



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA
SÍSMICA DE DOS GRADOS DE LIBERTAD CON
AMBOS ACTUADORES FIJOS**

Autor:

Alonso Porro, Luis Miguel

Tutores:

Lorenzana Ibán, Antolín

Magdaleno González, Álvaro

Departamento:

**Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno,
Mecánica de los medios Continuos y Teoría de Estructuras**

Valladolid, agosto 2020

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo la construcción de una mesa sísmica de dos grados de libertad con ambos actuadores sujetos a una misma base fija.

En esta memoria se detallan todos los aspectos relativos a los detalles de los componentes, así como su fase de diseño mediante el uso de herramientas CAD, su posterior fabricación y por último su montaje.

También se va a realizar un estudio cinemático del movimiento de la mesa sísmica.

Finalmente se indican posibles líneas futuras de mejora.

PALABRAS CLAVE

Mesa sísmica, Motores lineales, Cinemática de estructuras, Working model, terremoto.

ABSTRACT

The aim of this end-of degree project is to build a two axis shake table with both actuators fixed at the same base.

In this document all aspects related to the details of the components are detailed, as well as their design phase through the use of CAD tools, their subsequent manufacture and finally their assembly.

A kinematic study of the movement of the shake table will also be carried out.

Finally, possible future lines of improvement will be sought.

KEY WORDS

Shake table, Linear motors, Kinematics of structures, Working model, earthquake.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO.....	1
1.2. TERREMOTOS	3
1.3. ANTECEDENTES EN LA UVA	4
1.4. MARCAS COMERCIALES.....	5
1.5. OBJETIVOS.....	12
1.6. ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO	15
CAPÍTULO 2: COMPONENTES Y DISEÑO.....	17
2.1. COMPONENTES	17
2.1.1 ACTUADORES.....	17
2.1.2. TORNILLOS DE OJO	26
2.1.3. BIELAS.....	26
2.1.4. PLACA.....	28
2.1.5. GUIAS	34
2.1.6. BASE.....	34
2.2. DISEÑO.....	35
2.2.1. DISEÑO DE LA PLACA.....	36
2.2.2. DISEÑO UNION PLACA-BIELA.....	37
2.2.3. DISEÑO UNION BIELA-MOTOR	38
2.2.4. DISEÑO DE LA BASE.....	38
2.2.5. DISEÑO DE LAS GUÍAS	40
2.2.6. DISEÑO DE LA LONGITUD DE LAS BIELAS.....	44
2.2.7. DISEÑO DEL ZANCO DEL MOTOR PEQUEÑO	45
2.2.8. DISEÑOS DESCARTADOS.....	46
CAPÍTULO 3: PROTOTIPADO.....	49
3.1. FABRICACIÓN	49
3.1.1. FABRICACIÓN DE LA PLACA.....	49
3.1.2. FABRICACIÓN DE LA BASE.....	54
3.1.3. FABRICACIÓN DEL ZANCO DEL MOTOR PEQUEÑO	56
3.2. MONTAJE.....	56

3.2.1. MONTAJE DE LOS ACTUADORES	56
3.2.2 MONTAJE DE LA MESA SISMICA	59
CAPÍTULO 4: ESTUDIO CINEMÁTICO	65
4.1. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EN WM2D	65
4.2. SIMULACIÓN	74
4.2.1. PRIMERA SIMULACIÓN: CON UN ACTUADOR ACTIVADO	75
4.2.2. SEGUNDA SIMULACIÓN: AMBOS ACTUADORES CON EL MISMO DESPLAZAMIENTO	85
4.2.3. TERCERA SIMULACION: ACTUADORES CON VELOCIDADES DIFERENTES	86
CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS	89
5.1. APARTADO ECONÓMICO	91
BIBLIOGRAFÍA	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfica del número total de terremotos [2]	2
Figura 2. SHAKE TABLE II [4].....	7
Figura 3. Mesa sísmica de 2 grados de libertad formada apilando 2 SHAKE TABLE II [4].....	7
Figura 4. SHAKE TABLE III XY [5].....	8
Figura 5. HEXAPOD [6].....	9
Figura 6. Mesas sísmicas de un grado de libertad. A la izquierda mesa con un grado de libertad vertical y a la derecha con un grado de libertad horizontal [8]	10
Figura 7. Mesa sísmica de 2 grados de libertad [8].....	11
Figura 8. Mesa sísmica de 6 grados de libertad [8].....	11
Figura 9. Mesa sísmica de un grado de libertad con motor paso a paso [9]	4
Figura 10. Mesa sísmica de 2 grados de libertad con motores lineales [10]	5
Figura 11. Mesa sísmica de 2 grados de libertad apilando 2 mesas de 1 grado de libertad [10].....	12
Figura 12. Detalle de la unión guía – rodamientos [10].....	12
Figura 13. Detalle de la unión tornillo de ojo - pasador cónico [10].....	13
Figura 14. Maqueta modular de un edificio multidireccional [11].....	14
Figura 15. Estátor LINPS01-23x80F-HP-R [13]	19
Figura 16. Brida LINPF02-23x90 [13].....	20
Figura 17. Slider LINPL01-12x270/230-HP [13]	20
Figura 18. Driver LINC1250-EC-XC-1S-000 [13].....	21
Figura 19. Fuente de alimentación LINS01-72/500 [13].....	22
Figura 20. Cable LINK05-Y/R-2 [13]	22
Figura 21. Estátor LINPS01-37x120F-HP-C [14]	23
Figura 22. Fuente de alimentación LINS01-72/1000 [14]	25
Figura 23. Cable LINKS05-Y/C-4 [14]	25
Figura 24. Tornillos de ojo	26
Figura 25. Biela [16]	27

Figura 26. Medidas mínimas de las bielas [16].....	28
Figura 27. Composición de la placa de ALUCOBOND [17]	28
Figura 28. Dimensiones de la placa de ALUCOBOND (izq.) y del honey comb (dcha.) [17]	29
Figura 29. Gráfica de comparación de la dureza según la norma DIN 53295 [17], [18]	30
Figura 30. Gráfica de comparación de la rigidez [17]	31
Figura 31. Gráfica de comparación peso-rigidez [17]	32
Figura 32. Guías [19]	34
Figura 33. Modelado en CATIA V5 de la mesa sísmica	35
Figura 34. Taladros de la placa (Vista inferior)	36
Figura 35. Modelado de la unión biela-placa. En amarillo el pasador, en verde la placa y en gris la biela	37
Figura 36. Modelado de la unión biela-motor. En gris la biela, en amarillo el pasador, en negro el tornillo de ojo y en naranja la goma de final de carrera.....	38
Figura 37. Taladros en la base	39
Figura 38. Partes de las guías	41
Figura 39. En rojo los 4 puntos de soldadura que se dará a cada uno de las guías	42
Figura 40. Finales de carrera de las guías	43
Figura 41. Posición de las guías una vez soldadas.	43
Figura 42. Longitud de las bielas	45
Figura 43. Modelado en CATIA V5 de un diseño similar al SHAKE TABLE II de 2 grados de libertad. En amarillo la zona útil de la mesa	46
Figura 44. Modelado de la placa de agarre.....	48
Figura 45. Pruebas realizadas en un trozo sobrante de ALUCOBOND	50
Figura 46. Sierra circular de mesa	50
Figura 47. Taladro de columna	51
Figura 48. Marcador de centros	51
Figura 49. Jeringuilla para inyectar resina	52
Figura 50. Agujero relleno de resina	53
Figura 51. Avellanador de mano	53

Figura 52. Taladro de manual	55
Figura 53. Posición del estátor dentro de la brida en el actuador grande	57
Figura 54. Actuador pequeño montado por completo a falta del tornillo de ojo.....	58
Figura 55. Remachadora manual	60
Figura 56. Motor pequeño sujeto a la base	61
Figura 57. Detalle de la posición dl motor pequeño y el zanco.....	61
Figura 58. Detalle de la unión de las guías a la base	62
Figura 59. Pasador de la biela envuelto en teflón.....	63
Figura 60. Mesa sísmica completamente montada con una maqueta encima	64
Figura 61. Modelo de la mesa sísmica en WM2D.....	65
Figura 62. Menú superior WM2D.....	66
Figura 63. Ventana Gravity de WM2D	66
Figura 64. Ventana Preferences de WM2D.....	67
Figura 65. Ventana Number and Units de WM2D	67
Figura 66. Ventana Workspace de WM2D	68
Figura 67. Menú para dibujar sólidos en WM2D.....	68
Figura 68. Sólidos dibujados.....	69
Figura 69. Menú Appearance de WM2D	69
Figura 70. Menú para insertar pines de unión y guías de WM2D.....	70
Figura 71. Sólidos con los pines azules colocados.	71
Figura 72. Menú de las coordenadas del centro de masas del sólido	71
Figura 73. Menu para unir o separar dos pines.	72
Figura 74. Resultado de la unión de las bielas a la placa	72
Figura 75. Modelo completo a falta de los actuadores.....	73
Figura 76. Menú de motores.....	74
Figura 77. Menú properties del actuador.....	76
Figura 78. Opciones de medición	76
Figura 79. Posición del punto G.....	77
Figura 80. Menú superior de la pantalla	77

Figura 81. Trayectoria descrita por la mesa sísmica en la primera simulación.....	78
Figura 82. En negro la trayectoria real descrita por la mesa y en rojo la trayectoria ideal.....	79
Figura 83. Croquis de apoyo para resolver el movimiento circular	80
Figura 84. Comparación de las trayectorias inicial y corregida	82
Figura 85. Aceleración en el eje X.....	82
Figura 86. Aceleración en el eje Y.....	83
Figura 87. Comparación de la aceleración en ambos ejes	83
Figura 88. Trayectoria cuando la mesa sísmica esta fuera de la situación de reposo	84
Figura 89. Trayectoria descrita por la mesa sísmica en la segunda simulación.....	85
Figura 90. Comparación de las aceleraciones en la segunda simulación	86
Figura 91. Trayectoria descrita por la mesa sísmica en la tercera simulación.....	87
Figura 92. Comparación de las aceleraciones en la tercera simulación	87
Figura 93. Pasador calibrado	90
Figura 94. Mando fabricado en un trabajo de fin de grado anterior	¡Error!
Marcador no definido.	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Elementos de los dos conjuntos motores.....	18
Tabla 2. Propiedades del ALUCOBOND [17]	33
Tabla 3. Pernos y tuercas empleados en la sujeción a la base.....	40
Tabla 4. Precios.....	91

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Desde los comienzos de las edificaciones ha preocupado su conservación a lo largo del tiempo, son muchos los factores a tener en cuenta para prevenir los posibles fallos.

Estos factores pueden ser intrínsecos al edificio, como son la resistencia de los materiales empleados o la resistencia estructural del edificio, o extrínsecos a dicho edificio, como por ejemplo, las cargas derivadas de acciones climatológicas.

Las cargas a las que se ve sometido el edificio pueden ser de dos tipos:

- Las cargas dinámicas, que son las que actúan de forma repentina variando su magnitud y ubicación durante el transcurso del tiempo. Un claro ejemplo de este tipo de cargas sería el viento, que produce presión o succión sobre techos y paredes.
- Las cargas estáticas, que son todas aquellas fuerzas que actúan de manera estacionaria y no varían sustancialmente con el tiempo. El peso del edificio o la nieve sobre la cubierta, serían ejemplos de este tipo de fuerzas.

Todas estas cargas hay que tenerlas en cuenta y aunque muchas son difícilmente cuantificables, como las que dependen de las acciones climatológicas, podrían llegar a provocar deformaciones estructurales irreversibles, produciéndose el colapso de la estructura.

La cuantificación de las cargas por acciones climáticas viene recogida en el CTE (Código Técnico de la Edificación), estas cargas dependerán principalmente de la forma de fachadas y cubiertas, la altura y la ubicación del edificio.

Otros fenómenos naturales mucho más devastadores y destructivos que las acciones climática son los desastres naturales. Los desastres naturales son acciones climáticas de gran magnitud como por ejemplo los huracanes o las inundaciones.

Los desastres naturales que afectaron a mayor número de personas según los datos registrados por el CRED (Centro de Investigación sobre Epidemiología y Desastres, siglas en inglés) junto con la UNDRR (oficina de las naciones unidas para la reducción del riesgo de desastres, siglas en inglés), fueron las inundaciones que afectaron a un 45% de la población mundial, seguida de las sequías que afecto al 33% de la población, mientras que los terremotos solo afectaron a un 3%. Los terremotos, pese a no ser el desastre natural por el que se han visto afectadas mayor número de personas, sí que es el que más

muerres registra, con un 56% de las muertes registradas por desastres naturales entre los años 1998 a 2017, con unos daños estimados de 661 billones de dólares americanos [1].

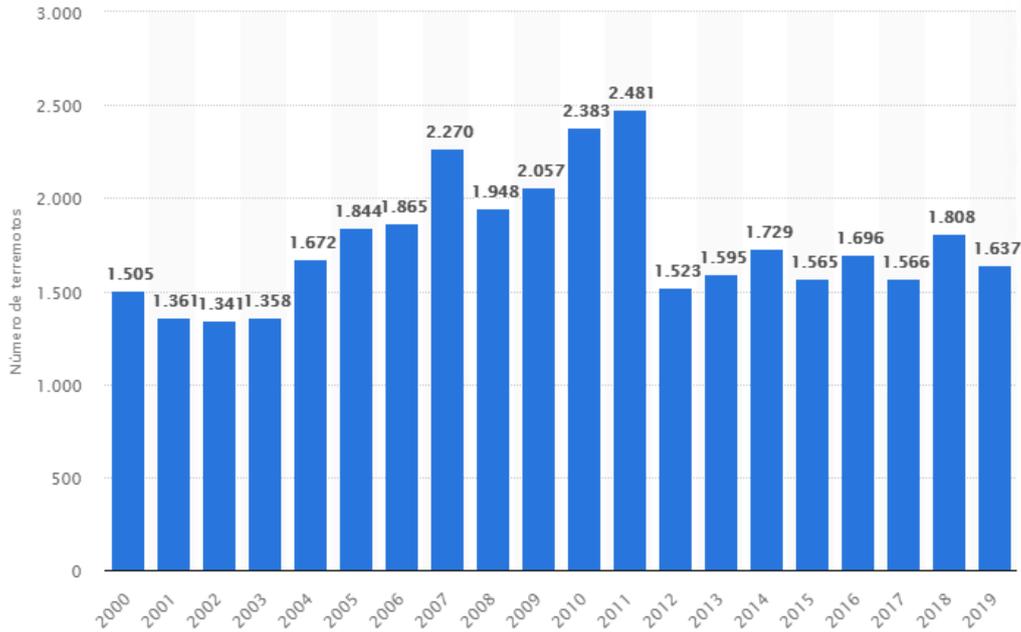


Figura 1. Gráfica del número total de terremotos [2]

La Figura 1 muestra el número total de terremotos de grado 5 o superior en la escala Richter registrados en el mundo cada año desde 2000 hasta 2019 [2].

El carácter impredecible de estos fenómenos hace que causen tantas muertes. Por este motivo, se realizan ensayos sobre nuevas estructuras o sobre edificios ya existentes para comprobar los efectos que provocan. Este es un proceso muy costoso debido a las dificultades que conlleva realizar ensayos sobre las estructuras reales, ya que someter a una simulación de un terremoto en la mayoría de los casos conlleva su destrucción, además de la necesidad de la elaboración de un mecanismo que recree dicho terremoto sobre el que montar la estructura, todo esto hace que sea un proceso inviable tanto desde el punto de vista económico, como desde el punto de vista físico a la hora de recrear un terremoto.

Por lo tanto, para realizar ensayos se recurre a la construcción de maquetas de menor tamaño, sobre las que se medirán los efectos de la simulación de distintos terremotos, y es aquí cuando surge la necesidad de un equipo que simule estos terremotos.

Con los datos obtenidos de este tipo de ensayo sobre las maquetas se puede comparar el comportamiento de distintas estructuras ante un mismo

terremoto, la utilización de distintos sistemas de amortiguación en estructuras o simplemente corregir defectos de la fase de diseño, para posteriormente incorporarlos a la estructura real y hacerla menos vulnerable ante este tipo de desastres naturales.

1.2. TERREMOTOS

Un terremoto es un temblor de la corteza terrestre de manera brusca y pasajera, producida por la acumulación de energía en el interior de la tierra y transmitida en forma de ondas sísmica.

En un terremoto se pueden diferenciar dos puntos característicos:

- Hipocentro: lugar en el interior de la Tierra donde se produce el terremoto (normalmente a varios kilómetros de la superficie)
- Epicentro: punto en la superficie terrestre más cercano medido desde el hipocentro

Dependiendo de la magnitud y el origen del terremoto pueden dar lugar a otro tipo de desastres naturales como maremotos o tsunamis, corrimientos de tierra, actividad volcánica...

Los terremotos se propagan mediante ondas elásticas desde el hipocentro, habiendo tres tipos:

- Ondas longitudinales u ondas tipo P: viajan a una velocidad entre 8 y 13 km/s por el interior de la tierra en el sentido de la vibración de las partículas, atravesando líquidos y sólidos. Son las primeras en ser detectadas por los sismógrafos.
- Ondas transversales u ondas tipo S: son más lentas que las ondas P, viajan a velocidades comprendidas entre los 4 y los 8 km/s, se propagan perpendicularmente al sentido de propagación de las partículas y solo atraviesan sólidos.
- Ondas superficiales: son las más lentas, viajan a unos 3,5 km/s y son el resultado de la interacción de las ondas P y S a lo largo de la superficie terrestre. Estas ondas se propagan desde el epicentro y son las que causan más daños. Este tipo de ondas son las que se simulan en las mesas sísmicas, ya que son las que afectan a las construcciones.

1.3. ANTECEDENTES EN LA UVA

Una mesa sísmica es un mecanismo o un robot que se encarga de realizar la simulación de un terremoto sobre una maqueta de un edificio real o una estructura (normalmente que pretende ser construida en un futuro), para así poder evaluar los daños producidos en dicho edificio o estructura y la capacidad de absorción que tienen distintos materiales y suspensiones.

Casi todas las mesas sísmicas llevan los mismos componentes:

- Una placa inferior fija a donde anclaremos el resto de los componentes.
- Uno o varios motores o actuadores (en función de los grados de libertad que tenga la mesa), normalmente tendrán uno por cada grado de libertad.
- Placa superior móvil sobre la que se montara la maqueta.
- Guías sobre las que deslizará la placa superior.

En todos estos componentes se buscará el mínimo rozamiento entre ellos y que no exista holguras, para que los resultados obtenidos en las simulaciones sean lo más parecidos a seísmo real.

En abril de 2017 en un TFG se diseñó y fabricó una mesa sísmica de 1 grado de libertad [9] (Figura 2) muy similar a la SHAKE TABLE II (Figura 4) de QUANSER, la cual emplea un motor que hace girar un husillo roscado para desplazar la mesa, con unas guías laterales sobre las que se sujeta.

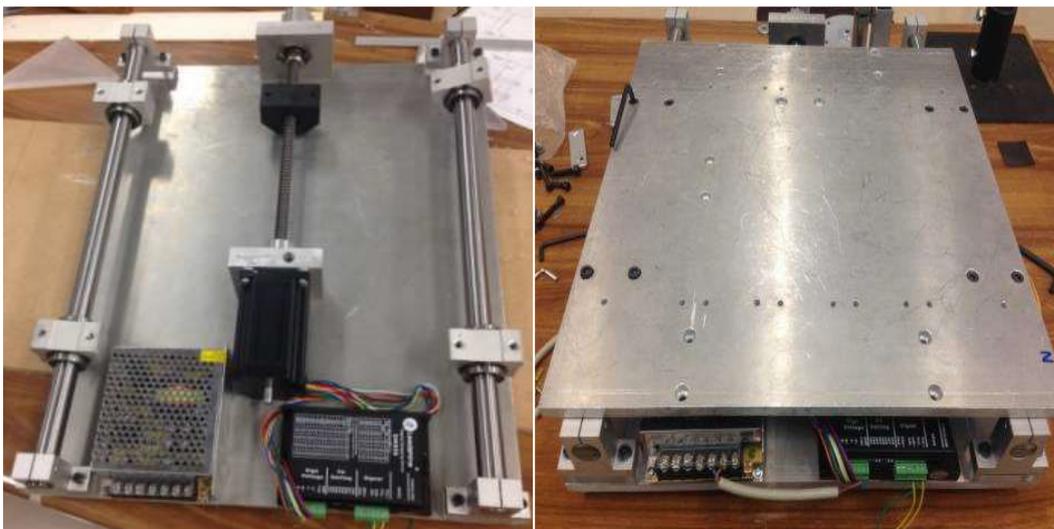


Figura 2. Mesa sísmica de un grado de libertad con motor paso a paso [9]

En junio de 2019 se diseñó y fabricó otra mesa sísmica, pero esta vez de dos grados de libertad [10] (Figura 3), comandada por dos servomotores en sustitución del husillo roscado. Esta mesa imitaba SHAKE TABLE II de QUANSER, que apilaba dos mesas sísmicas de un grado de libertad una encima de la otra (Figura 5). Pero con grandes limitaciones ya que estos servomotores son capaces de mover unos 5 kg y la mesa ella sola pesaba más de 10 kg.

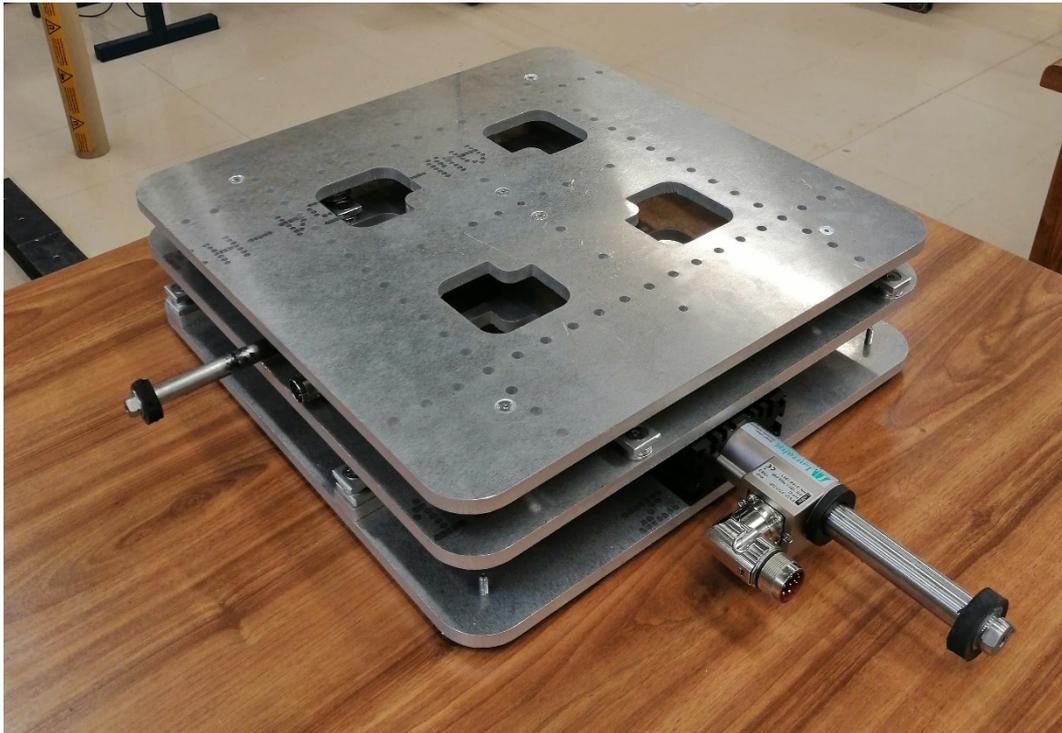


Figura 3. Mesa sísmica de 2 grados de libertad con motores lineales [10]

1.4. MARCAS COMERCIALES

En cuanto a las marcas comerciales que venden mesas sísmicas se pueden destacar dos:

QUANSER [3]

Marca fundada en 1989, con sede en Canadá, como respuesta a la necesidad de plataformas hardware optimizadas para la enseñanza y la investigación en el ámbito de la ingeniería.

Actualmente QUANSER es el líder mundial en el diseño y fabricación de productos y laboratorios completos, para la implementación de controles, en áreas como la robótica o la mecatrónica.

Más de 2.500 universidades e instituciones de prestigio cuentan con laboratorios y soluciones de esta compañía.

El enfoque de QUANSER en cuanto a innovación y colaboración con universidades ha dado como resultado una serie de novedades en el área de la ingeniería, como son:

- Plataforma de validación eficiente para la investigación y la realización comercial del péndulo invertido.
- Control de alto rendimiento en tiempo real de microordenadores comunes.
- Investigaciones centradas en los cuadricópteros una década antes de la revolución de los drones
- Plataforma táctil generalizada para la telerrobotica de retroalimentación de fuerza
- Plataforma de terapia robótica inteligente y asequible para la rehabilitación de pacientes con accidente cerebrovascular.
- Primera plataforma móvil de conocimiento optimizada para el contenido de ingeniería.

Centrándose en lo que a mesas sísmicas se refiere, habría varios tipos en función de los grados de libertad que tenga la mesa. QUANSER fabrica mesas sísmicas de 1,2 y 6 grados de libertad que pueden ser cargadas con maquetas de hasta 100 kg de peso.

SHAKE TABLE II [4] (Figura 4): es la mesa sísmica más simple, tiene un grado de libertad, alcanza una aceleración de 2,5 g cuando está cargada con 7,5 kg y tiene un recorrido de 152 mm (76 mm en cada dirección de un mismo eje desde el punto central).

DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE 2 GRADOS DE LIBERTAD CON AMBOS ACTUADORES FIJOS

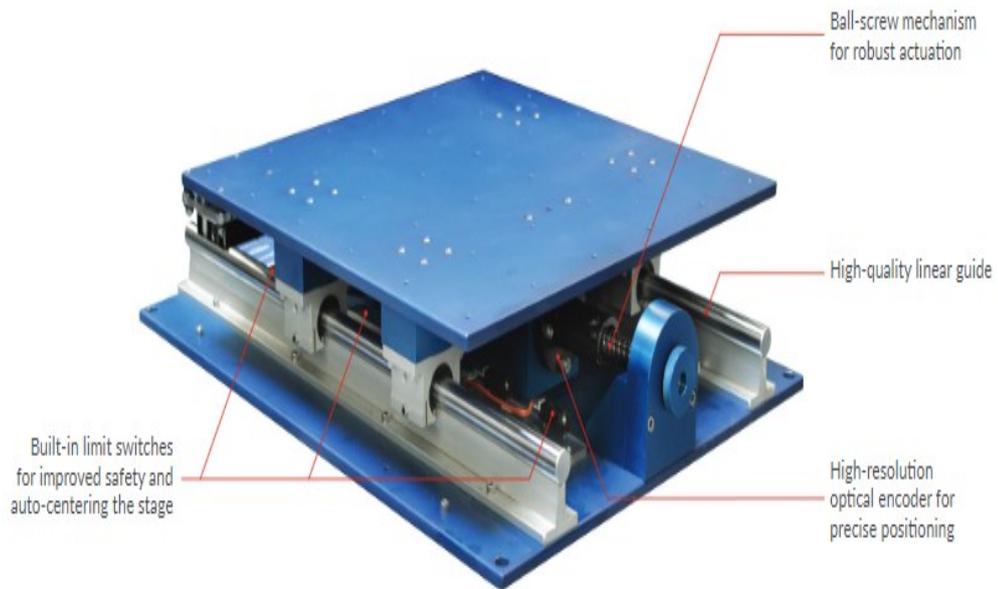


Figura 4. SHAKE TABLE II [4]

Una de las mayores ventajas de esta mesa es que se puede conseguir una mesa sísmica de 2 grados de libertad apilando dos módulos uno encima de otro como se muestra en la Figura 5, lo cual sale más barato que comprar la mesa SHAKE TABLE III XY.

