figura 19).

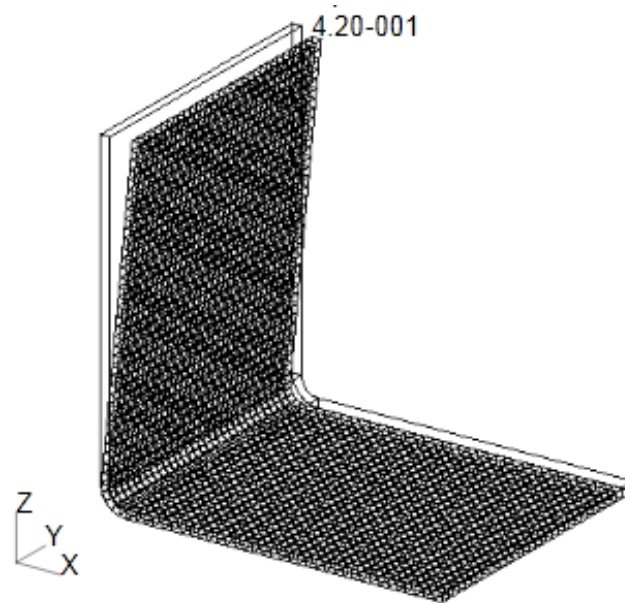


Figura 19. Deformada con nuevo largo.

#### 4.2.2 Mallado

El mallado es una parte muy importante en el estudio de un problema mediante un programa numérico ya que si la malla es muy grande, los resultados que obtenidos no serán suficientemente precisos, que es a lo que se pretende llegar con un modelo, pero si la malla es demasiado fina, el tiempo de cálculo se elevará mucho y con él, los costes, aunque se obtengan unos resultados más precisos. Por lo que hay que llegar a un punto intermedio y variar el tamaño del elemento en función de la precisión que se necesite en la zona. La malla ha de ser fina en zonas “problemáticas”, como entallas, concentradores de tensión, tramos curvos, etc.

Este es uno de los objetivos del proyecto como ya se ha dicho. En este apartado la malla va a ser muy fina, porque los resultados que se obtengan de aquí van a ser los que se comparen con el resto.

Al haber varias láminas en el laminado de la probeta, se debe mallar el espesor con al menos un elemento por lámina, y esto es lo que se va a hacer en este proyecto. Se podrían mallar también dos elementos por lámina para saber lo que ocurriría en el interior de la lámina, pero también aumentaría mucho el tiempo de cálculo y en este proyecto no es relevante. Sabiendo esto, el espesor de la probeta, al tener ocho láminas y ser de 1.6 mm, debe ser mallado con elementos de 0.2 mm de lado. Como se ha dicho que este primer mallado va a ser fino, se decide crear una malla uniforme de longitud de elemento 0.2 mm, para que los elementos sean cúbicos y que así el resultado sea más fiable.

Crear la malla uniforme es muy sencillo, ya que la longitud del elemento es la misma para toda la geometría. Para crearla se debe ir al módulo de *Elements*, una vez dentro, *Create > Mesh > Solid*, ya que se van a mallar los tres sólidos en los que se divide el modelo. El mallado se va a realizar con elementos hexaédricos de 8 nodos, con esto se obtiene un mallado de gran calidad, entonces se selecciona *Hex > Isomesh > Hex8*, y ya solo queda darle el valor de 0.2 a *Global Edge Length*.

En una imagen de la probeta no se pueden apreciar los elementos, ya que se superponen entre ellos, hay 1.180.001, con lo que se muestra una imagen ampliada también para ver la forma cúbica de los elementos (elemento de la esquina inferior marcado) y la división del espesor en ocho, esto está marcado con puntos rojos (ver Figura 20).

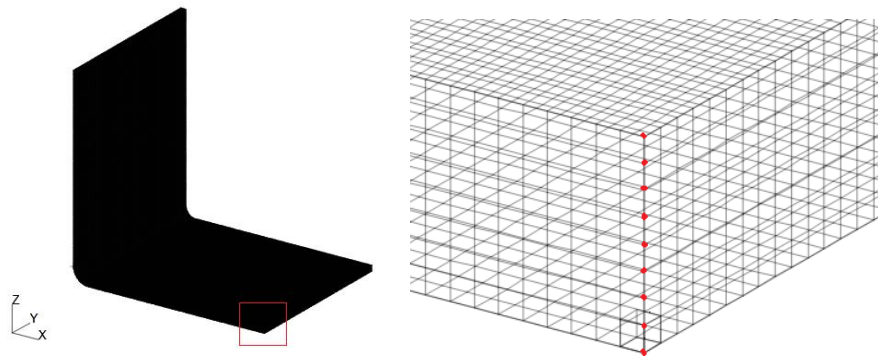


Figura 20. Malla de 0.2 mm.

Nada más realizado el mallado se deben eliminar los nodos redundantes, estos se generan porque hay dos superficies distintas que están en contacto, por tanto, habrá nodos redundantes en la superficie de unión entre las alas y la parte curva. Para eliminar estos nodos redundantes, dentro del módulo *Elements* todavía, se selecciona *Equivalence > All > Tolerance Cube*, se indica la distancia mínima a la que deben estar los nodos para considerarse redundantes, este número debe ser muy pequeño (0.05 por ejemplo), es la tolerancia. Por último, aunque se sabe dónde están los nodos redundantes, se seleccionan todos los nodos del modelo por si hubiera otra zona con nodos redundantes. Esta herramienta convierte estos nodos que se encuentran tan cerca y los une, así las superficies distinta pasan a ser una sola.

#### 4.2.3 Análisis y resultados

El modelo ya está terminado, solo queda realizar el cálculo y obtener los resultados. Interpretar los resultados no es algo sencillo, no hay que creer lo que nos da el programa directamente, sino que habrá que analizar primero si tienen lógica y pueden ser fiables. Para ello hay que tener ciertos conocimientos de mecánica, elasticidad y resistencia de materiales y por supuesto, de materiales compuestos.

Antes de ir al módulo de *Analysis*, hay que crear un caso de carga para el problema en particular. Este caso se crea en *Load Cases*, se le pone un nombre al caso y se selecciona *Input Data*, aquí se van a añadir las condiciones de contorno que se han creado anteriormente (ver Figura 21). Con esta opción se puede utilizar la misma geometría para distintos casos de carga, lo cual es muy útil.

	Type	Scale Factor	Priority
ux	Displacement	1.	Add
uy	Displacement	1.	Add
uz	Displacement	1.	Add
temperatura	Temperature	1.	Add

Figura 21. Condiciones de contorno del caso de carga.

Una vez creado el caso de carga, ya se puede entrar en el módulo de *Analysis*, pero para realizar el cálculo todavía hay que configurar algunas cosas. La *Solution Type* tiene que ser *LINEAR ELASTIC*, lo normal es que venga pre-seleccionada esta opción. En la ventana de *Subcases* se selecciona el caso creado y *Output Request* para que devuelva los resultados que se deseen (ver Figura 22), tampoco se necesita saber todo sobre el comportamiento de la probeta.

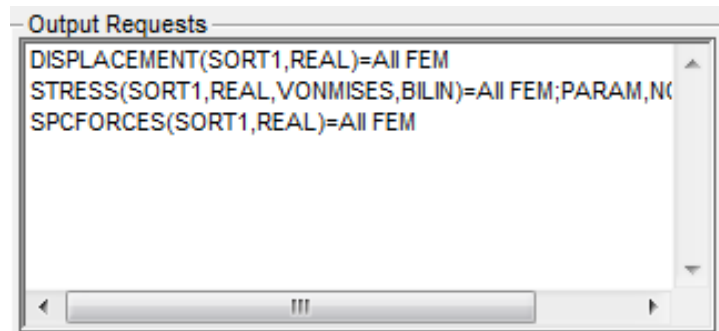


Figura 22. Cuadro de Output Request.

Realmente lo que interesa para este proyecto son los desplazamientos, pero también puede ser interesante conocer más datos para poder interpretar los resultados y asegurar que son correctos.

Ya solo queda ponerle un nombre al análisis y los resultados que van a salir, el nombre es importante que no tenga espacios ni tildes, ya que esto puede provocar errores en la ejecución del programa. Para que empiece a realizar el cálculo, *Analyze > Entire Model > Full Run* y *Apply* por supuesto. Debido al número tan alto de elementos que hay en este modelo, el análisis no se pudo realizar en un ordenador personal, sino que se tuvo que hacer en el “cluster” del departamento.

Una vez se han realizado los cálculos y se reciben los resultados, ahora hay que saber qué resultados pedirle al programa. Primero se van a sacar unos resultados gráficamente, para analizarlos y posteriormente se sacará una lista de desplazamientos, que servirá para calcular el ángulo de cierre de la probeta.

