

# Centro Politécnico Superior

Universidad de Zaragoza



## Proyecto Fin de Carrera

Diseño y caracterización de mecanismos flexibles con dos grados de libertad para la aplicación a junta cardan para una plataforma de posicionamiento

Autor: Albert Figueres Liñan

Directora: Ana Cristina Majarena Bello

Codirector: Jorge Santolaria Mazo

Ingeniería Industrial

Diciembre de 2010





# Diseño y caracterización de mecanismos flexibles con dos grados de libertad para la aplicación a junta cardan para una plataforma de posicionamiento

## RESUMEN

El presente proyecto, trata el estudio de una solución alternativa para el desplazamiento de una plataforma de precisión en un contexto predeterminado.

El objetivo es la culminación de una unión flexible que permita el movimiento en acimut y en elevación de la plataforma móvil.

Previamente a la concepción del diseño se ha hecho un estudio en profundidad de las bases teóricas, emprando la bibliografía disponible. En base a esta formación se ha justificado la factibilidad del mismo.

Se ha seguido con la optimización de los parámetros de diseño que determinarán, a lo largo de todo el proyecto, tanto la geometría como la manera de obtener un buen resultado con su variación.

En un siguiente paso se estudia las diferentes combinaciones, montajes y configuraciones para la correcta consecución de los objetivos marcados tanto en rango de movilidad como en la correcta colocación espacial dentro nuestro entorno establecido. De manera que se dejarán marcados tanto el diseño final, como su correcta colocación con los elementos dados y de apoyo.

Como continuación lógica a este proceso se hará una última simulación de todo el conjunto, con todos los elementos preestablecidos y de soporte de manera que se pueda confirmar su adecuado funcionamiento. Y su perduración a lo largo de su ciclo vital.

En una última parte de este proyecto se realizará la fabricación de una lámina del elemento flexible para la caracterización de su comportamiento, y de esta manera, poder realizar las adaptaciones pertinentes en los modelos para su aplicación futura como elemento de transmisión de desplazamientos. Al mismo tiempo nos permitirá corroborar los postulados y resultados que se han ido siguiendo durante toda la fase de desarrollo.

Un último apartado se destinará a una visión retrospectiva de todo el trabajo hecho, y se expondrán las conclusiones obtenidas.



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a Ana Cristina Majarena Bello y Jorge Santolaria Mazo, la oportunidad que me han brindado para realizar este proyecto y aprender de él. Al Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación por permitirme realizarlo.

A mi familia por saber orientarme y aconsejarme durante toda mi etapa estudiantil, gracias por vuestra confianza en mí durante estos años.

A todos mis compañeros y amigos que hicieron más grata mi etapa universitaria, dentro y fuera de ella.

Gracias.









# Índice general

1. Introducción .....	1
1.1. Justificación .....	1
1.2. Objetivos del proyecto .....	1
1.3. Descripción del proyecto .....	2
1.4. Contexto .....	2
2. Consideraciones teóricas.....	3
2.1. Introducción teórica .....	3
2.1.1. Teoría de la flexión .....	4
2.1.2. Deformación de las vigas.....	5
2.1.3. Utilización de una viga en voladizo como una articulación rotatoria.....	6
2.2. Consideraciones para el cálculo teórico del desplazamiento de uniones flexibles .....	7
2.2.1. Definición de los parámetros .....	9
2.2.2. Ejemplo de cálculo.....	10
2.3. Influencia de la modificación de los parámetros en el diseño .....	11
2.3.1. Variables dependientes del material .....	11
2.3.2. Variables dependientes de la geometría.....	12
3. Optimización de los parámetros de diseño .....	13
3.1. Introducción .....	13
3.2. Selección del material .....	13
3.2.1. Curva tensión/deformación.....	13
3.2.2. Materiales factibles de ser utilizados .....	14
3.3. Selección del tipo de unión .....	15
3.3.1. Limitaciones.....	15
3.3.2. Elección de la geometría.....	16
3.4. Simulación (Comprobación de los resultados teóricos).....	16
3.4.1. Parámetros geométricos vs ángulo.....	16
3.4.2. Optimización “L” .....	17
3.5. Conclusiones .....	19
4. Geometría para la combinación de dos elementos .....	21
4.1. Introducción .....	21
4.2. Objetivos.....	21

4.3.	Limitaciones.....	22
4.4.	Tipos de composiciones y disposiciones .....	22
4.5.	Movimientos parásitos .....	24
4.5.1.	Consideraciones previas.....	24
4.5.2.	Simulación .....	24
4.6.	Elección de la geometría.....	26
4.7.	Estabilidad .....	27
4.7.1.	Limitaciones.....	27
4.7.2.	Centro de gravedad .....	27
4.7.3.	Elementos auxiliares .....	28
4.7.4.	Optimización.....	29
4.7.5.	Orientación de los elementos auxiliares .....	30
4.8.	Elección de la disposición.....	31
4.8.1.	Limitaciones.....	31
4.8.2.	Trayectorias de los elementos flexibles .....	31
4.8.3.	Estudio de las trayectorias en el contexto predeterminado.....	32
4.9.	Elemento flexible .....	35
4.10.	Conclusiones .....	36
5.	Simulación .....	37
5.1.	Introducción .....	37
5.2.	Montaje final.....	37
5.3.	Ensayo a fatiga.....	38
5.4.	Soluciones en el caso de movimientos parásitos .....	40
5.5.	Conclusiones.....	42
6.	Ensayo.....	43
6.1.	Consideraciones previas.....	43
6.2.	Diseño .....	43
6.3.	Fabricación.....	44
6.4.	Montaje y Ensayo .....	45
6.4.1.	Orientación y numeración.....	46
6.5.	Resultados.....	47
6.5.1.	Objetivo .....	47
6.5.2.	Gráficas.....	47

6.6. Coste de los materiales y de la fabricación del elemento flexible .....	54
6.7. Conclusiones.....	55
7. Conclusiones .....	57
Apéndice 1: Tabla de propiedades de los materiales .....	59
Apéndice 2: Certificado Aluminio 7075-T6 .....	60
Apéndice 3: Plano del elemento flexible .....	61
Apéndice 4: Simulación mediante ANSYS. ....	64
Bibliografía.....	77
Índice de tablas.....	79
Índice de figuras .....	79



## **1. Introducción**

### **1.1. Justificación**

El presente proyecto se enmarca en el ámbito de la metrología de fabricación para la medición de alto rango.

En base al desarrollo previo de un proyecto de un modelo cinemático correspondiente a una unidad de posicionamiento basada en cinemática paralela. Se busca desarrollar una junta flexible que se base en las propiedades mecánicas del material que la conforma para proveer a la plataforma posea dos grados de libertad en elevación y acimut.

Estos dos grados de libertad son los asociados a las juntas cardan, que pasan por ser una opción para el cumplimiento de este objetivo. De esta manera, se ha buscado una alternativa a esta unión.

### **1.2. Objetivos del proyecto**

El objeto del presente trabajo es el diseño de una unión flexible junto con sus elementos de apoyo. También se tratará la fabricación de una lámina flexible que formará parte de la junta, con el objetivo de caracterizar el movimiento para el cual ha sido diseñada.

La plataforma y sus elementos de apoyo vienen predeterminados como características y especificaciones del proyecto, debido a que esta junta es una opción alternativa a la junta universal. Es por esto que las posiciones espaciales y diseños del contexto no pueden ser, ni cambiados, ni adaptados, durante el proceso de diseño.

Los objetivos son:

- Aproximación teórica de las geometrías mediante fórmulas conocidas, extraídas de bibliografía y artículos científicos. Análisis de las diferentes alternativas, mecanismos tipo entalla, lámina o toroidal. Análisis de la influencia que posee la modificación de sus parámetros geométricos en su comportamiento.
- Estudio de materiales sensibles de ser utilizados según sus propiedades. Selección de los que posean más posibilidades de ser elegidos dentro del proyecto.
- Selección del mecanismo analizado anteriormente, con análisis sobre la influencia de la modificación de sus parámetros geométricos, optimizando en la medida de lo posible estos parámetros (Programas SolidEdge y ANSYS).
- Estudio sobre la combinación de varios mecanismos para ofrecernos los dos grados de libertad. A su vez estudio de la configuración (forma “L” o “Recto”), disposición (“Recto” o “Recto Recrecido”) y orientación (“Normal” o “Invertido”) que se adapten mejor a las especificaciones y al entorno del

mecanismo elegido. A su vez diseño y elección de elementos auxiliares que hagan posible su unión con los elementos predeterminados (Programas SolidEdge y ANSYS).

- Simulación para la ratificación de no plastificación en los extremos de su rangos. Y la corroboración del buen comportamiento de todo el conjunto, de manera que, las cualidades que tiene individualmente, las mantenga en el montaje de todos sus componentes (Programa ANSYS).
- Fabricación de una de las láminas. Posterior ensayo físico en Máquina de Medición por Coordenadas (MMC) para caracterizar ejes, radios y ángulos de giro junto con sus posibles errores y movimientos no deseados. Estudio estadístico de estos resultados (Programas: SolidEdge, ANSYS y GeoGebra).

### **1.3. Descripción del proyecto**

A continuación se hará una breve descripción del contenido de cada uno de los capítulos.

El *capítulo 1* trata sobre la base teórica del proyecto con sus fórmulas y otras herramientas utilizadas. En el *capítulo 2* se trata la selección del material del mecanismo y la influencia de sus parámetros geométricos.

En el *capítulo 3* se estudia la combinación de dos mecanismos, su diseño y correcta distribución en el espacio para finalmente obtener la junta flexible. En el *capítulo 4* se hace una simulación de todos los elementos en rango máximo así como un estudio de su ciclo vital. En el *capítulo 5* se trata el ensayo de una “lámina flexible” para caracterizar su comportamiento frente a la junta universal.

Finalmente en el *capítulo 6* se hace una retrospectiva de todo el trabajo hecho durante este proyecto y se exponen las conclusiones obtenidas durante todo este proceso.

### **1.4. Contexto**

Se considera necesario hacer un pequeño inciso sobre el entorno predeterminado. Este contexto marcará el volumen físico que puede y debe ocupar el diseño, junto con todos sus elementos. De la misma forma, se deben analizar todos los problemas que puedan aparecer debido al nuevo diseño. Las posiciones relativas (marcadas por la junta universal) que deben mantener plataforma y elementos de apoyo se mantendrán y deberán ser consideradas durante todo el proyecto.

## 2. Consideraciones teóricas

Diseño, fabricación y caracterización de una junta flexible tipo cardan.

El objetivo del presente trabajo es la aplicación de un sistema de desplazamiento que permita a la plataforma giros en elevación y acimut.

Para la primera aproximación de la viabilidad de tal diseño se ha hecho un estudio previo teórico/bibliográfico de este tipo de elementos. El cual se detalla a continuación.

### 2.1. Introducción teórica

Hooke fue el primero en observar la relación, de carácter lineal, entre la extensión de un cable debida a la fuerza aplicada a lo largo del eje y el aumento proporcional de la longitud. De esta forma, formuló (Ecuación 2.1) la siguiente base teórica que definía este comportamiento(1; 2):

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Ecuación 2.1

Siendo “ $\sigma$ ” la tensión, “ $F$ ” la fuerza normal aplicada sobre el área “ $A_0$ ” de la superficie en cuestión y “ $\varepsilon$ ” la deformación, “ $l$ ” es la longitud del cable después de aplicar la fuerza, mientras que “ $l_0$ ” es la longitud inicial (Figura 2.1).

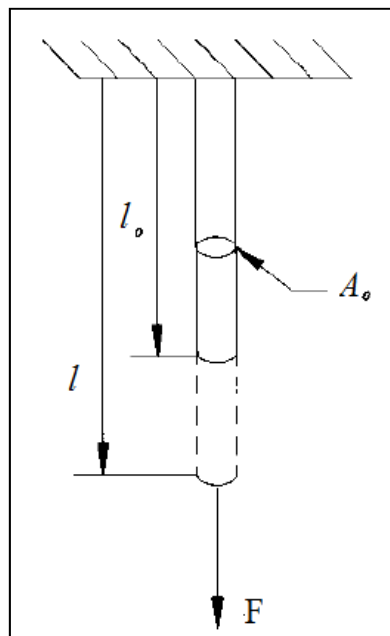


Figura 2.1: Elongación elástica

La relación lineal entre la carga y los esfuerzos hizo sugerir a Hooke un ratio constante para relacionar los esfuerzos con la tensión para un determinado material. A este ratio lo nombró módulo elástico, “ $E$ ”, dado por (Ecuación 2.2):



$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Ecuación 2.2

### 2.1.1. Teoría de la flexión

El siguiente paso es caracterizar el tipo de reacción que tendrá nuestro elemento. Para esto se ha aplicado la teoría de momento flector y la deflexión de un eje, concretamente la flexión de una viga simétrica (Figura 2.2).

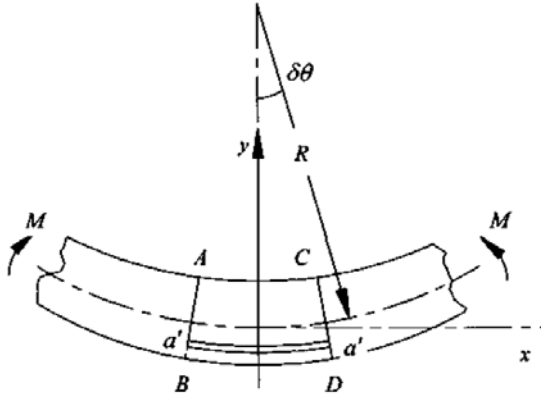


Figura 2.2: Flexión de una viga

Delante de un momento flector puro, M, que induce que la deflexión tenga una curvatura,  $1/R$  y una deformación angular  $\delta\theta$ . Claramente resultará una tensión que actuará a lo largo del eje. Al mismo tiempo hay un plano que también estará representado en la viga donde la tensión será cero, nombrado “eje neutro”(2).

Si tomamos el plano a'-a' se verifica que la rigidez viene dada por la siguiente expresión:

$$\varepsilon_x = \frac{(R + y)\delta\theta - R\delta\theta}{R\delta\theta} = \frac{y}{R}$$

Ecuación 2.3

Inmediatamente se deduce la relación entre la tensión y la deformación:

$$\sigma_x = E \frac{y}{R}$$

Ecuación 2.4

Si se suman las fuerzas se obtiene:

$$\int_A \sigma_x dA = \frac{E}{R} \int_A y dA = 0$$

Ecuación 2.5

Con esto se concluye que el eje neutro coincide con el centroide del área de la sección transversal. También se puede decir que el momento total flector sobre el eje neutro puede ser obtenido a través de la suma de todas las tensiones, de las áreas elementales y la distancia “y” desde el eje neutro, por ejemplo(1):

$$M = \int_A \sigma_x y dA = \frac{E}{R} \int_A y^2 dA = \frac{EI}{R}$$

Ecuación 2.6

Combinándola con la Ecuación 2.4

$$\frac{\sigma}{y} = \frac{E}{R} = \frac{M}{I} \xrightarrow{\text{reorganizando}} \frac{1}{R} = \frac{M}{EI}$$

Ecuación 2.7

Donde “M” es el momento flector, “I” la inercia, que dependerá de la geometría, “R” es el radio, e “y” la distancia en esa dirección según la Figura 2.2

### 2.1.2. Deformación de las vigas

Se aplican consideraciones geométricas para encontrar una relación entre la Ecuación 2.7 y la geometría que se va a estudiar.

En la Figura 2.3 se observa el eje neutral de la viga, descrito en la Figura 2.2, sufriendo una deflexión y sus diferentes deformaciones/desplazamientos (3):

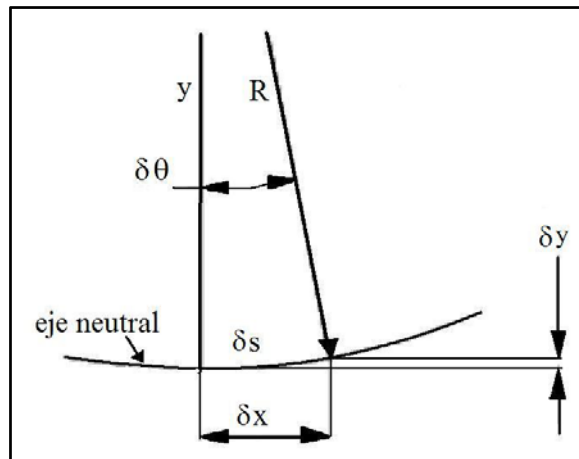


Figura 2.3: Deformaciones sufridas por una viga a flexión

Se deduce, para ángulos pequeños  $dy/dx = \tan \theta \approx \theta$ , la curvatura del eje se puede identificar como  $d\theta/ds = 1/R$ . En la figura  $\delta\theta$  es pequeña y  $\delta x$  es prácticamente igual a  $\delta s$ .

A partir de estas consideraciones se fórmula la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{R} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} \xrightarrow[\text{consideración}]{\text{denominador}=1} \frac{1}{R} = \frac{d^2y}{dx^2}$$

Ecuación 2.8

Se sustituye en la Ecuación 2.7, final de la deformación elástica para ejes simétricos.(1)

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = M_z(x)$$

Ecuación 2.9

### 2.1.3. Utilización de una viga en voladizo como una articulación rotatoria

Se utiliza una simplificación de las reacciones que va a sufrir nuestra junta flexible a nivel de fuerzas y esfuerzos para así poder aproximar las reacciones en sus puntos (Figura 2.4):

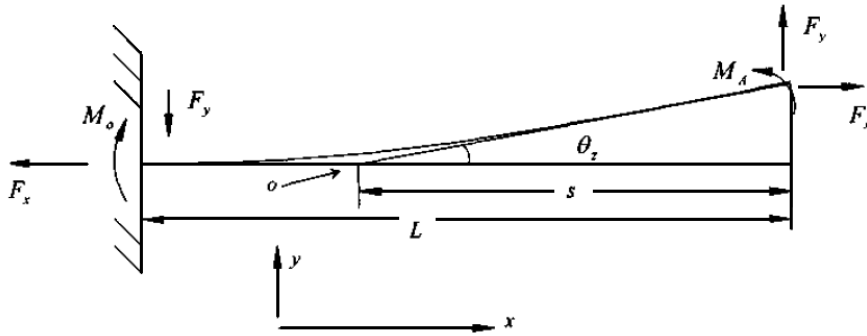


Figura 2.4: Viga en voladizo sufriendo, momento y fuerza en su extremo

Para la viga de la Figura 2.4 el momento de flexión causa sólo la fuerza,  $F_y$ , sustituyendo en la Ecuación 2.9 se obtiene:

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = F_y(L - x)$$

Ecuación 2.10

Con el propósito de conseguir la máxima tensión y el máximo momento flector, la ecuación  $M_{max} = F_y L$ , puede ser directamente sustituida dentro de la ecuación de flexión integrando la Ecuación 2.10 de la siguiente forma:

$$EI \frac{dy}{dx} = F_y \left( Lx - \frac{x^2}{2} \right) \Rightarrow EI y = F_y \left( L \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right)$$

Ecuación 2.11

El ángulo y el desplazamiento vienen dados por:

$$\theta_{x=L} = \frac{F_y L^2}{2EI}$$

Ecuación 2.12

$$\delta_{x=L} = \frac{F_y L^3}{3EI}$$

Ecuación 2.13

*Nota: Durante este desarrollo en algunos casos se han omitido parte de las fórmulas intermedias y consideraciones para hacer más legible el documento. En el caso de necesitar mayor detalle redirigiría al lector a la siguiente bibliografía (4)(5)(1).*

## **2.2.Consideraciones para el cálculo teórico del desplazamiento de uniones flexibles**

Previamente a las consideraciones del modelado, es necesario hacer una lista de las ventajas e inconvenientes que presentan este tipo de uniones.

Ventajas:

- No hay pérdidas debidas a la fricción.
- No necesita lubricación.
- Son compactas.
- La fabricación es relativamente sencilla.
- Su mantenimiento es prácticamente despreciable.
- Son precisas, aunque se necesita una buena caracterización de su comportamiento.

Inconvenientes:

- Los elementos flexibles proporcionan rangos de rotación relativamente pequeños (5-15°).
- La rotación no es pura ya que la deformación del elemento es compleja.
- El eje de rotación se mueve a través del elemento flexible durante su deformación.
- Es sensible a cambios de temperatura.

Para el modelado y el análisis de este tipo de mecanismos se utiliza, casi exclusivamente, el modelo aproximado de cuerpo pseudo-rígido (PRB)(5).

Esencialmente, este modelo trata el comportamiento de las uniones flexibles como la torsión de un muelle (Figura 2.5).

Referido a este modelo se tiene la Figura 2.5. A causa de la deformación torsional del muelle con una rigidez “K”, las uniones actúan una sobre la otra con un momento torsor M, con el que causan un desplazamiento angular que puede ser calculado de la siguiente forma(4):

$$M = K \cdot \theta$$

Ecuación 2.14

Siendo  $K$  la rigidez y  $\theta$  el ángulo.

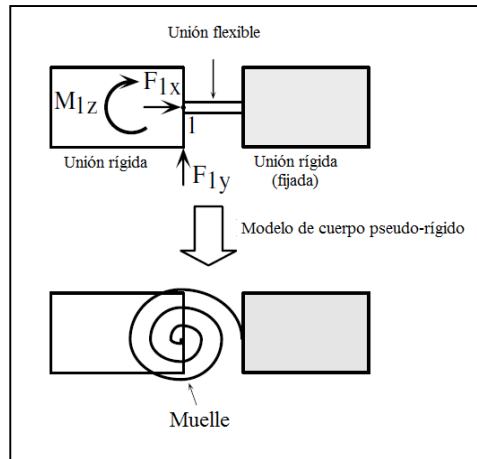


Figura 2.5: Adaptación de unión flexible a muelle

Al juntar Ecuación 2.7 con la Ecuación 2.14 se obtiene:

$$\frac{\sigma}{y} = \frac{E}{R} = \frac{M}{I} \rightarrow \sigma = \frac{K \cdot \theta}{I} \cdot y \xrightarrow[y = \frac{t}{2}; \sigma = \sigma_{PLAS}}{\theta = \frac{\sigma_{PLAS} \cdot 2 \cdot I}{K \cdot t}}$$

Ecuación 2.15

Siendo, “ $t$ ” el espesor mínimo y  $\sigma_{PLAS}$  la tensión máxima de plasticidad.

El ángulo de giro dependerá de parámetros geométricos y de las características mecánicas del material (4).

De las posibles formas de las uniones flexibles a considerar se han seleccionado las siguientes (Figura 2.6), por ser recurrentes en los diferentes artículos y bibliografía consultada.

Se es consciente de la variedad de este tipo de uniones pero se ha preferido hacer una primera selección(1).

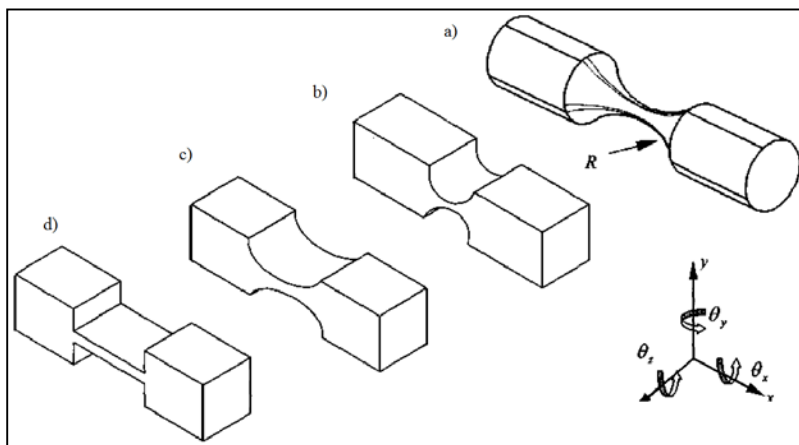


Figura 2.6: Tipo de uniones; a) toroidal; b) entalla; c) entalla-híbrida; d) lámina

### 2.2.1. Definición de los parámetros

Se observan básicamente 3 tipos de uniones flexibles tipo lámina, entalla y toroidal (Figura 2.6).

Para cada una de estas uniones hay asociada una fórmula de rigidez, las cuales se detallan continuación(1)(6):

La primera, en este caso, es para la unión tipo lámina. Procede de la condición de deformación de Euler:

$$K_{\theta_z M_z} = \frac{M_z}{\theta_z} = \frac{EI}{L} = \frac{Ebt^3}{12L}$$

Ecuación 2.16

En la Figura 2.7 se representa los parámetros expuestos en la Ecuación 2.16, siendo “L” la distancia entre apoyos de la unión.

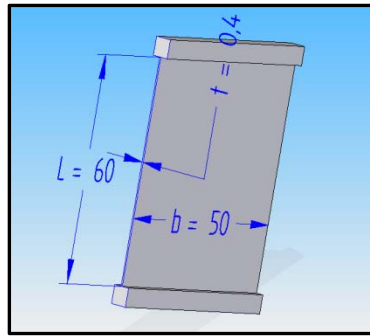


Figura 2.7: Unión tipo lámina

La unión tipo entalla fue presentada por primera vez por Paros y Weisbord 1965:

$$K_{\theta_z M_z} = \frac{M_z}{\theta_z} = \frac{2Ebt^{5/2}}{9\pi r^{1/2}}$$

Ecuación 2.17

En la Figura 2.8 se representa los parámetros expuestos en la Ecuación 2.17.

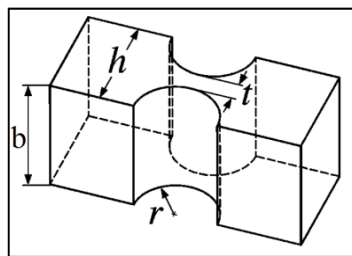


Figura 2.8: Unión tipo entalla

Para la unión tipo toroidal se puede aproximar mediante Paros y Weisbord 1965:

$$K_{\theta_Z M_Z} = \frac{M_Z}{\theta_Z} = \frac{Et^{7/2}}{20R^{1/2}}$$

Ecuación 2.18

En este caso la “t” representaría el diámetro en la sección más delgada del toroidal, y la “R” el radio de la geometría.

Según la geometría de la sección transversal en el punto más delgado de la unión flexible, existen dos maneras de definir “I” inercia (Figura 2.9)(2):

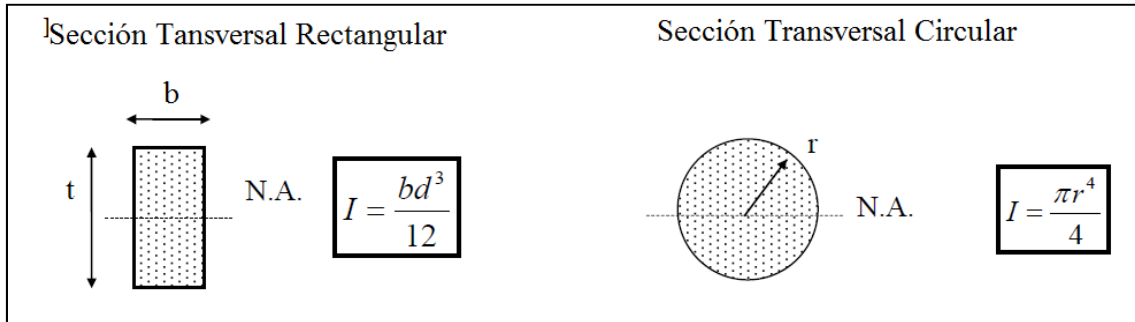


Figura 2.9: Inercias para sección circular y rectangular

Finalmente se tiene la dependencia de estas fórmulas de las características del tipo de material a emplear y de la geometría elegida.

Con todo esto se obtienen las siguientes fórmulas para el cálculo de ángulo máximo de deformación plástica (Tabla 2.1).

Unión	Fórmula para el cálculo del ángulo	Rigidez
Lámina	$\theta = \frac{2 \cdot L}{E \cdot t} \cdot \sigma_{PLAS}$	$K = \frac{Ebt^3}{12L}$
Entalla	$\theta = \frac{3 \cdot \pi \cdot r^{1/2}}{4 \cdot E \cdot t^{1/2}} \cdot \sigma_{PLAS}$	$K = \frac{2Ebt^{5/2}}{9\pi r^{1/2}}$
Toroidal	$\theta = \frac{10 \cdot \pi \cdot r'^4 \cdot R^{1/2}}{E \cdot t^{9/2}} \cdot \sigma_{PLAS}$	$K = \frac{Et^{7/2}}{20R^{1/2}}$

Tabla 2.1: Resumen de las fórmulas para rigidez y ángulos para diferentes geometrías

### 2.2.2. Ejemplo de cálculo

En este apartado se calculará el ángulo de giro de una junta flexible tipo entalla.

Para este ejemplo se ha elegido las dimensiones y el material (Tabla 2.2, 2.3 y Figura 2.10) utilizado en un artículo de la literatura especializada(2).

Material	E(Pa)	Tensión de plasticidad(Pa)
Ti-6Al-4V	$1,138 \cdot 10^{11}$	$8,8 \cdot 10^8$

Tabla 2.2: Propiedades Ti-6Al-4V

t(mm)	b(mm)	r(mm)
0,5	3	1

Tabla 2.3: Parámetros ejemplo

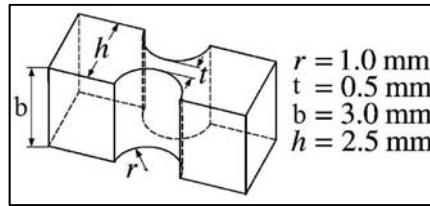


Figura 2.10: Figura ejemplo

Rigidez:

$$K = \frac{2 \cdot E \cdot b \cdot t^{5/2}}{9 \cdot \pi \cdot r^{1/2}} = \frac{2 \cdot 113,8 \cdot 10^9 \cdot 0,019 \cdot 0,03^{5/2}}{9 \cdot \pi \cdot 0,015^{1/2}} = 615,6 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{rad}}$$

Ecuación 2.19

Ángulo:

$$\theta = \frac{2 \cdot I}{K \cdot t} \cdot \sigma_{PLAS} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,001^4}{615,6 \cdot 0,00005 \cdot 4} \cdot 880 \cdot 10^6 = 0,0448 \text{ rad} \sim 2,6^\circ$$

Ecuación 2.20

Se observa que el ángulo máximo de giro en este caso se mueve en un rango pequeño.

## 2.3. Influencia de la modificación de los parámetros en el diseño

En este apartado se hará un estudio de la influencia de estos parámetros en el comportamiento de la pieza según su forma y el material que la conforma. Para, de esta forma, saber cómo modificar estos parámetros para optimizarlos

### 2.3.1. Variables dependientes del material

Se puede observar que las variables de las fórmulas que dependen del material son la “ $\sigma_{PLAS}$ ” y el “E”. En este caso para la ver la relación directa, se reducirán las fórmulas a las siguientes expresiones (Tabla 2.4):

Unión	Fórmula para el cálculo del ángulo	Constante
Lámina	$\theta = \frac{\sigma_{PLAS}}{E} \cdot C_1$	$C_1 = \frac{2 \cdot L}{t}$
Entalla	$\theta = \frac{\sigma_{PLAS}}{E} \cdot C_2$	$C_2 = \frac{3 \cdot \pi \cdot r^{1/2}}{4 \cdot t^{1/2}}$
Toroidal	$\theta = \frac{\sigma_{PLAS}}{E} \cdot C_3$	$C_3 = \frac{10 \cdot \pi \cdot r'^4 \cdot R^{1/2}}{t^{9/2}}$

Tabla 2.4: Optimización propiedades mecánicas materiales



De esta forma se ve que en los 3 casos para obtener un ángulo grande se necesita tener una elevada  $\sigma_{PLAS}$  frente a un bajo “E”.