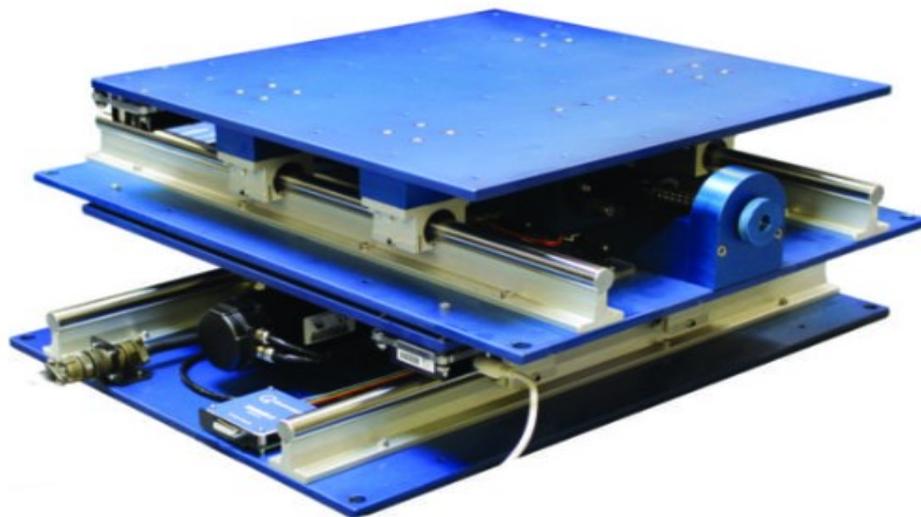


Figura 5. Mesa sísmica de 2 grados de libertad formada apilando 2 SHAKE TABLE II [4]

DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE 2 GRADOS DE LIBERTAD CON AMBOS ACTUADORES FIJOS

SHAKE TABLE III XY [5] (Figura 6): cuenta con 2 grados de libertad en los ejes X e Y, no se puede desplazar hacia arriba (eje Z), entre sus características más destacables es que se pueden conseguir aceleraciones de 1 g en ambos ejes con masas de hasta 100 kg y unos recorridos de 216 mm en cada uno de los ejes (108 mm en cada dirección).

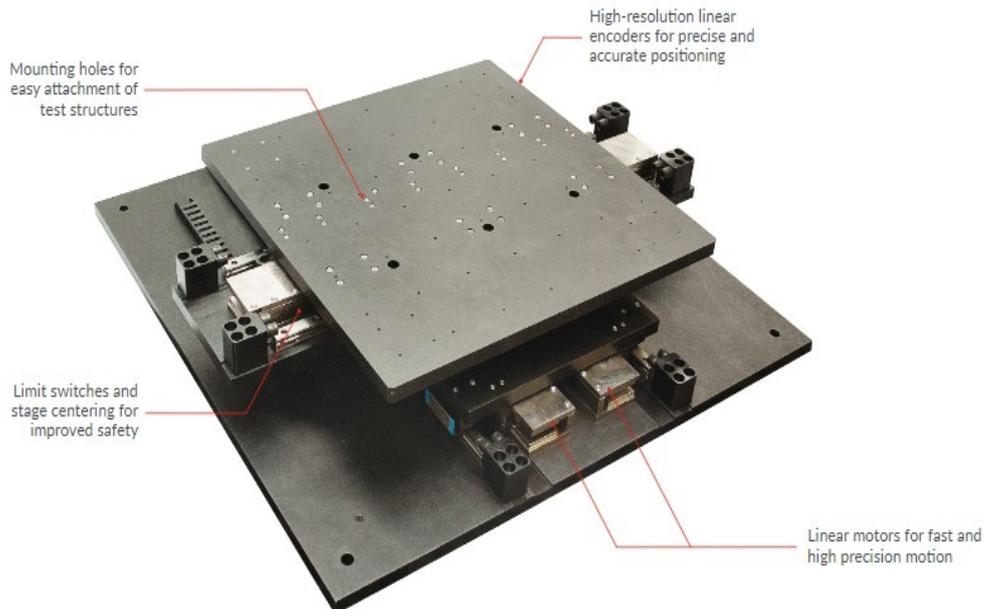


Figura 6. SHAKE TABLE III XY [5]

HEXAPOD [6] (Figura 7): sus 6 grados de libertad hacen que pueda simular casi cualquier tipo de terremoto, aguanta hasta 100 kg y consigue aceleraciones de 1 g, con unos desplazamientos máximos de ± 74 mm en el eje X, ± 110 mm en el eje Y, y ± 54 mm en el eje Z.

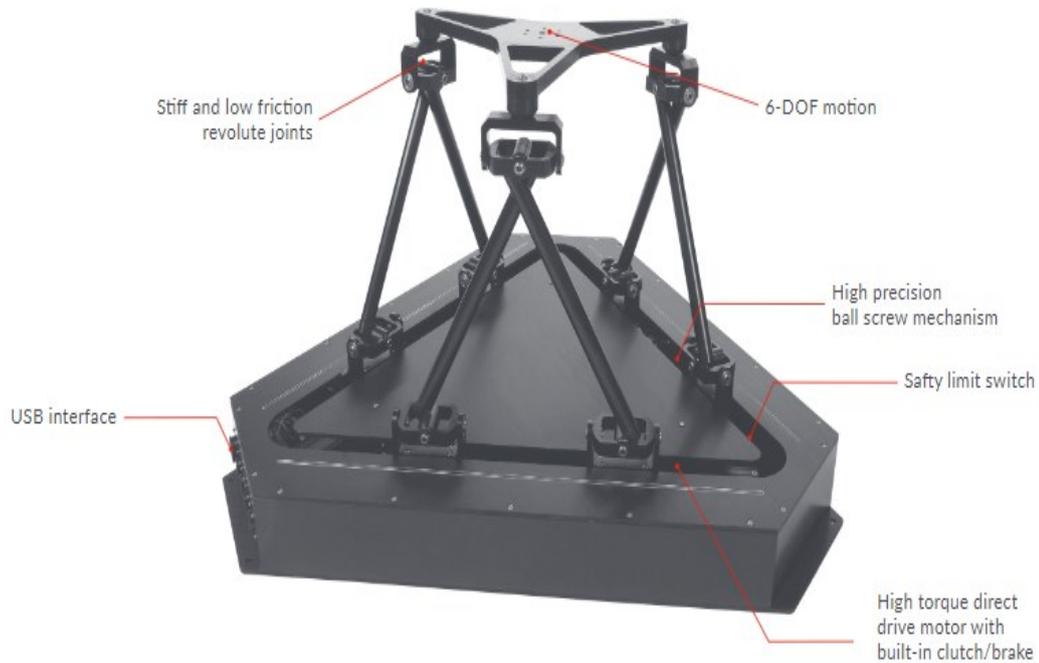


Figura 7. HEXAPOD [6]

VZERO [7]

Es una empresa que trabaja en múltiples campos de la ingeniería, desde la ingeniería civil o ingeniería aeroespacial hasta las energías renovables. También colabora con universidades y centros de investigación. Pero donde realmente destaca es en la fabricación de sistemas de análisis estructural, de donde cabe destacar las siguientes tecnologías:

- Mesas de vibración para ensayos a escala reducida de componentes o estructuras. 1 (Figura 8), 2 (Figura 9), 3 o 6 (Figura 10) grados de libertad [8].
- Sistemas de ensayo pseudo-dinámico, basados en servoactuadores hidráulicos, permite la evaluación de la respuesta real de ciertos tipos de estructuras a velocidad reducida, comparada con la del evento real, con las consecuentes reducciones de coste.
- Sistemas híbridos de tiempo real en los que las subestructuras de las estructuras ensayadas, cuyo comportamiento es bien conocido, son simuladas y las partes más complejas son realmente solicitadas a través de servoactuadores.
- Sistemas de ensayo de dinámica estructural para fatiga, durabilidad o effective force testing method. Estos sistemas típicamente se

DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE 2 GRADOS DE LIBERTAD CON AMBOS ACTUADORES FIJOS

componen de servoactuadores, grupos hidráulicos, sistema de control, muros de reacción y diseño de la masa de reacción.

- Maquetas inteligentes para ilustrar el comportamiento de estructuras reales ante terremoto: edificios, puentes, tuned mass dampers.

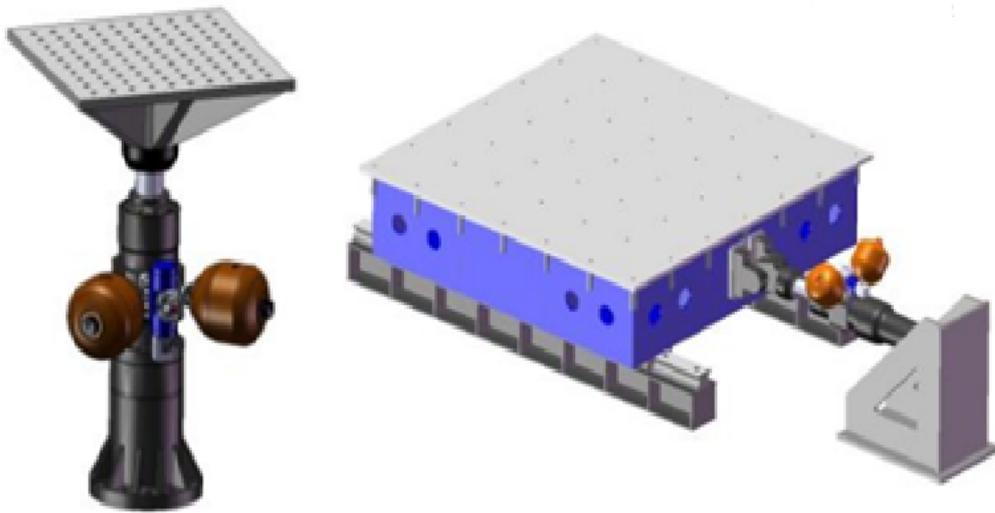


Figura 8. Mesas sísmicas de un grado de libertad. A la izquierda mesa con un grado de libertad vertical y a la derecha con un grado de libertad horizontal [8]

centrándose en el primer punto, el de las mesas de vibración. Tiene un rango de tamaños desde 1,5 x 1,5 m hasta 5 x 5 m pudiendo soportar hasta 30 toneladas, también realizada mesas más grandes y que soportan mayor peso, pero bajo encargo.

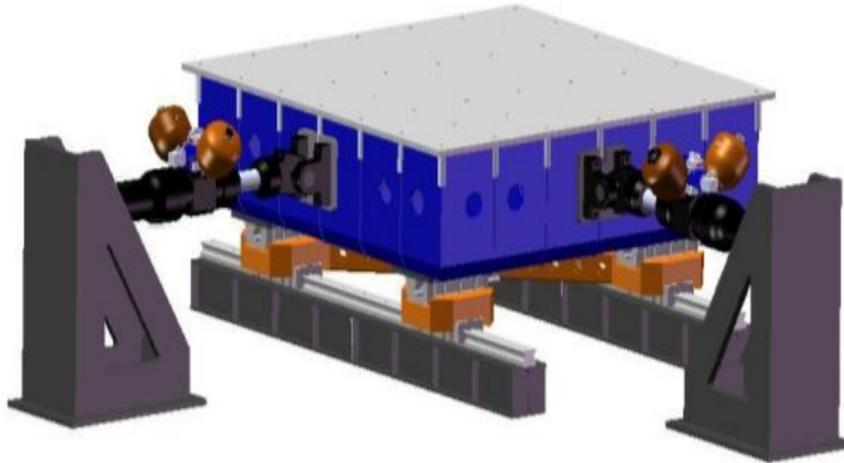


Figura 9. Mesa sísmica de 2 grados de libertad [8]

Estas mesas destacan por contar con aisladores en los actuadores para que las vibraciones no repercutan en su movimiento, el uso de soportes neumáticos para soportar el peso de la mesa, servoactuadores hidráulicos y rodamientos hidrostáticos para minimizar la fricción, y transductores para controlar la posición y la velocidad.



Figura 10. Mesa sísmica de 6 grados de libertad [8]

1.5. OBJETIVOS

Inicialmente este trabajo de fin de grado se iba a centrar en coger el diseño ya existente de otro trabajo de fin de grado mencionado anteriormente en el apartado 1.4. ANTECEDENTES EN LA UVA, el cual consistía en el diseño y prototipado de una mesa sísmica de 2 grados de libertad apilando 2 mesas sísmicas de 1 grado de libertad [10] y tratar de corregir su principal limitación, la masa de todo el conjunto, ya que esta era superior a la que podían mover ambos actuadores y no funcionaba correctamente.

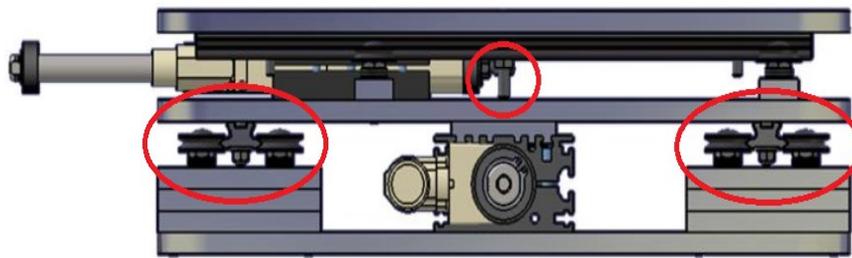


Figura 11. Mesa sísmica de 2 grados de libertad apilando 2 mesas de 1 grado de libertad [10]

En la Figura 11. Mesa sísmica de 2 grados de libertad apilando 2 mesas de 1 grado de libertad [10] se observa la mesa sísmica de la que va a partir este trabajo de fin de grado, donde se han marcado en rojo puntos que también se van a mejorar.

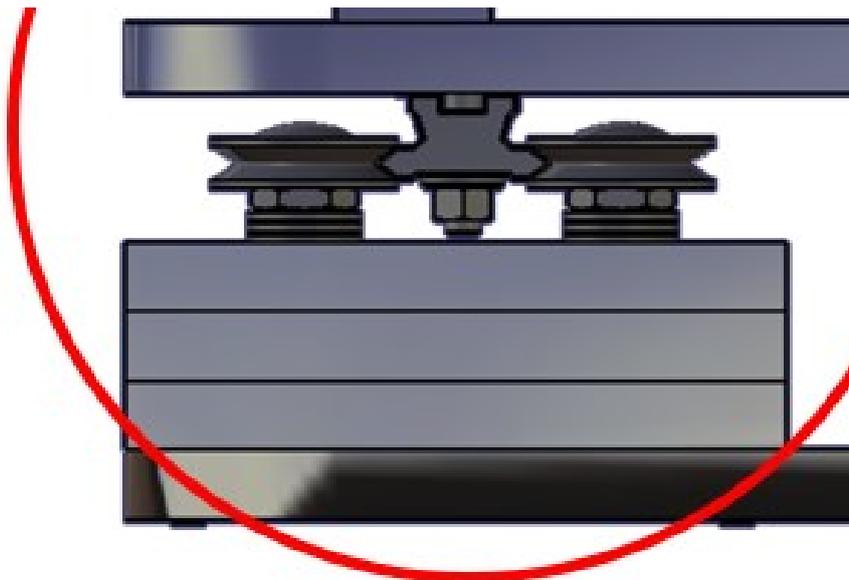


Figura 12. Detalle de la unión guía - rodamientos [10]

Otros de sus objetivos va a ser la eliminación de las holguras entre sus componentes, como por ejemplo la existente entre las guías o carriles y los rodamientos (Figura 12), o la existente entre el tornillo de ojo y el pasador cónico de la unión del motor con la mesa (Figura 13).



Figura 13. Detalle de la unión tornillo de ojo - pasador cónico [10]

Pero se investigó acerca de las novedades introducidas por los principales fabricantes y se observó que hay mesas sísmicas con ambos actuadores fuera de la mesa, es decir ambos fijos a una bancada que no se mueve (siguiendo un diseño similar a las mesas sísmicas comercializadas por la empresa VZERO). Por lo que se reducía el peso notablemente, ya que se pasaba de tener dos mesas apiladas una encima de otra, se quitaba el peso del segundo actuador, que pasaba de estar encima de la primera mesa a salir fuera del conjunto.

Además, con este nuevo diseño se simplificaba el montaje porque se tiene una mesa menos, no siendo necesario equilibrar el conjunto porque no hay ninguna masa encima de ella fuera de su centro de gravedad.

Otro requerimiento que se pidió a este trabajo de fin de grado es que los dos actuadores lineales que emplea para mover la mesa sísmica sean fácilmente desacoplables del resto del prototipo, ya que son bastante caros y se necesitan para otras funciones.

También se necesitaba que la mesa sísmica fuese compatible con lo diseñado en el trabajo de fin de grado “prototipado de una maqueta modular de un

DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE 2 GRADOS DE LIBERTAD CON AMBOS ACTUADORES FIJOS

edificio multidireccional” [11] (Figura 14) y otras maquetas de edificios ya construidas en el laboratorio [12].



Figura 14. Maqueta modular de un edificio multidireccional [11]

Como último punto a tener en cuenta es que se intentase que la mesa fuese lo más barata posible ya que se trata de un trabajo de fin de grado con posibilidades de mejora, que su principal función no va a ir más allá que la de usarse en alguna clase práctica en la universidad, para ver el comportamiento de ciertas maquetas de estructuras modeladas de forma muy simple.

1.6. ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO

En este trabajo se va a realizar un estudio de cada uno de los objetivos, tanto principales como secundarios. Se va a dividir en tres grandes bloques: que serán el diseño, el prototipado y el estudio cinemático del movimiento de la mesa sísmica, mediante una simulación con el programa Working Model.

En el bloque del diseño se van a incluir todas las ideas que se han tenido en cuenta hasta llegar al modelo final, que será el que finalmente se monte. También se va a enumerar y comentar las principales características de los componentes utilizados en este trabajo de fin de grado, así como sus características, y si es necesario comprarlos o ya se dispone de ellos.

El bloque de prototipado se va a centrar en la fabricación de las piezas necesarias para el posterior montaje de la mesa sísmica, previamente diseñadas en el bloque anterior.

En el último bloque se va a estudiar la cinemática de la mesa sísmica, ya que esta no describe una línea recta sino un arco de circunferencia cuando solo se pone en funcionamiento uno de los dos motores (llamaremos actuador 1 al actuador en funcionamiento y actuador 2 al actuador que está parado), que es necesario corregir si se quiere un movimiento puramente recto en cualquiera de los dos ejes. Para corregir dicho efecto se necesita comandar el movimiento (actuador 2) del actuador que no estaba funcionando en función de la posición del (actuador 1).

Se añadirá un pequeño capítulo con conclusiones acerca de este trabajo, así como las limitaciones que presenta la mesa sísmica, frente a la simulación de un seísmo real; por último se presentaran las líneas futuras de mejora para que esta mesa sísmica reproduzca mejor la realidad.

CAPÍTULO 2: COMPONENTES Y DISEÑO.

Este capítulo va a contener toda la información acerca de las características de los componentes que conforman la mesa sísmica, así como todas las modificaciones necesarias que se van a realizar sobre los componentes, con el fin de que se puedan unir de la forma deseada para conseguir una mesa sísmica funcional.

2.1. COMPONENTES

Todos los componentes que se han empleado han sido comprados o ya estaban disponibles en el departamento, lo que significa que no ha sido necesario fabricar ninguna pieza desde cero, solamente se han realizado pequeñas modificaciones sobre algunos de ellos, como cortes para reducir su tamaño o taladros para dejar paso a pernos y tornillos, por lo que se ha abaratado bastante su precio final.

2.1.1 ACTUADORES

Ambos actuadores están disponibles en el departamento, por lo que no ha sido necesario comprarlos. Son dos motores lineales del fabricante LinMot, externamente iguales, pero de diferentes tamaños (a partir de ahora se van a diferenciar, llamando actuador pequeño al más pequeño de los dos y actuador grande al más grande).

Si ambos actuadores no hubiesen estado disponibles, se hubiesen comprado dos actuadores del mismo tamaño, ya que no es necesario que uno sea más grande que el otro.

Ambos actuadores están formados por un estátor, una parte móvil, que es el *slider*, o vástago y una parte fija que es la brida. A parte, cada motor cuenta con un driver, que es el que controla el motor, un cable para conectar cada actuador con el driver y dos fuentes de alimentación: una principal y otra secundaria.

Hay que destacar que, aunque las características técnicas del actuador dependan del estátor elegido, algunas de estas características nos las dará el vástago que se utilice, por lo que en ambos actuadores también se comentarán las características de todo el conjunto elegido y no solamente de los elementos por separado.

Las características de todas las partes que forman los montajes de los actuadores están sacadas de la documentación técnica de cada parte: estatores, sliders, bridas, fuentes de alimentación... Toda esta información se

encuentra disponible en la página web de LinMot. Solamente se van a comentar las principales características de cada parte, si se quiere información más detallada, consultar la página web.

Tipo de elemento	Motor pequeño	Motor grande
Estátor	LINPS01-23x80F-HP-R	LINPS01-37x120F-HP-C
Vástago	LINPL01-12x270/230-HP	LINPL01-20x360/300-HP
Brida	LINPF02-23x90	LINPF02-37x100
Driver	LINC1250-EC-XC-1S-000	LINC1250-EC-XC-1S-000
Fuente de alimentación principal	LINS01-72/500	LINS01-72/1000
Fuente de alimentación secundaria	FUS-25D-24	FUS-100D-24
Cable	LINK05-Y/R-2	LINKS05-Y/C-4

Tabla 1. Elementos de los dos conjuntos motores

En la Tabla 1 se muestra un resumen del montaje de ambos actuadores con todos los componentes empleados.

2.1.1.1. ACTUADOR PEQUEÑO [13]

El montaje del actuador pequeño se compone de:

Estátor *LINPS01-23x80F-HP-R* (Figura 15).

Este motor tiene unas dimensiones de 162 mm de longitud, un diámetro externo de 23 mm y un diámetro interno de 12 mm, donde posteriormente se va a introducir el vástago. Su masa total es de 0,265 kg.

El estátor LINPS01-23x80F-HP-R es capaz de moverse a una velocidad máxima de 7,3 m/s, con una fuerza máxima de 67 N y una repetibilidad de $\pm 0,05$ mm.

En referencia a las letras finales del nombre del estátor (LINPS01-23x80F-HP-R), las letras HP hacen referencia a que es un componente perteneciente a la sección de alto rendimiento de la marca LinMot (HP: high performance); mientras que la R es el tipo de conector que tiene el estátor, donde posteriormente se conectará el cable que lo une con el driver.



Figura 15. Estátor LINPS01-23x80F-HP-R [13]

Brida LINPF02-23x90 (Figura 16).

La función principal de este componente es dar sujeción al estátor mediante dos tornillos. La brida tiene 4 taladros: dos de ellos roscados que sirven para apretar al estátor y que no haya movimiento relativo entre estos dos componentes y los otros dos para fijar la brida a una base.

Las medidas de este elemento son 90x55x30 mm.



Figura 16. Brida LINPF02-23x90 [13]

Vástago LINPL01-12x270/230-HP (Figura 17).

Este componente es la única parte móvil de todo el conjunto por el que se componen el actuador. El vástago tiene un diámetro de 12 mm, igual al diámetro interno del estátor donde va introducido y una longitud de 270 mm. Las letras HP en su nombre (LINPL01-12x270/230-HP) significan lo mismo que en el estátor (alto rendimiento). Su masa total es de 0,215 kg.

El vástago cuenta con un taladro roscado en ambos extremos de métrica M5, donde posteriormente se va a introducir un tornillo de ojo en uno de los extremos. A parte de estos taladros el slider cuenta con unas muescas en los extremos para introducir anillas de seguridad.



Figura 17. Slider LINPL01-12x270/230-HP [13]

El conjunto formado por el estátor LINPS01-23x80F-HP-R y el vástago LINPL01-12x270/230-HP ofrecen un actuador con una carrera máxima de 200 mm, con una carrera normal de 140 mm, que se va a ver reducida por la el montaje de unos topes de goma en los extremos del vástago, que hacen de finales de carrera.

La fuerza y la velocidad que es capaz de suministrar el estátor no se verán modificadas (una velocidad máxima de 7,3 m/s, con una fuerza máxima de 67 N y una repetibilidad de $\pm 0,05$ mm).

Driver LINC1250-EC-XC-1S-000 (Figura 18).

El driver es el encargado de controlar el actuador. Esta formado por varias entradas digitales y analógicas, donde van conectados tanto el estátor como las fuentes de alimentación, también cuenta con una entrada ethernet para poder conectar el driver a un ordenador, para configurar el movimiento del actuador.



Figura 18. Driver LINC1250-EC-XC-1S-000 [13]

Fuente de alimentación LINS01-72/500 (Figura 19).

Fuente de alimentación de 72 V, 500 W (6,7 A). Tiene unas dimensiones de 125x121x62 mm. Esta fuente de alimentación funciona con corriente monofásica.

Posee un enganche en uno de sus lados para ser acoplado posteriormente en un carril normalizado.

DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE 2 GRADOS DE LIBERTAD CON AMBOS ACTUADORES FIJOS



Figura 19. Fuente de alimentación LINS01-72/500 [13]

A mayores, también se va a utilizar en el montaje del actuador la fuente de alimentación *FUS-25D-24*, de la marca FullWat, de 24 VDC, 1 A, 25W. Esta es una fuente de alimentación de carril, de dimensiones 90x45x35 mm.

Cable *LINK05-Y/R-2* (Figura 20).



Figura 20. Cable LINK05-Y/R-2 [13]

La conexión del motor al driver se realiza mediante un cable de sección 0,5 mm² y una longitud de 2 m, con un conector tipo R en un extremo (este extremo va conectado al estator Estátor LINPS01-23x80F-HP-R) y por el otro cuenta con

un conector para controladores de las series C1100 y C1200 (en este caso se emplea un controlador de la serie C1200).

2.1.1.2. ACTUADOR GRANDE [14]

El montaje del actuador grande está compuesto por:

Estátor LINPS01-37x120F-HP-C (Figura 21).

El estátor tiene unas dimensiones de 216 mm de longitud, un diámetro interno de 20 mm, donde al igual que en el estátor del actuador pequeño se alojará posteriormente el vástago, y un diámetro externo de 37 mm. Su masa es de 0,74 kg.

En cuanto a sus características técnicas este estátor es capaz de suministrar una fuerza máxima de 255 N a una velocidad máxima de 3,8 m/s y una repetibilidad de $\pm 0,05$ mm. De igual manera que en el estátor del actuador pequeño, las siglas HP de su nomenclatura indican que es un motor que pertenece a línea de productos de alto rendimiento (HP: *high performance*), mientras que la letra C hace referencia al tipo de conector del estátor.



Figura 21. Estátor LINPS01-37x120F-HP-C [14]

Brida LINPF02-37x100.

La brida es exactamente igual que la del actuador pequeños, pero con unas dimensiones más grandes porque tiene que sujetar un estátor de mayor tamaño. Las dimensiones de la brida LINPF02-37x100 son 100x80x55 mm.

Vástago *LINPL01-20x360/300-HP*.

Este vástago es exactamente igual al del actuador pequeño. Cuenta con dos agujeros roscados en los extremos de métrica M8 y dos muescas para las anillas de seguridad; cómo se puede ver en su nomenclatura, lleva las siglas HP que hacen referencia a que pertenece a la gama de productos de alto rendimiento.

Las principales diferencias con el vástago del actuador pequeño son las dimensiones, ya que este cuenta con un diámetro mayor, de 20 mm y una longitud de 360 mm. Los agujeros roscados de los extremos también son de mayor tamaño, son de métrica M8 y su masa total es de 760 g.

El conjunto formado por el estátor *LINPS01-37x120F-HP-C* y el vástago *LINPL01-20x360/300-HP*, da lugar a un montaje capaz de ofrecer 240 mm de carrera máxima y 160 mm de carrera normal, que se verá reducida, al igual que en el actuador pequeño, por el montaje de unas piezas de goma en ambos extremos para hacer de finales de carrera. En cuanto a la velocidad y la fuerza capaz de suministrar son las mismas que las del estátor *LINPS01-37x120F-HP-C* (una fuerza máxima de 255 N a una velocidad máxima de 3,8 m/s y una repetibilidad de $\pm 0,05$ mm).

Driver *LINC1250-EC-XC-1S-000*.

El driver es el mismo modelo que el del actuador pequeño por lo que las características son idénticas y no es necesario repetirlo.

Hay que destacar que cada actuador tiene su driver, no lo comparten, por lo que habrá dos unidades idénticas.