Primero se saca la deformada, que lo que representa es la forma que tendrá la probeta después de que actúen la carga de temperatura. En la deformada se magnifican los desplazamientos que sufre la probeta, de modo que es útil para ver si todo se deforma en la dirección y de la forma que debe. Por lo que es una imagen muy útil, ya que permite detectar muy rápido el fallo si lo hubiera. Para obtener la deformada con el programa hay que ir al módulo de resultados, y seleccionar *Create > Deformation*, seleccionar el tipo de deformada que se desea, que en este caso es *Displacements, Translational* y por último que muestre la deformada resultante, no por componente, sino la total.

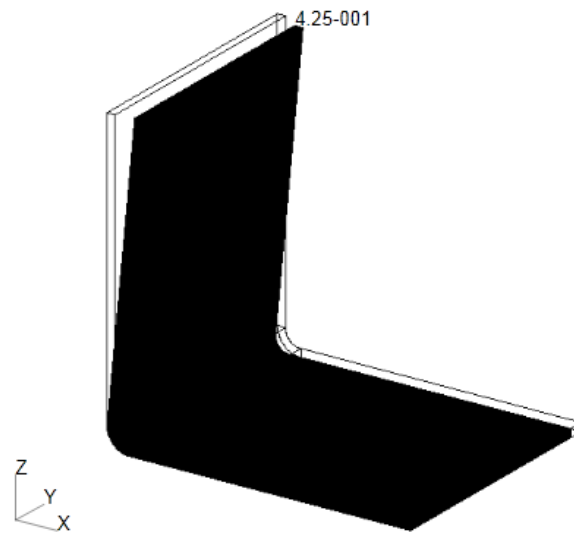
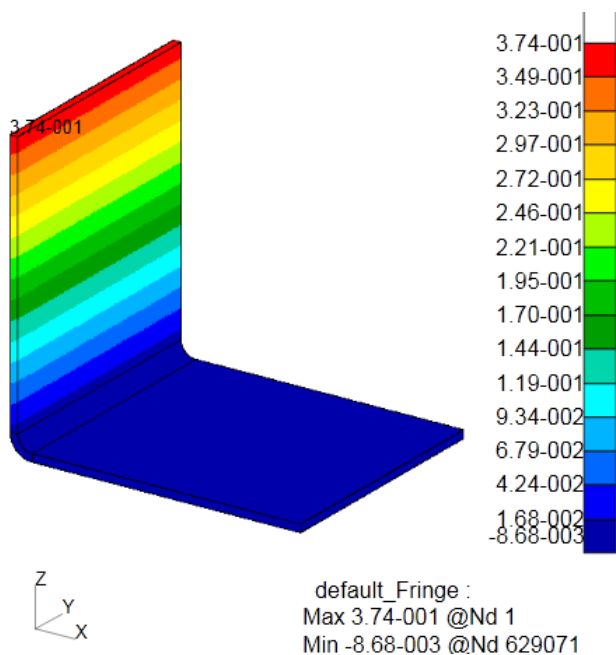


Figura 23. Deformada modelo 0° con longitud elemento 0.2 mm.

Ya se vio antes que la forma que debía tener era esta (ver Figura 23), cerrándose solo un ala, de forma homogénea en el largo y acortándose en el eje Y. Por lo que de momento parece que no hay errores. Ahora se van a obtener más resultados de desplazamientos, pero ya con valores y a escala real, estos resultados ya se pueden analizar más profundamente. En este caso es mejor obtener los desplazamientos de cada componente, X, Y y Z por separado. Para que el programa proporcione esto, se emplea *Create > Fringe y Displacements, Translational*, como se hizo antes para la deformada. Esta herramienta, *Fringe*, es muy útil, puede representar desplazamientos, fuerzas y tensiones. Como se ha dicho, se va a representar por componentes, se cambia de *Magnitude* a *X Component*.



Las líneas en la parte frontal del ala son horizontales, aquí (ver Figura 24) se ve la homogeneidad del desplazamiento de la probeta.

El ala del plano XY no se desplaza, ni la parte curva debido a las condiciones de contorno.

En el perfil se puede ver que las líneas tienen cierta pendiente, esto tiene una explicación muy sencilla, es debido a que el desplazamiento en X es realmente un giro con eje en la zona curva, con lo que la superficie de atrás del ala tendrá un desplazamiento algo mayor que el punto que está a la misma altura de la superficie delantera.

Figura 24. Desplazamiento en X modelo 0° con longitud de elemento 0.2 mm.



Las líneas divisorias es correcto que sean aquí también paralelas (ver Figura 25) y que haya homogeneidad. El lado izquierdo no se desplaza debido a las condiciones de contorno en ese lado. Es lógico que se contraiga, debido al valor positivo de su coeficiente térmico ( $\Delta L = \alpha_2 * \Delta T * L$ ) y se contrae mucho ya que la dirección es la perpendicular a las fibras con lo que es mucho menos rígida.

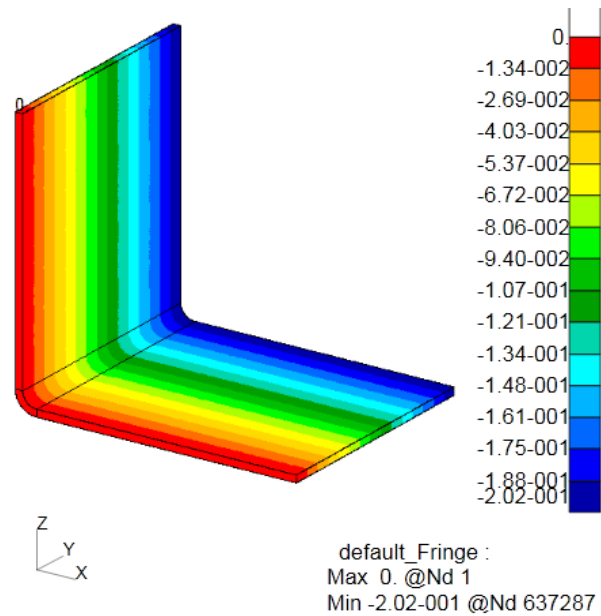


Figura 25 . Desplazamiento en Y modelo 0° con longitud de elemento 0.2 mm.

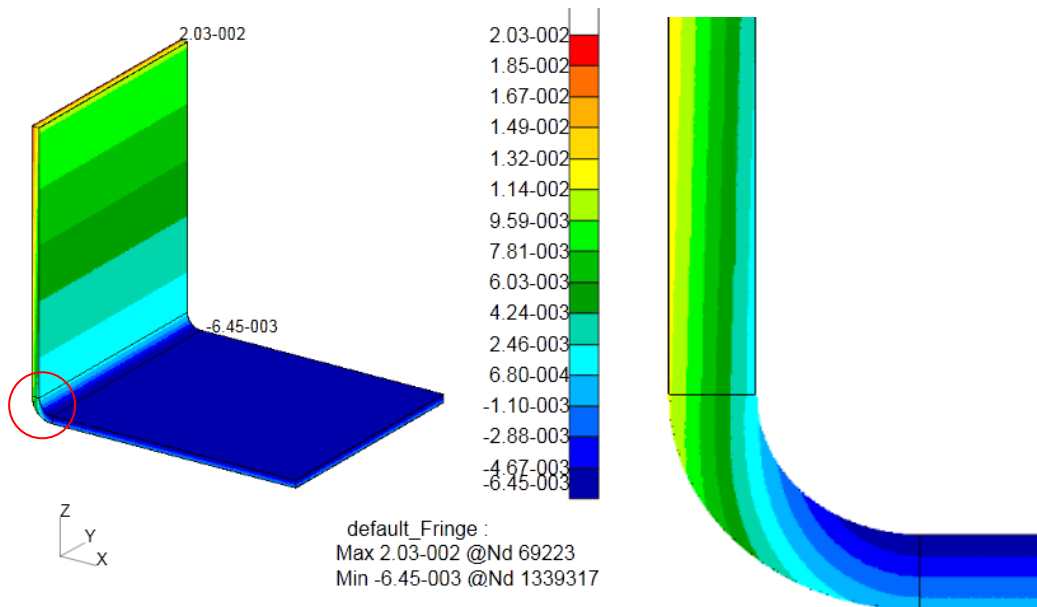


Figura 26. Desplazamiento en Z modelo 0° con longitud de elemento 0.2 mm.

Se puede ver en la Figura 26 que el ala superior se ha levantado algo, pero el inferior nada, esto es lo que se pretendía con las condiciones de contorno. Aún así los valores del desplazamiento son muy pequeños, esto se debe a que en el ala superior, las fibras van en dirección de Z global, con lo que tienen una rigidez muy alta.

Como se dijo antes, el ala superior está realizando un giro, por lo tanto la superficie de atrás del ala superior estará un poco más elevada que el punto que está a la misma altura antes del desplazamiento, esta es la razón de que las líneas se vayan inclinando hacia la derecha en el perfil.

Después del análisis realizado se puede decir que los resultados que han salido del programa son correctos. De modo que ya es hora de calcular lo que realmente interesa, el ángulo que se cierra la probeta tras el enfriamiento. Para ello, hay que conseguir obtener los desplazamientos en el eje X en función de la localización en el eje Z, se van a mirar los desplazamientos de los nodos de la línea media del perfil. Por un lado hay que obtener una lista de los nodos de la línea media del ala superior, que es la que interesa conocer cuánto se cierra. Y por otro lado hay que sacar los valores de los desplazamientos en el eje X.