### 2.3.2. Variables dependientes de la geometría

Se observa que la dependencia de los parámetros según la geometría elegida viene definida por las siguientes fórmulas (Tabla 2.5):

Unión	Fórmula para el cálculo del ángulo	Constante
Lámina	$\theta = \frac{L}{t} \cdot C_4$	$C_4 = 2 \cdot \frac{\sigma_{PLAS}}{E}$
Entalla	$\theta = \frac{r^{1/2}}{t^{1/2}} \cdot C_5$	$C_5 = \frac{3 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{\sigma_{PLAS}}{E}$
Toroidal	$\theta = \frac{R^{1/2} \cdot r'^4}{t^{9/2}} \cdot C_6$	$C_6 = 10 \cdot \pi \cdot \frac{\sigma_{PLAS}}{E}$

Tabla 2.5: Optimización parámetros geométricos

Se puede concluir que maximizando la diferencia entre “L” o “r” frente a “t”, siendo el primer grupo numéricamente mayor, que el segundo, se obtendrán ángulos superiores.

Se observa que el parámetro de diseño “b” no tendrá influencia en el ángulo de giro del elemento, pero si en su rigidez. Esto será útil más adelante para rigidizar la pieza sin influenciar en su ángulo de giro.

Finalmente reseñar que en la bibliografía siempre se habla de pequeños desplazamientos 5-15° (7)(1)(5). La mayoría de expresiones han sido deducidas siguiendo esta consideración. Tal considera puede ser motivo de resultados dispares entre la deducción teórica y las simulaciones.

### 3. Optimización de los parámetros de diseño

#### 3.1.Introducción

Como se ha explicado en el *Capítulo 2*, los parámetros que influenciarán a nivel de diseño serán, el material de la pieza y la geometría de ésta.

En este capítulo trataremos el procedimiento para la selección de estos elementos. Tratando previamente la selección del material y posteriormente el estudio de la forma geométrica.

No es objeto de este capítulo, aunque se va a tratar a posteriori, la disposición de estas juntas para poder conseguir los dos grados de giro.

#### 3.2. Selección del material

Los materiales pueden soportar una cierta tensión y deformación antes de romperse. Para evaluar estos límites, es común aplicar una carga a tracción o compresión a partir de unas condiciones conocidas. La manera de representar los resultados y de esta forma poder comparar unos materiales con otros, es la representación mediante curvas tensión/deformación.

En este apartado se tratará el comportamiento de los metales a partir de estos ensayos, para de esta forma, hacer una primera selección de los materiales óptimos. En el *Capítulo 4* se seleccionará el material(1).

##### 3.2.1. Curva tensión/deformación

Ensayo a tracción de un metal que podemos observar en la Figura 3.1(8):

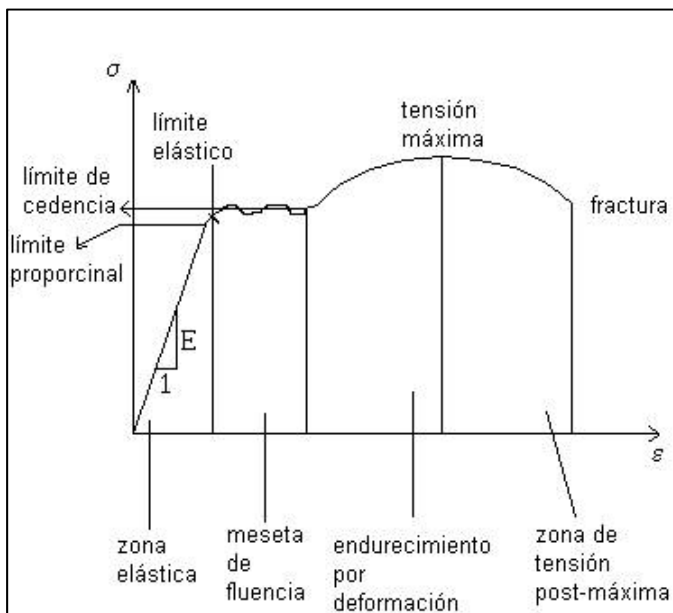


Figura 3.1: Tensión vs deformación elástica

La zona elástica: es la parte donde, al retirar la carga, el material regresa a su forma y tamaño inicial. En casi toda la zona se presenta una relación lineal. El punto donde la curva deja de ser lineal se llama límite proporcional. El valor de la tensión en donde termina la zona elástica, se llama límite elástico, y a menudo coincide con el límite proporcional.

La meseta de fluencia: es la región en donde el material se comporta plásticamente; es decir, en la que continúa deformándose

bajo una tensión “constante”, de un valor promedio llamado límite de fluencia o cedencia.

Para los materiales que no poseen un límite de fluencia bien definido, se halla en forma estándar con una desviación del 0,2% en la deformación unitaria (Figura 3.2).

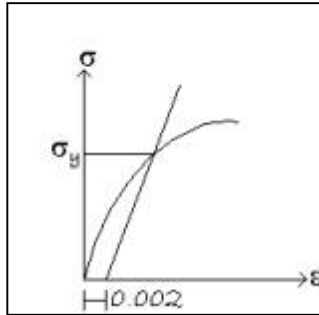


Figura 3.2: Límite de fluencia

La recta que se traza debe ser paralela a la parte rectilínea de la curva.

El endurecimiento por deformación, es la zona en donde el material retoma tensión para seguir deformándose; va hasta el punto de tensión máxima, llamado tensión ó resistencia última.

En la zona de tensión post-máxima el material se va poniendo menos tenso hasta que se fractura. La tensión de fractura es llamada, también, tensión última.

Nótese que mientras que unos llaman tensión última al punto de carga máxima, otros llaman tensión última al punto de fractura.

### 3.2.2. Materiales factibles de ser utilizados

En este apartado se estudiarán los materiales en los que nos fijaremos para su utilización en los primeros cálculos del modelo.

A partir de una tabla (*Apéndice 1*) extraída de la bibliografía (1), se ha hecho una primera selección de los metales más adecuados, también se ha valorado los diferentes materiales que se han utilizado en los diferentes ensayos y artículos consultados(9)(4).

Para esta primera prueba se han seleccionado los dos metales de cada grupo que tienen mejor relación  $\frac{\sigma_{PLAS}}{E} > 0$ .

Mediante otra fuente se han confirmado las propiedades de los materiales elegidos (Tabla 3.1) (10).

Grupo	Acero		Aluminio		Titanio		Cobre	SMA
Referencia	4340	6150	6061	7075	Ti-6Al-4V	Ti13	Ca170	HTP
Límite elástico (MPa)	710	989	276	578	880	1100	1034	560
Módulo elástico (GPa)	205	205	68,9	71,7	113,8	110	128	75
Rating $(\sigma/E)*1000$	3,5	4.8	4,0	8,1	7,7	10,0	8,1	7,5

Tabla 3.1: Materiales con posibilidad de ser usados

Tenemos que los mejores metales son  $Ti13 > 7075 = Ca170$ .

El material elegido después de consultar distintos distribuidores, ha sido Aluminio 7075 T-6 (como material válido de ser utilizado) y acero 6150 que al ser más económico, nos servirá para hacer pruebas.

### 3.3. Selección del tipo de unión

En este apartado se evalúa cuales de las uniones presentadas en el *Capítulo 2*, cumplen con nuestras especificaciones.

#### 3.3.1. Limitaciones

Para esto previamente se hará referencia a ciertas limitaciones que presenta el presente proyecto.

Una de las limitaciones es el espacio que puede ocupar la junta flexible. Se dispone de un volumen predeterminado para el alojamiento del elemento el cual no podemos sobrepasar (Figura 3.3).

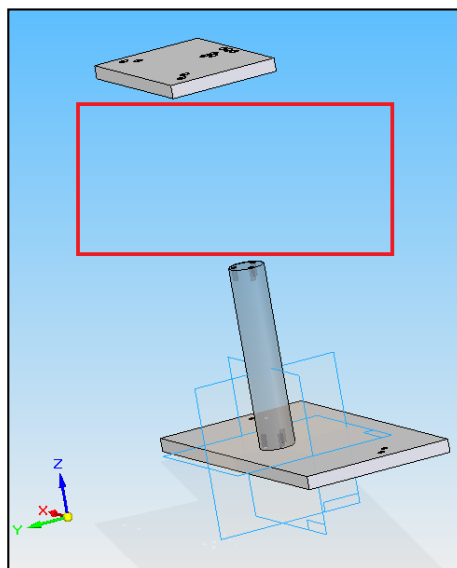


Figura 3.3: Volumen útil

Este volumen está definido según la Figura 3.3 aproximadamente 160 mm en dirección “z”, 120 mm en dirección “y” y 100 mm en dirección “x”.

El diseño final tiene que respetar la disposición predeterminada de la plataforma respecto de la columna de apoyo.

### 3.3.2. Elección de la geometría

Se intentará aproximar los mismos parámetros geométricos para los diferentes tipos de uniones y calcular, con las fórmulas teóricas, cual es mejor.

Como valores máximos se han tomado la mitad del espacio aproximado es decir un elemento como máximo 50 mm en dirección “z”, 60 mm en dirección “y” y 80 mm en dirección “x”, ya que para conseguir los dos rangos de giro se necesitará de la unión de dos juntas en sentidos opuestos.

Estos tipos de configuraciones serán tratadas en capítulos posteriores.

Sabiendo que el parámetro a maximizar es “L” o “r” (dependiendo de si la unión es tipo entalla, toroidal o lámina), y el elemento a minimizar es “t”, el diseño comparativo elegido ha sido  $b=50$  mm,  $t=0,4$  y  $L$  o  $r = 60$  mm se ha cogido el Aluminio 7075.

	<b>b (mm)</b>	<b>t (mm)</b>	<b>L;r (mm)</b>	<b>Ángulo (°)</b>
<b>Lámina</b>	50	0,4	60	139
<b>Entalla</b>	50	0,4	60	13
<b>Toroidal</b>	50	0,4	60	11

Tabla 3.2: Ángulo según tipo de unión

De la Tabla 3.2 se extrae una conclusión inicial. Las uniones tipo entalla y tipo toroidal tienen un rango de actuación pequeño. En este caso, la elección pasaría por la unión tipo lámina, que a priori y sobre cálculos teóricos nos da un rango holgado.

## 3.4.Simulación (Comprobación de los resultados teóricos)

El siguiente paso es aproximar lo máximo posible la reacción del elemento a la realidad. Para conseguirlo se ha utilizado un programa de cálculo mediante elementos finitos, ANSYS WORKBENCH, con el que se observará el ángulo máximo de giro. Estos resultados se compararán con los dados teóricamente. Se verá si difieren y si lo hacen, en cuánto.

### 3.4.1. Parámetros geométricos vs ángulo

En un primer punto se ha considerado importante corroborar que la variación de los parámetros en el sentido que se indicaba en el *Capítulo 2* es correcta y se cumple en la simulación.

El procedimiento, que será igual en posteriores cálculos, se basa en diseñar la unión mediante programa de dibujo 3D, en este caso SolidEdge. Una vez creado el elemento, importarlo al programa de cálculo de elementos finitos, Ansys(11), donde se evaluará el

ángulo máximo. En este caso se han necesitado 4 simulaciones. El procedimiento puede consultarse en el *Apéndice 4*.

Sus resultados vienen dados en la siguiente Tabla 3.3:

Unión	L	b	t	ángulo (°)
1	40	20	0,5	41
2	40	40	0,5	39
3	60	20	0,5	52
4	40	20	0,7	32

Tabla 3.3: Ángulo según parámetros para lámina

El elemento de referencia es una unión tipo lámina 1:40x20x0,5 mm. Vemos que cuando se aumenta “b”, unión 2, el ángulo prácticamente no varía. Cuando se aumenta “L”, unión 3, el ángulo aumenta casi 11°. En el caso de aumentar el espesor, unión 4, tenemos una reducción del ángulo de 9°. Se cumple lo deducido teóricamente en el *Capítulo 2*.

Se ha considerado interesante hacer una pequeña comparativa con el otro material seleccionado (Acero 6150). En este caso la geometría seleccionada será la que nos ha dado mejores resultados en la Tabla 3.3. De esta forma veremos la diferencia en rango entre uno y el otro Tabla 3.4.

Unión	L	b	t	ángulo (°)
1	40	20	0,5	41
5	40	20	0,7	29

Tabla 3.4: Aluminio 7075 vs Acero 6150

Vemos que para una aplicación futura el estudio se centraría en el Aluminio 7075 el acero nos puede servir para estudiar la geometría tipo lámina.

### 3.4.2. Optimización “L”

El siguiente paso consiste en simular un elemento el cual pueda ser utilizado en el diseño. El procedimiento es el mismo que se ha detallado anteriormente.

En este caso se han necesitado 12 simulaciones, las cuales se han llevado a cabo de la siguiente manera.

Para los parámetros geométricos se ha fijado la “b”, ya que no influye en el giro, y el espesor “t”. Una vez fijados, se ha variado la longitud “L”, que será la que nos modificará el ángulo de giro.

La evolución en la Figura 3.5 y Figura 3.4 corresponde a los valores indicados (Tabla 3.5):

Unión	b (mm)	t (mm)	L (mm)	Angl. teórico	Angl. Simulación
1	20	0,4	1	2,3	2,3
2	20	0,4	2	4,6	3,4
3	20	0,4	3	6,9	5,6
4	20	0,4	4	9,2	8,2
5	20	0,4	5	11,5	8,8
6	20	0,4	6	13,9	10,3
7	20	0,4	7	16,2	11,6
8	20	0,4	8	18,5	13,3
9	20	0,4	9	20,8	14,8
10	20	0,4	10	23,1	16,0
11	20	0,4	30	69,3	39,1
12	20	0,4	40	92,4	46,3

Tabla 3.5: Ángulos según parámetro “L”

Según la simulación que se aprecia en la Figura 3.5, para una longitud “L” superior a 40mm se consigue el ángulo máximo deseado.

A medida que se aumenta la distancia entre apoyos (L), el ángulo teórico (Ecuación 2.15 y 2.16) se va distanciando del ángulo de la simulación. Esto es debido a las consideraciones que se han tenido en cuenta durante la deducción teórica, ya que las ecuaciones están formuladas para giros pequeños (Figura 3.4), por debajo de 15°, para las cuales hay un error de cálculo aceptable.

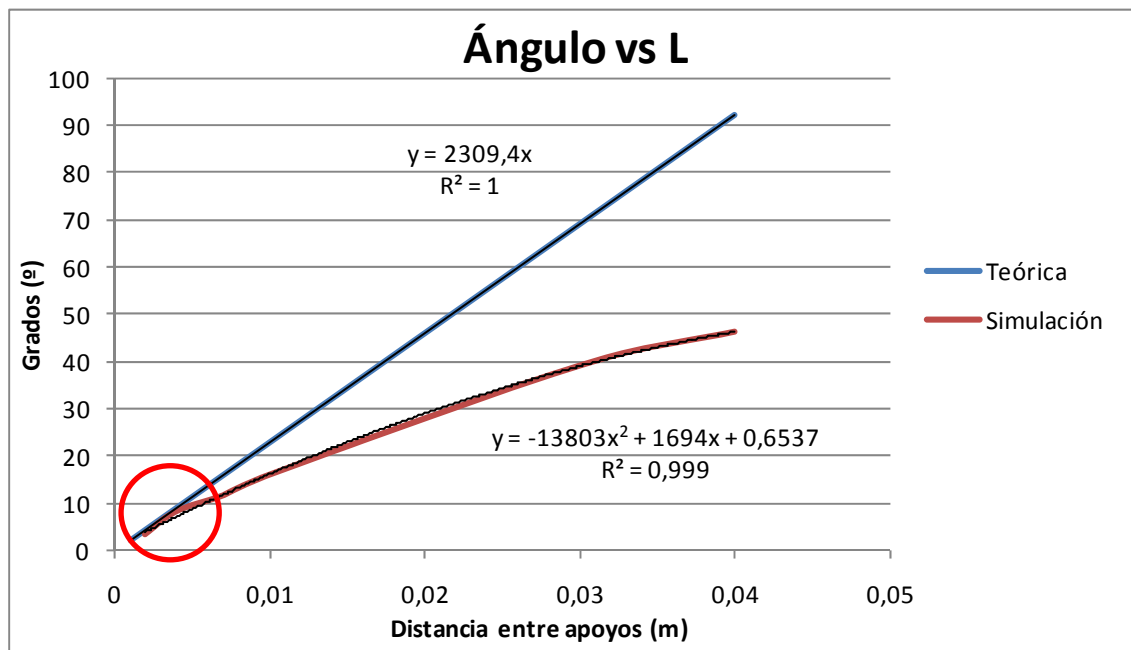


Figura 3.4: Ángulo teórico vs ángulo dado por simulación

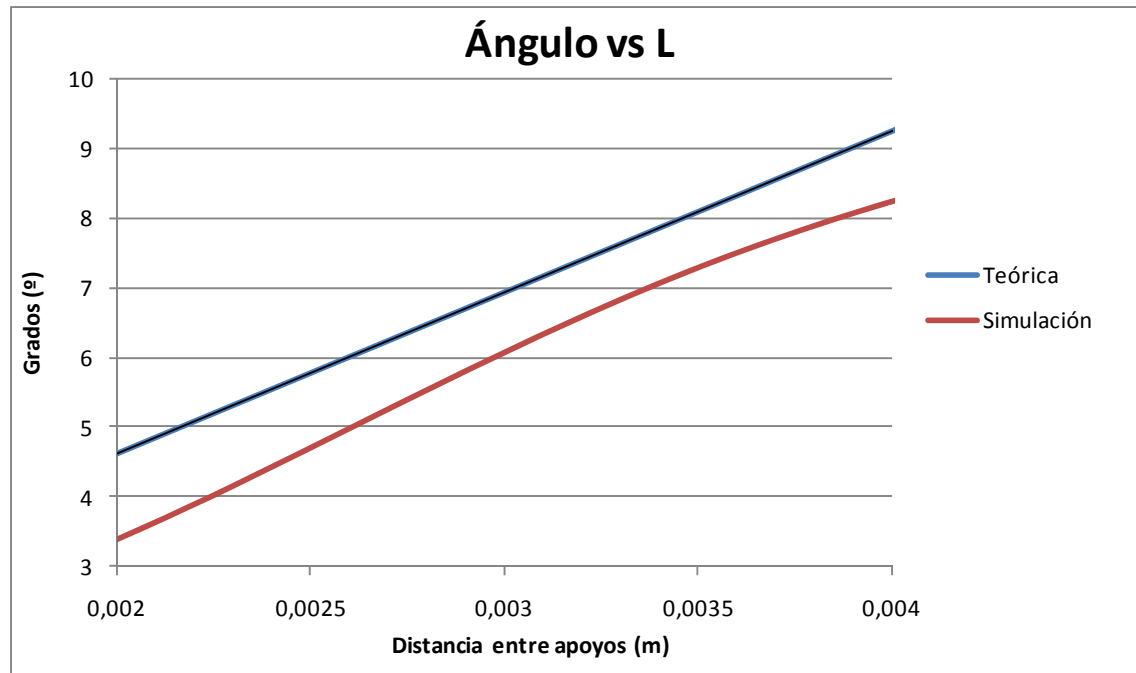


Figura 3.5 Ampliación en rango de 3°-10°

### 3.5.Conclusiones

En este apartado, finalmente, se han elegido como materiales viables de ser utilizados Aluminio 7075 T-6 y Acero 6150 debido a su precio, disponibilidad y propiedades.

Se ha elegido la configuración tipo lámina al ser la que nos ofrece más rango de actuación. Así como, a su vez, se ha corroborado los postulados teóricos formulados en el *Capítulo 2* mediante diseño (SolidEdge) y simulación (ANSYS WORKBENCH).

Finalmente se ha hecho una comparación de valores teóricos y valores de la simulación, confirmando que las fórmulas teóricas solamente funcionan para ángulos pequeños ( $\pm 15^\circ$ )





## 4. Geometría para la combinación de dos elementos

### 4.1. Introducción

En los *capítulos 2 y 3* se han estudiado los elementos de unión de manera individual y los ángulos que adoptan según su geometría. Pero se necesita la unión de dos elementos para conseguir los giros en acimut y elevación (doble lámina). En lo siguiente se tratará la solución de esta doble lámina.

En este apartado se estudiarán las diferentes combinaciones posibles con las uniones estudiadas en apartados anteriores, para conseguir los dos grados de libertad cumpliendo con las especificaciones.

### 4.2. Objetivos

El propósito de este apartado es numerar las partes que se quieren modelar y el orden que se va a seguir en su modelado, se va a seguir nomenclatura específica de este capítulo cuya descripción se hará en los puntos que la suceden:

- Elección de la composición, “Recto” o “L”.
- Elección de la geometría, “b”, “t” y “L”.
- Elección de los elementos auxiliares y su orientación “Normal” o “Invertida”
- Elección de la disposición. La composición “Recto” está formada por las disposiciones “Recto” o “Recto Recrecido” y la composición “L” está formada por las disposiciones “L” y “L invertida” (Figura 4.1).

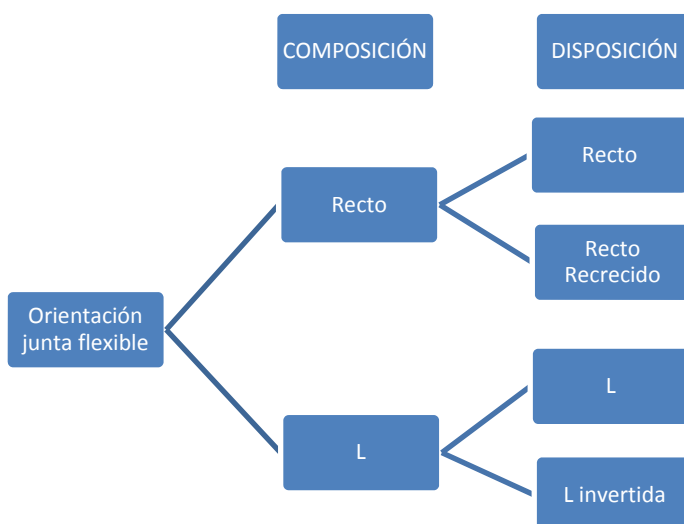


Figura 4.1: Nomenclatura de la orientación de la unión

Para facilitar la elección se hará uso de las siguientes herramientas siguiendo el mismo orden de aparición que las partes:

- Transmisión de movimientos parásitos (mediante SolidEdge y ANSYS)
- Plasticidad del elemento (mediante SolidEdge y ANSYS)

- Posición del centro de gravedad (mediante SolidEdge)
- Impactos o Colisiones con el entorno (mediante SolidEdge)

### **4.3. Limitaciones**

Esta combinación lleva ciertos problemas asociados.

Movimientos parásitos, es decir, que una junta pensada para un giro en acimutal, actúe, en la dirección del otro giro. Este suceso desvirtúa el movimiento individual, sin saber exactamente cuál de las dos es la responsable de la posición de la plataforma, provocando problemas para la teorización del giro, ya de por sí, complicados de localizar.

Aumento del volumen del conjunto limitado por el contexto. Esto puede provocar choques y la necesidad de elementos auxiliares para la correcta colocación de la plataforma, así como desequilibrios e inestabilidades.

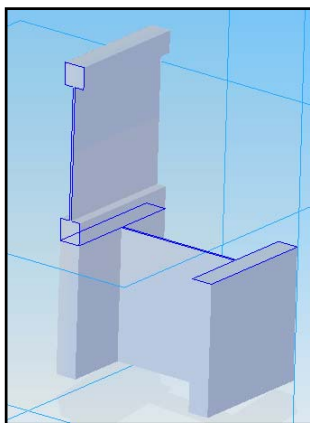
Por todo ello, elegir una buena configuración es un proceso clave para minimizar estos problemas y obtener unos buenos resultados.

### **4.4. Tipos de composiciones y disposiciones**

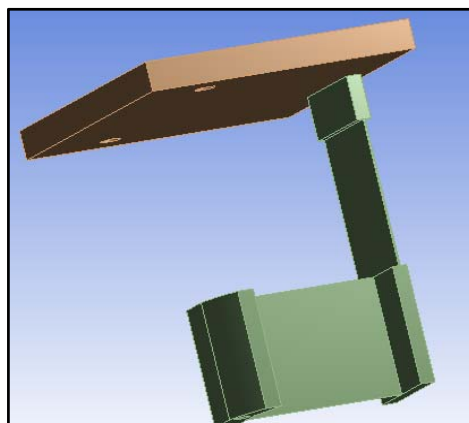
En este punto se van a tratar los diferentes tipos de composiciones (cada composición tiene dos disposiciones, durante todo el capítulo se va a referir a estas formas con esta nomenclatura). En esencia, dos tipologías (“Recto” y “L”) con sus dos posibles disposiciones (Figura 4.3, Figura 4.4, Figura 4.5, Figura 4.6, Figura 4.7, Figura 4.8 y Figura 4.9) dando un total de 4 opciones que se engloban dentro de las limitaciones expuestas.

Composición “L”:

Disposición “L”



**Figura 4.2: L**



**Figura 4.3: L+ plataforma**

Disposición “L invertida”

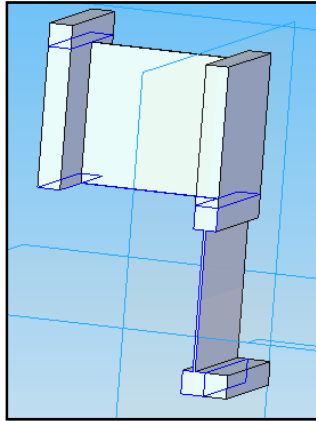


Figura 4.4: L invertida + plataforma

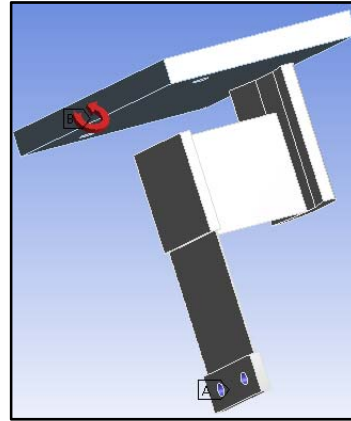


Figura 4.5: L invertida

Composición “Recto”:

Disposición “Recto”

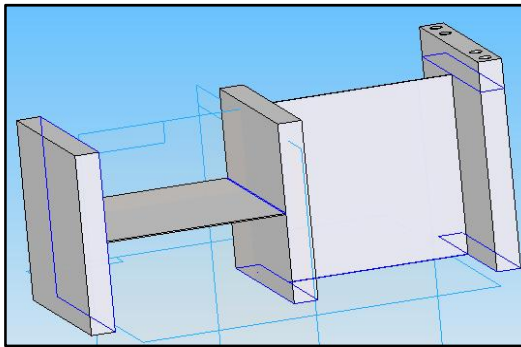


Figura 4.6: Recto + plataforma

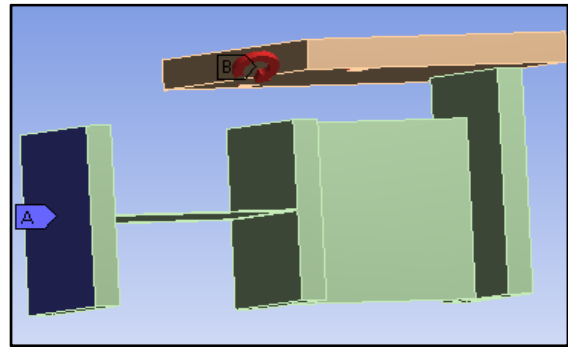


Figura 4.7: Recto

Disposición “Recto Recrecido”:

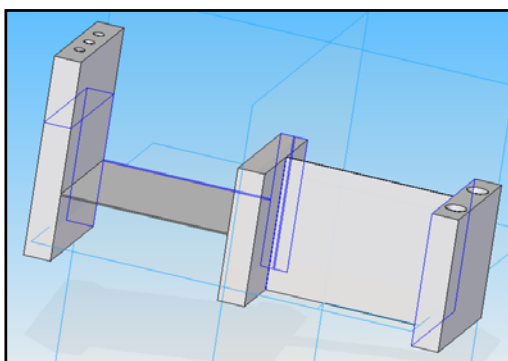


Figura 4.9: Recto Recrecido

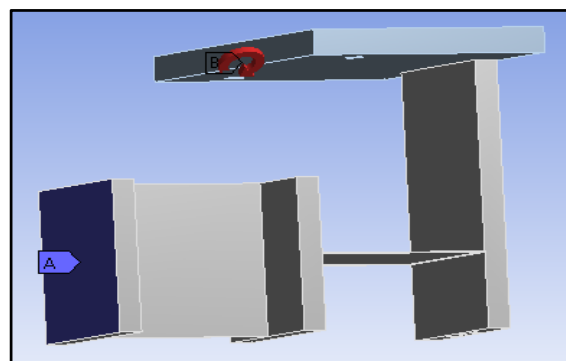


Figura 4.8: Recto Recrecido + plataforma

Dependiendo de la colocación de los elementos auxiliares, se pueden orientar en sentido “Invertido” (como se ve en las imágenes preliminares) o en sentido “Normal” (lo contrario). La orientación en el proceso de ensamblaje determinará el centro de masas del conjunto y por consiguiente su equilibrio y estabilidad.

Una vez llegado a este punto se plantean qué ventajas tiene la composición “L” frente a su homóloga “Recto”.

El elemento diferenciador, en este caso, serán los movimientos parásitos.

#### 4.5. Movimientos parásitos

Para saber que elemento flexible es más vulnerable a sufrir estos movimientos, se usará el mismo procedimiento (*apartado 3.3.1.*). A partir de un diseño base y un análisis mediante simulación se hará la comparativa de resultados.

##### 4.5.1. Consideraciones previas

Se considera necesario hacer un primer repaso a la nomenclatura que se va a seguir para definir las diferentes partes del elemento flexible. A la lámina que está unida al apoyo se le denominará “a”, a la lámina que esté sujeta a la plataforma móvil se le nombrará “b”. En el caso de no hacer referencia a “a” o “b” (cuando hablemos de los parámetros geométricos del elemento) se deducirá que los dos elementos siguen la misma distribución geométrica (Figura 4.11).

En el caso de hacer referencia a la geometría de la lámina, seguirá las siguientes indicaciones:  $N^{\circ}1 \times N^{\circ}2 \times N^{\circ}3$ ; el número 1 ( $N^{\circ}1$ ) es el referente a “L”, el número 2 ( $N^{\circ}2$ ) hará referencia a “b”; finalmente tenemos el número 3 ( $N^{\circ}3$ ) es el referente a “t”. Ejemplo,  $40 \times 60 \times 0,4$  mm (Figura 4.10):

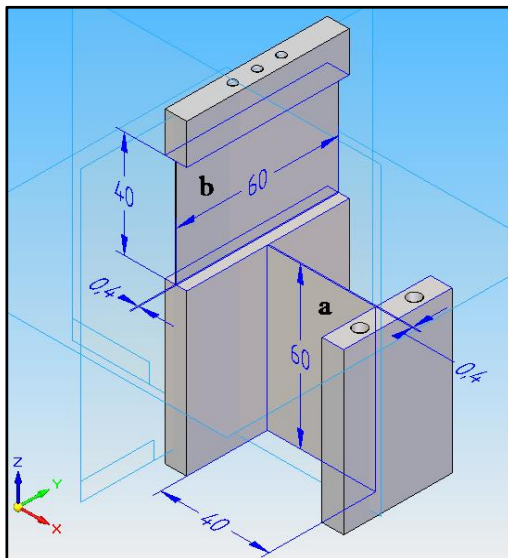


Figura 4.10: Ejemplo geometría “L”

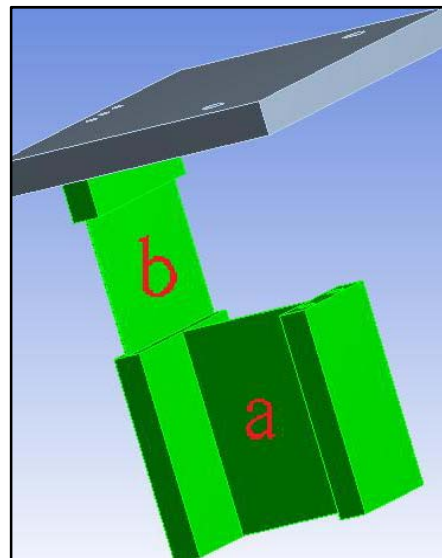


Figura 4.11: Láminas “a” y “b”

##### 4.5.2. Simulación

Para el caso que nos ocupa, se ha decidido escoger la misma geometría para las dos “láminas” del mismo elemento flexible para simplificar las opciones comparativas. De esta forma y, partiendo en todos los casos del mismo diseño en la lámina, se comparará la reacción a momentos de estos elementos flexibles.