Fuente de alimentación *LINS01-72/1000* (Figura 22).

Fuente de alimentación de 72 V, 1000 W (13,5 A). De dimensiones 230x183x66 mm. Esta fuente de alimentación da mayor potencia e intensidad que la del actuador pequeño, además esta utiliza corriente trifásica.



Figura 22. Fuente de alimentación LINS01-72/1000 [14]

A parte, también se va a utilizar la fuente de alimentación FUS-100D-24, de la empresa FullWat, de 24 VDC, 4,2 A y 100 W de potencia, que al igual que en el actuador pequeño, es una fuente de alimentación adicional de carril.

Cable *LINKS05-Y/C-4* (Figura 23)

La conexión entre el estátor y el driver se realiza con el cable *LINKS05-Y/C-4*, el cual tiene un conector en un extremo para controladores de las series C1100 y C1200 (al igual que en el cable del actuador pequeño, se emplea un controlador de la serie C1200) y en el otro extremo un conector tipo C para conectar con el estátor *LINPS01-37x120F-HP-C*.



Figura 23. Cable *LINKS05-Y/C-4* [14]

Este cable tiene una sección de 0,5 mm², 4 m de longitud y es de alta flexibilidad. Aunque externamente los cables de ambos actuadores parecen iguales, tienen conectores distintos lo que hace que no puedan ser intercambiados

2.1.2. TORNILLOS DE OJO

Se usarán dos tornillos de ojo normalizados por la norma DIN 444:2017 [15] (Figura 24), uno de rosca métrica M5 y de diámetro del ojo de 5mm, y otro de métrica M8 y diámetro del ojo de 8mm; que se roscarán en un extremo del *slider* del motor pequeño (LINPL01-12x270/230-HP) y del *slider* del motor grande (LINPL01-20x360/300-HP.)



Figura 24. Tornillos de ojo

2.1.3. BIELAS

Las bielas (Figura 25) que se emplearán han sido fabricadas por Haotool Store, son unos tensores de acero inoxidable de grado 304 resistentes a la oxidación superior empleados en náutica para regular la tensión de los cables y cuerdas. Se emplearán dos bielas de medidas distintas, una con un diámetro de pasador de métrica M5 y otra de métrica M8.



Figura 25. Biela [16]

Las bielas se componen de 3 piezas: el cuerpo, los extremos o bocas, y los pasadores.

El cuerpo es la parte central de las bielas, tiene forma cilíndrica hueca y roscado interiormente en ambos lados para posteriormente roscar los extremos en su interior.

En los extremos se componen de una parte en forma de “C” con un agujero donde posteriormente se introducirá el pasador y una barilla roscada para unirse al cuerpo.

En función del diámetro del pasador que se necesite nuestra biela tendrá unas dimensiones (Figura 26), esto no influirá en el montaje ya que la longitud de las bielas se puede variar con facilidad, simplemente introduciendo los extremos más o menos para que se ajusten a las necesidades.

Se necesitará una biela con el diámetro del pasador de 8 mm para el motor grande que lleva un tornillo de ojo de diámetro 8mm (biela grande), y una biela de diámetro del pasador 5 mm (biela pequeña) para el motor pequeño por la misma razón.

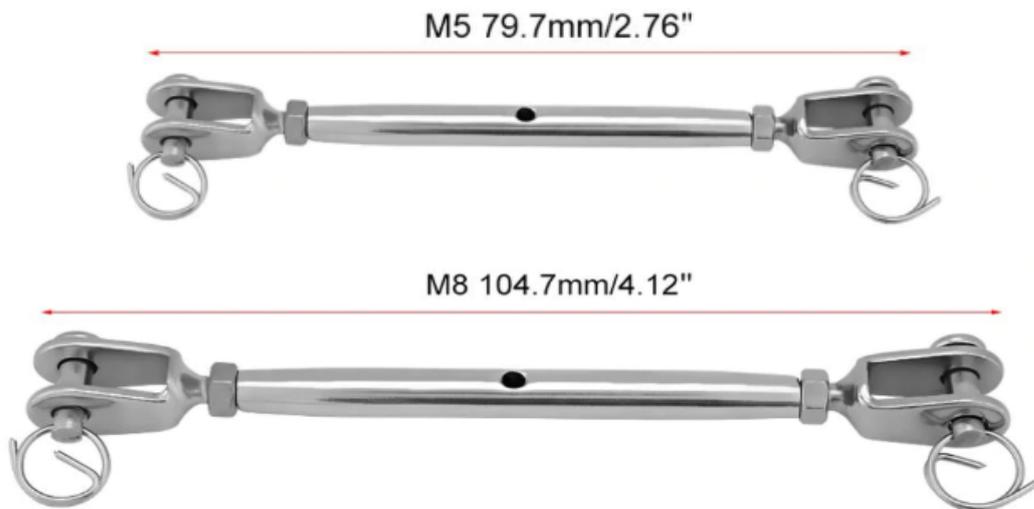


Figura 26. Medidas mínimas de las bielas [16]

2.1.4. PLACA

El material que se empleara en la placa de la mesa, se ha comprado a la empresa ALUCOBOND [17].



Figura 27. Composición de la placa de ALUCOBOND [17]

Es un panel compuesto por un núcleo de tipo alveolar llamado *honey comb* (Figura 27 y Figura 28), recubierto con dos chapas de una aleación de peraluman (AlMg/5005A) resistente a la corrosión, de entre 0,5 y 1mm (d1 y

d2) de espesor (una a cada lado). El espesor total (H) de la placa puede variar desde 5,5 mm hasta los 50 mm. A este material la empresa le ha llamado ALUCORE.

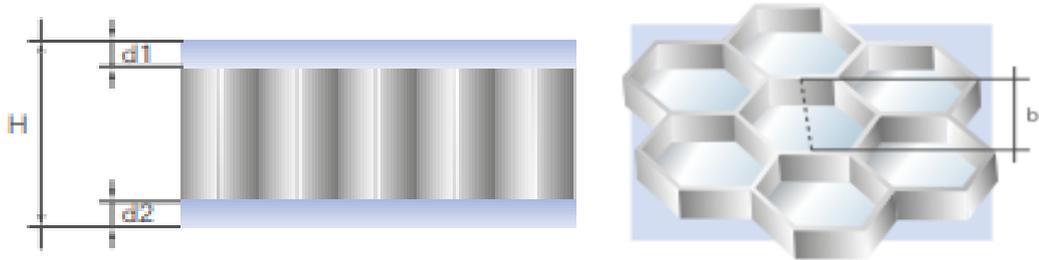


Figura 28. Dimensiones de la placa de ALUCOBOND (izq.) y del honey comb (dcha.) [17]

El *honey comb* consiste en láminas de aluminio de la aleación AlMn (EN AW 3003) tiene un rango de dimensiones de la celda (b) de entre 6,3 mm y 12,7 mm. El proceso continuo de fabricación hace que se puedan fabricar placas de hasta 9 m de largo y 1,5 m de ancho. Se usa principalmente en el ámbito de la construcción. Ya sea tanto en recubrimientos de fachadas, cubiertas, tejados ligeros... como en reformas interiores.

Entre sus propiedades más destacables se encuentran:

- Material muy ligero, simultáneamente con una extrema rigidez a la flexión.
- Amortigua las vibraciones.
- Fácil aplicación con herramientas habituales, p.ej. para recortar y perforar.
- Excelente resistencia a la intemperie.

A continuación, se presentan tres graficas que comparan diferentes características del ALUCORE frente a otros materiales metálicos empleados en la construcción, apoyando la decisión tomada para la elección de este material en la etapa de diseño. Las características que se comparan son el peso, la rigidez y el espesor.

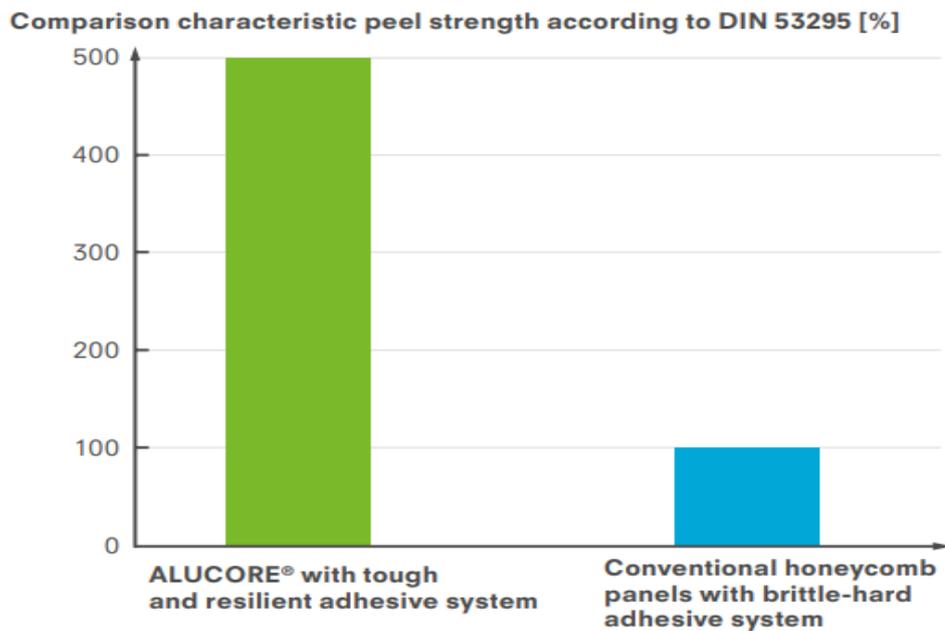


Figura 29. Gráfica de comparación de la dureza según la norma DIN 53295 [17], [18]

Según la norma DIN 53295:1982 [18], la cual recoge los ensayos de pelado de las placas sobre el núcleo en paneles sándwich. El Alucore tiene una ventaja frente a otros materiales similares, simplemente por el pegamento que se usa en la fase de encolado de las placas sobre el núcleo alveolar, ya que al estar encolado de modo viscoplástico en un modo de fabricación continua no es susceptible de rotura frágil, sino viscoplástica, destacando así la adherencia de sus capas de cubierta haciéndolo que tenga una gran resistencia mecánica a la tracción. Esta nueva forma de encolado de las placas sobre el núcleo aumenta la resistencia en un 500% frente al encolado convencional usado por otras empresas en materiales de composición similar (Figura 29).

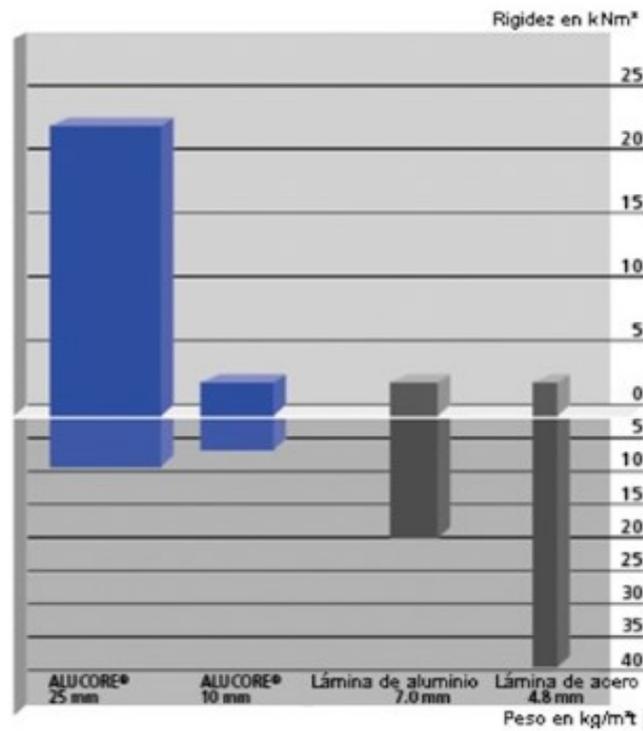


Figura 30. Gráfica de comparación de la rigidez [17]

En la Figura 30 se puede apreciar como una plancha de ALUCORE de 10 mm de espesor, tiene la misma rigidez a flexión que una plancha maciza de aluminio de 7 mm o que una también maciza de acero de 4,8 mm.

Aunque el ALUCORE necesite un espesor algo mayor que el aluminio o el acero para conseguir una misma rigidez (es algo casi insignificante ya que es de 5 mm aproximadamente respecto al acero); esto se ve compensado por su peso infinitamente menor (una placa de 1 m² de alucore pesaría aproximadamente 5 kg frente a los 20 kg del aluminio y los 40 kg del acero).

Un ahorro bastante mayor en peso, aspecto muy importante a la hora de tener en cuenta en el diseño de la mesa sísmica; frente a un ligero aumento del espesor.

También se puede observar cómo se dispara la rigidez en cuanto se aumenta el espesor del ALUCORE, sin aumentar en exceso el peso de la placa. Aspecto a tener en cuenta en caso de que se necesite una rigidez mayor.

DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE 2 GRADOS DE LIBERTAD CON AMBOS ACTUADORES FIJOS

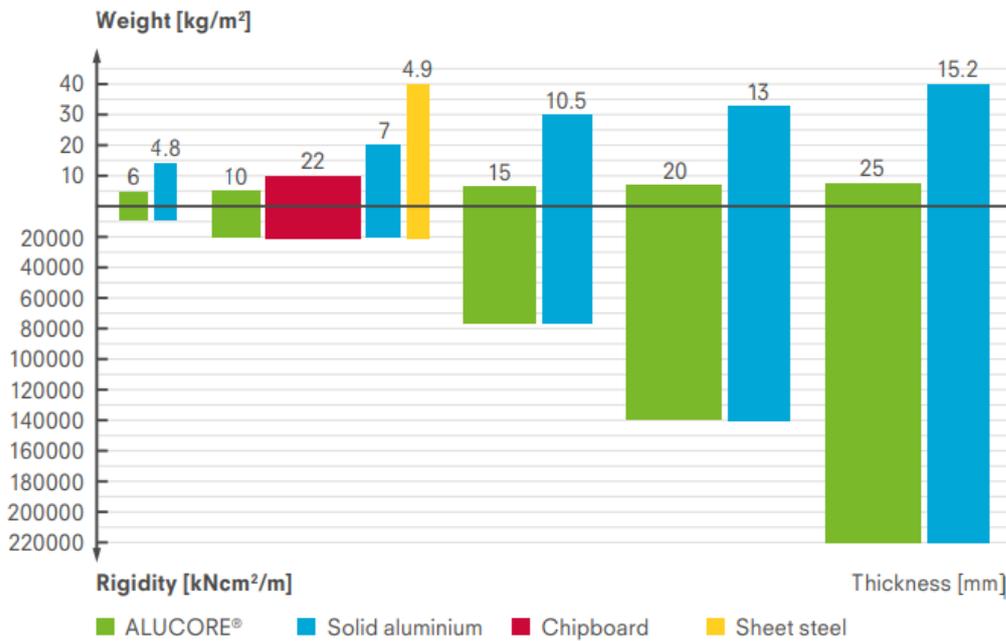


Figura 31. Gráfica de comparación peso-rigidez [17]

La Figura 31 hace una comparación similar a la de la gráfica anterior, pero en este caso se centra en comparar el ALUCORE con una plancha de aluminio.

De esta gráfica lo más reseñable es como a pesar de aumentar el espesor de la placa de ALUCORE el peso se mantiene casi constante, como se puede observar aumentando más de 4 veces su espesor el peso no llega ni a ser el doble, esto no sucede con el aluminio que su peso si es proporcional al espesor.

Para este trabajo de fin de grado se va a emplear un panel de ALUCORE de 10mm de espesor y con forma cuadrada de 40 cm de lado.

A continuación, en la Tabla 2 se pueden observar todas las características técnicas del ALUCORE empleado.

**DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE 2 GRADOS DE LIBERTAD
CON AMBOS ACTUADORES FIJOS**

		ALUCORE® / ALUCORE® A2						
Standard thickness [mm]		Unit	6	10	10.5	15	20	25
Cover sheet thickness, front side	[mm]		1.0					
Cover sheet thickness, rear side	[mm]		0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0
Weight	[kg/m ²]		4.7	5.0	6.3	6.7	7.0	7.3
Technical properties								
Section modulus	W	[cm ³ /m]	2.5	4.5	8.63	13.1	18.1	23.1
Rigidity	EJ	[kNcm ² /m]	7100	21 900	34 800	75 500	138 900	221 600
Alloy of cover sheet (accord. to EN 485-2 / EN 1396:2007)			EN AW-5005A (AlMg1) H22/H42			EN AW-5005A (AlMg1) H28/H48 (H22 / H42)		
Modulus of elasticity	E	[N/mm ²]	70 000					
Tensile strength of cover sheets	R _m	[N/mm ²]	≥ 125			≥ 185 (125)		
0.2% Proof stress	R _{m0.2}	[N/mm ²]	≥ 80			≥ 160 (80)		
Elongation	A ₅₀	[%]	≥ 5			≥ 2 (5)		
Linear thermal expansion	α		2.4 mm/m at 100° C temperature difference					
Core								
Bare compressive strength		[N/mm ²]	approx. 2.5					
Cell size		[inch] [mm]	3/8 (9.5)					
Surface								
Lacquering			both sides polyester platinum white or fluoropolymer lacquer (e.g. PVDF), one or both sides					
Brilliance (standard)		[%]	25-40					
Hardness (pencil hardness)			HB-F					
Acoustical properties								
Sound absorption factor	α _s		0.05					
Air-borne sound insulation index (accord. to ISO 717-1, ISO 140-3)	R _w	[dB]	21	21	21	22	23	25
Thermal properties								
Thermal conductivity (depends on total panel thickness incl. cover sheets)	λ	[W/mK]	0.95	1.35	1.42	1.78	2.25	2.70
Thermal resistance	R	[m ² K/W]	0.0063	0.0074	0.0074	0.0084	0.0089	0.0093
Heat transition coefficient	U	[W/m ² K]	5.67	5.64	5.64	5.61	5.59	5.58
Temperature resistance		[°C]	-40 to +80					

Tabla 2. Propiedades del ALUCOBOND [17]

2.1.5. GUIAS

Las guías (Figura 32) que se han empleado para la construcción de la mesa sísmica son guías laterales para cajones, que se han comprado en Leroy Merlín, por lo que no ha sido necesaria su fabricación [18].

Están fabricadas en acero cincado, cada una tiene un peso de 1,16 kg, usan un rodamiento de bolas a ambos lados de la guía lo que las hace más resistentes, la longitud de la carrera varia de 35 cm a 50 cm como máximo (50 cm en cada sentido teniendo una carrera total de 100 cm), soportan hasta 35 kg cada guía (se van a usar 2 en cada dirección por lo que van a soportar un total de 70 kg).

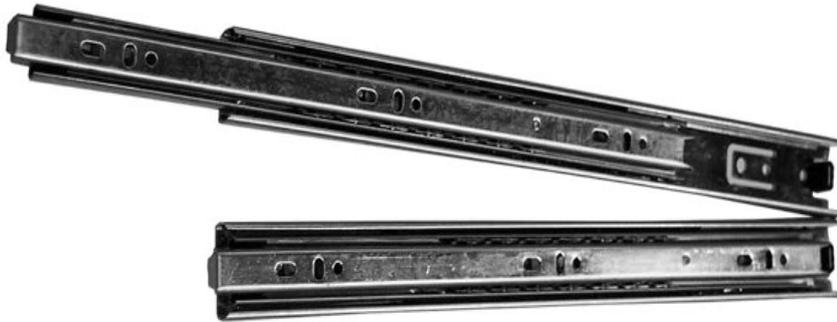


Figura 32. Guías [19]

Se necesitarán un total de 4 guías, dos en la dirección del eje X que irán unidas a la base y que se denominaran guías inferiores, y dos en la dirección del eje Y que se soldaran a las guías inferiores y unidas a la placa de ALUCORE.

2.1.6. BASE

Como base se va a usar una tabla de madera de aglomerado de dimensiones 80 x 80 cm de largo y ancho y 3 cm de alto, también disponible en el laboratorio, donde después se anclará todos los componentes, así como los drivers de los motores.

2.2. DISEÑO

En este apartado se va a comentar por un lado cómo se ha diseñado la mesa, y por otro lado como se han adaptado el resto de componentes comerciales para que el funcionamiento de todo el conjunto sea el mejor posible.

Dentro de este apartado, también se va a hablar acerca de diseños pensados que por determinados motivos no se llegaron a ejecutar.

El diseño que se ha elegido finalmente (Figura 33), es uno muy similar al creado por la empresa VZERO de 2 grados de libertad (Figura 9) con los dos actuadores fijos. En un primer momento se pensó en seguir un diseño similar al de la empresa QUANSER llamado SHAKE TABLE II (Figura 5) apilando dos mesas de un grado libertad.

Desde el punto de vista cinemático es mucho más simple el diseño de QUANSER, pero es una mesa más pesada al usar dos placas, además el hecho de montar un actuador sobre la primera placa produce un desequilibrio teniendo que añadir otra masa para equilibrar el conjunto.

El diseño de VZERO tiene a su favor que es más ligero y que es fácilmente desmontable que es uno de los objetivos que se le pusieron a este trabajo de fin de grado, pero el problema añadido de una cinemática más compleja para su posterior estudio.

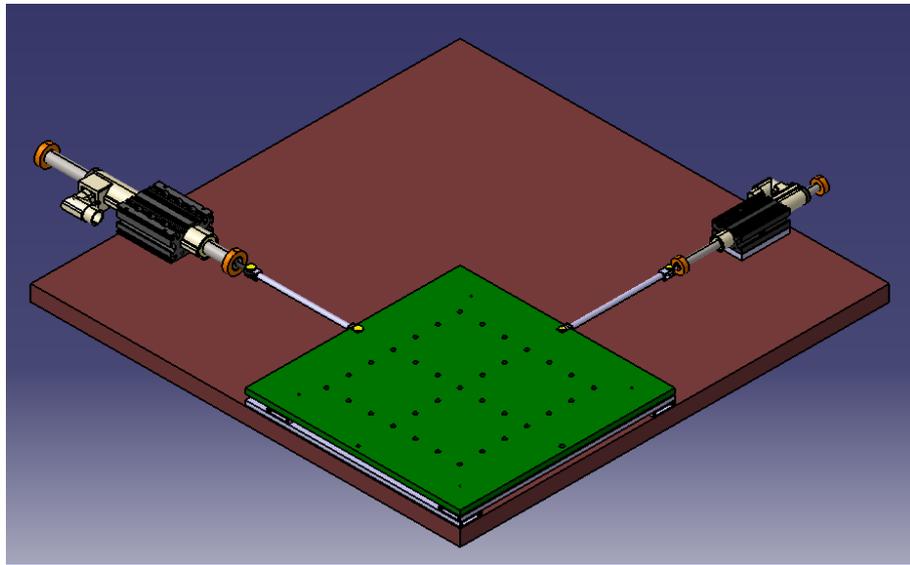


Figura 33. Modelado en CATIA V5 de la mesa sísmica

Los planos de las piezas se incluirán en el ANEXO I: PLANOS donde se detallarán las medidas y la posición de los taladros.

2.2.1. DISEÑO DE LA PLACA

Se empleará una plancha cuadrada de 40 x 40 cm de largo y ancho y 1 cm de espesor.

A la placa se le practican un total de 37 taladros (Figura 34) pasantes de tres medidas distintas 5, 7 y 8 mm, con un taladro de columna y añadiendo una sufridera de madera en la parte posterior de la placa, esta parte se desarrolla con más profundidad en el Capítulo 5: Prototipado.

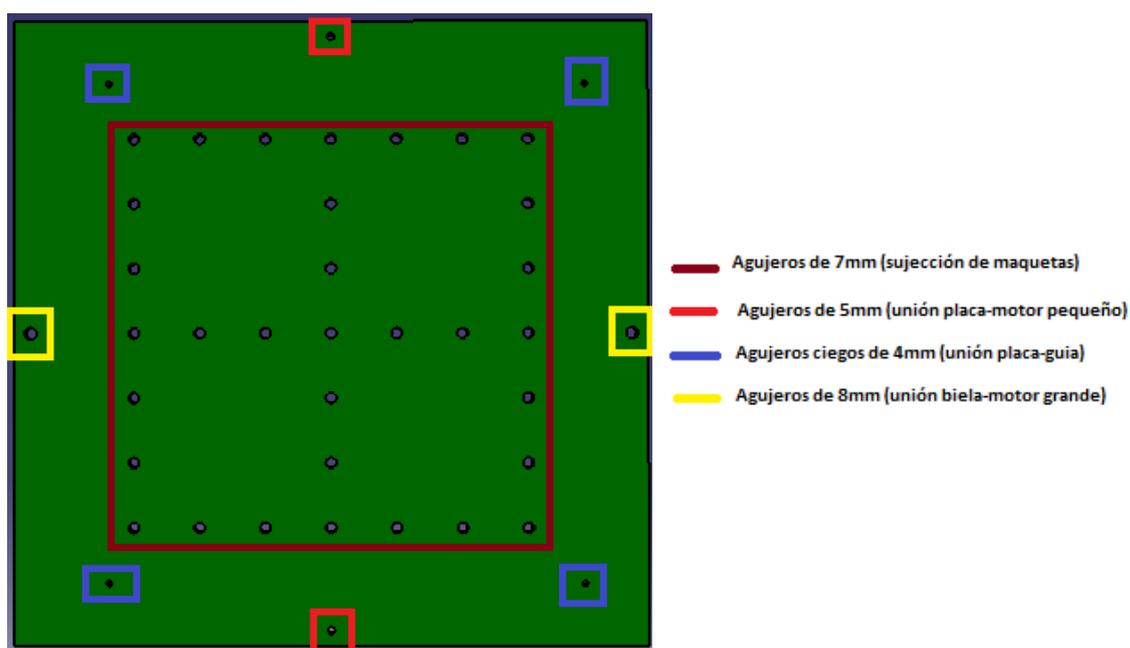


Figura 34. Taladros de la placa (Vista inferior)

Se realizarán dos taladros de diámetro 5 mm y otros dos de diámetro 8 mm, cuya función será la de unir la biela a la placa. Estos taladros posteriormente se endurecerán o macizarán con resina o con silicona, para que la placa tenga una mayor resistencia en ese punto y no se deforme.

Los 31 taladros restantes de diámetro 7 mm se realizarán para unir posteriormente las maquetas que queremos ensayar (TFG: Prototipado de una maqueta modular multidireccional [11] (Figura 14), TFG: Diseño, construcción y caracterización de una maqueta de edificio multiplanta para prácticas de vibraciones [12]), por lo que deberán estar distribuidos de tal forma que posteriormente encajen sin problemas.

A parte de estos 37 taladros pasantes que perforan la placa entera, se realizaran 4 taladros de diámetro 4 mm en la chapa inferior de la placa para posteriormente remachar la parte superior de las guías a la placa.

En estos agujeros se introducirán 4 remaches de 4 mm de diámetro y 7 mm de longitud para remachar un espesor aproximado de 3 mm.

2.2.2. DISEÑO UNION PLACA-BIELA

Como se aprecia en la Figura 35, se unen a través de los agujeros practicados en el borde de la placa mediante el pasador que traían las bielas.