Para obtener la lista: *Tools > List > Create*, aquí se abre una ventana en la cual se debe seleccionar *FEM > Node > Attribute*, se va a obtener la lista a partir de las coordenadas de los tres ejes, que deben entre los tres, seleccionar solo los nodos de la línea media del perfil exterior, ya que el desplazamiento es el mismo por todo el largo de la probeta. Para seleccionar solo estos nodos se les da los valores (en mm) a los ejes de:

- $X = 0.8$
- $Y = 0$
- $Z > 0$

En la lista de nodos, se puede pulsar en *Highlight* para asegurar que son los correctos, ahora se procede a obtener los desplazamientos en función de la altura. En el módulo de resultados, *Create > Report > Overwrite File*, se selecciona como siempre *Displacements, Translational*, y el componente X del desplazamiento que es el que se desea obtener y la localización de Z. Todavía hay que introducir la lista de nodos que se ha obtenido y en *Sorting Options* ponerlo para que empiece desde  $Z=0$ , para esto, se selecciona *Z Location* y *Ascending*. Con esto ya se obtiene la lista de desplazamientos, donde se puede ver la altura, que va variando de 0.2 en 0.2, el nodo al que corresponde y el desplazamiento en X que tiene. La lista sigue hasta que llega a la altura de 55.4 mm (ver Figura 27).

-Entity ID--	Z Location--	X Component--
279390	0.000000	0.006719
279389	0.199955	0.008033
279388	0.399957	0.009347
279387	0.599958	0.010662
279386	0.799956	0.011976
279385	0.999958	0.013291
279384	1.199960	0.014605
279383	1.399960	0.015919
279382	1.599960	0.017234
279381	1.799960	0.018548
279380	1.999960	0.019863
279379	2.199960	0.021177
279378	2.399960	0.022491
279377	2.599960	0.023806
279376	2.799960	0.025120
279375	2.999960	0.026435
279374	3.199960	0.027749
279373	3.399970	0.029064
279372	3.599960	0.030378
279371	3.799960	0.031692
279370	3.999960	0.033007

Figura 27. Parte de lista desplazamientos X/localización Z.

Cuando se tiene la lista, se puede calcular ya el ángulo de cierre mediante una fórmula muy sencilla.

$$\cos \beta = \frac{Desp. X}{L}$$

- $\beta$  es  $90 - \text{ángulo de cierre}$
- *Disp. X* es el desplazamiento máximo en X, es decir el del nodo más alto, menos el desplazamiento en Z=0
- *L* es la longitud del ala, que es 55.4 mm

De la fórmula, sale que  $\beta = 89.623453^\circ$ , con lo que el ángulo de cierre es:

$$\Delta\beta = 90 - \beta = 0.376547^\circ.$$

Se ve muy claro si se representan en una gráfica los valores obtenidos en la lista (ver Figura 30).

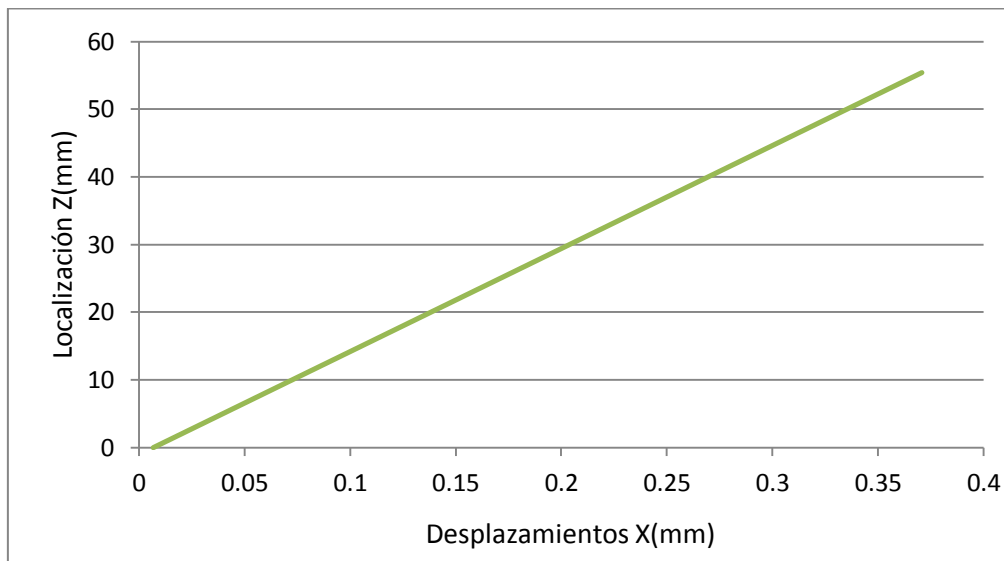


Figura 28. Desplazamientos X frente a localización Z de modelo 0.2 mm.

Tipo estudio	$\Delta\beta$
Experimental	$0.35845^\circ$
Analítico	$0.37665^\circ$
Numérico	$0.376547^\circ$

Tabla 4. Resultados del ángulo de cierre probeta  $0^\circ$ .

Se puede ver la similitud con los resultados obtenidos analíticamente y también la disparidad con los que se tomaron del estudio experimental (ver Tabla 4), ya se preveía que no estuvieran muy cercanos dado que la fabricación experimental no fue todo lo meticulosa que debía. Sin embargo, el hecho de que sean tan similares a los analíticos es una buena señal de que el modelo realizado se acerca bastante a la realidad que se pretendía modelar.

#### 4.2.4 Remallado

Llegado este punto, donde ya se conocen los resultados que vamos a emplear como referencia, se van a ir realizando diferentes mallados del modelo y calculando los desplazamientos para compararlos con los de la malla más fina. Lo que se pretende en este apartado es reducir el tiempo de cálculo del programa y averiguar en qué partes de la geometría se puede cambiar el mallado sin que afecte a los resultados.

A primera vista, la zona que parece más problemática a la hora del cambio del mallado es la curva, con lo que los primeros intentos serán aumentando el tamaño de elemento en las alas, sin modificarlo en la curva. El número de elementos que hay en el espesor debe mantenerse igual, ya que simula el número de láminas que tiene el laminado. Por tanto se va a aumentar el tamaño de elemento en la longitud de las alas y en el largo de la probeta, incluso en el largo de la curva, ya que los resultados que se desean obtener no son en el largo de la probeta. Se vio que se redujo un 75% el largo de ésta sin ningún efecto sobre los resultados.

El primer aumento de la longitud de elemento es de 0.2 a 0.4 mm. Dado que en la curva los elementos tienen un largo de 0.2 mm, hay que realizar esta transición de modo suave, no se puede pasar de un elemento a otro junto a él con el doble de largo. Esto solo influye en la longitud de las alas, que es dónde se da la transición. En el largo de la probeta no hay necesidad de realizar ninguna transición suave.

Para poder fijar la longitud del elemento en diferentes zonas hay que usar la herramienta *Mesh Seed*, con ella se le indica al programa o bien el número de elementos que se desean en una curva o bien la longitud de estos. Hay que hacerlo en dos partes, primero colocar las semillas de mallado uniformes en las curvas deseadas y después en dónde haya transición irán aumentando los elementos.

Para las curvas con elementos uniformes se selecciona *Create > Mesh Seed > Uniform y Element Length* para indicar la longitud deseada mejor que el número de elementos. En el primer caso esta longitud es 0.4 mm como ya se ha dicho y se seleccionan las curvas que tendrán elementos uniformes (ver Figura 29).

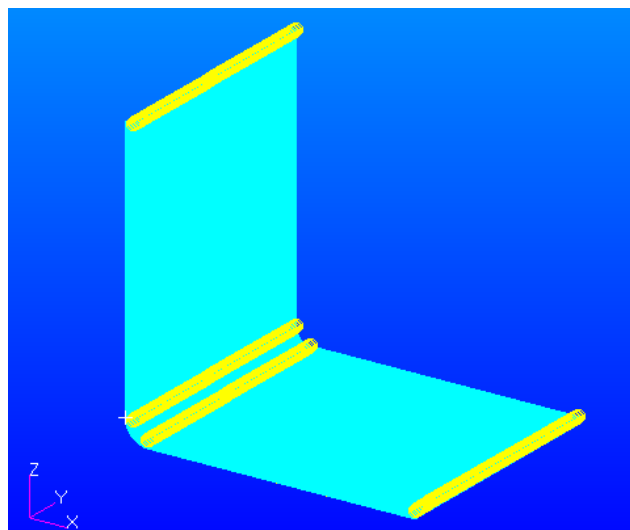


Figura 29. Mesh Seed uniforme 0.4 mm.