El tamaño elegido de la unión tipo lámina ha sido 40x40x0,4 mm, con el material Aluminio 7075.

La metodología del experimento es la siguiente (mediante previo diseño con SolidEdge y posterior simulación en ANSYS):

Objetivo: Obtener movimientos parásitos en lamina “b”

- 1- Obtener ángulo 30° mediante aplicación de momento en lámina “a” (acimutal 30°):
  - a. Aplicar momento en lámina “a” en una dirección (Figura 4.12).
  - b. Obtención de las deformaciones puras (sin movimientos parásitos) en las dos láminas. Esta parte la denominaremos blanco (Figura 4.13).

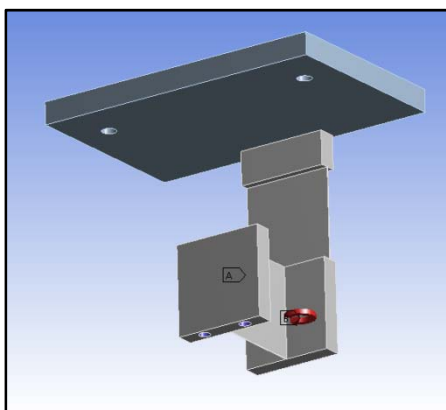


Figura 4.12: Apoyo y fuerza de “blanco”

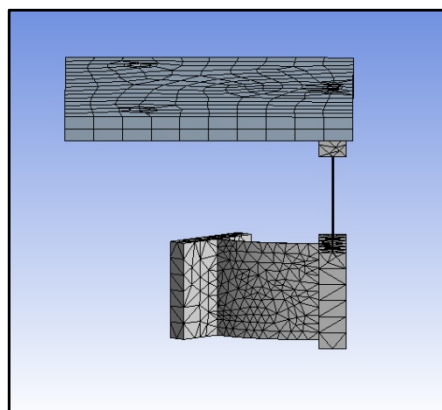


Figura 4.13: Deformación “blanco”

- 2- Obtener ángulo 30° mediante la aplicación de momento en la plataforma móvil:
  - a. Aplicar momento en la plataforma en la misma dirección que en el apartado 1 (Figura 4.15).
  - b. Obtención de deformaciones totales (con movimientos parásitos) en las dos láminas (Figura 4.14).

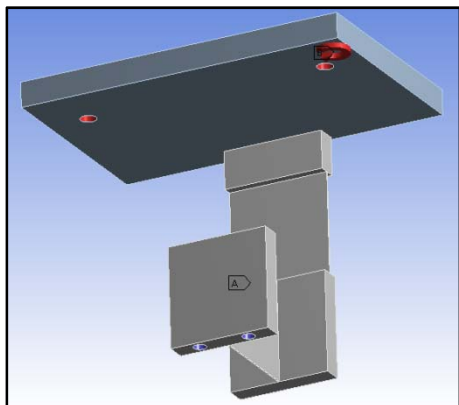


Figura 4.15: Apoyo y fuerza de mov. parásito

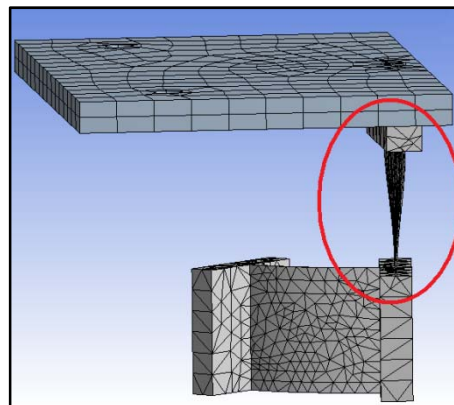


Figura 4.14: Deformación mov. parásito

- 3- La diferencia que haya entre las primeras deformaciones (punto 1) y las segundas (punto 2) determinarán el grado de movimiento parásito en lámina “b”.

- 4- Se repite el mismo procedimiento, pero con un momento puro en la lámina “b” (elevación 30°).
- 5- Se repite todo para las 4 composiciones, para a posteriori sacar conclusiones.

Composición Lámina	Acimutal (30°)		Elevación (30°)	
	a (mm)	b (mm)	a (mm)	b (mm)
<b>L</b>	0,049	<b>1,536</b>	0,002	0,000
<b>L<sup>-1</sup></b>	<b>2,116</b>	0,010	0,000	0,001
<b>Recto</b>	<b>0,002</b>	0,000	0,000	0,002
<b>Recto Recrecido</b>	0,000	<b>0,002</b>	0,002	0,000

Tabla 4.1: Movimientos parásitos según disposición

*Nota: La confección de esta tabla ha requerido de 8 simulaciones.*

Se ha elegido 30° cogiendo como rango de estudio el doble del rango máximo expuesto en la bibliografía(7) (12). Nos interesa el estudio de rangos grandes para plataformas móviles.

Como se deduce de la Tabla 4.1 el grupo que está formado por la composición “L” posee más transmisión de los momentos parásitos que el grupo formado por su homóloga “Recto”.

Las disposiciones (“Recto” y “Recto Recrecido”) de la composición “Recto” tienen el mismo nivel de transmisión de movimientos no deseados. En este caso se evaluará otras especificaciones para discernir cual disposición es mejor.

#### 4.6. Elección de la geometría

En este apartado se elegirán los valores de los parámetros geométricos. Para simplificar la fase de diseño y el cálculo de la trayectoria en los ejes de giro, se ha diseñado la lámina “a” sea igual a la lámina “b”. De esta forma, con sólo un patrón experimental, se podrán caracterizar los dos elementos. Al ser las dos láminas iguales y tener similar distribución solamente será necesario ensayar en una disposición, ya que se obtendrá idénticos resultados en la otra.

Se ha elegido disposición “Recto Recrecido”. Igual que en casos anteriores la “b” se ha mantenido constante a 40mm, “t” en 0,4mm y se ha variado la “L”. Los patrones elegidos han sido para L=40; 50; 60 mm en este caso se quiere obtener valores de coeficiente de seguridad (C.S) superiores a 1,5. Material aluminio 7075.

Los valores objetivos en este caso, han sido 30° en elevación, 45° en acimut, esta diferencia es consecuencia de querer introducir un elemento diferencial en el giro. Debido a que se ha observado que en los casos estudiados(12)(7)(9), hay más rango de giro en acimut que en elevación. Se aplica los momentos necesarios para llegar a estos valores con la limitación de mantener como mínimo un C.S, igual o superior a 1.

Junta (mm)	L (mm)	b (mm)	t (mm)	elevación (30°)	acimut (45°)	C.S
40x40x0,4	40	40	0,4	28	42	1
50x40x0,4	50	40	0,4	30	45	1,3
60x40x0,4	60	40	0,4	30	45	1,6
60x50x0,4	60	50	0,4	30	45	1,6

Tabla 4.2: Ángulo según L

En vista de los resultados (Tabla 4.2) y queriendo mantener un cierto grado de seguridad en el diseño, se ha elegido como distribución geométrica idónea, 60x50x0,4 mm. En este caso vemos que tanto la distribución elegida como la 60x40x0,4 mm tienen el mismo C.S, el criterio para elegir una en favor de la otra, pasa por querer rigidizar la pieza lo máximo posible dentro de las limitaciones espaciales.

La siguiente disyuntiva será la disposición idónea para esta configuración de parámetros.

#### 4.7. Estabilidad

El objetivo es seleccionar la orientación de los elementos auxiliares, dichos elementos, se diseñarán para la correcta colocación del elemento en el contexto.

Es objeto de este capítulo es hacer una valoración mediante centro de masas para elegir cuál de las dos orientaciones posibles se adecua mejor, orientación “Normal” o “Invertido”

##### 4.7.1. Limitaciones

La limitación a valorar será la estabilidad de todo el montaje. Durante su diseño se tendrá en cuenta la influencia que pueden tener los elementos en el equilibrio final de todo el montaje así como su posible interferencia.

##### 4.7.2. Centro de gravedad

Para analizar el equilibrio resultante del diseño utilizaremos la localización del centro de gravedad. La situación de este centro respecto de la base de apoyo y su posible movimiento dependiendo de la actuación de la máquina hará crítica la elección de la configuración.

Se considera de especial interés definir previamente este concepto. El centro de gravedad (c.g) es el punto de aplicación de la resultante de todas las fuerzas de gravedad que actúan sobre las distintas porciones materiales de un cuerpo, de tal forma que el momento respecto a cualquier punto de esta resultante aplicada en el centro de gravedad es el mismo que el producido por los pesos de todas las masas materiales que constituyen dicho cuerpo(1).

En este caso el centro de masas coincide con el centro de gravedad ya que el campo gravitatorio es uniforme; es decir, viene dado en todos los puntos del campo gravitatorio por un vector de magnitud y dirección constante.



Un objeto apoyado sobre una base plana estará en equilibrio estable si la vertical que pasa por el centro de gravedad corta a la base de apoyo. Se expresa diciendo que el c.g. se proyecta verticalmente dentro de la base de apoyo. Por consiguiente cuanto más cerca de la base y centrado de la base este el centro de gravedad, más estabilidad para el diseño.

#### 4.7.3. Elementos auxiliares

Como se observa en la Figura 4.17 para conectar el elemento flexible con la plataforma se necesitará un elemento intermedio con forma cilíndrica (Figura 4.19), para que se aloje en el registro de la placa y otro con forma rectangular para que pueda juntarse con un añadido (Figura 4.16) (en el caso de ser necesario) que ira junto con la junta o directamente sobre la junta.

Según la forma de la Figura 4.17 para unir la lámina doble flexible con la columna deberemos diseñar una extensión que llegue hasta la columna. En un extremo se ha pensado en una repisa que sirva de unión con la junta, y en el otro punto se hará un registro para alojar la columna al estilo del que se ha visto en la plataforma.

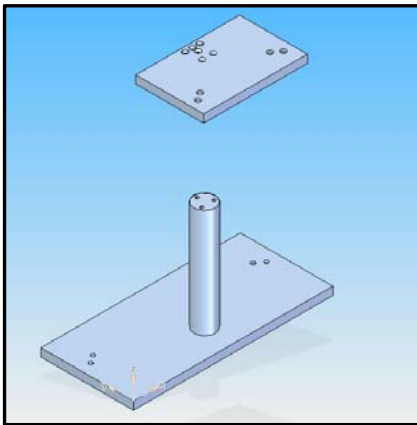


Figura 4.16: Entorno predeterminado

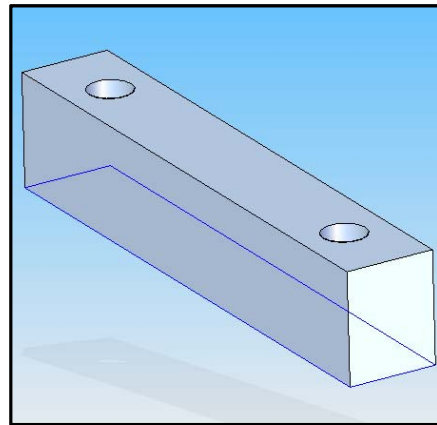


Figura 4.17: Añadido

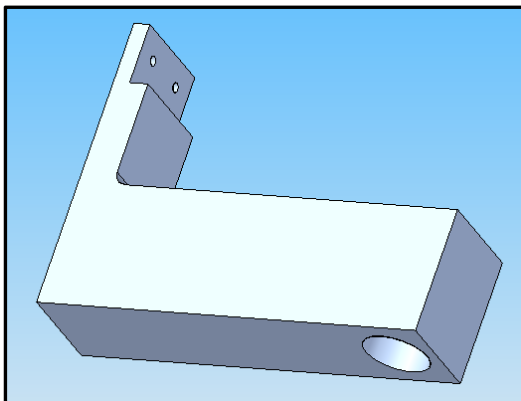


Figura 4.18: Elongación grande

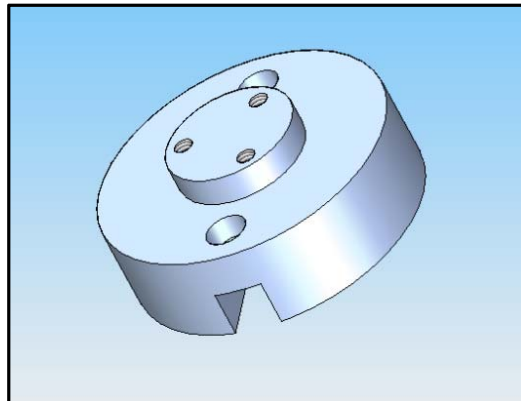


Figura 4.19: Elemento circular

#### 4.7.4. Optimización

Esta extensión cómo se observa en la Figura 4.18 se ve muy voluminosa y se intuye que puede llegar a afectar negativamente al equilibrio del conjunto, a esta extensión la llamaremos “extensión 1”.

Para analizarlo se tomará el centro de masas (c.m.) del montaje. En este caso y ante la duda compararemos dos configuraciones que son viables para este elemento. Una de ellas necesitará otro elemento auxiliar (Figura 4.20), a esta extensión la llamaremos “extensión 2”.

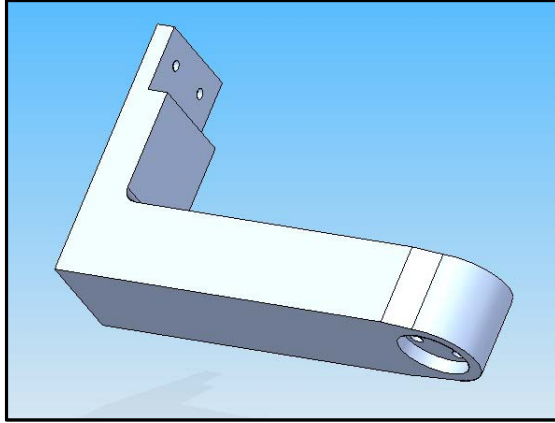


Figura 4.20: Elongación delgado

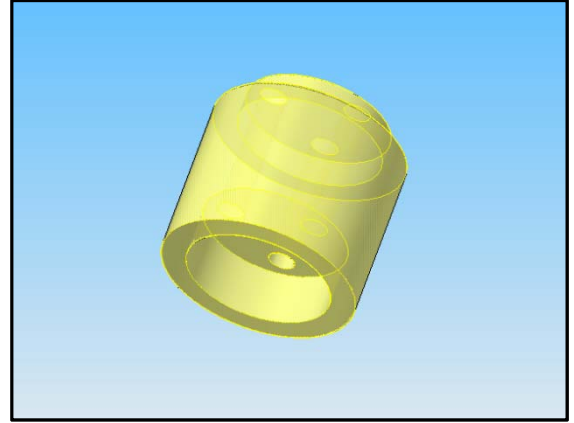


Figura 4.21: Recrecido

Los resultados se pueden ver en la siguiente tabla (Tabla 4.3) y de manera gráfica en la Figura 4.23 y Figura 4.22.

C.G	Objetivo	Extensión 1	Extensión 2
x (mm)	125	125	125
y (mm)	58	74	67
z (mm)	0	128	126

Tabla 4.3: Extensión 1 vs Extensión 2

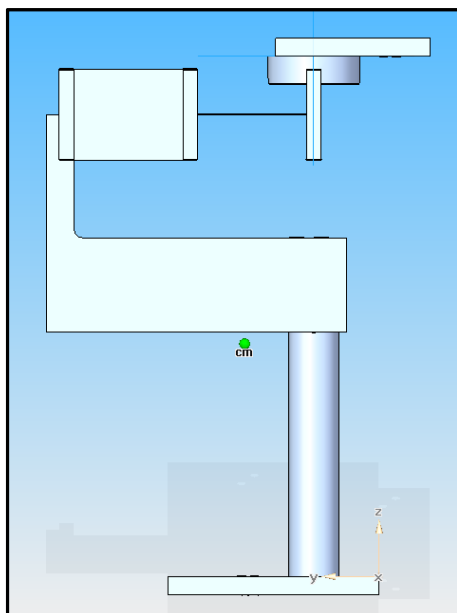


Figura 4.22: C.G Elongación grande

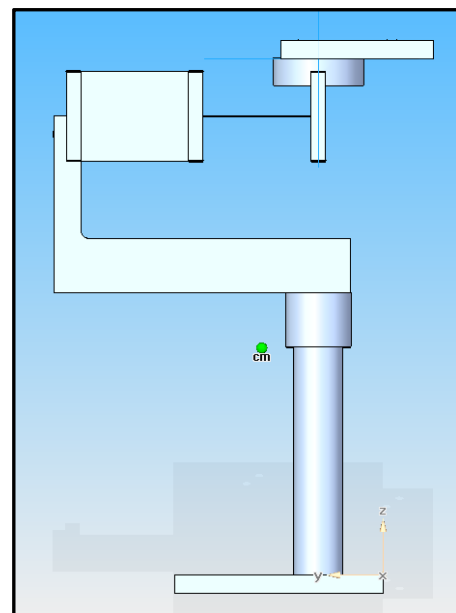


Figura 4.23: C.G Elongación delgada

El propósito es acercarse lo máximo posible al valor objetivo. Se puede concluir que la colocación “extensión 2” es más estable que su predecesora ya que nos centra y nos baja el centro de gravedad. En este caso será la elegida.

#### 4.7.5. Orientación de los elementos auxiliares

Utilizando el centro de gravedad se buscará la colocación más favorable para la estabilidad del conjunto. En este caso dependerá de la orientación de los elementos auxiliares, como se ve en la Figura 4.24 y Figura 4.25 (Nótese que la posición de la plataforma respecto de la columna es la misma en ambos casos).

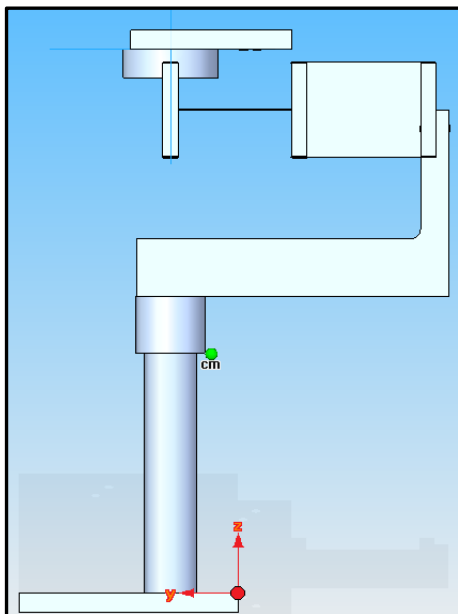


Figura 4.24: Orientación “Invertido”

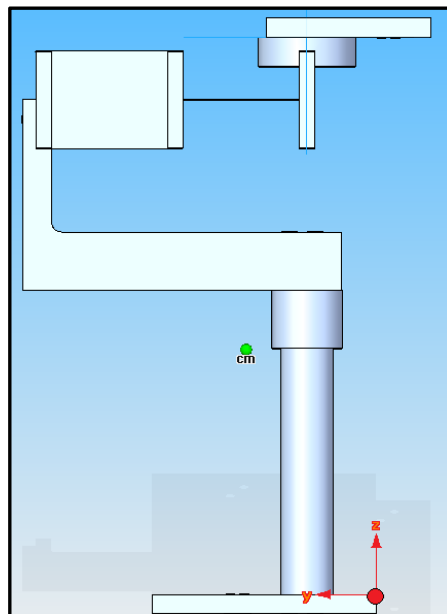


Figura 4.25: Orientación “Normal”

Los resultados pueden verse en la siguiente tabla (Tabla 4.4):

C.G	Objetivo	Normal	Invertido
X (mm)	125	125	125
Y (mm)	58	67	14
Z (mm)	0	126	126

Tabla 4.4: C.G “Normal” vs “Invertido”

Como podemos deducir la configuración que se acerca más a nuestro valor objetivo, y por consiguiente la más favorable a la estabilidad del diseño, es la configuración “Normal” de la plataforma.

La configuración “Invertido” en este caso es totalmente desaconsejable ya que un mínimo cambio en la plataforma hace prever la desestabilización de la misma con un final trágico.

Como conclusión final del apartado, se decide que la elección pasará por una configuración de los elementos auxiliares en clave “Normal” y con una reducción volumétrica en uno de ellos para mejorar en todos los casos la estabilidad.

## 4.8. Elección de la disposición

En este apartado, mediante una valoración espacial, se elegirá la disposición que case mejor con el contexto predeterminado

Para la elección, se debe tener un conocimiento más detallado del espacio físico donde irá ubicado nuestro elemento, ya que dependerá de este volumen de maniobra la elección del elemento flexible “Recto” o “Recto Recrecido”.

### 4.8.1. Limitaciones

En este caso las limitaciones vendrán dadas por el espacio entre el apoyo superior e inferior de los actuadores, durante toda su operación se debe mantener libre de elementos que puedan colisionar en la trayectoria entre estos dos puntos. Haciendo la valoración en sus rangos máximos de actuación elegidos anteriormente  $\pm 30^\circ$  de elevación y  $\pm 45^\circ$  acimut se tiene que vigilar que los actuadores no choquen contra la columna o elementos auxiliares.

### 4.8.2. Trayectorias de los elementos flexibles

Miraremos la evolución del movimiento de los dos elementos en el entorno, previo estudio individual.

Trayectorias “Recto” y “Recto Recrecido”:

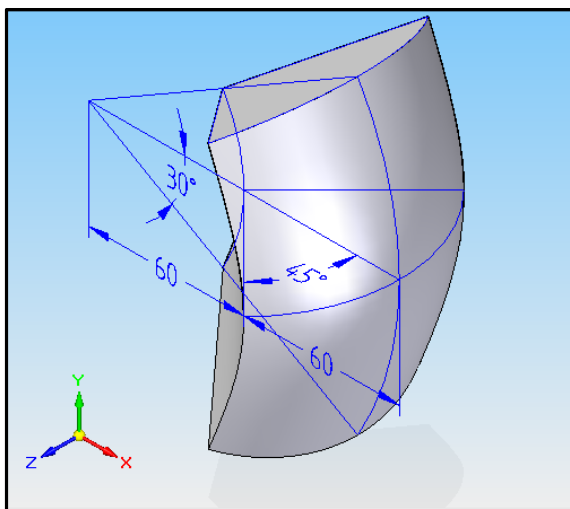


Figura 4.26: Trayectoria punto 1 (rango máximo) disposición “Recto Recrecido”

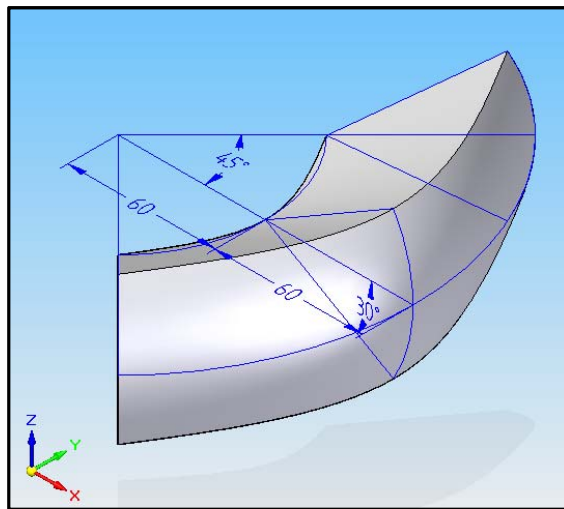


Figura 4.27: Trayectoria punto 1 (rango máximo) disposición “Recto”

En la Figura 4.27 y 4.26 se pueden apreciar un protrusión gris. La cara externa de esta proyección representa el movimiento que hará el punto de unión de la placa con la junta flexible. Ver punto 1 en la Figura 4.33.

Para poder representar el movimiento volumétrico que tendrá todo el montaje se ha recurrido a unos elementos cónicos y de barrido. De esta forma se tiene todo el volumen de maniobra de los elementos móviles de la plataforma. Previamente, se ha representado

solamente la junta (Figura 4.29, Figura 4.28 y recta nº 2 de la Figura 4.33) y a posteriori la placa (Figura 4.30, Figura 4.31 y plano nº 3 de la Figura 4.33 ).

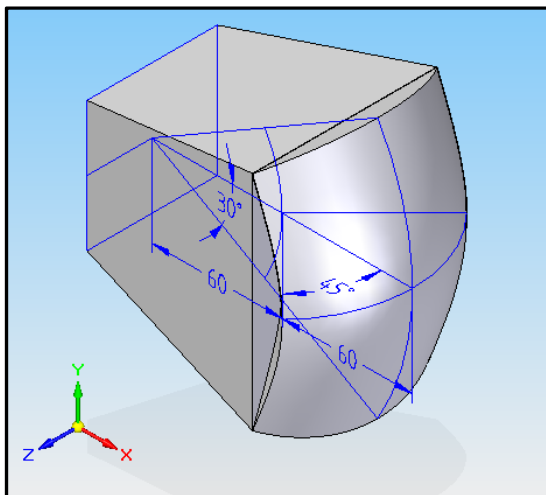


Figura 4.28: Recto Recrecido + junta

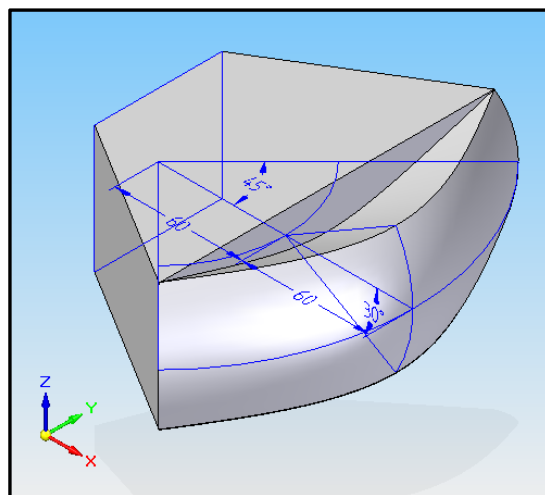


Figura 4.29: Recto + junta

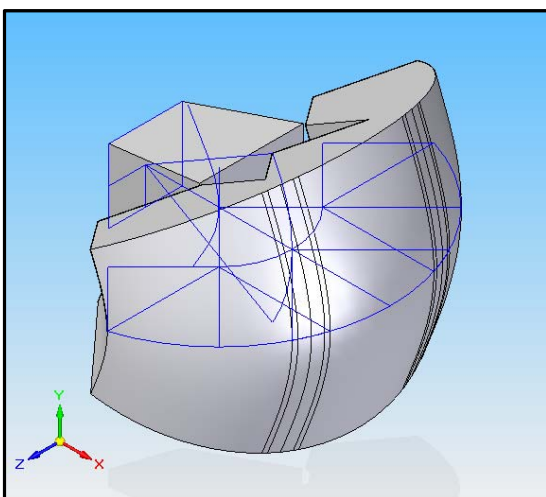


Figura 4.30: Recto Recrecido + junta + plataforma

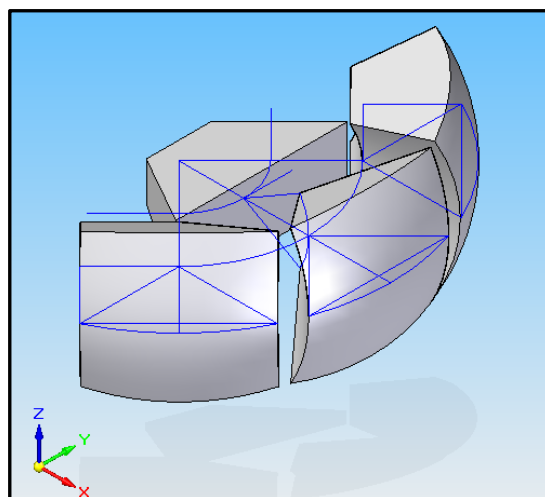


Figura 4.31: Recto + junta + plataforma

De estas representaciones se resaltaré que es en las partes máximas de desplazamiento, donde se va a realizar el siguiente estudio.

Se sabe que la posición relativa inicial de la plataforma con la columna debe mantenerse. Este hecho es de gran ayuda, ya que permite situar los conos de movimiento en el dibujo. El centro de la base mayor de cada cono representa la posición inicial de la plataforma.

#### 4.8.3. Estudio de las trayectorias en el contexto predeterminado

En este punto se situarán los conos de movimiento junto con la plataforma y se estudiarán posibles problemas debido a impactos con el entorno.

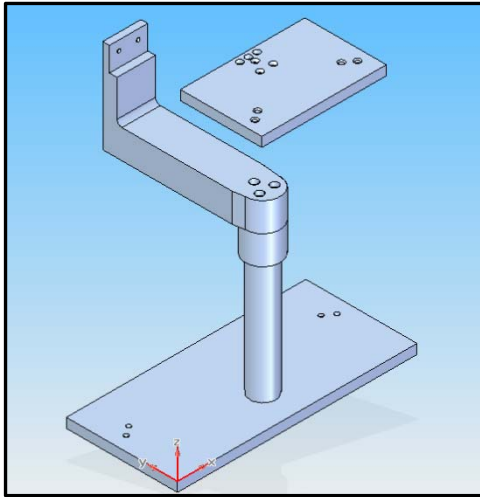


Figura 4.32: Plataforma + elem. auxiliares

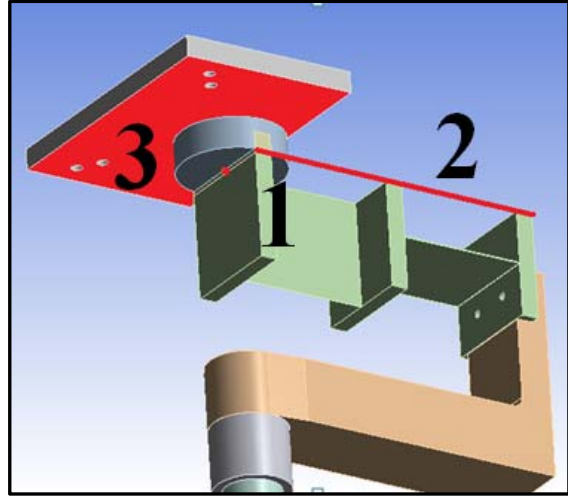


Figura 4.33: Puntos de las protusiones

El estado inicial es el que se aprecia en la Figura 4.32 y Figura 4.33. El siguiente paso es situar los conos de desplazamiento.

Se dibujan dos preformas cilíndricas, simulando los actuadores, y se sitúan en sus posiciones correspondientes.

El primer caso que se analizará, será la disposición “Recto Recrecido”:

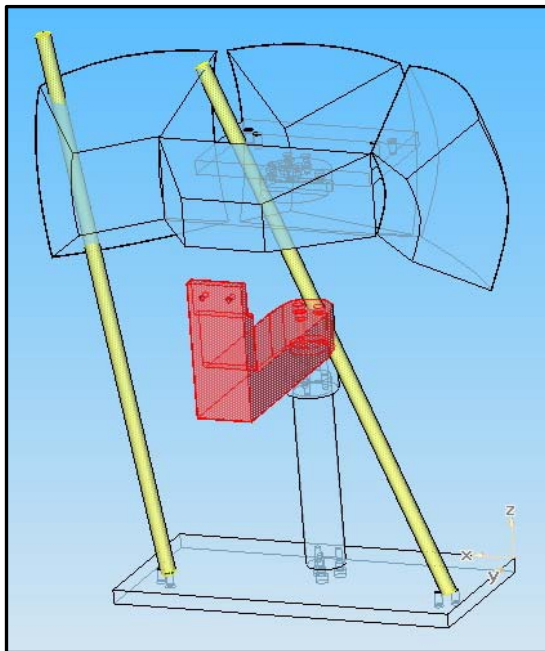


Figura 4.34: Recrecido posición +45°, +30°

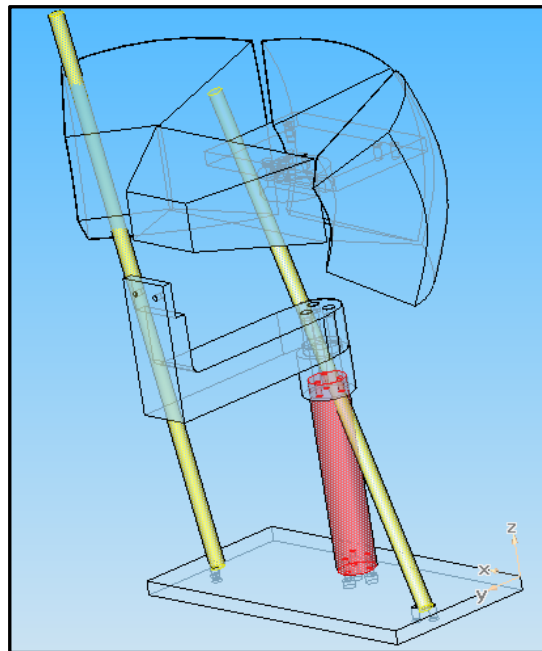


Figura 4.35: Recrecido posición +45°, -30°

En la Figura 4.34 y Figura 4.35 se aprecia como el actuador colisionaría contra un elemento auxiliar y la columna en el rango superior máximo y en rango inferior máximo. Este diseño no permitiría llegar a los rangos máximos que se han planteado en el apartado 4.6.