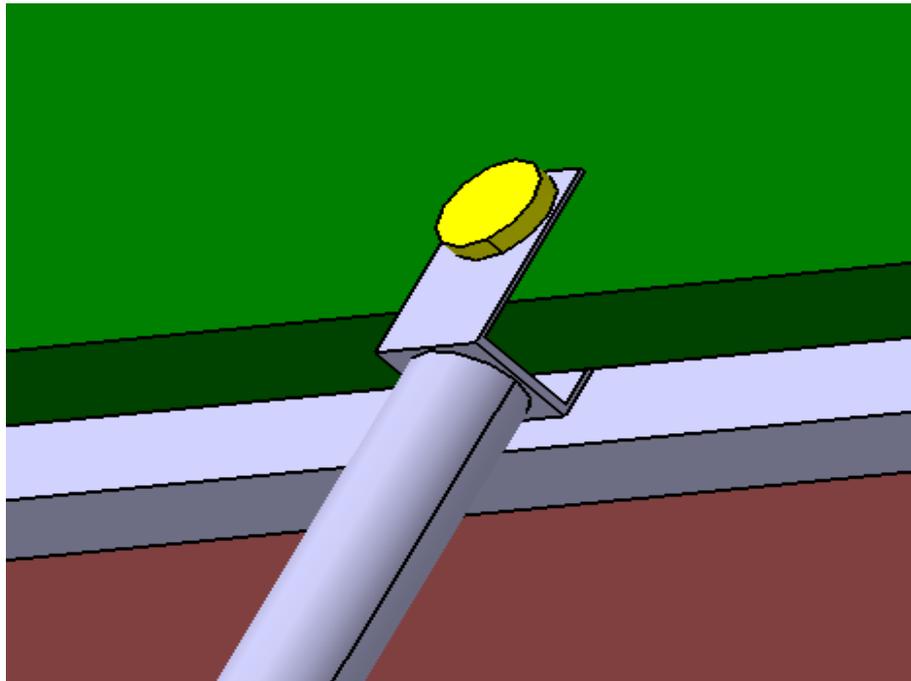


Figura 35. Modelado de la unión biela-placa. En amarillo el pasador, en verde la placa y en gris la biela

Estos agujeros son de diámetro 5 mm para la biela pequeña que une el motor pequeño con la placa, esta biela tiene un pasador de diámetro 5 mm; y de diámetro 8 mm para la biela grande por la misma razón.

Estos agujeros de diámetros 5 y 8 mm se macizarán a su alrededor como ya se ha comentado en el apartado anterior para que aguanten mejor a fatiga y el agujero tarde más en deformarse, teniendo así menos holgura entre pasador y agujero.

Estos agujeros se practicarán a 1 cm del borde de la placa, se alinearán para que los vástagos de los actuadores queden totalmente perpendiculares al eje de los agujeros

2.2.3. DISEÑO UNION BIELA-MOTOR

Para esta unión se introducirá un tornillo de ojo en el extremo roscado de cada vástago. Para el motor pequeño utilizaremos un tornillo de ojo de métrica M5, con un diámetro de ojo de 5 mm (DIN444 M5x30) y para el motor grande un tornillo de ojo de M8 con un diámetro de ojo de 8 mm (DIN444 M8x40) (Figura 36).

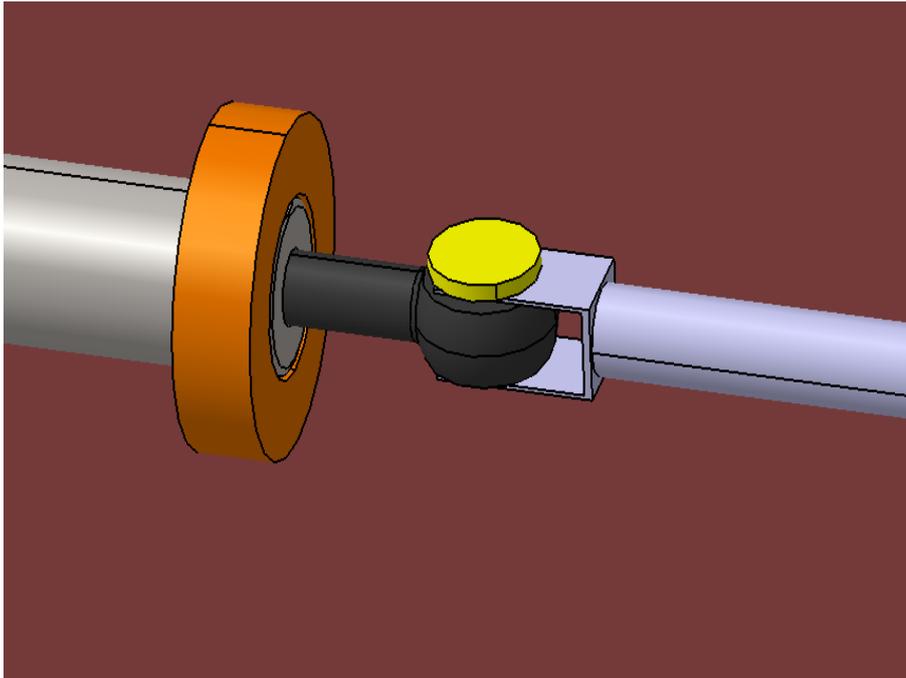


Figura 36. Modelado de la unión biela-motor. En gris la biela, en amarillo el pasador, en negro el tornillo de ojo y en naranja la goma de final de carrera.

Estos tornillos están normalizados según la norma alemana DIN 444:2017 [15]. Para unir la biela al tornillo se utilizará el propio pasador que viene con la biela.

2.2.4. DISEÑO DE LA BASE

A la base se le van a practicar 8 taladros pasantes (Figura 37) según la norma ISO 273:1979 [19], que establece los diámetros de los taladros pasantes para cada rosca métrica, anteriormente citada.

De estos 8 taladros, 4 van a ser para sujetar los actuadores a la base (2 taladros por cada actuador) mediante un perno y una tuerca y los otros 4 van a ser para sujetar el módulo interno de las guías inferiores (2 taladros por guía).

Para que el montaje y desmontaje de los actuadores sea más fácil, todos los pernos van a ser de métrica M5, de cabeza cilíndrica y hueco hexagonal, normalizados según la norma DIN EN 912:2011 [20] (tornillo DIN 912 M5 x 90).

La cabeza de todos estos pernos quedará embebida en el propio tablero por su parte inferior, por lo que será necesario realizar un taladro en la cara inferior del tablero de diámetro 8,5 mm y de 5mm de profundidad. Estos taladros se harán de forma aproximada ya que su única función es que la cabeza no sobresalga de la parte inferior del tablero.

Estos tornillos se sujetarán mediante unas tuercas de mariposa de métrica M5 fácilmente desmontables. Estas tuercas se encuentran normalizadas dentro de la norma DIN 315:2016 [21] (tuerca DIN 315 M5).

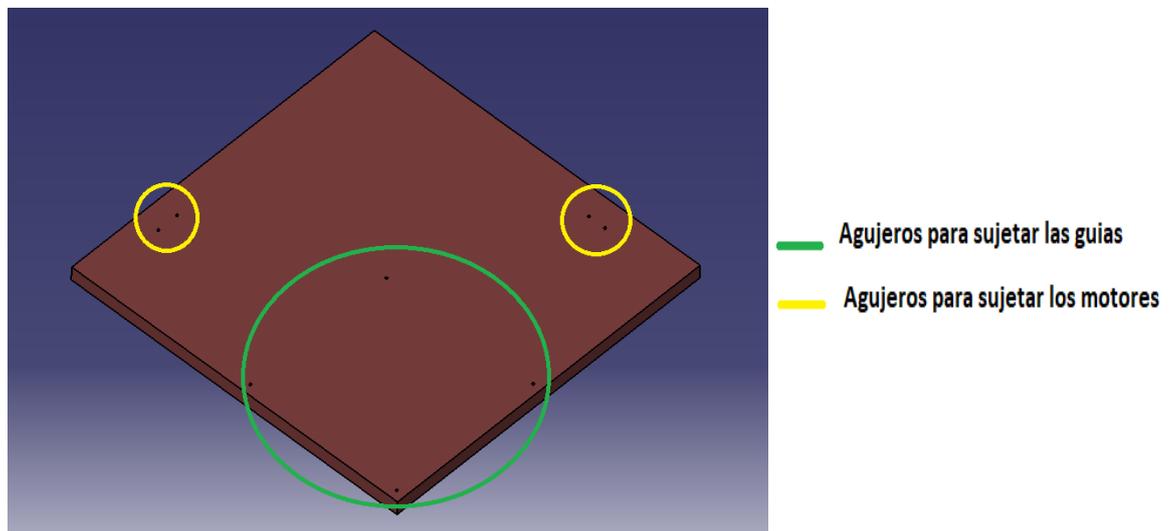


Figura 37. Taladros en la base

A parte de los agujeros necesarios para sujetar los actuadores son necesarios otros 4 agujeros del mismo diámetro ya que se utilizarán 4 pernos para sujetar las guías a la base (2 pernos por cada guía que se apoya en la base)

Se emplearán pernos de métrica M5 al igual que los que sujetan los actuadores, pero con alguna diferencia. Estos pernos tendrán la cabeza en la parte superior del tablero y no quedara embebida en el tablero, en este caso será la tuerca la que quede embebida, porque la cabeza se utilizara como final de carrera para que no se salgan los rodamientos de bolas.

Los pernos empleados serán de cabeza de gota ranurada normalizados por la norma ISO 2010:2011 [22] (tornillo ISO 2010 M5 x 40), sujetos por una tuerca

hexagonal de métrica M5 recogidas en la norma ISO 4032:2012 [23] (tuerca ISO 4032 M5).

De igual manera que los agujeros para sujetar los motores, se necesitara un taladro posterior en la cara inferior de la base para esconder las tuercas de estos tornillos. En este caso el segundo taladro será de diámetro 10 mm y profundidad 5mm.

Para poder observar con mayor claridad la posición y profundidad de cada uno de los taladros, consultar el ANEXO I. PLANOS, el plano de la base.

	Perno	Tuerca	Cantidad
Guías	ISO 2010 M5 x 40	ISO 4032 M5	4
Actuadores	DIN 912 M5 x 90	DIN 315 M5	4

Tabla 3. Pernos y tuercas empleados en la sujeción a la base.

En la Tabla 3 se recoge un resumen de todos los pernos y tuercas empleados en sujetar las guías y los actuadores a la base.

2.2.5. DISEÑO DE LAS GUÍAS

Se van a emplear cuatro guías, dos para el eje X (se denominan guías inferiores) y otras dos para el eje Y (se denominan guías superiores). Con dos guías (una por cada eje) sería suficiente para que funcionase correctamente, pero deberían estar perfectamente centradas, alineadas con las bielas y sería necesario eliminar casi por completo la holgura de la unión de la biela con la placa, ya que la más mínima desviación produciría un momento que haría que se torsionase la mesa, dejándola inservible.

Aunque con cuatro guías las pérdidas por rozamiento son mayores, realmente no afecta al correcto funcionamiento de la mesa sísmica, haciendo que su montaje, aunque tenga más piezas, no es necesario que sea tan preciso.

Las guías utilizadas son guías extensibles, formadas por tres módulos. Se desmontará el módulo más externo de las 4 guías, al que denominaremos modulo desmontado, porque no es necesaria tanta carrera, quedándose en dos módulos (Figura 38) facilitando así su montaje y posterior funcionamiento.

Los dos módulos se pueden diferenciar claramente, uno que se va a llamar el módulo externo, que es el que lleva el rodamiento de bolas alojado en su interior y sobre el que se monta el módulo interno.

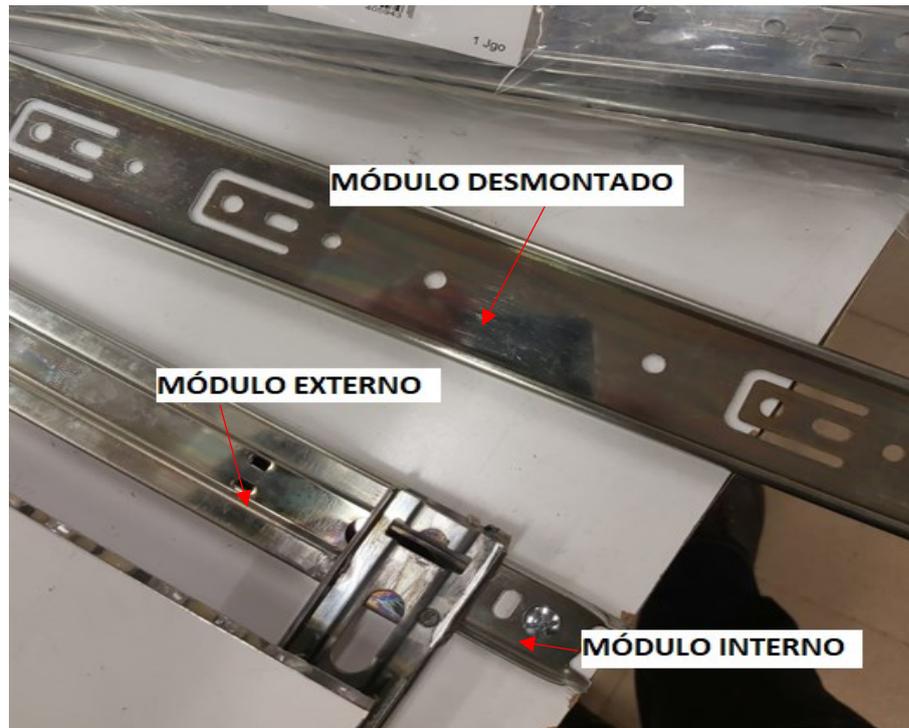


Figura 38. Partes de las guías

La disposición final de las guías es formando un cuadrado (Figura 41), las dos guías inferiores, paralelas al eje X. Se van a atornillar a la base apoyando en el módulo interno en los agujeros anteriormente practicados en la base.

Sobre estas se montarán las guías superiores, de tal forma que los módulos externos de las superiores apoyen sobre los módulos externos de las inferiores y sean paralelas al eje Y. una vez dispuestas las guías superiores en la posición indicada se soldarán a las inferiores con 4 puntos de soldadura (Figura 39), uno por cada unión.

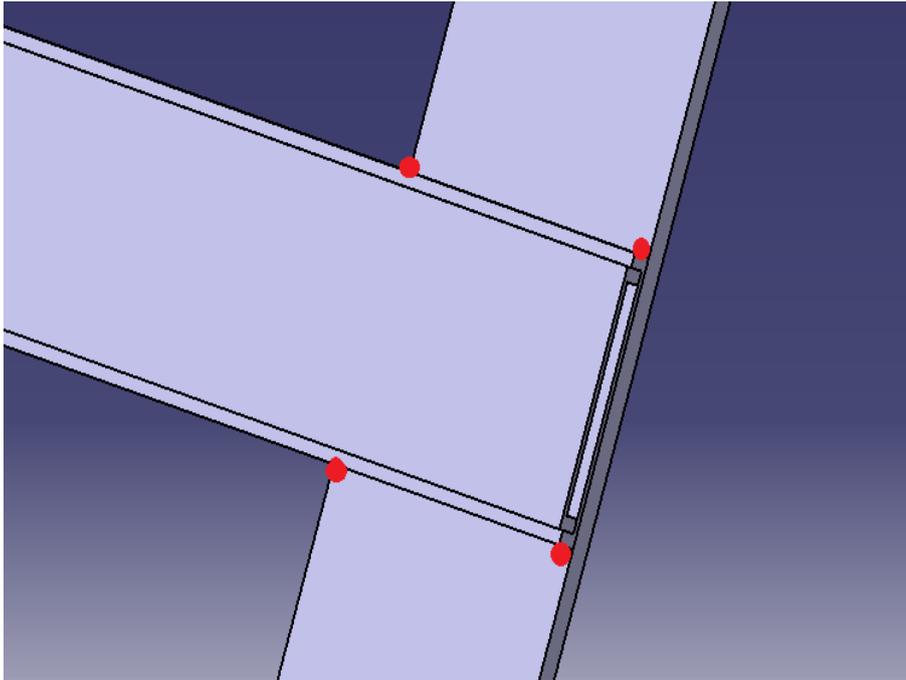


Figura 39. En rojo los 4 puntos de soldadura que se dará a cada uno de las guías

El módulo interno de las guías superiores se remachará a la placa, con 4 remaches, uno en cada extremo de cada guía, a su vez el módulo interno de las guías inferiores se sujetará a la base mediante un tornillo y una tuerca que quedará embebida en la base.

Los módulos externos de las 4 guías tienen un agujero de 3 mm en que introduciremos un remache en cada agujero sin quedar remachado a nada, simplemente tendrá la función de final de carrera para que no se salga el rodamiento de bolas. En el extremo contrario de la guía hay unas pestañas que se levantarán con la misma finalidad que el remache (Figura 40)

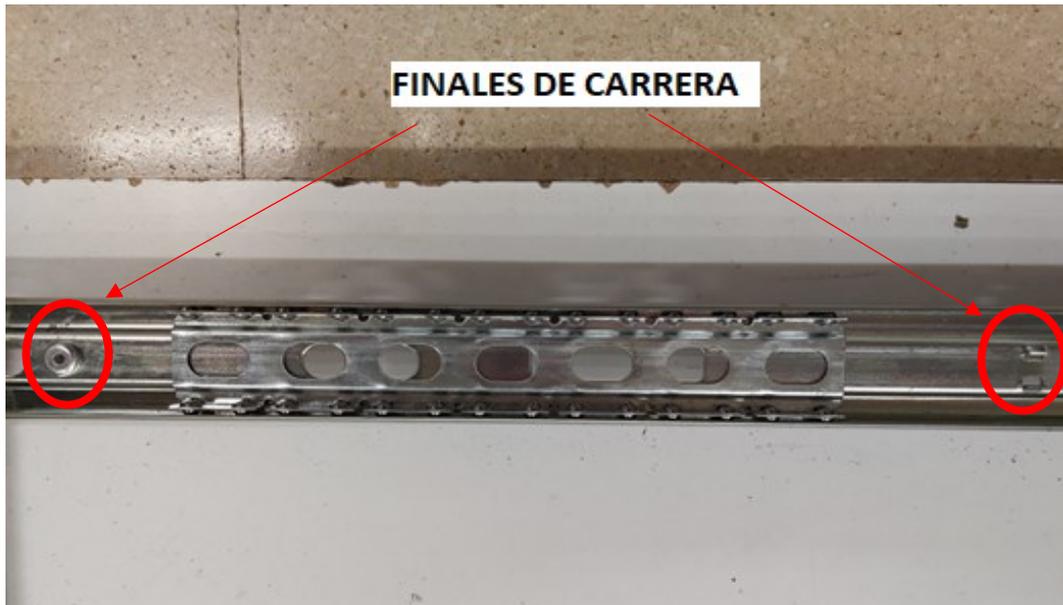


Figura 40. Finales de carrera de las guías

Hay que añadir, que la guía superior que está más cerca del agujero practicado en la placa, para la unión de la biela del actuador grande con la placa, hay que desplazarla 4 cm hacia el interior del cuadrado (Figura 41) para que no interfiera con dicho agujero.

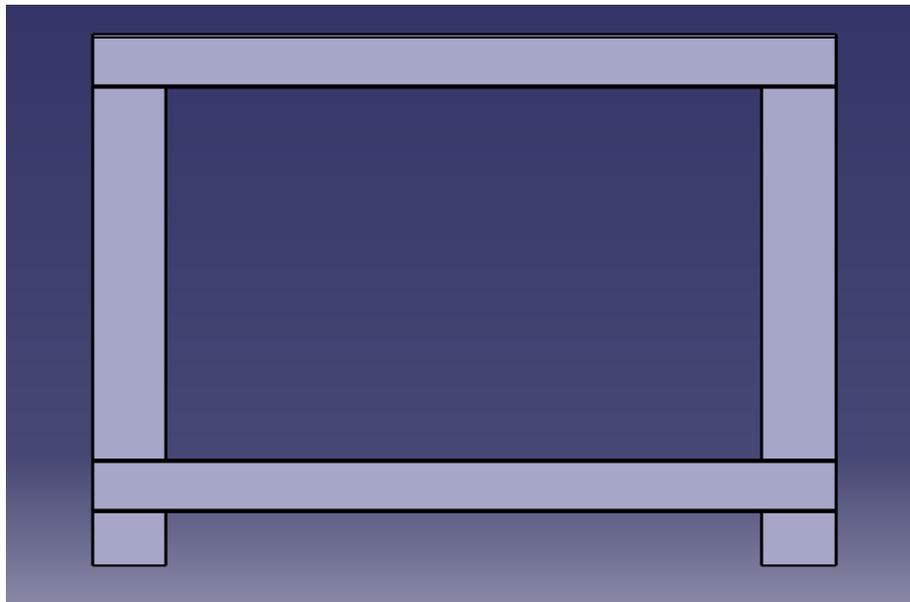


Figura 41. Posición de las guías una vez soldadas.

2.2.6. DISEÑO DE LA LONGITUD DE LAS BIELAS

El diseño escogido para esta mesa sísmica hace que cuando un actuador esté funcionando, la placa se mueva describiendo un arco de circunferencia de radio igual a la longitud de la biela.

Los actuadores empleados tienen una carrera muy pequeña en comparación con el radio de la circunferencia, por lo que para pequeños desplazamientos el arco barrido por la mesa será muy pequeño pudiéndose aproximar a una recta.

Lo que significa esto es que cuanto más largas sean nuestras bielas, más grande será el radio de la circunferencia que describe la mesa y menor el error en la aproximación supuesta en el párrafo anterior.

Para ello buscaremos que la longitud de las bielas sea la máxima posible, lo que limitará esta longitud es cuánto podremos separar los actuadores de la placa.

Como tenemos dos actuadores de distinto tamaño si ambos los colocamos al borde de la base tendremos bielas de distinto tamaño. Esto no es interesante puesto que posteriormente dificultará las ecuaciones en el estudio cinemático de la mesa sísmica.

Para conseguir dos bielas de la misma longitud lo que se va a hacer es variar la posición del actuador pequeño adelantándolo o retrasándolo:

- Respecto del borde de la base.
- La posición del estátor dentro de la brida.

Modificando estos dos parámetros se consigue una longitud de biela máxima de 20 cm (Figura 42).



Figura 42. Longitud de las bielas

2.2.7. DISEÑO DEL ZANCO DEL MOTOR PEQUEÑO

Al querer abaratar al máximo los costes, se ha empleado material ya existente en el laboratorio. Esto tiene algunas consecuencias que de haber sido comprado nuevo no hubiese pasado. Esto es un claro ejemplo de lo sucedido con los actuadores que de haberse comprados nuevos serían los dos iguales.

Una vez soldadas las guías, atornilladas a la base y remachadas a la placa, se observa que la altura a la que queda el punto medio de la placa es de 25 mm respecto de la base

Para el actuador grande no es problema ya que el tornillo de ojo roscado en el vástago queda a la misma altura no siendo necesario ni elevarlo ni bajarlo.

Pero el actuador pequeño queda bastante por debajo del punto medio de la placa por lo que es necesario elevarlo, para ello se cortará una pieza de aluminio con forma de rectángulo con las mismas dimensiones que la brida que sujeta al actuador pequeño (90 x 55) y 10 mm de espesor.

A este zanco se practicarán 2 taladros pasantes en la misma posición que los existentes en la brida para que los 2 pernos que se emplean para su sujeción a la base.

2.2.8. DISEÑOS DESCARTADOS

2.2.8.1. DISEÑO SIMILAR A LA SHAKE TABLE II

En un principio se optó por imitar el diseño de la SHAKE TABLE II de QUANSER anteriormente elaborado en un TFG de la universidad de Valladolid (Diseño y prototipado de una mesa sísmica de dos grados de libertad [10]), intentando mejorar ese diseño ya que presentaba grandes limitaciones por su gran peso.

Las mejoras que se pensaron iban en la línea del aligeramiento de las placas de aluminio, sustituyéndolas por el ALUCORE de la empresa ALUCOBOND; un material infinitamente más ligero, pero con un comportamiento a fatiga muy malo ante esfuerzos que crean momentos flectores en los taladros de la placa. Esto sucedería si metiésemos los motores debajo de las placas e imitar el sistema de sujeción del Trabajo de fin de Grado citado en el párrafo anterior[10]; acababa deformando el taladro y dejando inservible la mesa sísmica.

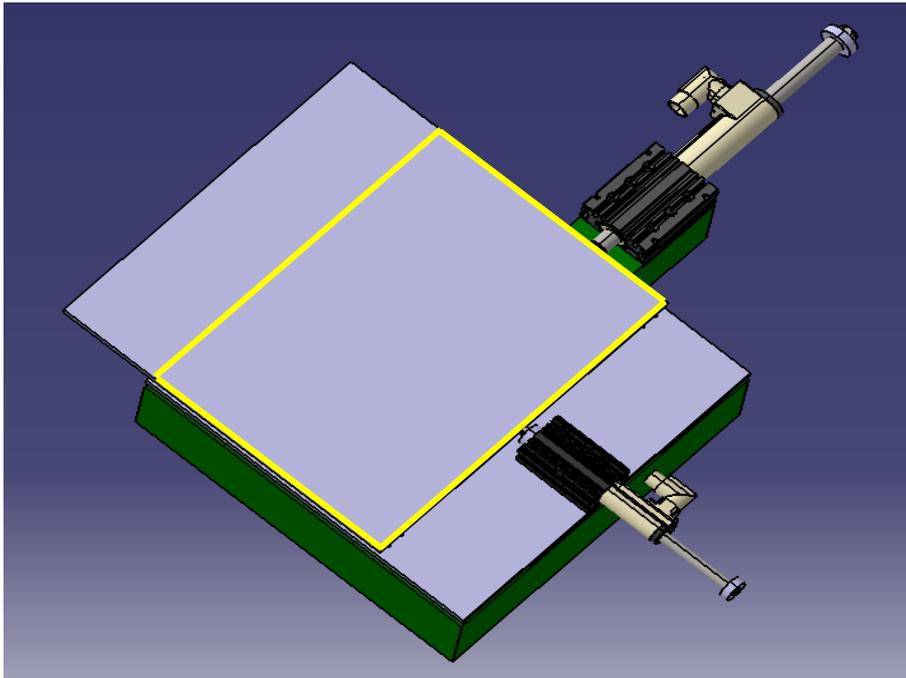


Figura 43. Modelado en CATIA V5 de un diseño similar al SHAKE TABLE II de 2 grados de libertad. En amarillo la zona útil de la mesa

Ante esta limitación era necesario sacar los actuadores de debajo de las placas y ponerlos a la misma altura de estas. Lo que nos dejaba dos importantes limitaciones:

-una mesa desequilibrada, al montar un motor fuera del centro de gravedad de la placa inferior, lo cual necesitaría ser corregido añadiendo masas en distintos puntos hasta equilibrarla.

-una zona útil para montarlas maquetas muy reducida (Figura 43).

Con las limitaciones anteriormente expuestas se decidió desechar este diseño y tras investigar sobre posibles diseños, y se optó por el diseño de la empresa VZERO con los dos actuadores fijos a la base.

2.2.8.2. INTRODUCIR UN TORNILLO DE OJO EN LA PLACA

Para unir la placa con la biela se pensó en vaciar dos zonas de la placa para posteriormente introducir un tornillo de ojo y por último introducir resina o algún pegamento suficientemente fuerte para rellenar la zona anteriormente vaciada, para que no se debilitara.

Tras realizar algunas pruebas en el laboratorio del departamento con este diseño y distintos tipos de resinas y pegamentos, se concluyó que no era la mejor manera de unir la placa con la biela ya que con la repetición del movimiento el tornillo de ojo cogía juego y se acababa saliendo.

2.2.8.3. PLACA DE AGARRE

Se diseñó como primera opción para la unión de la biela con la placa.

Estaba compuesta de dos piezas, la primera era una chapa doblada de aluminio en forma de "C" (Figura 44), de 1 mm de espesor y de dimensiones 30 x 50 mm; y la segunda un tornillo de ojo del diámetro necesario en función de si fuese para el actuador grande o pequeño.

Estas dos piezas se unían mediante una soldadura de cordón alrededor del tornillo de ojo.

Se agarraba a la placa mediante 6 remaches de diámetro 4 mm dispuestos en 2 filas de 3 remaches.

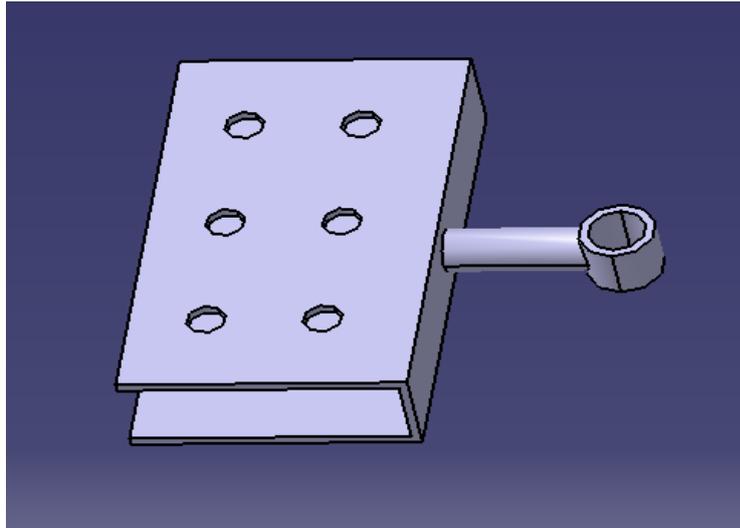


Figura 44. Modelado de la placa de agarre

Aunque realmente es la mejor manera de ejecutar la unión de la placa con la biela se acabó desechando por los siguientes motivos:

- Compleja elaboración, se tendría que encargar a alguna empresa especializada en piezas de aluminio, lo que supondría un aumento sustancial en el coste de la mesa sísmica.
- Dificultad a la hora de ejecutar la soldadura sobre una chapa de aluminio tan fina.
- Se debería desplazar la guía que pasa justo por debajo para que no choque con esta pieza.