Para conseguir la transición de 0.2 a 0.4 mm en vez de seleccionar *Uniform*, se usará *One Way Bias*, en la cual se puede seleccionar la longitud inicial de los elementos y la final en la curva, 0.2 y 0.4 respectivamente. En el programa se ven unas flechas que indican la dirección que tiene la geometría, esto hay que tenerlo en cuenta a la hora de poner la longitud inicial y final, ya que las flechas indican cual es el inicio de la curva. Puede apreciarse como aumenta la distancia entre las semillas de mallado al final (ver Figura 30), aunque se ve mucho más claro cuando el tamaño de elemento es mayor.

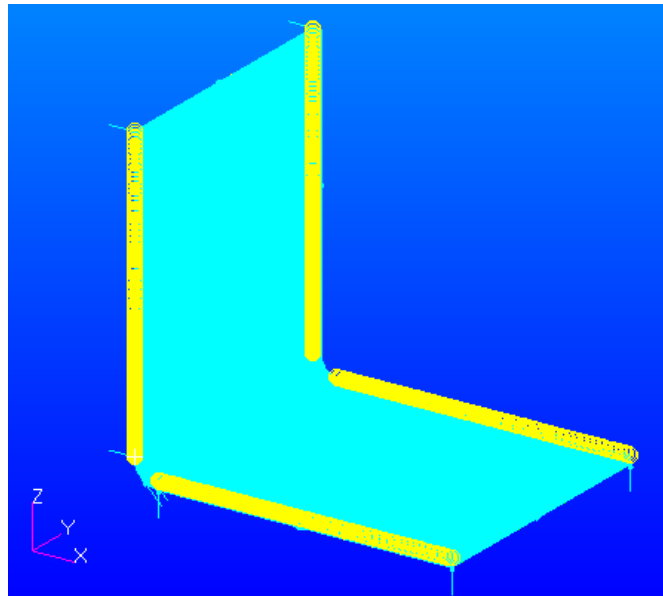


Figura 30. Mesh Seed One Way Bias 0.2-0.4 mm.

Ya están puestas todas las semillas necesarias, con lo que ya solo queda mallar. Se crea una malla uniforme de tamaño 0.2 mm para que en la curva y en el espesor ésta sea la longitud de los elementos. A partir de aquí el procedimiento es el mismo, se crea el caso y se realiza el análisis, que ya se puede hacer en el ordenador personal, dado que ha disminuido mucho el número de elementos. Hecho el cálculo se comparan los resultados y si salen cercanos se sigue aumentando el tamaño de elementos en las alas. A la vez que se ha ido aumentando este, también se ha ido aumentando el tamaño en la zona curva para ver cómo afectaba a los resultados. Pero siempre manteniendo los mismos elementos en el espesor.

Para comparar los resultados se ha generado una gráfica, en la cual es muy sencillo ver cuando los resultados dejan de ser aceptables. Pero en la gráfica no se pueden ver los resultados exactamente, con lo que también se ha creado una tabla que contiene todos los valores que pueden resultar interesantes para evaluar los modelos.

En la gráfica se puede ver el proceso que se ha seguido en el aumento del tamaño de los elementos. Primero se ha ido aumentando solo en las alas y en el largo, hasta 1.6 mm la longitud del elemento. Después se ha reducido algo para aumentar el tamaño en la curva a 0.4, con el mallado de 0.8 en las alas y el largo, como los resultados seguían siendo correctos se ha seguido aumentando para cada longitud de elemento que se aumentaba en las alas y el largo se probaba aumentando en la curva. Así hasta llegar al tamaño de 12.8 y 1.6 mm en la curva donde ya se han separado algo los resultados, pero aún aceptables. En 12.8 y 3.2 mm en la curva ya se separa considerablemente, lo que da a entender que el siguiente aumento

producirá un cambio enorme en los resultados, y así es, ya que al definir la longitud de los elementos en la zona curva con 6.4 mm ya se separa muchísimo del resultado real. Se puede decir que el último mallado con el que se obtienen unos resultados aceptables es 12.8 mm en las alas y el largo y 1.6 mm en la curva (ver Figura 31), lo cual es impresionante ya que los elementos están muy deformados.

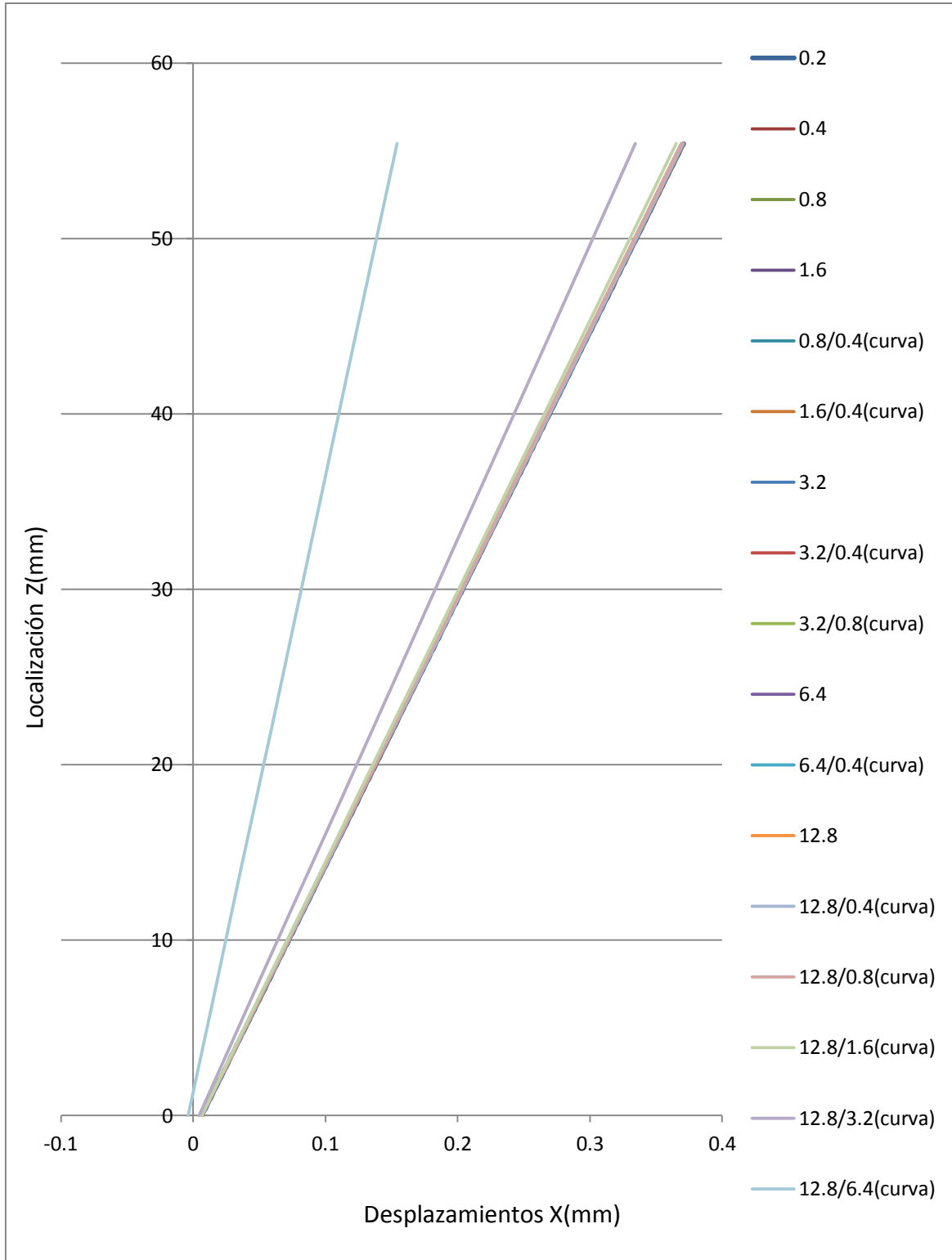


Figura 31. Desplazamientos X frente a localización Z de todos los modelos probeta 0°.

Tamaño	Nodos	Elementos	Tiempo	Z=0(mm)	Z=55.4(mm)	$\Delta\beta(^{\circ})$
0.2	1335069	1180000	cluster	0.006719	0.370804	0.376547
0.4	477414	420000	1:27:53	0.006719	0.370801	0.376544
0.8	168768	147168	0:44:10	0.006719	0.370801	0.376544
0.8/0.4(curva)	121536	105840	0:18:20	0.006698	0.370464	0.37622
1.6	57888	49600	0:04:08	0.006719	0.370801	0.376544
1.6/0.4(curva)	42336	36208	0:03:14	0.006698	0.370463	0.37622
3.2	21267	17664	0:01:17	0.006719	0.370801	0.376544
3.2/0.4(curva)	15453	12800	0:00:38	0.006698	0.370463	0.37622
3.2/08(curva)	11322	9344	0:00:22	0.006613	0.36913	0.3749
6.4	7857	6144	0:00:16	0.006719	0.370801	0.376544
6.4/0.4(curva)	5589	4352	0:00:10	0.006698	0.370463	0.37622
12.8	3195	2240	0:00:08	0.006719	0.370801	0.376544
12.8/0.4(curva)	2205	1536	0:00:07	0.006698	0.370463	0.37622
12.8/0.8(curva)	1530	1056	0:00:12	0.006613	0.369131	0.3749
12.8/1.6(curva)	1170	800	0:00:06	0.006365	0.365281	0.3712
12.8/3.2(curva)	855	576	0:00:11	0.004446	0.334396	0.34124
12.8/6.4(curva)	630	416	0:00:06	-0.003667	0.154123	0.1632

Tabla 5. Comparación de datos obtenidos del cálculo probeta 0°.