A su vez se aprecia (una vez colocado el volumen de acción de la plataforma) si hay colisiones con su entorno (Figura 4.36 y Figura 4.37).

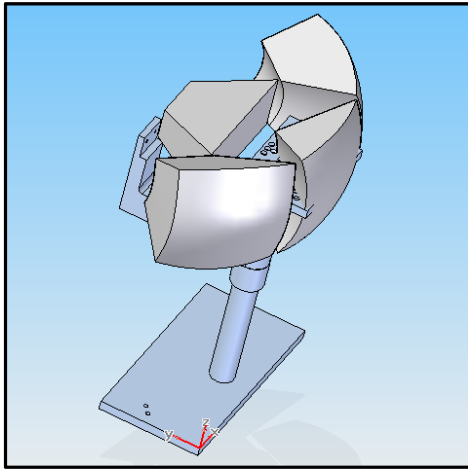


Figura 4.36: Montaje recto recreado

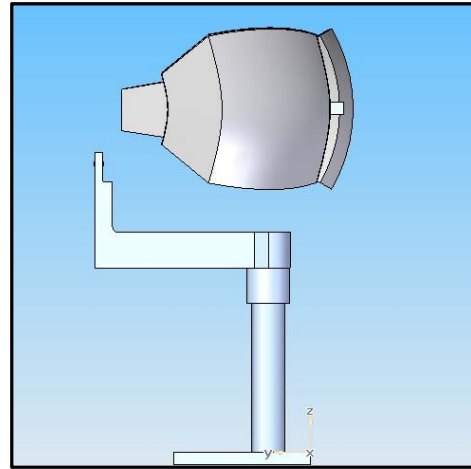


Figura 4.37: Espacio montaje recto recreado

No se observa ningún problema de interferencia en el movimiento de la plataforma.

Disposición “Recto”:

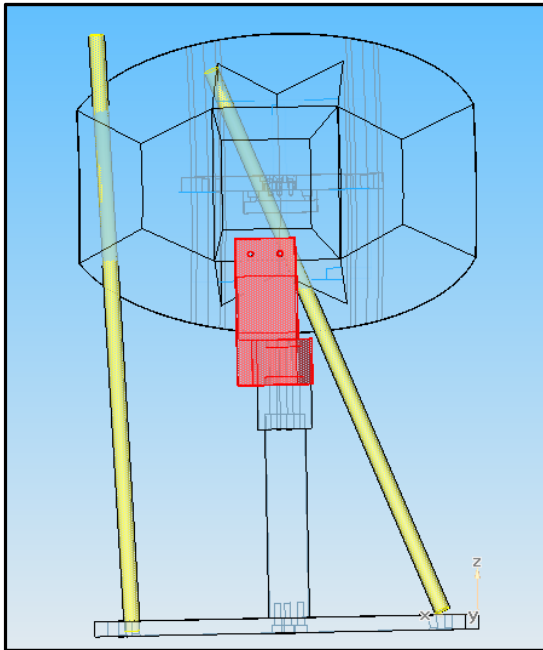


Figura 4.38: Recto posición  $+45^\circ, +30^\circ$

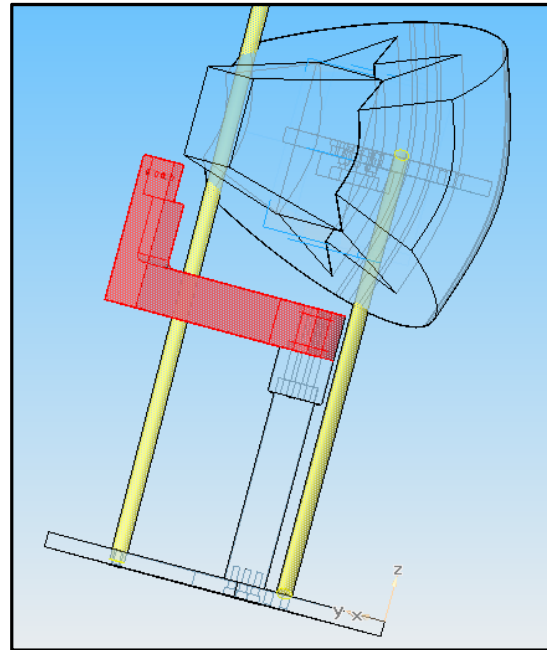


Figura 4.39: Recto posición  $+45^\circ, -30^\circ$

En la Figura 4.38 y Figura 4.39 se observa que tanto en el caso de rango máximo superior como inferior no habría colisión. Se tiene que remarcar que hay poco margen en este caso, ya que la linealidad de los agujeros casi se ve afectada por los elementos auxiliares de soporte.



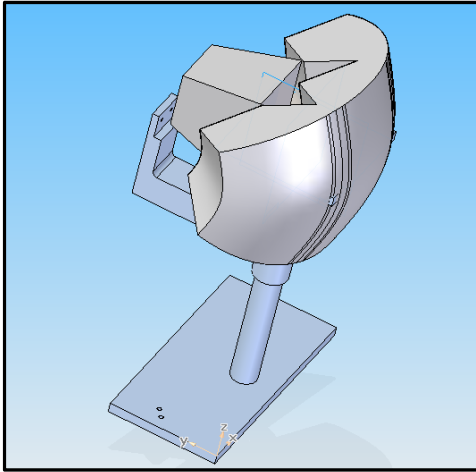


Figura 4.40: Espacio montaje recto

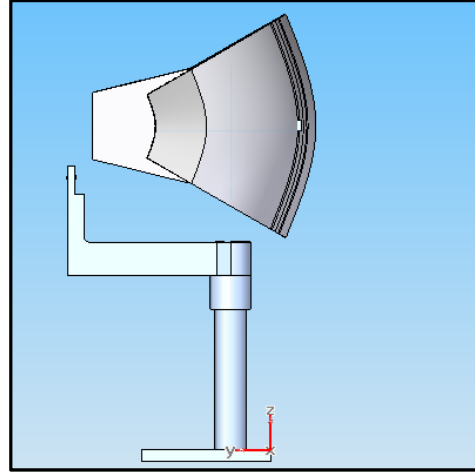


Figura 4.41: Montaje recto

No se observan problemas de movimiento de la plataforma (Figura 4.41 y Figura 4.40).

Finalmente se puede concluir que la disposición óptima para cumplir los rangos que se han estimado oportunos es la composición “Recto”.

#### 4.9. Elemento flexible

Finalmente se ha elegido una junta doble 60x50x0,4 mm, cuya composición igual que su disposición es la nombrada “Recto” (Figura 4.42). El plano del elemento puede consultarse en el *Apéndice 3*.

El material elegido para llegar a los rangos es el Aluminio 7075.

La preforma adquirida para el Aluminio 7075 es d=70mm, L=600mm distribuidor Alumafel (*Apéndice 2*).

El proceso por el cual se mecaniza este tipo de láminas es el denominado electroerosión (EDM), ya que es la manera de conseguir láminas tan delgadas sin afectar durante el proceso las propiedades mecánicas del material.

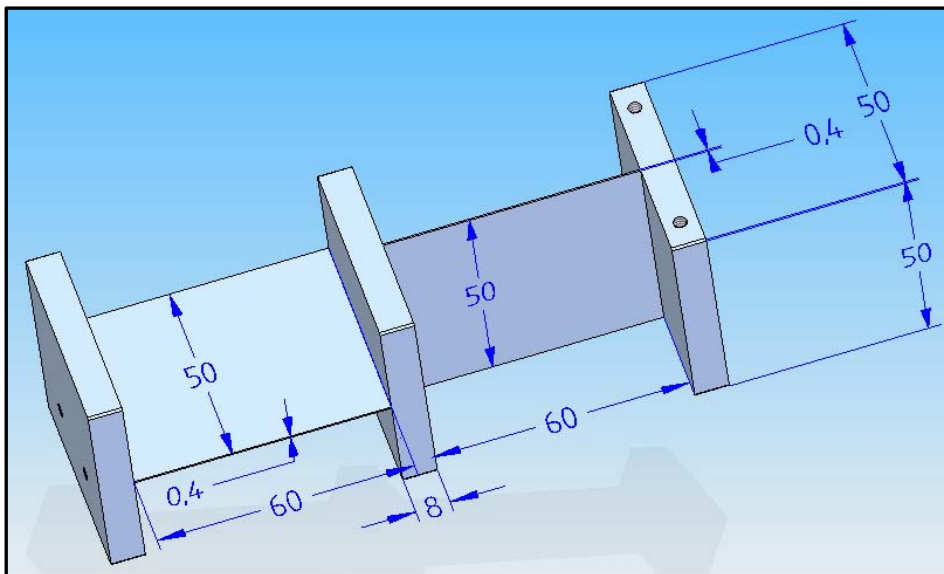


Figura 4.42: Elemento flexible de doble lámina



#### **4.10. Conclusiones**

Se ha elegido la composición “Recto” frente a la composición “L” ya que después del análisis mediante ANSYS se ha observado menos transmisión de movimientos parásitos (elección mediante movimientos parásitos).

Posteriormente se ha hecho una selección de la geometría más adecuada para nuestro proyecto que tuviera un C.S superior a 1,5. En este caso ha sido una lámina doble de 60x50x0,4 mm; L=60 mm, b=50 mm y t=0,4 mm.

Se han diseñado los elementos auxiliares y se ha optado por una colocación de los mismos en posición “Normal” frente la “Invertido” porque se ha obtenido una mejor estabilidad del conjunto (elección mediante estabilidad).

Se ha seleccionad la disposición “Recto” frente la “Recto Recrecido”. Se ha concluido que esta disposición no provoca problemas de colisión con su entorno y por consiguiente será la elegida (elección mediante espacio volumétrico).

Finalmente, el elemento elegido ha sido una junta doble 60x50x0,4 mm con una disposición y composición “Recto” y orientación “Normal”.

## 5. Simulación

### 5.1. Introducción

En este apartado se tratará la simulación del elemento flexible con todos los elementos que conformarán su montaje. Así mismo también se hará un estudio a fatiga de todo el conjunto. Todas estas simulaciones se han hecho empleando el software ANSYS WORKBENCH 11(13).

De manera adjunta a este capítulo se ha considerado interesante añadir una parte de posibles soluciones en caso de aparecer movimientos parásitos.

### 5.2. Montaje final

En este capítulo veremos el montaje final y las partes del montaje que son más sensibles a los esfuerzos.

Las condiciones necesarias para conseguir los ángulos en elevación y en acimut han sido un momento resultante en la plataforma de  $M_x = \pm 300 \text{ N}\cdot\text{mm}$  y una  $M_z = \pm 300 \text{ N}\cdot\text{mm}$ . No habría ningún problema para llegar hasta estos valores.

A continuación vamos a ver las partes del conjunto que sufren durante la deformación a  $M_x = 300 \text{ N}\cdot\text{mm}$  y  $M_z = 300 \text{ N}\cdot\text{mm}$  en la Figura 5.1 y 5.2.

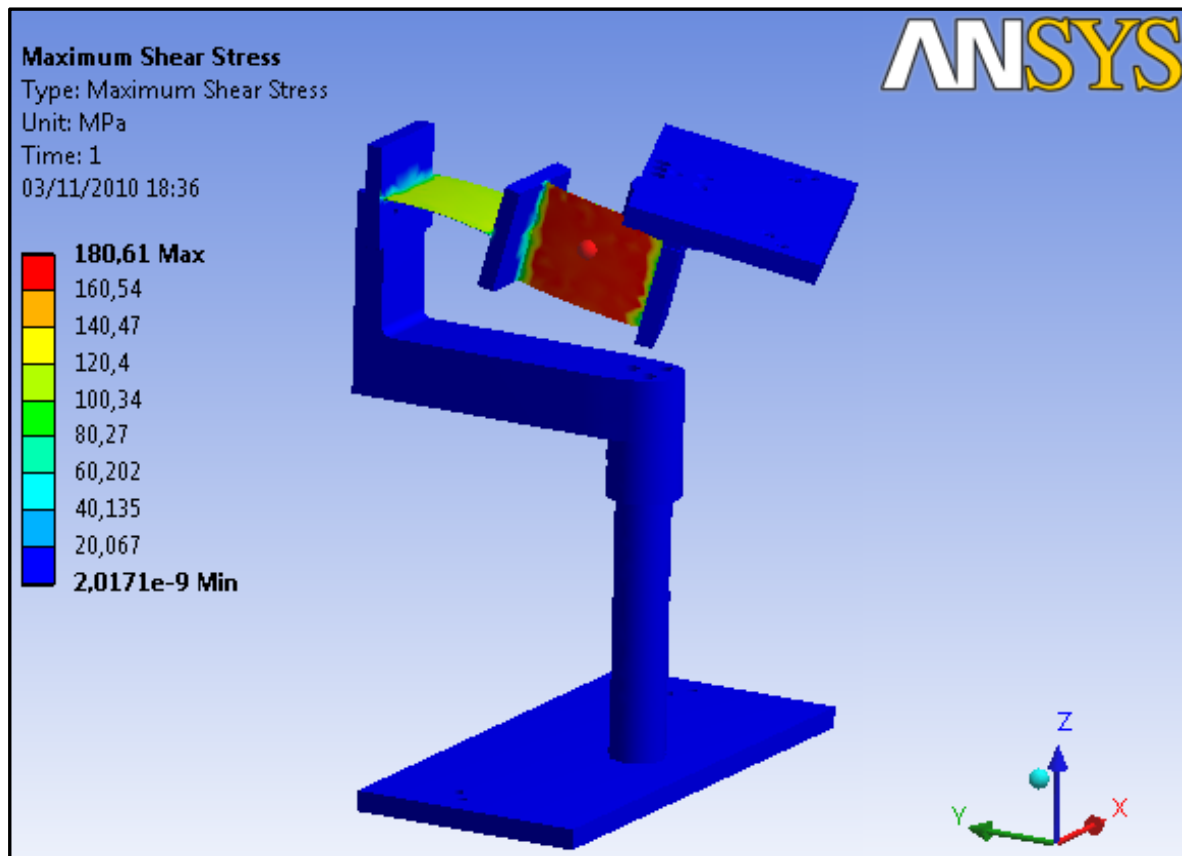


Figura 5.1: Tensión sufrida en rangos máximos repartida por el montaje

Acimut, Elevación (°)	Mx (N·mm)	Mz (N·mm)	Máxima tensión compartida (MPa)
30, -30	300	300	180
30, 30	-300	300	179
-30, 30	-300	-300	177
-30, -30	300	-300	178

Tabla 5.1: Momentos y tensiones para diferentes posiciones

En todos los casos el C.S es aproximadamente 1,6.

Como era previsible, la parte que sufre más es la junta flexible (Figura 5.1), concretamente la lámina “b”, en todos los casos analizados. Aunque el C.S en este caso es de 1,6, si en el futuro hubiera que introducir alguna mejora, nos centraríamos en este segmento “b”. En la Tabla 5.1, también se observa que sufre las mismas tensiones para las diferentes posiciones.

No se aprecian movimientos parásitos en ninguna de las dos láminas (Figura 5.2 y Figura 5.3) en ninguno de los casos.

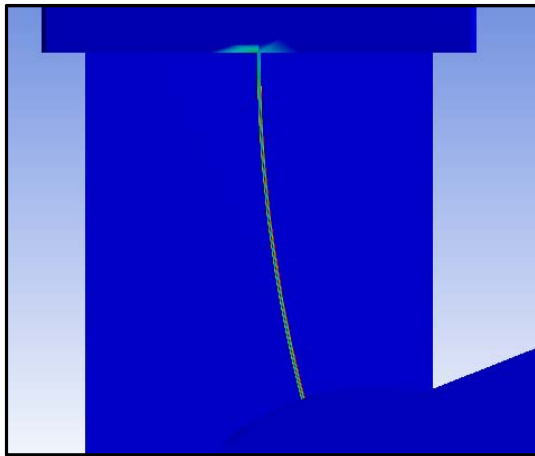


Figura 5.2: Lámina “b”

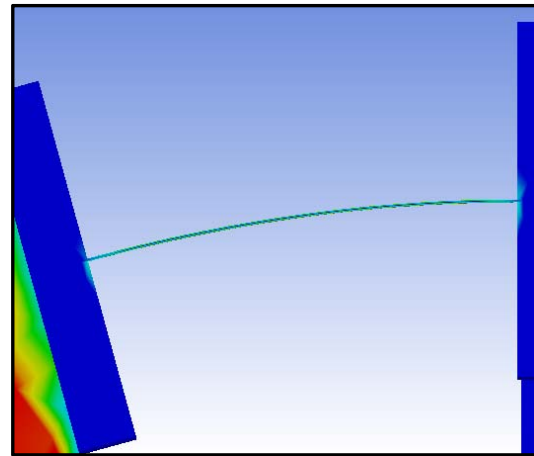


Figura 5.3: Lámina “a”

### 5.3. Ensayo a fatiga

Esta simulación consistirá en aplicar un momento de una amplitud constante de manera cíclica, para ver cuántos ciclos es capaz de aguantar antes de fallar por fatiga(14).

Se considera realista que se haga este ensayo aproximadamente a la mitad de los rangos máximos que a la vez son parecidos a los teóricos (acimut 15°, elevación 15°).

Se debe tener en cuenta que a más rango de ensayo, menos ciclos, variando estos de manera muy significativa.

En este caso los ciclos de vida son aproximadamente 36.900.000 ciclos. Para un uso normal de la máquina sería del orden de unos 5 movimientos por minuto, 300 por hora, 2.400 ciclos por día laborable de 8 horas. Esto da un total de 15.375 días laborables que puede trabajar la máquina.

La Figura 5.4 muestra la evolución proporcional de los ciclos respecto de los ángulos de giro. De manera que el número “1” del eje de las abscisas representa  $\pm 30^\circ$  acimut y  $\pm 30^\circ$  elevación y el “0,5”  $\pm 15^\circ$  acimut y  $\pm 15^\circ$  elevación. Y el eje de las ordenadas representa los ciclos de vida.

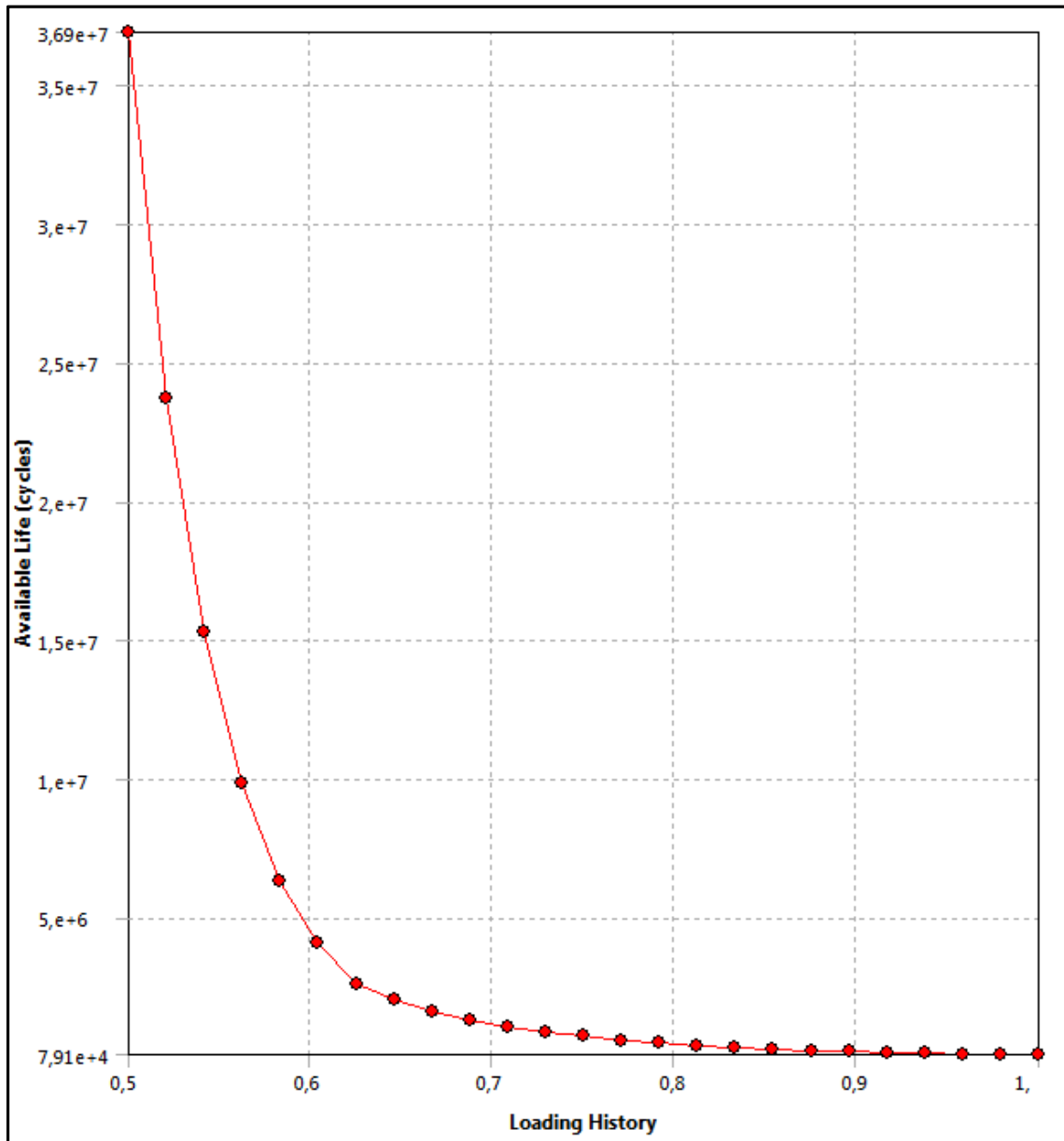


Figura 5.4: Rango ángulo de giro vs ciclos de vida

Se observa que para una aplicación que trabajase par un rango de amplitud constante de giros máximos, el elemento pasaría a tener una vida corta 79.100 ciclos (33 días laborables). Lo que podría suponer el descarte de este elemento como junta, a favor de otro con una vida útil más larga. En todo caso la bibliografía siempre habla de rangos de aplicación máximos de  $15^{\circ}(9)(12)(7)$ , con lo que no habría ningún inconveniente.

#### 5.4. Soluciones en el caso de movimientos parásitos

Uno de los problemas que puede tener el elemento flexible es la transmisión de movimientos no deseados. Aunque se ha visto que el diseño no conlleva este problema, se mantiene un cierto aire crítico en este sentido. Debido a que las simulaciones representan momentos ideales.

Para sopesar la posible solución de este problema, en el caso de aparición, se hace un estudio de proposiciones que se cree, pueden mejorar este problema sin afectar en exceso su funcionalidad. No se entrará en un análisis detallado, pero se considera interesante nombrarlas. Estas opciones serían una línea alternativa de investigación para reducir este problema.

La solución pasaría por rigidizar la pieza, aunque esto iría en perjuicio del ángulo que pueda alcanzar la junta:

- Aumentar el parámetro geométrico “b”. Esta opción ya ha sido analizado en los *capítulos 2 y 3*. Es la mejor solución de las planteadas, el inconveniente que podría traer sería la adecuación de la nueva geometría a su entorno. Es la única opción que no iría en perjuicio del ángulo de giro (Figura 5.5 y Figura 5.6).

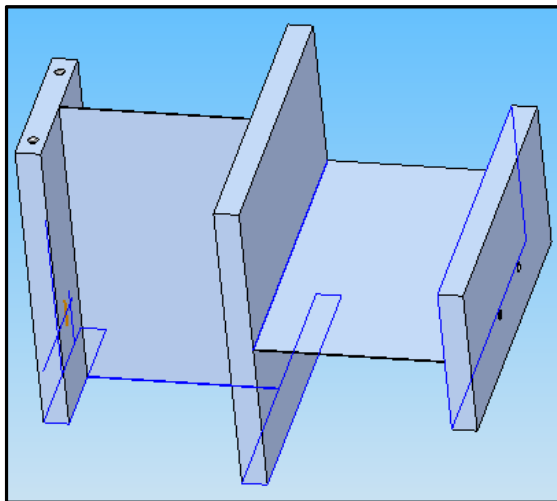


Figura 5.5: Aumento de “b”

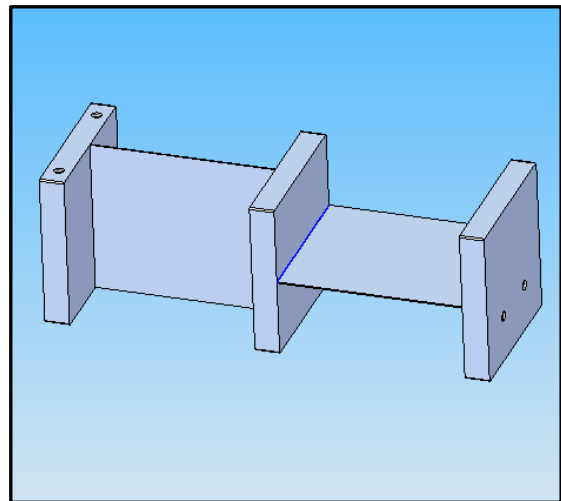


Figura 5.6: Disminución de “b”

- Añadir nervios en las láminas. Este añadido puede ser igual en las dos láminas, hecho que nos facilitaría el cálculo del comportamiento del elemento, o pueden ser colocados estratégicamente de manera distinta en cada uno, opción menos aconsejable ya que aumenta considerablemente las dificultades de cálculo de las reacciones del conjunto (Figura 5.8, Figura 5.7, Figura 5.10 y Figura 5.9).

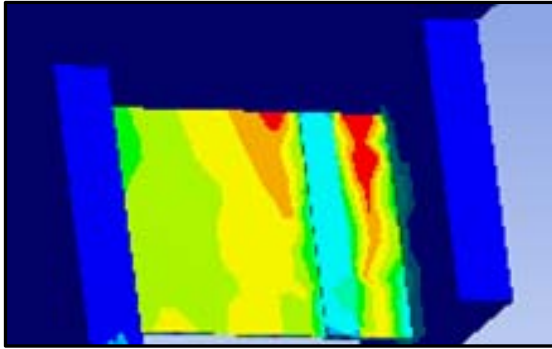


Figura 5.8: Nervio 1

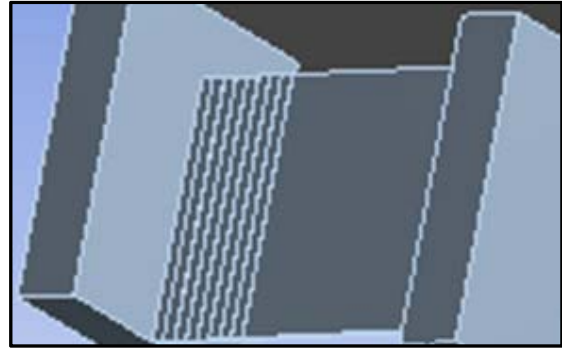


Figura 5.7: Nervio 2

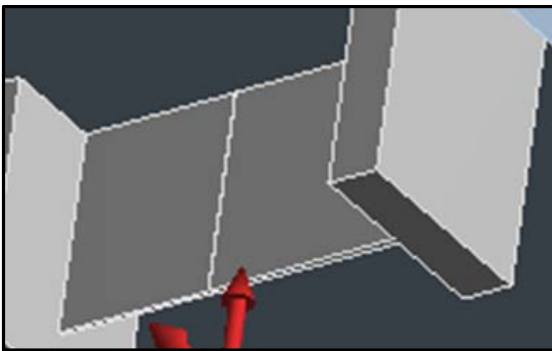


Figura 5.9: Nervio 3

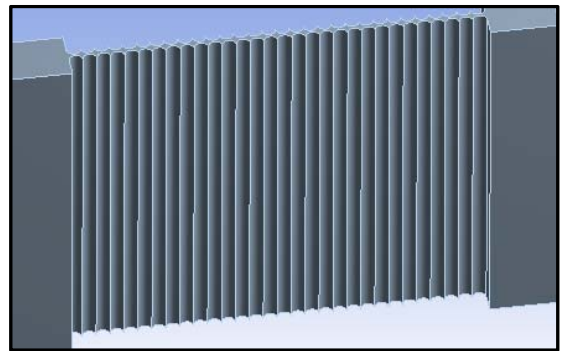


Figura 5.10: Nervio 4

- Jugar con distintas geometrías en las dos láminas. Esto es posible ya que queremos rangos de giro distintos para las dos. Este cambio, sin embargo, puede conllevar grandes dificultades a posteriori, ya que estaríamos tratando con centros de giro distintos para cada elemento individual para cada posición de la plataforma. Se necesitaría de un estudio muy detallado de su comportamiento (Figura 5.11).

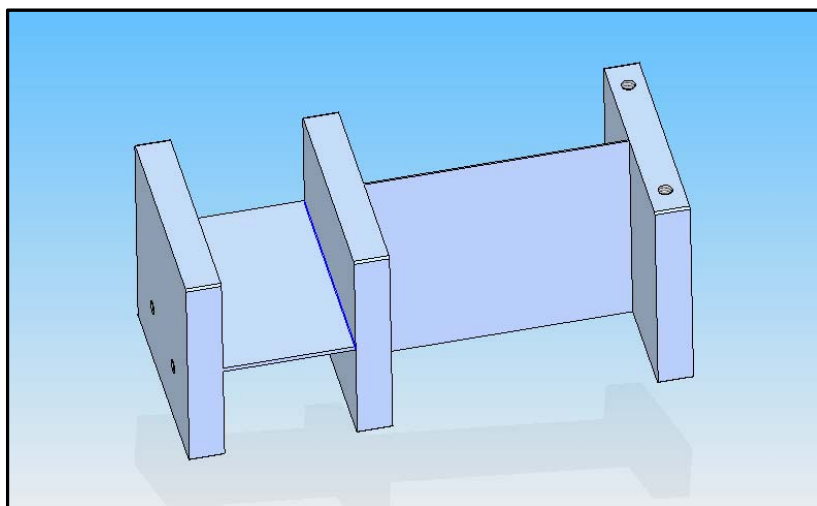


Figura 5.11: Lámina “a” más grande que “b”

- Cambiar la forma geométrica (Figura 5.12). Siendo esta opción, la menos deseada ya que como se ha visto en el *capítulo 2* tiene rangos muy pequeños de actuación.

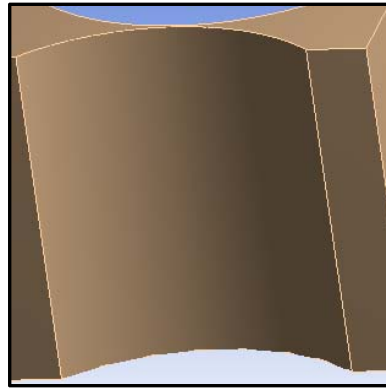


Figura 5.12: Forma de Entalla

### 5.5. Conclusiones

Después del análisis mediante ANSYS se ha conseguido un diseño válido con un C.S de 1,6 en el punto más desfavorable con una repartición homogénea de las tensiones en todas sus posiciones.

El elemento flexible es capaz de tener una vida útil satisfactoria de 15.375 días laborables par unos rangos de movimiento de  $\pm 15^\circ$  en acimut y elevación y un uso cíclico de 5 movimientos por minuto.

Se han aportado posibles nuevas soluciones y diseños en el caso de aparecer movimientos parásitos.

## 6. Ensayo

El ensayo consistirá en caracterizar el giro, así como los posibles movimientos parásitos de un elemento con la geometría descrita en el *capítulo 4* y *5*.