CAPÍTULO 3: PROTOTIPADO

Este capítulo de prototipado se va a dividir en tres apartados: el apartado de fabricación, el apartado de montaje y un último apartado de cómo utilizar la mesa sísmica.

El apartado de fabricación va a contener información acerca de los procesos realizados, con el fin de obtener las piezas previamente diseñadas en el apartado 2.2. DISEÑO.

El apartado de montaje se va a referir a la sujeción de todas las piezas a la base y su posterior unión entre ellas.

Por último, dentro de este capítulo se va a introducir un breve apartado sobre la utilización de la mesa y de cómo se debería haber conectado, ya que por motivos referentes al COVID-19 no se ha podido ir al laboratorio a hacer el conexionado de los actuadores.

3.1. FABRICACIÓN

Dentro de este apartado se va a comentar el proceso de fabricación de las piezas de la mesa sísmica.

Todo este proceso se ha llevado a cabo en los talleres de la universidad (taller de la sede Francisco Mendizábal y en el laboratorio de estructuras de la sede del Paseo del Cauce) por lo que no ha incrementado el precio de las piezas.

Todos los taladros se realizarán siguiendo la norma ISO 273:1979 [20] que recoge las dimensiones de agujeros pasantes para tornillos y pernos.

3.1.1. FABRICACIÓN DE LA PLACA

Esta placa inicialmente era un cuadrado de 100 x 100 x 1 cm de espesor, y se necesitaba una placa cuadrada de 40 x 40 cm.

Este sobrante ha sido el que se empleó para experimentar (Figura 45) como se comportaba este material frente a distintos tipos de uniones (si al ser remachada o taladrada se abollaba lo cual se observó que si no se tenía cuidado sí que sufría una ligera deformación; si se podían emplear pegamentos o resinas, se llegó a la conclusión de que no era la mejor opción en cuanto a unir dos piezas de estas características se refiere; el comportamiento a fatiga de los taladros, si se deformaban o no con el uso de la mesa sísmica...).



Figura 45. Pruebas realizadas en un trozo sobrante de ALUCOBOND

Para cortar esta placa se empleó una sierra circular de mesa (Figura 46) con un disco especial para el corte de aluminio, disponible en el taller de la escuela de ingenierías industriales de la sede de Francisco Mendizábal.



Figura 46. Sierra circular de mesa

A continuación, procedemos a hacer los agujeros con un taladro de columna (Figura 47) y brocas para aluminio, con los que posteriormente se sujetarán las estructuras que queremos ensayar a la mesa sísmica.



Figura 47. Taladro de columna

Para ello observamos los planos en los Trabajos de Fin de Grado [11], [12] de cómo están construidas las estructuras, donde tienen los agujeros previstos para el anclaje posterior y de qué diámetro son.

Habiendo tenido todo esto en cuenta en la fase de diseño, se realizarán los 33 taladros de diámetro 7 mm, previamente dibujados sobre la mesa y marcados sus centros con un marcador de centros (Figura 48).



Figura 48. Marcador de centros

DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE 2 GRADOS DE LIBERTAD CON AMBOS ACTUADORES FIJOS

Para realizar los taladros se colocará una sufridera debajo de la placa, dicha sufridera será un trozo de madera, se usarán dos brocas, una de 5 mm de diámetro que se va a emplear para hacer el agujero inicial para que la placa no se abolle, y posteriormente se va a utilizar la broca de diámetro 7 mm.

Por lo que cada agujero tendrá que ser hecho dos veces, la primera con la broca de 5 mm y la segunda con la broca de 7 mm.

Una vez se finalicen los agujeros para la sujeción de las maquetas, se procederá a hacer los 4 agujeros para la unión biela-placa (2 agujeros de 5 mm de diámetro y otros 2 de diámetro 8 mm) a 2 mm del borde de la placa.

Solo se necesitan 2 agujeros uno de diámetro 8 mm y otro de diámetro 5 mm, pero se realizarán por duplicado quedando los dos agujeros de 8 mm uno en frente del otro y lo mismo con los de 5 mm, para que cuando se agranden estos agujeros y la unión biela-placa coja juego, no sea necesario hacer otra placa nueva, bastara con desmontar la unión quitando el pasador, sacar la placa de las guías y girarla 180°. De esta manera es como si se tuviese una placa nueva con los agujeros sin holgura.



Figura 49. Jeringuilla para inyectar resina

Para una mayor resistencia a fatiga estos agujeros se rellenan con una jeringuilla y silicona (Figura 49 y Figura 50).



Figura 50. Agujero relleno de resina

El procedimiento para la elaboración de estos agujeros es similar al de los agujeros de sujeción, también se emplearán dos brocas, una de diámetro 5 mm y otra de diámetro 8 mm.

En este caso los agujeros de 5 mm no será necesario hacerlos dos veces, solo se pasará una vez la broca de 5 mm, para los de diámetro 8 mm se pasarán las dos brocas.

Se observó que al hacer los taladros quedaba una pequeña rebaba, por lo que se decidió pasar un avellanador de mano (Figura 51) siguiendo el consejo del maestro de taller para eliminarla, no para avellanar los agujeros.



Figura 51. Avellanador de mano

Para acabar con la fabricación de la placa se realizarán 4 agujeros ciegos de diámetro 4 mm en la plancha de la parte inferior de la placa para posteriormente introducir los remaches de 4 mm de diámetro y de 7 mm de longitud, estos remaches sirven para unir espesores de entre 3 y 4 mm que entraría en el rango de espesores que queremos unir (1 mm de la plancha de aluminio + 2 mm aproximadamente de espesor de la guía); y unen el módulo interior de las guías superiores con la placa.

Una vez realizados se procederá a vaciar el interior del agujero sin llegar a tocar la plancha superior de la placa.

3.1.2. FABRICACIÓN DE LA BASE

La fabricación de la base seguirá un proceso similar al de la base, pero con la diferencia de que este tablero ya viene cortado a la medida de 80 x 80 cm, solamente será necesario realizar los taladros pertinentes.

Los taladros que se realicen serán todos ellos pasantes de diámetro 5,5 mm para introducir en todos ellos tornillos de métrica M5. Estos taladros tendrán funciones distintas, unos se emplearán para sujetar los motores a la base, y otros para anclar el módulo interno de dos de las guías.

Primero se medirá sobre el tablero y se marcó la posición de todos los centros de los taladros (ver ANEXO: PLANOS para ver la posición de estos)

Estos taladros se realizarán en el propio laboratorio de estructuras y con un taladro de mano (Figura 52) ya que las grandes dimensiones del tablero imposibilitaban el uso del taladro de columna. Para el proceso de taladrado se empleó una broca de diámetro 5,5 mm para madera, se colocó el tablero entre dos mesas dejando un espacio entre ellas, posicionando el taladro que se va a realizar en este espacio para que cuando salga la broca por el otro lado de la base no perfora ninguna mesa. Se empleó también tornillos de apriete para sujetar la base a las mesas y que no se moviese durante el proceso de taladrado.



Figura 52. Taladro de manual

Se comenzará por los taladros para sujetar los motores, cada motor se sujetará mediante dos tornillos lo que implica que se necesitarán dos taladros por cada motor. Estos tornillos de M5 descritos en el CAPÍTULO 4: DISEÑO, llevan la cabeza embebida en la parte inferior de la base, por lo que será necesario la elaboración de un segundo taladro en la parte inferior de 5 mm de profundidad y de diámetro 8,5 mm.

Posteriormente se realizarán los taladros para sujetar las guías a la base. Cada guía llevará 2 tornillos (1 en cada extremo de la guía), se necesitarán 4 taladros en total.

Los tornillos que se introducirán en estos agujeros irán al revés que los anteriores, quedando la cabeza de estos en la parte superior de la base, y la tuerca que los sujeta en la parte inferior, por lo que será necesario embeberla en la base y cortar el tornillo para que no sobresalga de la base.

Para ello se realizará un taladro posterior a este, de 10 mm de diámetro y 5 de profundidad.

Los taladros para esconder las cabezas o las tuercas se harán de manera aproximada ya que no es necesario que las tuercas queden al ras del borde inferior, sino simplemente que queden escondidas para que la base no apoye sobre estas.

3.1.3. FABRICACIÓN DEL ZANCO DEL MOTOR PEQUEÑO

La fabricación del zanco tiene un proceso de fabricación muy similar al de la placa. En ambos casos se empleó el mismo material, el aluminio, aunque difiere en lo que a espesor se refiere ya que la placa de ALUCOBOND tiene dos planchas de aluminio de 1 mm, pero internamente esta hueco, mientras que para el zanco se empleó una pieza maciza de aluminio de 1 cm de espesor.

Para la fabricación del zanco se usó la sierra circular (Figura 48) con la misma hoja solo que en este caso se empleó taladrina para refrigerar la sierra durante el corte.

Sobre una pieza de aluminio de 1 cm de espesor y grandes dimensiones se realizaron dos cortes para conseguir un rectángulo de dimensiones 90 x 55 mm.

Posteriormente, con el marcador de centros se marcaron los dos taladros a realizar, la función de estos dos taladros es la de dejar pasar los tornillos que sujetaran el motor pequeño a la base; los taladros pasantes se realizaron con el taladro de columna siguiendo la norma ISO 273:1979 [19] de 5,5 mm de diámetro, sin ser necesario la colocación de sufrideras en ninguna de las dos caras.

Una vez finalizado todo el proceso se eliminó la parte más gorda de la rebaba con la mano y la parte más fina con un papel de lija.

3.2. MONTAJE

En este apartado se va a centrar en explicar cómo montar todos los componentes citados a lo largo de la memoria, para conseguir una mesa funcional.

3.2.1. MONTAJE DE LOS ACTUADORES

El montaje de los actuadores se va a referir a la unión de todos sus componentes mecánicos, es decir, sin su posterior conexionado con el driver ni las fuentes de alimentación.

El montaje de ambos actuadores (tanto el grande como el pequeño) es idéntico, ambos están compuestos por las mismas piezas, pero de distinto tamaño.

Para montar los actuadores, se comienza fijando el estátor dentro de la brida, mediante dos de los taladros que tiene la brida, estos taladros son fácilmente identificables porque son los dos únicos que están roscados, se encuentran

más próximos a la abertura de la brida y en ambos extremos (marcados en rojo en la Figura 54).

Una vez identificados los dos taladros se introducen dos tornillos de cabeza cilíndrica y hueco hexagonal, para apretar con llave Allen, apretándose hasta quedar el estátor bien sujeto dentro de la brida. La posición del estátor dentro de la brida es diferente para el actuador grande y el pequeño. El estátor del actuador grande se posicionará a 35 mm del borde de la brida (Figura 53) y el del pequeño a 20 mm.

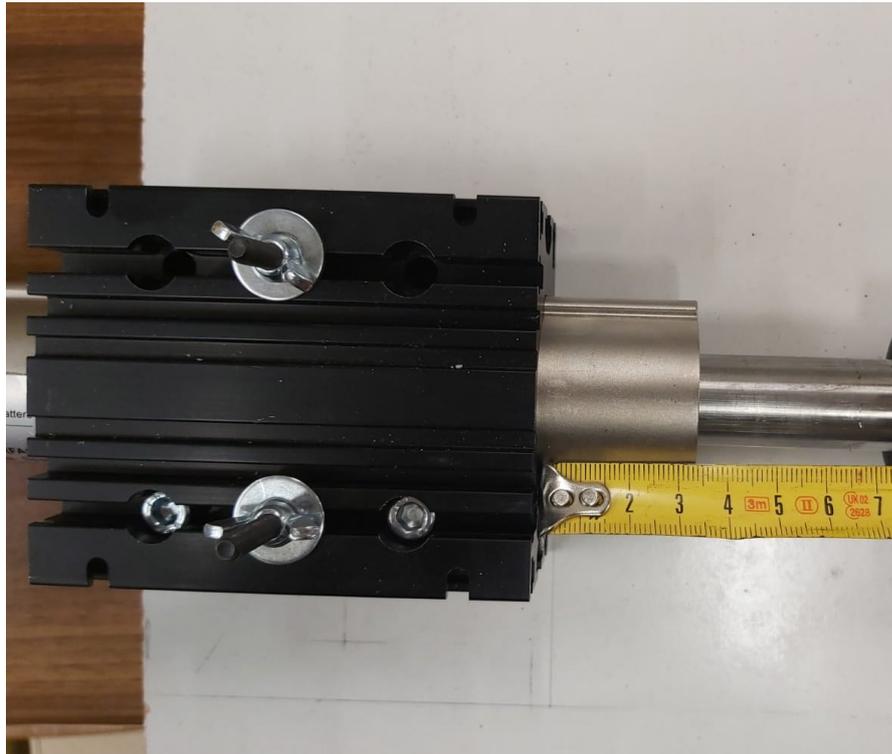


Figura 53. Posición del estátor dentro de la brida en el actuador grande

Estos tornillos son de métrica M5x25 para el actuador pequeño y de métrica M6x35 para el grande, ambos normalizados dentro de la norma ISO 4762:2004 [25]

Previamente a su montaje, todos los tornillos han de ser cortados 2 mm para que no sobresalgan de la brida por su parte inferior, ya que esta luego va a ir apoyada en la base.

Después de fijar el estátor dentro de la brida, se procede a introducir el vástago dentro del estátor. Una vez se ha introducido el vástago se pueden poner los

DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE 2 GRADOS DE LIBERTAD CON AMBOS ACTUADORES FIJOS

finales de carrera, en un extremo una anilla de seguridad y en el otro extremo una pieza de goma.

Análogamente al paso de fijar el estátor a la brida, se coloca una anilla de seguridad en uno de los extremos del vástago del motor y, a continuación, una de las piezas de goma que actuarán como final de carrera.

Posteriormente, se introduce el vástago en el motor por el extremo donde no están instalados ya la anilla de seguridad y la pieza de goma.

Una vez introducido el vástago en el motor se colocan, en el extremo contrario al de la anilla de seguridad, el resto de piezas de goma necesarias. Para que estas piezas de goma no se salgan por el extremo del *slider*, se instala una arandela suficientemente grande para que haga de tope, fijada por una tuerca, y roscada sobre el tornillo de ojo (Figura 54).



Figura 54. Actuador pequeño montado por completo a falta del tornillo de ojo

En la Figura 54 se puede observar cómo queda un actuador completamente montado.

A parte de los tornillos que aprietan la brida, hay alguna diferencia más entre ambos actuadores debido a su diferencia de tamaño, como por ejemplo las anillas de seguridad o las piezas de goma, que son de 12 mm de diámetro para el actuador pequeño y de 20mm de diámetro para el actuador grande. Las arandelas de seguridad siguen la norma DIN 471:2011 [26]. Las arandelas utilizadas son DIN 471 12x1 para el motor pequeño y DIN 471 20x1,2 para el motor grande.

Otra diferencia viene en cuanto al número de piezas de goma empleadas, el actuador pequeño solamente necesita dos piezas (una en cada extremo),

mientras que el actuador grande necesita cuatro piezas (una en el extremo del tornillo de ojo y tres en el otro extremo).

En el motor grande se introducen más gomas para igualar la carrera de ambos actuadores.

El conjunto para la sujeción de los finales de carrera formado por un tornillo de ojo (DIN 444:2017 [15]), una tuerca (ISO 4032:2012 [23]) y una arandela (ISO 7093-1:2000 [26]) para cada motor será:

- Motor pequeño: tornillo de ojo DIN 444 M5x30, tuerca ISO 4032 M5, arandela plana ISO 7093 M6x18.
- Motor grande: tornillo de ojo DIN 444 M8x40, tuerca ISO 4032 M8, arandela plana ISO 7093 M8x24.

En el montaje de ambos actuadores se han empleado arandelas planas de la norma ISO 7093-1:2000 [27], que son unas arandelas planas de mayor tamaño. Se han elegido estas arandelas porque se necesita de una mayor superficie para que apoyen tanto las piezas de goma como la tuerca roscada que sujeta el tornillo de ojo.

3.2.2 MONTAJE DE LA MESA SISMICA

Partiendo de que los actuadores ya están completamente montados, el estator correctamente posicionado y apretado dentro de la brida, y que las guías ya están correctamente soldadas. Se comenzará por coger las dos guías superiores y desmontar el módulo interno para remacharlo a la placa. Para ello se necesitará una remachadora manual (Figura 55), para los remaches elegidos en el CAPITULO 4.1.: DISEÑO DE LA PLACA.



Figura 55. Remachadora manual

Una vez ejecutada esta unión se procederá a situar la base en una superficie plana y firme para ubicar sobre ella el resto de componentes que conforman la mesa sísmica, para marcar sobre esta con un lapicero la posición de estos.

En primer lugar, se cogerán los 4 tornillos DIN 912 M5 x 90 con sus correspondientes 4 tuercas DIN 315 M5 que se emplearán para unir los dos motores a la base (Figura 56). El orden de sujeción de los motores a la base es indiferente. Se colocará la base de canto para introducir los tornillos en los agujeros practicados en la fase de fabricación, por la parte inferior de la base, quedándose las cabezas escondidas en los agujeros que previamente se han ejecutado para ello.

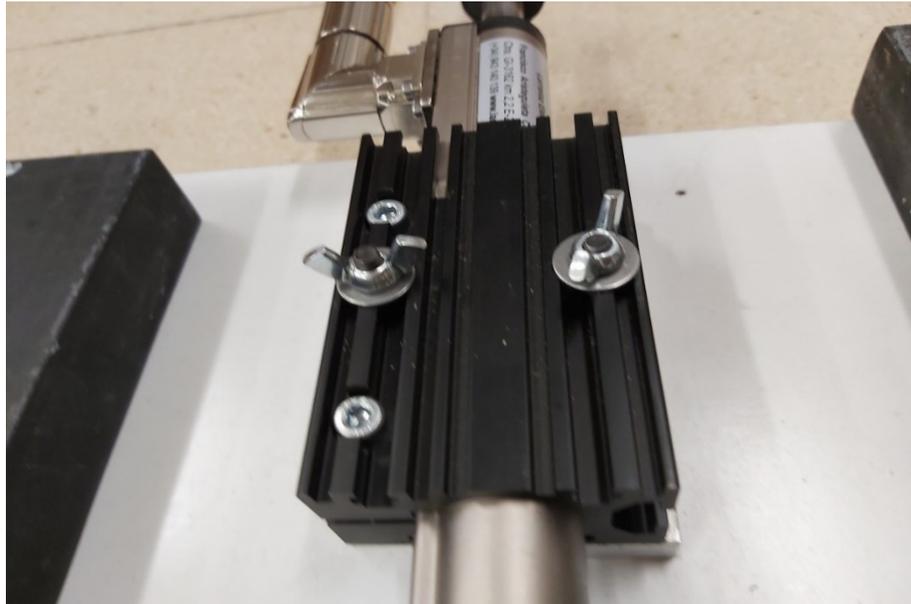


Figura 56. Motor pequeño sujeto a la base

En el motor pequeño, entre la base y el motor introduciremos el zanco (Figura 57) para que el centro del vástago del motor pequeño quede a la misma altura que el del grande.

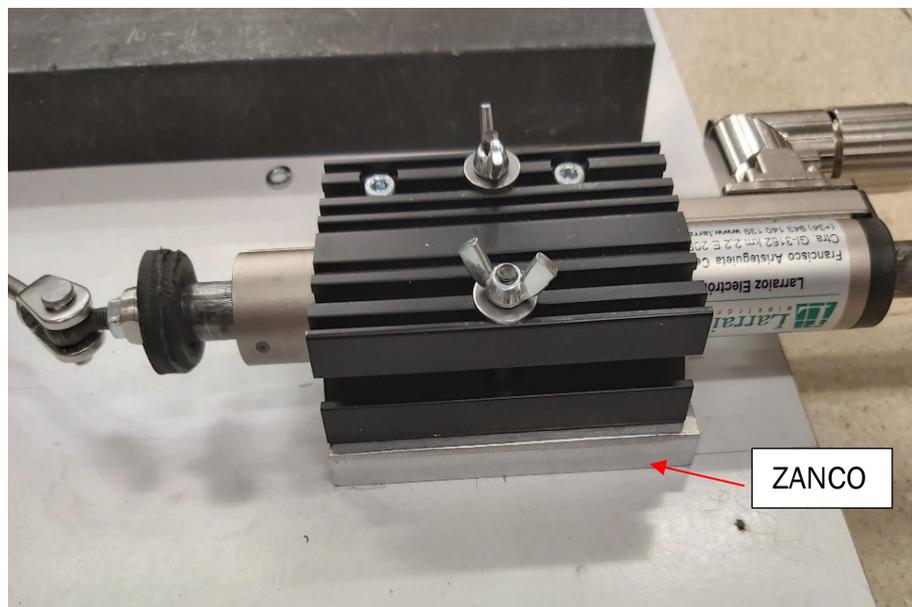


Figura 57. Detalle de la posición del motor pequeño y el zanco

DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE 2 GRADOS DE LIBERTAD CON AMBOS ACTUADORES FIJOS

Para apretar estos tornillos se necesitará una llave Allen de 4 mm para sujetar la cabeza del tornillo y con la mano sería suficiente para apretar las tuercas de mariposa, pero si por algún motivo fuese necesario se podría emplear unos alicates o una llave inglesa para apretar la tuerca.

Con ambos motores correctamente colocados y sujetos a la base, se procederá de la siguiente manera. Se desmontará el módulo interno de las guías inferiores para posteriormente atornillarlo a la base y que este proceso se ejecute más fácilmente.

Se cogerán los 4 tornillos ISO 2010 M5 x 40 con sus tuercas ISO 4032 M5, para este montaje se necesitará un destornillador plano o de estrella, sirven ambos para sujetar la cabeza del tornillo, y una llave de carraca con un vaso hexagonal de 8 mm o una llave del número 8, para la tuerca.

El proceso para fijar el módulo interno de las guías a la base (Figura 58) será similar al de los motores. Se introducirán los tornillos en los agujeros y se apretará usando las tuercas y las herramientas anteriormente citadas.



Figura 58. Detalle de la unión de las guías a la base

Una vez estén el módulo interno de las guías se cortará la parte de rosca del tornillo que sobresalga de la tuerca (unos 8 mm).

Seguidamente se encajarán de nuevo los módulos externos de las guías inferiores con los rodamientos de bolas (previamente desmontados), con los módulos internos atornillados a la base. Se tendrá cuidado de no doblar ni los

módulos ni los rodamientos. Y por último encajar los módulos externos de las guías superiores (que están soldados a los módulos externos de las inferiores) con los módulos internos de estas guías, que se encuentran remachadas a la placa.

Por último, se unirán los motores con la placa, para ello emplearemos las bielas, a las que previamente se ha ajustado su longitud a 20 cm utilizando las contratueras ubicadas en el cuerpo para ello.

La unión se realizará mediante el pasador que viene con las bielas. La biela de diámetro 8 mm para el motor grande y la de 5 mm para el motor pequeño. Simplemente consiste en hacer coincidir los agujeros de la placa hechos para la unión con los de la biela en un extremo, y el agujero del tornillo de ojo con el otro extremo e introducir los pasadores.

Se observó durante el montaje de las bielas que los pasadores en la unión con el tornillo de ojo tenían bastante juego por lo que se decidió engordar su diámetro recubriéndolos con teflón (Figura 59), una solución mejor a esta deficiencia se recoge en el CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS.



Figura 59. Pasador de la biela envuelto en teflón

Una vez realizado todo el montaje mecánico (Figura 60), solamente quedaría realizar las conexiones de los actuadores a sus respectivos drivers y a las fuentes de alimentación. Esto no se ha podido realizar por motivos relacionados con el COVID-19.



Figura 60. Mesa sísmica completamente montada con una maqueta encima

El conexionado y la configuración de los drivers se puede consultar en el trabajo de fin de grado Diseño y prototipado de una mesa sísmica de dos grados de libertad [10]. El conexionado se puede encontrar en el apartado 5.2.2. MONTAJE ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO y la configuración de los drivers en el ANEXO IV. CONFIGURACIÓN DE LOS DRIVERS.

CAPÍTULO 4: ESTUDIO CINEMÁTICO

Este capítulo va a contener dos partes. La primera en la que se va a explicar paso a paso cómo se ha creado el modelo en WorkingModel 2D, la segunda se va a centrar en la simulación de distintos movimientos de la mesa sísmica con el programa WorkingModel 2D (se abreviará mediante el nombre WM2D).

4.1. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EN WM2D

En este apartado se va a explicar paso por paso como se ha construido el modelo de la mesa sísmica (Figura 61), en el programa WM2D.

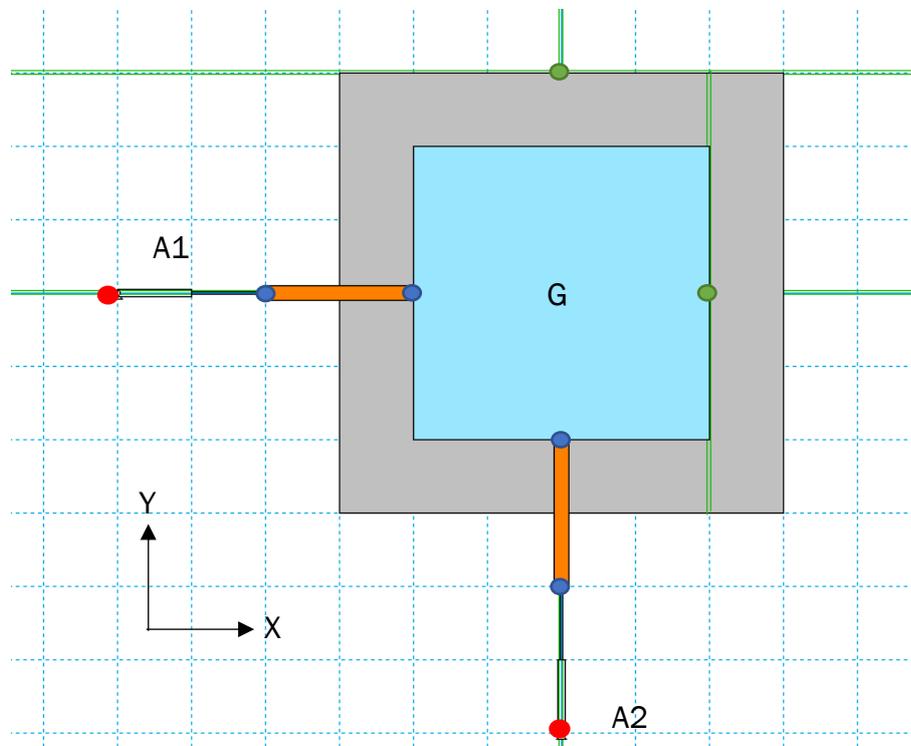


Figura 61. Modelo de la mesa sísmica en WM2D.

Como se aprecia en la Figura 61 el modelo construido en WM2D consta de 2 cuadrados: uno gris que solo se puede mover en el eje X y es un sólido auxiliar, es decir en el modelo real no existe y su función es la de montar sobre él las guías superiores, ya que estas no están sujetas a la base, sino que presentan un movimiento relativo respecto de ésta; y otro azul sujeto al cuadrado gris y que se puede mover tanto en el eje X como en el eje Y. Además de estos dos cuadrados, el modelo está formado por dos rectángulos naranjas, que simulan

las bielas, por dos actuadores lineales (A1 y A2) que simulan los actuadores y por cuatro líneas verdes que simulan las guías y limitan el movimiento de los sólidos.