Se han utilizado varios factores para analizar los modelos realizados (ver Tabla 5). El número de nodos, de elementos y el tiempo están intrínsecamente relacionados, cuantos menos elementos/nodos, menor será el tiempo de cálculo. Cuando llega al orden de segundos, no es muy fiable para comparar, ya que si el ordenador en ese momento tenía más programas abierto pues tardaría unos segundos más. Pero el tiempo sí es útil para comparar el segundo modelo con el que se decidió que era el último óptimo, se reduce de aproximadamente una hora y media al orden de segundos, este tiempo se consulta en el .log que se obtiene tras el cálculo, hay que mirar el tiempo *Real*.

El valor de  $Z=55.4 - Z=0$  es el desplazamiento total en el eje X, el valor *Desp.X* que se introducía en la fórmula para calcular  $\beta$ . Y en la última columna está el resultado que realmente interesa para comparar. Se puede ver que todos los valores coinciden al menos hasta el segundo decimal, hasta el último modelo que se ha considerado aceptable, con un valor de  $0.3712^{\circ}$ . El cual está bastante cerca de los  $0.376547^{\circ}$  que se obtuvieron con el cluster. El número de elementos ha disminuido en un 99.93% lo cual es una reducción enorme, no se esperaba que se pudiera reducir tanto el número de elementos sin que afectara a los resultados significativamente.

Es interesante ver lo deformados que han llegado a estar los elementos en el último modelo que se consideró aceptable (ver Figura 32).

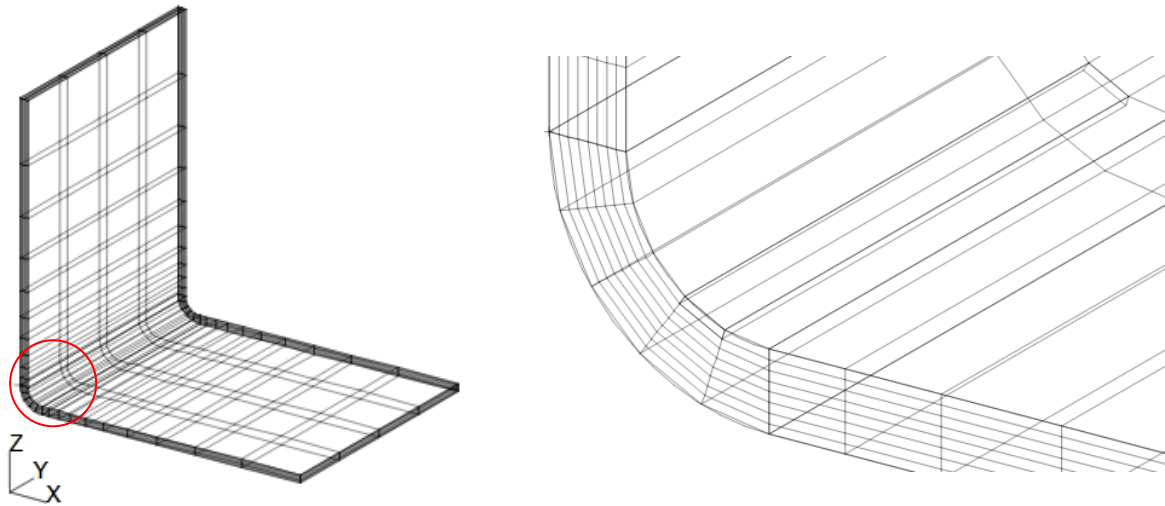


Figura 32. Mallado 12.8 mm y 1.6 mm en la curva.

### 4.3 Probeta 90°

Una vez hecho el estudio numérico de la probeta de 0°, el proceso de creación del modelo de la de 90° se acelera y hace mucho más fácil. La geometría es la misma, lo único que va a cambiar es el material, ya que ahora las fibras son perpendiculares a como lo eran en la probeta ya estudiada. Con lo que solo es necesario un giro de 90° a la matriz de rigidez de 0°, esto ya se hizo en el apartado 4.

$$Q_A^{90} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 8.0754 & 2.277 & -0.4845 & 0 & 0 & 0 \\ 2.277 & 126.3663 & 2.277 & 0 & 0 & 0 \\ -0.4845 & 2.277 & 8.0754 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.28 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.28 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.28 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{vmatrix}$$

Los valores son los mismos, pero las posiciones han cambiado, siguen estando en ejes de ortotropía. Con los valores de los coeficientes térmicos ocurre lo mismo (ver Tabla 6).

$\alpha_x$	$\alpha_y$	$\alpha_z$	$\alpha_{xy}$	$\alpha_{yz}$	$\alpha_{zx}$
$\alpha_2$	$\alpha_1$	$\alpha_3$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Tabla 6. Coeficientes térmicos probeta 90°.



Estos valores son los que se deben introducir en la ventana *Input Properties* del módulo *Materials*, como ya se explicó para la anterior probeta. Esta vez se nombra el material como "Carbono\_90". En las propiedades se usará este material nuevo creado, lógicamente, y la orientación del material irá también en los ejes del elemento.

A diferencia de cómo se hizo en el mallado de la anterior probeta, aquí se parte de unos resultados y se pueden realizar ciertas hipótesis de partida sobre éstos, para aplicarlas al mallado que se necesita para obtener unos desplazamientos similares a los reales de esta probeta. Debido a esto, no es necesario empezar mallando con elementos de longitud 0.2 mm, sino que se supone que la última malla aceptable para la probeta anterior lo es también para ésta, dado que la geometría, las cargas y las condiciones de contorno son las mismas, solo cambia el material y con él las propiedades de la pieza.

A pesar de hacer estas hipótesis, se decide probar con dos mallados medianos, con un tiempo de cálculo pequeño para asegurar que son correctas, y posteriormente se realizará el cálculo con el último mallado aceptable. El primer mallado que se va a probar es el de 1.6 mm en las alas y el largo de la probeta, sin variar los elementos en la curva, ya que esto es lo que podría afectar a los resultados. En el segundo mallado tampoco se varía el tamaño de los elementos en la zona curva, simplemente se aumenta de 1.6 a 6.4 mm para asegurar que al aumentar tanto el tamaño del elemento los resultados no varían. Finalmente se pasa directamente al último mallado aceptable según la otra probeta, y si se obtienen unos resultados similares a los anteriores se podrá asegurar que se puede aumentar también el tamaño de los elementos en la curva sin que el modelo deje de ser aceptable y se validarán las hipótesis que se han hecho al variar las propiedades de la probeta.

Para el primer mallado se obtendrán la deformada y los desplazamientos para analizarlos y asegurar que los resultados son lógicos ya que se podría haber cometido algún error durante el modelado.

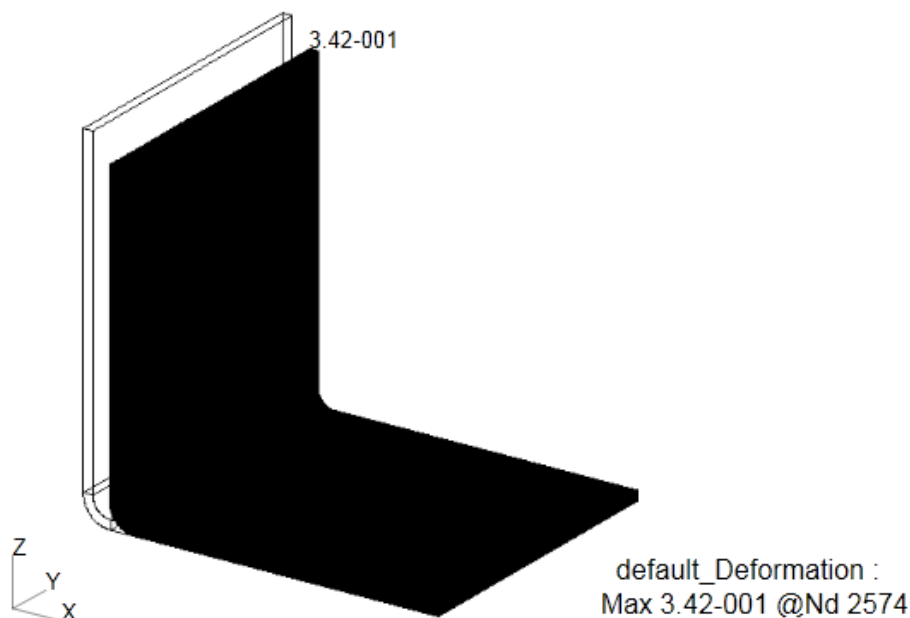
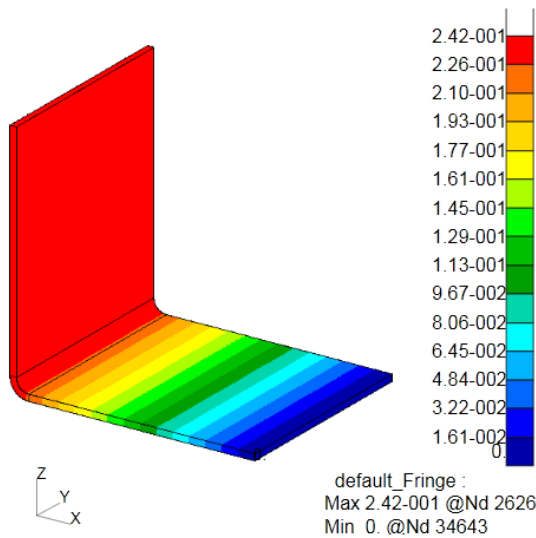


Figura 33. Deformada modelo 90°.