Al estar la junta flexible formada por dos elementos flexibles tipo lámina de las mismas características geométricas, se considera suficiente caracterizar una de estas láminas (60x50x0,4 mm), ya que los resultados serán por ende, igual para las dos. El material con el que se ha hecho la lámina es Aluminio 7075.

### 6.1. Consideraciones previas

Este diseño constará solamente de una lámina. Para sujetar esta lámina en la plataforma de ensayos se ha diseñado un elemento de sujeción. En la parte superior de la lámina se han añadido un total de 6 esferas patrón de diámetro 12mm.

Estas esferas tendrán dos objetivos, por una parte dos de ellas servirán de apoyo al actuador, que desplazará la lámina cierto ángulo de manera repetitiva e iterativa. En un primer ensayo se apoyará en la bola central, y en un segundo ensayo en la esfera lateral (Figura 6.11), de esta manera se evaluará los movimientos parásitos de los elementos en caso de soportar una fuerza no deseada.

A su vez las otras esferas servirán para la medición del posicionamiento del elemento en los distintos ángulos para tres coordenadas X, Y, Z. Esta medición se realizará en un laboratorio según las normas pertinentes, mediante la máquina por medición de coordenadas (MMC). De esta forma, y en un posterior estudio, podremos ver las diferentes características de análisis. Se ha utilizado un software para tratamiento de geometrías GeoGebra(15).

### 6.2. Diseño

En este apartado se describirán los elementos diseñados que formarán el ensayo.

El elemento intermedio de sujeción es una pieza que nos sujetará la lámina a la base soporte (Figura 6.1). Los planos de los elementos pueden verse en *Apéndice 3*.

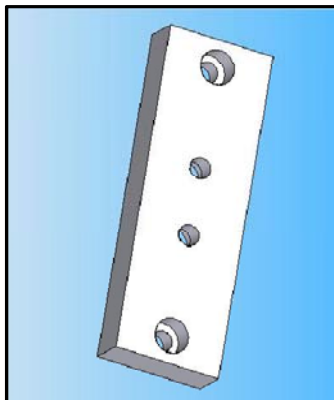


Figura 6.3: Elemento intermedio

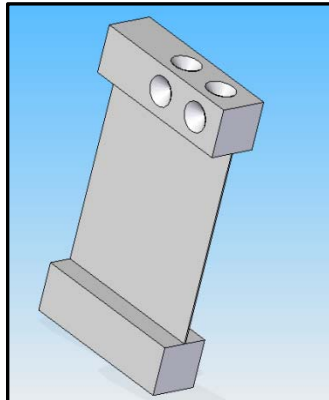


Figura 6.2: Lámina

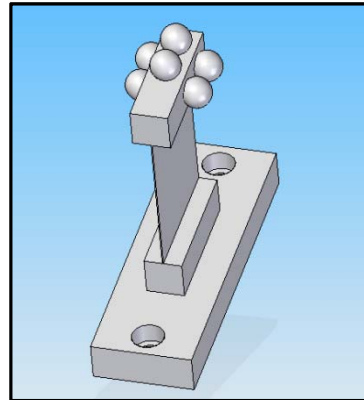


Figura 6.1: Lámina + esferas



A la lámina, en el diseño, se le ha añadido unos rebordes en la parte superior e inferior (Figura 6.2) del mismo tamaño, donde irán alojados, por la parte de la base los tornillos que la sujetarán al elemento intermedio y por la parte de la cabeza a las esferas.

El montaje final se puede observar en la Figura 6.3, siendo las esferas de la parte derecha del dibujo, empujadas por los actuadores y las bolas restantes medidas con la MMC para su posicionamiento durante la deformación.

### **6.3. Fabricación**

En este apartado se hace una escueta referencia a los procesos de fabricación utilizados.

La fabricación del elemento flexible será mediante Electroerosión (EDM) por hilo (Figura 6.4 y Figura 6.5).

Este proceso consiste en el arranque de material mediante una serie de sucesivas descargas eléctricas muy cortas, que saltan entre dos polos. En este caso, los polos serán la pieza y el hilo, por lo que ambos deben ser materiales conductores.

Su uso acostumbra a ser para mecanizado de agujeros pasantes y contornos de formas muy complejas(16).



**Figura 6.4: EDM por hilo con elemento flexible**



**Figura 6.5: EDM piza sujeta durante el proceso**

La fabricación del elemento de sujeción será mediante fresado, torno y sierra.

#### 6.4. Montaje y Ensayo

En este apartado se hará una breve descripción del montaje del elemento y la metodología de ensayo.

Se ha atornillado la lámina flexible al elemento auxiliar de sujeción, que a su vez se ha atornillado a la placa base (Figura 6.7). Se han pegado las bolas con pegamento industrial (Figura 6.6). Se ha colocado el actuador perpendicular al eje de giro de la lámina, y delante la bola 5 ó 6 según corresponda (Figura 6.6)

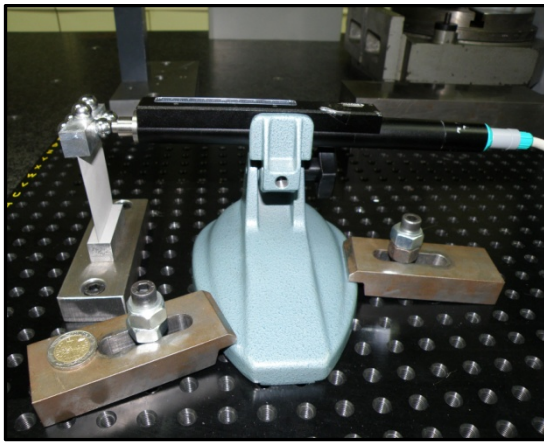


Figura 6.6: Montaje MMC

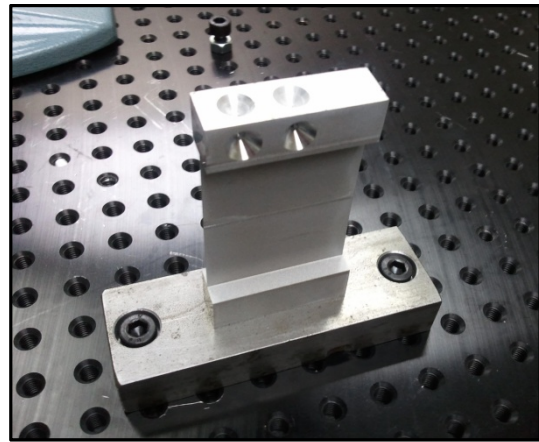


Figura 6.7: Lámina sin esferas

Se ha proseguido haciendo desplazamientos lineales de 2 mm del actuador, y en cada posición se han tomado las coordenadas con la MMC de las bolas 1, 2, 3, 4 (Figura 6.8 y Figura 6.9).

El rango ha sido desde 2 mm hasta 30 mm (en ángulo aproximadamente representa desde 0° hasta 40°).

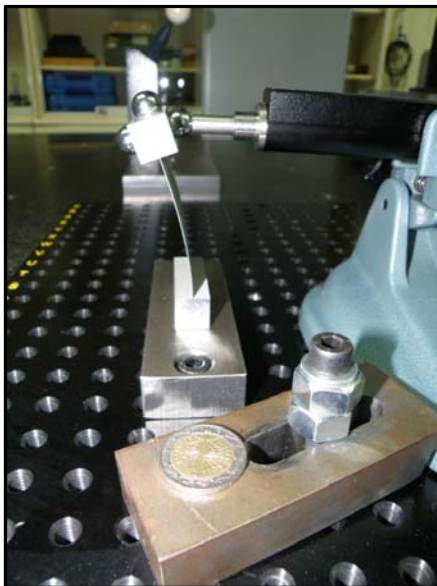


Figura 6.8: Ensayo ángulo pequeño

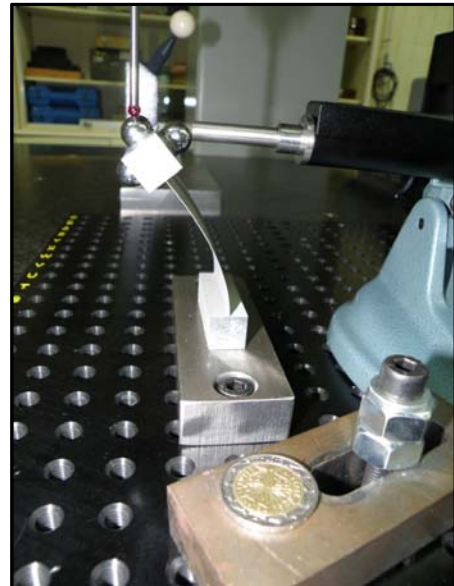


Figura 6.9: Ensayo ángulo grande

Se ha repetido 3 veces el experimento para las posiciones 0, 6, 12, 18, 24, 30 mm del actuador, para corroborar la repetibilidad, y a su vez, mediante la posición 0, la no plastificación de la lámina.

#### 6.4.1. Orientación y numeración

En este apartado se señalará la orientación que tendrán las esferas en el espacio según los ejes X, Y, Z. Y al mismo tiempo se numerarán las esferas para su posterior referencia en el proceso (Figura 6.10, Figura 6.11, Figura 6.12 y Figura 6.13).

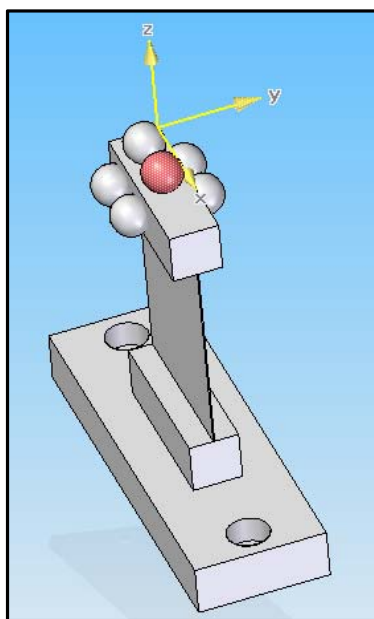


Figura 6.10: Vista del montaje

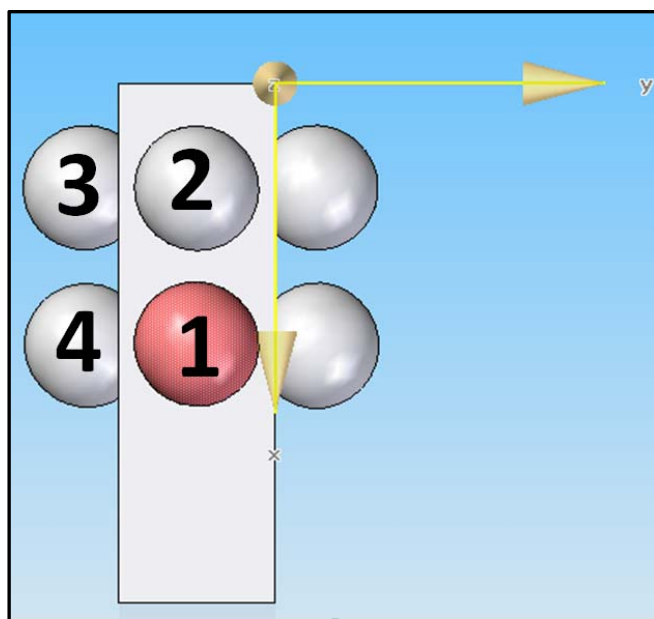


Figura 6.11: Numeración de esferas Y/X

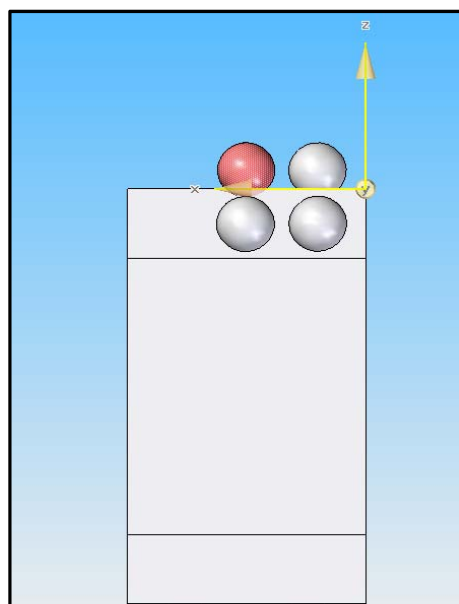


Figura 6.12: Perfil X/Z

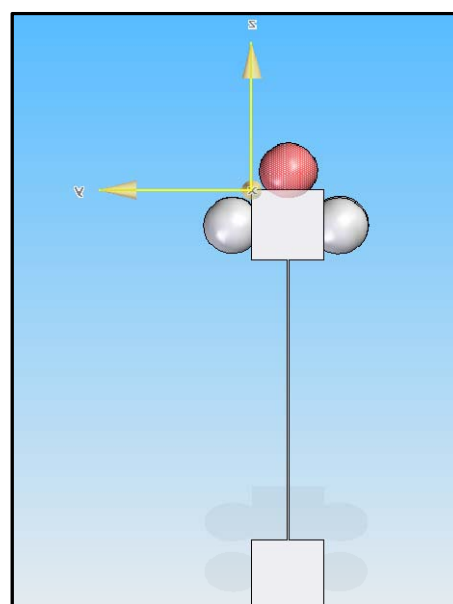


Figura 6.13: Perfil Y/Z

## 6.5. Resultados

En este apartado se hará un estudio detallado sobre los datos aportados por el ensayo durante su prueba en la MMC

### 6.5.1. Objetivo

El objetivo de este ensayo pasa por poder caracterizar, el error de la lámina y la comparativa con la junta universal:

- El ángulo que ha ido adquiriendo nuestra pieza a medida que se ha desplazado con el actuador, comparándolo con la junta universal.
- La diferencia entre un giro “perfecto”, es decir, el que realizaría un articulación universal, y el giro que realiza el elemento flexible.
- Comprobar que durante el ensayo nuestra pieza no ha plastificado. Se debe corroborar que no ha habido un fallo en el cálculo de las propiedades mecánicas de nuestro elemento.
- Caracterizar desde un punto de vista objetivo la transmisión de movimientos parásitos que tiene la lámina.
- Finalmente un pequeño estudio sobre repetitividad y fiabilidad de este ensayo, a la misma vez que se hará referencia a las posibles causas que podrían inducir error en las pruebas.

### 6.5.2. Gráficas

- La primera gráfica a la que se hará referencia, es la del ángulo que ha ido adquiriendo la lámina flexible con el desplazamiento que le daba el actuador (Tabla 6.1), y se comparará con el ángulo que habría obtenido una junta universal de semejante dimensión.

En la siguiente tabla se observan los valores representados en la Figura 6.14

<b>Actuador (mm)</b>	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00
<b><math>\alpha</math> Lámina (°)</b>	0,00	3,99	6,78	9,35	12,15	14,38	16,87	19,34
<b><math>\alpha</math> Universal (°)</b>	0,00	1,74	3,55	6,06	8,67	10,44	12,52	14,57
<b>Actuador (mm)</b>	16,00	18,00	20,00	22,00	24,00	26,00	28,00	30,00
<b><math>\alpha</math> Lámina (°)</b>	21,85	24,41	26,91	29,23	31,28	33,52	36,56	38,90
<b><math>\alpha</math> Universal (°)</b>	16,51	18,50	20,62	22,39	24,33	26,52	28,67	30,49

Tabla 6.1: Ángulo Lámina simulación vs Ángulo junta universal

Como se observa en la gráfica estos dos parámetros poseen una relación lineal.

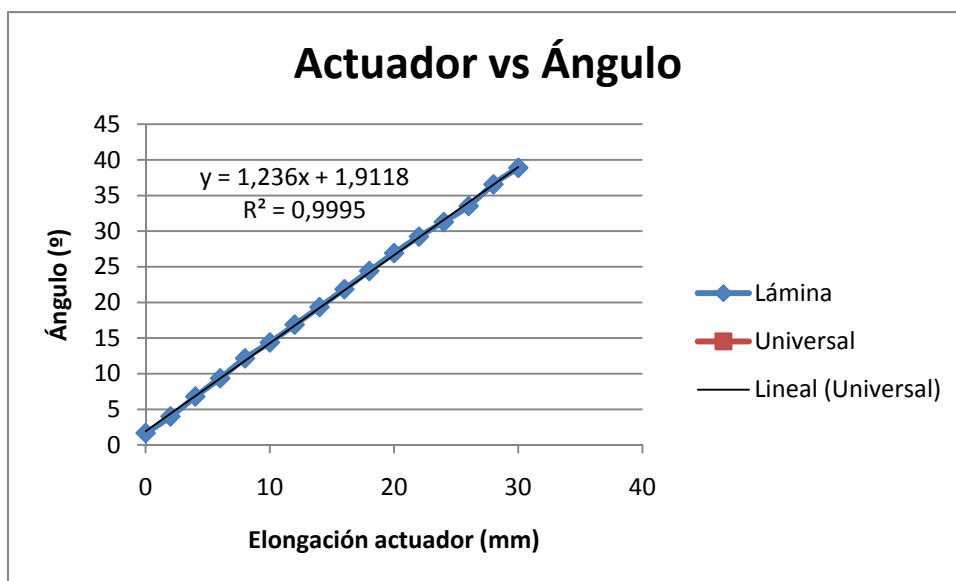


Figura 6.14: Lámina vs Junta Universal

La segunda representación es la trayectoria de giro de nuestro elemento (Tabla 6.2). En este caso se ha comparado con la trayectoria que tendría una articulación de este mismo tamaño con su centro de giro en la base de la lámina (Figura 6.15).

Z (mm)	Y(mm) Lámina	Y' (mm) Circular
10,9102	0,0000	0,0000
10,8725	-2,2289	-2,2314
10,7795	-4,7880	-4,4213
10,3824	-6,9233	-9,0310
10,0321	-9,2375	-11,6620
9,6020	-11,6104	-14,2303
9,0427	-13,9556	-16,9834
8,4439	-16,2698	-19,4872
7,7155	-18,5893	-22,1327
6,8876	-20,8840	-24,7732
5,9816	-23,2027	-27,3438
4,9155	-25,5162	-30,0535
3,8792	-27,8194	-32,4381
2,6377	-30,1834	-35,0417
1,3614	-32,4163	-37,4878
0,1694	-34,5505	-39,5989

Tabla 6.2: Medidas Radio

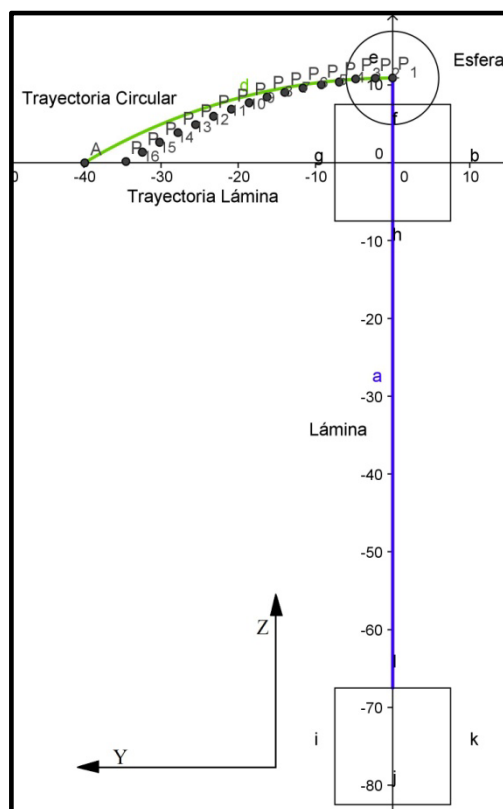


Figura 6.15: Radios perfil Y/Z

En la Figura 6.15, la línea verde marca la trayectoria del la unión universal y la sucesión de puntos la trayectoria del elemento flexible.

Estas progresiones son las que de cara a un futuro estudio sobre las diferencias entre el giro de una junta universal y una junta flexible serán sensibles de ser estudiadas.

- Durante el ensayo se ha doblado la lámina repetidas veces hasta cerca del límite de su rango. Una manera de comprobar que no haya plastificado es ver si una vez en su posición inicial después de cada recorrido se ha movido de sus coordenadas. Y si se ha movido analizar la trayectoria o dirección en que lo ha hecho.

Las gráficas representan los planos Y vs Z e Y vs X de la esfera 1 (Figura 6.16 y Figura 6.17).

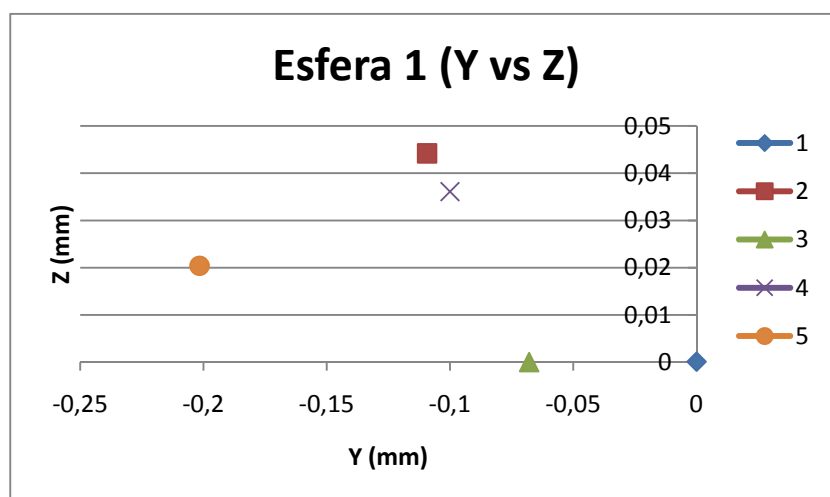


Figura 6.16: Plastificación en eje X

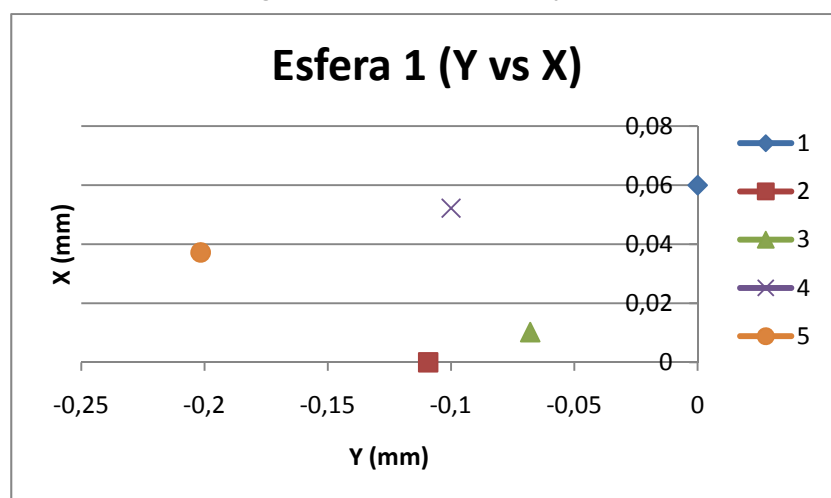


Figura 6.17: Plastificación en eje Z

En estos casos se observa que el centro de la esfera no vuelve a las mismas coordenadas iniciales. También se observa que no sigue una trayectoria, hay algunos puntos tomados posteriores a otros que quedan tanto delante como detrás en las dos direcciones de esos mismos.

El hecho, puede ser el centro de la misma esfera en diferentes repeticiones difiera en su posición debido al error de medida. Ha resultado complicado realizar estas mediciones, al tratarse de un elemento flexible.

- El siguiente paso es analizar los movimientos parásitos a los que está sometida la lámina. Para realizar este análisis se han tomado como referencia los dos planos que nos representan los dos ejes de giro que no deberían estar afectados por las fuerzas parásitas (eje Z e Y) y que en el caso de estarlo nos desvirtúan la medida.

Se ha tomado como referencia, la orientación de la trayectoria (de la esfera 1) cuando el actuador está apoyado en el centro. Ésta, en teoría, debería ser una recta sin ángulo en la orientación.

Se ha comparado con la orientación de la trayectoria (de los mismos planos/ejes) del ensayo donde el actuador está ejerciendo su fuerza de empuje en el extremo de la lámina. Este ensayo representa la aplicación de un movimiento no deseado en el elemento.

La comparación relativa de estos dos ensayos nos dará el ángulo máximo de transmisión de movimientos no deseados o parásitos que puede llegar a transmitir esta lámina.

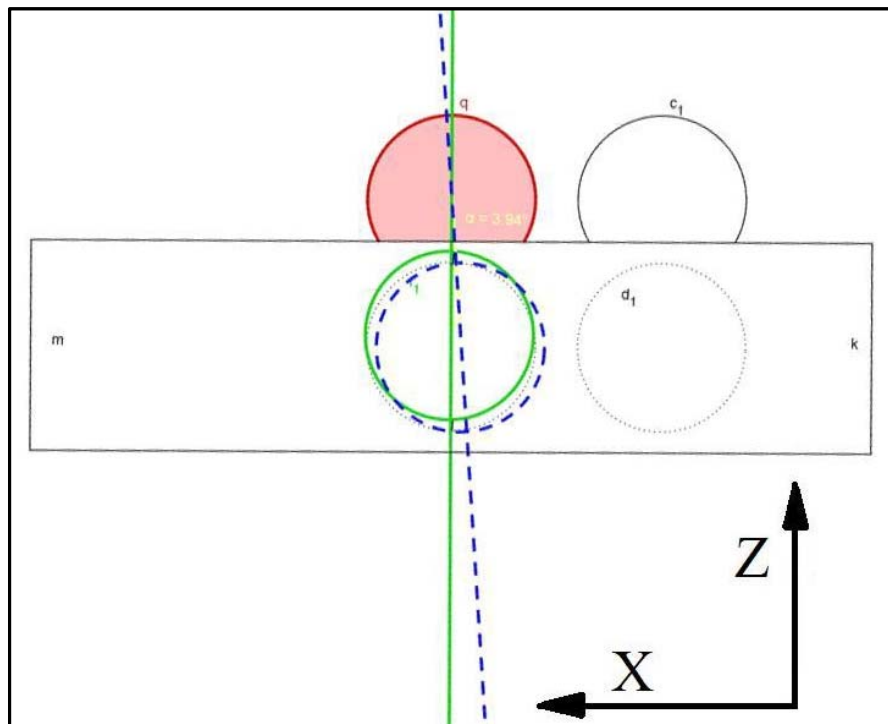


Figura 6.18: Error en ángulo eje Y



En la Figura 6.18, se ve la esfera 1 marcada en color rojo. Hay dos trayectorias. La verde, correspondería a la trayectoria de la lámina con el actuador empujando en el centro. La esfera de color verde representa la última posición de la esfera 1 en esa trayectoria. La trayectoria azul corresponde a la ruta de la esfera 1 cuando el actuador está empujando en el extremo. La esfera de color azul representa la última posición de esta esfera.

El ángulo entre estas dos trayectorias es el ángulo del movimiento parásito en el eje Y. Y corresponde a  $3,94^\circ$ .

En la Figura 6.19, se ve la esfera 1 marcada de color rojo. Igual que en el caso anterior hay dos recorridos. El verde, correspondería a la trayectoria de la lámina con el actuador empujando en el centro con una esfera de color verde que representaría la última posición de la esfera 1 en esa trayectoria. La trayectoria azul corresponde a la ruta de la esfera 1 cuando el actuador está empujando en el extremo. La esfera de color azul representa la última posición de esta esfera.

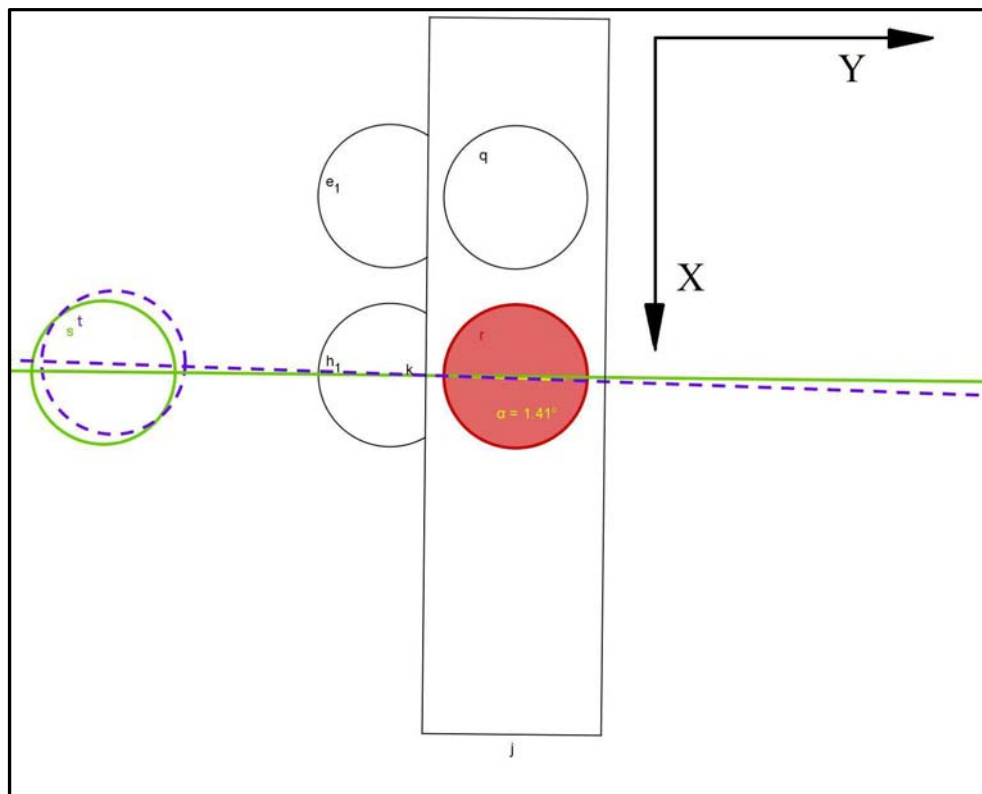


Figura 6.19: Error en ángulo eje Z

El ángulo entre estas dos trayectorias es el ángulo del movimiento parásito en el eje Z que corresponde a  $1,41^\circ$ .



Como se observa, las trayectorias verdes están inclinadas respecto a sus ejes. Esto es debido a que las trayectorias con el actuador centrado no son trayectorias perfectamente rectas. También llevan un cierto ángulo de desvío. Este ángulo, en este caso, correspondería al ángulo de error propio de la lámina que viene provocado por errores (errores en la medición y errores de fabricación). Estos errores propios (Tabla 6.3) son en el caso del eje “Y” igual a 1,61° y en el caso del eje “Z” igual a 0,89°.

Bola 1	Inicial (°)	Final (°)	Parásito (°)
Eje Z	0,89	2,24	1,41
Eje Y	1,61	5,55	3,94

Tabla 6.3: Ángulo Parásito

El siguiente paso es analizar en qué puntos estos ángulos parásitos nos presentarán problemas. En este caso, se analizará en qué puntos estos ángulos representan un desplazamiento alrededor de 50  $\mu\text{m}$ . Se coge el caso más desfavorable para este análisis.

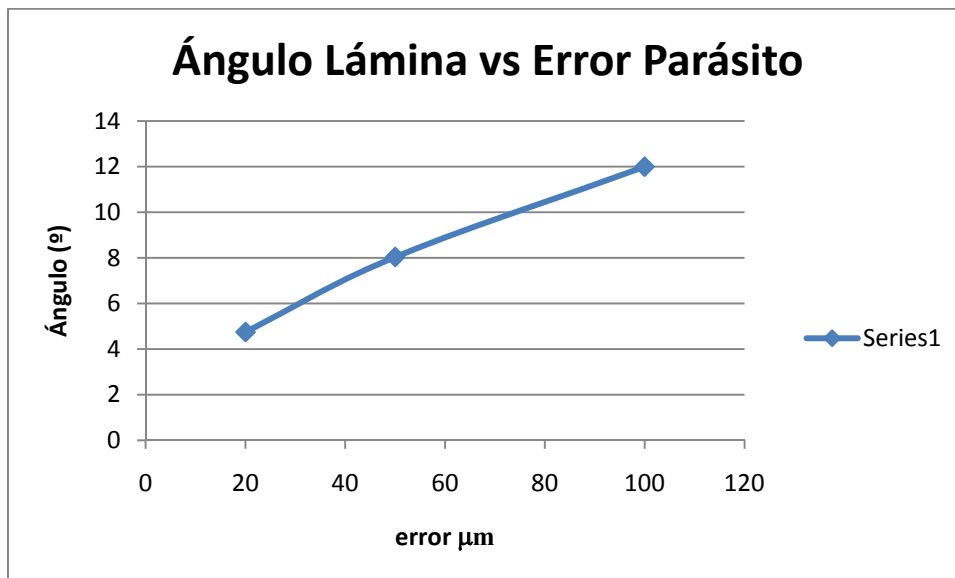


Figura 6.20: Error en desplazamiento vs ángulo de la lámina

En la Figura 6.20, se ve, el error que provoca nuestro elemento flexible a medida que se dobla en el peor de los casos. Concluiremos que para ángulos efectivos, de la lámina, inferiores a 10°, el valor del error producido es satisfactorio.