Se va a comenzar abriendo el programa WM2D, antes de empezar a dibujar nada hay que cambiar algunos aspectos referentes a la configuración del programa.

En el menú superior (Figura 62) se selecciona la pestaña *World -> Gravity*



Figura 62. Menú superior WM2D

En la ventana que se abre (Figura 63), se selecciona la opción donde pone *None*, se clic en *OK*, para guardar la configuración. Esta ventana nos da la opción de cambiar la gravedad, en este caso como va a ser un mecanismo plano en los ejes X e Y, no se va a ver afectado por ninguna gravedad vertical, por lo que se va a deshabilitar.

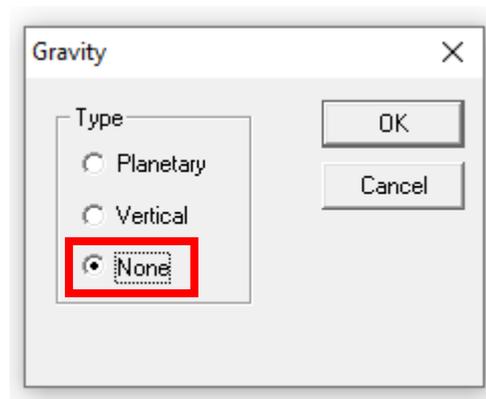


Figura 63. Ventana Gravity de WM2D

En el menú superior, en la misma pestaña que antes, *World -> Preferences* se abre una nueva ventana con múltiples opciones, en la parte superior de la ventana elegimos la opción: *Objects do not collide by default*. Esta opción lo que hace es que los sólidos no se choquen entre ellos, te da la opción de trabajar en distintos planos. Se clic en *OK* para que guarde la configuración.

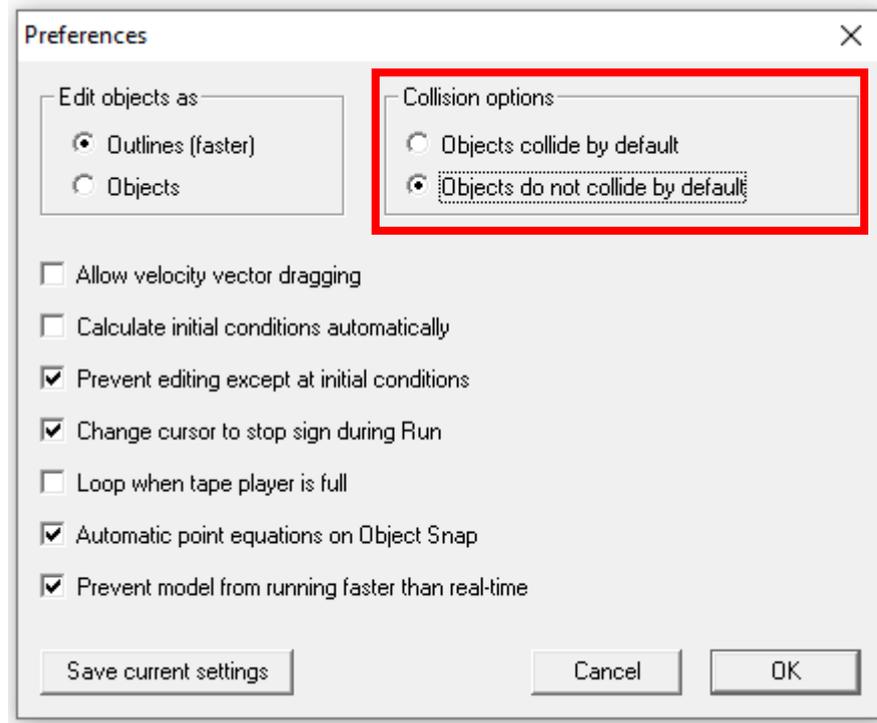


Figura 64. Ventana Preferences de WM2D

Volviendo al menú superior, se selecciona la pestaña *View -> Number and Units*, que va a abrir una nueva ventana (Figura 65), aquí cambiaremos los radianes por grados, esto va a ayudar cuándo haya que girar sólidos para posicionarlos.

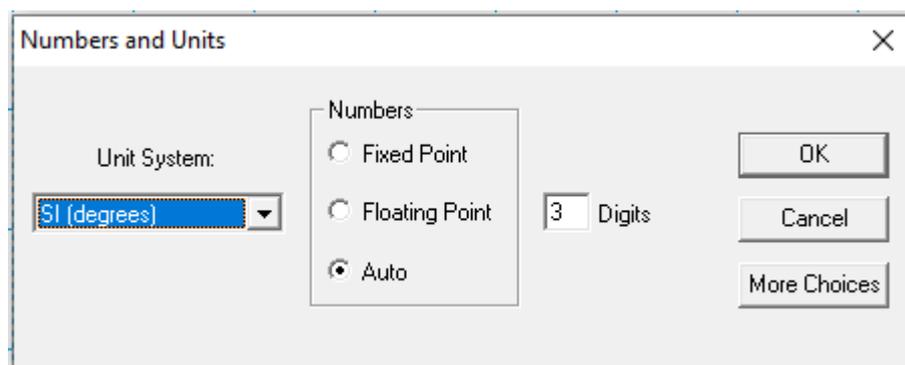


Figura 65. Ventana Number and Units de WM2D

Para acabar con la configuración de WM2D, en el menú superior, se selecciona la pestaña *View -> Workspace*, dónde se abrirá una ventana nueva (Figura 66), en la parte izquierda de esta ventana se selecciona las 3 siguientes pestañas:

Rulers, Grid Lines y X, Y Axes. Este cambio en la configuración no va a afectar al modelo, simplemente crea una cuadrícula que ayuda al posterior posicionamiento de los sólidos.

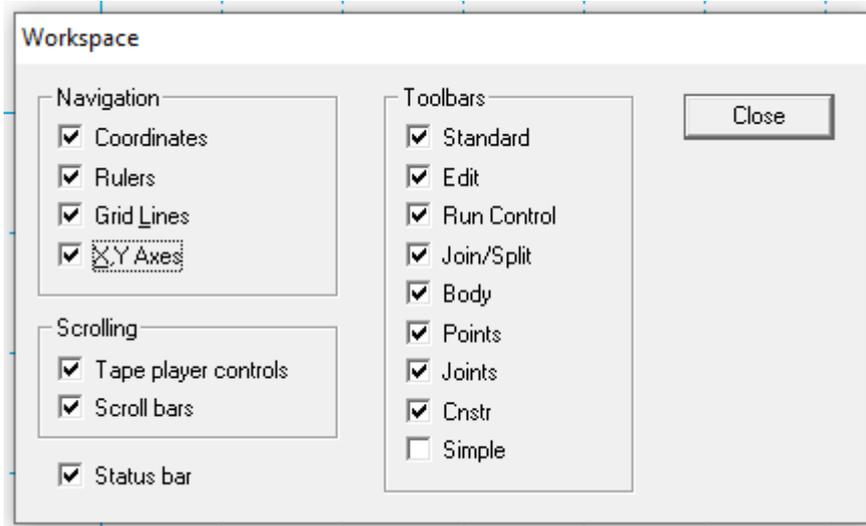


Figura 66. Ventana Workspace de WM2D

Dando por finalizada la configuración de WM2D, se va a comenzar por dibujar los diferentes sólidos, que posteriormente se colocarán sobre la cuadrícula, y unirán mediante los diferentes tipos de unión existentes.

Se van a dibujar 4 sólidos, si se hace en este orden se evitará que posteriormente unos sólidos queden escondidos detrás de los otros. Para dibujar hay que usar el menú situado a la izquierda de la pantalla (Figura 67)



Figura 67. Menú para dibujar sólidos en WM2D

Los 4 sólidos dibujados son (Figura 68):

- Un cuadrado de 0,6 m de lado que se va a llamar sólido auxiliar. Este cuadrado no representa ninguna parte de la mesa sísmica creada en el

DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE 2 GRADOS DE LIBERTAD CON AMBOS ACTUADORES FIJOS

laboratorio, por lo que la forma y las dimensiones de este sólido son las que se desee.

- Un cuadrado de 0,4 m de lado, que simula la placa en el modelo real.
- 2 rectángulos de 0,2 m de largo por 0,02 m de alto, que simulan las dos bielas en el modelo real.

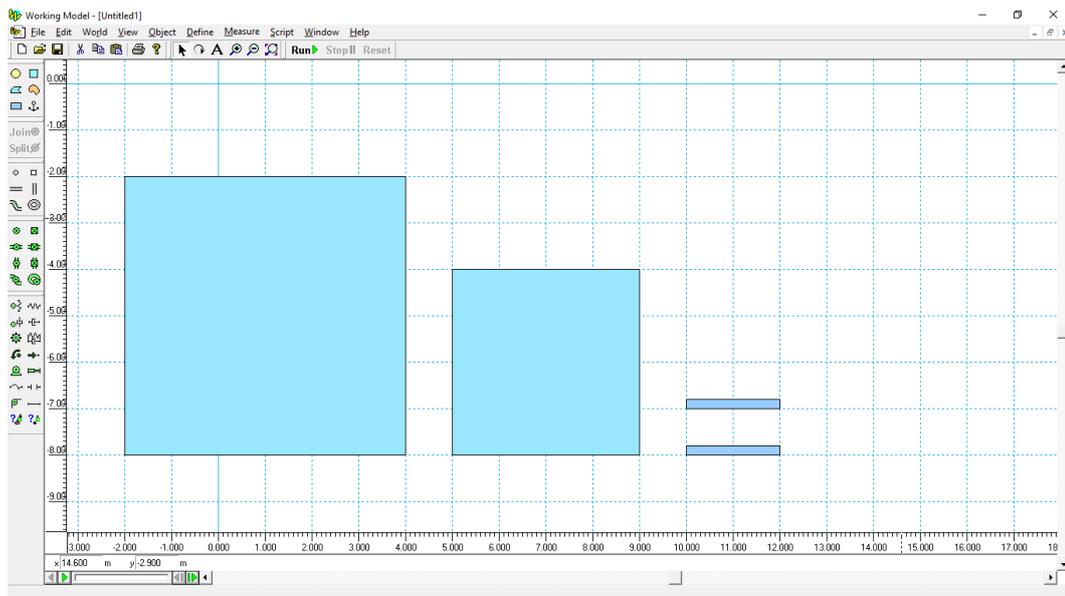


Figura 68. Sólidos dibujados

Para cambiar el color de los sólidos y diferenciarlos más fácilmente, como en la Figura 61, se selecciona el sólido y con la combinación de botones *ctrl + J* se abre una ventana (Figura 69), en la que se pueden modificar varias opciones referentes al sólido seleccionado.

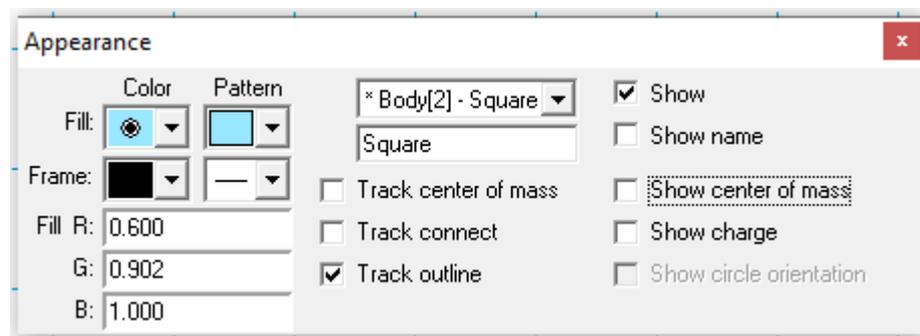


Figura 69. Menú Appearance de WM2D

Seleccionando los sólidos se va a modificar el color de cada uno de ellos para dejarlos como en la Figura 61.

Con todos los colores de los sólidos cambiados, se va a comenzar a colocar los pines de unión. El modelo de WM2D presenta distintos tipos de uniones. En la Figura 61 se han diferenciado empleando círculos de distintos colores:

- Rojos: son uniones fijas a la base, no permiten el desplazamiento de ese punto, pero si se permite el giro respecto de éste. En este modelo se han empleado para fijar los dos actuadores a la base.
- Azules: son uniones que permiten giro y desplazamiento, en cualquier dirección, si se quiere que el desplazamiento se limite a una dirección este punto se puede apoyar en una guía. En este modelo se han empleado en la unión del cuadrado azul que simula la placa con las bielas y en la unión de las bielas con los actuadores, con una guía por debajo, para restringir su movimiento al eje X o al Y.
- Verdes: son uniones iguales que las azules, pero no permiten el giro relativo entre los dos sólidos que unen o entre el sólido y la guía a la que está unida. En este modelo se han empleado en la unión del sólido auxiliar (cuadrado gris) con la guía del eje X y en la unión de la placa (cuadrado azul) con la guía del eje Y, que está montada sobre el sólido auxiliar.

Se va a comenzar por los pines azules de la Figura 61, para ello se va a hacer uso del menú de la izquierda (Figura 70), en rojo los pines de unión y en verde las guías que posteriormente se van a utilizar.



Figura 70. Menú para insertar pines de unión y guías de WM2D

Se distinguen varios tipos de pines de unión en el menú:

- Círculos: son uniones que permiten giro entre los sólidos que unen.
- Cuadrados: son uniones que no permiten el giro entre los sólidos que unen.

- Grises: se pone un pin a cada sólido y posteriormente se unen (opción que se va a utilizar).
- Verdes: se colocan los sólidos en posición final y se coloca un solo pin en la parte por la que quieres unir los sólidos.

Para las uniones azules se va a hacer uso de círculos grises, se van a colocar 6:

- 2 en el cuadrado azul (en la mitad del borde izquierdo y en la mitad del borde inferior).
- 2 en cada biela (uno en la mitad de cada lado corto).

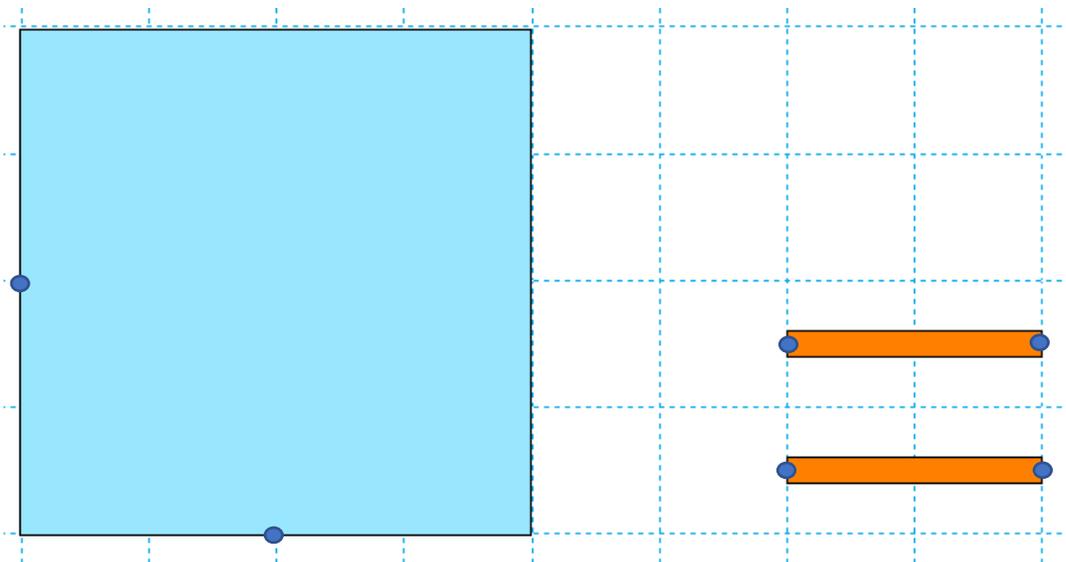


Figura 71. Sólidos con los pines azules colocados.

Una vez que están todos los pines colocados, se va a proceder a colocar el cuadrado azul en su posición final, se selecciona cuadrado azul y con las coordenadas que nos aparecen en la parte inferior de la pantalla (Figura 72), colocamos el centro de masas del sólido en el punto (0,0). Con el icono del ancla de la Figura 67, se fija el cuadrado azul para que no se mueva.

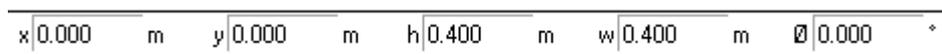


Figura 72. Menú de las coordenadas del centro de masas del sólido

Para unir los pines de los diferentes sólidos, se mantiene pulsada la tecla *Shift* del teclado, y con el ratón se selecciona los pines a unir, cuándo se seleccionen

dos pines que no están unidos, se activará en la parte izquierda de la pantalla la opción de *Join* (Figura 73), pinchando sobre ella se unirán automáticamente.



Figura 73. Menu para unir o separar dos pines.

Se selecciona el pin inferior del cuadrado azul, con uno cualquiera de las bielas, usando el menú de coordenadas de la biela, se la gira 270° hasta que esté en posición vertical. Del mismo modo unimos un pin cualquiera de la biela restante con el pin restante del cuadrado. El resultado obtenido ha de ser similar al de la Figura 74.

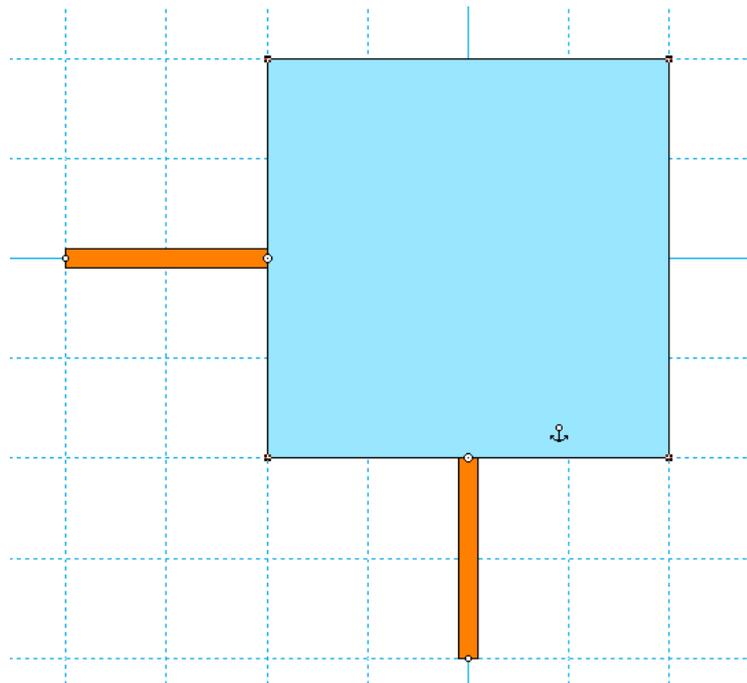


Figura 74. Resultado de la unión de las bielas a la placa

A continuación, se van a dibujar dos guías, una horizontal en $Y=0$ y otra vertical en $X=0$, haciendo uso de las guías grises del menú de la Figura 70.

Para dibujar la guía horizontal, se pincha en su icono en el menú correspondiente y posteriormente sobre la cuadrícula en cualquier lugar,

haciendo uso del menú de coordenadas de la guía, se pone la coordenada $Y=0$. De igual modo con la guía vertical, pero cambiando su coordenada $X=0$.

Cuando se tenga las guías dibujadas, se podrán unir las bielas a ellas, de la misma manera que se unen dos sólidos, se unen un sólido y una guía, se selecciona la guía y el pin correspondiente y con el botón *Join* quedan unidos.

Con todo lo anterior correctamente montado, se selecciona el cuadrado gris usando el menú de coordenadas, se coloca en el punto $(0,0)$ y se coloca el ancla de igual manera que en el cuadrado azul.

A continuación, se van a hacer las uniones verdes de la Figura 61, se genera una guía horizontal de igual manera que las anteriores y se coloca en $Y=0,3$, esta vez se va a emplear una unión de cuadrado, para ello se selecciona el cuadrado gris del menú de la Figura 70, y se coloca en el punto medio del borde superior del sólido auxiliar. De igual manera que las anteriores uniones, se une el pin cuadrado a la guía.

Para la última unión verde, se selecciona el sexto icono de la columna derecha del menú de la Figura 70, y se pincha sobre la mitad del lado derecho del cuadrado azul, automáticamente el programa genera una guía y una unión de cuadrado.

El resultado ha de ser igual al de la Figura 75.

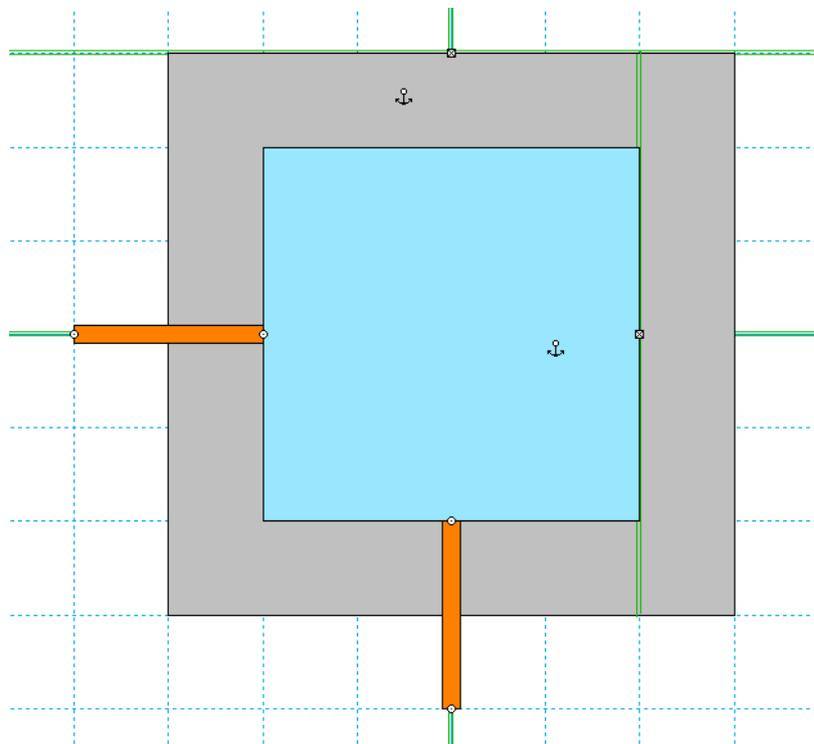


Figura 75. Modelo completo a falta de los actuadores

Cuando ya está todo unido se pueden eliminar las anclas que sujetan los sólidos.

Por último, se van a colocar los actuadores, se va a emplear el menú de la izquierda que quedaba por usar (Figura 76)

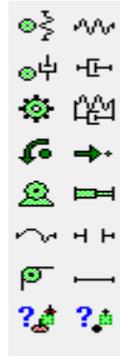


Figura 76. Menú de motores

Se va a usar el quinto icono de la columna derecha y se van a colocar dos actuadores:

- Uno horizontal unido al extremo libre de la biela izquierda
- Uno vertical unido al extremo libre de la biela vertical

La longitud de estos actuadores no es relevante, ya que posteriormente se van a modificar sus características para obtener el desplazamiento deseado.

Al añadir los actuadores lineales quedaría finalizado el modelo de mesa sísmica en WM2D.

4.2. SIMULACIÓN

Una vez que está completo el modelo con el que se va a simular el movimiento de la mesa sísmica, solo queda programar el movimiento de los actuadores. Se puede programar de diferentes maneras, introduciendo la velocidad, la fuerza, la longitud, la aceleración o para que se comporte como un actuador de corriente continua. Este modelo solamente se va a programar para que varíe la longitud del actuador en función del tiempo.

Se van a simular tres supuestos, en estos supuestos cuando se hable acerca de las trayectorias se refiere a la trayectoria del punto G de la placa (Figura 61):

- En el primero de ellos solo va a funcionar un actuador (A1), con una variación de longitud igual a $0,1 \cdot \sin(t)$, donde t es el tiempo, dejando

A2 fijo. Con esta primera simulación se pretende mostrar cómo la mesa se mueve describiendo un arco de circunferencia. También se va a explicar cómo corregir esto comandando el actuador A2 en función del actuador A1.

- En la segunda simulación, ambos actuadores (A1 y A2) se van a mover con la misma variación de longitud igual al $0,1*\sin(t)$, donde t es el tiempo. Aquí se pretende observar como la mesa se mueve en línea recta empleando ambos actuadores.
- En la tercera y última simulación, se van a programar los actuadores con variaciones de longitud diferentes y aleatorias, para ver como la mesa sísmica describe trayectorias difícilmente predecibles.

4.2.1. PRIMERA SIMULACIÓN: CON UN ACTUADOR ACTIVADO

Para esta primera simulación solamente se va a mover el actuador A1 (Figura 61), éste se va a mover con un incremento de longitud que varíe con la ecuación $\sin(t)$.

Para introducir estos valores en el programa WM2D, lo que hay que hacer es pinchar dos veces sobre el actuador A1, a continuación, se abrirá el menú *Properties*, en el desplegable *Type* se escoge la opción *Length* y en la casilla de *Value* escribimos lo que se muestra en la Figura 77 ($0,200 + 0,1*\sin(\text{time})$).

En la ecuación $0,200 + 0,1*\sin(\text{time})$, el valor $0,200$ es una constante que crea el programa, que depende de la longitud que hayamos dibujado el actuador en la simulación. Este valor para la simulación creada es indiferente, lo único que se va a ver es un actuador dibujado en WM2D más largo o más corto, pero la amplitud del movimiento la va a dar la función $0,1*\sin(\text{time})$, dónde el $0,1$ reduce la amplitud de la función $\sin(\text{time})$.

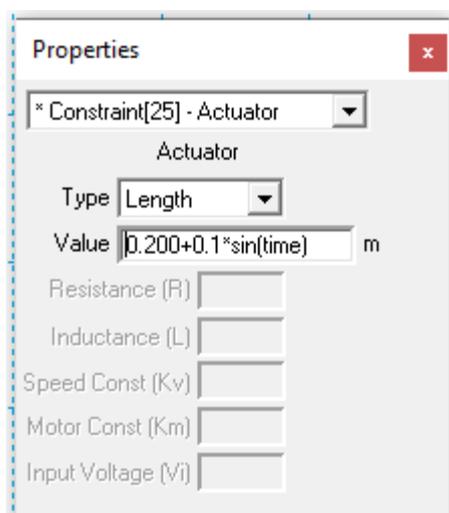


Figura 77. Menú properties del actuador

De forma análoga abrimos el menú *Properties* del actuador A2, en el desplegable *Type* se escoge la opción *Length* y en la casilla de *Value* se introduce un valor que sea constante, en este caso para la simulación se ha elegido 0,200.

Después de configurar los dos actuadores, se eligen los puntos de los sólidos de los que se quieren medir sus propiedades (velocidad, posición, aceleración...), en este caso se va a elegir la trayectoria del centro de masas del cuadrado que simula la placa (punto G de la Figura 61). Para ello, primero se selecciona el sólido (en este caso el cuadrado azul) y en la parte superior de la pantalla, en la pestaña *Measure* -> *Center of Mass Position* -> *All* (Figura 78)

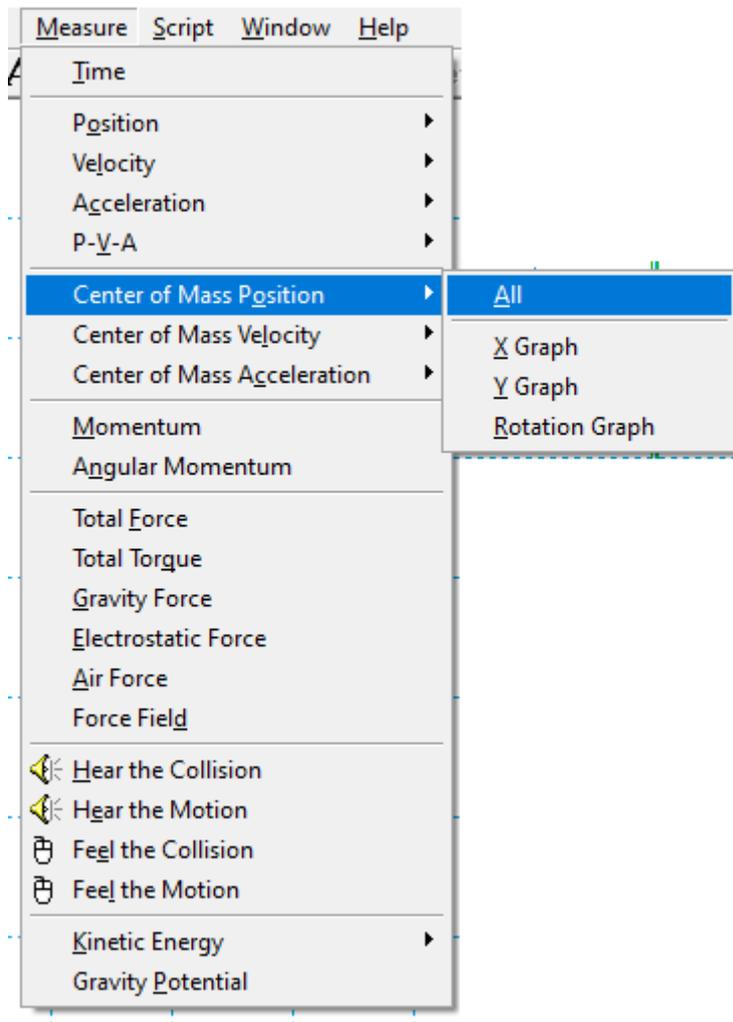


Figura 78. Opciones de medición

Aparece una nueva pantalla que muestra la posición del punto G, en el eje X, en el eje Y y su rotación.