Como puede verse en la Figura 33, la probeta no se ha cerrado, como se esperaba, parece que el ala superior se ha desplazado en dirección X de manera homogénea. Para comprobar si esto es correcto, se van a analizar los desplazamientos en las tres direcciones.



El ala inferior reduce su longitud ya que  $\alpha_2 > 0$  y esta reducción es cada vez mayor porque se aleja de la condición de contorno  $u_x = 0$ . Esto sale de la fórmula:  $\Delta L = \alpha_2 * \Delta T * L$  y todo el ala superior se desplaza la misma cantidad dado que está a la misma  $L$ .

Son valores altos (ver Figura 34) porque el eje X en el ala inferior es perpendicular a la dirección de las fibras, tiene muy poca rigidez en esa dirección.

Figura 34. Desplazamiento en X modelo 90°.

La probeta aumenta su longitud en dirección Y porque  $\alpha_1 < 0$ . Esta vez la magnitud del desplazamiento es pequeña ya que es en la dirección de las fibras.

Se puede ver (en la Figura 35) también como aumenta a medida que se aleja de la condición de contorno  $u_y = 0$  en el perfil.

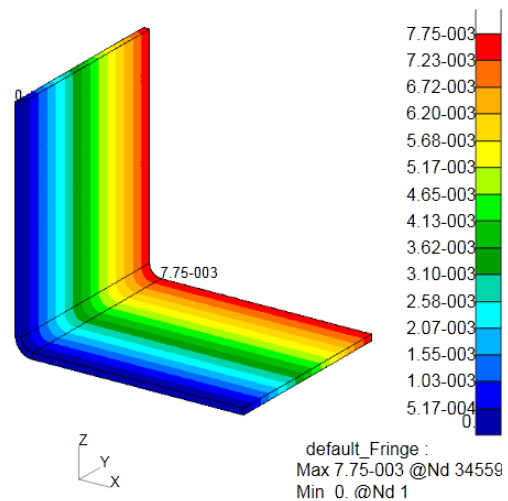
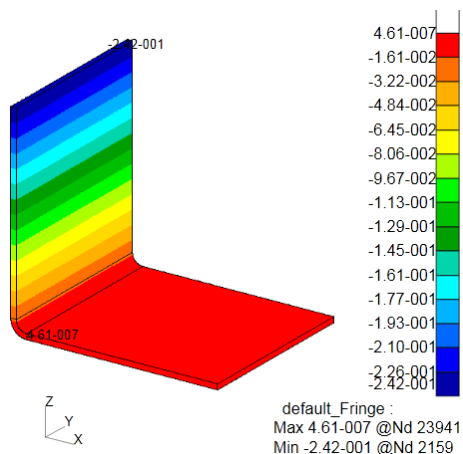


Figura 35. Desplazamiento en Y modelo 90°.



Se reduce el alto del ala superior porque  $\alpha_2 > 0$  y son valores altos por la perpendicularidad de las fibras en esa dirección.

También se ve (en la Figura 36) que el espesor se reduce, esto ocurre debido a que  $\alpha_3 > 0$ , pero no es un valor grande dado que el espesor es muy pequeño.

Figura 36. Desplazamiento en Z modelo 90°.

Del análisis se puede decir que los resultados son lógicos, con lo que ahora hay que entrar en los coeficientes térmicos para comprobar si debería cerrarse la probeta o no. Se dijo que la razón del Spring-back en las zonas curvas era la diferencia en los coeficientes de expansión térmica, pero en este caso, al tener las fibras dirección en el eje y, el  $\alpha_2$  lleva la dirección del eje x, que anteriormente era  $\alpha_1$  y era diferente al  $\alpha_3$ , pero como  $\alpha_2 = \alpha_3$  las deformaciones serán iguales y no habrá Spring-back. Por lo tanto el modelado realizado es correcto. Esto disiente de los resultados experimentales que predecían un  $\Delta\beta = 0.62645^\circ$ , mientras que se ha concluido que es nulo.

Ahora hay que comparar los valores que se obtienen de los tres mallados realizados, solo hay que comparar un valor ya que todo el ala superior se desplaza igual.

Tamaño	1.6	6.4	12.8-1.6(curva)
Desplazamiento X(mm)	0.238576	0.238576	0.238576

Tabla 7. Resultados desplazamiento X probeta  $90^\circ$ .

El desplazamiento es el mismo para los diferentes mallados (ver Tabla 7), con lo que las hipótesis que se hicieron se pueden considerar válidas. Entonces estas mismas hipótesis sobre el mallado se aplicarán también a la última probeta que se va a estudiar.

#### 4.4 Probeta $[90^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_S$

En esta probeta la geometría va a ser algo diferente, esto se debe a que hay diferentes orientaciones en las diferentes láminas del laminado. Para darle la orientación a las fibras se le asignaba el material con las propiedades en esa dirección a un sólido del modelo, con lo que habrá que crear un sólido por cada dirección. El proceso de creación de la geometría es el mismo, pero cuando se termine, se va a dividir cada uno de los tres sólidos que se han creado en ocho, uno por lámina.

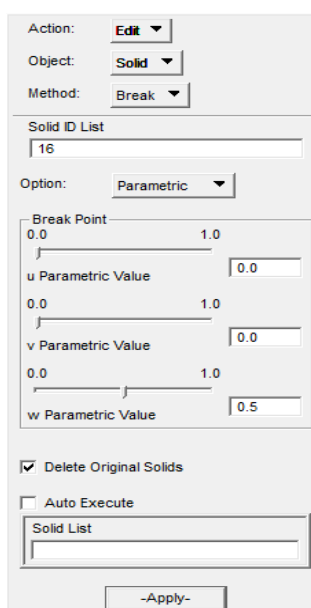


Figura 37. Dividir sólidos.

Esta división se realiza con *Edit > Break > Solid*, dentro de esa ventana (ver Figura 37) se elige la opción *Parametric* y se le da un valor de 0.5 a *w Parametric Value* tal como aparece en la imagen, con esto se consigue dividir el sólido por la mitad en la dirección deseada.

Se activa la opción de eliminar los sólidos originales, ya que crea dos nuevos cada vez que se hace la división.

Por último se debe seleccionar el sólido y pulsar *Apply*, con una vez solo se ha dividido en dos sólidos, ahora hay que ir a cada división y volver a hacerlo, y entonces habrá cuatro, con lo que se tendrá que repetir el proceso. Esto mismo se hace para los tres sólidos del modelo.

Si en el programa aparece un mensaje de error al intentar dividir el sólido en las ocho partes, puede ser porque la tolerancia global del modelo sea muy grande, ir a *Preferences > Global >*

Después de las divisiones, la geometría debe quedar como se ve en la Figura 38:

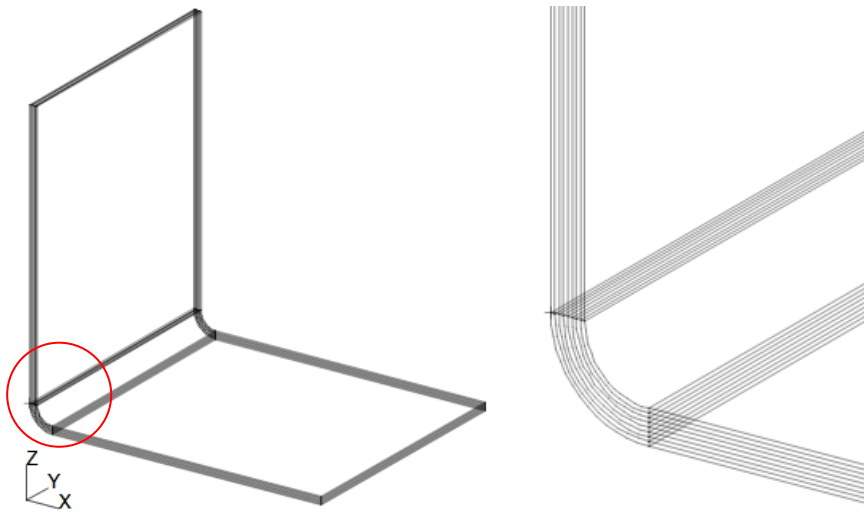


Figura 38. Geometría con ocho sólidos.