- Para el estudio estadístico se ha estudiado la desviación típica. Se han hecho tres repeticiones para los mismos valores de todo el rango, para una actuación en posición central y para otra actuación en posición extrema. Para cada repetición, se han tomado 6 puntos para cada coordenada.

El tratamiento será el siguiente:

Para la posición central se ha hecho la media de la desviación estándar y del recorrido para las 3 repeticiones. Con estos valores se ha hecho la media de la

desviación estándar y el recorrido, de las 6 mediciones de la posición, para cada esfera obteniendo un total de 8 tablas. Una de ellas se muestra en la Tabla 6.4.

Central	X	Desv.	Recorr.	Y	Desvi.	Recorr.	Z	Desv.	Recorr.
Bola 1	214,71	0,167	0,294	-227,59	0,055	0,109	55,37	0,025	0,044
	214,77	0,021	0,038	-234,37	0,014	0,023	54,76	0,018	0,036
	214,93	0,021	0,039	-241,32	0,015	0,026	53,41	0,015	0,029
	215,06	0,034	0,060	-248,29	0,015	0,027	51,29	0,030	0,057
	215,10	0,033	0,062	-255,31	0,026	0,048	48,22	0,013	0,023
	215,13	0,010	0,018	-262,03	0,008	0,017	44,37	0,021	0,039
	<b>Media</b>	0,048	0,085	<b>Media</b>	0,022	0,042	<b>Media</b>	0,020	0,038

Tabla 6.4: Ejemplo Media de las 3 repeticiones para Central Esfera 1

A posteriori se han juntado los valores de todas las esferas. Se ha hecho la media para las desviaciones estándar y recorridos para cada esfera, y para cada eje (Tabla 6.5) de la posición central y extrema.

		x	y	z	Media	x	y	z	Media
		desv.	desv.	desv.		recc.	recc.	recc.	
Bola1	Central	0,048	0,022	0,020	<b>0,030</b>	0,085	0,042	0,038	<b>0,055</b>
Bola2	Central	0,028	0,210	0,076	<b>0,104</b>	0,052	0,379	0,150	<b>0,194</b>
Bola3	Central	0,058	0,056	0,063	<b>0,059</b>	0,108	0,104	0,116	<b>0,109</b>
Bola4	Central	0,039	0,046	0,050	<b>0,045</b>	0,074	0,087	0,096	<b>0,086</b>
<b>Media</b>		<b>0,043</b>	<b>0,084</b>	<b>0,052</b>		<b>0,080</b>	<b>0,153</b>	<b>0,100</b>	
Bola1	Extremo	0,040	0,080	0,028	<b>0,049</b>	0,073	0,156	0,055	<b>0,095</b>
Bola2	Extremo	0,016	0,195	0,030	<b>0,081</b>	0,031	0,359	0,059	<b>0,150</b>
Bola3	Extremo	0,065	0,206	0,227	<b>0,166</b>	0,125	0,373	0,415	<b>0,305</b>
Bola4	Extremo	0,064	0,087	0,037	<b>0,063</b>	0,121	0,167	0,071	<b>0,119</b>
<b>Media</b>		<b>0,046</b>	<b>0,142</b>	<b>0,080</b>		<b>0,087</b>	<b>0,264</b>	<b>0,150</b>	

Tabla 6.5: Resumen de desviaciones y recorridos para cada esfera en situación de actuador “central” o “extremo”

Finalmente para saber la desviación estándar de cada esfera y su recorrido en las medidas, se ha hecho la media de las desviaciones y recorridos por cada bola. Esto ha sido cogiendo el valor de la posición “central” y de la posición “extremo” para cada esfera (Tabla 6.6).

Se observa que para las esferas 1 y 4 dan, aproximadamente, la mitad de error que las esferas 2 y 3. Esto es debido a la situación de las esferas 1 y 4 era en la parte central de la lámina, mientras que las esferas 2 y 3 estaban situadas en el extremo.

	Desviación	Recorrido
<b>Esfera 1 Central</b>	0,030	0,055
<b>Esfera 1 Extremo</b>	0,049	0,095
<b>Esfera 2 Central</b>	0,104	0,194
<b>Esfera 2 Extremo</b>	0,081	0,150
<b>Esfera 3 Extremo</b>	0,059	0,109
<b>Esfera 3 Central</b>	0,166	0,305
<b>Esfera 4 Central</b>	0,045	0,086
<b>Esfera 4 Extremo</b>	0,063	0,119

Tabla 6.6: Desviación y Recorrido para cada esfera

Estos errores están dentro del rango de aceptabilidad para este tipo de medidas. En una fase posterior se obtendrían los modelos de corrección que contemplarían estos errores y corregiría las futuras medidas.

### 6.6. Coste de los materiales y de la fabricación del elemento flexible

La fabricación y concepción de este elemento va asociado a una serie de gastos que de manera esquemática se detalla a continuación:

Proceso de fabricación (Tabla 6.7):

Proceso de fabricación	Tiempo (horas)
Torno/Sierra	1
Fresadora	3
EDM por hilo	15
<b>TOTAL</b>	<b>19</b>

Tabla 6.7: Tiempos de fabricación

El precio medio del taller por hora de fabricación es aproximadamente de 36 euros/hora más I.V.A.

$$19 \times 36 \times 1,16 = 793,44 \text{ euros}$$

Material:

Barra de aluminio de diámetro de 70mm y una longitud de 600mm proporcionada por Alumafel, tiene un precio de 74,39 euros (*Ápendice 2*).

El coste total es igual a 867,83 euros.

Al ser un prototipo de investigación hay partes del proceso que no se contemplan. Sería el caso del precio de utilización de la MMC.

### **6.7. Conclusiones**

Se ha hecho un estudio sobre la relación que existe entre nuestro modelo flexible y el comportamiento de una junta universal. Se ha caracterizado tanto el ángulo de giro como el radio de giro para los dos casos. Estas relaciones serían, en un futuro, las necesarias para la corregir el modelo matemático que relacionaría los dos tipos de uniones.

Se ha comprobado que el elemento no plastifica durante su ensayo.

Se han encontrado los errores de giro para el elemento. Se ve que nuestro elemento se comporta bien para valores parecidos a los de la bibliografía ( $10^{\circ}$ - $15^{\circ}$ ), para valores de ángulo superiores tendrían resultados poco satisfactorios.

Finalmente se ha hecho un estudio estadístico sobre las medidas, llegando a la conclusión que los errores están dentro del rango de aceptabilidad para este tipo de medidas. En un futuro se aplicarían los modelos de corrección pertinentes para corregir estos errores.



## **7. Conclusiones**

Todo el trabajo desarrollado ha cumplido con los objetivos y proposiciones marcadas inicialmente, las cuales detallaremos a continuación:

- Se han localizado y analizado los diferentes tipos de uniones flexibles., analizando la viabilidad de su implementación en nuestro proyecto así como la influencia de la modificación de sus parámetros. Este trabajo ha llevado como resultado final la elección de la unión tipo lámina como mejor opción. A la vez, se ha hecho la selección del material óptimo.
- Se ha corroborado mediante simulación que las tendencias sobre el efecto de la modificación de los parámetros casan con las predichas teóricamente. A la vez se ha hecho un estudio sobre la optimización de estos parámetros obteniendo como resultado, la geometría óptima para este proyecto.
- Mediante una nomenclatura predefinida para este trabajo, se ha hecho un detallado estudio sobre la posición espacial de la junta en el entorno predeterminado. La selección de la mejor orientación de todos sus elementos, para la correcta estabilidad del conjunto y el libre movimiento de todas sus partes. Se ha concluido de manera satisfactoria con la selección de la composición “Recto”, su disposición “Recto” con la orientación “Normal”. A la vez se ha resaltado el estudio sobre la minimización de los puntos débiles de la junta flexible (movimientos parásitos).
- Se ha realizado la selección de la junta flexible, con la nomenclatura del trabajo siendo, 60x50x0,4 mm ,el elemento elegido de todo el proceso.
- Se ha corroborado mediante simulación con ANSYS el correcto funcionamiento del modelo en base a su no plastificación y su cumplimiento para todo su ciclo vital.
- En una última fase se ha caracterizado el comportamiento de la lámina flexible (ayudados por la MMC y software GeoGebra) dando como resultados la confirmación de su correcto funcionamiento en los rangos que la bibliografía daba como satisfactorios. Se han compensado el comportamiento del elemento flexible y de la junta universal para el desarrollo de un modelo de corrección.




**Apéndice 1: Tabla de propiedades de los materiales**

Material	Condition	Tensile strength (MPa)	Yield stress (MPa)	Endurance limit (MPa)
Steel alloys (endurance limit based on 10 million cycles)				
1015	Cold drawn - 0%	455	275	240
1015	Cold drawn - 60%	710	605	350
1040	Cold drawn - 0%	670	405	345
1040	Cold drawn - 50%	965	855	410
4340	Annealed	745	475	340
4340	Quenched and tempered (204 C)	1950	1640	480
4340	Quenched and tempered (427 C)	1530	1380	470
4340	Quenched and tempered (538 C)	1260	1170	670
HY140	Quenched and tempered (538 C)	1030	980	480
D6AC	Quenched and tempered (260 C)	2000	1720	690
9Ni-4Co-0.25C	Quenched and tempered (315 C)	1930	1760	620
300M		2000	1670	800
Aluminum alloys (endurance limit based on 500 million cycles)				
1100-0		90	34	34
2014-T6		483	414	124
2024-T3		483	345	138
6061-T6		310	276	97
7075-T6		512	503	159
Titanium alloys (endurance limit based on 10 million cycles)				
Ti-6Al-4V		1035	885	515
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo		895	825	485
Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr		1185	1130	675
Copper alloys (endurance limit based on 100 million cycles)				
70Cu-30Zn brass	Hard	524	435	145
90Cu-10Zn		420	370	160



# Apéndice 2: Certificado Aluminio 7075-T6



**CERTIFICADO DE CALIDAD**

Nr.: 4221615 1 / 1

HYDRO

**CLIENTES VARIOS ZARAGOZA edif**  
Customer: 509598  
Client: 50014 ZARAGOZA ZARAGOZA

**REDONDO EXT. ZINCAL 75 T6 70 MM.**  
Product: 1 PIEZAS A 600MM.  
Produt:

**IP 606231(304836)**  
Factura o Albaran Nr.: N7079288

Ria. del Cliente / Nr. de Pedido: - Nr. de Comanda Client: 09-dic-2009

Nr. de Pedido Interior: - Nr. Order Int.: - Nr. de Comanda Interior: 120075246

**Alacion:** A. A. (U.S.A.) **D. C. A.** ZINCAL 75 **Estado:** T6  
Alloy: EN AW-7075 Temper: Etat:

**Expedido:** 4192734 **ALUMAFEL S.A. ZARAGOZA**  
Dispatched: Expedic:

Características mecánicas / Mechanical properties / Caracteristiques mécaniques														
Pos.	Material: Material: Materiaux:	Sentido del ensayo Direction of testing Sens de mesure	Resistencia a la tracción Tensile strength Resistance a la traction N/mm2 (Kg/mm2)	Limite elastico 0.2% 0.2% Proof stress Limite d'élasticité N/mm2 (Kg/mm2)	Alargamiento Elongation Allongement 50 mm. %	Dureza Hardness Dureté HB								
1	BARRA REDN 70 MM		642.8	578.4	9.7									
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
Valores segun Norma EN 755-2			MIN	560	7									
			MAX	500										

Composicion química / Chemical composition / Composition chimique														
Nr. de colada / Batch Nr. / Nr. de coulée:	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Bi	Pb	Ga	Otros	Al	
89714	0.114	0.291	1.593	0.114	2.514	0.206	5.940	0.023						
2														
3														
4														
5														
Valores segun Norma EN 573-3			MIN	0.400	0.500	1.200	0.180	5.100	0.200					
			MAX	0.400	0.500	2.000	0.280	6.100						

**Certificado en recepción de acuerdo a norma EN10204/3.1**

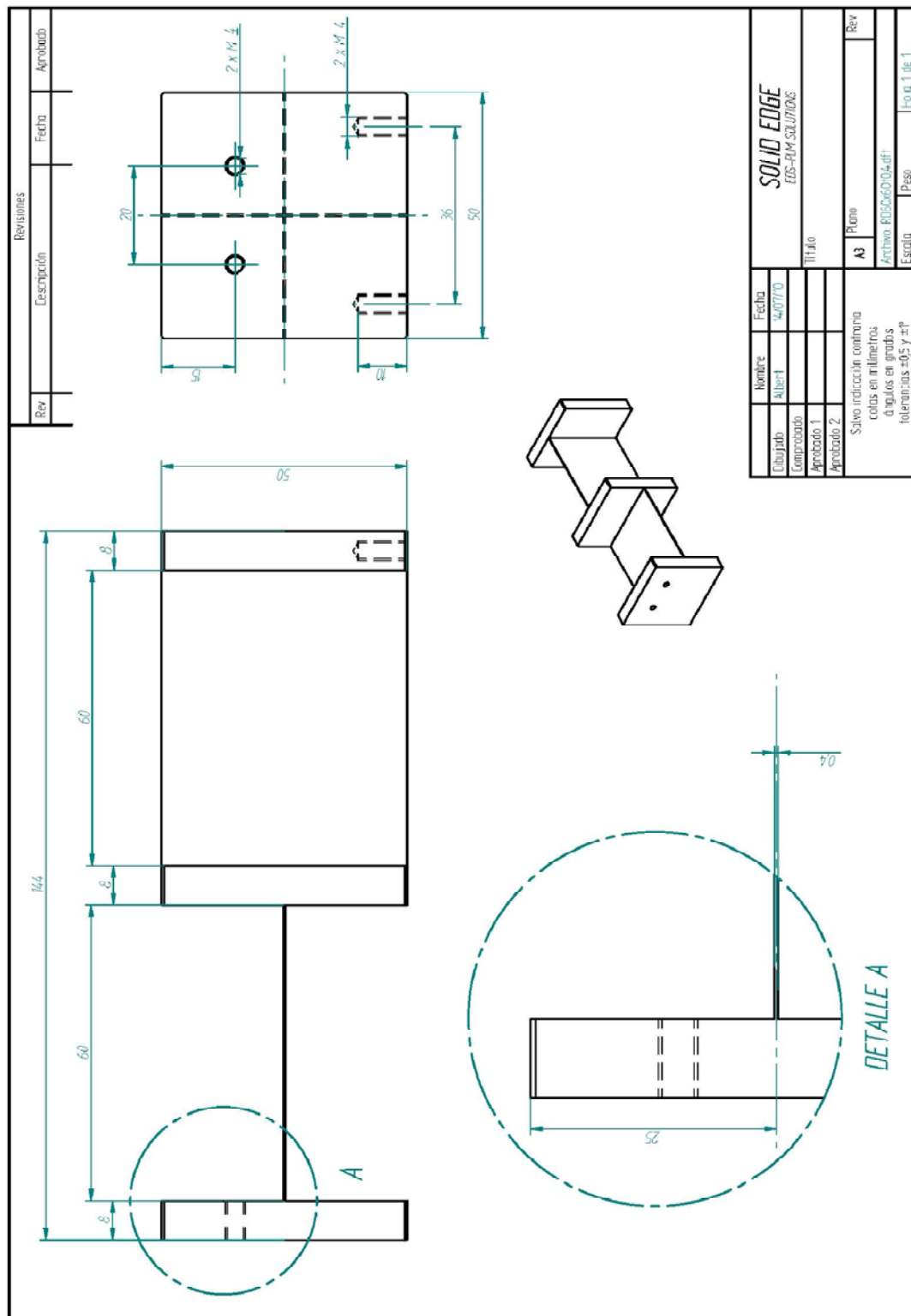
**VITORIA, 14 de Diciembre de 2009**

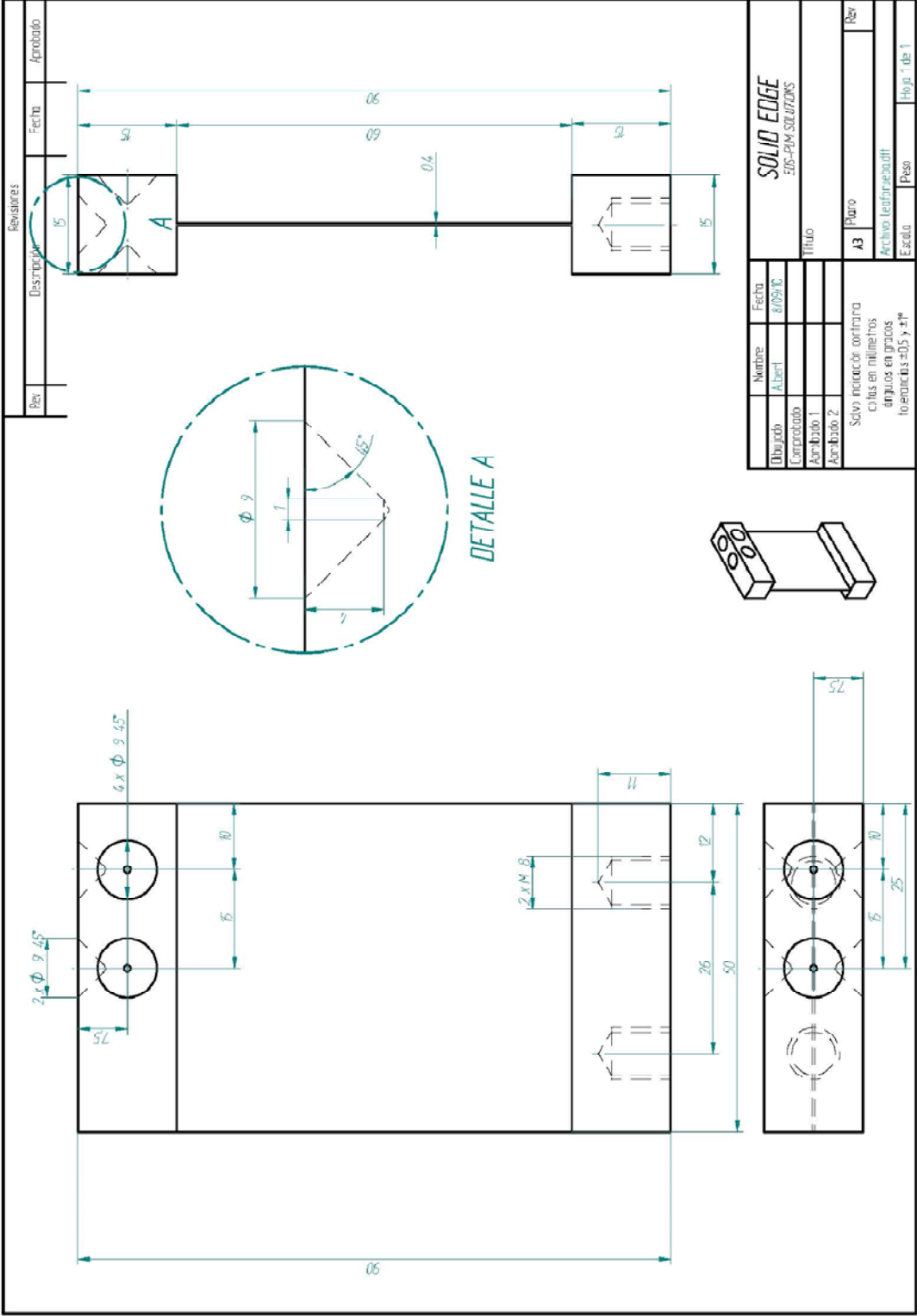
**Departamento de Control**  
Control Department  
Departement de controle

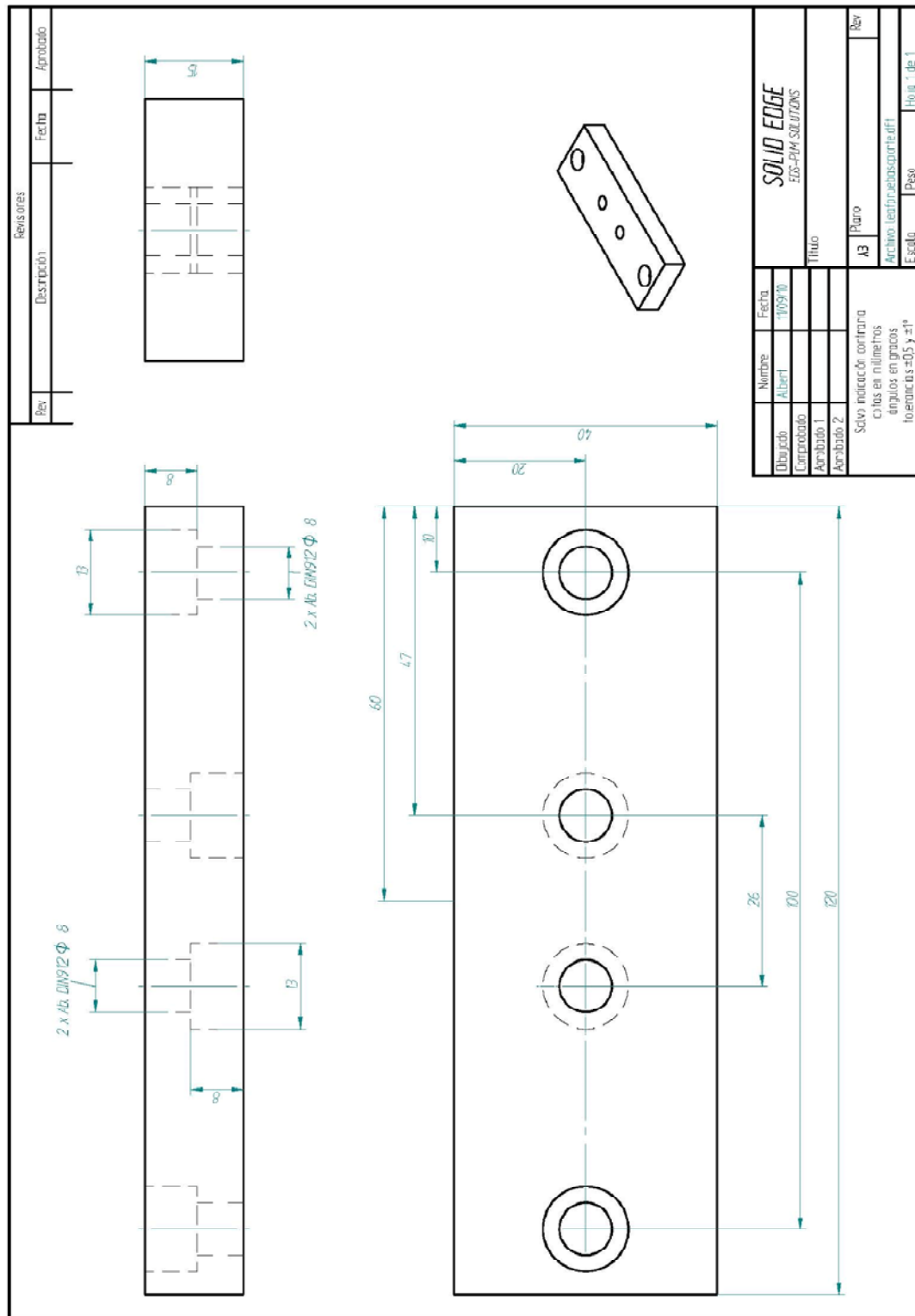
Joined Ferrón, 28  
Polig. Industrial Cogulada Tel.: 976 47 1270  
50014 ZARAGOZA Fax: 976 47 16 21

ALUMAFEL

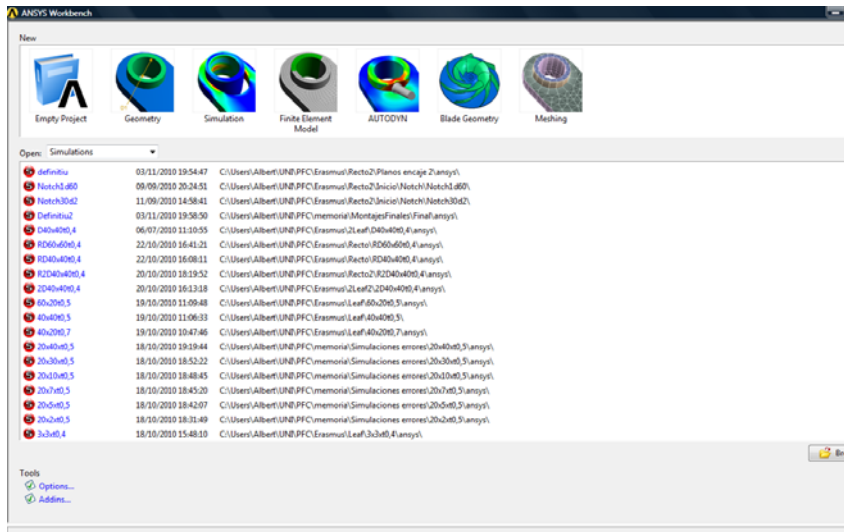
### Apéndice 3: Plano del elemento flexible



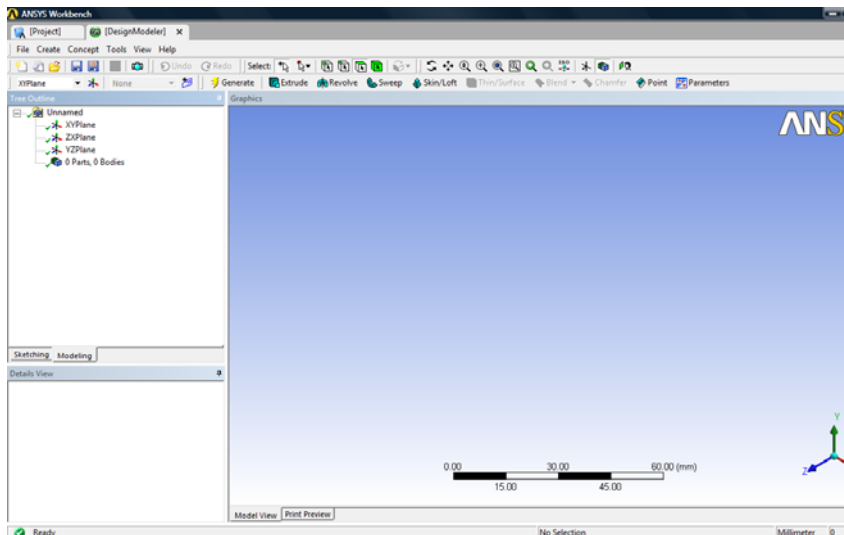




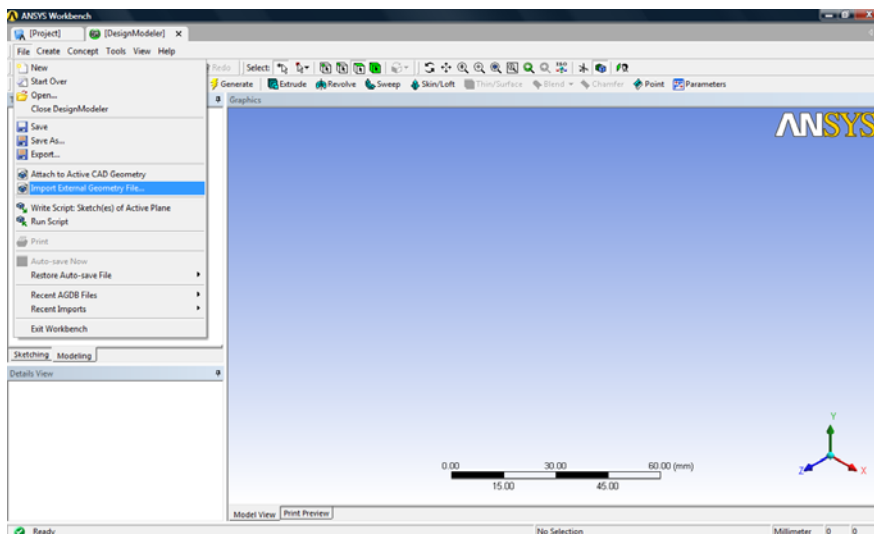
## Apéndice 4: Simulación mediante ANSYS.



Primera pantalla de inicio. Clicamos en Geometry.

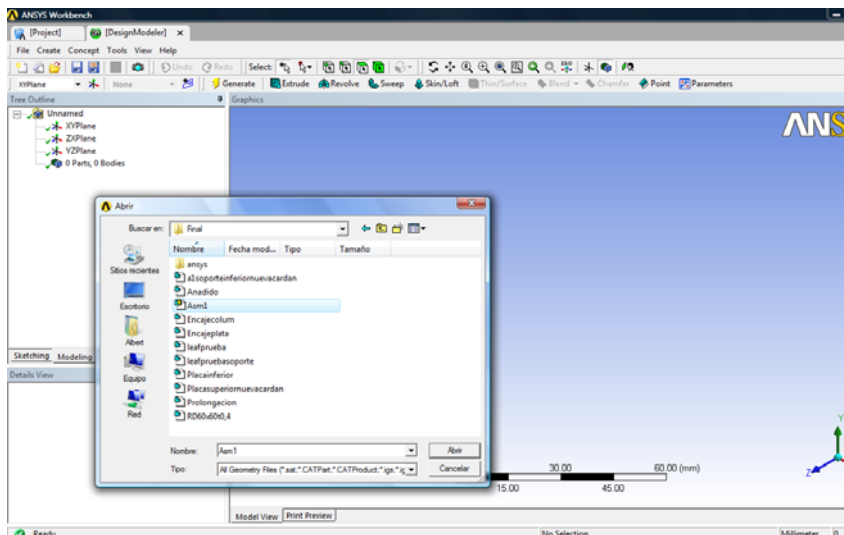


Se abre una nueva ventana, donde vemos en la parte superior izquierdo, dos pestañas. Project y DesignModeler.

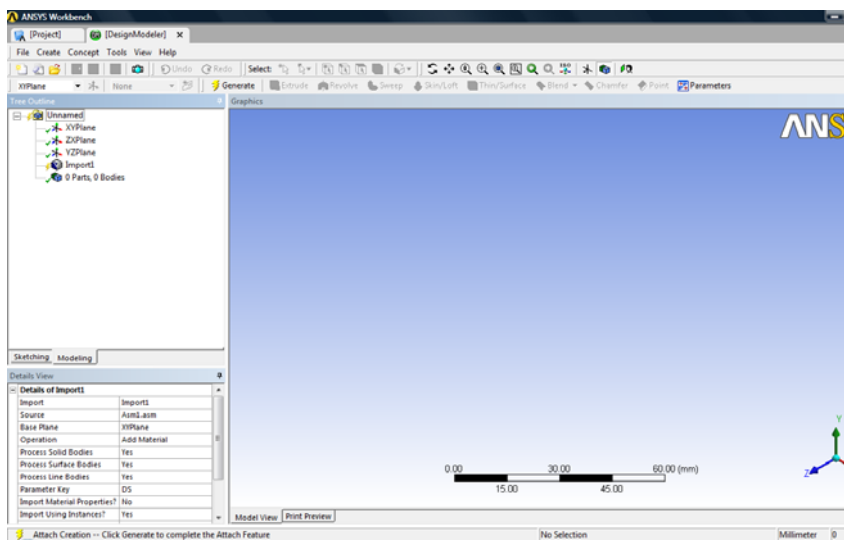


Clicamos en File, y dentro en Import External Geometry File.

Des de aquí vamos a cargar la geometría que previamente hemos diseñado en SolidEdge.