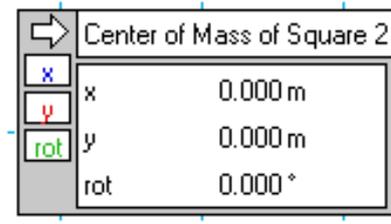


Figura 79. Posición del punto G

Una vez se han elegido todos los puntos de los que se quieren conocer sus propiedades, se procede a arrancar el mecanismo, para ello se utilizará el menú que se encuentra en la parte superior de la pantalla:

- *Run*: Inicia la simulación.
- *Stop*: Para la simulación.
- *Reset*: el mecanismo vuelve a su posición inicial.

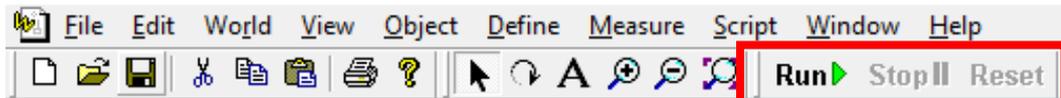


Figura 80. Menú superior de la pantalla

Se clicca en el botón *Run* y se espera hasta que el mecanismo realice un ciclo completo, a continuación, clicamos en el botón *Stop* y posteriormente al botón *Reset*.

Para exportar los datos obtenidos durante la simulación, se selecciona la pantalla de la Figura 79, mediante la combinación de teclas *Ctrl+C* se copian los datos, para posteriormente pegarlos en una hoja de excel y realizar una gráfica.

DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE 2 GRADOS DE LIBERTAD CON AMBOS ACTUADORES FIJOS

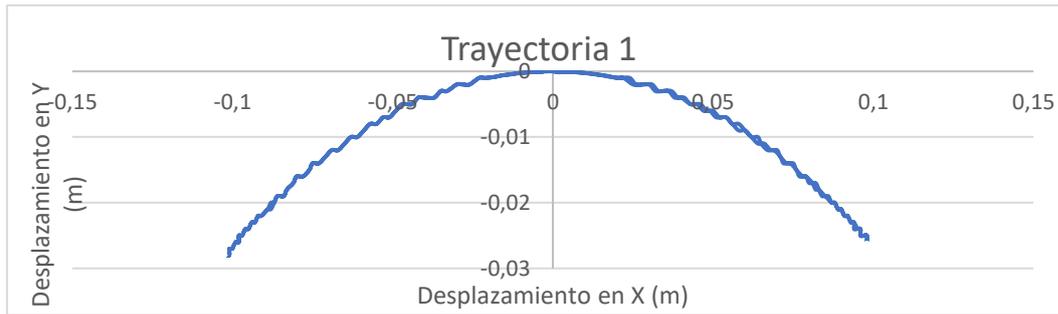


Figura 81. Trayectoria descrita por la mesa sísmica en la primera simulación.

En esta primera simulación (Figura 81), se observa como la placa describe un arco de circunferencia, de radio igual a la longitud de la biela (200 mm).

Esto se esperaba que sucediese puesto que la placa pivota respecto del punto A. Con esta primera simulación además de mostrar la trayectoria de la placa, se pretende demostrar que, si se quiere simular un terremoto en una sola dirección y solamente se pone un actuador en funcionamiento, se estará cometiendo un error puesto que la placa no se desplaza en línea recta, sino describiendo un arco.

Este error es prácticamente despreciable para pequeños desplazamientos en comparación al radio de giro. En el caso de esta mesa sísmica el radio de giro es de 200 mm (la longitud de la biela), mientras que el desplazamiento queda limitado por el actuador pequeño a 100 mm de carrera total, es decir, la placa solamente se desplazara 50 mm en cada dirección.

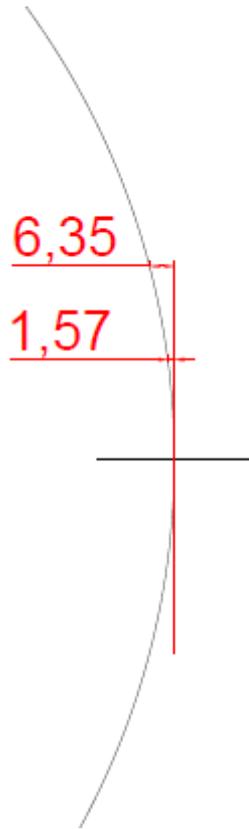


Figura 82. En negro la trayectoria real descrita por la mesa y en rojo la trayectoria ideal.

En la Figura 82 se muestra en negro un arco de circunferencia de radio 200 mm que simula la trayectoria real de la mesa y a su lado en rojo la trayectoria ideal que debería describir la mesa de 50 mm de en cada sentido.

Se observa que cuando el actuador se encuentra en el final de su recorrido, se produce la mayor desviación, donde toma el valor de 6,35 mm, una desviación prácticamente despreciable frente a la carrera del actuador y del radio de giro de la placa. En cambio, en su punto medio de desplazamiento (a 25 mm) su desviación es solo de 1,57 mm.

Esta pequeña desviación se puede corregir moviendo el actuador A2 en función del desplazamiento del actuador A1. Haciendo uso de la geometría y para este caso en concreto, en que el actuador A1 se mueve con la forma de la función $\sin(t)$.

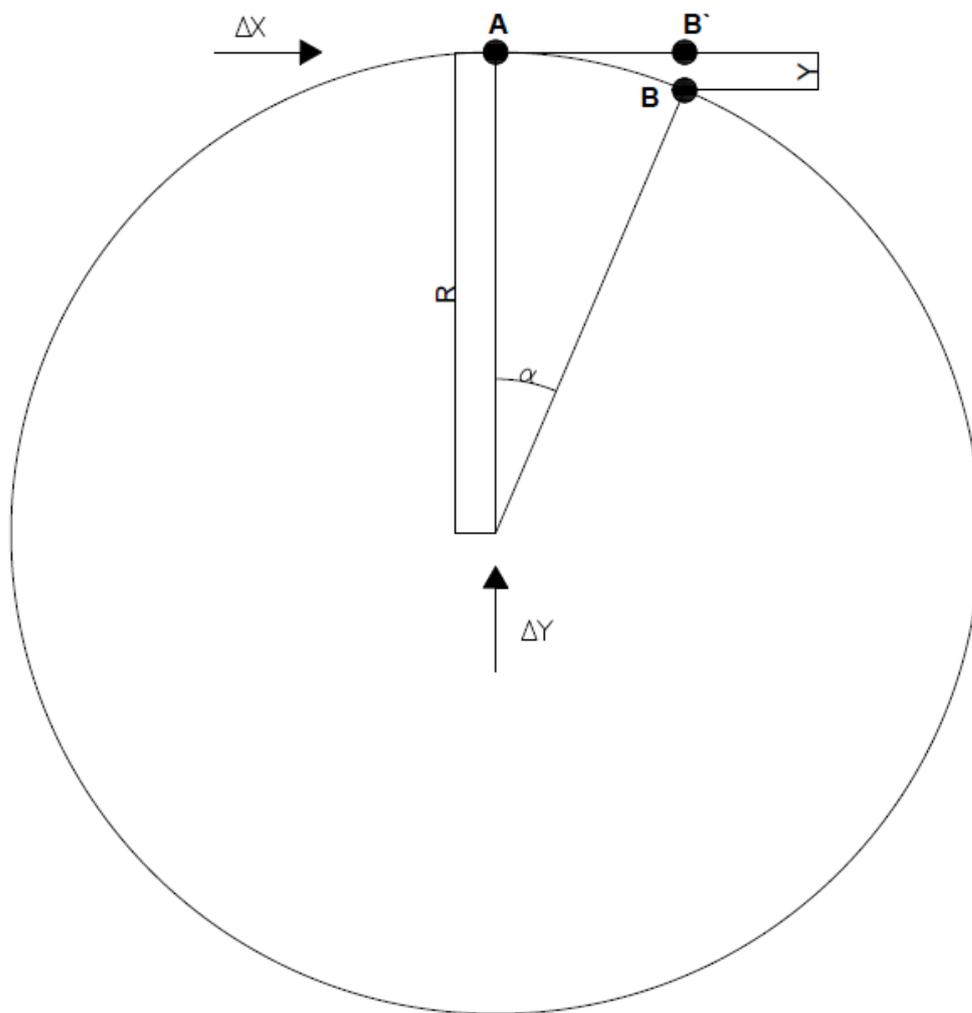


Figura 83. Croquis de apoyo para resolver el movimiento circular

En la Figura 83, suponiendo que el actuador A1 se desplaza ΔX , pasando a estar el centro de la mesa del punto A al punto B, hay que conseguir que la mesa alcance el punto B', comandando el actuador A2 haciendo que se desplace ΔY . Este desplazamiento ΔY a de ser igual a lo que ha bajado la mesa en su desplazamiento desde A hasta B.

Por trigonometría se llega a que ΔY a de ser igual a:

$$\Delta Y = Y = R - R \cos \alpha \quad (1)$$

Para este caso donde el actuador A1 tiene un desplazamiento igual a $\sin(t)$, se puede deducir lo siguiente:

$$\Delta X = H \sin t \quad (2)$$

Donde H es la amplitud de mitad de carrera del actuador A1, que es igual a la del actuador A2

Se puede relacionar el ángulo α con el desplazamiento del actuador A1 mediante la siguiente expresión:

$$R \sin \alpha = H \sin t \quad (3)$$

$$\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1 \quad (4)$$

Haciendo uso de las ecuaciones (3) y (4) en la ecuación (1), se llega a la conclusión:

$$\cos \alpha = \sqrt{1 - \left(\frac{H}{R} * \sin t\right)^2} \quad (5)$$

$$\Delta Y = R * \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{H}{R} * \sin t\right)^2}\right) \quad (6)$$

En la ecuación (6) nos queda como resultado el valor con el que se debe mover el actuador A2, donde conocemos todos los parámetros ($R=0,2$ y $H=0,1$). En el lenguaje de WM2D, para programar el actuador A2, la ecuación (6) queda de la siguiente forma: $0,200+0,2-\text{sqrt}(0,04-0,01*\sin(\text{time})*\sin(\text{time}))$.

Una vez introducido el desplazamiento del actuador A2, que tiene como fin corregir la desviación del desplazamiento de la mesa, se puede proceder a realizar la gráfica de la trayectoria del centro de masas de la placa. Para esta nueva simulación, simplemente como comprobación, se va a medir también la aceleración de este mismo punto. Esto se hace en el menú *measure* -> *Center of Mass Acceleration* -> *All* (Ver la Figura 78)

DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA MESA SÍSMICA DE 2 GRADOS DE LIBERTAD CON AMBOS ACTUADORES FIJOS

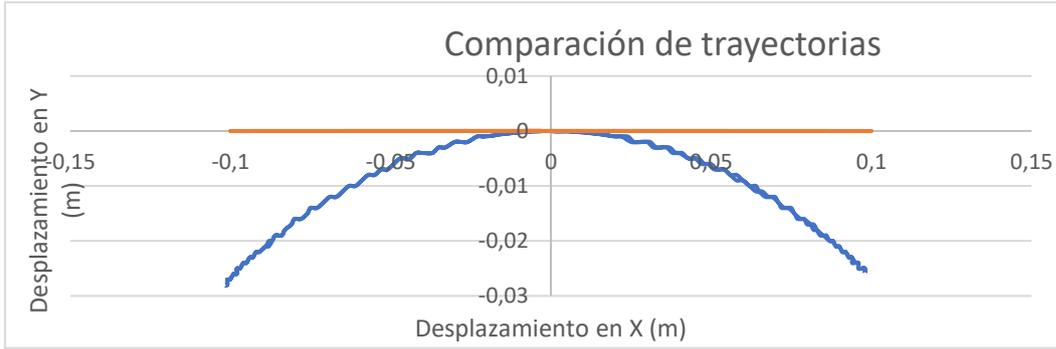


Figura 84. Comparación de las trayectorias inicial y corregida

En la Figura 84 se pueden observar una comparativa de ambas trayectorias. La trayectoria describe una línea recta, pero si se observan las aceleraciones en los ejes X e Y, solamente debería aparecer aceleración en el eje X, ya que es el eje en el que tenemos desplazamiento.

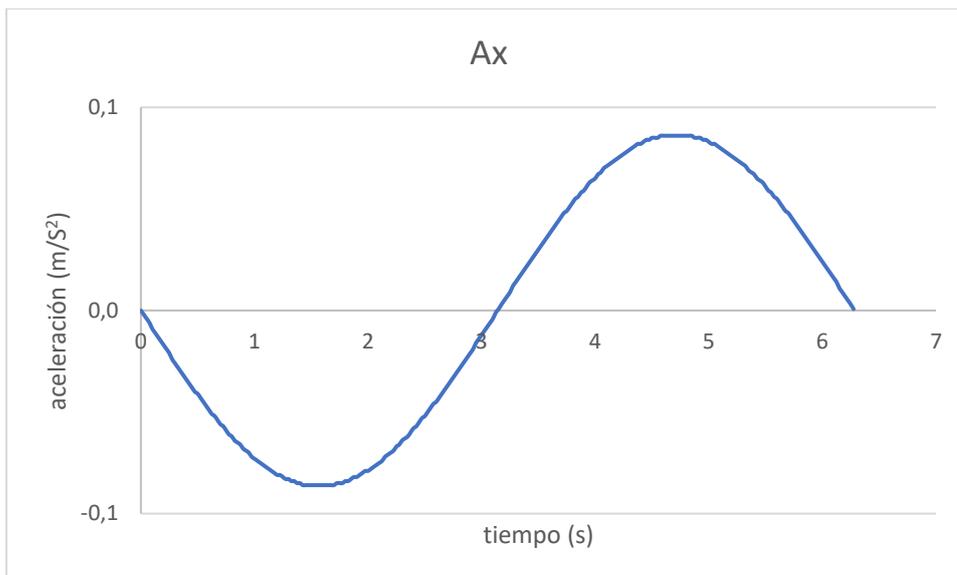


Figura 85. Aceleración en el eje X

La Figura 85 muestra la aceleración en el eje X, tiene una forma senoidal, debido a que la aceleración es la segunda derivada del desplazamiento, que en este caso es una función seno.

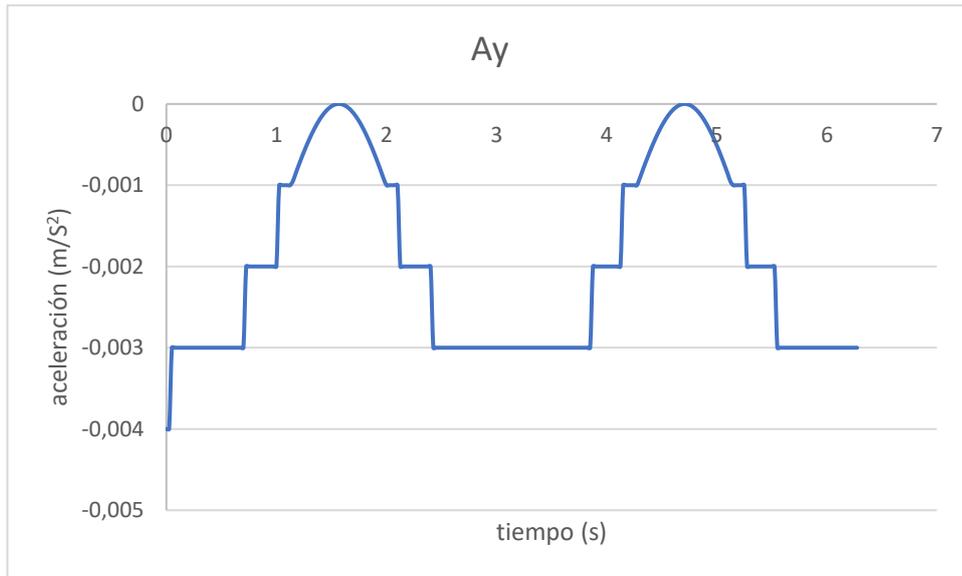


Figura 86. Aceleración en el eje Y

Como se había comentado anteriormente, no debería aparecer aceleración en el eje Y, pero si se observa la Figura 86, la mesa sísmica sí que tiene componente de la aceleración en eje Y.

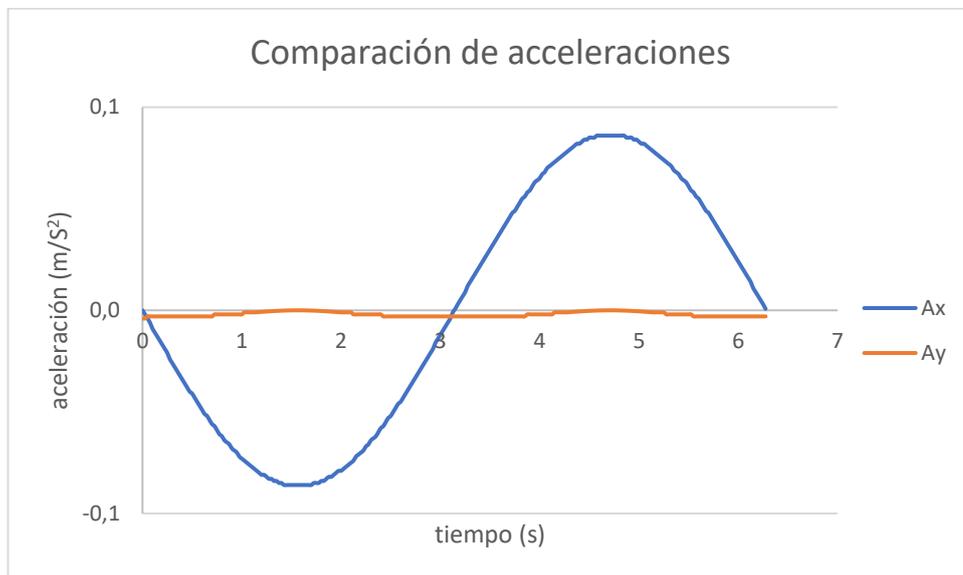


Figura 87. Comparación de la aceleración en ambos ejes

Como se puede observar en la Figura 87, La aceleración en el eje Y es despreciable con la aceleración en el eje X, por lo que podría valer para una primera aproximación de los datos obtenidos en estudios sobre maquetas.

Esta corrección de la trayectoria tiene una limitación y es que solo sirve si ambos actuadores parte de la situación de reposo, desde el punto medio de su carrera, si uno de los dos está fuera de este punto la corrección de la trayectoria deja de ser válida. Esto también sucede si el desplazamiento del actuador A1 es distinto a la función $\sin(t)$, si la función de desplazamiento cambia también lo hará la función de corrección introducida en el actuador A2.

Para realizar la comprobación de lo citado en el párrafo anterior, se va a poner el centro de masas de la mesa sísmica en el punto (0,02 , 0,03) y se va a analizar su trayectoria.

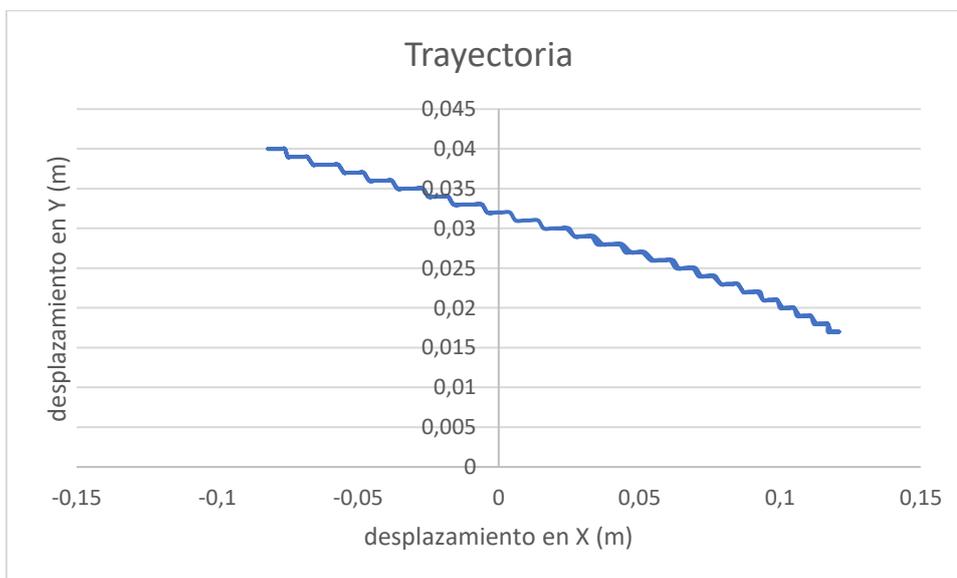


Figura 88. Trayectoria cuando la mesa sísmica esta fuera de la situación de reposo

Como bien se puede observar en la Figura 88, la mesa sísmica ya no describe una trayectoria recta. Para que esto no suceda, habría que realizar un estudio de la cinemática mediante el uso de álgebra inversa de robots, un estudio mucho más complejo para que cuando se quiera mover la mesa sísmica en un solo eje con una aceleración, mediante el uso de álgebra de robots se pueda conocer cómo se debe desplazar el segundo actuador para corregir el movimiento circular que describe la mesa.

Otra aproximación que se puede tomar es que la desviación de la trayectoria corregida sobre la trayectoria inicial, es muy pequeña como ya se observó en la Figura 82, por lo que se podrían hacer simulaciones de terremotos sin corregir la trayectoria, asumiendo que se está cometiendo un error al no describir una trayectoria puramente recta.

4.2.2. SEGUNDA SIMULACIÓN: AMBOS ACTUADORES CON EL MISMO DESPLAZAMIENTO

En esta segunda simulación se va a dar el mismo desplazamiento a ambos actuadores en WM2D, posteriormente se va a realizar gráficas de la trayectoria y de la aceleración en ambos ejes.

El desplazamiento elegido para ambos actuadores es la función $0,05 \cdot \sin(t)$, ya empleada en la simulación anterior. Para cambiar el desplazamiento de un actuador ya se explicó cómo hacerlo en el apartado anterior (Figura 78).

Una vez se ha cambiado el desplazamiento a ambos actuadores se puede comenzar la simulación y grabar los datos para realizar las gráficas

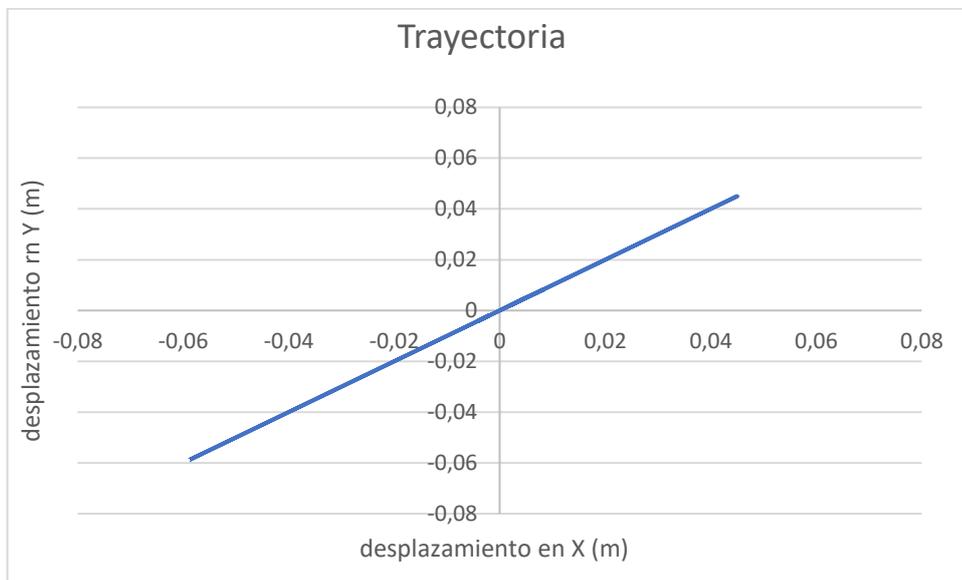


Figura 89. Trayectoria descrita por la mesa sísmica en la segunda simulación

Como era de esperar la trayectoria descrita por el centro de masas es una línea recta, pero en diagonal (Figura 89). Esto sucede de igual modo con las aceleraciones de ambos ejes (Figura 90), que son iguales en módulo, pero con direcciones diferentes. Para obtener el valor de la aceleración del centro de masas de la placa y la dirección, será necesario hacer la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los módulos de ambas componentes (vertical y horizontal) y conocer su dirección.



Figura 90. Comparación de las aceleraciones en la segunda simulación

Esta podría ser otra forma de simular un terremoto en una única dirección, haciendo funcionar ambos actuadores con un mismo desplazamiento, se consigue un movimiento en línea recta, pero en diagonal.

Otro aspecto a tener en cuenta es que la aceleración total al que se somete el ensayo no es la aceleración de uno de los actuadores, si no como ya se ha dicho antes a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de ambas componentes (que son iguales en magnitud).

4.2.3. TERCERA SIMULACION: ACTUADORES CON VELOCIDADES DIFERENTES

Para esta simulación el actuador A1 se ha programado con una variación de longitud igual a $0.200+0.05*\sin(\text{time})*\cos(3*\text{time})$, mientras que el actuador A2 su variación de longitud va a ser $0.200+0.05*\sin(1.7*\text{time})$.

Al arrancar la simulación y posteriormente grabar los datos en Excel, para realizar la gráfica de la trayectoria. Se observa cómo la mesa describe una trayectoria bastante compleja y difícil de predecir (Figura 91).

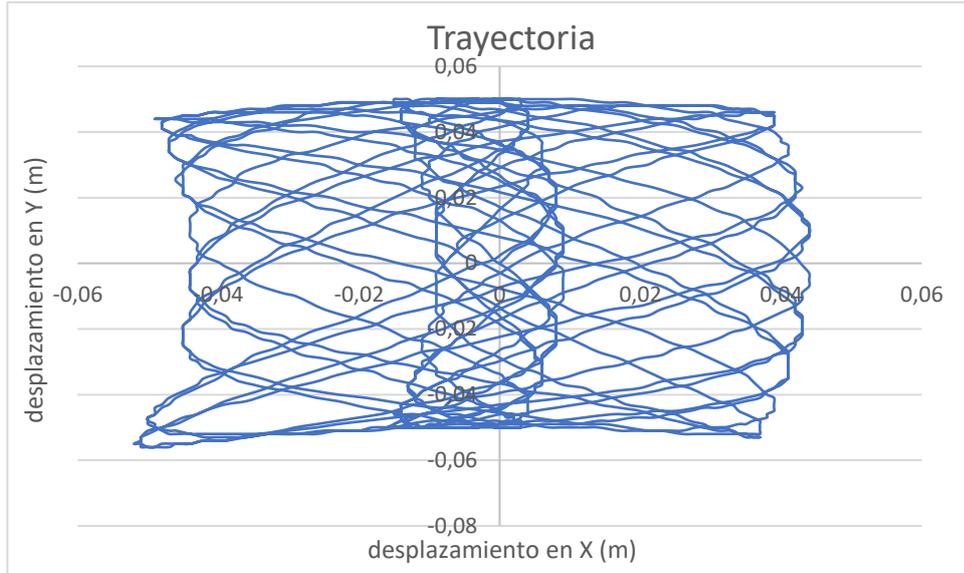


Figura 91. Trayectoria descrita por la mesa sísmica en la tercera simulación

De igual manera sucede con las aceleraciones, no se puede apreciar ningún patrón que se repita, ni se asemejan a ninguna forma fácilmente descriptible.

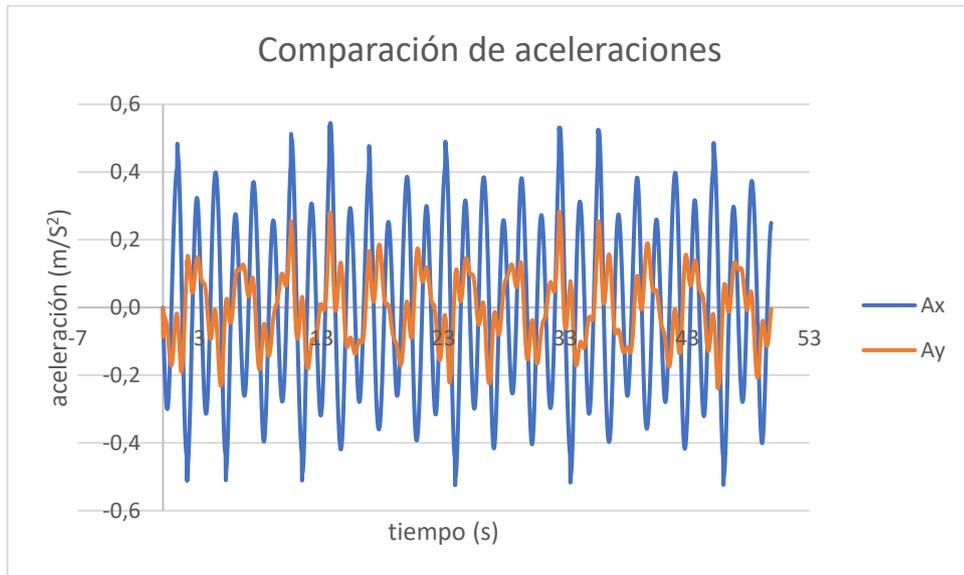


Figura 92. Comparación de las aceleraciones en la tercera simulación

CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

Antes de comenzar a explicar las mejoras hay que decir que la mesa sísmica de dos grados de libertad con los dos actuadores fijos diseñada y fabricada en este Trabajo de Fin de Grado, es totalmente funcional y cumple con todos los objetivos planteados en el CAPITULO 2: OBJETIVOS.

En este capítulo se recogerán posibles ideas o diseños futuros, aplicables al prototipo de la mesa sísmica que se ha fabricado.

Estas ideas no se han llevado a cabo por diversos motivos, ya sea bien por tiempo o por no querer encarecer el prototipo de la mesa sísmica, ya que estos nuevos diseños no mejorarían su funcionamiento sustancialmente.

Durante este proyecto, también se han adquirido y mejorado ciertas competencias, sobre todo en la fase de diseño y fabricación:

- Se ha trabajado con programas de diseño en 3D por ordenador, como CATIA V5, tanto en la fase de diseño de las piezas, como en la obtención de planos para su posterior fabricación.
- Se han realizado trabajos en el taller, tanto a nivel de maquinaria pesada, como puede ser realizar taladros en un taladro de columna o cortar aluminio en una sierra industrial, como a nivel de herramientas ligeras, como puede ser realizar taladros con un taladro de mano o avellanar con un avellanador de mano.
- Se ha trabajado con materiales eléctricos y electrónicos, gracias al montaje de todos los circuitos eléctricos y la instalación de todos los componentes electrónicos.
- Se ha cogido soltura a la hora de buscar las normas que regulan los elementos normalizados, y de buscar en las tablas que vienen en ellas.
- Por último, cabe destacar que se ha adquirido una mayor capacidad de decisión a la hora de elegir procesos productivos, materiales, dimensionado de elementos...

En lo que a líneas futuras se refiere, principalmente se centraran en la mejora principalmente en dos áreas:

- La de las bielas y en su unión con los motores y con la placa.
- En la sustitución de la base.

Comenzaremos por las bielas, se podría mejorar fabricando unas bielas de una sola pieza hechas a medida, y no como las utilizadas que tienen la ventaja de que son de longitud variable, pero tiene un juego mínimo entre sus piezas (este juego es casi nulo por el uso de contratueras que fijan mejor la longitud)

Por otro lado, tenemos las uniones de las bielas con los motores y con la placa, estas uniones se realizan mediante los pasadores que venían con las bielas que al no estar calibrados presentan grandes holguras, y en pequeños desplazamientos se absorben por estas holguras. Una mejora sustancial sería la de pasadores calibrados (Figura 93) hechos específicamente para cada unión, eliminándose así estas holguras.



Figura 93. Pasador calibrado

Otro punto a tener en cuenta a la hora de mejorar esta mesa sísmica sería la de la fabricación de la placa de agarre mencionada en el CAPITULO 4.8.3. PLACA DE AGARRE Con esta nueva pieza se conseguiría que el agujero practicado en la placa para la unión con la biela no se deformase con el uso de la mesa sísmica.

Respecto a la base, esta se podría sustituir por una estructura metálica en forma de emparrillado con anclajes para todas las piezas, facilitando el montaje y desmontaje, así como la accesibilidad a la parte inferior de la placa para la sujeción de las estructuras a ensayar sin necesidad de tener que extraer la placa.

Con el fin de conseguir un análisis más detallado de ambos motores se podría realizar una caracterización de cada uno de ellos por separado, mediante la realización de las curvas par-tensión, par-velocidad, par-eficiencia...

Se debería realizar un estudio cinemático mediante el uso de álgebra inversa de robots, para poder conseguir comandar un actuador en función de la aceleración del otro actuador, cuando se quieran aceleraciones en un solo eje. En este trabajo de fin de grado se ha conseguido hacer mediante el uso de geometría y para desplazamientos, no para aceleraciones que es como realmente se programan los terremotos en las mesas sísmicas.

Respecto a los materiales utilizados, no se han empleado materiales peligrosos ni contaminantes para el medio ambiente, así como todas las partes sobrantes o inútiles han sido debidamente reciclados.

Este trabajo de fin de grado tiene importantes repercusiones sociales y económicas ya que puede ayudar a crear edificios mejor preparados en caso de que se produzca un terremoto, evitando muertes y la destrucción del edificio.

5.1. APARTADO ECONÓMICO

En el apartado económico, en lo que a costes se refiere, es difícil determinar el precio exacto de los materiales (ya que la mayoría estaban disponibles en el departamento), así como la amortización de los equipos empleados en su fabricación (se han empleado herramientas disponibles en los talleres de la universidad).

Si se puede hacer una aproximación de los costes de todos los materiales empleados.

material	ud	precio total
Base de madera	1	10 €/m ²
Guías	4	31,96 €
Actuador pequeño	1	1.983,60 €
Actuador grande	1	2.503,20 €
Biela M5	1	3,72 €
Biela M8	1	5,52 €
Placa alucore	1	15 €/m ²
Tornillos, tuercas y remaches	N/A	2,00 €

Tabla 4. Precios

En la Tabla 3 se recoge un breve resumen del coste aproximado de las piezas empleadas, donde asciende a un total de 4.555,00 €.

Hay que decir que los dos elementos más caros (los dos actuadores) ya estaban disponibles en el departamento y no ha sido necesario comprarlos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Wallemacq, R. Below, and D. McLean, "Economic Losses, Poverty and Disasters 1998-2017," Brussels, BELGIUM, 2018.
- [2] B. Sevilla, "Terremotos: número registrado a nivel mundial 2000-2019," [Online] Available: <https://es.statista.com/estadisticas/635155/numero-de-terremotos-registrados-a-nivel-mundial/> (accessed Apr. 28, 2020).
- [3] Quanser, "About - Quanser." [Online] Available: <https://www.quanser.com/about/> (accessed Apr. 28, 2020).
- [4] Quanser, "Operation Simple Components Workstation Shake table ii." [Online] Available: https://www.quanser.com/products/shake_table_ii/ (accessed Apr. 28, 2020).
- [5] Quanser, "XY Shake Table III," *Quanser Inc*, 2014, [Online]. Available: http://www.quanser.com/products/shake_table_III (accessed Apr. 28, 2020).
- [6] Quanser, "Six Degrees of Freedom Motion Platform for Advanced Research." [Online] Available: <https://www.quanser.com/products/hexapod/> (accessed Apr. 28, 2020).
- [7] VZero, "Civil y sísmico - VZero.eu." https://www.vzero.eu/business_areas/14 (accessed Apr. 28, 2020).
- [8] VZero, "VZST SHAKE TABLES." [Online] Available: <https://www.vzero.eu/products/19> (accessed Apr. 28, 2020).
- [9] J. Reyes Morales, "Diseño, prototipaje y caracterización de una mesa sísmica de 1 grado de libertad a escala," Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Valladolid, 2017.
- [10] R. Puertas Granja, "Diseño y prototipado de una mesa sísmica de dos grados de libertad," Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Valladolid, 2019.
- [11] J. Villanueva González, "Prototipado de una maqueta modular de un edificio multidireccional," Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Valladolid, 2019.
- [12] J. L. García García, "Diseño, construcción y caracterización de una maqueta de edificio multiplanta para prácticas de vibraciones," Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Valladolid, 2016.
- [13] LinMot, "PS01-23x80F-HP-R - LinMot e-Catalogue." [Online] Available: <https://shop.linmot.com/E/ag1000.23.082/linear-motors/linear-motors-p01-23/stators-ps01-23x80-hp/ps01-23x80f-hp-r.htm> (accessed Apr. 29, 2020).

- [14] LinMot, “PS01-37x120F-HP-C - LinMot e-Catalogue.” [Online] Available: <https://shop.linmot.com/E/ag1000.37.122/linear-motors/linear-motors-p01-37/stators-ps01-37x120-hp/ps01-37x120f-hp-c.htm> (accessed Apr. 29, 2020).
- [15] Deutsches Institut für Normung, “DIN 444:2017-04 - Fasteners - Eye bolts,” 2017.
- [16] Aliexpress, “M5 M6 M8 Acero inoxidable tornillo de aparejo cuerpo cerrado mandíbula sujetador tensor|Tornillos| - AliExpress.” [Online] Available: https://es.aliexpress.com/item/32959751241.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.7fcc2c87MesKzB&algo_pvid=3228b6c7-aa9d-47a8-91ef-7b3f7645604a&algo_expid=3228b6c7-aa9d-47a8-91ef-7b3f7645604a-30&btsid=39226a81-e39f-4773-9af4-d507a25a2ea9&ws_ab_test=searchweb0_0,s (accessed May 04, 2020).
- [17] Alucobond, “Alucore, información del producto,” [Online]. Available: <https://alucobond.com/products/alucore> (accessed: May 04, 2020)
- [18] Deutsches Institut für Normung, “DIN 53295:1982-02 - testing of sandwiches; peel test by means of a drum,” 1982.
- [19] LeroyMerlin, “Guía para cajón lateral en acero de 1x50 mm · LEROY MERLIN.” [Online]. Available: <https://www.leroymerlin.es/fp/81888027/guia-para-cajon-lateral-en-acero-de-1x50-mm> (accessed May 04, 2020).
- [20] International Organization for Standardization, “ISO 273:1979 - Fasteners – Clearance holes for bolts and screws,” 1979.
- [21] Deutsches Institut für Normung, “DIN EN 912:2011-09 - Timber fasteners - Specifications for connectors for timbers,” 2011.
- [22] Deutsches Institut für Normung, “DIN 315:2016-12 - Fasteners - Wing nuts - Rounded wings,” 2016.
- [23] International Organization for Standardization, “ISO - ISO 2010:2011 - Slotted raised countersunk head screws – Product grade A.”
- [24] International Organization for Standardization, “ISO 4032:2012 - Hexagon regular nuts (style 1) - Product grades A and B,” 2012.
- [25] International Organization for Standardization, “ISO 4762:2004 - Hexagon socket head cap screws,” 2004.
- [26] Deutsches Institut für Normung, “DIN 471:2011-04 - Retaining rings for shafts - Normal type and heavy type,” 2011.
- [27] International Organization for Standardization, “ISO 7093-1:2000 - Plain washers – Large series – Part 1: Product grade A,” 2000.

ANEXO I. PLANOS

En este anexo se van a adjuntar los planos relativos a las piezas que han sido fabricadas o han sufrido algún tipo de modificación para su utilización, en el taller de la escuela o en el mismo departamento con herramientas manuales.

Estas piezas se han descrito en el CAPITULO 4: DISEÑO y en el CAPITULO 5: PROTOTIPADO se ha profundizado más en los procesos de fabricación empleados en las distintas piezas.

A continuación, se van a numerar los planos de las piezas que forman la mesa sísmica y que se presentaran en este anexo

- Base
- Placa
- Zanco del motor pequeño

H G F E D C B A

4

3

2

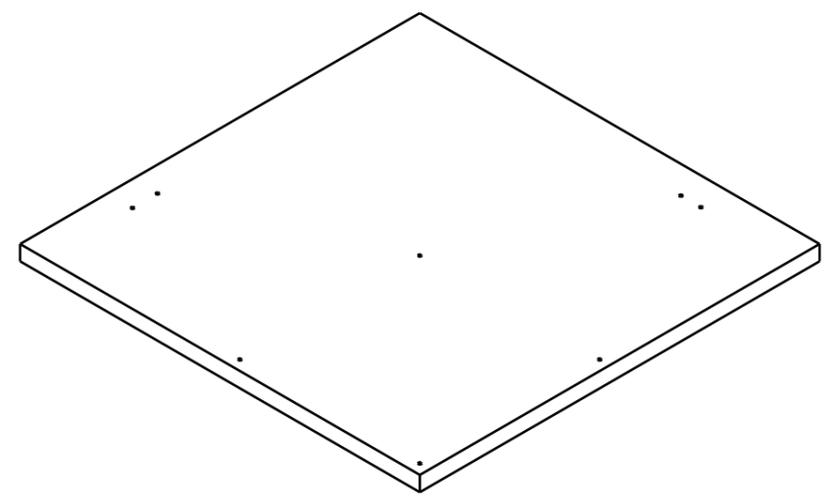
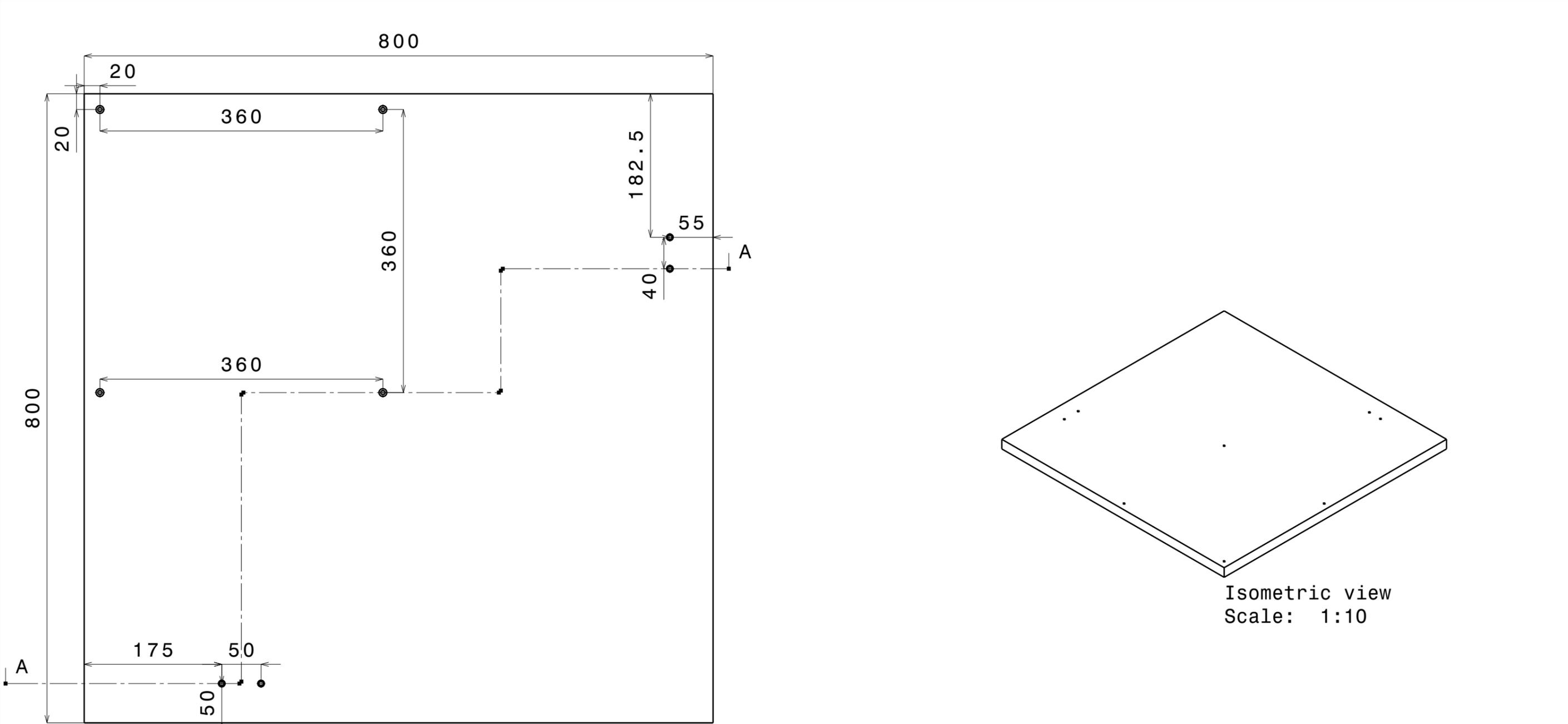
1

4

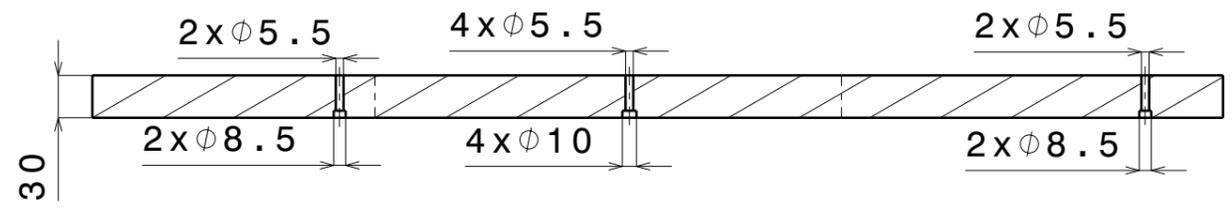
3

2

1



Isometric view
Scale: 1:10



Section view A-A

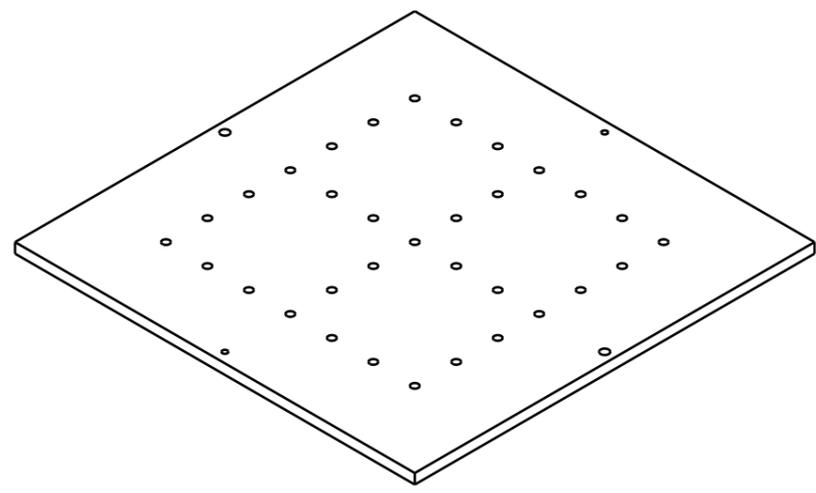
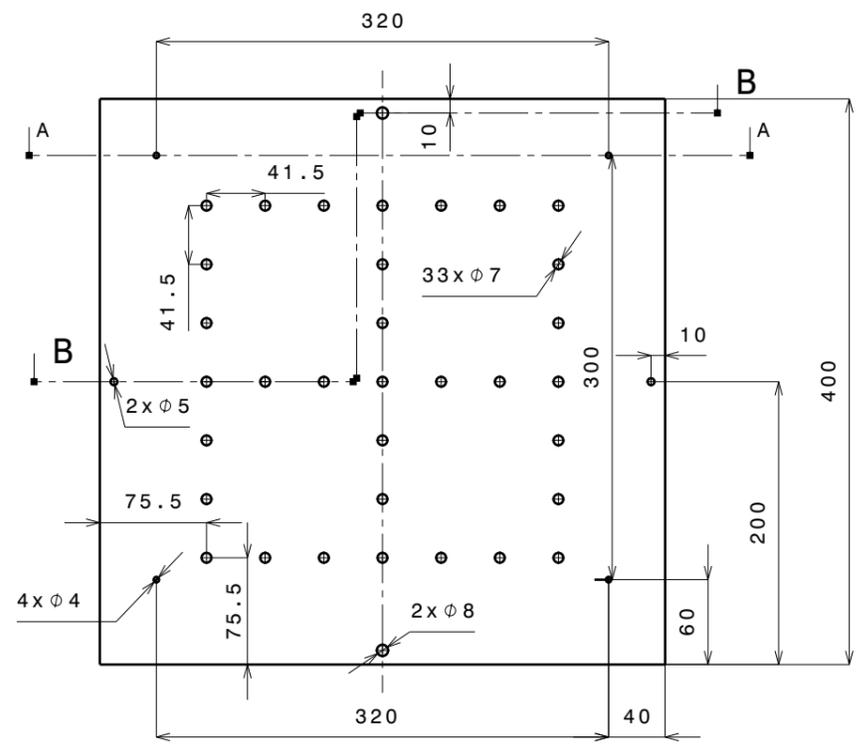
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		DASSAULT SYSTEMES		
DRAWN BY Alonso, L.M.		DRAWING TITLE BASE		
DATE 18/03/2020	CHECKED BY XXX	DATE xxx	SIZE A3	DRAWING NUMBER
DESIGNED BY XXX	DATE xxx	SCALE 1:5	SHEET 1/3	REV X

H G B A

H G F E D C B A

4

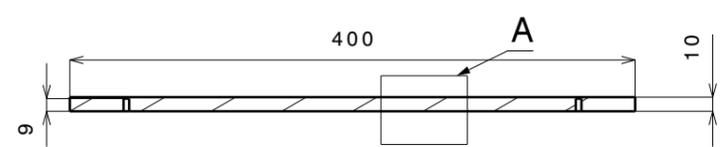
4



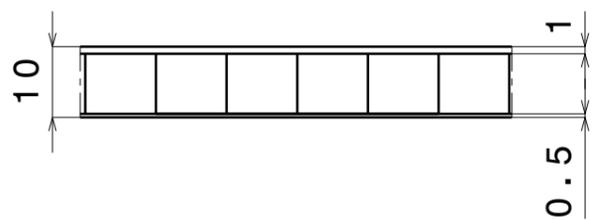
Isometric view
Scale: 1:5

3

3



Section view A-A



Detail A
Alucore
Scale: 1:1

2

2



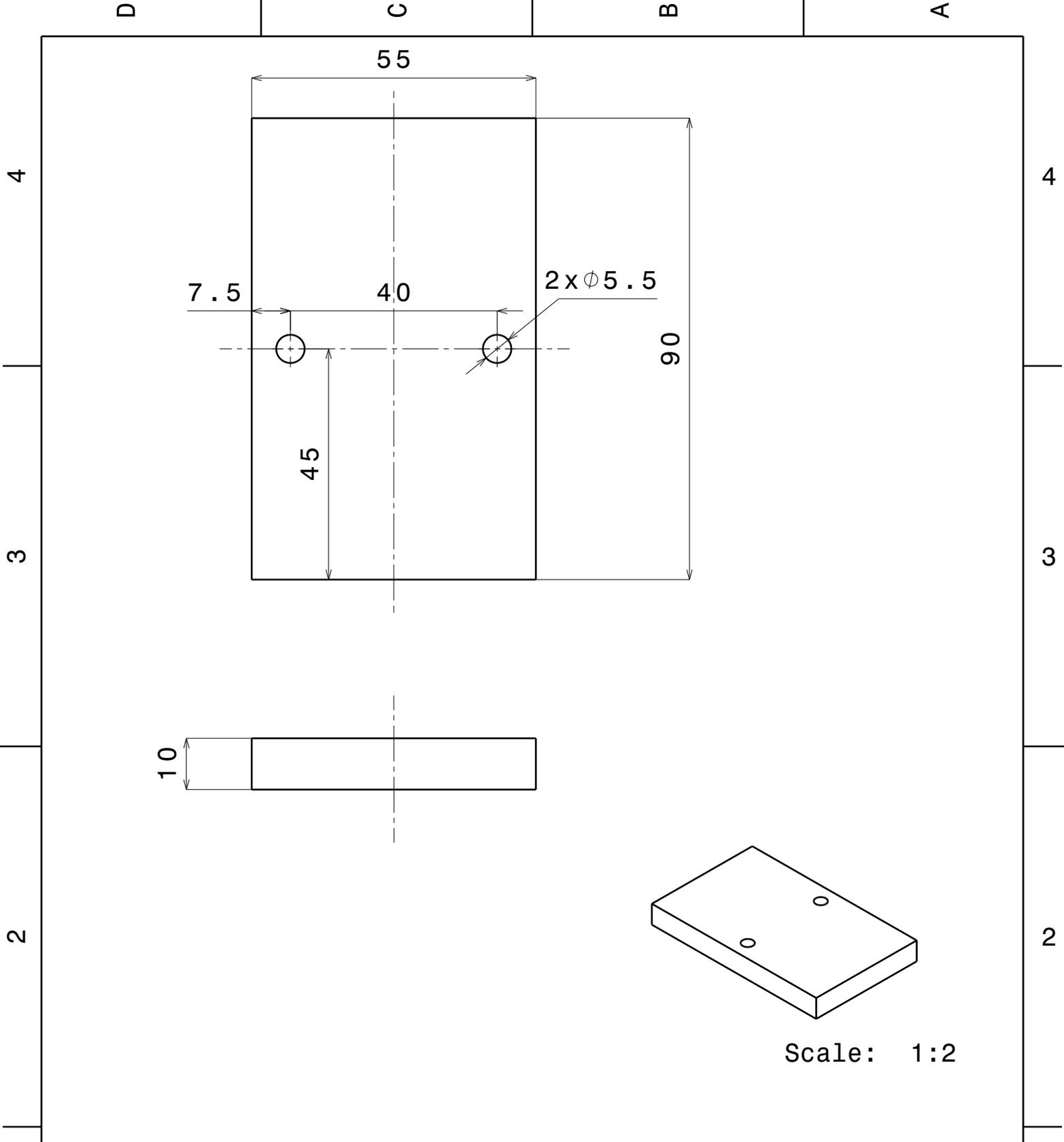
Section view B-B

1

1

This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		DASSAULT SYSTEMES			
DRAWN BY Alonso, L.M.		DATE 17/03/2020		DRAWING TITLE PLACA	
CHECKED BY XXX		DATE xxx		SIZE A3	
DESIGNED BY XXX		DATE xxx		DRAWING NUMBER	
		SCALE 1:5		REV X	
				SHEET 1/1	

H G F E D C B A



This drawing is our property.
It can't be reproduced
or communicated without
our written agreement.

DASSAULT SYSTEMES

DRAWING TITLE

DRAWN BY
Alonso, L.M.

DATE
18/03/2020

ZANCO

CHECKED BY
XXX

DATE
XXX

SIZE
A4

DRAWING NUMBER

REV
X

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SCALE 1:1

SHEET 3/3