En cuanto a la creación de los materiales, los respectivos a las orientaciones de  $0^\circ$  y  $90^\circ$  ya se han explicado y realizado anteriormente. Ahora solo quedaría por crear los de  $45^\circ$  y  $-45^\circ$ . Estos, como ya se dijo tienen sus matrices de rigidez casi completas, ya que no están orientados en los ejes de ortotropía. Rellenando con estos valores se crean los materiales “Carbono\_45” y “Carbono\_-45”.

$$Q_A^{45} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 39.0290 & 30.4690 & 0.8963 & 29.5727 & 0 & 0 \\ 30.4690 & 39.0290 & 0.8963 & 29.5727 & 0 & 0 \\ 0.8963 & 0.8963 & 80.0754 & 1.3809 & 0 & 0 \\ 29.5727 & 29.5727 & 1.3809 & 32.4718 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.28 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.28 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{vmatrix}$$

$$Q_A^{-45} = \begin{vmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 39.0290 & 30.4690 & 0.8963 & -29.5727 & 0 & 0 \\ 30.4690 & 39.0290 & 0.8963 & -29.5727 & 0 & 0 \\ 0.8963 & 0.8963 & 80.0754 & -1.3809 & 0 & 0 \\ -29.5727 & -29.5727 & -1.3809 & 32.4718 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.28 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.28 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{vmatrix}$$

	$\alpha_x$	$\alpha_y$	$\alpha_z$	$\alpha_{xy}$	$\alpha_{yz}$	$\alpha_{zx}$
$45^\circ$	$1.25 \cdot 10^{-5}$	$1.25 \cdot 10^{-5}$	$\alpha_3$	$-2.7 \cdot 10^{-5}$	0	0
$-45^\circ$	$1.25 \cdot 10^{-5}$	$1.25 \cdot 10^{-5}$	$\alpha_3$	$2.7 \cdot 10^{-5}$	0	0

Tabla 8. Coeficientes térmicos probetas  $45^\circ$  y  $-45^\circ$ .

En la Tabla 8 se ve que los coeficientes térmicos cambian su valor menos el  $\alpha_3$ , por la misma razón que las matrices están casi completas. También ha cambiado el valor de 0 de un coeficiente, el  $\alpha_{xy}$ . Sin embargo, aquí si se espera que se cierre la probeta, ya que hay disparidad en los coeficientes térmicos, no ocurre como en la probeta de  $90^\circ$  que eran iguales el  $\alpha_x$  y el  $\alpha_z$ .

En el módulo de *Properties*, también cambia el procedimiento respecto a los otros dos modelos, ya que aquí hay 24 sólidos en vez de los 3 que había antes. Además hay que ir asignando cada material a su sólido correspondiente, que simula cada lámina. El orden que tienen las láminas se puede fácilmente sacar del nombre de la probeta (ver Figura 39):

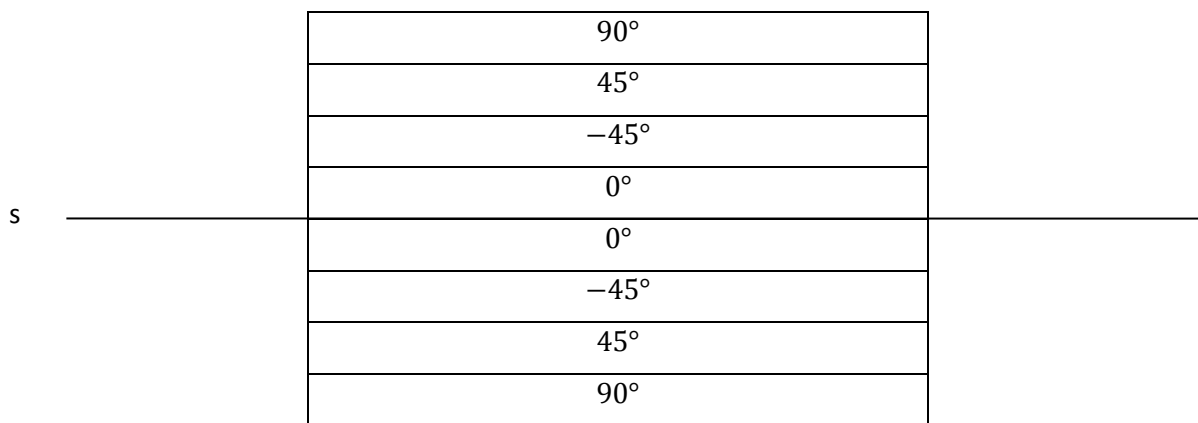
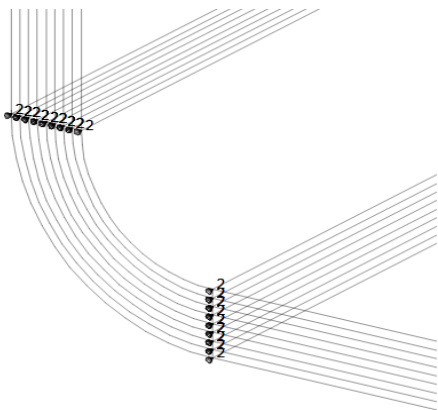


Figura 39. Distribución láminas.

De esta forma, por ejemplo, el material “*Carbono\_90*” se debe asignar al sólido superior e inferior de las tres partes en las que se ha creado la geometría (dos alas y zona curva), y se hace lo mismo para cada material. La orientación del material sigue siendo en los ejes del elemento.



Para las condiciones de contorno ocurre lo mismo, si en los otros modelos se tenían que asignar a una superficie, ahora debe hacerse a ocho. En la Figura 40 se puede ver cómo quedaría la condición de  $u_y$  en la zona curva.

En la condición de temperatura se tienen que seleccionar todos los sólidos, solo hay que enmarcar el modelo completo.

Figura 40. Condiciones de contorno  $u_y$  en la curva.

Ya se puede proceder al mallado, como se ha dicho antes, dado que las dimensiones de la probeta y las condiciones de contorno son las mismas, no es necesario partir de una malla muy fina, sino que se va a seguir el mismo proceso que en el modelo de  $90^\circ$ . Primero la malla más o menos fina, luego la mediana y por último la mayor que se consideró aceptable en el primer

modelo. En el mallado al igual que en el resto de módulos hay que tener en cuenta los sólidos que hay y seleccionarlos todos.

Se realiza el análisis para el primer mallado, de longitud de elemento 1.6 mm en las alas y el largo, sin variar el tamaño en la zona curva. Aquí es muy difícil analizar si los resultados son lógicos debido a que el laminado está compuesto por diferentes orientaciones, así que como se han realizado ya dos análisis correctamente con la misma geometría y condiciones de contorno, se supondrá que los resultados obtenidos son correctos. Solo se puede predecir que la probeta se va a cerrar y efectivamente ocurre (ver Figura 41).

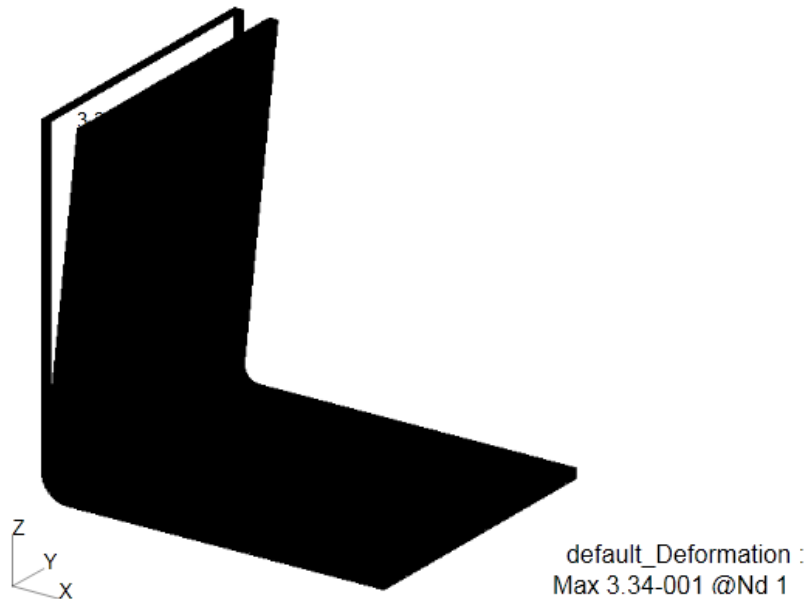


Figura 41. Deformada modelo  $[90^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_S$ .