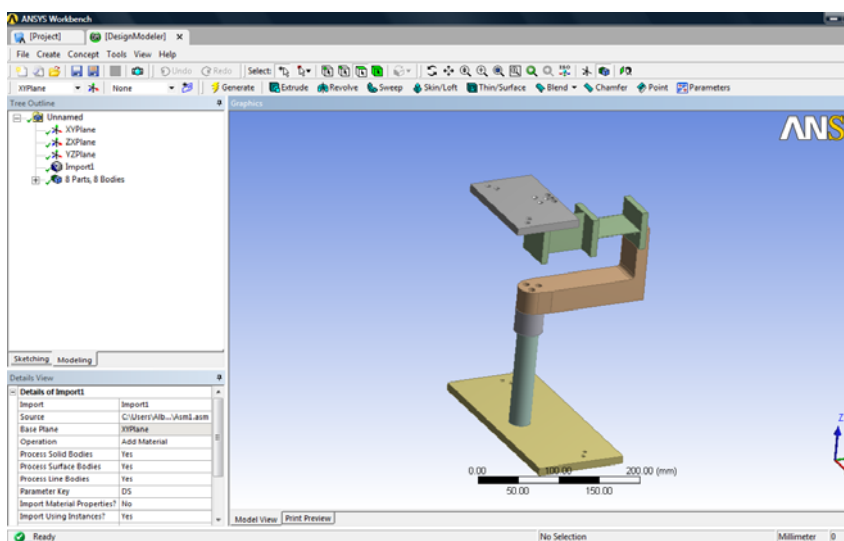


Se elige la geometría deseada. En este caso será un conjunto titulado Asm1.

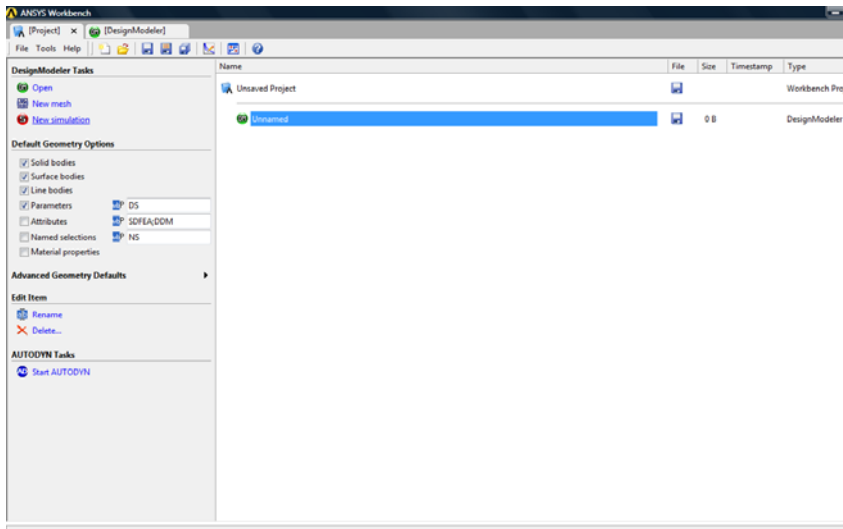


En el dialogo de la izquierda ha aparecido un nuevo elemento Import1.

Clicamos en Generate. Para generar el objeto en ANSYS.

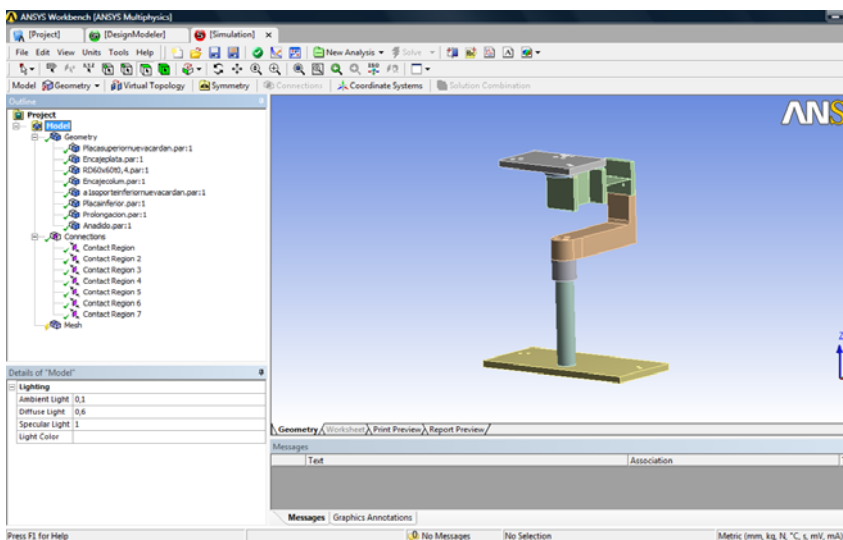


En este ejemplo se ha cargado el diseño final de la plataforma.



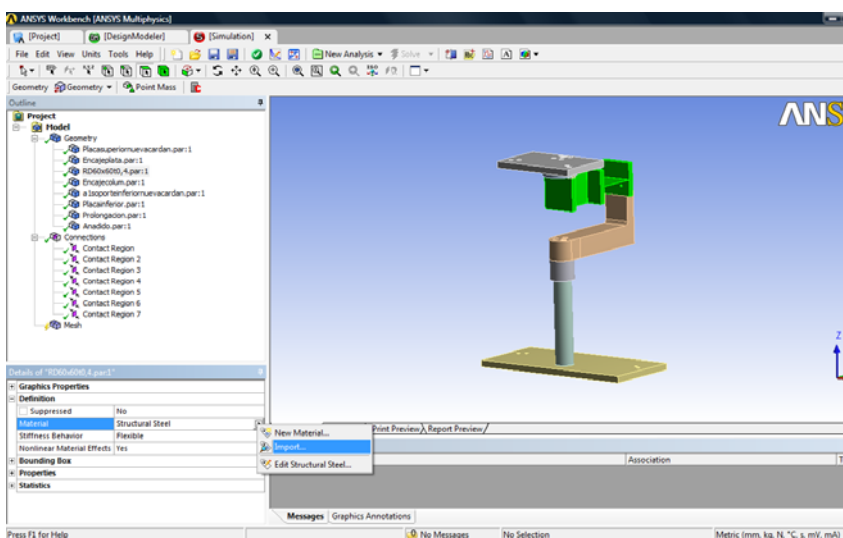
Abrimos la primera pestaña que se nombro en los puntos anteriores, Project.

Clicamos en New simulation.



Se abre una nueva pestaña, Simulation. Observamos que en el dialogo de la izquierda tenemos 3 grupos. Geometry, referido a los elementos que conforman el conjunto que hemos cargado.

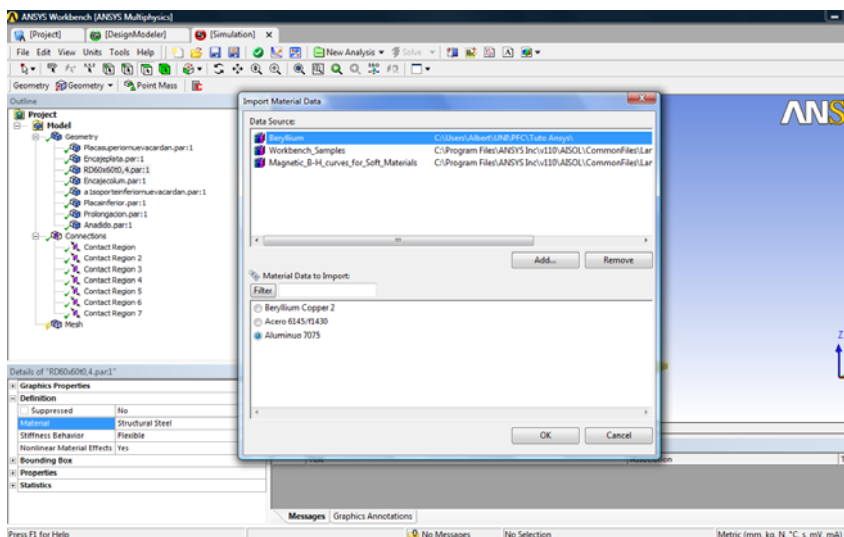
Connections, las partes de cada elemento que están conectadas con los otros elementos y Mesh.



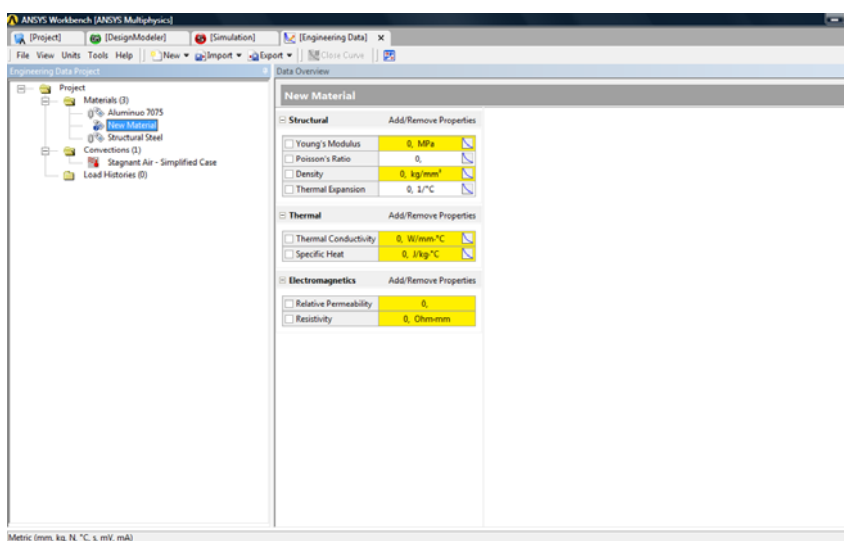
Dentro de Geometry nos ponemos encima de RD60x60t0,4.

Dentro del dialogo inferior clicamos en Material dentro de Material la pestañita y clicamos Import.

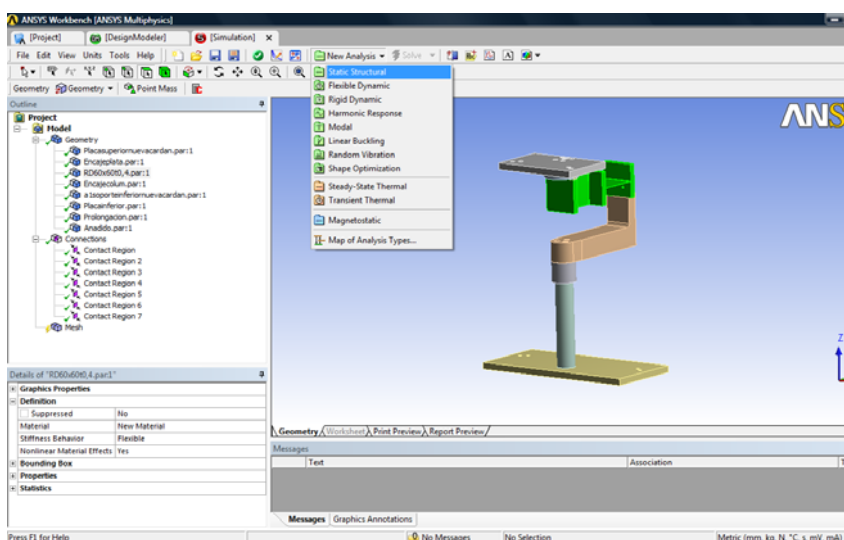




Se nos abre una ventana donde vemos diferentes librerías. Aquí dentro podemos elegir entre los diferentes materiales para la pieza seleccionada. Estas librerías vienen predeterminadas en ANSYS.

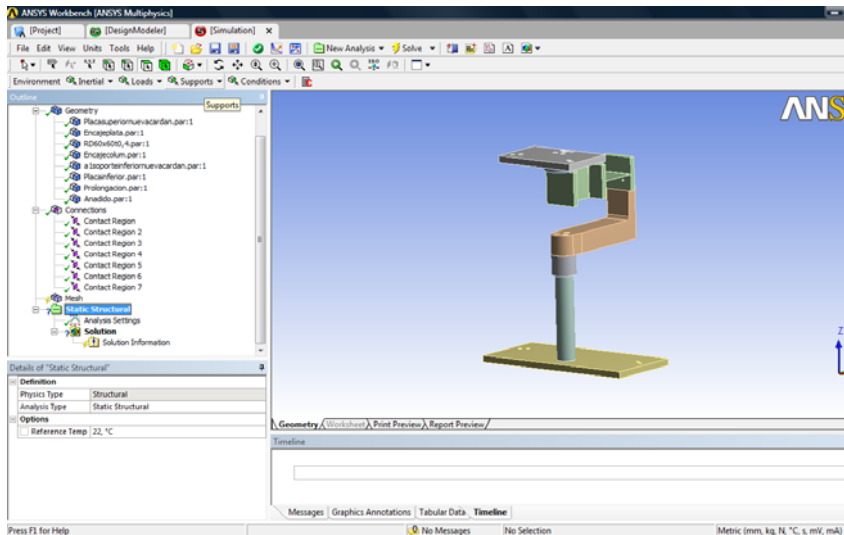


Si en vez de Import clicamos en New material, Ansys nos deja añadir un nuevo material sabiendo previamente sus propiedades.

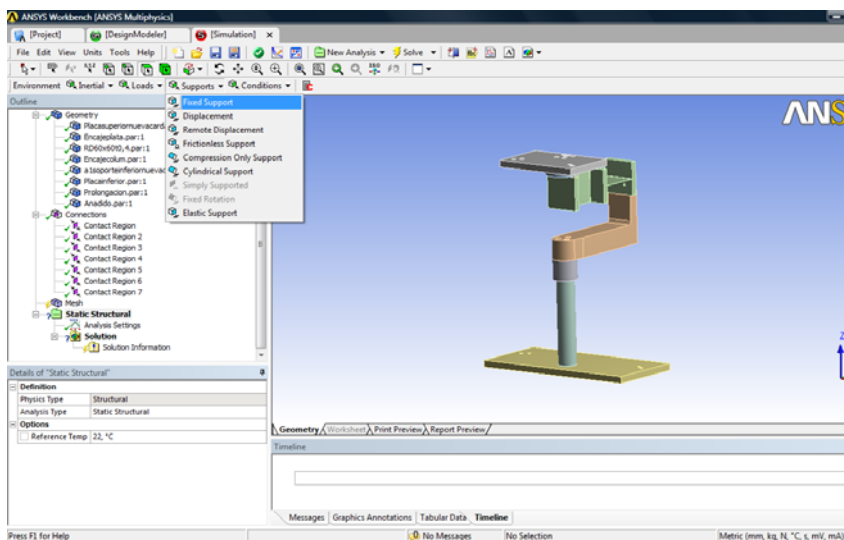


Volvemos otra vez a la pestaña Simulation. Después de definir como están conectados los elementos y sus materiales. Iniciaremos el módulo de la simulación. Clicamos en Static Structural.



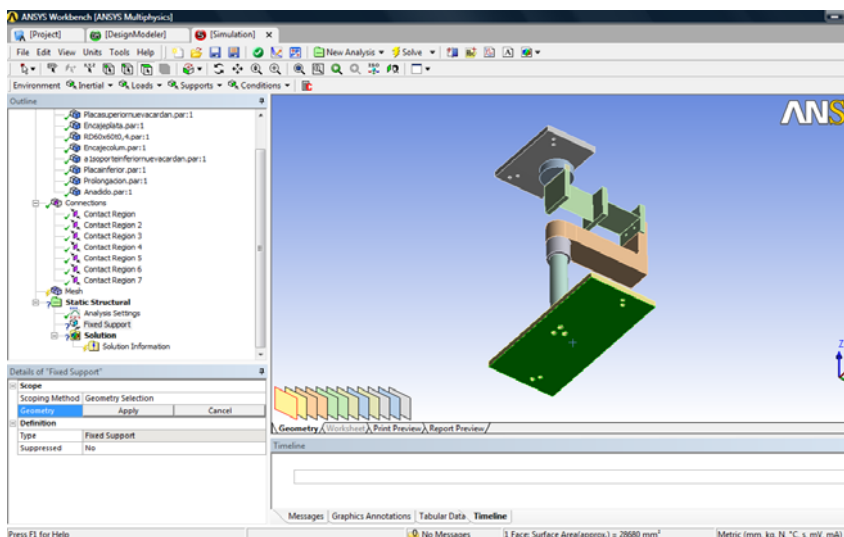


Se nos añade un nuevo elemento al dialogo superior.



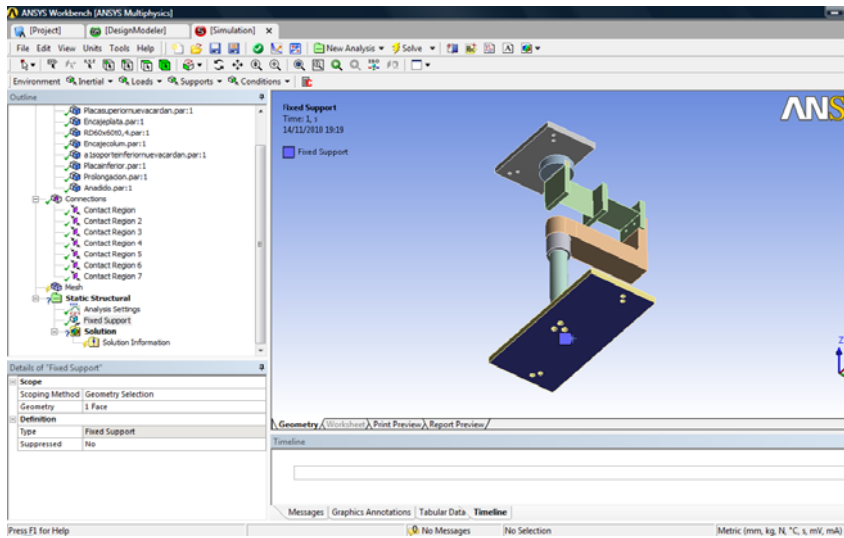
Si clicamos encima de Static Structural vemos que la barra superior cambia, apareciendo nuevas opciones.

Clicamos encima de Fixed support

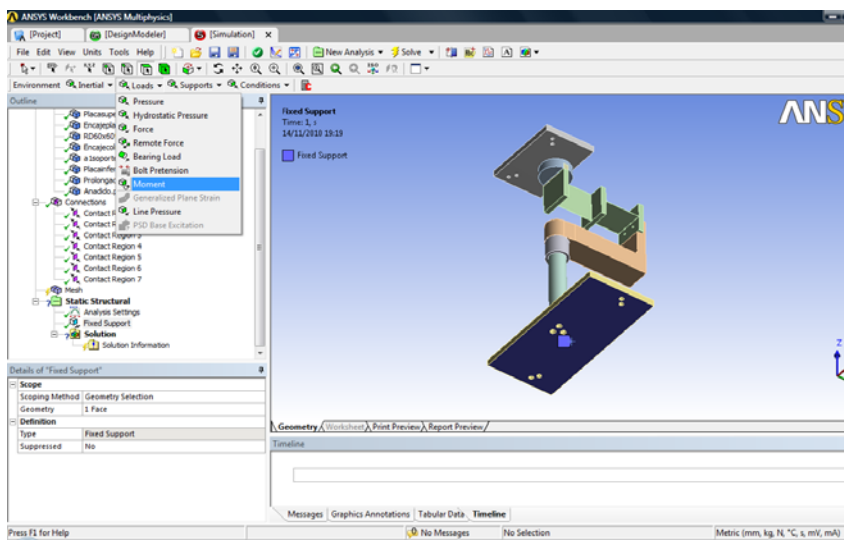


El cuadro de dialogo inferior nos cambia. Nos pide la superficie a fijar.

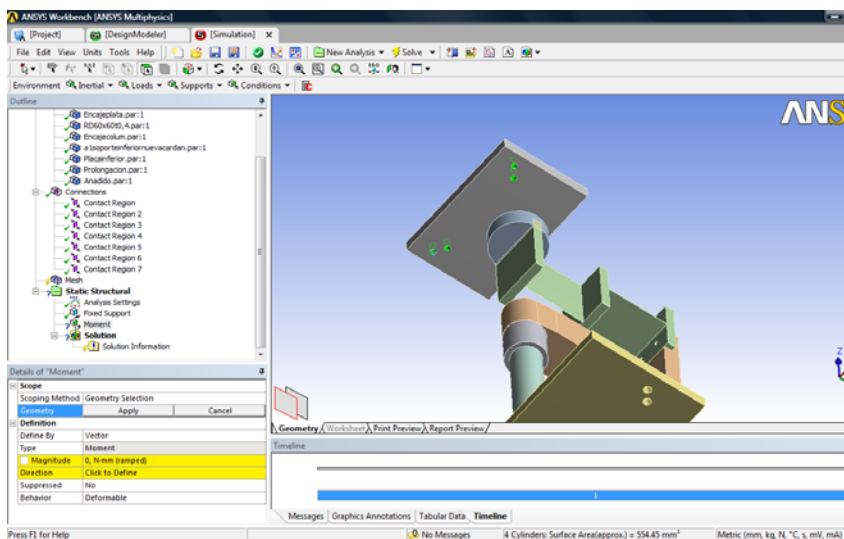
Seleccionamos la base de la plataforma (cambia a color verde).



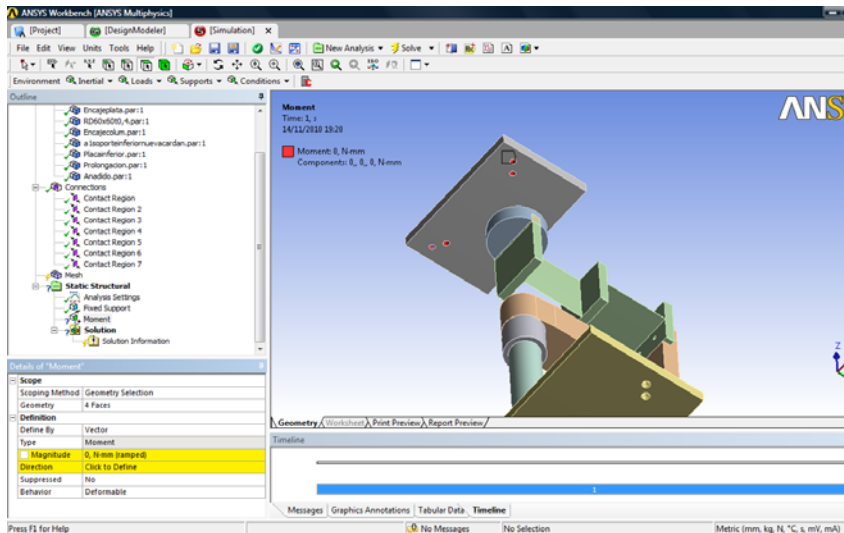
Clicamos en Apply, la superficie cambia de color verde a azul.



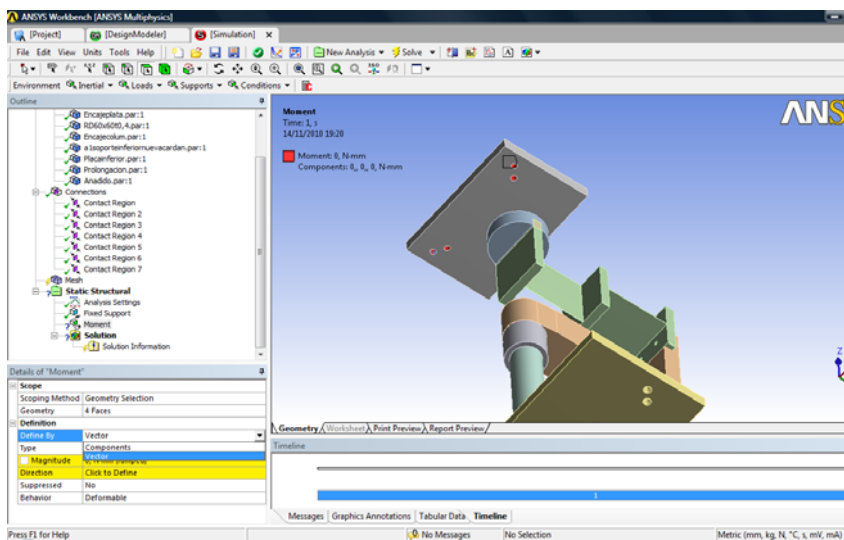
Clicamos en Loads. Seleccionamos Moment.



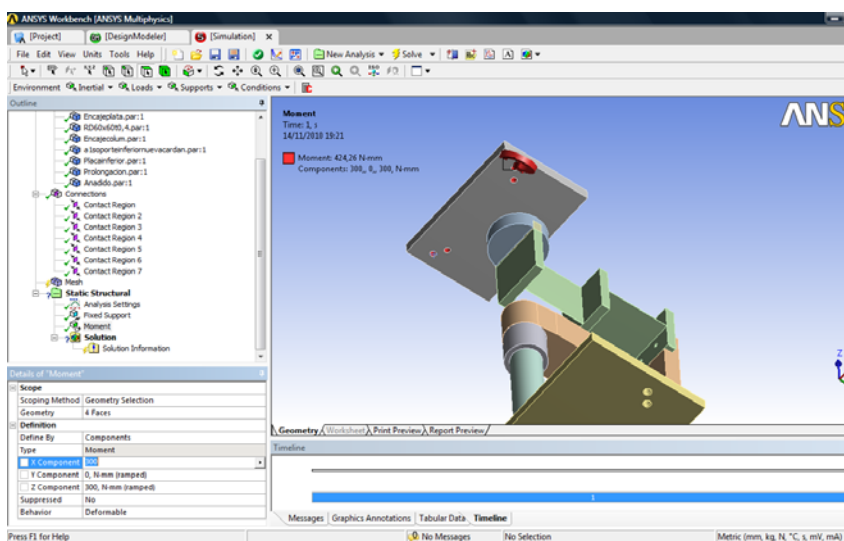
Seleccionamos las 4 agujeros de la plataforma mobil, cambiando a color verde.



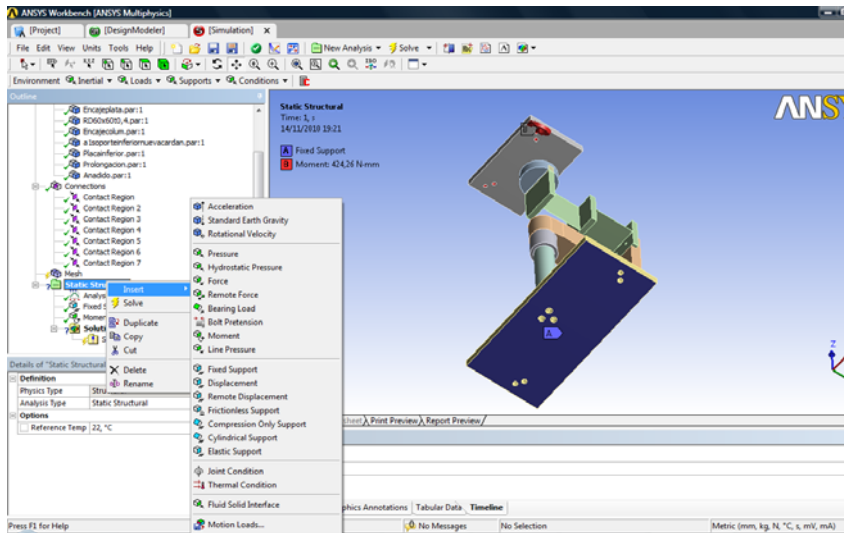
Clicamos en Apply, cambia de color verde a rojo.



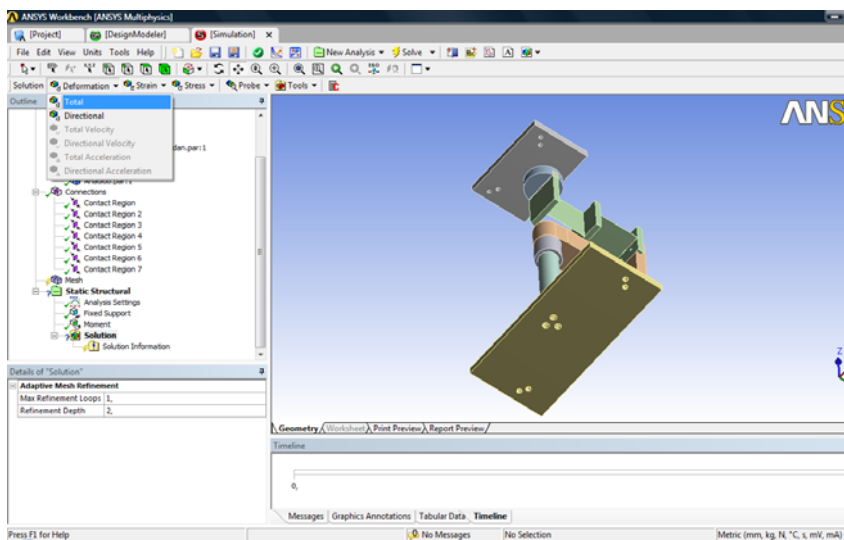
En el diálogo inferior dentro de Type, podemos seleccionar entre Components o Vectors. Clicamos en Components



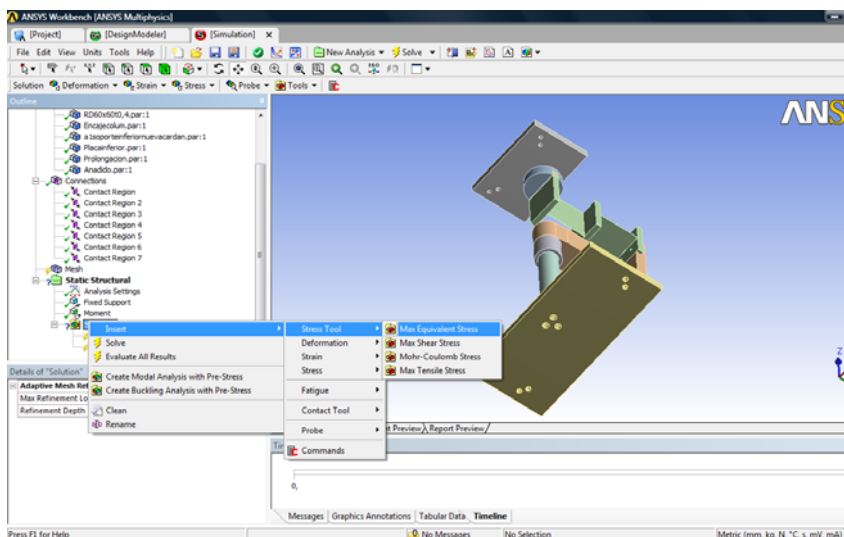
Aplicamos momentos dirección X y Z para simular el efecto de los actuadores.



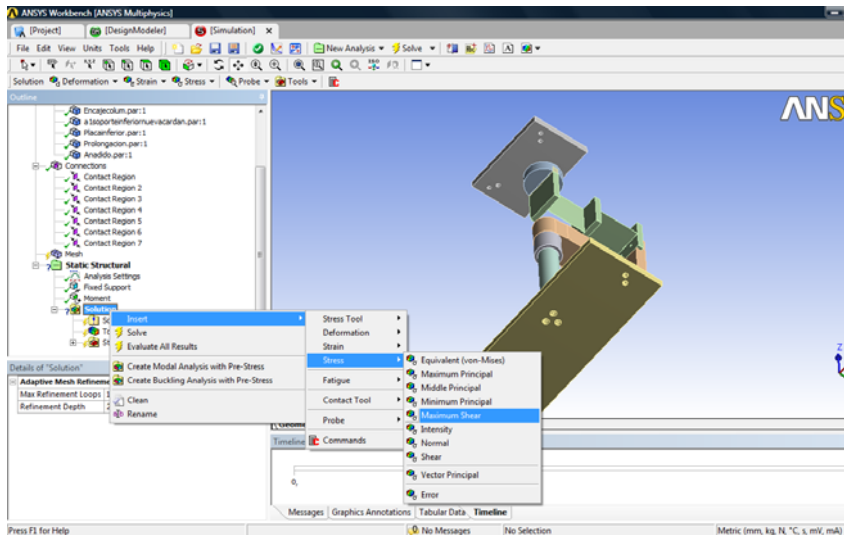
Las mismas barras que tenemos en el menú superior las tenemos si clicamos con el botón derecho encima de Static Structural.



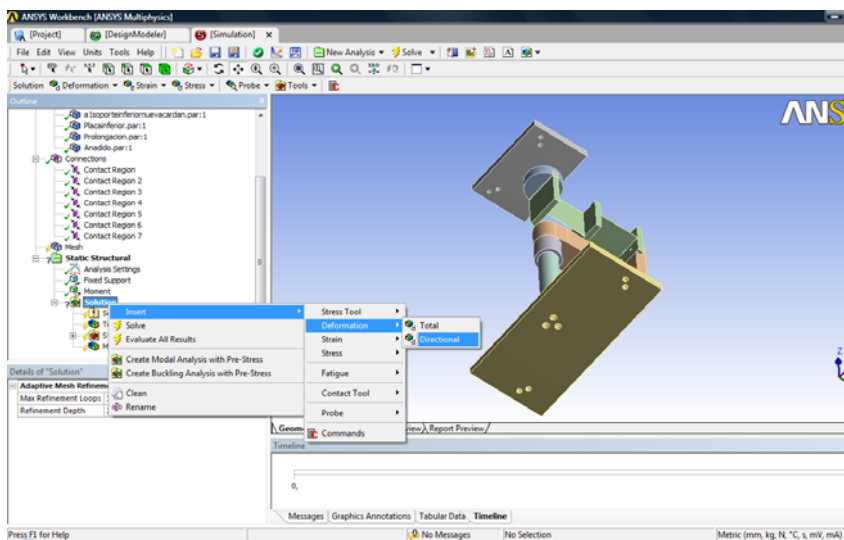
Dentro de Solution clicamos en Deformation. En Solution añadiremos las características que queremos que nos evalúe Ansys.



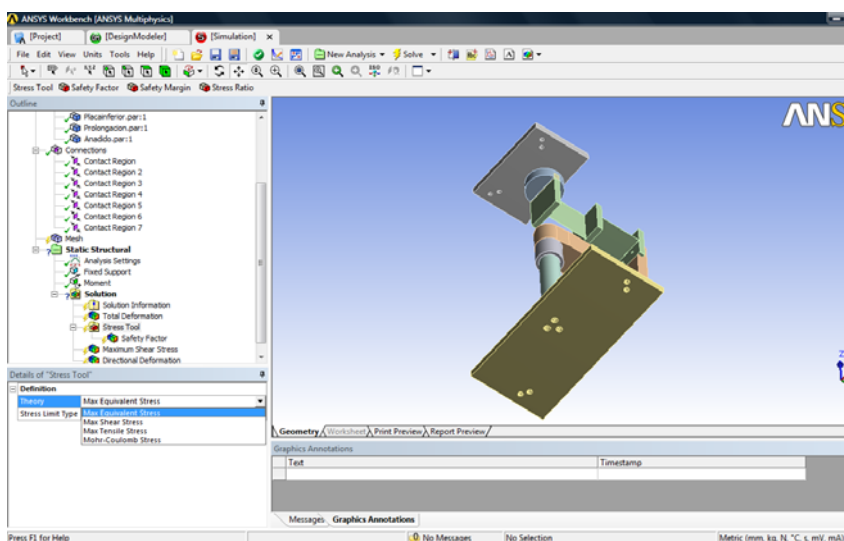
Añadimos también clicando con el botón derecho en Solution, Stress Tool.



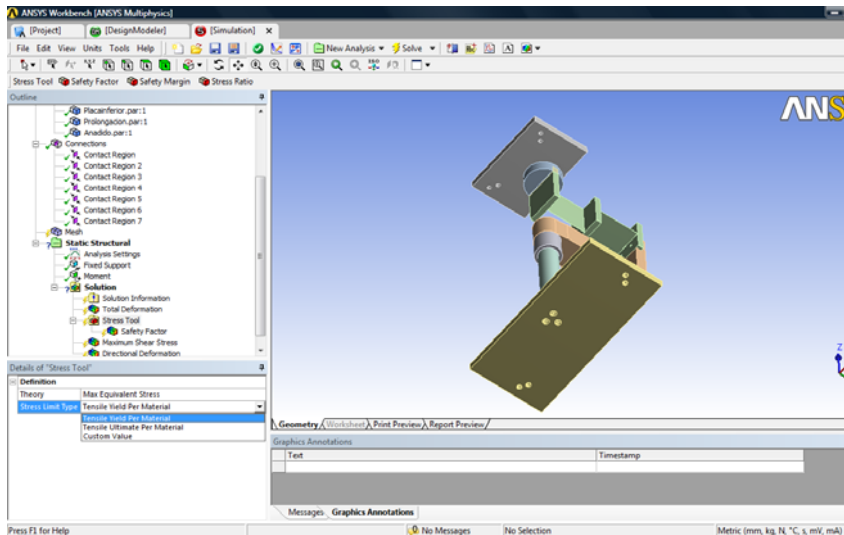
• Añadimos Maximum Shear Stress.



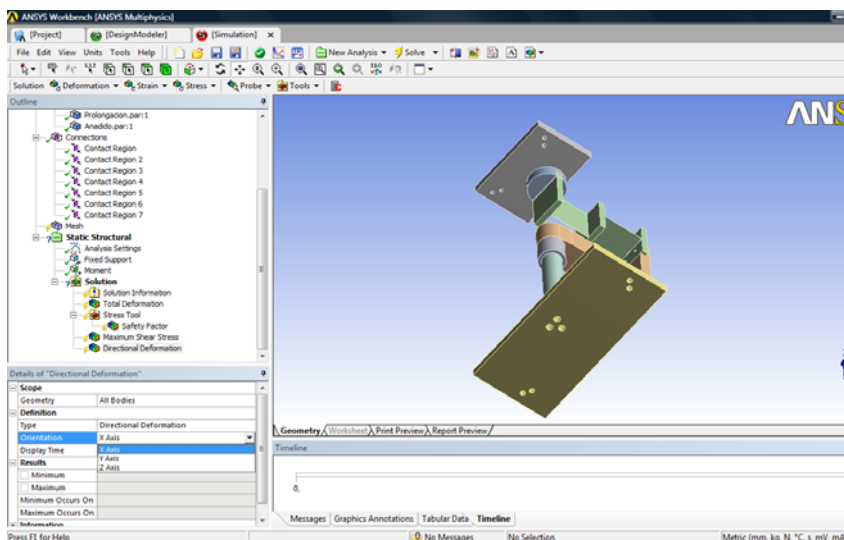
• Añadimos Deformation Directional



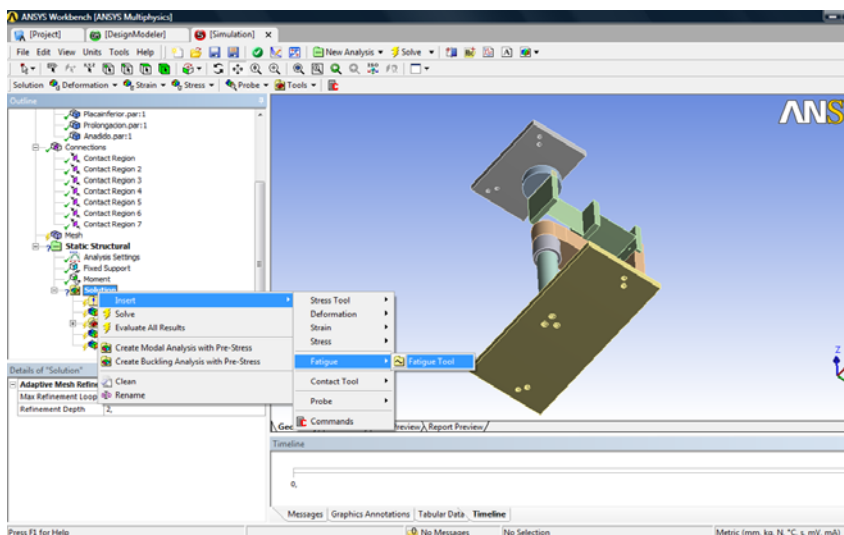
• Dentro de Maximum Shear Stress, nos permite cambiar el tipo de tensión que vamos a evaluar.



Dentro de Stress Tool. Será la herramienta que nos dará el coeficiente de seguridad. Podemos seleccionar la tensión que queremos que nos evalué. La tensión de plasticidad o la tensión última de ruptura.

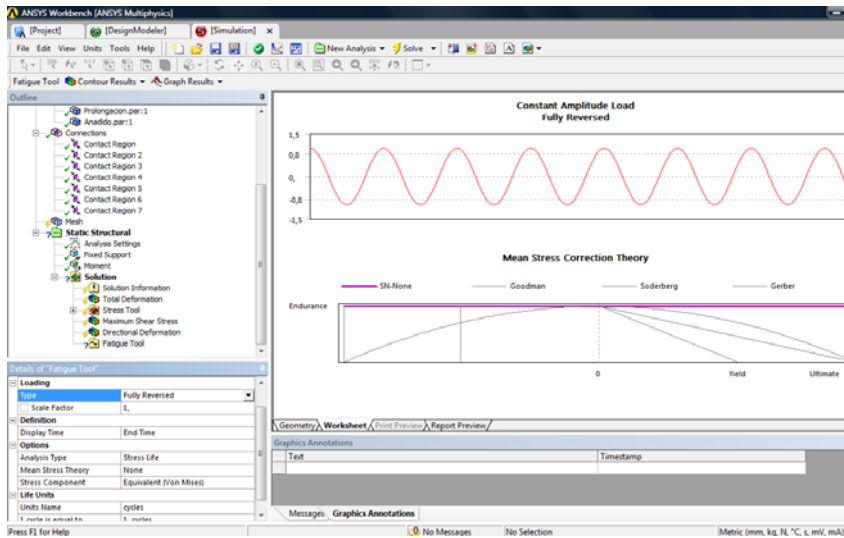


Dentro de Directional Deformation podemos seleccionar una de las direcciones en los tres ejes de coordenadas según dibujo.

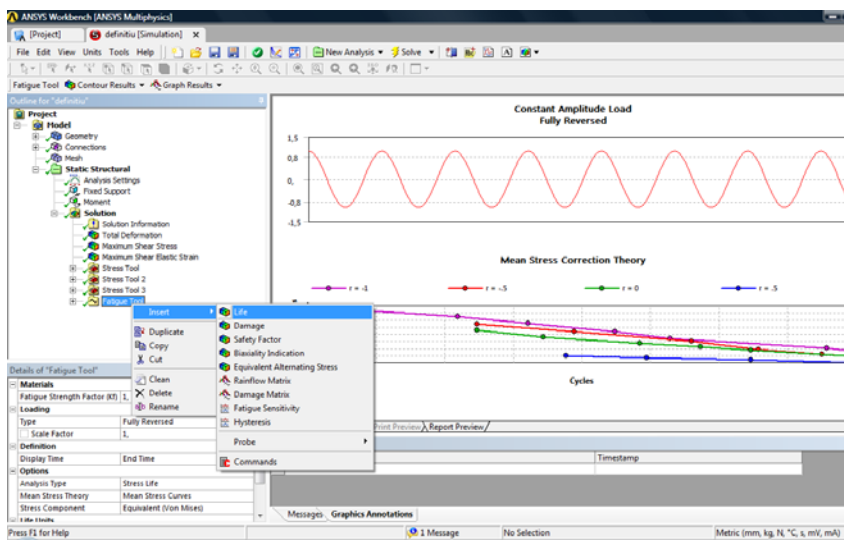


Añadimos Fatigue Tool, para evaluar nuestro elemento a fatiga.

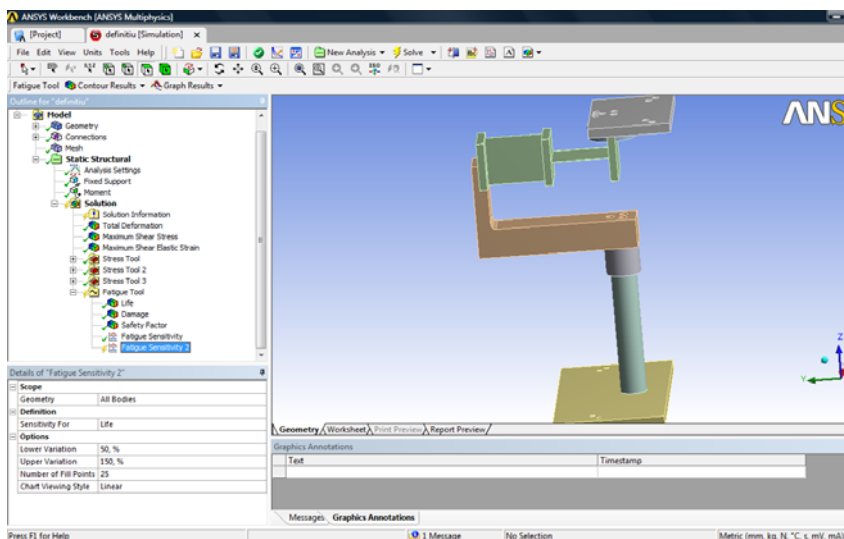




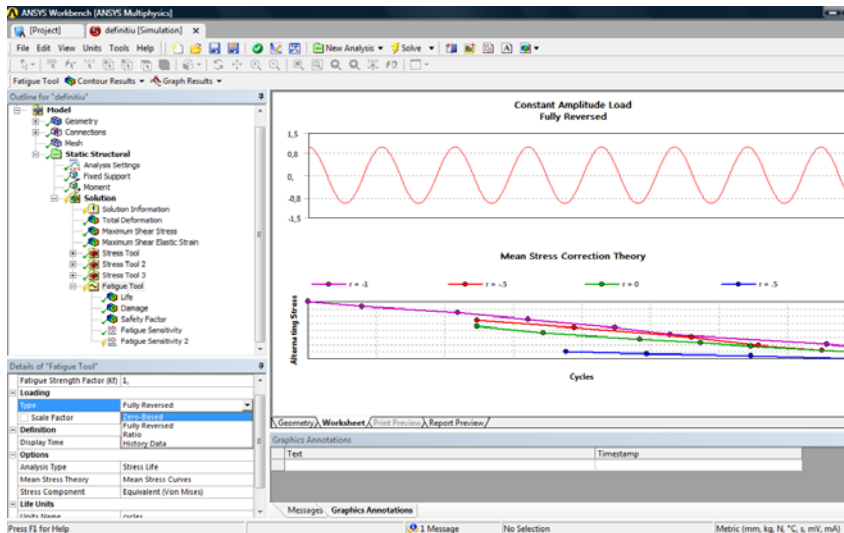
Observamos la nueva herramienta de fatiga y su cuadro de control de en el menú inferior



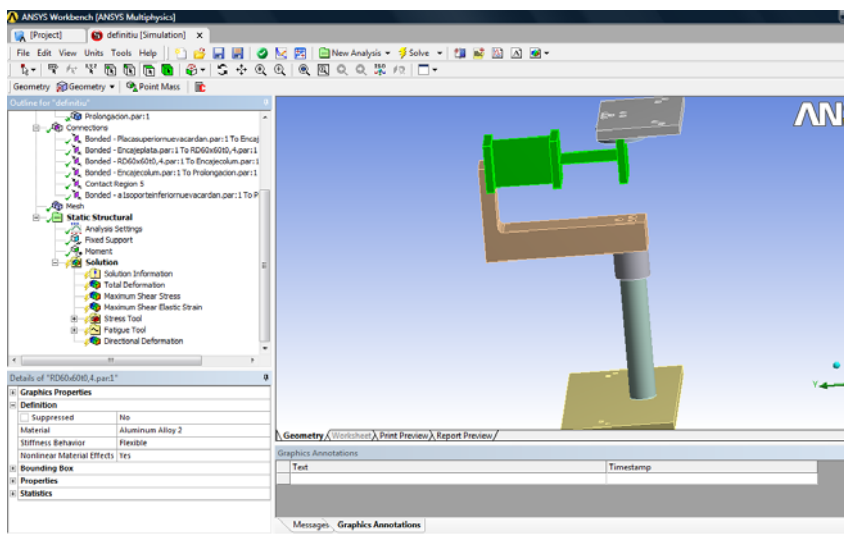
Añadimos el parámetro de medida Life



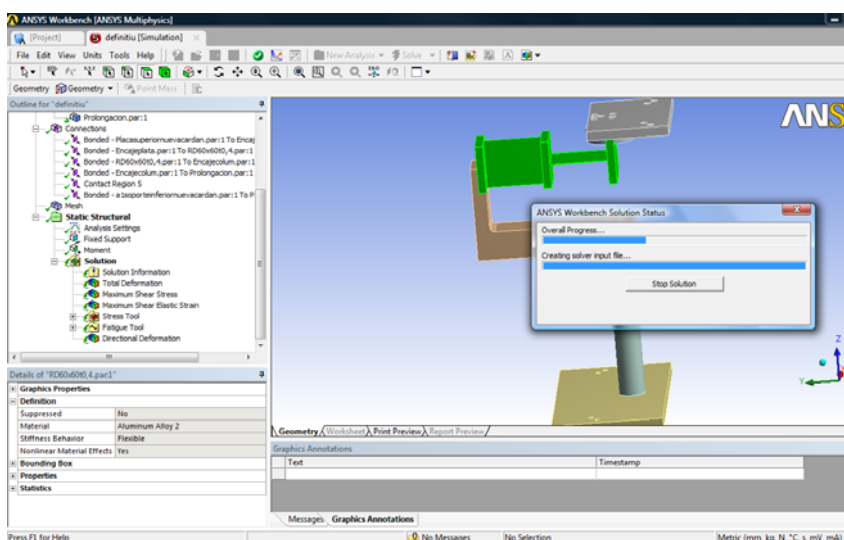
Se añaden 4 parámetros más para la medida del elemento a fatiga



Vemos que podemos cambiar las características o métodos de evaluación a fatiga de nuestro elemento en el menú inferior dentro de la herramienta de fatiga

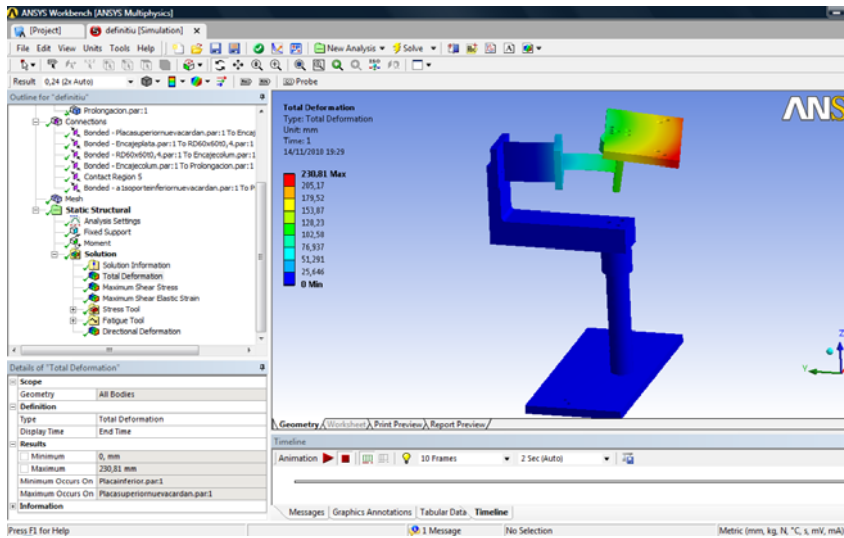


Los relámpagos en el apartado Solution nos indica que aun no se ha ejecutado la simulación y por tanto no hay resultados.

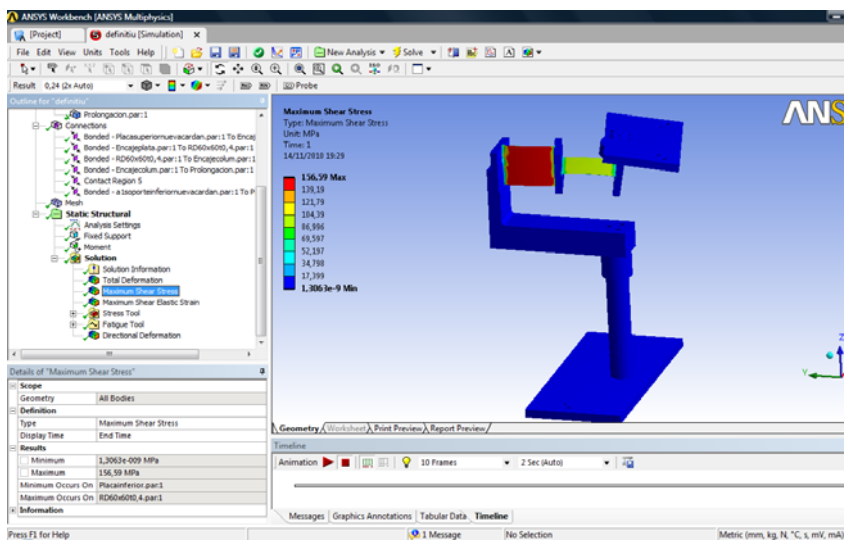


Ejecutamos la herramienta clicando en Solve. En la barra de menú superior, icono con forma de relámpago.

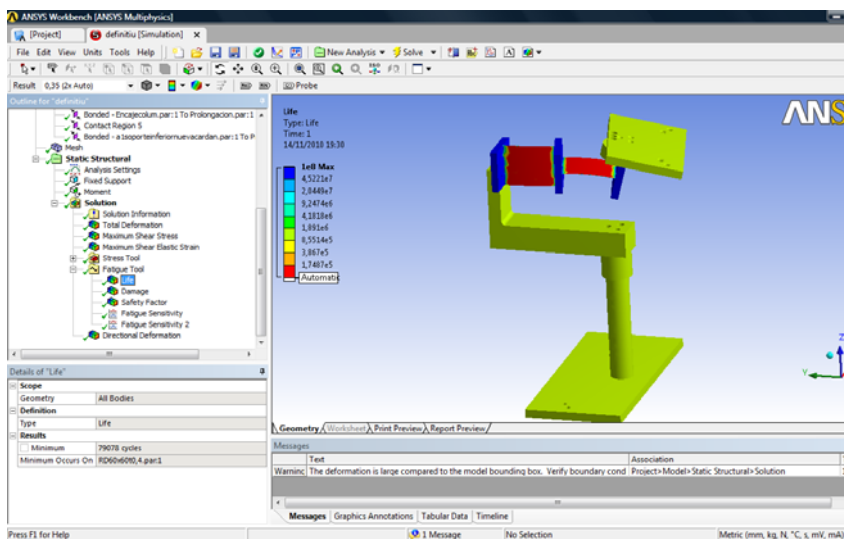




Ahora entramos en el menú superior dentro de cada apartado y vemos su solución. En este caso Deformation Total



Aquí Maxium Shear Stress



Dentro la herramienta Fatigue Tool, analizamos el ciclo de vida, Life.

## Bibliografía

1. **T.Smith, Stuart.** *Flexures*. Amsterdam : Gordon and Breach Science Publishers, 2000.
2. Ssussex. [Online] [Cited: ]  
[http://www.sussex.ac.uk/engineering/documents/sm\\_lecture\\_6.pdf](http://www.sussex.ac.uk/engineering/documents/sm_lecture_6.pdf).
3. **Beardmore, Roy.** RoyMech. [Online] 08 05, 2010 .  
[http://www.roytech.co.uk/Useful\\_Tables/Beams/Beam\\_theory.html](http://www.roytech.co.uk/Useful_Tables/Beams/Beam_theory.html).
4. **Xu, Yangmin Li and Qingsong.** IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING, VOL. 3, NO. 3, JULY 2006.
5. **Lobontiu, Nicolae.** *Compliant Mechanisms*. Florida : CRC PRESS, 2003.
6. **D.Pilkey, Walter and F.Dilkey, Deborah.** *Stress Concentration Factors*. s.l. : Peterson's.
7. **ORION MINANGLE: A FLEXURE-BASED, DOUBLE-TILTING PARALLEL. Patric Pham, Yves-Julien Regamey, Maurice Fracheboud, Prof. Reymond Clavel.** Lausanne : Ecole polytechnique f'ed'erale de Lausanne.
8. **S., Ricardo León Ochoa.** RESISTENCIA DE MATERIALES. [Online] 2003. [Cited: 02 10, 2009.] <http://www.edisonochoa.netfirms.com/pr1.htm>.
9. *Kinematics, Workspace and Static Analyses of 2-DOF Flexure Parallel Mechanism.* **Chen, Huy Hoang Pham and I-Ming.** s.l. : School of Mechanical & Production Engineering, Nanyang Technological University.
10. **AUTOMATION CREATIONS, INC.** MatWeb™. [Online] Automation Creations, Inc., 1996. <http://www.matweb.com/index.aspx>.
11. **Alberta, University of.** University of Alberta - ANSYS Tutorials. [Online] University of Alberta, 2002. [Cited: 07 02, 24.] <http://www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys/index.html>.
12. *Performance of Pseudo-Elastic Flexure Hinges in Parallel Robots for.* **J. Hesselbach', A. Raatzl.** Braunschweig : Technical University of Braunschweig.
13. **L.Lawerence, Kent.** Ansys tutorial. s.l. : SDC.
14. **Hancq, D. Alfred.** *Fatigue Module*. 2003.
15. **Hohenwarter, Markus, Borchers, Michael and Ancsin, Gabor.** GeoGebra. *GeoGebra*. [Online] Colaboration. <http://www.geogebra.org/cms/>.
16. **Zaragoza, Universidad de.** Asignatura de Procesos de fabricación. *Ingeniería Industrial*. Zaragoza : s.n., 2009.



## Índice de tablas

Tabla 2.1: Resumen de las fórmulas para rigidez y ángulos para diferentes geometrías	10
Tabla 2.2: Propiedades Ti-6Al-4V .....	10
Tabla 2.3: Parámetros ejemplo .....	11
Tabla 2.4: Optimización propiedades mecánicas materiales .....	11
Tabla 2.5: Optimización parámetros geométricos .....	12
Tabla 3.1: Materiales con posibilidad de ser usados .....	15
Tabla 3.2: Ángulo según tipo de unión.....	16
Tabla 3.3: Ángulo según parámetros para lámina .....	17
Tabla 3.4: Aluminio 7075 vs Acero 6150 .....	17
Tabla 3.5: Ángulos según parámetro “L” .....	18
Tabla 4.1: Movimientos parásitos según disposición.....	26
Tabla 4.2: Ángulo según L .....	27
Tabla 4.3: Extensión 1 vs Extensión 2 .....	29
Tabla 4.4: C.G “Normal” vs “Invertido” .....	30
Tabla 5.1: Momentos y tensiones para diferentes posiciones .....	38
Tabla 6.1: Ángulo Lámina simulación vs Ángulo junta universal .....	47
Tabla 6.2: Medidas Radio.....	48
Tabla 6.3: Ángulo Parásito .....	52
Tabla 6.4: Ejemplo Media de las 3 repeticiones para Central Esfera 1 .....	53
Tabla 6.5: Resumen de desviaciones y recorridos para cada esfera en situación de actuador “central” o “extremo” .....	53
Tabla 6.6: Desviación y Recorrido para cada esfera .....	54
Tabla 6.7: Tiempos de fabricación .....	54

## Índice de figuras

Figura 2.1: Elongación elástica .....	3
Figura 2.2: Flexión de una viga .....	4
Figura 2.3: Deformaciones sufridas por una viga a flexión .....	5
Figura 2.4: Viga en voladizo sufriendo, momento y fuerza en su extremo.....	6
Figura 2.5: Adaptación de unión flexible a muelle .....	8
Figura 2.6: Tipo de uniones; a) toroidal; b) entalla; c) entalla-híbrida; d) lámina .....	8
Figura 2.7: Unión tipo lámina .....	9
Figura 2.8: Unión tipo entalla.....	9
Figura 2.9: Inercias para sección circular y rectangular .....	10
Figura 2.10: Figura ejemplo .....	11
Figura 3.1: Tensión vs deformación elástica .....	13
Figura 3.2: Límite de fluencia .....	14

Figura 3.3: Volumen útil .....	15
Figura 3.4: Ángulo teórico vs ángulo dado por simulación .....	18
Figura 3.5 Ampliación en rango de 3°-10° .....	19
Figura 4.1: Nomenclatura de la orientación de la unión.....	21
Figura 4.2: L .....	22
Figura 4.3: L+ plataforma.....	22
Figura 4.4: L invertida + plataforma .....	23
Figura 4.5: L invertida .....	23
Figura 4.6: Recto + plataforma.....	23
Figura 4.7: Recto .....	23
Figura 4.8: Recto Recrecido + plataforma .....	23
Figura 4.9: Recto Recrecido .....	23
Figura 4.10: Ejemplo geometría “L” .....	24
Figura 4.11: Láminas “a” y “b” .....	24
Figura 4.12: Apoyo y fuerza de “blanco” .....	25
Figura 4.13: Deformación “blanco” .....	25
Figura 4.14: Deformación mov. parásito.....	25
Figura 4.15: Apoyo y fuerza de mov. parásito .....	25
Figura 4.16: Entorno predeterminado.....	28
Figura 4.17: Añadido.....	28
Figura 4.18: Elongación grande .....	28
Figura 4.19: Elemento circular .....	28
Figura 4.20: Elongación delgado.....	29
Figura 4.21: Recrecido .....	29
Figura 4.22: C.G Elongación grande.....	29
Figura 4.23: C.G Elongación delgada .....	29
Figura 4.24: Orientación “Invertido” .....	30
Figura 4.25: Orientación “Normal” .....	30
Figura 4.26: Trayectoria punto 1 (rango máximo) disposición “Recto” .....	31
Figura 4.27: Trayectoria punto 1 (rango máximo) disposición “Recto Recrecido” .....	31
Figura 4.28: Recto + junta .....	32
Figura 4.29: Recto Recrecido + junta.....	32
Figura 4.30: Recto + junta + plataforma .....	32
Figura 4.31: Recto Recrecido + junta + plataforma .....	32
Figura 4.32: Plataforma + elem. auxiliares .....	33
Figura 4.33: Puntos de las protusiones .....	33
Figura 4.34: Recrecido posición +45°, +30°.....	33
Figura 4.35: Recrecido posición +45°, -30°.....	33
Figura 4.36: Montaje recto recrecido .....	34
Figura 4.37: Espacio montaje recto recrecido .....	34
Figura 4.38: Recto posición +45°, +30°.....	34
Figura 4.39: Recto posición +45°, -30°.....	34
Figura 4.40: Espacio montaje recto .....	35
Figura 4.41: Montaje recto .....	35

Figura 4.42: Elemento flexible de doble lámina .....	35
Figura 5.1: Tensión sufrida en rangos máximos repartida por el montaje .....	37
Figura 5.2: Lámina “b” .....	38
Figura 5.3: Lámina “a” .....	38
Figura 5.4: Rango ángulo de giro vs ciclos de vida .....	39
Figura 5.5: Aumento de “b” .....	40
Figura 5.6: Disminución de “b” .....	40
Figura 5.7: Nervio 2 .....	41
Figura 5.8: Nervio 1 .....	41
Figura 5.9: Nervio 3 .....	41
Figura 5.10: Nervio 4 .....	41
Figura 5.11: Lámina “a” más grande que “b” .....	41
Figura 5.12: Forma de Entalla .....	42
Figura 6.1: Elemento intermedio .....	43
Figura 6.2: Lámina .....	43
Figura 6.3: Lámina + esferas .....	43
Figura 6.4: EDM por hilo con elemento flexible .....	44
Figura 6.5: EDM piza sujeta durante el proceso .....	44
Figura 6.6: Montaje MMC .....	45
Figura 6.7: Lámina sin esferas .....	45
Figura 6.8: Ensayo ángulo pequeño .....	45
Figura 6.9: Ensayo ángulo grande .....	45
Figura 6.10: Vista del montaje .....	46
Figura 6.11: Numeración de esferas Y/X .....	46
Figura 6.12: Perfil X/Z .....	46
Figura 6.13: Perfil Y/Z .....	46
Figura 6.14: Lámina vs Junta Universal .....	48
Figura 6.15: Radios perfil Y/Z .....	48
Figura 6.16: Plastificación en eje X .....	49
Figura 6.17: Plastificación en eje Z .....	49
Figura 6.18: Error en ángulo eje Y .....	50
Figura 6.19: Error en ángulo eje Z .....	51
Figura 6.20: Error en desplazamiento vs ángulo de la lámina .....	52