Además del cierre de la probeta, también se observa que los desplazamientos en las direcciones Y y Z son muy pequeños, esto es lógico, dado que en este laminado no ocurre como en los anteriores que había una dirección muy rígida y la otra muy poco, sino que al tener fibras en varias orientaciones, todas las direcciones son rígidas. No tanto como cuando se mira en la dirección de las fibras, pero bastante más que cuando es perpendicular.

Tipo estudio	$\Delta\beta$
Experimental	0.60637°
Analítico	0.3172°
Numérico	0.318284°

Tabla 9. Resultados del ángulo de cierre probeta  $[90^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_S$ .

Como se puede ver en la Tabla 9, el resultado obtenido numéricamente es muy similar al que se tenía del cálculo analítico, lo cual es muy buena señal de que el modelado es correcto. Al igual que con las otras probetas, difiere mucho del experimental, ya no sorprende que suceda

esto. Una vez que se comprueba que el modelo está bien, se vuelve a mallar con los otros dos tamaños que se dijeron antes (ver Tabla 10).

Tamaño	Z=0(mm)	Z=55.4(mm)	$\Delta\beta$
1.6	0.023372	0.331123	0.318284
6.4	0.023373	0.33121	0.318476
12.8/1.6(curva)	0.022969	0.32603	0.313433

Tabla 10. Comparación de datos obtenidos del cálculo probeta  $[90^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_S$ .

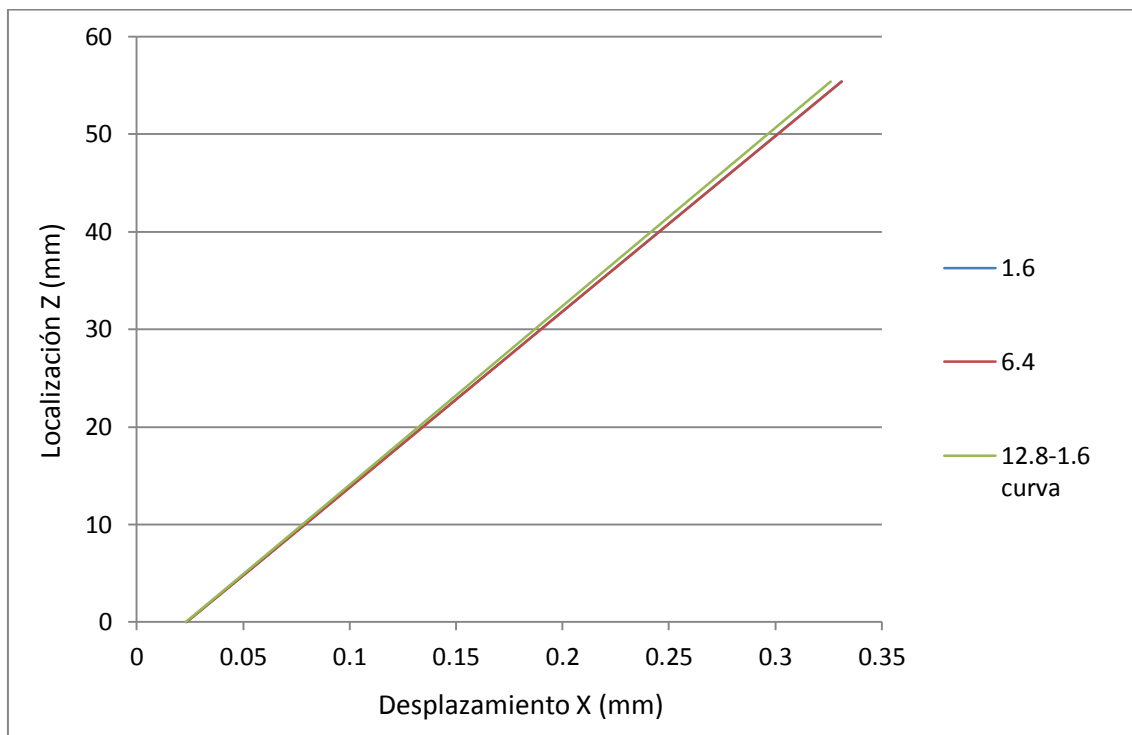


Figura 42. Desplazamientos X frente a localización Z de todos los modelos probeta  $[90^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]_S$ .

Se puede ver en la Figura 42 y además comprobar con los valores exactos que no se desvía mucho el resultado que se obtiene con la malla más grande del que se saca de la malla más fina. Esto quiere decir que las hipótesis también son correctas para esta probeta.

## 5 CONCLUSIONES

---

Por último, en este capítulo se exponen las conclusiones que se han podido extraer de los resultados obtenidos en el análisis.

El objetivo principal de este proyecto era desarrollar una herramienta de simulación que lograra calcular el Spring-back en piezas de fibra de carbono mediante un análisis numérico con elementos sólidos. Se puede decir que se ha logrado, ya que los resultados han sido los esperados, comparándolos con los obtenidos del cálculo analítico. Sin embargo la comparación con los resultados experimentales no se ajusta tanto. Esto es, debido por un lado a que los modelos solo incluyen parte de los fenómenos causantes del Spring-back y, por otro, a que la fabricación de las probetas y las medidas del ángulo de cierre no fueron lo suficientemente cuidadosas.

En el modelo realizado no se han tenido en cuenta muchos factores, solo la geometría, el material, las condiciones de contorno y la variación de temperatura. En las tres probetas diferentes que se han estudiado lo único que cambiaba era el material, variando solo este en el modelo que se hizo de la primera probeta han salido resultados válidos para las otras dos. Con esto se puede decir que se ha generado un modelo que es válido para todas las probetas que tengan una geometría similar y estén sometidas a las mismas condiciones. Pensando más sobre las condiciones, las de contorno solo son para que no se mueva como sólido rígido, permitiendo que se deforme libremente. Con esto se pueden generalizar las condiciones de contorno para casi todas las piezas. La variación de temperatura, que es la que provoca el cierre de la probeta es muy fácil de modificar, solo hay que cambiar la temperatura ambiente y la temperatura a la que llega al autoclave, con lo que se podría decir que se ha generado una herramienta para calcular el Spring-back en piezas de material compuesto de fibra de carbono con forma de L.

Aunque ya se ha visto anteriormente, concluir que para probetas con fibras solo en dirección  $90^\circ$  no se da el fenómeno del Spring-back. Mientras que en las que incluyen más orientaciones sí se dará.



El objetivo principal que tenía este proyecto ayuda a la resolución de modelos de piezas que contienen alguna parte curva en su geometría, pero no solo es útil para los perfiles en L. También se pretendía averiguar cuánto se podía aumentar la malla y en qué zonas y cómo afecta esto a los resultados, y hasta dónde se ha llegado ha sido sorprendente. En la probeta que se ha hecho el análisis iterativo probando los diferentes tamaños de malla ha sido en la de  $0^\circ$ , luego las conclusiones obtenidas, teniendo en cuenta que tienen la misma geometría y condiciones de contorno, se ha extrapolado a las otras dos probetas, con muy buena respuesta. Primero se decidió aumentar el tamaño de elemento en las alas, lejos de la zona curva que a primera impresión era la más problemática, y después poco a poco se fue aumentando en la curva mientras se dejaba fijo en el resto de la pieza. Finalmente se llegó a un tamaño de elemento en las alas y el largo de la probeta de 12.8 mm y en la zona curva de 1.6 mm sin que los resultados se desviaran. Parecía imposible llegar a estos valores, ya que los elementos están muy deformados debido a que en el espesor siguen teniendo una longitud de 0.2 mm. Con este aumento se ha conseguido reducir el tiempo de cálculo de la primera malla que se realizó, que no se pudo hacer en el ordenador personal (la segunda realiza el cálculo alrededor de una hora y media), al orden de diez segundos, ya que el número de elementos se ha reducido en un 99.93%.

Haber llegado a esto no es solo útil para las probetas en L, sino que ahora se sabe que se puede aumentar tanto el tamaño de elemento en piezas con zonas curvas que estén sometidas a condiciones similares a estas. Se sabe que no hay que hacer una malla finísima en la zona curva, de hecho en el modelo se llegan a tener solo cinco elementos en la longitud de ésta, y que en las zonas alejadas se puede aumentar muchísimo el tamaño sin que influya significativamente en la precisión de los resultados. Con esto se puede llegar a reducir el tiempo de cálculo de ciertas piezas hasta un límite que no se esperaba y con él también se reducen los costes por supuesto.

## 6 REFERENCIAS

---

[1] F. R. Coca Jiménez, Estudio de deformaciones por enfriamiento tras el curado en piezas de material compuesto, Sevilla, 2015.

[2] [http://somim.org.mx/articulos2010/memorias/memorias2013/pdfs/A3/A3\\_97.pdf](http://somim.org.mx/articulos2010/memorias/memorias2013/pdfs/A3/A3_97.pdf)

[3] <http://www.intechopen.com/books/finite-element-analysis-new-trends-and-developments/damage-tolerant-design-of-stiffener-run-outs-a-finite-element-approach>

[4] F. París, J. Cañas, J. Marín y A. Barroso, Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos, Sección de Publicaciones Escuela Técnica Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla.