



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**INDUSTRIALIZACION DE UN ABSORBEDOR
MODULAR DE VIBRACIONES**

Autor: D. Arturo Víctor Laass Muñoz

Tutor: D. Antolín Lorenzana Ibán

Valladolid, Septiembre 2020

RESUMEN

Se trata de la industrialización de un absorbedor modular de vibraciones basado en la tecnología TMD (Tuned Mass Damper) a través de la construcción de una maqueta digital parametrizada con el objetivo de crear una gama de producto que pueda ser comercializada. La evolución de este producto, partiendo de un prototipo inicial, presenta mejoras tecnológicas las cuales hacen que nuestro producto se diferencie de otros TMD.

Cada producto concreto se define mediante una hoja de cálculo donde obtendremos como salida los valores de los parámetros del modelo TMD de CATIA, en función de los datos de entrada que nos ofrece el cliente. La hoja de cálculo fue construida empleando una hoja EXCEL donde presentamos todas las ecuaciones que rigen el TMD.

Finalmente, se presentará el prototipo de TMD construido en el laboratorio de estructuras, el cual fue empleado para testar las nuevas soluciones tecnológicas implementadas en la maqueta digital ofrecida a los clientes.

PALABRAS CLAVE

Maqueta Digital, TMD, Parámetros, Prototipo, Industrialización y Hoja de cálculo.

ABSTRACT

It is about the industrialization of a modular absorber of vibrations using the TMD's technologies (Tuned Mass Damper) through the construction of a parametric digital mock-up with the goal of creating a range of this product that could be marketable. The evolution of this product, based on an initial prototype, provides some technological improvements which make our product different from other TMDs.

The different models of this product are based on a spreadsheet where we obtain the parameter's values of the TMD model of CATIA, depending on the input data offered by the client. The spreadsheet was developed using an EXCEL sheet where we show all TMD's equations.

Finally, both the digital mock-up and the mockup of the prototype are presented. They were built in the laboratory of structures and the mockup of the prototype was used to test these new solutions.

KEY WORDS

Digital Mockup, TMD, Parameters, Prototype, Industrialization and Spreadsheet

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi madre y hermana todo el apoyo que me han dado durante mis años universitarios tanto en España como en Francia.

Al Laboratorio de Estructuras de la Escuela de Ingenierías Industriales – ITAP, principalmente a mi tutor D. Antolín por darme la oportunidad de trabajar con él, así como su rápida respuesta y ayuda durante el periodo de confinamiento sufrido por la pandemia global. También agradecer la ayuda de D. Álvaro por sus aportaciones a lo largo de este proyecto como en la fabricación del prototipo.

También agradecerles a todos mis amigos y amigas que han estado conmigo estos años y aquellos que continúan conmigo por su apoyo a lo largo de estos años.

Finalmente, gracias a la Universidad de la ENSAM-ParisTech que me dio la oportunidad de realizar un doble diploma con ellos, así como aquellas personas que compartieron conmigo dicha experiencia y que juntos creamos una familia que perdura hoy en día.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Antecedentes	4
1.3	Objetivos	8
2	DISEÑOS PARAMÉTRICOS.....	11
3	PREMISAS Y DESARROLLO DEL PROYECTO.....	13
4	MAQUETA DIGITAL TMD	15
4.1	Parámetros	16
4.2	Ballestas.....	19
4.2.1	MATERIAL ACERO F143.....	21
4.3	Base Fija.....	22
4.3.1	EVOLUCIÓN DE LA BASE FIJA	22
4.3.2	PARÁMETROS Y DIMENSIONES	25
4.3.3	MATERIAL ACERO S275.....	28
4.4	Base Móvil	30
4.4.1	EVOLUCIÓN DE LA BASE MÓVIL	30
4.4.2	PARÁMETROS Y DIMENSIONES	32
4.5	Cuna.....	35
4.5.1	EVOLUCIÓN DE LA CUNA	35
4.5.2	PARÁMETROS Y DIMENSIONES	37
4.6	Masas.....	44
4.6.1	EVOLUCIÓN DE LA MASA.....	44
4.6.2	PARÁMETROS Y DIMENSIONES	45
4.7	SopORTE de los Muelles.....	48
4.7.1	EVOLUCIÓN DE LOS SOPORTE DE MUELLES.....	48
4.7.2	PARÁMETROS Y DIMENSIONES	50
4.8	Taco	55
4.9	Escuadra final de Carrera	57
4.9.1	EVOLUCIÓN DE FINAL DE CARRERA.....	57
4.9.2	PARÁMETROS Y DIMENSIONES	59
4.10	Escuadra Unión del Amortiguador	61
4.11	Tope de Goma	63
4.12	Varilla Roscada	65
4.13	Muelles	67
4.14	Amortiguador	70
4.15	Modelo Final del TMD	73
5	CÁLCULO NUMÉRICO - PARÁMETROS.....	79

5.1	Fase 1 – Rigidez de los muelles	81
5.2	Fase 2 – Parámetros de Muelles Helicoidales	85
5.3	Fase 3 – Almacén de Muelles	90
6	PROTOTIPO TMD	93
6.1	Base Fija y Base Móvil	94
6.2	Cuna y Masas.....	96
6.3	Muelles y Amortiguador.....	99
6.4	Ballestas y Tacos.....	101
6.5	Experimentación - Ensayos.....	102
7	CONCLUSIONES	107
7.1	Consideraciones Adicionales	108
7.2	Vías de Investigación	110
	BIBLIOGRAFIA	112
	ANEXOS	114
	Planos TMD Final	114
	Planos Prototipo TMD	115

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. TMD instalados sobre la pasarela Millenium Brigde en Londres [2]</i>	1
<i>Figura 2. Torre Titania en Madrid (Oficinas) [3]</i>	2
<i>Figura 3. Digital Mock-up de una turbina [4]</i>	3
<i>Figura 4. Software CATIA (Dassault Système) [5]</i>	3
<i>Figura 5. TMD situado en el rascacielos Taipéi 101 [6]</i>	4
<i>Figura 6. Esquema TMD rascacielos Taipéi 101 [6]</i>	5
<i>Figura 7. Esquema MD de un Fórmula 1 (Temporada 2006/07) [7]</i>	5
<i>Figura 8. Standard TMD (Empresa MAURER) [8]</i>	6
<i>Figura 9. Folded TMD (Empresa MAURER) [8]</i>	7
<i>Figura 10. Controlled TMD (Empresa MAURER) [8]</i>	7
<i>Figura 11. Maqueta digital del prototipo TMD [1]</i>	8
<i>Figura 12. TMD prototipo físico (Laboratorio de estructura - Paseo del Cauce) [1]</i>	9
<i>Figura 13. Producto final (TMD) deseado</i>	9
<i>Figura 14. Fichero del historial paramétrico (Fichero CATPart)</i>	11
<i>Figura 15. Maqueta digital inicial – TMD 4 (Modelo parametrizado)</i>	12
<i>Figura 16. Maqueta digital inicial – TMD 1 (Modelo parametrizado)</i>	12
<i>Figura 17. Parámetro Ancho Cuna</i>	16
<i>Figura 18. Parámetro Longitud Ballesta</i>	17
<i>Figura 19. Parámetro Espesor Ballesta</i>	17
<i>Figura 20. Árbol del fichero Parámetros</i>	18
<i>Figura 21. Maqueta digital de una ballesta</i>	19
<i>Figura 22. Ventana creación de fórmulas (CATIA)</i>	20
<i>Figura 23. Árbol del fichero Ballesta</i>	20
<i>Figura 24. Material Acero F143 (Aplicación maqueta digital)</i>	21
<i>Figura 25. Base Fija Inicial (Maqueta Digital)</i>	22
<i>Figura 26. Primera modificación de la Base Fija (Maqueta Digital)</i>	23
<i>Figura 27. Segunda modificación de la Base fija (Maqueta Digital)</i>	23
<i>Figura 28. Tercera modificación de la Base fija (Maqueta digital)</i>	24
<i>Figura 29. Base Fija - Modelo Final (Maqueta Digital)</i>	24
<i>Figura 30. Árbol del fichero Base Fija</i>	25
<i>Figura 31. Ventana creación de Rules</i>	26
<i>Figura 32. Rule Hilera Taladros (Posiciones Agujeros Rules – Base Fija)</i>	27
<i>Figura 33. Rules taladros Base Fija – Soporte sujeción (Unión Soporte Muelles Rules – Base Fija)</i>	28
<i>Figura 34. Material Acero S275 (Aplicación maqueta digital)</i>	29
<i>Figura 35. Base móvil Inicial (Maqueta Digital)</i>	30
<i>Figura 36. Primera modificación de la Base móvil (Maqueta Digital)</i>	31
<i>Figura 37. Segunda modificación de la Base móvil (Maqueta Digital)</i>	31
<i>Figura 38. Base móvil - Modelo Final (Maqueta Digital)</i>	32
<i>Figura 39. Árbol del fichero Base Móvil</i>	33
<i>Figura 40. Rule Hilera Taladros (Posiciones Agujeros Rules – Base Móvil)</i>	34
<i>Figura 41. Cuna Inicial (Maqueta Digital)</i>	35
<i>Figura 42. Primera modificación de la Cuna (Maqueta Digital)</i>	36
<i>Figura 43. Segunda modificación de la Cuna (Maqueta Digital)</i>	36
<i>Figura 44. Cuna - Modelo Final (Maqueta Digital)</i>	37
<i>Figura 45. Árbol del fichero Cuna</i>	38
<i>Figura 46. Rule del ancho de pletina (Ancho Pletinas Rules - Cuna)</i>	39
<i>Figura 47. Rule taladros de la masa (Uniones masa Rule - Cuna)</i>	41
<i>Figura 48. Rule posición de los taladros de los muelles (Posición Unión Muelle - Cuna)</i>	42
<i>Figura 49. Rule número de uniones de los muelles (N.º Uniones Muelles Rule - Cuna)</i>	43
<i>Figura 50. Masa - Modelo Final (Maqueta Digital)</i>	44
<i>Figura 51. Masa - Modelo Inicial (Maqueta Digital)</i>	45
<i>Figura 52. Árbol del fichero Masa</i>	45
<i>Figura 53. Rule taladros de la masa (Uniones masa Rule - Masa)</i>	47
<i>Figura 54. Soporte de los muelles - Modelo Inicial (Maqueta Digital)</i>	48
<i>Figura 55. Primera modificación del Soporte de los muelles (Maqueta digital)</i>	49

Figura 56. Segunda modificación del Soporte de los muelles (Maqueta Digital).....	49
Figura 57. Soporte muelles - Modelo Final (Maqueta Digital).....	50
Figura 58. Árbol del fichero Soporte de los Muelles.....	51
Figura 59. Rule de la posición del taladro de los muelles (Posición Unión Muelles Rule -Soporte Muelles)	52
Figura 60. Rule del número de taladros en el soporte (N.º Uniones Muelles Rule – Soporte de los muelles).....	53
Figura 61. Rule de las uniones de la base fija y el soporte (Distancia Unión Base Rule – Soporte de los muelles).....	54
Figura 62. Taco - Modelo Final (Maqueta Digital).....	55
Figura 63. Árbol del fichero Taco	56
Figura 64. Escuadra Final de carrera - Modelo Inicial (Maqueta Digital).....	57
Figura 65. Primera modificación de la Escuadra final carrera (Maqueta Digital).....	58
Figura 66. Segunda modificación de la Escuadra final carrera (Maqueta Digital).....	58
Figura 67. Escuadra Final Carrera - Modelo Final (Maqueta Digital).....	59
Figura 68. Árbol del fichero Escuadra Final Carrera.....	60
Figura 69. Escuadra Unión Amortiguador - Modelo Final (Maqueta Digital).....	61
Figura 70. Árbol del fichero Escuadra Unión Amortiguador	62
Figura 71. Tope de Goma Macho - Modelo Final (Maqueta Digital).....	63
Figura 72. Tope de Goma Hembra - Modelo Final (Maqueta Digital).....	63
Figura 73. Árbol del fichero Tope de Goma.....	64
Figura 74. Varilla Roscada - Modelo Final (Maqueta Digital).....	65
Figura 75. Árbol del fichero Varilla Roscada	66
Figura 76. Muelles - Modelo Final (Maqueta Digital).....	67
Figura 77. Árbol del fichero Muelles	68
Figura 78. Rule del número de muelles (N.º Muelles Rules - Muelles).....	69
Figura 79. Esquemas del flujo del aceite dentro del pistón [11].....	70
Figura 80. Amortiguador - Modelo Final (Maqueta Digital).....	71
Figura 81. Árbol del fichero Amortiguador	72
Figura 82. Elemento de sujeción de muelles (Maqueta Digital).....	73
Figura 83. Elemento Final de Carrera.....	74
Figura 84. Elemento de ballesta.....	74
Figura 85. Elemento de amortiguación.....	75
Figura 86. Parte fija.....	76
Figura 87. Parte Cuna.....	76
Figura 88. Parte Móvil.....	77
Figura 89. Modelo final del TMD.....	77
Figura 90. Logotipo software EXCEL.....	79
Figura 91. Parámetro de un muelle helicoidales.....	86
Figura 92. Despiece TMD (Maqueta Física).....	93
Figura 93. Parte trasera de las bases, fija y móvil (Prototipo).....	94
Figura 94. Parte delantera de las base, fija y móvil (Prototipo).....	94
Figura 95. Vista frontal de la Cuna (Prototipo).....	96
Figura 96. Interior de la Cuna (Prototipo).....	96
Figura 97. Bloque de pesos (Prototipo).....	97
Figura 98. Muelle tipo gordo (Prototipo).....	99
Figura 99. Muelle situado en el prototipo TMD	99
Figura 100. Amortiguador (Prototipo).....	100
Figura 101. Ballestas y tacos (Prototipo).....	101
Figura 102. Prototipo TMD.....	102
Figura 103. Puente de madera colgante (Estructura de ensayo).....	103
Figura 104. TMD sin muelle y cargado (Prototipo).....	104
Figura 105. TMD con muelles y cargado (Prototipo).....	104
Figura 106. Ensayo del TMD sobre el puente colgante.....	105
Figura 107. Esquema del proceso de pedido de un cliente	108

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Estructura del TMD.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 2. Datos de entrada (Hoja EXCEL)</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 3. Datos del Acero (S275 y/o F143)</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 4. Datos Ballestas</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 5. Geometría Cuna (Parámetros CATIA).....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 6. Cálculo Km (1 mm y 1,5 mm espesor Ballesta).....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 7. Número de muelles en función del ancho de cuna</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 8. Propiedades Muelles helicoidales.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 9. Propiedades muelles helicoidales modelo CATIA (Espesor ballesta 1 mm)</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 10. Km objetivo y Elongación Necesaria.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 11. Tipos de muelles en el almacén (Fino, Mediano y Gordo)</i>	<i>91</i>
<i>Tabla 12. Datos laboratorio muelles almacén</i>	<i>91</i>

INDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1. Espacio Cuna-Base Fija.....</i>	<i>37</i>
<i>Ecuación 2. Ancho del soporte de los muelles.....</i>	<i>50</i>
<i>Ecuación 3. Ancho de cuna inicial b'.....</i>	<i>82</i>
<i>Ecuación 4. Peso Cuna.....</i>	<i>82</i>
<i>Ecuación 5. Peso Base Móvil.....</i>	<i>82</i>
<i>Ecuación 6. Ancho de cuna calculada b''.....</i>	<i>82</i>
<i>Ecuación 7. Rigidez ballesta K_b.....</i>	<i>84</i>
<i>Ecuación 8. Comprobación de Régimen Elástico.....</i>	<i>84</i>
<i>Ecuación 9. Rigidez de los muelles K_m.....</i>	<i>84</i>
<i>Ecuación 10. Constante de rigidez de los muelles unitarios.....</i>	<i>86</i>
<i>Ecuación 11. Rigidez de muelles helicoidales.....</i>	<i>86</i>
<i>Ecuación 12. Elongación estática de los muelles.....</i>	<i>87</i>
<i>Ecuación 13. Elongación máxima de los muelles.....</i>	<i>87</i>
<i>Ecuación 14. Tensión Cortante (τ).....</i>	<i>87</i>
<i>Ecuación 15. Comprobación esfuerzo cortante límite de los muelles helicoidales.....</i>	<i>87</i>

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

Una estructura, aparte de cumplir su misión funcional, debe ser lo suficientemente cómoda como para garantizar la confianza de los usuarios. El comportamiento de las estructuras ante cargas dinámicas ha estado siempre relacionado con la sensibilidad de las personas frente a las vibraciones. Existen ciertos movimientos y/o fuerzas que hacen que los usuarios puedan sentirse incómodos. Una solución a esta problemática es la incorporación de disipadores, que son el objeto de estudio de este informe. Concretamente se trabajará con disipadores inerciales tipo TMD (*Tuned Mass Damper*).

El dispositivo TMD tiene por objetivo la reducción de la respuesta dinámica de la estructura a la que está fijada [1]. Una de sus aplicaciones, por ejemplo, es la absorción de las vibraciones generadas por los viandantes en puentes o pasarelas (*Figura 1*) [2] o por los usuarios de forjados comerciales de grandes luces y edificios de oficinas (*Figura 2*) [3]. Los disipadores inerciales de tipo TMD están, generalmente, formados por una masa, un resorte y un amortiguador.

El objetivo de este dispositivo es que su frecuencia esté sintonizada con la frecuencia particular de la estructura a la que está anclado. Así pues, cuando la frecuencia es excitada, el amortiguador entrará en resonancia fuera de fase con el movimiento de esta. Por tanto, aparecerá una velocidad relativa entre las partes que puede ser aprovechada para instalar un amortiguador y así poder disipar energía. La cantidad de energía disipada depende de la cantidad de movimiento (masa por velocidad) que la estructura es capaz de transmitir al TMD.



Figura 1. TMD instalados sobre la pasarela Millenium Brigde en Londres [2]

Según lo expuesto hasta el momento, estos productos deben presentar diferentes configuraciones según la frecuencia que se quiere amortiguar, así como la estructura en la que se sitúe. El hecho de que dicho producto sea modular y cambie sus dimensiones según las condiciones de trabajo, hace que sea obligatorio el uso de maquetas digitales, las cuales representen el modelo que se quiere para cada caso específico.



Figura 2. Torre Titania en Madrid (Oficinas) [3]

El uso de maquetas digitales o DMU (*Digital Mock-up*) permite realizar la descripción completa de nuestro producto, generalmente en 3D, a lo largo de su ciclo de vida. El DMU permite crear un ensamblaje del producto con todos sus componentes (*Figura 3*), además es enriquecida por todas las actividades que ayudan a describir dicho producto.

La nueva revolución industrial, es decir, la industria 4.0, se basa en el uso de los DMU para realizar la concepción de nuevos productos o generar los modelos a industrializar. El uso de esta tecnología se basa en las siguientes ventajas [4]:

- Permite la optimización del diseño para mejorar su calidad.
- Reducción del plazo de salida al mercado del producto.
- Reducción de costes en todos los procesos del producto.
- Permite la colaboración universal entre los equipos que pueden participar en el modelo del producto.
- Elimina las costosas pruebas de concepto o reducen los prototipos.
- Permite simular su comportamiento mediante ensayos no destructivos y relativamente barato (solamente el tiempo de ingeniería).

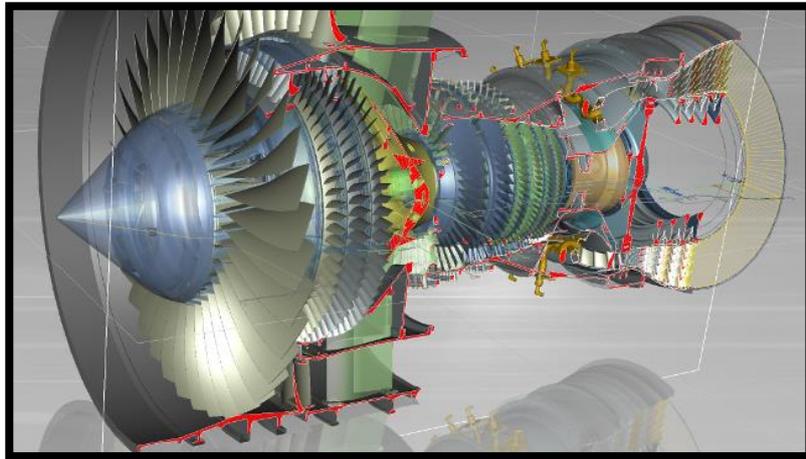


Figura 3. Digital Mock-up de una turbina [4]

Existen diversos programas, hoy en día, dedicados a la generación de los DMU, los cuales están muy extendidos en muchos sectores industriales: aviación, automoción, construcción, etc. Además, estos programas están tan desarrollados que pueden abarcar el ciclo de vida del producto completo, desde la fase de diseño hasta la fase de producción. Algunos de los programas más destacados son: *Unigraphics NX (SIEMENS)*, *3D Experience (DASSAULT SYSTEME)* [5], *Autocad (AUTODESK)*, *ProEngineer Wildfire (PTC CORP)*, etc.



Figura 4. Software CATIA (Dassault Systèmes) [5]

El laboratorio de estructuras, perteneciente al departamento de Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno y Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras, dispone tanto de los equipamientos como de las instalaciones necesarias para la realización del presente TFM ya que mantiene una línea de investigación activa en dinámica estructural.

1.2 ANTECEDENTES

Actualmente se puede encontrar en el mercado diversos modelos de TMDs, los cuales han ido evolucionando a lo largo de los años desde su primer modelo en 1909 por Frahm (TMD destinado a la reducción de los movimientos oscilatorios de los barcos). Dicho dispositivo de control pasivo mediante sistemas inerciales acoplados, siempre deben constar de:

- Un oscilador de un grado de libertad
- Un mecanismo de muelle o péndulo
- Un mecanismo de amortiguamiento

Uno de los usos más destacado de esta tecnología, en el sector de la construcción, fue la introducción de un TMD en el rascacielos Taipéi 101 (*Figura 5*) [6]. El uso de este elemento tiene por objetivo la reducción de las vibraciones, de esta estructura esbelta, producido por el viento. Este TMD además de ser funcional, también es una atracción ya que puede ser visitada, por la estética que presenta.



Figura 5. TMD situado en el rascacielos Taipéi 101 [6]

El TMD (*Figura 6*) [6] empleado está constituido por una esfera de 5,5 metros de diámetro y construido en acero. La masa está suspendida por 92 cables de acero de 8,9 cm de diámetro y 42 metros de longitud (mecanismo tipo péndulo), dichos cables presentar un alto factor de seguridad ya que con solo un cuarto de los cables empleados son suficientes para aguantar el peso de la esfera. Además, la esfera está sujeta por 8 amortiguadores hidráulicos (mecanismo de amortiguamiento). Finalmente, se tiene que los amortiguadores se unen a un parachoques horizontal para darle mayor estabilidad [6].

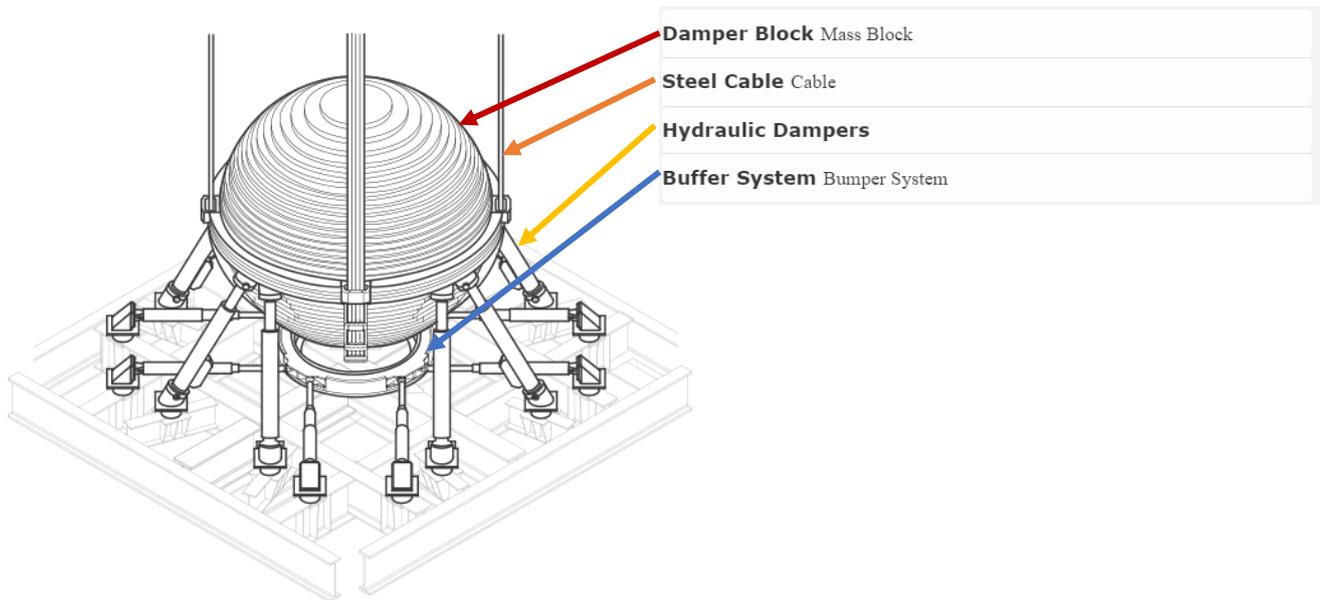


Figura 6. Esquema TMD rascacielos Taipéi 101 [6]

La aplicación no solamente se restringe al mundo de la arquitectura, sino que también puede emplearse en el sector de la automoción. La primera vez que se usó esta tecnología en dicho sector fue en el año 2006 para uno de los Fórmula 1 de la escudería Renault F1. En este caso solamente se empleaba un MD (*Mass Damper*) el cual, claramente, no formaba parte de la suspensión de los coches.

El sistema (*Figura 7*) [7] consistía solamente de una masa (generalmente de unos 9 Kg) suspendido entre dos muelles situado en la parte delantera de los coches. Fue empleado a principio de la temporada 2006/2007 de Fórmula 1, sin embargo, la FIA (Federación Internacional del Automóvil) prohibió su uso en competición.



Figura 7. Esquema MD de un Fórmula 1 (Temporada 2006/07) [7]

Gracias a las diversas aplicaciones que presentan los TMDs, se puede encontrar actualmente diferentes modelos de esta tecnología en el mercado. Aunque cada modelo presenta al menos dos de los componentes necesario de esta tecnología, la manera de alcanzarlo difiere de un modelo a otro. Por ejemplo, en el oscilador de un grado de libertad o el empleo del muelle o péndulo.

Algunos de los modelos de TMD empleado actualmente y que se puede encontrar en algunas de las empresas que se dedican a este tipo de productos son [8]:

- Standard TMD: Modelo económico el cual no requiere alguna prestación especial, sino que solamente se emplea en aquellas estructuras que se quiera amortiguar sus vibraciones (Figura 8).



Figura 8. Standard TMD (Empresa MAURER) [8]

- Compact TMD & Folded TMD: Por un lado, se tiene que el modelo *Folded TMD* está construido con dos péndulos entrelazados para así poder reducir el espacio vertical de montaje. Por otro lado, el modelo *Compact TMD*, que puede ser de péndulo o péndulo invertido, es empleado generalmente para alturas mínimas de montaje. Ambos son empleados en edificios de gran altura. Tienen en común que se puede optimizar la sintonización de la frecuencia en dos de las direcciones principales gracias al ajuste de la longitud del péndulo (Figura 9).



Figura 9. *Folded TMD* (Empresa MAURER) [8]

- *Controlled TMD*: Se puede sintonizar tanto la frecuencia como la amortiguación según la frecuencia real de la estructura. De esta manera, se mejora la reducción de las vibraciones o la reducción de la masa de amortiguamiento (*Figura 10*).



Figura 10. *Controlled TMD* (Empresa MAURER) [8]

También se puede encontrar modelos de TMD unidireccionales guiado, TMD verticales con resortes helicoidales de compresión o tracción para disipadores horizontales [9] de edificios o incluso modelos de TMD sin masas inerciales para máquinas de conformados de metales.

1.3 OBJETIVOS

El presente proyecto TFM tiene por objetivo la definición completa de un producto en el cual se unificarán por un lado la maqueta digital de un tipo particular de TMD y por el otro los cálculos que definen su comportamiento. Es decir, se quiere presentar una de gama de producto que se adapte a las exigencias de los posibles clientes del ámbito de la ingeniería civil.

Se comenzará con la generación de una maqueta digital paramétrica a partir de un modelo inicial, es decir, de un prototipo de TMD (*Figura 11*) [1]. El prototipo inicial sirvió de punto de partida a la concepción del producto a industrializar y que se presentará en el siguiente apartado. Gracias a esta maqueta inicial se pudo determinar qué componentes eran necesarios, como por ejemplo las placas grises de la *figura 11* que son lo que se denominan ballestas, y cómo debían de estar distribuidos en su interior con el objetivo de hacerlo más compacto.

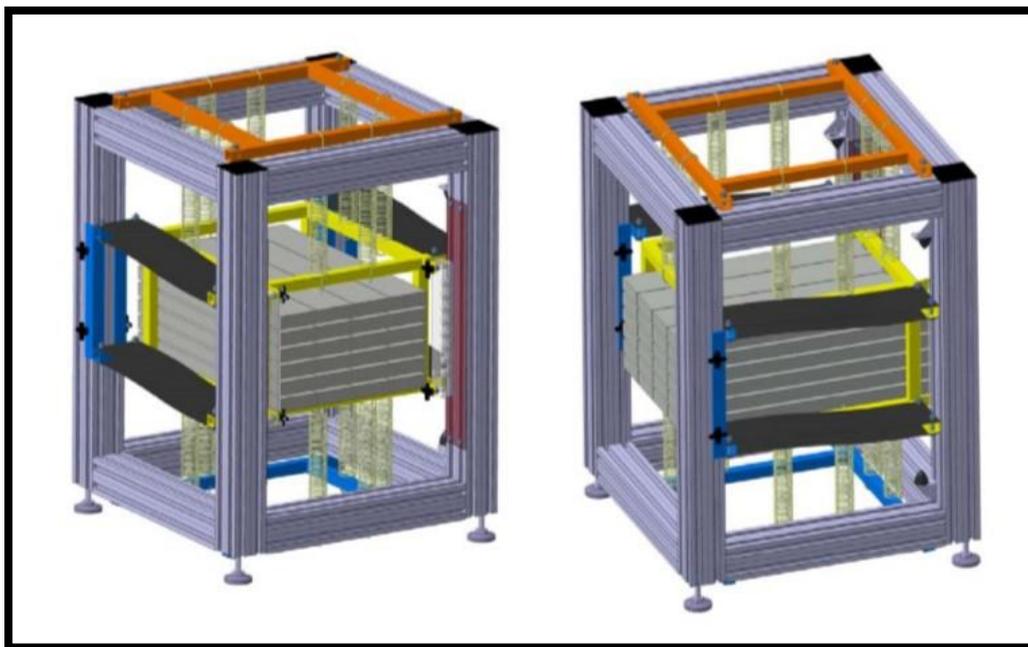


Figura 11. Maqueta digital del prototipo TMD [1]

El prototipo, que se ha empleado como punto de partida en la concepción del TMD industrial, puede encontrarse en laboratorio de estructuras (*Figura 12*) del departamento CAITMMCyTE (Sede Paseo del Cauce) y que sirvió en su momento para demostrar que la solución adoptada era válida a los objetivos establecidos. El TMD que se desarrolló es pasivo de oscilación vertical destinado principalmente a la experimentación en pasarelas peatonales [1]. Por ello, las soluciones presentadas en el siguiente apartado estarán basadas en los ensayos y los resultados que se obtuvieron en dicho proyecto. Claramente, dichas soluciones presentarán modificaciones ya que debemos presentar un producto que se pueda comercializar y que sea atractivo a posibles clientes.

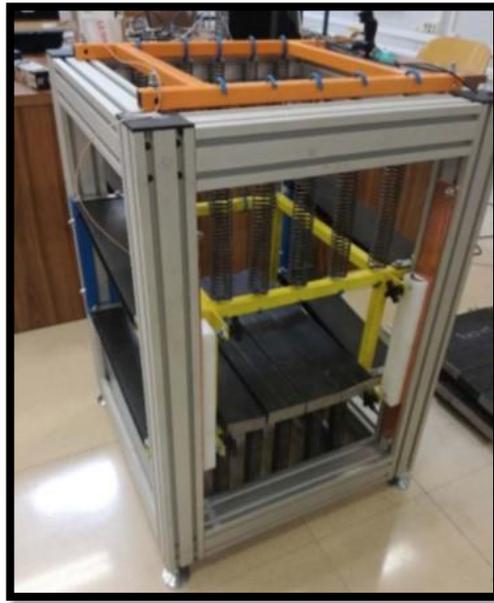


Figura 12. TMD prototipo físico (Laboratorio de estructura - Paseo del Cauce) [1]

El producto final que se debe presentar al cliente tiene que contener aquellos componentes que definen un TMD y que fueron descritos al inicio del apartado 1.2: Muelle, Amortiguador y Masa (Figura 13). El objetivo de construir una maqueta parametrizada tiene por finalidad comprender el funcionamiento del conjunto y, por otro lado, saber cómo generar una gama de producto que pueda ser comercializada.

La generación del DMU, que se presenta en los siguientes apartados, fue establecido a través del software CATIA V5 de Dassault Systèmes (Figura 4). Así que será necesario tener los conocimientos necesarios sobre el uso de dicho programa y la concepción paramétrica, la cual he adquirido a través de mi formación tanto en la Universidad de Valladolid como en la ENSAM (Ecole Nationale des Arts et Métiers – ParisTech).

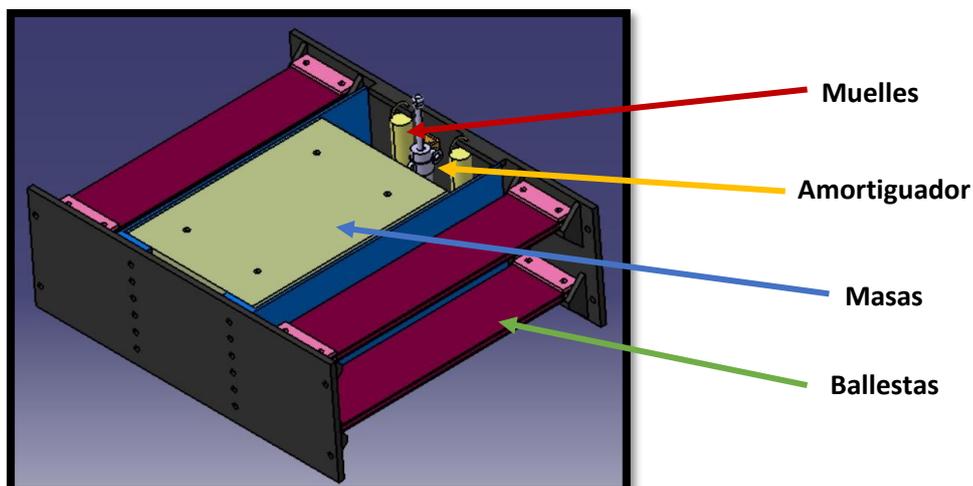


Figura 13. Producto final (TMD) deseado

El modelo de la *figura 13* presenta componentes importantes tales como el recipiente azul de la zona central también denominado cuna, o las placas grises que son denominadas bases (base fija y base móvil).

A la hora de realizar el nuevo modelo TMD, se tuvo que introducir nuevas soluciones tecnológicas. Uno de estos requisitos tecnológicos es que las ballestas no tuviesen que soportar ninguna carga. Así que se tomó la decisión de poner una serie de muelles (*Figura 13*) con el objetivo de soportar dicho peso y permitir que la ballesta solamente guiasen el movimiento del TMD. Este hecho obligó a reconsiderar como debían de ser la geometría del resto de componentes. Asimismo, repercute en la formulación teórica para determinar la frecuencia en función de las rigideces de los muelles y las ballestas.

Sin embargo, no se trata solamente de una configuración geométrica parametrizada, sino que hay una interrelación entre la geometría del producto y sus propiedades mecánicas (masa que se puede emplear, espacio para los muelles a utilizar, etc.). Se precisará de cálculos, los cuales no suelen estar preparados en programas CAD (Concepción Asistida por Ordenador) y que podemos establecer en hojas Excel, por ejemplo.

Los cálculos permitirán conocer el comportamiento del TMD, a través de las ecuaciones que lo definen, y ver como se obtienen los parámetros del modelo a través de estos cálculos. Pudiendo así obtener una comprensión completa del producto con el que se trabajará y que se venderá a posibles clientes.

Finalmente, se estableció como objetivo del proyecto el estudio geométrico y topológico de todos los componentes modificados a través de la impresión 3D de dichos componentes. Sin embargo, la crisis sanitaria a la que tuvimos hacer frente durante la realización de dicho trabajo, no nos permitió alcanzar dicho objetivo. Aunque, sin embargo, se decidió cambiar de objetivo y realizar la construcción de un prototipo de TMD con el cual realizar ensayos de funcionamiento sobre una estructura tipo.

2 DISEÑOS PARAMÉTRICOS

De entre los distintos diseños mecánicos que existen de los TMDs, se va a trabajar con uno concreto, diseñado en el laboratorio de estructuras y que tiene la particularidad de no incorporar guías lineales. La tipología concreta de este modelo es la mostrada en la *Figura 11* y *Figura 13*.

Se parte de la idea de que nuestro producto TMD se ajuste a la demanda de nuestro cliente o mejor dicho a la estructura a la que irá acoplada. Este requisito es una obligatoriedad para que nuestro modelo digital adapte sus dimensiones para obtener la mejor solución.

El uso de un modelo paramétrico para la representación de nuestro TMD tiene por finalidad los siguientes aspectos:

- Dinamizar el proceso de concepción del producto permitiendo relacionar los componentes entre sí.
- Facilitar los procesos de revisión y modificación del modelo a lo largo de todo su ciclo de vida.
- Utilizar los mínimos parámetros posibles para así tener un modelo robusto del TMD. El resto de las dimensiones estarán asociadas a estos parámetros y se recalcularán automáticamente.

Este tipo de diseño se basa, obviamente, en el empleo de parámetros que hacen que para una sola maqueta digital podamos tener una amplia gama de producto, simplemente cambiando sus valores. Como explicaremos en el capítulo 4, la tipología elegida en los parámetros que definen nuestro modelo TMD serán parámetros dimensionales. Sin embargo, existen diversos tipos de parámetros a emplear como parámetros materiales, recubrimientos, pinturas, tratamiento, etc.

Los parámetros son almacenados en un fichero tipo *CATPart*, denominado también fichero del historial paramétrico (*Figura 14*). Así pues, toda modificación necesaria se realizará sobre este fichero afectando a los demás ficheros *CATPart* que componen el TMD y que contienen algunos de los parámetros definidos en él.

 Amortiguador Vibraciones		27/03/2020 13:51	CATIA Product
 Parametros		27/03/2020 13:51	CATIA Part

Figura 14. Fichero del historial paramétrico (Fichero CATPart)

Como se mencionó anteriormente, el modelo que se empleó como punto de partida, tal y como se observa en la *Figura 11*, era un DMU no paramétrico así que solamente es válido para una solución concreta. Los modelos parametrizados buscan obtener una solución adaptable a diferentes situaciones siguiendo diferentes criterios. Esto será explicado tanto en el capítulo 4 (modelo parametrizado) como en el capítulo 5 (criterios de selección de modelos).

Debido a la situación a la que tuvimos que hacer frente durante el segundo cuatrimestre, el modelo del prototipo no pudo usarse como base para la creación del nuevo modelo paramétrico, debido a que solo podía ser visualizado en los ordenadores de la universidad. Sin embargo, sí que se pudo tomar las medidas necesarias para así poder crear desde cero todos los componentes del TMD. Así pues, a lo largo de estos meses el modelo parametrizado ha ido evolucionando, partiendo de un TMD simple con muchos parámetros (Figura 15) hasta obtener un TMD más fino y con menos parámetros (Figura 16).

Como se expone en el capítulo 4, la evolución del TMD se ha realizado a través de 7 modelos diferentes donde se ha ido mejorando el diseño hasta optimizarle y tener un producto compacto.

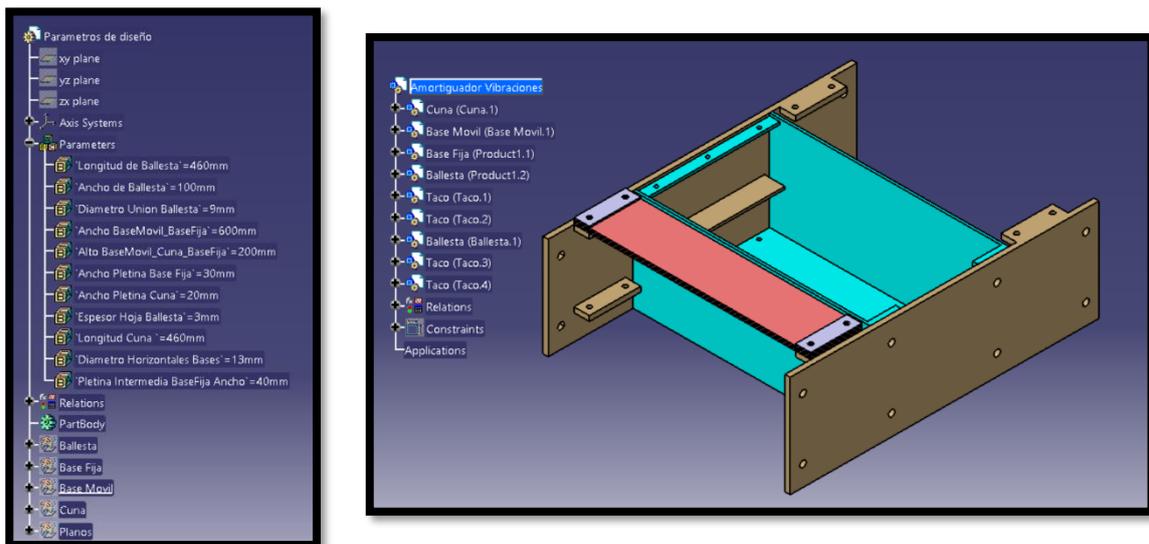


Figura 16. Maqueta digital inicial – TMD 1 (Modelo parametrizado)

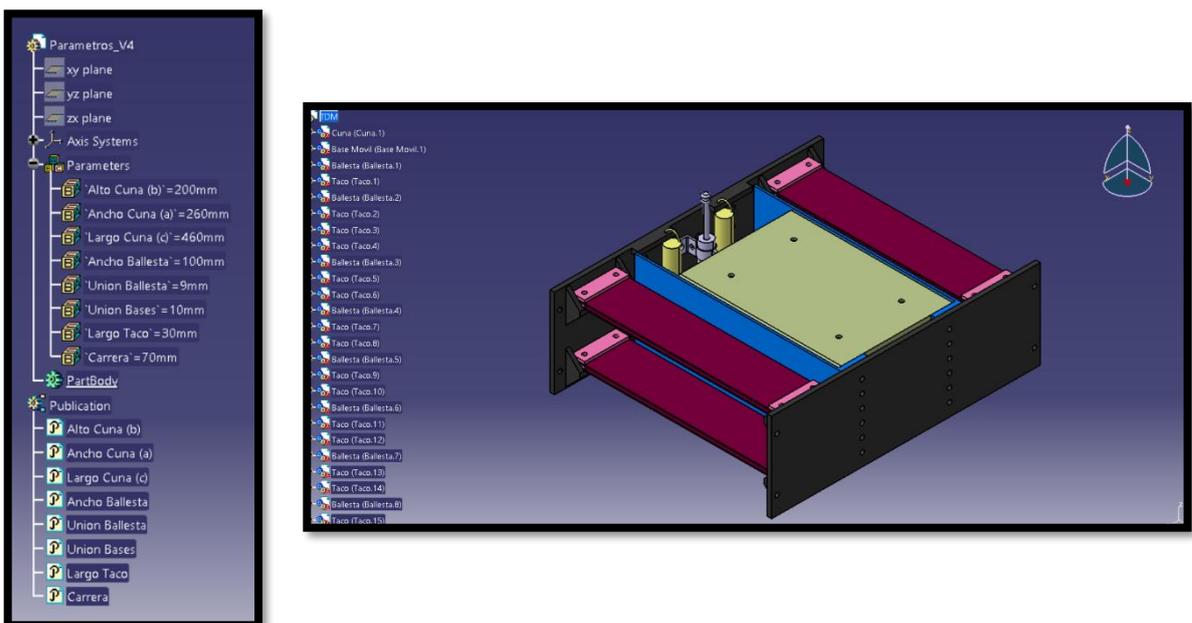


Figura 15. Maqueta digital inicial – TMD 4 (Modelo parametrizado)

3 PREMISAS Y DESARROLLO DEL PROYECTO

Los objetivos marcados desde el inicio del proyecto fueron siempre obtener un modelo paramétrico del TMD para así obtener una amplia gama de producto. Sin embargo, algunas de las premisas que nos pusimos al inicio de este proyecto tuvieron que ser modificadas debido a la crisis sanitaria del Covid-19 aunque éstas fueron sustituidas por nuevos objetivos.

El TMD que se busca debe presentar las siguientes premisas, las cuales van a guiar la concepción del modelo parametrizado objetivo de estudio en este informe:

- Concebir un modelo TMD compacto y atractivo.
- Modificar el TMD inicial para introducir una nueva solución tecnológica que ayude a descargar las ballestas (*Figura 11*) del peso soportado.
- Generar una maqueta digital que proponga una amplia gama de producto a comercializar.
- Modificar los valores de los parámetros en función de las ecuaciones que rigen el comportamiento del TMD.
- Construir un prototipo del TMD parametrizado para estudiar las soluciones adoptadas y presentar un modelo a los clientes.

Teniendo en cuenta todo lo descrito anteriormente, el proyecto y el informe se desarrollará siguiendo los siguientes aspectos:

- **Maquetado digital de cada componente** → *Capítulo 4*
 - Modelo inicial de los componentes
 - Evolución de los componentes
 - Parámetros del TMD y dimensionado
 - Ensamblaje de los componentes
- **Cálculos numéricos de los parámetros** → *Capítulo 5*
 - Planteamientos de las ecuaciones que rigen el TMD
 - Relación de las ecuaciones con los parámetros del modelo
 - Construcción de la hoja Excel
 - Enlace entre el modelo y la hoja Excel
- **Prototipo TMD** → *Capítulo 6*
 - Componentes y modificaciones del prototipo
 - Planos del prototipo
 - Construcción del prototipo
 - Puesta en marcha
- **Conclusión y líneas futuras de investigación** → *Capítulo 7*

4 MAQUETA DIGITAL TMD

Este capítulo está destinado a la presentación en detalle de los componentes que conforman el producto TMD, los parámetros, las geometrías y finalmente el montaje del TMD. También se podrá encontrar la evolución del modelo desde el inicio de la concepción hasta el afinado final del modelo digital.

El TMD se estructura en tres partes principales (*Tabla 1*), las cuales no solamente ha facilitado el montaje de la maqueta digital, sino que también ha facilitado la concepción paramétrica de cada componente. Todas estas partes, como los componentes que lo conforman, están apoyadas en los parámetros haciendo que las partes estén relacionadas a través de ellos.

Parte Fija	Base Fija	Base Fija	
	Elemento de Sujeción Muelles Derecho	Soporte Muelle Derecho Muelles	
	Elemento de Sujeción Muelles Izquierdo	Soporte Muelles Izquierdo Muelles	
Parte Móvil	Base Móvil	Base Móvil	
	Elemento Ballesta	Ballestas Tacos	
Parte Cuna	Cuna	Cuna	
	Varilla Roscada	Varilla Roscada	
	Masa	Masa	
	Elemento Final Carrera		Escuadra Final Carrera Arandela Tope Goma Macho Tope Goma Hembra
Elemento Amortiguador	Unión Amortiguador	Unión Amortiguador	
	Amortiguador	Cuerpo Central Varilla Central Sujeción Central	

Tabla 1. Estructura del TMD

El modelo TMD está compuesto por ficheros tipo *CATProduct*, generalmente empleado en la construcción de las partes y elementos, como por ficheros *CATPart*, empleado para la definición de los componentes más simple del modelo. Sin entrar en detalle sobre los ficheros tipo CAT que existen en CATIA V5, tenemos que estos dos ficheros presentan:

- **CATPart**: Fichero donde se define la geometría y las dimensiones de todos los componentes del TMD.
- **CATProduct**: Fichero donde se definen elementos más complejos y las relaciones entre los componentes que forman el producto final.

4.1 PARÁMETROS

Los parámetros que definen el modelo final TMD son la clave para obtener una amplia gama de producto. Hace que se tenga un mayor rango de trabajo a las posibles demandas de un cliente. Un alto número de parámetros hace que se tenga una gran gama de producto, y aunque pueda parecer una ventaja, a veces conlleva un mayor esfuerzo por parte del ingeniero responsable ya que los parámetros se podrían traducir como incógnitas a determinar. Así que siempre se ha buscado un equilibrio entre los parámetros esenciales y el tiempo necesario para determinarlos.

Se ha intentado establecer un modelo TMD robusto, por ello se ha empleado solamente tres parámetros y así reducir las infinitas combinaciones que podrían presentar un modelo ordinario.

Conocido el objetivo de trabajar con el mínimo número posible de parámetros, estos han ido evolucionando a lo largo de los diversos modelos (que se presenta en los siguientes apartados), obteniendo los siguientes parámetros esenciales:

- **Ancho Cuna** → Parámetro acotado entre los 180 mm hasta los 500 mm. Siguiendo lo expuesto, se tuvo que acotar las infinitas posibilidades y por ello se decidió presentar un número finito de posibles valores. La lista de valores van de 20 en 20 mm desde los 180 hasta los 500 mm (*Figura 17*). Listar y acotar los parámetros también facilita la fabricación del TMD al tener una serie de valores estándar. Parámetro tipo *LENGHT*.

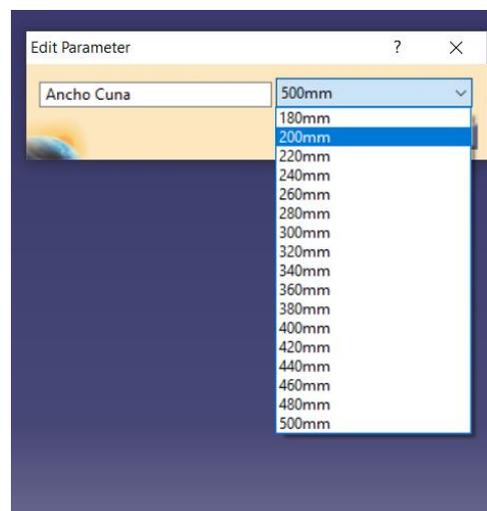


Figura 17. Parámetro Ancho Cuna

- **Longitud Ballesta** → Parámetro acotado entre los 400 mm hasta los 600 mm. Siguiendo lo expuesto, se acotó las infinitas posibilidades y se decidió crear un número finito de valores, los cuales son los valores estándar de dicho parámetro. La lista de valores van de 20 en 20 mm desde los 400 hasta los 600 mm (*Figura 18*). Parámetro tipo *LENGHT*.

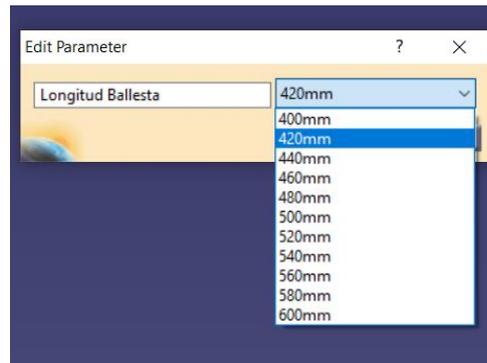


Figura 18. Parámetro Longitud Ballesta

- **Espesor Ballesta** → Parámetro acotado entre 1 mm hasta los 3 mm. Reduciendo las posibilidades, se listó los valores de 0,5 en 0,5 mm dentro del rango de trabajo para dicho parámetro (Figura 19). Parámetro de tipo LENGHT.

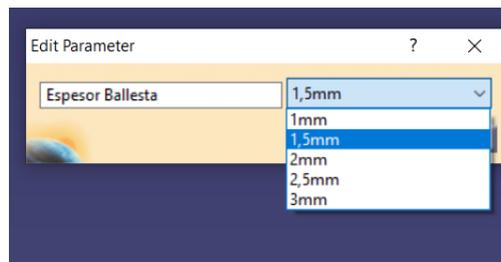


Figura 19. Parámetro Espesor Ballesta

Controlar tanto el rango de trabajo como la lista de valores de cada parámetro, permite establecer una gama de producto mayor o menor según sea necesario en cada momento. Entonces, esto hace que, si la solución necesaria no se encuentre dentro del rango establecido, siempre se puede modificar para que la maqueta presente la solución buscada.

Como el objetivo de los parámetros es emplearlo en la concepción de los componentes que definen el TMD, entonces será necesario realizar la publicación (Figura 20) de aquellos parámetros que serán empleados en los diferentes ficheros *CATPart*. El proceso implica que los parámetros sean copiados desde el fichero del historial paramétrico para así poder pegarlo en el fichero *CATPart* destino (fichero que contenga la geometría del componente). Es importante que para que estos valores se actualicen en cualquier momento, el pegado debe realizarse manteniendo el enlace con el fichero origen, fichero historial paramétrico.

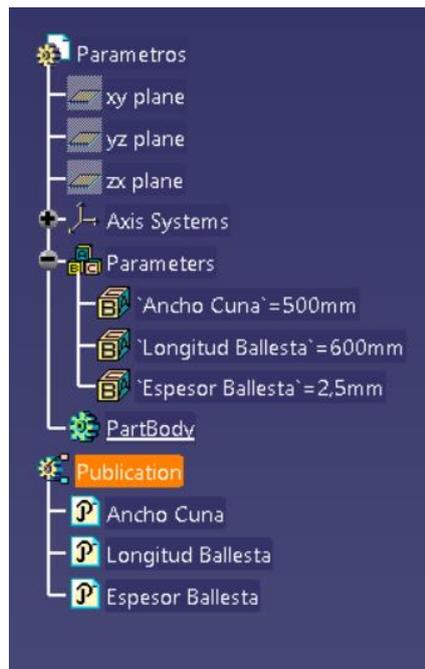


Figura 20. Árbol del fichero Parámetros

Los parámetros presentados en la *Figura 20* corresponde a los parámetros que guían el modelo final del TMD. Sin embargo, se partió con un número elevado de parámetros en modelos iniciales del TMD, los cuales se tuvo que ir afinando en cada modelo que fuimos mejorando a lo largo de este proyecto. Ir mejorando los modelos, favoreció la obtención de estos parámetros expuestos y relacionarlos con el resto de las dimensiones.

4.2 BALLESTAS

Se comenzará con la descripción de las ballestas, uno de los componentes más importantes del producto TMD ya que permite cumplir el objetivo de guiar el movimiento de la masa móvil mediante la deformación elástica de las mismas. La ballesta, que actúa de guía en el movimiento del TMD, permite solamente el desplazamiento vertical de la parte móvil y la parte cuna (*Tabla 1*).

La ballesta tiene por finalidad la transmisión de las vibraciones (originadas en la estructura por agentes externos como la acción del viento) a las partes móviles, las cuales son las encargadas de amortiguarlas. Por ello, las dimensiones deben ser lo suficientemente grande para poder, en primer lugar, trabajar sin deformarse plásticamente (se desea que solamente trabaje en la región elástica del material) y, en segundo lugar, evitar que no se produzcan inestabilidades del TMD (únicamente se desea el desplazamiento vertical del conjunto y no horizontal).

Conocidas las funciones esperadas y las exigencias planteadas, ya se puede pasar a la concepción de dicho componente. Topológicamente, la ballesta es una placa rectangular (*Figura 21*) guiada por dos de los parámetros que definen el modelo final del TMD. Las dimensiones de este componente son:

- Largo de la ballesta es función del parámetro **Longitud_Ballesta**.
- Espesor de la ballesta es función del parámetro **Espesor_Ballesta**.
- Ancho de la ballesta presenta un valor constante de 100 mm.
- La ballesta presenta cuatro taladros de diámetro $\varnothing = 9$ mm. La finalidad de estos taladros es permitir la unión de las ballestas con la base fija y la base móvil. La posición de dichas uniones es fija.

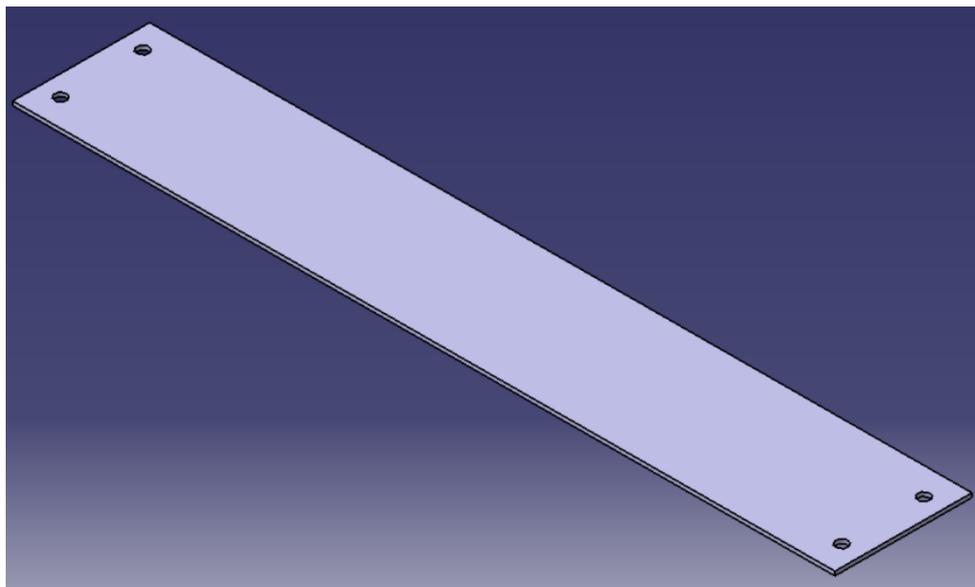


Figura 21. Maqueta digital de una ballesta

Se busca que el componente se adapte a los diversos casos o exigencias del cliente, es decir, qué según el valor de los parámetros, la maqueta digital se actualice. Esto se consigue relacionando todas las dimensiones, que no sean fijas, con los parámetros que guían el modelo de la ballesta. La herramienta, que se ha empleado en todos los componentes del modelo TMD para relacionar las dimensiones entre sí o con los parámetros, son las fórmulas (Figura 22). Siempre se podrá visualizar las fórmulas en el árbol (Figura 23) de los ficheros con los que se trabaje en ese momento (para su visualización es necesario activarlo en las opciones de CATIA).

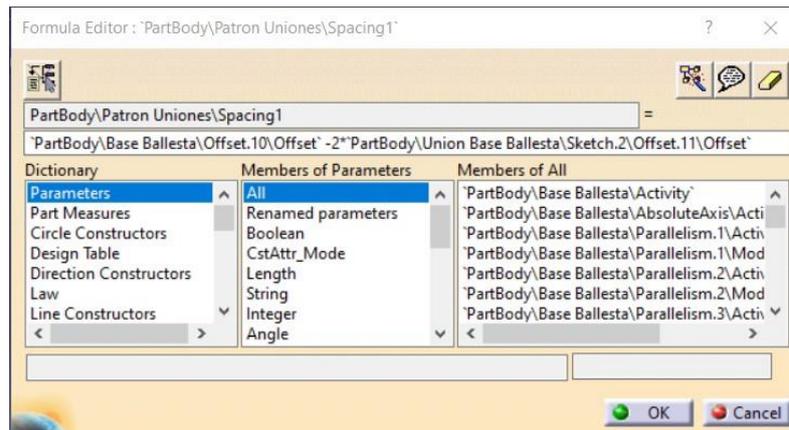


Figura 22. Ventana creación de fórmulas (CATIA)

Por ejemplo, tal y como se observa en la Figura 23, la posición de los taladros deben ser siempre constante. El objetivo que se marcó es que los taladros siempre estuviesen a 10 mm del canto corto y a 20 mm del canto largo de la ballesta. Como se empleó un patrón para posicionar todos los taladros en la maqueta digital, fue necesario crear fórmulas para que se cumpliese dicho objetivo.

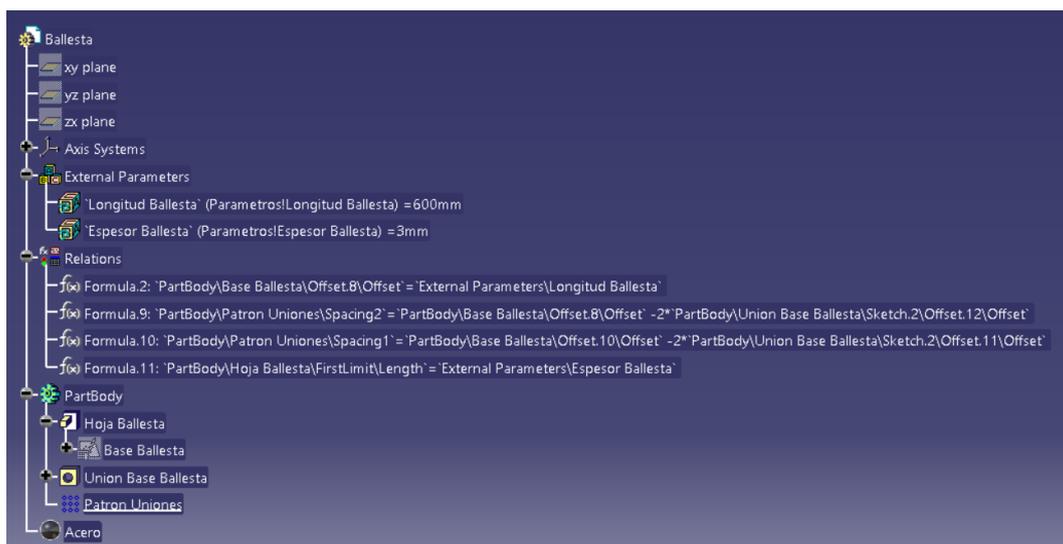


Figura 23. Árbol del fichero Ballesta

4.2.1 MATERIAL ACERO F143

Aquellos componentes que sean “no comerciales”, es decir, productos que no se compran, sino que se fabricarán en taller, serán fabricados o bien en acero S275 o en acero F143. Se indicará en cada componente, si corresponde, el tipo de material con el que es fabricado.

Las ballestas, componente que se debe fabricar en taller, estará construido en acero F143. Esto implica que en la maqueta digital se deba aplicar dicho material para que el modelo sea lo más parecido posible al modelo real. La aplicación del material es útil para realizar simulaciones de comportamiento dinámico del conjunto.

Solamente es necesario rellenar los campos demandados cuando se aplica el material en el modelo (*Figura 23*). Cuando se quiera aplicar un acero F143, es necesario rellenar dichos campos con los siguientes valores:

- Young Modulus → $2,1e+011$ N/m²
- Poisson Ratio → 0,266
- Density → 7860 Kg/m³
- Thermal expansion → $1,17e-005$ K⁻¹
- Yield Strength → $1,43e+009$ N/m²

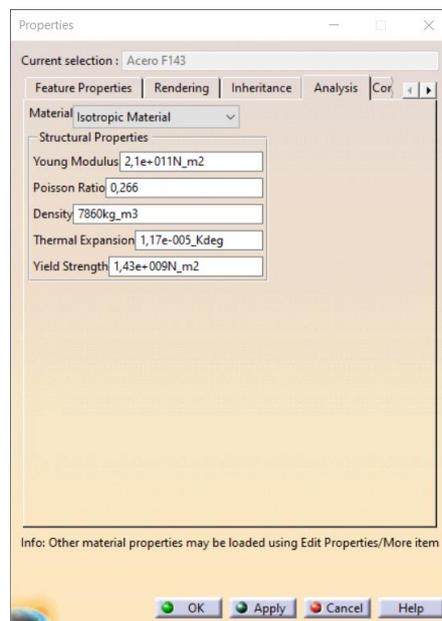


Figura 24. Material Acero F143 (Aplicación maqueta digital)

4.3 BASE FIJA

La base fija es otro de los componentes clave del TMD ya que sirve de unión entre la estructura, donde va acoplado, y el resto de los componentes. Esta unión debe ser lo suficientemente fuerte y rígida para que la base vibre a la misma frecuencia que la estructura y pueda transmitir las vibraciones al TMD. Además, es importante que la base sea lo suficientemente rígida para que no se produzcan abolladuras durante su funcionamiento.

Este componente tuvo que adaptarse a la introducción de los muelles tal y como indicamos en el capítulo 1, apartado de objetivos. Este requisito marcó la evolución de la base hasta encontrar una solución adecuada.

4.3.1 EVOLUCIÓN DE LA BASE FIJA

Este requisito obligó a que tuviésemos que modificar la base fija inicial (*Figura 25*) para dejar espacio a las uniones donde van colocados los muelles. Inicialmente, la base presentaba una pletina central, destinada a soportar distintos componentes, la cual dificultaba el posicionamiento de los muelles en dicha base. Además, la maqueta inicial presentaba demasiados parámetros, lo que hacía difícil controlar todas las dimensiones.

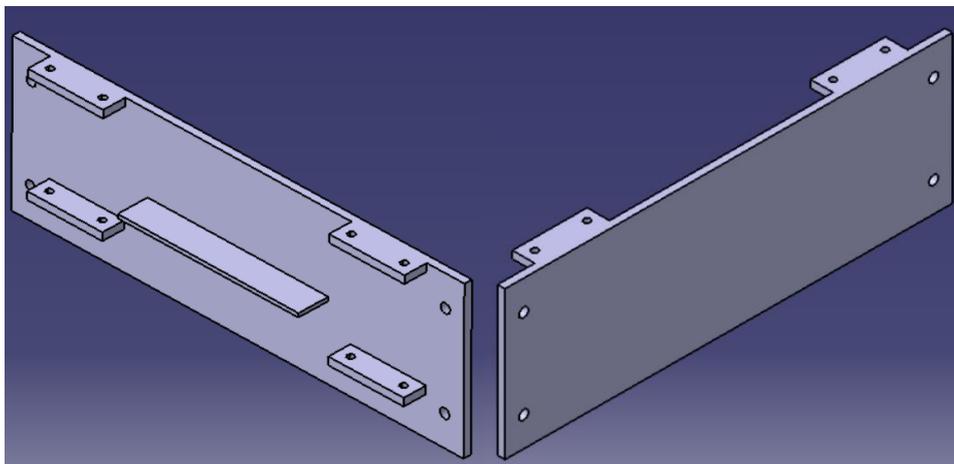


Figura 25. Base Fija Inicial (Maqueta Digital)

El siguiente modelo de la base fija supuso la eliminación de la pletina central y la creación de una base suplementaria donde posicionar los muelles (*Figura 26*). Además, las bases de sujeción superior de las ballestas fueron desplazadas, verticalmente, hacia el interior para así evitar que las ballestas sobresalieran de la base y tener un TMD algo más compacto. Sin embargo, este nuevo modelo sigue presentando algunos inconvenientes e incumple algunos de los criterios establecidos como por ejemplo tener un producto compacto.

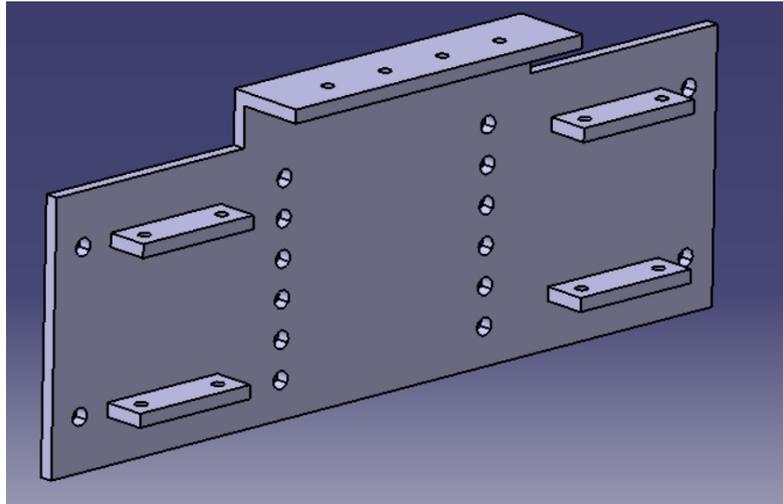


Figura 26. Primera modificación de la Base Fija (Maqueta Digital)

Siguiendo el objetivo de tener un TMD compacto, el nuevo modelo de la base fija presentaba una modificación de importancia (Figura 27). Se redujo la altura de la base de sujeción, destinada a los muelles, hasta tener solamente el tramo horizontal. Sin embargo, la nueva solución presentaba aún un inconveniente ya que hacía que tuviésemos al amortiguador a diferente nivel que los muelles.

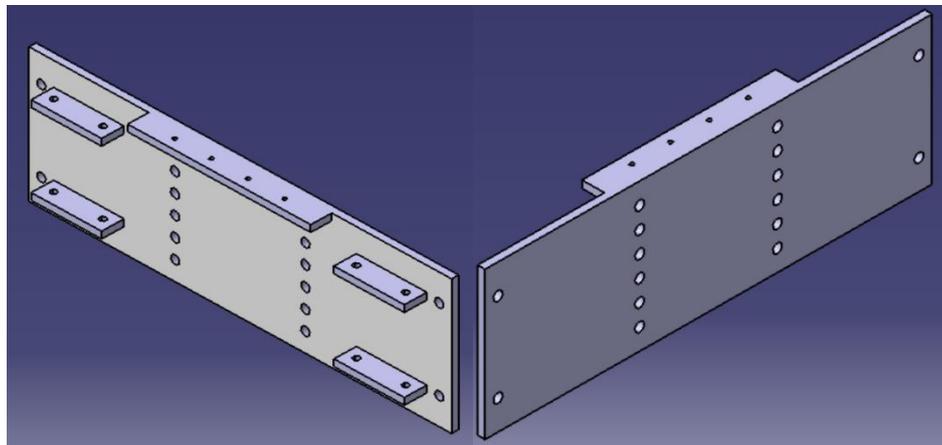


Figura 27. Segunda modificación de la Base fija (Maqueta Digital)

Buscando que los muelles y el amortiguador trabajen al mismo nivel, el nuevo modelo de la fase fija (Figura 28) presenta un espacio intermedio para así dejar espacio al amortiguador. Esto supuso que la base de sujeción se dividiese en dos partes: Base de sujeción izquierda y Base de sujeción derecha. Ahora, este espacio introducido, permite realizar las uniones necesarias entre la base y el amortiguador. Como se observa en la Figura 28, las bases de sujeción de las ballestas presentan tendones a cada lado para darles mayor rigidez durante el movimiento.

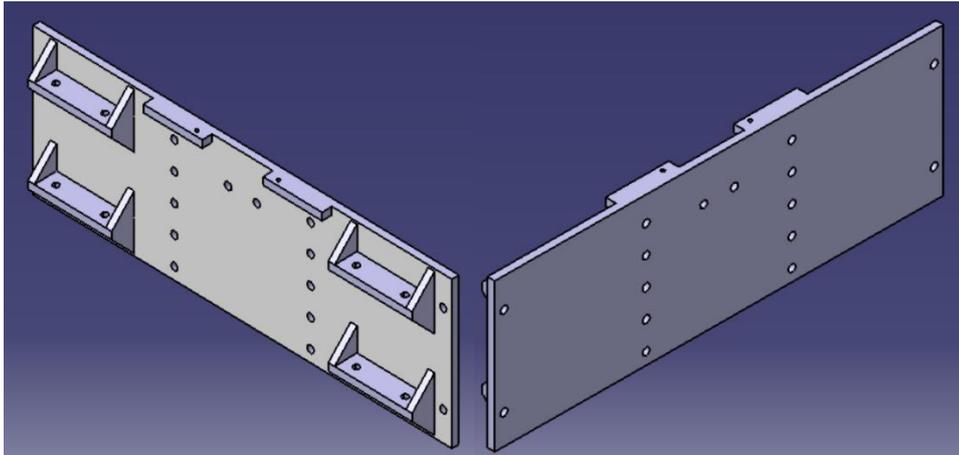


Figura 28. Tercera modificación de la Base fija (Maqueta digital)

Finalmente, tras una serie de modificaciones, se obtuvo la última versión de la base fija (Figura 29), la cual compone el modelo final del TMD. Aunque la solución anterior era adecuada a las premisas establecidas, esta aun podía ser mejorada. La versión definitiva de la base fija se obtuvo gracias a la evolución del TMD como a la evolución del final de carrera (Apartado 4.9). Las modificaciones finales realizadas son:

- Eliminación de los tendones con el objetivo de dejar espacio al componente final de carrera (Apartado 4.9).
- Separación de los soportes de sujeción de los muelles (Apartado 4.7) de la base fija, generando así un nuevo componente. Se busca evitar la soldadura de dicho componente con la base fija.
- Aumento del tamaño de la base, guiado por la última versión del final de carrera (Apartado 4.9), para así poder tener el espacio suficiente a la carrera del conjunto, de valor 70 mm.

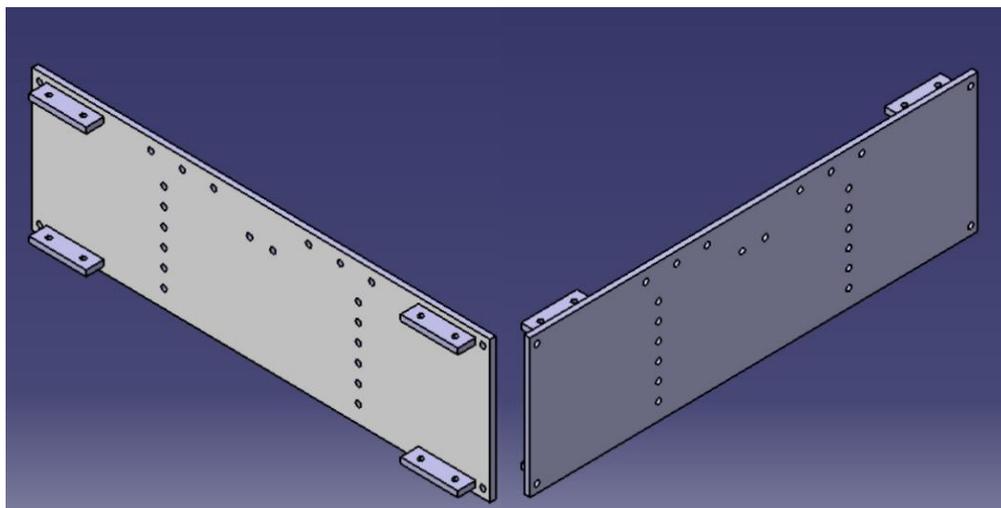


Figura 29. Base Fija - Modelo Final (Maqueta Digital)

4.3.2 PARÁMETROS Y DIMENSIONES

Solamente se hablará de aquellos parámetros y dimensiones que apoyan el modelo final de la base fija de la *Figura 29*, ya que es el modelo con el que finalmente se trabajará. Topológicamente, la base fija es una placa rectangular a la cual se le añade cuatro pletinas (*Figura 29*). El modelo solamente está guiado por un parámetro, siendo las dimensiones de dicho componente:

- Ancho de la base fija es función del parámetro **Ancho_Cuna** (*Figura 30*) más un valor constante de 300 mm (150 mm a cada lado) para dejar espacio a las ballestas y los taladros necesarios. Dicho valor surge de los 100 mm del ancho de la ballesta más 25 mm a cada lado.
- Las dimensiones fijas de la base son: Alto de la base fija con un valor de 240 mm y Espesor de la base fija con un valor de 10 mm.
- Las cuatro bases de sujeción de las ballestas presentan dimensiones constantes: 31x100x10 mm. Además, presentan taladros destinados a la unión con la ballesta de diámetro $\varnothing = 9$ mm.
- Los taladros, que se observan en la *Figura 29*, son de diámetro $\varnothing = 10$ mm. Los taladros que aparecen en dicho modelo corresponden a:
 - Taladros más externos destinados a realizar la unión entre la base fija y la estructura a la que va acoplada el TMD.
 - Taladros superiores destinados a realizar la unión entre la base fija y los soportes de sujeción de los muelles (Apartado 4.7).
 - Taladros centrales destinado a realizar la unión entre el amortiguador y la base fija.
 - Hilera de taladros para estandarizar el proceso de fabricación de las bases del modelo TMD.

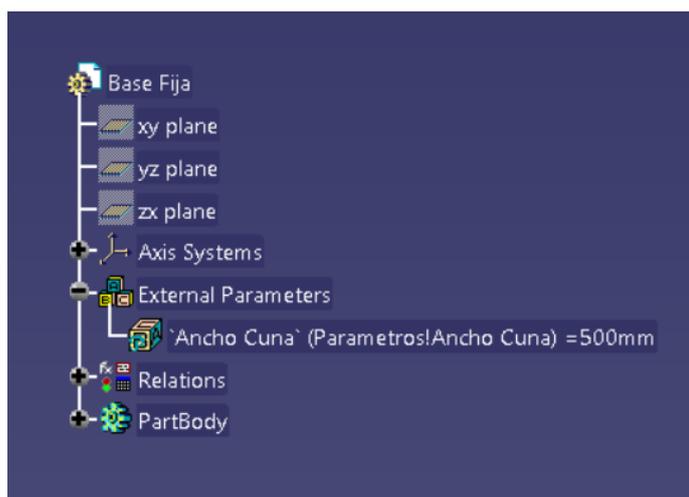


Figura 30. Árbol del fichero Base Fija

Se busca que el modelo sea dinámico y que se adapte a las diferentes exigencias del cliente. Esto se consigue gracias a la actualización automática de las dimensiones, que no sean fijas, de manera automática gracias a que se apoyan al parámetro que guía el modelo. Se empleará tanto la herramienta de creación de fórmulas como la herramienta *Rules*.

La herramienta *Rules* (Figura 31) o reglas permite variar ciertos aspectos de la maqueta digital automáticamente en función de los parámetros y le obliga al modelo que siga unas determinadas pautas o condiciones. Esta herramienta se caracteriza por [10]:

- Agrupación de fórmulas para conseguir tener un árbol ordenado y con menos elementos.
- Los *Rules* son creadas por el mismo usuario a través de un lenguaje intrínseco de CATIA y que sigue el lenguaje de programación VBA (*Microsoft Visual Basic*).

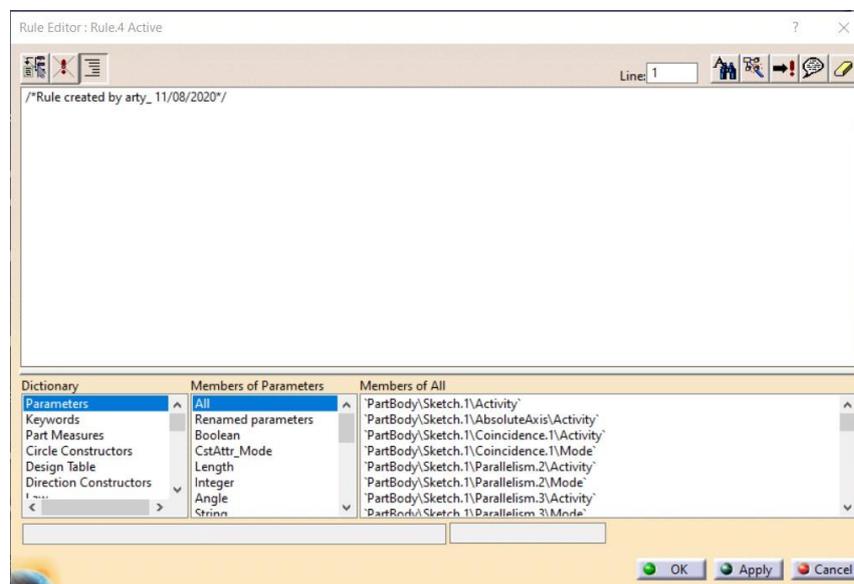


Figura 31. Ventana creación de Rules

También existía la posibilidad emplear la herramienta *Macro*, pero se consideró que la herramienta *Rules* se ajustaba a las exigencias del modelo TMD. El empleo de esta herramienta también conlleva tener conocimiento sobre el lenguaje VBA.

La diferencia con la herramienta fórmulas es que solamente se empleaba para relacionar o sincronizar valores o parámetros entre sí, manteniendo entre ellos no sólo una proporción, sino una ecuación de relación [10].

En primer lugar, se estableció el comportamiento de la hilera de taladros, específicamente, la distancia de dicha hilera respecto al sistema de ejes de la base fija. El comportamiento de dicha geometría presenta seis posibles rangos de trabajo, marcado por las sentencias *if*. Cada sentencia impone una condición para entrar a la ecuación que determina el valor de la posición de las uniones.

Los taladros no tienen funciones constructivas, tal y como se indicó anteriormente, así que se siguieron las medidas que se establecieron en la base móvil (Apartado 4.4). Así que las seis condiciones de trabajo del *Rule* Posiciones Uniones (*Figura 32*) y sus ecuaciones son:

- Cuando el parámetro *Ancho_Cuna* esté dentro del rango de 180-200 mm, la posición de la hilera de taladros, respecto del sistema de ejes, será: $\frac{1}{4} (\text{Ancho_Cuna} + 80) \text{ mm}$.
- Cuando el parámetro *Ancho_Cuna* esté dentro del rango de 200-280 mm, la posición de la hilera de taladros, respecto del sistema de ejes, será: $\frac{1}{4} (\text{Ancho_Cuna} + 100) \text{ mm}$.
- Cuando el parámetro *Ancho_Cuna* esté dentro del rango de 280-340 mm, la posición de la hilera de taladros, respecto del sistema de ejes, será: $\frac{1}{4} (\text{Ancho_Cuna} + 120) \text{ mm}$.
- Cuando el parámetro *Ancho_Cuna* esté dentro del rango de 340-400 mm, la posición de la hilera de taladros, respecto del sistema de ejes, será: $\frac{1}{4} (\text{Ancho_Cuna} + 140) \text{ mm}$.
- Cuando el parámetro *Ancho_Cuna* esté dentro del rango de 400-460 mm, la posición de la hilera de taladros, respecto del sistema de ejes, será: $\frac{1}{4} (\text{Ancho_Cuna} + 160) \text{ mm}$.
- Cuando el parámetro *Ancho_Cuna* esté dentro del rango de 460-500 mm, la posición de la hilera de taladros, respecto del sistema de ejes, será: $\frac{1}{4} (\text{Ancho_Cuna} + 180) \text{ mm}$.

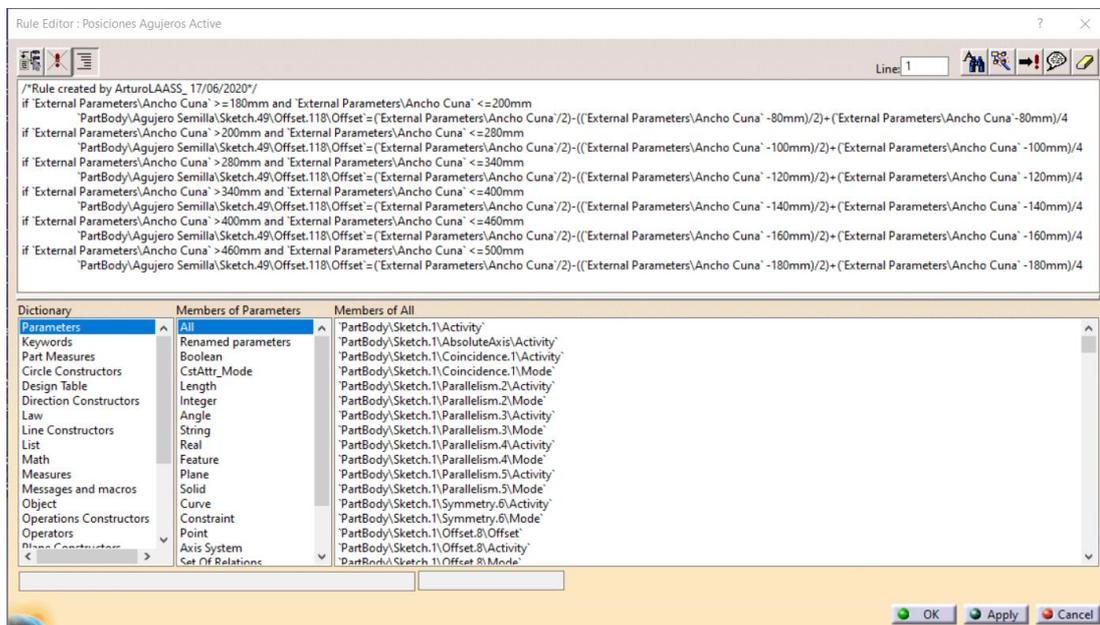


Figura 32. Rule Hilera Taladros (Posiciones Agujeros Rules – Base Fija)

Se continúa con la descripción del comportamiento de los taladros de unión de la base fija con los soportes de sujeción de los muelles. En este caso, se tiene un *Rule* para cada uno de los soportes. El soporte izquierdo de sujeción de los muelles (*Figura 33*) presenta dos rangos de trabajo. Aunque en la *Figura 33* se observa cuatro sentencias o condiciones, se tiene que una línea del código está destinada a determinar el número de taladros necesarios y la otra línea está destinada a calcular la distancia de los taladros entre sí. Así pues, en cada rango de trabajo se tiene:

- Cuando el ancho del soporte de sujeción (Apartado 4.7) sea menor a 140 mm, solo se tendrá **2 taladros** de diámetro $\phi=10$ mm separados entre sí: **2/4 Ancho soporte de sujeción**.
- Cuando el ancho del soporte de sujeción sea mayor a 140 mm, se tendrá **3 uniones** de diámetro $\phi=10$ mm separados entre sí: **3/4 Ancho soporte de sujeción**.

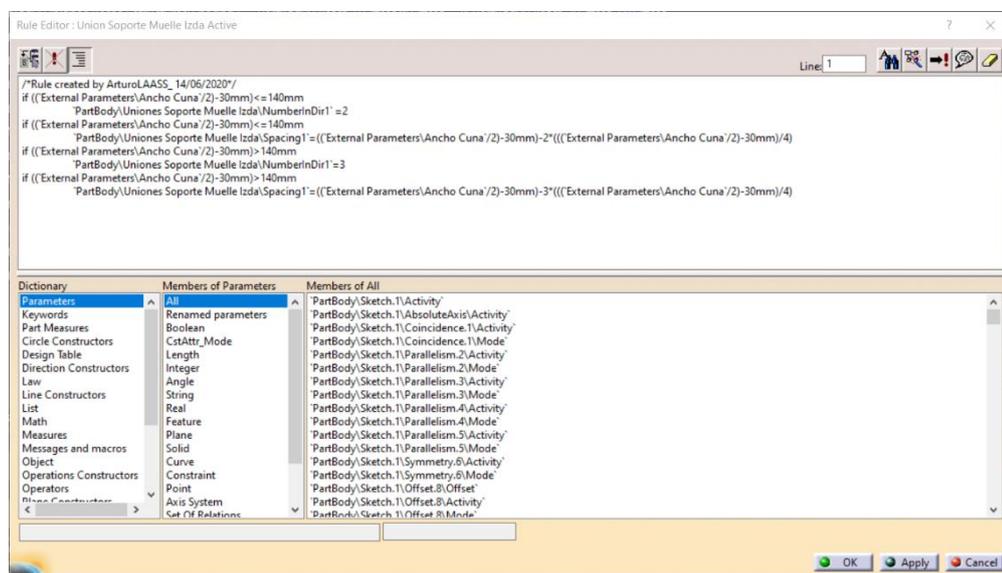


Figura 33. Rules taladros Base Fija – Soporte sujeción (Unión Soporte Muelles Rules – Base Fija)

El *Rule* de los taladros de la unión de la base fija con el soporte de sujeción derecho es exactamente el mismo que se ha presentado en la *Figura 33*. Solamente cambia la referencia respecto el sistema de ejes de la base fija.

4.3.3 MATERIAL ACERO S275

La base fija, componente que se debe fabricar en taller, estará construido en acero S275. Esto implica que en la maqueta digital se deba aplicar dicho material para que el modelo sea lo más parecido posible al modelo real. La aplicación del material es útil para realizar simulaciones de comportamiento dinámico del conjunto.

Solamente es necesario rellenar los campos demandados cuando se aplica el material en el modelo (Figura 34). Cuando se quiera aplicar un acero S275, es necesario rellenar dichos campos con los siguientes valores:

- Young Modulus → $2,1e+011 \text{ N/m}^2$
- Poisson Ratio → 0,266
- Density → 7860 Kg/m^3
- Thermal expansion → $1,17e-005 \text{ K}^{-1}$
- Yield Strenqht → $2,75e+008 \text{ N/m}^2$

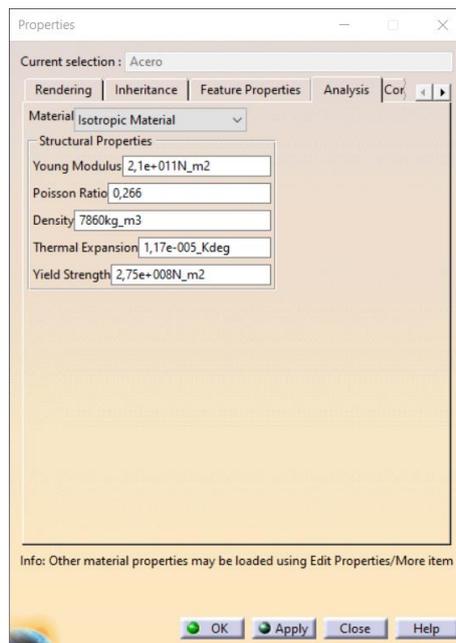


Figura 34. Material Acero S275 (Aplicación maqueta digital)

4.4 BASE MÓVIL

La base móvil tiene por misión realizar la unión entre las ballestas y la cuna, para así poder transmitir las vibraciones a aquellos componentes responsables de amortiguarlas. A diferencia de la base fija, esta base no se atornilla en ningún lado, sino que queda suspendida gracias a las uniones de dicha base con las ballestas. Este componente forma parte de lo que se denomina la parte móvil del TMD (*Tabla 1*).

Topográficamente, la base móvil y la base fija son prácticamente parecidas, salvo por la presencia de ciertas uniones. Además, se buscaba que la base móvil fuese rígida para que no se deformase en el movimiento de amortiguamiento, sobre todo por la zona de las uniones que tiene con la cuna. Como se indicó anteriormente, el hecho de que las bases fuesen parecidas tenía el objetivo de reducir los tiempos de fabricación de ambas bases y minimizar el número de referencia/planos/etc. para evitar errores de montaje.

4.4.1 EVOLUCIÓN DE LA BASE MÓVIL

El modelo inicial de la base móvil (*Figura 35*), salvo por la pletina central que presentaba la base fija, también necesitaba ser modificada siguiendo algunas de las modificaciones ya presentadas en la base fija (*Apartado 4.3*). Además, la maqueta inicial presentaba demasiados parámetros, lo que hacía difícil controlar todas las dimensiones.

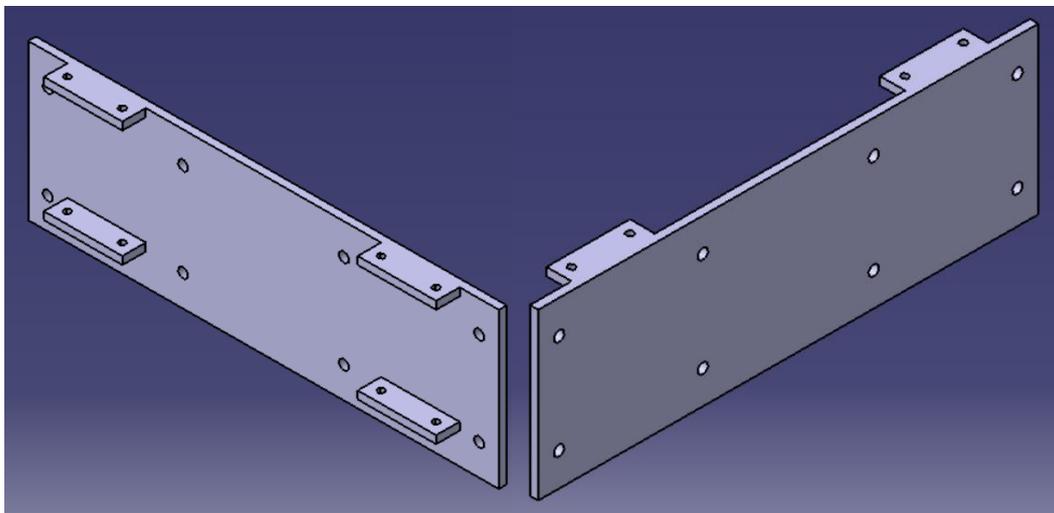


Figura 35. Base móvil Inicial (Maqueta Digital)

La maqueta digital inicial debía ser modificada para conseguir un modelo algo más compacto (*Figura 36*). Como se hizo con la base fija, las bases de apoyo de las ballestas se desplazaron verticalmente hacía la región interna de la base. Se evita, por un lado, que las ballestas sobresalgan de la base y, por otro lado, que las ballestas se inclinen debido a diferencias geométricas entre ambas bases. La última modificación, que se realizó sobre este modelo, fue aumentar el número de taladros situados en la parte central de la base, las cuales sirven para realizar la unión entre la base y la cuna.

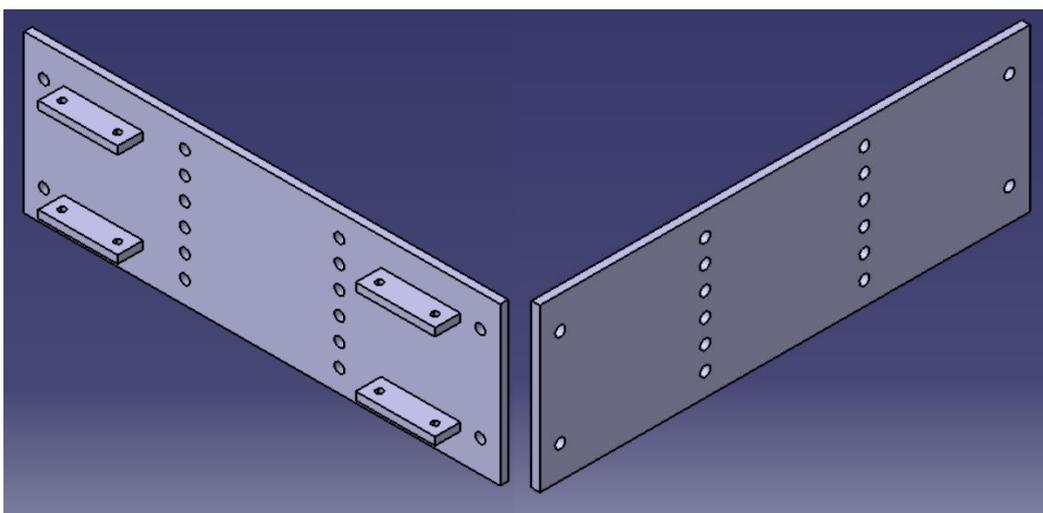


Figura 36. Primera modificación de la Base móvil (Maqueta Digital)

La nueva modificación de la base móvil (Figura 37) supuso la introducción de tendones sobre las bases de apoyo de las ballestas. El objetivo era que las bases de apoyo fuesen más rígidas durante el movimiento vertical del TMD. Las modificaciones que se observan en la Figura 36 se mantendrán en esta nueva versión de la base móvil.

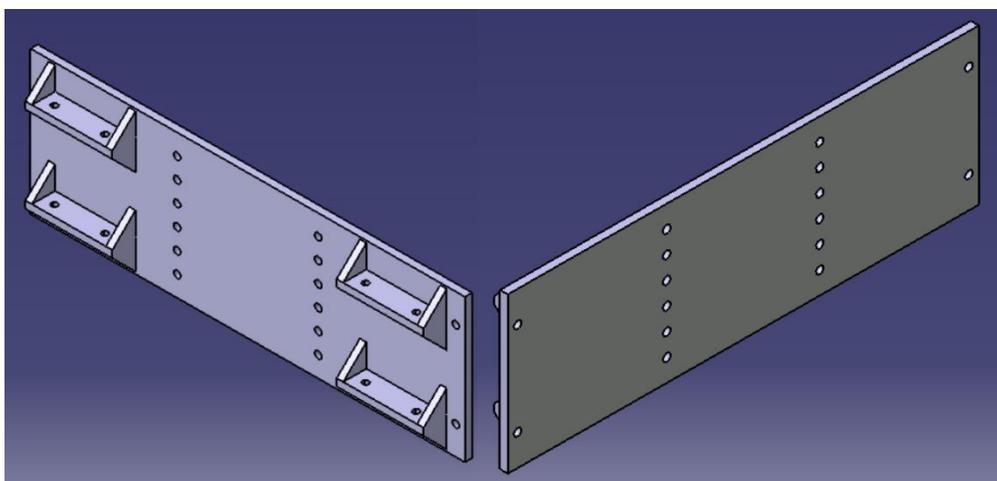


Figura 37. Segunda modificación de la Base móvil (Maqueta Digital)

Finalmente, tras una serie de modificaciones, se obtuvo el modelo final de la base móvil (Figura 38), la cual compone el modelo final del TMD. Esta nueva versión de la base móvil presenta, en primer lugar, las bases de apoyo de las ballestas sin los tendones y, en segundo lugar, un aumento de la altura de la base para dejar el espacio suficiente al componente de final de carrera, y sobre todo obtener una topología parecida a la base fija.

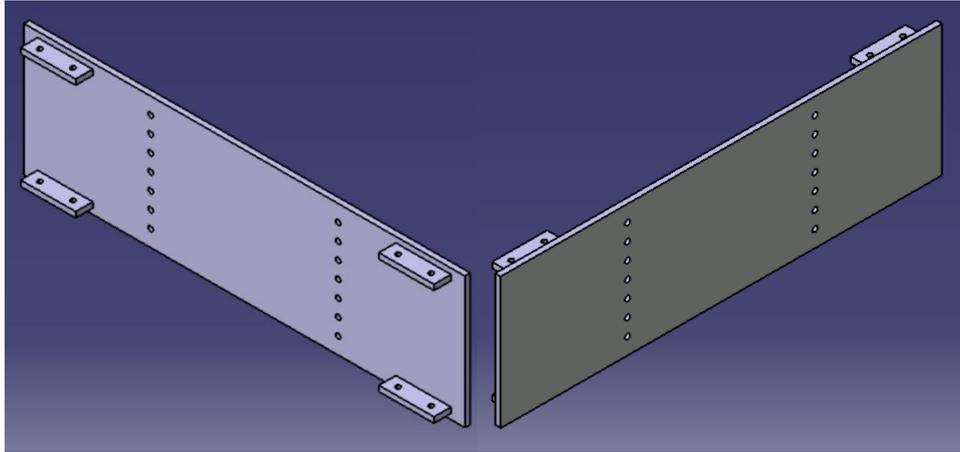


Figura 38. Base móvil - Modelo Final (Maqueta Digital)

4.4.2 PARÁMETROS Y DIMENSIONES

Las dimensiones y los parámetros a los que se hacen referencia en este apartado están solamente referidos al modelo final de la base móvil que se ha presentado en la *Figura 38*. Topológicamente, la base móvil como la base fija es una placa rectangular a la que se le une cuatro pletinas (*Figura 38*). El modelo está guiado por un solo parámetro, siendo las dimensiones de dicho modelo:

- Ancho de la base móvil es función del parámetro **Ancho_Cuna** (*Figura 39*) más un valor constante de 300 mm (150 mm a cada lado) para dejar espacio a las ballestas y los taladros necesarios. Dicho valor surge de los 100 mm del ancho de la ballesta más 25 mm a cada lado.
- Las dimensiones fijas de la base son: Alto de la base móvil con un valor de 240 mm y Espesor de la base móvil con un valor de 10 mm.
- Las cuatro bases de sujeción de las ballestas presentan dimensiones constantes: 31x100x10 mm. Además, presentan taladros destinados a la unión con la ballesta de diámetro $\varnothing = 9$ mm.
- Los taladros, que se observan en la *Figura 38*, son de diámetro $\varnothing = 10$ mm. Los taladros que aparecen en dicho modelo corresponden a:
 - Hilera de taladros destinados a realizar la unión entre la base móvil y la cuna con el objetivo de transmitir las vibraciones.

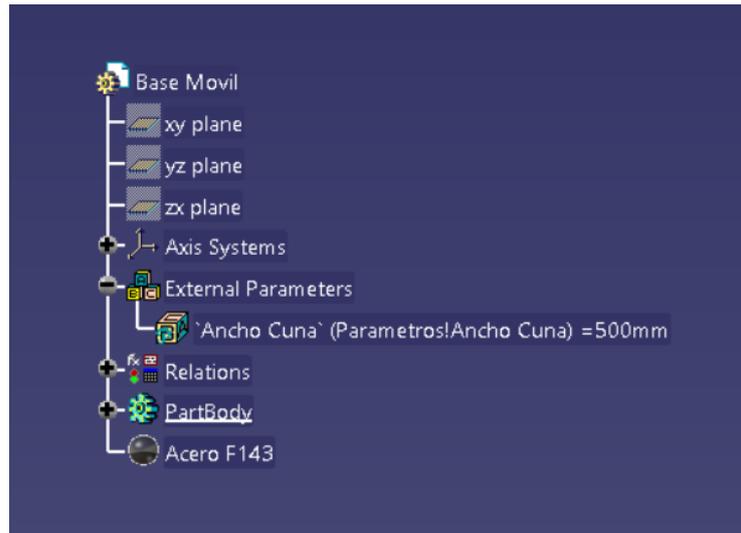


Figura 39. Árbol del fichero Base Móvil

Como se introdujo en la base fija, se busca que el modelo sea dinámico, es decir, que la base móvil se adapte a cada situación. Así que, se estableció el comportamiento de la hilera de taladros, específicamente, la distancia de dicha hilera respecto al sistema de ejes de la base móvil. El comportamiento de dicha geometría presenta seis posibles rangos de trabajo, marcado por las sentencias *If*. Cada sentencia impone una condición para entrar a la ecuación que determina el valor de la posición de las uniones. Así que las seis condiciones de trabajo del *Rule Posiciones Uniones* (Figura 40) y sus ecuaciones son:

- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango de 180-200 mm, la posición de la hilera de taladros, respecto del sistema de ejes, será: $\frac{1}{4} (\text{Ancho_Cuna} + 80) \text{ mm}$.
- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango de 200-280 mm, la posición de la hilera de taladros, respecto del sistema de ejes, será: $\frac{1}{4} (\text{Ancho_Cuna} + 100) \text{ mm}$.
- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango de 280-340 mm, la posición de la hilera de taladros, respecto del sistema de ejes, será: $\frac{1}{4} (\text{Ancho_Cuna} + 120) \text{ mm}$.
- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango de 340-400 mm, la posición de la hilera de taladros, respecto del sistema de ejes, será: $\frac{1}{4} (\text{Ancho_Cuna} + 140) \text{ mm}$.
- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango de 400-460 mm, la posición de la hilera de taladros, respecto del sistema de ejes, será: $\frac{1}{4} (\text{Ancho_Cuna} + 160) \text{ mm}$.
- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango de 460-500 mm, la posición de la hilera de taladros, respecto del sistema de ejes, será: $\frac{1}{4} (\text{Ancho_Cuna} + 180) \text{ mm}$.

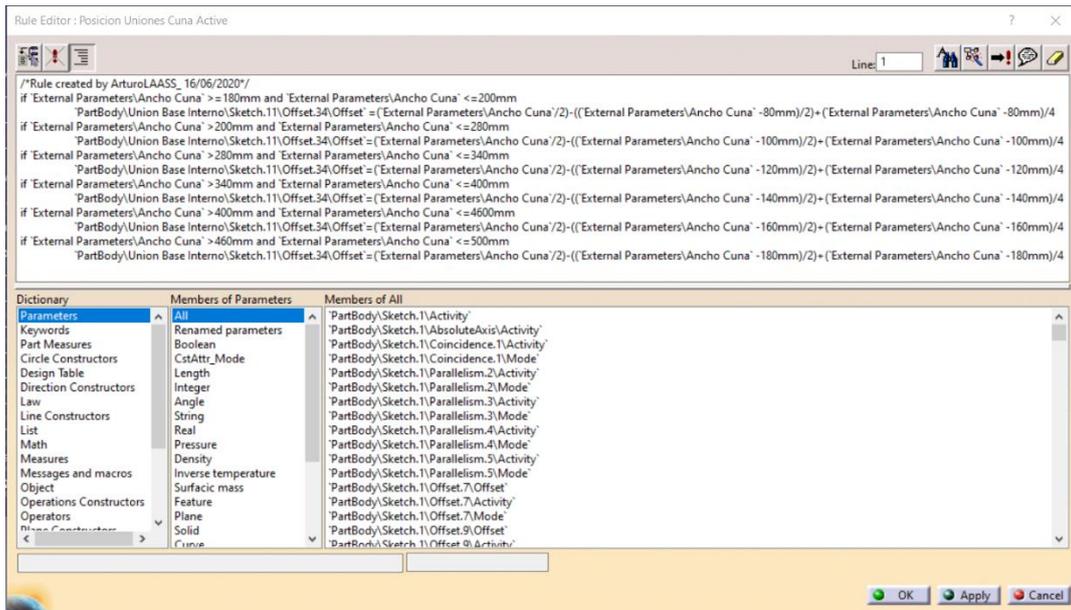


Figura 40. Rule Hilera Taladros (Posiciones Agujeros Rules – Base Móvil)

4.5 CUNA

La cuna, uno de los componentes importantes del TMD, alojará las masas necesarias para realizar los ajustes del TMD que ayudarán a adaptarse a las exigencias del cliente. También, se situarán los muelles y el amortiguador necesarios. El objetivo, entonces, es albergar la masa móvil. Nótese, la mitigación de las vibraciones dependerá no solo de que el dispositivo esté bien sintonizado con la estructura sino de la cantidad de masa móvil. Concretamente la capacidad de disipación es lineal con la cantidad de masa móvil.

Las exigencias de la cuna, por consiguiente, serán mayores que el resto de los componentes. En primer lugar, se busca una cuna rígida ya que tiene que soportar las masas que van en su interior. Además, se desea una cuna compacta donde la mayoría de su volumen sea aprovechable, así que los taladros serán un factor importante ya que se busca que las masas ocupen el mayor espacio posible.

4.5.1 EVOLUCIÓN DE LA CUNA

El modelo inicial de la cuna (*Figura 41*), con una sección en forma de U para la contención de las masas necesarias, presenta una pletina superior la cual suponía un impedimento a la introducción de los muelles. También, se puede observar en la *Figura 41* que existen dos pletinas verticales con el objetivo de realizar la unión con la base móvil.

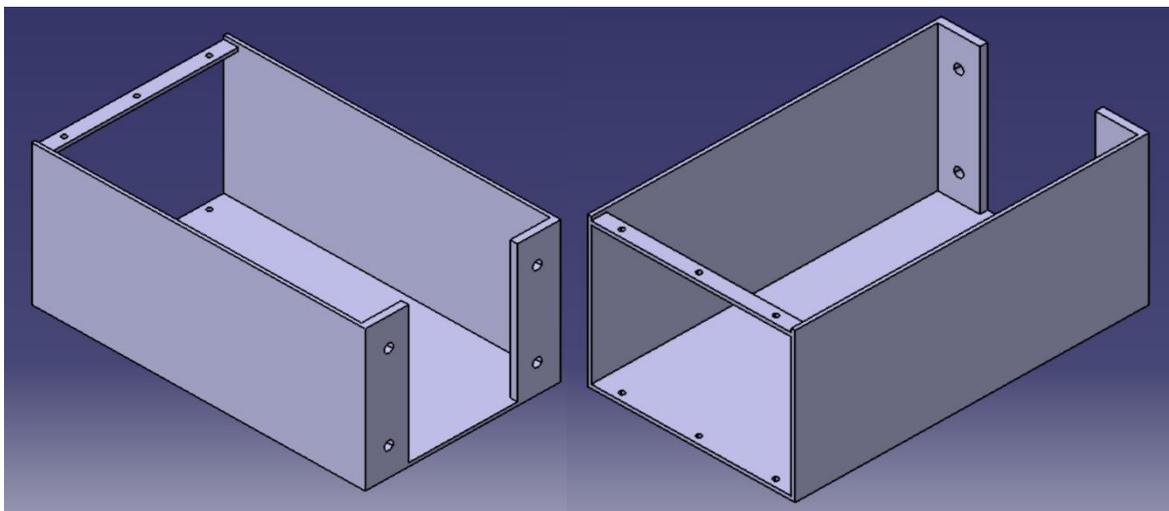


Figura 41. Cuna Inicial (Maqueta Digital)

El nuevo modelo de la cuna (*Figura 42*) presenta algunas modificaciones de importancia como por ejemplo la eliminación de la pletina superior y el aumento del número de taladros de las pletinas de sujeción vertical. Sin embargo, el tipo de sección empleado es el ideal así que no será necesario modificarlo a lo largo de la evolución de la cuna.

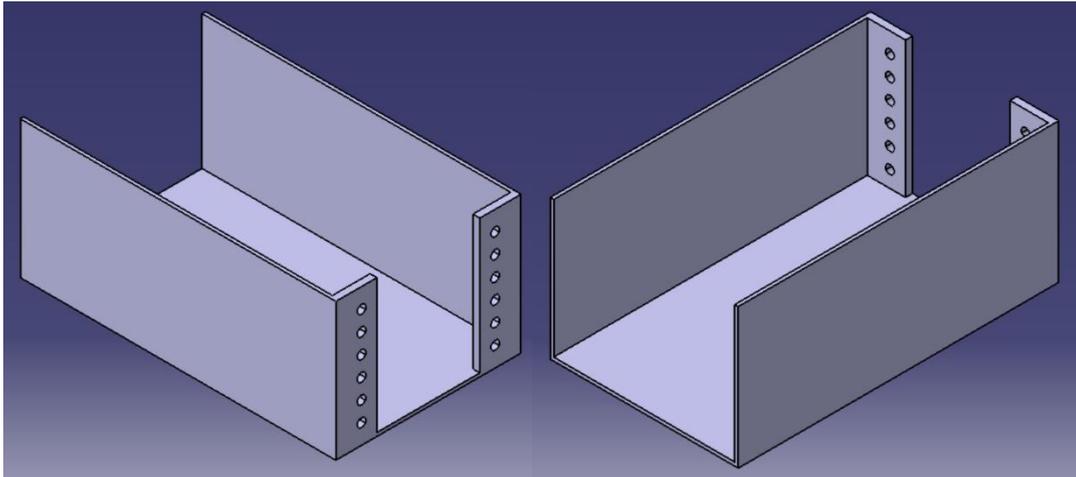


Figura 42. Primera modificación de la Cuna (Maqueta Digital)

Ahora que ya se tiene el volumen de la cuna adaptada a las masas que se introducirán, para ajustar el funcionamiento del TMD, solamente queda ir introduciendo las uniones que faltan:

- Taladros necesarios para realizar las uniones con los muelles
- Taladros necesarios para realizar la unión con el amortiguador
- Taladros necesarios para realizar la unión con las masas y evitar su desplazamiento

La nueva versión de la cuna (*Figura 43*) presenta cuatro taladros de diámetro $\varnothing = 10$ mm para la unión con las masas, taladros para la unión con los muelles de diámetro $\varnothing = 4$ mm y dos taladros de diámetro $\varnothing = 10$ mm para la unión con el amortiguador.

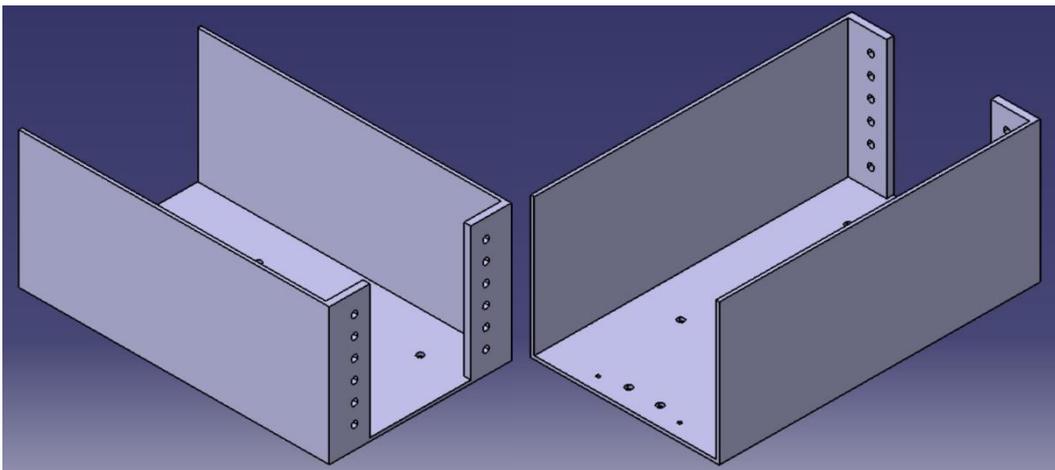


Figura 43. Segunda modificación de la Cuna (Maqueta Digital)

Finalmente se obtuvo el modelo final de la cuna (*Figura 44*), debido a la evolución del resto de componentes del TMD. Estas últimas modificaciones se basaron principalmente por la evolución del componente final de carrera (*Apartado 4.9*):

- Aumento del espesor de las pletinas de sujeción vertical, destinadas a alojar los taladros de unión con la cuna, para dar mayor rigidez.
- Posicionamientos de dos taladros a cada lado de la cuna para realizar la unión con el elemento final de carrera.
- Reducción del largo de la cuna para dejar el espacio entre la cuna y la base fija. El objetivo es evitar que la cuna choque con la base fija durante el funcionamiento del TMD.

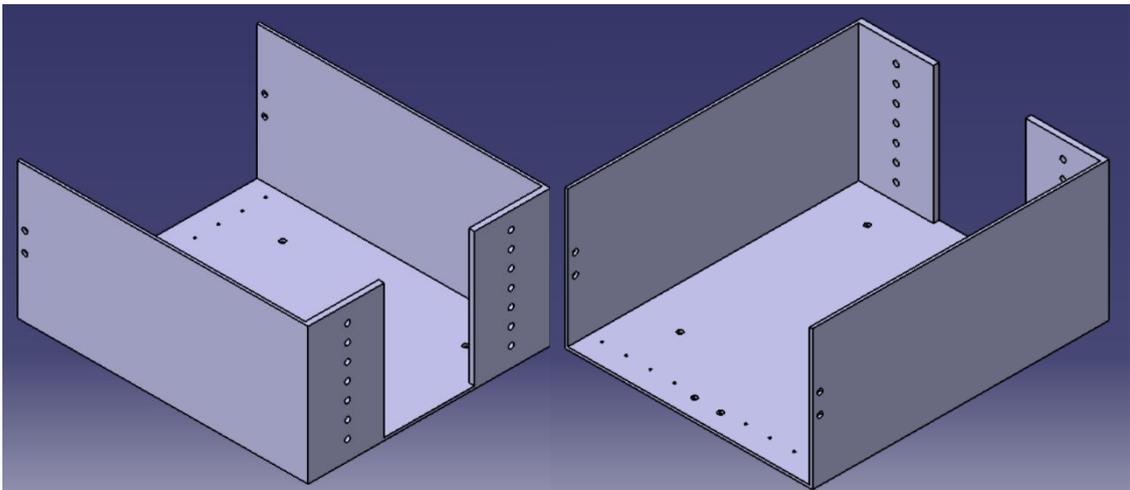


Figura 44. Cuna - Modelo Final (Maqueta Digital)

4.5.2 PARÁMETROS Y DIMENSIONES

Las dimensiones y los parámetros a los que se hace referencia en este apartado, está referido al modelo final de la cuna de la *Figura 44*. Topológicamente, la cuna presenta un perfil en U a la cual se le añade dos pletinas en uno de los extremos (*Figura 44*). En este caso, el modelo está apoyado en el uso de dos parámetros (*Figura 45*), siendo las dimensiones:

- Longitud de la cuna es función del parámetro **Longitud_Ballesta**, teniendo en cuenta que se debe restar a dicho parámetro el espacio necesario entre la cuna y la base fija. La aproximación del espacio será:

$$Espacio_{CUNA-BASE FIJA} = \sqrt{Longitud_{BALLESTA}^2 - Carrera^2} \quad [1]$$

Ecuación 1. Espacio Cuna-Base Fija

- Ancho de la cuna es función del parámetro **Ancho_Cuna**
- Las dimensiones fijas de la cuna son: Espesor de la cuna con un valor de 5 mm y Alto de la cuna con un valor de 240 mm.
- Dos pletinas con dos de sus dimensiones fijas: Espesor con un valor de 10 mm y Alto con un valor de 240 mm. El ancho de las pletinas se determina en función de *Rules*.
- Los taladros, que se observan en la *Figura 44*, están destinados a unir la cuna con otros componentes:
 - Taladros de diámetro $\varnothing = 4$ mm posicionado en uno de los extremos de la cuna y con el objetivo de realizar la unión con los muelles. El resto de los parámetros de los taladros: Numero y Distancia entre ellos, dependen de los *Rules* que se explicará después.
 - Dos taladros de diámetro $\varnothing = 10$ mm posicionado en uno de los extremos de la cuna, junto a los taladros de los muelles, con el objetivo de realizar la unión con el amortiguador.
 - Cuatro taladros de diámetro $\varnothing = 10$ mm posicionado en la parte interna de la cuna y con el objetivo de realizar la unión con las masas. Así, se evitará el desplazamiento de las masas durante el movimiento del TMD.

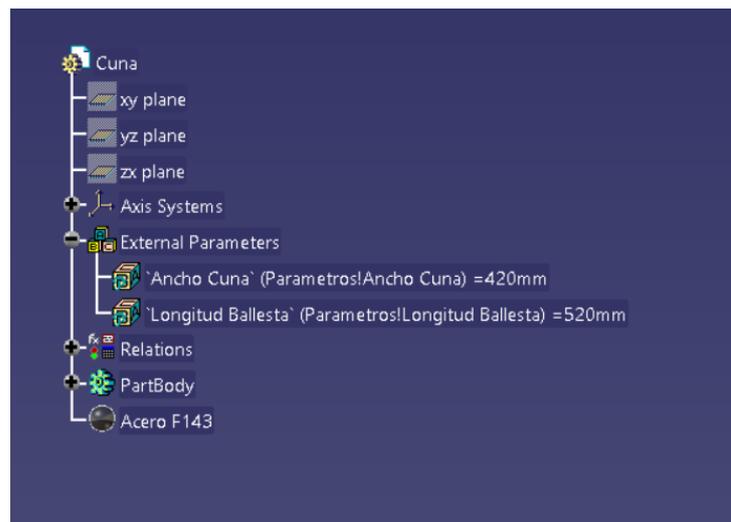


Figura 45. Árbol del fichero Cuna

La cuna debe adaptarse a las exigencias de la estructura en la que se colocará el TMD. Es por ello, que varias partes de la cuna se deberán adaptar a estas exigencias y será necesario el empleo de la herramienta *Rules*.

En primer lugar, se estableció el comportamiento del ancho de las pletinas (*Figura 46*) que serán función del parámetro **Ancho_Cuna**. El objetivo es mantener una proporcionalidad entre el ancho de la cuna y el ancho de estas pletinas para así evitar posibles fallos por el aumento del peso debido al aumento de las dimensiones.

El comportamiento de dicha geometría presenta seis rangos diferente de trabajo marcados por las sentencias *if*. Así que las seis condiciones de trabajo del *Rule* Ancho de pletinas (Figura 46) y sus ecuaciones son:

- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango de 180-200 mm, el ancho de pletina presentará un valor de: $\frac{1}{2} (\text{Ancho_Cuna} - 80)$ mm.
- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango de 200-280 mm, el ancho de pletina presentará un valor de: $\frac{1}{2} (\text{Ancho_Cuna} - 100)$ mm.
- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango de 280-340 mm, el ancho de pletina presentará un valor de: $\frac{1}{2} (\text{Ancho_Cuna} - 120)$ mm.
- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango de 340-400 mm, el ancho de pletina presentará un valor de: $\frac{1}{2} (\text{Ancho_Cuna} - 140)$ mm.
- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango de 400-460 mm, el ancho de pletina presentará un valor de: $\frac{1}{2} (\text{Ancho_Cuna} - 160)$ mm.
- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango de 460-500 mm, el ancho de pletina presentará un valor de: $\frac{1}{2} (\text{Ancho_Cuna} - 180)$ mm.

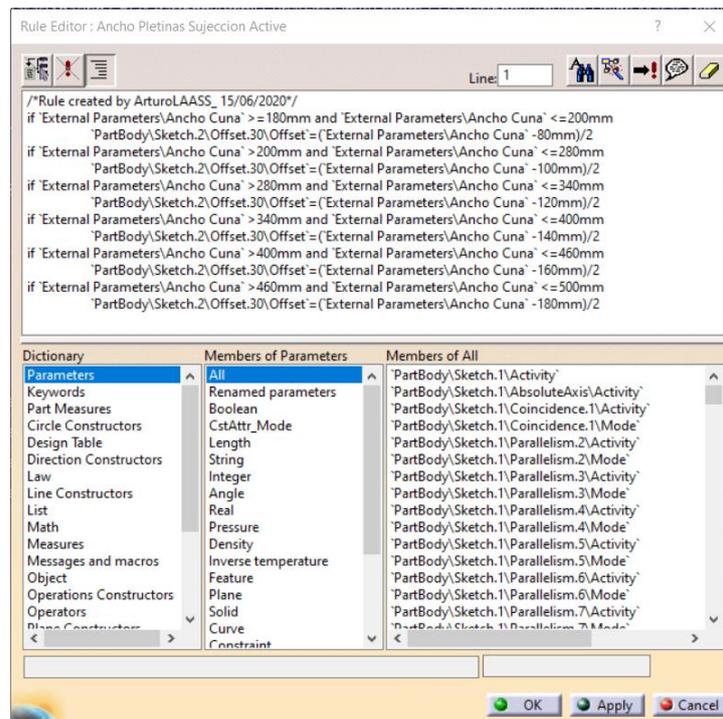


Figura 46. Rule del ancho de pletina (Ancho Pletinas Rules - Cuna)

Se continúa con la descripción del comportamiento de los taladros destinados a la unión entre la cuna y las masas que irán en su interior (*Figura 47*). Específicamente, el componente que realizará dicha unión son las varillas roscadas (Apartado 4.12). El objetivo es mantener una proporcionalidad entre la posición de los taladros y las masas, así evitar tener las uniones demasiado alejadas del centro de gravedad de las masas.

El comportamiento de dicha geometría presenta 12 regiones de trabajo. La mitad de esta región de trabajo está destinada a determinar la posición horizontal del taladro y la otra mitad destinada a determinar la posición vertical del taladro. Así pues, la descripción de esta primera mitad de trabajo es función del parámetro Ancho Cuna:

- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango 180-240 mm, la **posición horizontal** de los taladros presentará un valor de **30 mm** respecto del canto largo de la cuna.
- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango 240-320 mm, la **posición horizontal** de los taladros presentará un valor de **45 mm** respecto del canto largo de la cuna.
- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango 320-400 mm, la **posición horizontal** de los taladros presentará un valor de **60 mm** respecto del canto largo de la cuna.
- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango 400-500 mm, la **posición horizontal** de los taladros presentará un valor de **75 mm** respecto del canto largo de la cuna.

La descripción de esta segunda mitad de trabajo es función del parámetro Longitud_Ballesta:

- Cuando el parámetro Longitud_Ballesta esté dentro del rango 400-440 mm, la **posición vertical** de los taladros presentará un valor de **30 mm** respecto del canto corto de la cuna.
- Cuando el parámetro Longitud_Ballesta esté dentro del rango 440-500 mm, la **posición vertical** de los taladros presentará un valor de **45 mm** respecto del canto corto de la cuna.
- Cuando el parámetro Longitud_Ballesta esté dentro del rango 500-560 mm, la **posición vertical** de los taladros presentará un valor de **60 mm** respecto del canto corto de la cuna.
- Cuando el parámetro Longitud_Ballesta esté dentro del rango 560-600 mm, la **posición vertical** de los taladros presentará un valor de **75 mm** respecto del canto corto de la cuna.

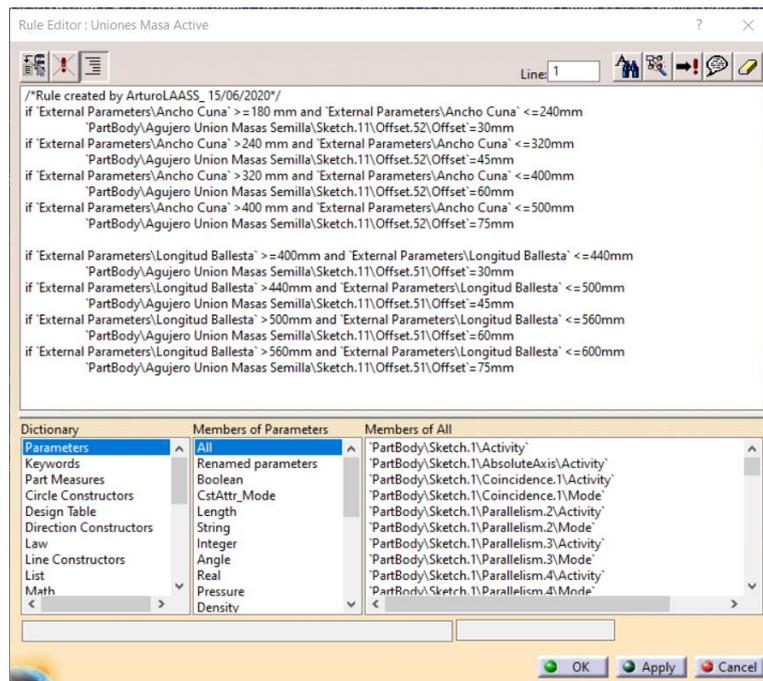


Figura 47. Rule taladros de la masa (Uniones masa Rule - Cuna)

Finalmente, se realizó la descripción de los taladros destinados a las uniones de los muelles con la cuna (Figura 48 y Figura 49). Dicha descripción se realiza a través de tres Rules diferentes: Números de uniones (lado derecho e izquierdo de la cuna) y Posición de las uniones. Gracias a estos Rules se puede presentar un modelo que se ajusta a cada situación y que aprovecha todo el espacio disponible para la introducción de todos los muelles posibles.

El primero de estos Rules es la posición de los taladros, destinados a las uniones de los muelles (Figura 48), respecto a la cara interna de la cuna. Esta geometría presenta dos rangos de trabajo marcado por las sentencias *if*:

- Cuando el parámetro Ancho_Cuna es de 180 mm, la **posición del taladro** de los muelles presenta un valor de: $\frac{1}{2} ((\text{Ancho_Cuna} * \frac{1}{2}) - 30) + 2 \text{ mm}$, es decir, estará situada en la **mitad de la base de sujeción**.
- Cuando el parámetro Ancho_Cuna es superior a 180 mm, la **posición del taladro** de los muelles presenta un valor constante de **22 mm**.

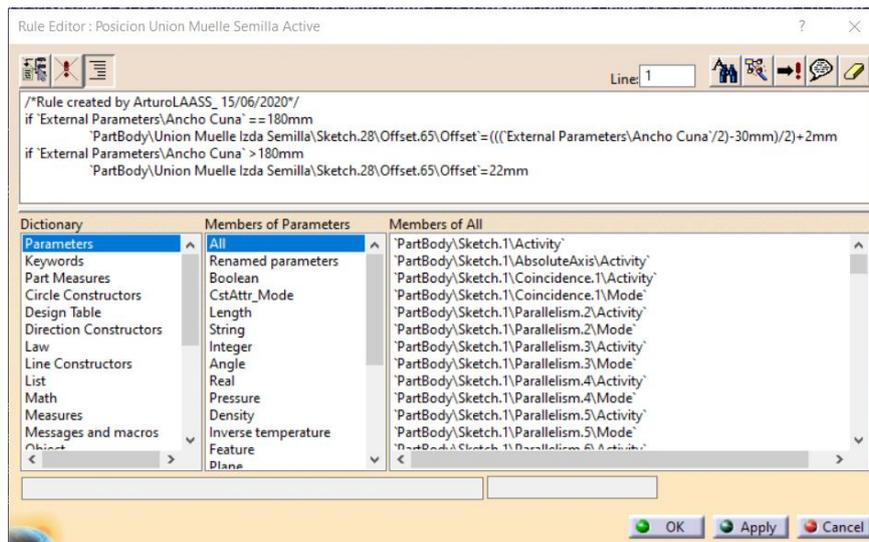


Figura 48. Rule posición de los taladros de los muelles (Posición Unión Muelle - Cuna)

Los otros dos *Rules* que quedan por definir son el número de taladros en la cuna (Figura 49) tanto en el lado izquierdo como en el lado derecho. Se desea optimizar al máximo el espacio disponible, por lo que el número de uniones con los muelles varían tal y como variarán el número de muelles (Apartado 4.13). La geometría presenta cinco rangos de trabajo:

- Cuando el parámetro Ancho_Cuna presente un valor de 180 mm, será solamente necesario **un único taladro**.
- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango 200-300 mm, el **número de uniones** necesarios en la base de la cuna será de **2**.
- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango 300-380 mm, el **número de uniones** necesarios en la base de la cuna será de **3**.
- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango 380-460 mm, el **número de uniones** necesarios en la base de la cuna será de **4**.
- Cuando el parámetro Ancho_Cuna esté dentro del rango 460-500 mm, el **número de uniones** necesarios en la base de la cuna será de **5**.

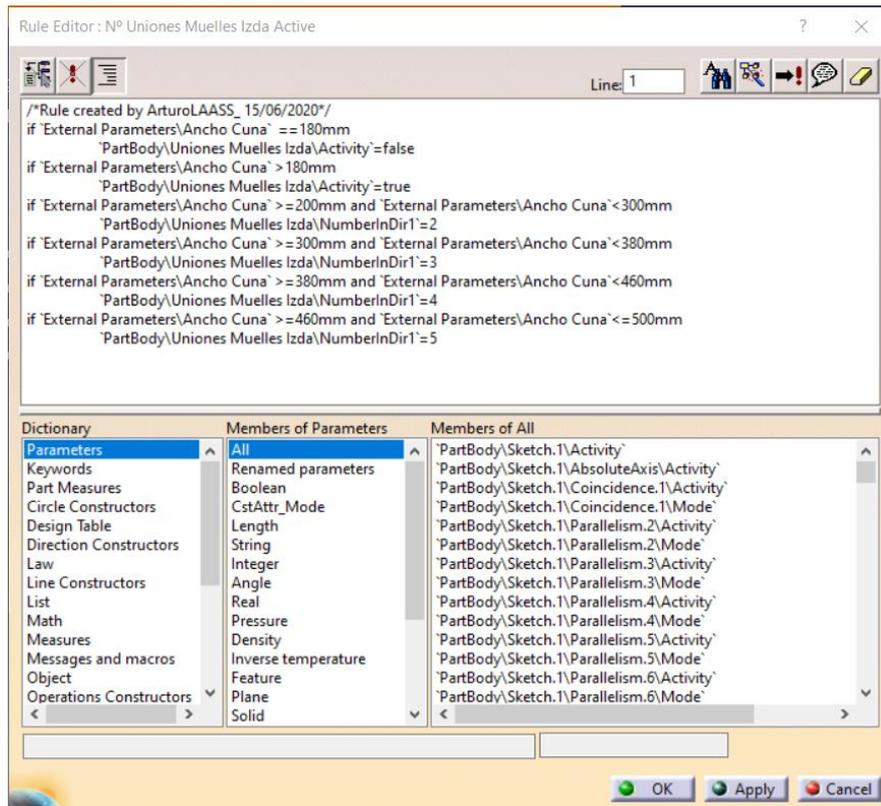


Figura 49. Rule número de uniones de los muelles (N.º Uniones Muelles Rule - Cuna)

La cuna será un componente que se fabricará en taller, generalmente, estará construido en acero S275 (Apartado 4.4.3). El hecho de utilizar este material es que la cuna tiene una gran exigencia durante el funcionamiento del TMD, así que es necesario que el material resista y no plastifique.

4.6 MASAS

La masa, uno de los componentes que define la tecnología TMD, es necesaria para la absorción de las vibraciones que se quieren amortiguar. El objetivo de las masas es adquirir energía cinética que provoque desplazamiento relativo entre la parte fija y la parte móvil. También es empleado para realizar los ajustes finos, generalmente, en campo.

4.6.1 EVOLUCIÓN DE LA MASA

Topológicamente, la masa es un bloque rectangular lo que implica que su maqueta digital fue sencilla de obtener (*Figura 50*). La evolución desde su modelo inicial (*Figura 51*) implicó solamente:

- La reducción del espesor para poder controlar con mayor precisión la masa que se introduce en el producto TMD.
- Introducción de los taladros destinados a realizar la unión con la cuna a través de las varillas roscadas y así evitar los desplazamientos de las masas durante el movimiento del TMD.

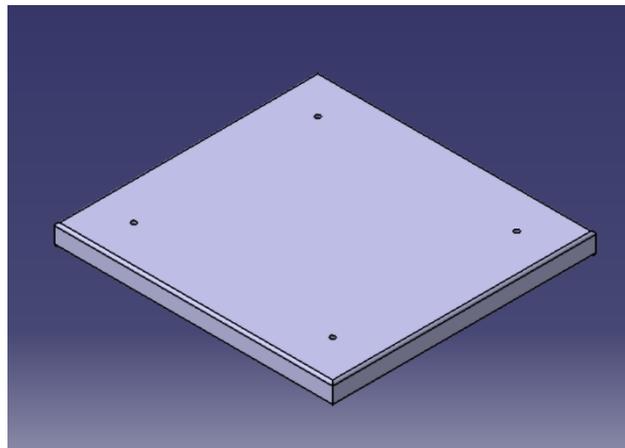


Figura 50. Masa - Modelo Final (Maqueta Digital)

Las dimensiones de la *Figura 51* se tuvieron que modificar para dejar espacio suficiente a las uniones de la cuna con los muelles y el amortiguador tal y como se expuso en el apartado 4.5. Siempre con el objetivo de aprovechar el máximo espacio disponible dentro de la cuna.

El modelo final presentado en la *Figura 50* hace que la masa sea más manejable ya que se distribuye en lingotes “modulares”. El número total de lingotes que se pueden introducir en el TMD es de 6.

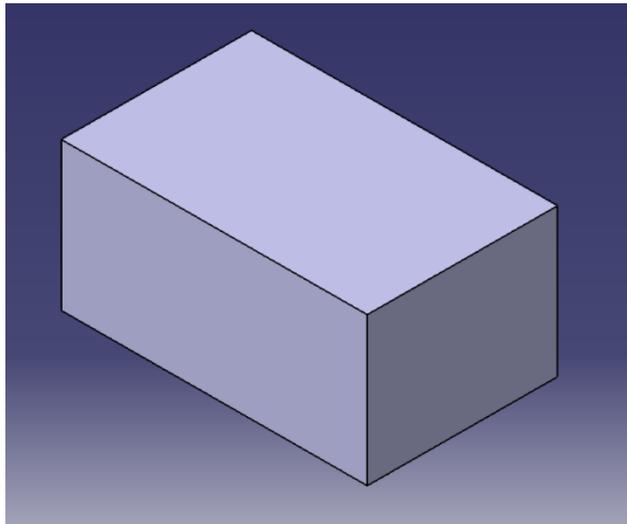


Figura 51. Masa - Modelo Inicial (Maqueta Digital)

4.6.2 PARÁMETROS Y DIMENSIONES

El modelo final de la masa (Figura 50) está apoyado en dos de los tres parámetros (Figura 52) que guían el TMD. Las dimensiones del modelo son entonces:

- El ancho de la masa es función del parámetro **Ancho_Cuna** donde se tuvo que restar un 1 mm a cada lado para el posicionamiento de estas.
- El largo de la masa es función del parámetro **Longitud_Ballesta** a la cual se resta el espacio necesario entre la cuna y la base fija expuesto en la *Ecuación 1* y 70 mm para dejar el espacio a las uniones necesarias en la cuna.

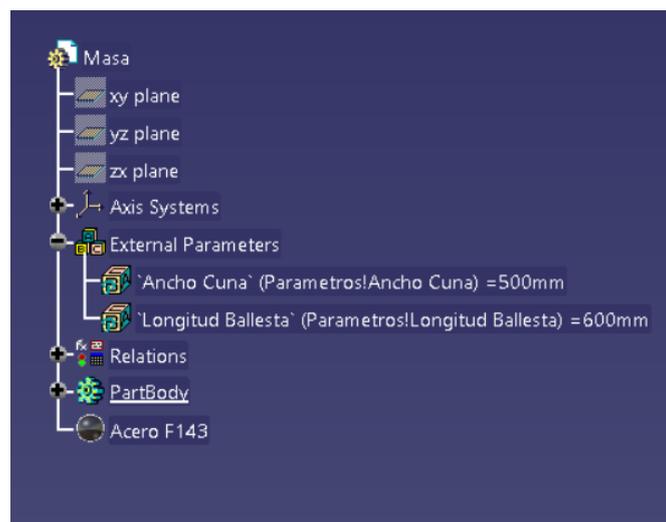


Figura 52. Árbol del fichero Masa

La masa también tenía que adaptarse a las diferentes situaciones, es decir, a los diferentes valores de los parámetros que guían el modelo. Así pues, se consiguió a través del comportamiento de la posición de los taladros (*Figura 53*) a través de la herramienta *Rules*. Específicamente, el componente que realizará dicha unión son las varillas roscadas (Apartado 4.12). El objetivo es mantener una proporcionalidad entre la posición de los taladros y las masas, así evitar tener las uniones demasiado alejadas del centro de gravedad de las masas.

El comportamiento de dicha geometría presenta 12 regiones de trabajo. La mitad de esta región de trabajo está destinada a determinar la posición horizontal del taladro y la otra mitad destinada a determinar la posición vertical del taladro. Así pues, la descripción de esta primera mitad de trabajo es función del parámetro *Ancho_Cuna*:

- Cuando el parámetro *Ancho_Cuna* esté dentro del rango 180-240 mm, la **posición horizontal** de los taladros presentará un valor de **30 mm** respecto del canto largo de la masa.
- Cuando el parámetro *Ancho_Cuna* esté dentro del rango 240-320 mm, la **posición horizontal** de los taladros presentará un valor de **45 mm** respecto del canto largo de la masa.
- Cuando el parámetro *Ancho_Cuna* esté dentro del rango 320-400 mm, la **posición horizontal** de los taladros presentará un valor de **60 mm** respecto del canto largo de la masa.
- Cuando el parámetro *Ancho_Cuna* esté dentro del rango 400-500 mm, la **posición horizontal** de los taladros presentará un valor de **75 mm** respecto del canto largo de la masa.

La descripción de esta segunda mitad de trabajo es función del parámetro *Longitud_Ballesta*:

- Cuando el parámetro *Longitud_Ballesta* esté dentro del rango 400-440 mm, la **posición vertical** de los taladros presentará un valor de **30 mm** respecto del canto corto de la masa.
- Cuando el parámetro *Longitud_Ballesta* esté dentro del rango 440-500 mm, la **posición vertical** de los taladros presentará un valor de **45 mm** respecto del canto corto de la masa.
- Cuando el parámetro *Longitud_Ballesta* esté dentro del rango 500-560 mm, la **posición vertical** de los taladros presentará un valor de **60 mm** respecto del canto corto de la masa.
- Cuando el parámetro *Longitud_Ballesta* esté dentro del rango 560-600 mm, la **posición vertical** de los taladros presentará un valor de **75 mm** respecto del canto corto de la masa.

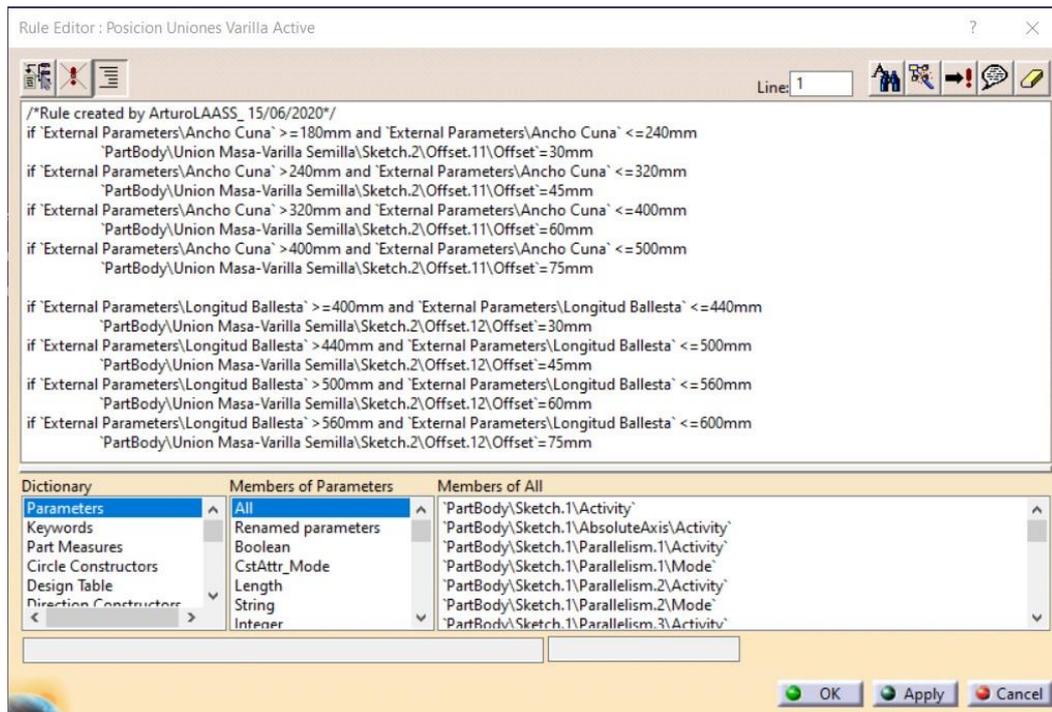


Figura 53. Rule taladros de la masa (Uniones masa Rule - Masa)

La masa será un componente que se fabricará en taller, que estará construido en acero S275 (Apartado 4.4.3). Generalmente, para las partes móviles se emplearán este tipo de acero.

4.7 SOPORTE DE LOS MUELLES

El componente soporte de los muelles, tal y como se explicó en el apartado de la base fija (Apartado 4.3), surge de una de las evoluciones de la base fija. La funcionalidad de dicho componente será, entonces, asegurar la unión entre la base fija, los muelles y la cuna. Todo ello con el objetivo de sujetar la masa objetivo, es decir, las partes móviles y descargar las ballestas. Las exigencias de este componente es que la unión sea lo suficientemente rígida para que no se produzcan abolladuras o fallos, además debe soportar las fuerzas de tracción de los muelles que sostiene.

4.7.1 EVOLUCIÓN DE LOS SOPORTE DE MUELLES

La evolución del soporte de los muelles está ligada a la evolución de la base fija, expuesta anteriormente. El primer modelo del soporte de los muelles (*Figura 54*) presentaba una geometría de L invertida con cuatro taladros destinados a las uniones con los muelles. Como se observa, este soporte formaba parte de la base fija, es decir, estaba soldada a ella. Sin embargo, sobresalía demasiado del producto lo que implicó que se tuviese que modificar para hacerlo algo más compacto.

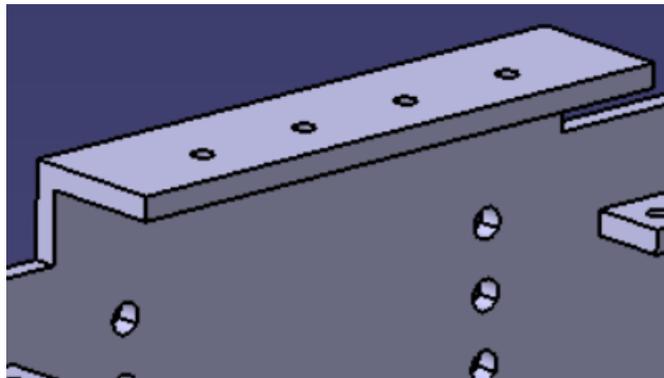


Figura 54. Soporte de los muelles - Modelo Inicial (Maqueta Digital)

El siguiente modelo del soporte, aunque seguía unido a la base fija, era más compacto que el modelo anterior ya que se eliminó el tramo vertical y solamente se dejó el tramo horizontal, con el objetivo de evitar que sobresaliese del TMD. Seguía presentando las correspondientes uniones (*Figura 55*). El soporte ocupaba toda la parte central de la base fija, correspondiente al espacio interno de la cuna.

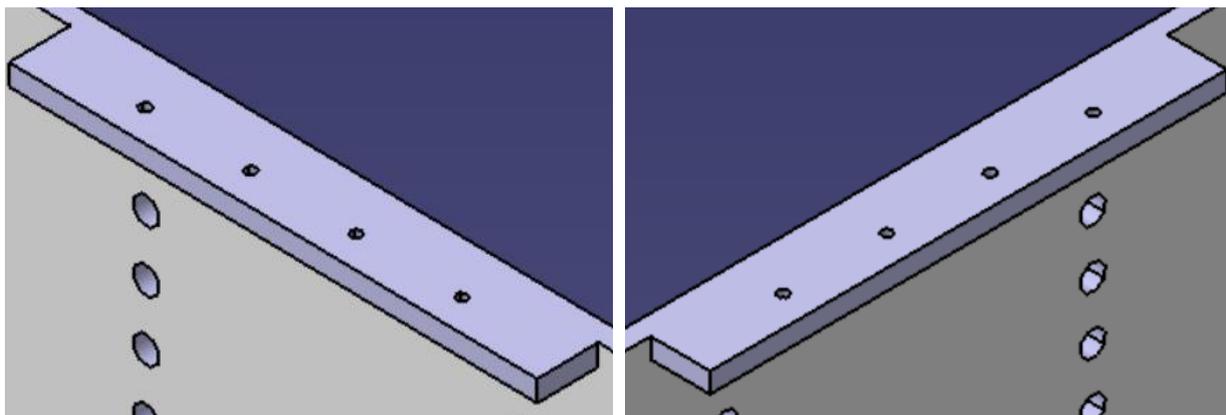


Figura 55. Primera modificación del Soporte de los muelles (Maqueta digital)

Aunque la solución anterior era ideal para la sujeción de los muelles, esta no era válida debido a que era necesario dejar un espacio intermedio para el posicionamiento del amortiguador. Este espacio permitirá tener los muelles y el amortiguador al mismo nivel (Figura 56). El objetivo es conseguir un producto compacto, por eso los dos componentes deben estar al mismo nivel. Ahora se tiene que el soporte de sujeción de los muelles estará dividido en dos, teniendo un soporte izquierdo y otro derecho. Aunque en la Figura 56 solo aparece un taladro en cada lado, el modelo se adaptada en función del valor del ancho de la cuna.

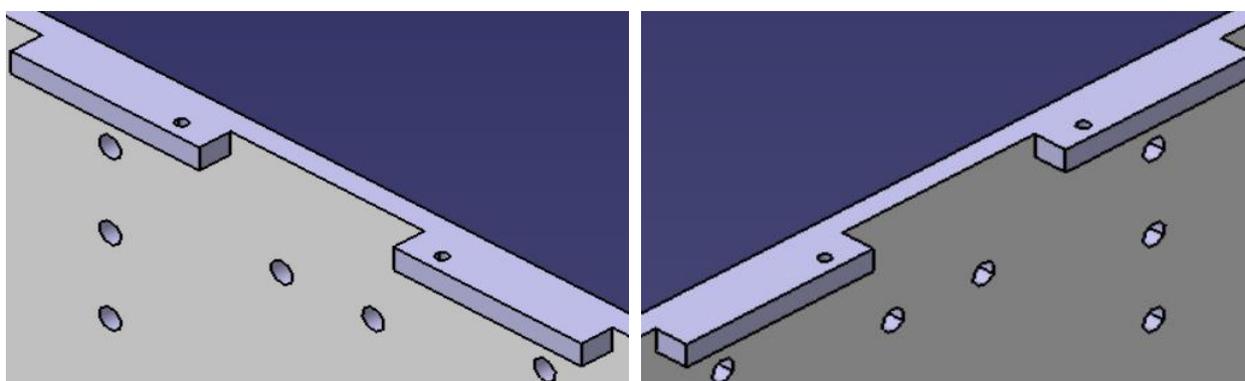


Figura 56. Segunda modificación del Soporte de los muelles (Maqueta Digital)

Finalmente, se obtuvo el modelo final del soporte de los muelles (Figura 57), que está separado de la base fija y supone un componente nuevo en el modelo final del TMD. La sección del soporte vuelve a presentarse como una L invertida donde por un lado se tiene los taladros destinados a las uniones de los muelles, y, por otro lado, los taladros destinados a las uniones de dicho componente con la base fija. El tramo horizontal debe ser lo suficientemente largo para sobrepasar el espacio existente entre la base fija y la cuna. Así que se tendrá una pequeña separación entre los muelles y la base fija. El tramo vertical debe asegurar una buena unión entre ambos componentes.

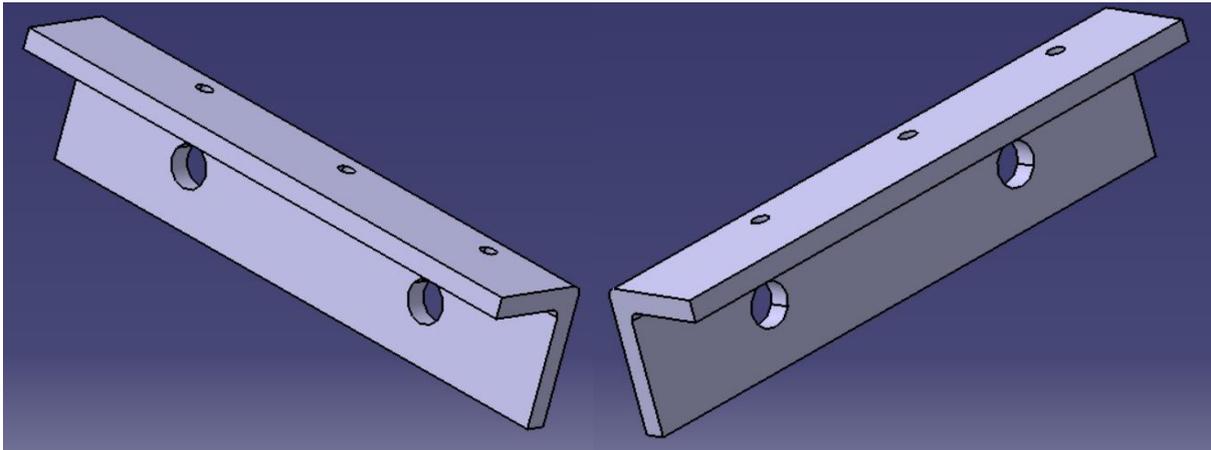


Figura 57. Soporte muelles - Modelo Final (Maqueta Digital)

4.7.2 PARÁMETROS Y DIMENSIONES

Las dimensiones y los parámetros presentados en este apartado son los correspondientes al modelo final de la *Figura 57*. Topológicamente, el soporte presenta una sección en L en la cual se realizan los correspondientes taladros destinado a las diferentes uniones. Este modelo final está guiado solamente por un solo parámetro (*Figura 58*). Así que las dimensiones son:

- Ancho del soporte es función del parámetro **Ancho_Cuna** restando 30 mm para dejar el espacio al amortiguador y un espacio entre dicho componente y la cuna.

$$Ancho_{SOPORTE\ MUELLE} = \frac{Ancho_{CUNA}}{2} - 30\ mm \quad [2]$$

Ecuación 2. Ancho del soporte de los muelles

- Espesor del soporte de los muelles presenta un valor fijo de 5 mm.
- Largo del tramo horizontal presentará un valor fijo de 20 mm para así asegurarse que siempre sobrepasará el espacio que existe entre la cuna y la base fija (*Formula 1*) y realizar el correcto posicionamiento de los muelles.
- Largo del tramo vertical presentará un valor fijo de 28 mm para dejar el espacio suficiente a las uniones necesarias y evitar posibles fallos como el desgarro de las uniones.
- Los taladros presentes en ambos tramos del componente son:
 - Taladros de diámetro $\varnothing = 4\ mm$ destinados a la unión del soporte con los muelles situados en el tramo horizontal.
 - Taladros de diámetro $\varnothing = 10\ mm$ destinados a la unión del soporte con la base fija situados en el tramo vertical.

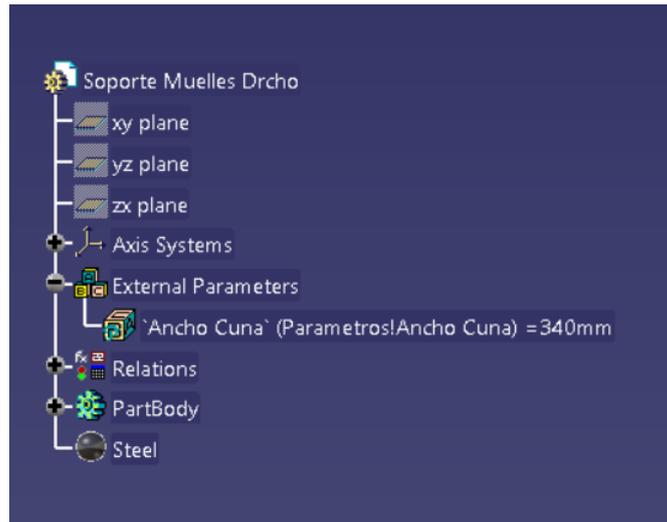


Figura 58. Árbol del fichero Soporte de los Muelles

Se necesita que el soporte de los muelles se adapte a las exigencias del cliente, es decir, a la estructura a la que va acoplada el TMD. Por ello, la maqueta final del soporte variará en función del valor de los parámetros.

Los *Rules*, que se presentarán a continuación, están en sintonía con los *Rules* correspondiente de la cuna y la base fija con el objetivo de que se comporten exactamente igual ante los cambios de los parámetros del TMD.

En primer lugar, la definición del comportamiento de las uniones de los muelles presenta dos *Rules* diferentes. El primer *Rule* está destinado a determinar la distancia entre las uniones (Figura 59). Como se observa en la Figura 59, se tiene dos rangos de trabajo:

- Cuando el ancho del soporte (Ecuación 2) presenta un valor de 60 mm, es decir, el parámetro Ancho_Cuna vale 180 mm, el **único taladro** estará situado en **mitad del soporte de los muelles (30 mm)**.
- Cuando el ancho del soporte (Ecuación 2) presenta un valor superior a 60 mm, es decir, el resto de los valores del parámetro Ancho_Cuna, los **taladros** estarán **separados** entre sí un valor de **20 mm**.

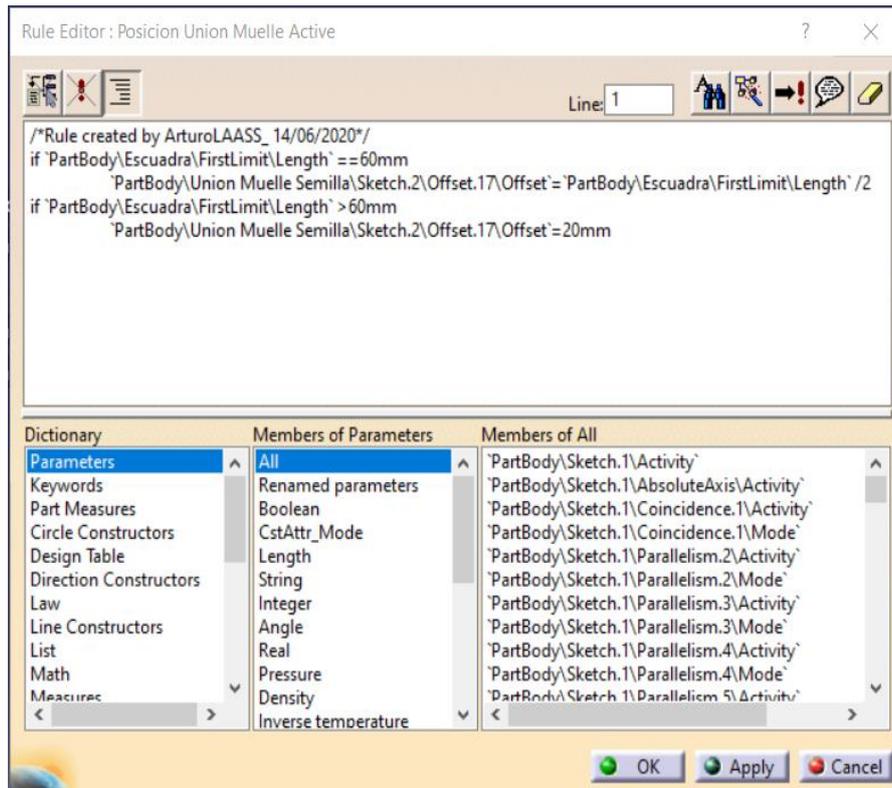


Figura 59. Rule de la posición del taladro de los muelles (Posición Unión Muelles Rule -Soporte Muelles)

El segundo *Rule* del comportamiento de las uniones de los muelles, está referido al número de taladros que se presenta en el tramo horizontal (Figura 60). Como ya se sabe, se busca aprovechar el máximo espacio disponible para meter el número máximo de muelles. La geometría presenta cinco rangos de trabajo, tal y como se presentó en la geometría de la cuna (Apartado 4.5):

- Cuando el ancho del soporte presenta un valor comprendido entre los 60-70 mm, se desactiva el patrón de las uniones ya que solamente se tiene **un solo taladro**. Cuando el valor es superior a los 70 mm, se activa el patrón de uniones.
- Cuando el ancho del soporte presenta un valor comprendido ente los 70-120 mm, el **número de uniones** necesarios en el soporte será de **2**.
- Cuando el ancho del soporte presenta un valor comprendido ente los 120-160 mm el **número de uniones** necesarios en el soporte será de **3**.
- Cuando el ancho del soporte presenta un valor comprendido ente los 160-200 mm, el **número de uniones** necesarios en el soporte será de **4**.
- Cuando el ancho del soporte presenta un valor comprendido ente los 200-220 mm, el **número de uniones** necesarios en el soporte será de **5**.

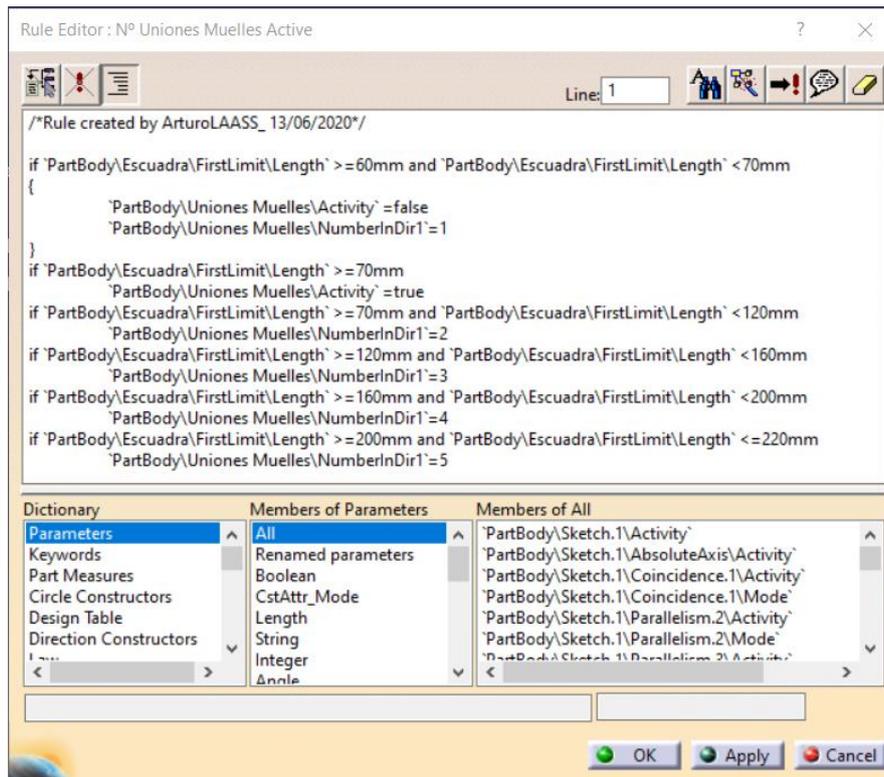


Figura 60. Rule del número de taladros en el soporte (N.º Uniones Muelles Rule – Soporte de los muelles)

Finalmente, se definirá el comportamiento de los taladros destinados a la unión del soporte con la base fija. El *Rule* recogerá el comportamiento del número de uniones necesarios y la distancia entre estas uniones (Figura 61), apoyado por el parámetro **Ancho_Cuna**. Aunque en la Figura 61 se observa cuatro líneas de código, la geometría tendrá solamente dos rangos de trabajo:

- Cuando el ancho del soporte presenta un valor menor a 140 mm (incluido dicho valor), el soporte de los muelles presentará **dos uniones** que estarán separadas entre sí una **distancia de:** $\frac{1}{2} * \text{Ancho_Cuna}$.
- Cuando el ancho del soporte presenta un valor superior a 140 mm, el soporte de los muelles presentará **tres uniones** que estarán separadas entre sí una **distancia de:** $\frac{1}{4} * \text{Ancho_Cuna}$.

Como se indicó anteriormente, se recomienda revisar los *Rules* de los taladros destinados a la unión entre la base fija y el soporte de los muelles (Apartado 4.4.2) y los taladros destinados a la unión entre los muelles y la cuna (Apartado 4.5.2).

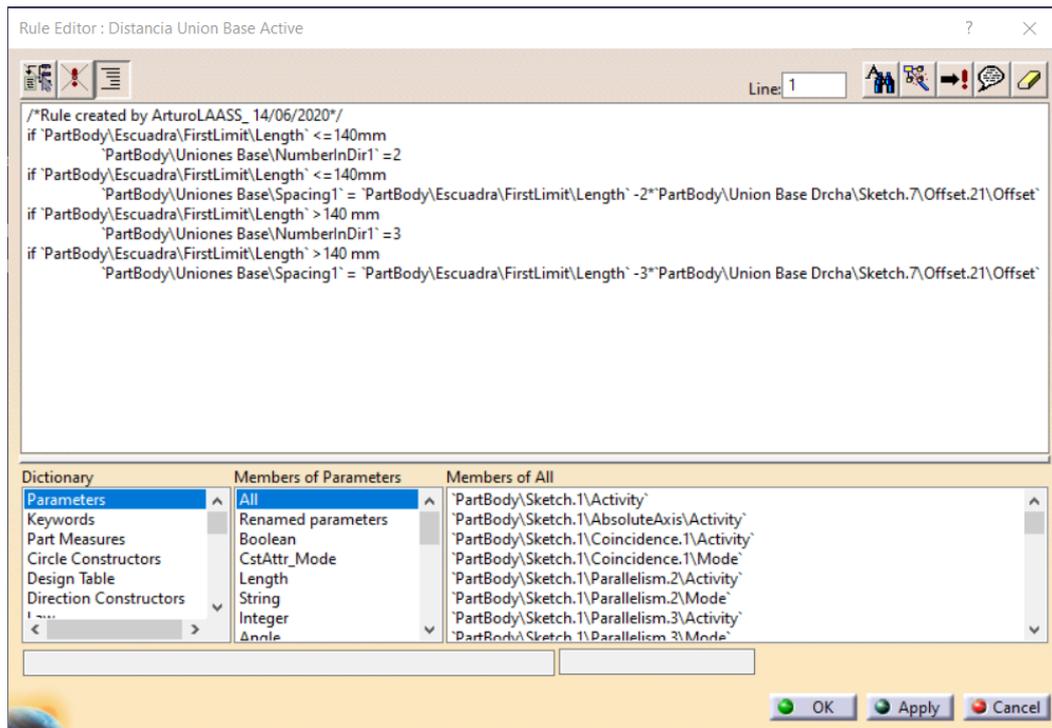


Figura 61. Rule de las uniones de la base fija y el soporte (Distancia Unión Base Rule – Soporte de los muelles)

El soporte de los muelles, que se fabricará en taller a medida, estará construido en acero S275. El soporte de los muelles empleará este tipo de material ya que, aunque tenga la exigencia de sujetar los muelles y por consiguiente la masa suspendida, este tipo de acero será suficientemente rígido para aguantarlo.

4.8 TACO

El taco, cuyo objetivo es reforzar la unión de las ballestas con las bases de apoyo de la base fija y de la base móvil, confinará una pequeña zona de la ballesta. Esta región confinada, corresponde a la zona de apoyo de la ballesta con las bases de apoyo, dejará de ser útil durante el movimiento del TMD. Todo ello con el objetivo de que las uniones no fallen y la transmisión de las vibraciones desde la base fija hacia la base móvil sea adecuada.

Geoméricamente, el taco es una placa rectangular, de espesor reducido, que contiene los taladros necesarios para realizar las uniones con la ballesta y las bases de apoyo (*Figura 62*). Apenas el modelo del taco ha sufrido cambios durante la evolución del TMD, ya que la solución presentada desde el inicio era la adecuada.

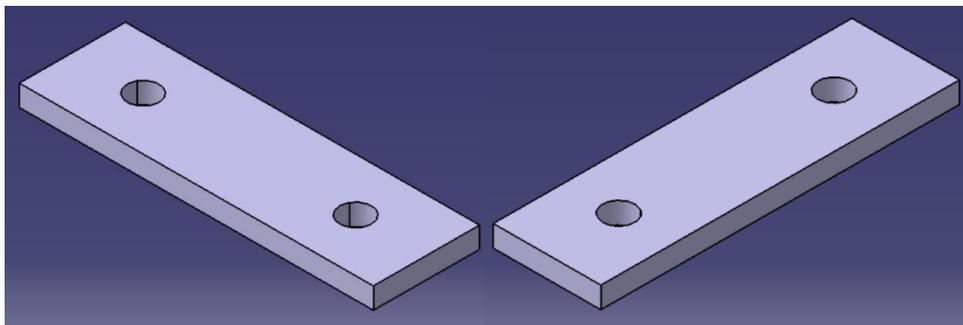


Figura 62. Taco - Modelo Final (Maqueta Digital)

Las dimensiones del taco (*Figura 63*) presentarán siempre un valor fijo, es decir, no están apoyadas en ningún de los parámetros que guían el TMD. Dichas dimensiones serán:

- Ancho del taco presentará un valor fijo de 100 mm, con el objetivo de confinar todo el ancho de las ballestas.
- Largo del taco presentará un valor fijo de 30 mm, con el objetivo de cubrir una pequeña zona de la ballesta.
- Espesor del taco presentará un valor fijo de 5 mm.
- Dos taladros de diámetro $\varnothing = 9$ mm separados entre sí 60 mm, con el objetivo de realizar la unión entre ambos componentes.

El taco, que se fabricará en taller a medida, estará construido en acero S275. El taco empleará este tipo de material ya que solamente debe resistir las uniones que se realizarán a través de los tornillos.

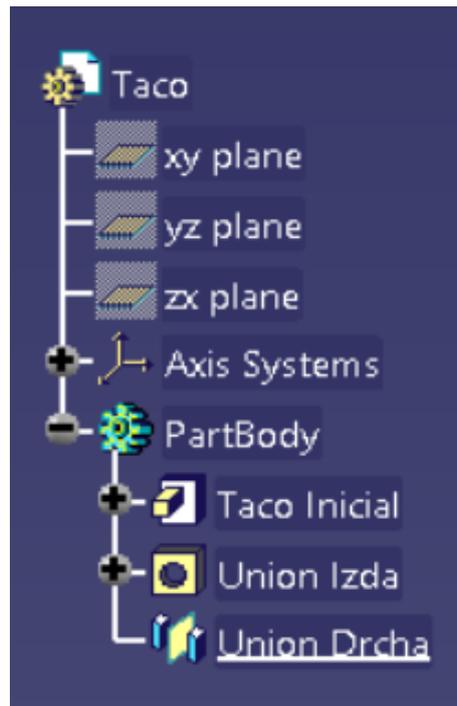


Figura 63. Árbol del fichero Taco

4.9 ESCUADRA FINAL DE CARRERA

La escuadra final de carrera, otro de los componentes importantes del modelo TMD, tiene por objetivo limitar el movimiento de los componentes móviles una cierta distancia. Esta distancia estará limitada por la carrera que marca el amortiguador, que en el modelo TMD que se comercializa, será de un valor de 70 mm. Componente de gran importancia ya que, si se limita el movimiento, se asegura que los componentes solamente trabajen en la zona elástica y evitar posibles plastificaciones.

Es uno de los elementos que más modificaciones ha sufrido durante el proyecto. Sin embargo, los componentes que conforman el elemento final de carrera siempre han sido los mismos:

- Una escuadra que limita el espacio de movimiento
- Gomas que amortiguan el choque de estos elementos.

4.9.1 EVOLUCIÓN DE FINAL DE CARRERA

Inicialmente, el modelo de la escuadra final de carrera (*Figura 64*) presentaba una sección en L, es decir, una escuadra simple. Además, presentaba dos taladros de los cuales uno estaba destinado a realizar la unión con la cuna y por el otro destinado a realizar la unión con las gomas. Sin embargo, esta solución no era válida por las evoluciones del resto de componentes del TMD, y específicamente por la evolución de la cuna (Apartado 4.5)

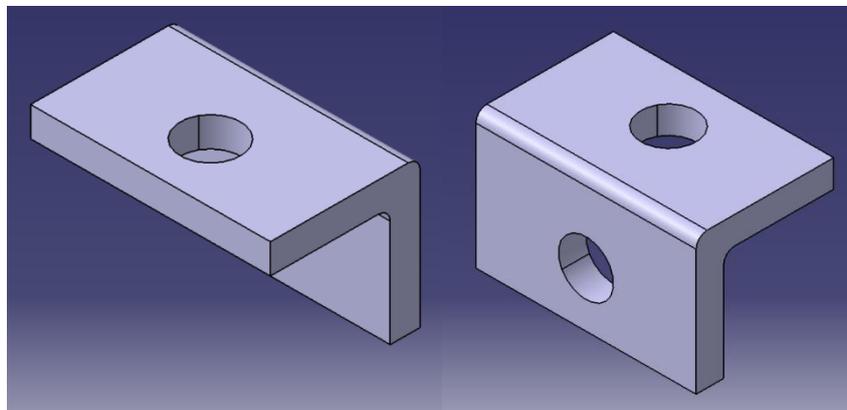


Figura 64. Escuadra Final de carrera - Modelo Inicial (Maqueta Digital)

Las modificaciones introducidas, siguiendo las modificaciones realizadas sobre la base fija para la inserción de los muelles, obligó a modificar el modelo inicial de la escuadra. La nueva versión de la escuadra (*Figura 65*) presenta una sección en C, la cual permitía tener toda la carrera de los elementos móviles dentro de la misma escuadra, es decir, la distancia entre las caras internas corresponde a la carrera del amortiguador. Esta nueva versión del componente está situada en la base fija situando la cuna entre las caras internas de la escuadra.

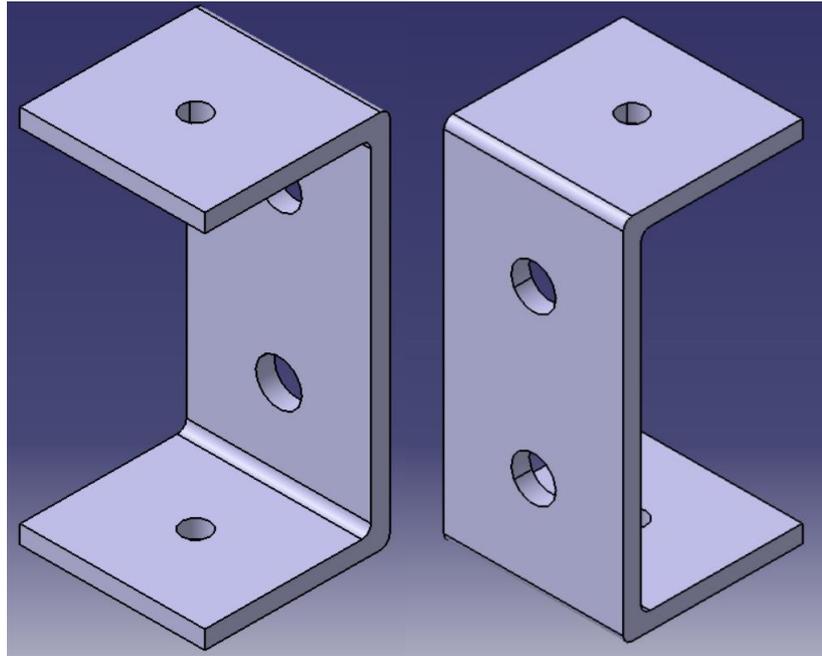


Figura 65. Primera modificación de la Escuadra final carrera (Maqueta Digital)

El final de carrera de la *Figura 65* no era la solución ideal, ya que no se cumplía con el objetivo de tener un modelo compacto debido a que sobresalía por la parte inferior del TMD. Así que, ante la imposibilidad de situar este componente dentro de la cuna, se tomó la decisión de sacarlo fuera. Ante la existencia de un espacio entre las ballestas superiores e inferiores, se observó que este podía ser aprovechado para el posicionamiento de las escuadras. La nueva versión de la escuadra final de carrera (*Figura 66*) cambió completamente su geometría. Ahora la escuadra presenta una sección en forma de T, la cual en el tramo de mayor longitud (tramo horizontal) será donde se sitúen los topes de goma y los tramos de menor longitud (tramos verticales) serán donde situaremos los taladros destinados a las uniones con la cuna.

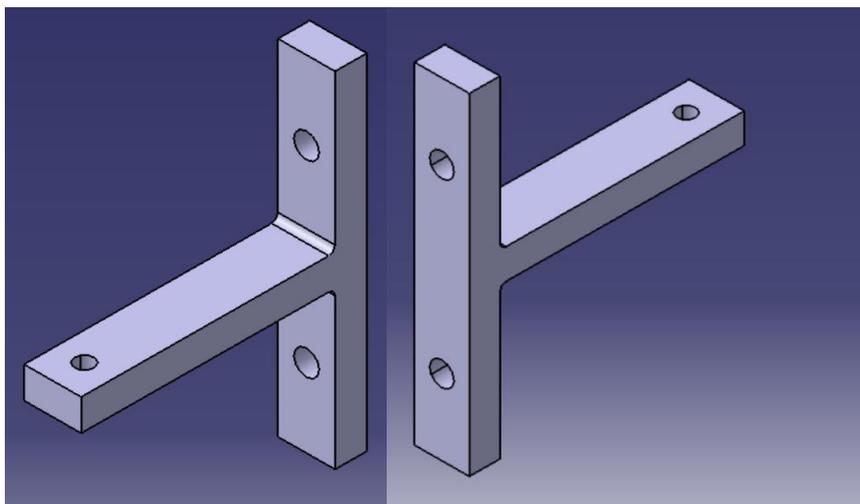


Figura 66. Segunda modificación de la Escuadra final carrera (Maqueta Digital)

Finalmente, se obtuvo el modelo final de la escuadra final de carrera (*Figura 67*) la cual presenta la misma geometría que el modelo anterior, aunque en este modelo fue eliminado una de las patas y fue aumentado el ancho del componente. La escuadra será emplazada en el exterior de la cuna, entre el espacio de las ballestas como en la versión anterior.

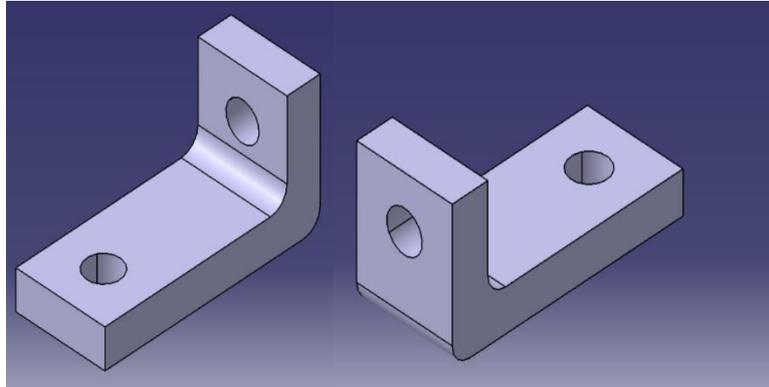


Figura 67. Escuadra Final Carrera - Modelo Final (Maqueta Digital)

4.9.2 PARÁMETROS Y DIMENSIONES

Los parámetros y las dimensiones a las cuales se harán referencia en este apartado están referidas al modelo final de la escuadra de final de carrera de la *Figura 67*. Topológicamente, el final de carrera presenta una sección en L con los taladros necesarios para realizar las diferentes uniones necesarias. Las dimensiones serán:

- Ancho de la escuadra del final de carrera será función del parámetro **Longitud_Ballesta** (*Figura 68*). Su ancho estará determinado por la diferencia entre el ancho de las bases de apoyo de la base fija y el espacio que existe entre la cuna y la base fija (*Formula 1*). El objetivo es poder aprovechar el máximo espacio disponible.
- Espesor de la escuadra presenta un valor fijo de 10 mm para dar una mayor rigidez a los choques de la escuadra con las ballestas.
- El tramo vertical como el tramo horizontal presentan valores fijos: Tramo vertical con una dimensión de 35 mm y el tramo horizontal con una dimensión de 65 mm. El objetivo es llegar a la zona central de las bases de apoyos.
- Los taladros de diámetro $\varnothing = 10$ mm están destinados a:
 - Taladro del tramo vertical está destinado a realizar la unión entre la escuadra de final de carrera y la cuna.
 - Taladro del tramo horizontal está destinado a realizar la unión entre la escuadra de final de carrera y las gomas.

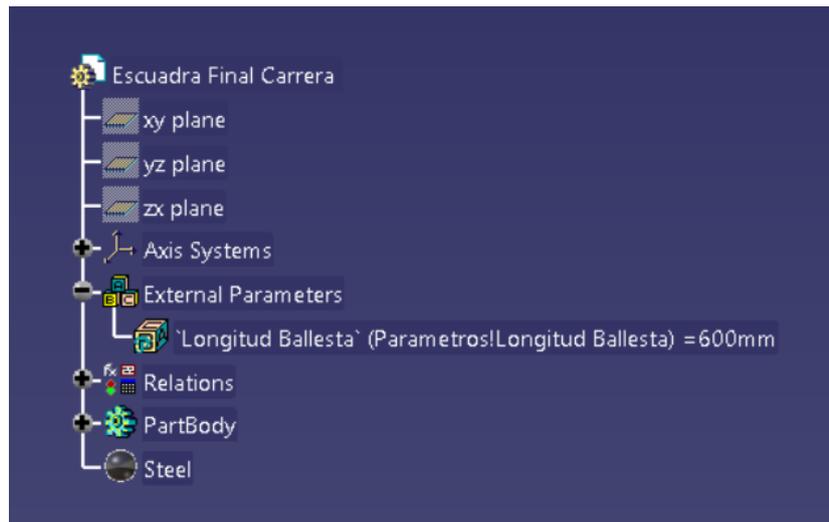


Figura 68. Árbol del fichero Escuadra Final Carrera

El posicionamiento de la escuadra estará condicionado por la carrera que se necesita en el TMD. Como se desea tener una carrera de 70 mm, habrá que situarlo en mitad del espacio entre las ballestas, para así poder tener una carrera de 35 mm a cada lado de la escuadra.

La escuadra final de carrera, componente que se fabricará en taller, estará construido en acero S275. Se emplea este material ya que solamente debe resistir los golpes que se producirán durante el movimiento del TMD, así que dicho material será suficiente para la exigencia de dicho componente.

4.10 ESCUADRA UNIÓN DEL AMORTIGUADOR

La escuadra de unión del amortiguador permite unir el amortiguador con la base fija y la cuna. Permite, por un lado, que el cuerpo central del amortiguador quede fijado a la base fija y, por otro lado, permite que la varilla móvil se pueda desplazar durante el movimiento del TMD por acción de la cuna.

Geoméricamente, la escuadra presenta una sección en L (*Figura 69*), en la cual se tiene los taladros destinados a realizar las uniones necesarias. Se tuvo en cuenta que la geometría y las dimensiones fuesen las adecuadas, para que durante el movimiento del TMD resistiese los esfuerzos.

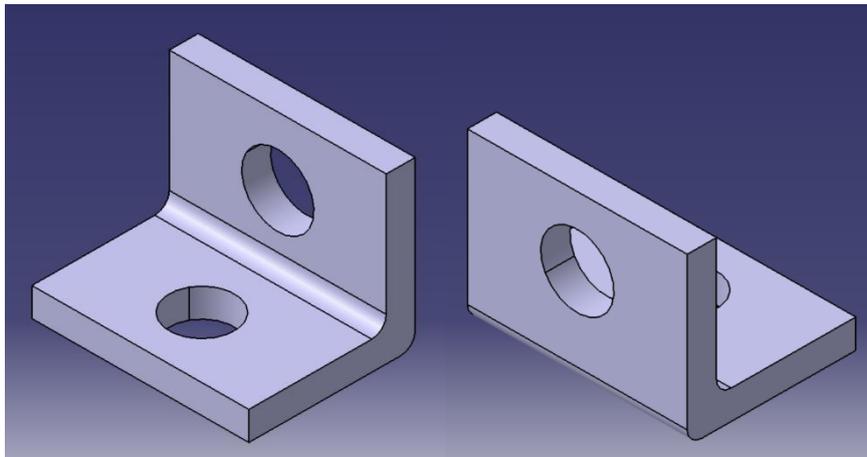


Figura 69. Escuadra Unión Amortiguador - Modelo Final (Maqueta Digital)

Las dimensiones del modelo presentan valores fijos ya que no se apoyan en ningún de los parámetros que guían el TMD (*Figura 70*). La escuadra, que presenta un eje de simetría, presenta las siguientes dimensiones:

- Espesor de la escuadra de unión del amortiguador presenta un valor fijo de 4 mm.
- Ambos tramos de la escuadra presentan el mismo valor de 19 mm (simétrico).
- Ancho de la escuadra de unión del amortiguador presenta un valor fijo de 30 mm.
- Los taladros de ambos tramos de la escuadra están destinados a:
 - Taladro de diámetro $\varnothing = 9$ mm destinado a la unión entre el amortiguador y la escuadra.
 - Taladro de diámetro $\varnothing = 10$ mm destinado a la unión entre la escuadra, la base fija y la cuna.

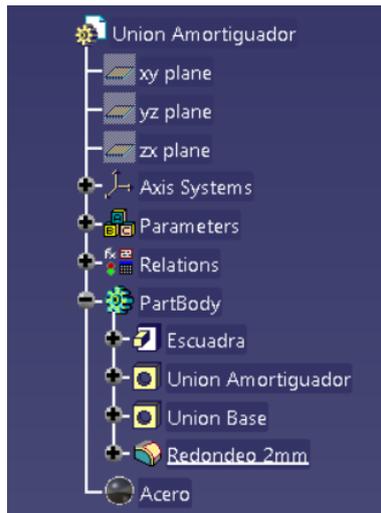


Figura 70. Árbol del fichero Escuadra Unión Amortiguador

La escuadra de unión del amortiguador, componente que se fabricará en taller, estará construido en acero S275. Se emplea este material ya que solamente debe resistir los esfuerzos que ejerce el amortiguador sobre ella, así que dicho material será suficiente para la exigencia de dicho componente.

4.11 TOPE DE GOMA

El tope de goma, componente que trabaja juntamente con la escuadra final de carrera (Apartado 4.9), tiene por objetivo amortiguar el choque del elemento final de carrera con aquellos elementos que delimiten su movimiento, es decir, las ballestas. El componente, que debe presentar un área adecuada, no debe deformar ninguna de las piezas durante el movimiento del TMD, sino que debe amortiguar el choque suavemente

El modelo del tope de goma presenta una geometría cilíndrica, a la cual se la añade los elementos necesarios para realizar las uniones necesarias. El producto TMD está constituido por:

- Un tope de goma macho (*Figura 72*) que presenta un vástago roscado para poder unirlo a la escuadra de final de carrera y el otro tope de goma.
- Un tope de goma hembra (*Figura 71*) que presenta un taladro roscado del mismo diámetro que el vástago.

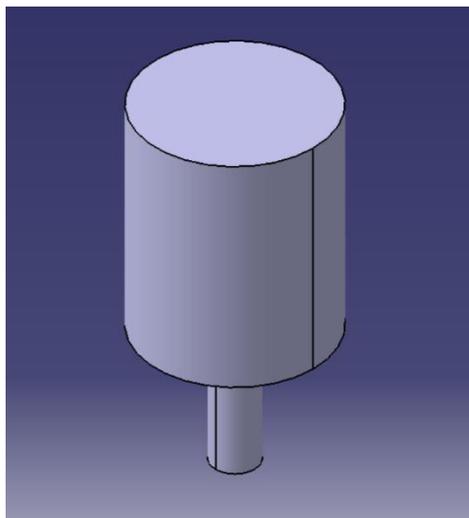


Figura 71. Tope de Goma Macho - Modelo Final
(Maqueta Digital)

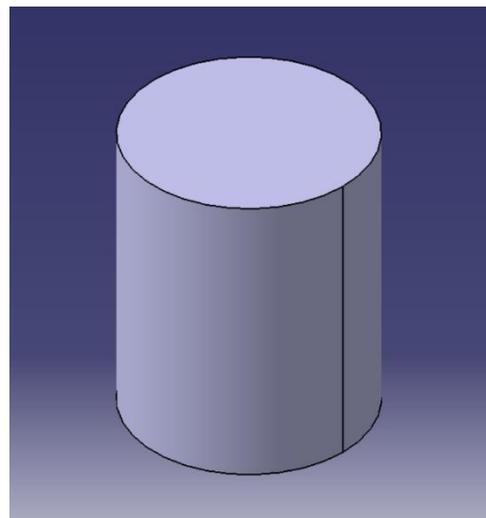


Figura 72. Tope de Goma Hembra - Modelo Final
(Maqueta Digital)

Como el tope de goma será uno de esos componentes que no están construido en taller, entonces sus dimensiones serán los estándares, es decir, que serán las que indica el proveedor. Además, hoy en día, se presenta una amplia del producto, pudiendo elegir entre diferentes proveedores y diferentes dimensiones.

Aunque las dimensiones son función del proveedor, se decidió que la geometría de los topes de goma estuviesen apoyado en uno de los parámetros del modelo TMD. El objetivo, era poder determinar la altura de los topes en función de dicho parámetro (*Figura 73*) y así poder buscar el proveedor que mejor se adaptase a las exigencias del modelo. Así pues, las dimensiones para cada uno de los topes es:

- Las gomas cilíndricas presentan un diámetro $\varnothing = 40$ mm y su altura es función del parámetro **Espesor_Ballesta**. El objetivo de emplear dicho parámetro es poder calcular la altura de la goma y así buscar en los diferentes proveedores.
- El tope de goma macho presenta un vástago de diámetro $\varnothing = 10$ mm y longitud 30 mm para así poder atravesar la escuadra de final y roscar con el tope de goma hembra.
- El tope de goma hembra presenta un taladro de diámetro $\varnothing = 10$ mm y profundidad 20 mm con el objetivo de alojar el vástago del tope de goma macho.

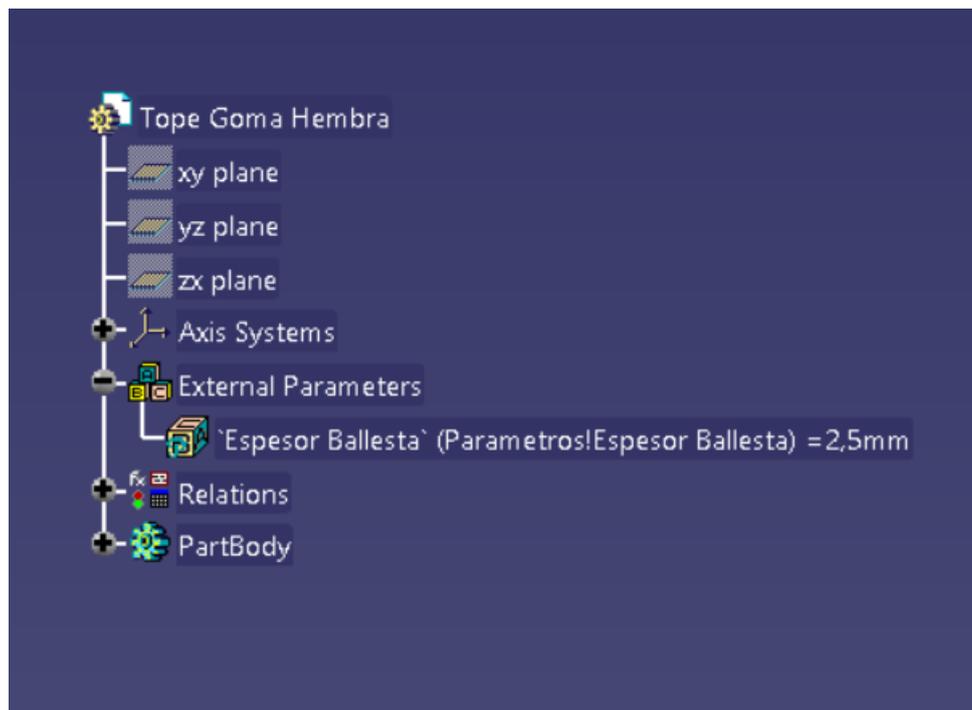


Figura 73. Árbol del fichero Tope de Goma

Los modelos del tope de goma tanto hembra como macho, no se les ha aplicado ningún material ya que no se fabricarán en taller, sino que se pedirán al proveedor correspondiente. Tampoco interesa simular su comportamiento ya que los proveedores garantizan un correcto funcionamiento de dichos componentes.

4.12 VARILLA ROSCADA

La varilla roscada, cuya finalidad es unir las masas con la cuna, tiene por objetivo evitar o reducir todo lo posible el desplazamiento de las masas durante el movimiento del TMD. De esta manera, se evitan posibles daños que se puedan ocasionar al resto de los componentes o incluso evitar desequilibrios del conjunto del TMD.

La varilla roscada presenta una geometría cilíndrica en la cual todo su cuerpo está roscado para facilitar la unión con las masas. Así pues, el modelo digital de la varilla será simplemente un cilindro donde se le realiza el proceso de roscado (*Figura 74*).



Figura 74. Varilla Roscada - Modelo Final (Maqueta Digital)

Las dimensiones del modelo de la varilla presentan valores constantes, además no se apoyan en ninguno de los parámetros que guían el producto TMD (*Figura 75*). Así pues, las dimensiones de estas varillas serán:

- Cuatro varillas de diámetro $\varnothing = 10$ mm para que se puedan roscar en los taladros de las masas y la cuna.
- Una altura de 245 mm correspondiente a la altura global del resto de componentes, valor de 240 mm, más el espesor de la base de la cuna, valor de 5 mm. De esta manera se asegura que dicho componente no sobre salga del TMD.

Las varillas roscadas pueden o bien fabricarse en taller o bien pedir las a un proveedor. El modelo de la *Figura 74* fue concebido aplicándolo el material acero S275. El empleo de este tipo de material fue debido a que, aunque, solamente tiene el objetivo de realizar las uniones entre las masas y la cuna, este componente debe resistir los movimientos de las masas a la frecuencia que trabajará el TMD.

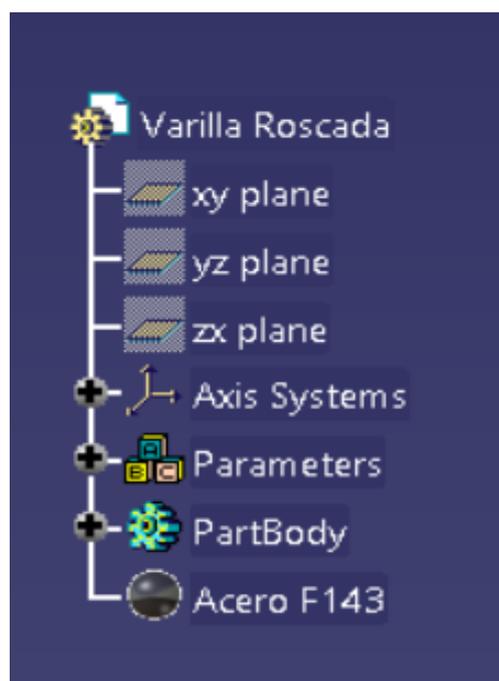


Figura 75. Árbol del fichero Varilla Roscada

4.13 MUELLES

Los muelles, elemento que ha guiado la mayoría de las modificaciones realizadas sobre el resto de los componentes del TMD, fueron introducidos en esta nueva versión del producto con el objetivo de sostener las partes móviles. Gracias a la utilización de esta nueva “tecnología”, se ha conseguido descargar las ballestas y así garantizar que no plastifiquen durante el movimiento del TMD. Los muelles, ahora son los encargados de soportar todo el peso de las partes móviles, sufriendo así una deflexión estática.

La maqueta digital de los muelles solamente se empleó para determinar el espacio que ocupaban en el modelo y poder así determinar el número de muelles máximo que se podrían emplear, en función de los parámetros del TMD. Aunque el software CATIA permite una representación exhaustiva de los muelles, se optó a realizar una representación simplificada de estos.

El modelo simplificado de los muelles (*Figura 76*) presenta una geometría cilíndrica a la cual se le añade a los extremos dos sobresalientes correspondientes a los enganches del muelle. La representación sobre el modelo corresponde a los muelles en deflexión estática.



Figura 76. Muelles - Modelo Final (Maqueta Digital)

Las dimensiones (*Figura 77*) empleadas para la representación simplificada de los muelles son:

- Diámetro de $\varnothing = 40$ mm, correspondiente al diámetro de espira Φ .
- Longitud de 195 mm, correspondiente a la deflexión estática.
- Enganches de diámetro $\varnothing = 4$ mm y una altura máxima de 42,5 mm.

Estas dimensiones son las que se han empleado para realizar el maquetado del TMD y presentar un modelo al cliente. Sin embargo, el resto de las dimensiones que definen los muelles helicoidales, se calcularán empleando la hoja de cálculo que se expondrá en el Capítulo 5. La única dimensión que será fija, es el diámetro de espira ya que es la que nos define el espacio ocupado por estos.



Figura 77. Árbol del fichero Muelles

El modelo se debe ajustar a las exigencias del cliente, que se refleja a través de las variaciones de los parámetros que guían el TMD. Como se explicitó en anteriores apartados, el número de muelles (por consiguiente, el número de taladros destinado a las uniones con los muelles) variará en función del espacio disponible. El objetivo es aprovechar el máximo espacio disponible y de esta manera evitar poner muelles de grandes dimensiones, ya que, si existe la posibilidad de meter más muelles de menores dimensiones, se podrá presentar un modelo de TMD más compacto.

El número de muelles (*Figura 78*), el cual se explicita cuando se realiza el maquetado de los muelles con los soportes de los muelles, define el comportamiento de los muelles en función del parámetro **Ancho_Cuna** a través del número de taladros que se tenga en el soporte de los muelles. La geometría presenta 5 rangos de trabajo:

- Cuando el **número de taladros** del soporte sea **1**, entonces se activará **un solo muelle**.
- Cuando el **número de taladros** del soporte sea **2**, entonces se activarán **dos muelles**.
- Cuando el **número de taladros** del soporte sea **3**, entonces se activarán **tres muelles**.
- Cuando el **número de taladros** del soporte sea **4**, entonces se activarán **cuatro muelles**.
- Cuando el **número de taladros** del soporte sea **5**, entonces se activarán **cinco muelles**.

Si se desea saber cuál es el *Rule* del número de taladros de los soportes, se recomienda revisar el apartado 4.7.2. Se podrá comprobar que en función del parámetro **Ancho_Cuna**, el número de muelles ira aumentando si aumenta dicho parámetro.

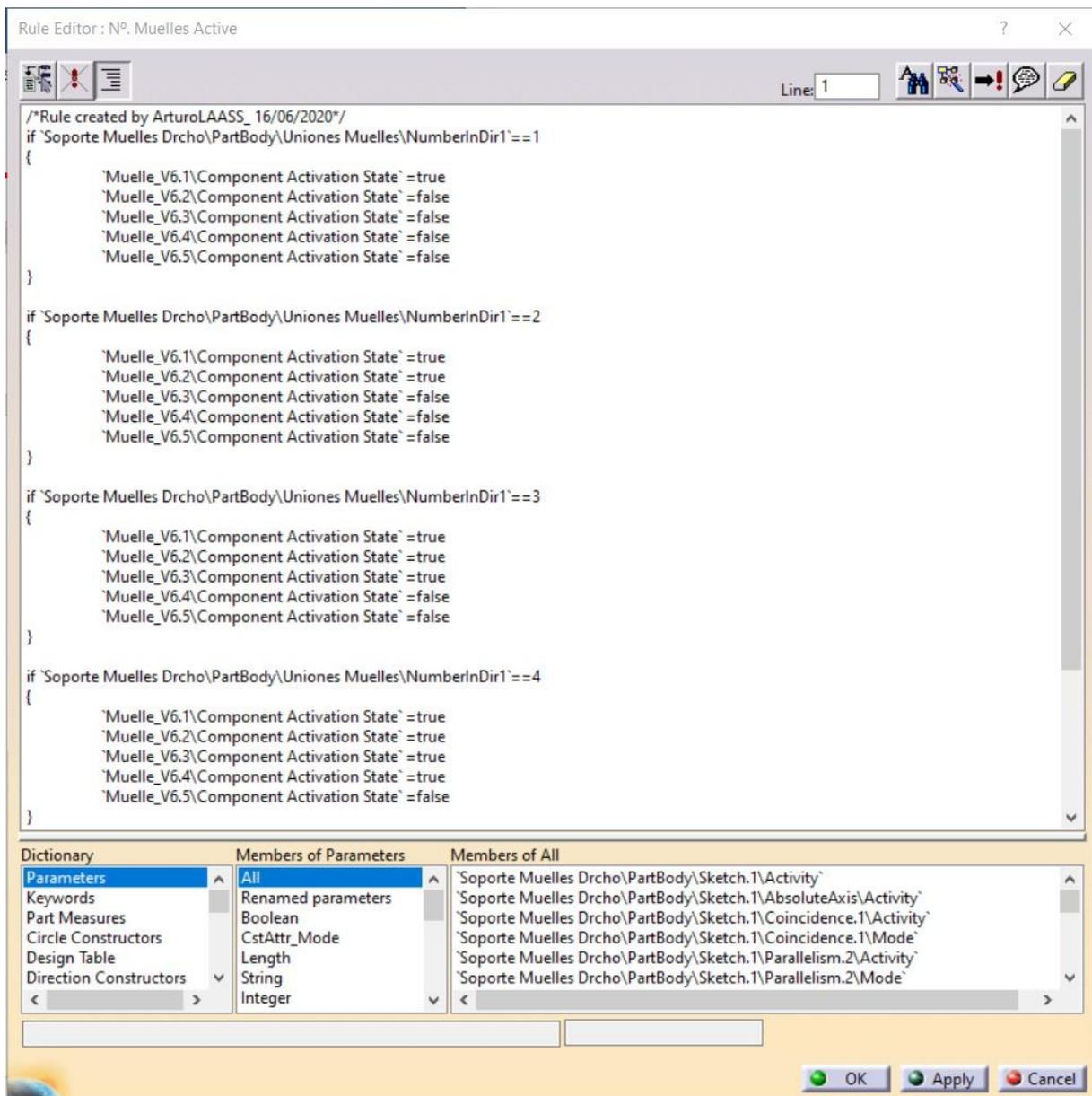


Figura 78. Rule del número de muelles (N.º Muelles Rules - Muelles)

Los muelles serán uno de esos componentes que no se fabriquen en taller, sino que se pedirán a diferentes proveedores en función de las dimensiones necesarias. De esta manera, se podrá externalizar su fabricación y solamente dedicarse a los otros componentes. Además, existen diversas fábricas dedicadas a la fabricación de muelles a bajo precio.

4.14 AMORTIGUADOR

El amortiguador, uno de los componentes que define la tecnología TMD, es otro de los elementos que ha guiado algunas de las modificaciones de los componentes del TMD. El objetivo de emplear este tipo de tecnología es poder amortiguar las vibraciones que se quieren eliminar de la estructura objetivo. El tipo de amortiguador con el que se trabaja es un amortiguador de dirección ajustable, es decir, podemos elegir con qué intensidad realiza la amortiguación.

Este tipo de amortiguador consta de un pistón, el cual trabaja dentro de un cilindro en el que hay aceite (*Figura 79*). El pistón estará compuesto por una serie de orificios y de válvulas pre comprimidas las cuales permiten el paso de aceite de una parte a otra del pistón cuando la presión supera un valor dado [11].

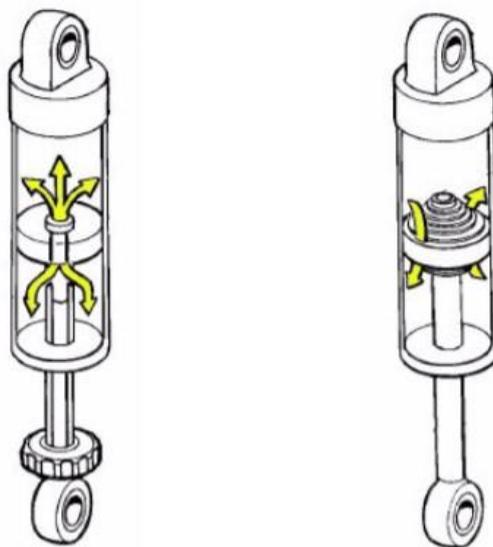


Figura 79. Esquemas del flujo del aceite dentro del pistón [11]

La maqueta digital del amortiguador solamente se empleó para poder determinar el volumen que ocupaba, influyendo en el número de muelles que se pueden introducir. Como pasaba con los muelles, aunque CATIA nos permitía realizar un modelo exhaustivo del amortiguador, se optó por realizar un modelo simplificado del amortiguador (*Figura 80*). El producto amortiguador está compuesto por las siguientes partes:

- Cuerpo central donde se encuentra la ruleta destinada a regular la dureza del amortiguador.
- Sujeción lateral que permite unir el amortiguador con la base fija y fijarlas a un componente fijo.
- Varilla central destinada a la transmisión de las vibraciones al cuerpo central, se realizará a través de la unión con la base de la cuna.

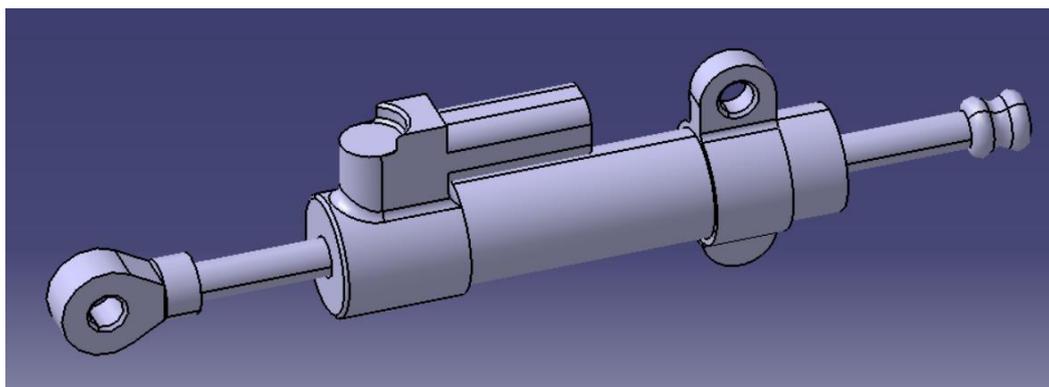


Figura 80. Amortiguador - Modelo Final (Maqueta Digital)

Las dimensiones empleadas para el maquetado simplificado del amortiguador, fueron las que el proveedor nos indicó. Es por lo que el modelo no se apoyará en ninguno de los parámetros que guían el TMD (Figura 81). Solamente fueron de interés las dimensiones externas del amortiguador, es decir, cuanto sobresalía por arriba, por abajo y por los laterales.

Importante en este componente es la dimensión de su carrera, ya que el resto de componente como por ejemplo la escuadra de final de carrera o incluso la base fija, depende de ella. El modelo TMD presentará una carrera de 70 mm ya que es la carrera más comercial y fue difícil encontrar otra de mayor carrera.

Como el amortiguador es uno de esos componentes que no se fabrica en taller, sino que lo sirve un proveedor, entonces no será necesario aplicar ningún material al modelo de la Figura 80. Se considera que el correcto funcionamiento del amortiguador estará asegurado por el proveedor, así que no se será necesario simular su comportamiento.

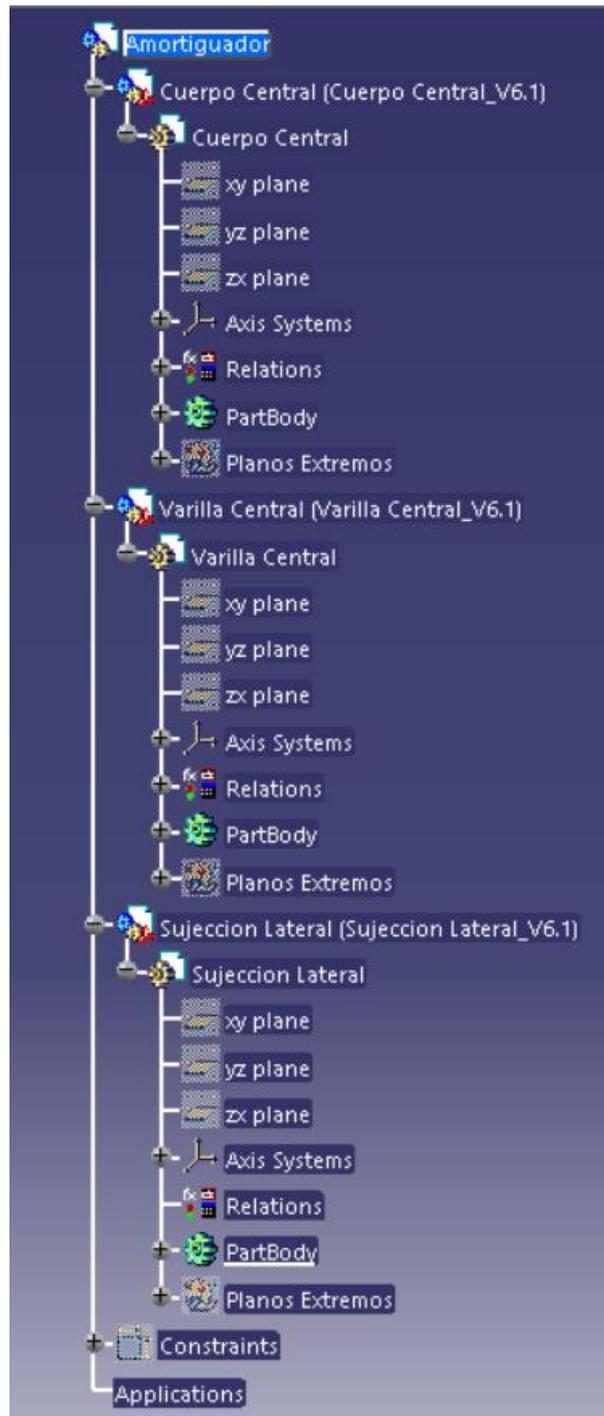


Figura 81. Árbol del fichero Amortiguador

4.15 MODELO FINAL DEL TMD

Una vez construido todos los componentes del producto TMD, se pasó al ensamblaje de estos componentes para así poder establecer el modelo final del TMD. Solamente se empleará aquellos modelos finales de los componentes que se han ido explicado a largo de este capítulo. No se han detallado los tornillos, tuercas, arandelas, etc. ya que son elementos estandarizados y CATIA V5 presenta una librería de elementos.

Primero se pasó a la unión de los muelles con las bases de apoyo para así poder construir lo que se denomina: **Elemento de sujeción** (Figura 82). Como se explicó anteriormente, el producto TMD estará compuesto por un elemento de sujeción derecho e izquierdo. Este elemento está compuesto por:

- Número variable de muelles (Apartado 4.13), teniendo un máximo de 10 muelles.
- Un soporte de muelles por cada lado (Apartado 4.7), teniendo un total de 2 soportes.

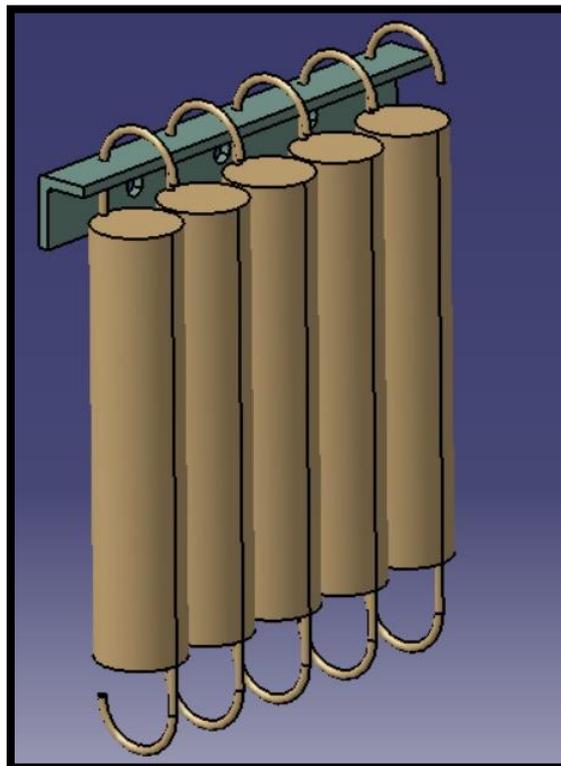


Figura 82. Elemento de sujeción de muelles (Maqueta Digital)

Luego, se pasó a la unión de los topes de goma con la escuadra de final de carrera para construir lo que se denomina: **Elemento Final Carrera** (Figura 83). El modelo final del TMD presenta un elemento de final de carrera a cada lado de la cuna, así se dará mayor rigidez a los golpes que debe soportar. Este elemento está compuesto por:

- Un tope de goma macho y hembra (Apartado 4.11).
- Una escuadra de final de carrera (Apartado 4.9).

- Dos arandelas situadas entre los topes de goma y la escuadra. Componente que será servido por un proveedor externo.

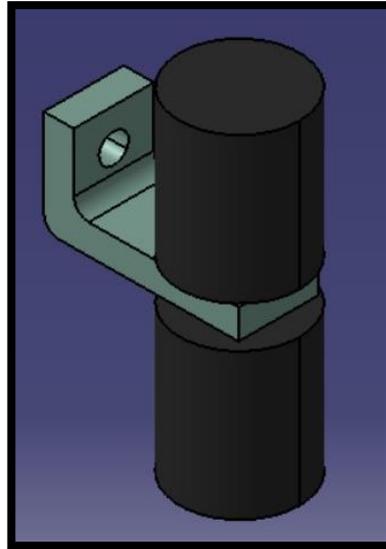


Figura 83. Elemento Final de Carrera

Se pasó a la unión de las ballestas con los tacos necesarios para así construir lo que se denomina: **Elemento Ballesta** (Figura 84). El modelo final presentará cuatro elementos de ballesta, uno por cada base de apoyo que se presenta en las diferentes bases. Aunque también existe la posibilidad de meter dos elementos de ballesta por base de apoyo, teniendo un total de ocho elementos de ballesta. Este elemento está compuesto por:

- Una ballesta (Apartado 4.2).
- Dos tacos (Apartado 4.8).

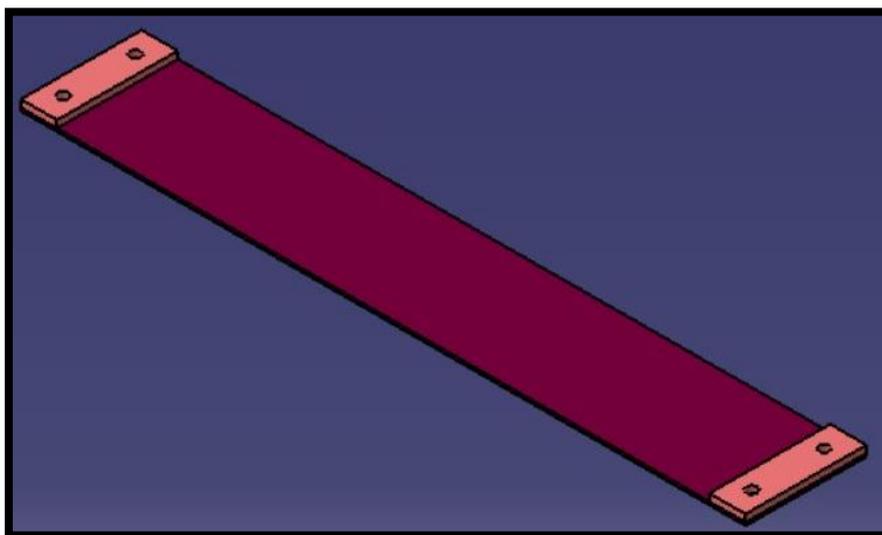


Figura 84. Elemento de ballesta

Finalmente, se pasó a la unión del amortiguador con las escuadras de unión del amortiguador para así poder construir lo que se denomina: **Elemento de amortiguación** (*Figura 85*). El modelo presentará solamente un elemento de amortiguación situado entre los elementos de sujeción izquierdo y derecho, es decir, en el parte central de la cuna y la base fija. El elemento está compuesto por:

- Un amortiguador (Apartado 4.14).
- Dos escuadras de unión del amortiguador (Apartado 4.10).

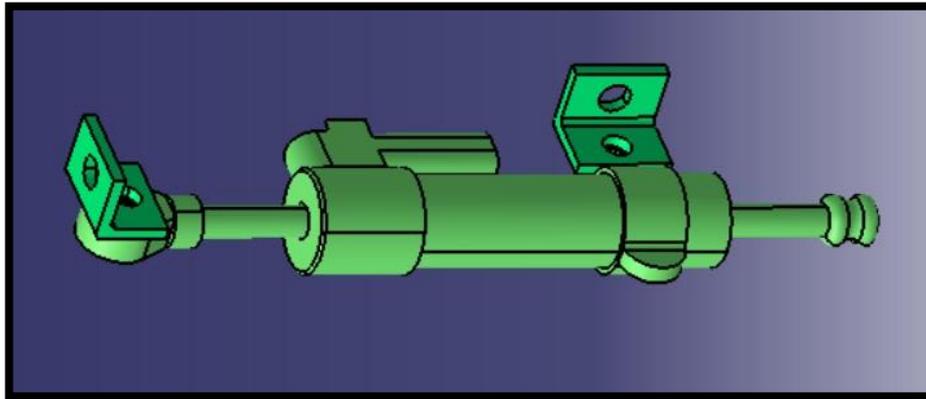


Figura 85. Elemento de amortiguación

Una vez se estableció los elementos que se acaban de describir, se pasó a la construcción de las “partes”. Estas “partes” están compuestas por diversos elementos como por los componentes restantes, así permiten gestionar más fácilmente el producto final del TMD y realizar los cambios necesarios sobre el modelo rápidamente. El producto final presentará solamente tres partes principales tal y como se estableció en la *Tabla 1*.

Primero se comenzó con la construcción de la **Parte Fija** (*Figura 86*), la cual estará constituida por aquellos elementos que no se moverán de su posición durante el movimiento del TMD. Esta parte está constituida por:

- Base fija (Apartado 4.3).
- Elemento de sujeción de muelles derecho.
- Elemento de sujeción de muelles izquierdo.

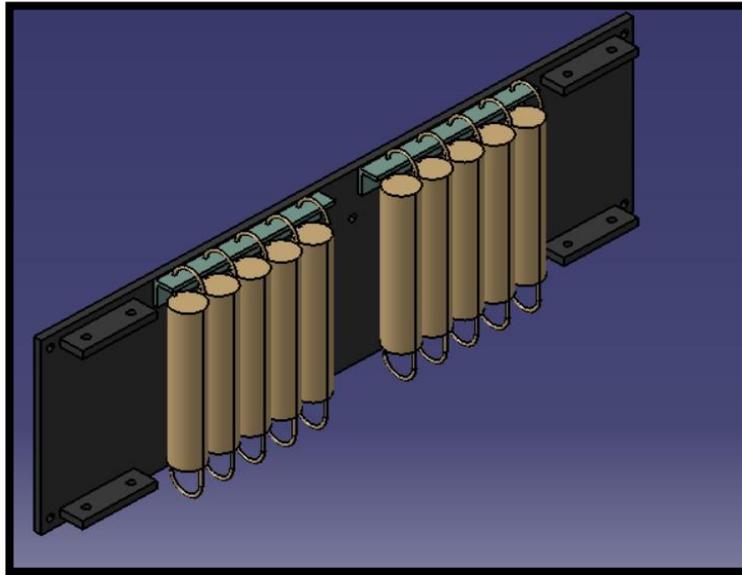


Figura 86. Parte fija

Luego, se pasó a la construcción de la **Parte Cuna** (Figura 87) la cual está compuesta por todos aquellos componentes que estarán situados en el interior de la cuna. La parte cuna está compuesto por:

- Cuna (Apartado 4.5).
- Cuatro varillas roscadas (Apartado 4.12), uniendo las masas y la cuna.
- Seis masas (Apartado 4.6), aunque no es obligatorio llenar la cuna con las seis masas.
- Dos elementos de final de carrera, situado a cada lado de la cuna.

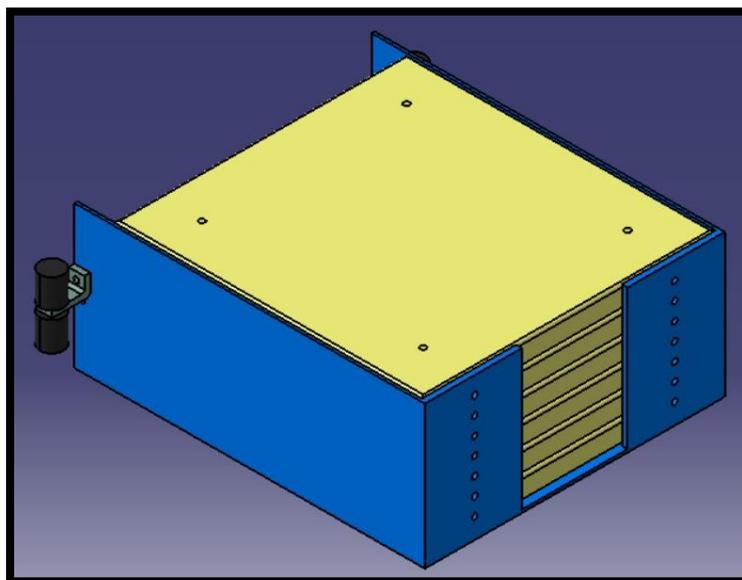


Figura 87. Parte Cuna

Finalmente, se construyó la **Parte Móvil** (*Figura 88*) la cual está compuesta por todos aquellos componentes que se desplazan durante el movimiento del TMD. Esta parte está compuesta por:

- Cuatro elementos ballestas, situados en las bases de apoyo de la base móvil.
- Base móvil (Apartado 4.4).

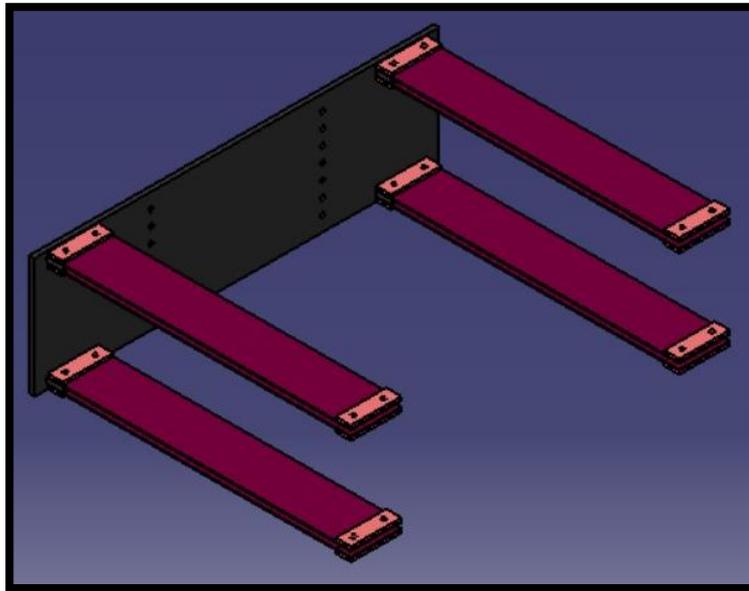


Figura 88. Parte Móvil

Uniendo todas estas partes se obtuvo el modelo final del TMD (*Figura 89*), el cual varía en función de los valores de los parámetros que se describieron al inicio del capítulo. Este modelo sirve de maqueta digital de muestra para el cliente.

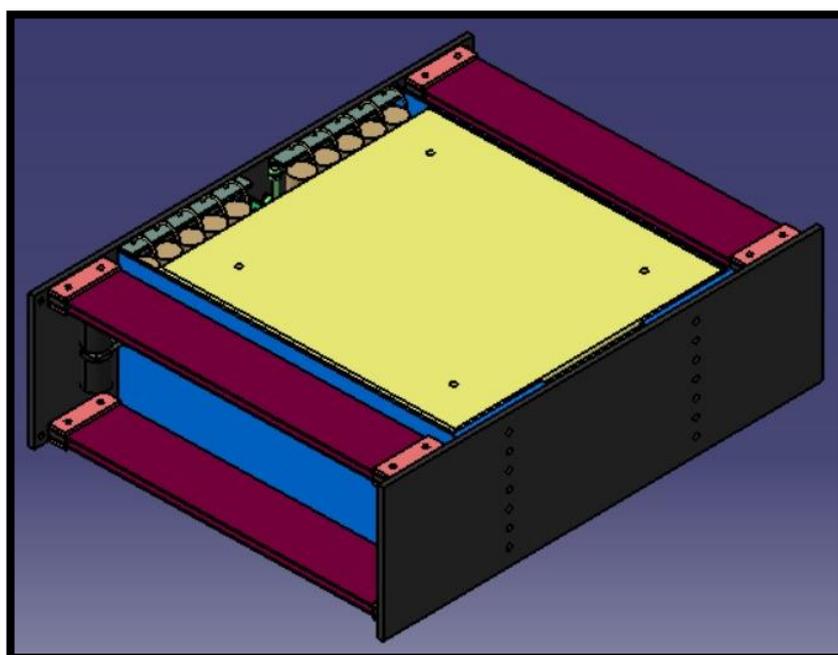


Figura 89. Modelo final del TMD

5 CÁLCULO NUMÉRICO - PARÁMETROS

El modelo, descrito en el capítulo 4, necesita apoyarse en los cálculos necesarios para así poder determinar cuáles son los valores que se deben introducir en los parámetros que definen el TMD. Los cálculos necesarios fueron introducidos en una hoja de cálculo donde según los parámetros de entrada, proporcionados por el cliente, se sacarán los valores necesarios para obtener el modelo final del TMD buscado.

Los cálculos se realizaron sobre un fichero EXCEL (*Figura 90*) donde se podrán encontrar tres fases de cálculo, descritas a continuación, la cual servirá para calcular los diversos parámetros del producto.



Figura 90. Logotipo software EXCEL

El objetivo de tener una parte numérica dentro del proyecto es poder ofrecer al cliente una solución adaptada a sus necesidades, a través de, solamente, dos parámetros de entrada. De esta manera se podrá cumplir el requisito de industrialización del TMD donde poder ensamblar el EXCEL (Parte numérica) y el CATIA (Parte digital).

El fichero EXCEL, debido a la complejidad de los cálculos y a las diversas decisiones que se deben ir tomando entre fases, está destinado a una persona experta o que tenga conocimientos sobre los TMD como por ejemplo un ingeniero calculista. Igualmente, se ha añadido una hoja de introducción donde se encuentran descritos:

- Los pasos para realizar los cálculos necesarios con el objetivo de determinar los parámetros de salida hacia el modelo CATIA.
- Introducción de los parámetros de entrada: **Masa Objetivo** y **Frecuencia Objetivo** (*Tabla 2*) para iniciar los cálculos.

DATOS DE ENTRADA			
FRECUENCIA OBJETIVO		MASA OBJETIVO	
1,5	Hz	400	Kg

Tabla 2. Datos de entrada (Hoja EXCEL)

Los datos de entrada, introducidos en la *Tabla 2*, pueden ser obtenidos a través del cliente, suponiendo que los datos entregados por el cliente son adecuados, o bien ser nosotros mismos quienes se desplacen a la estructura objetivo y determinar estos datos de entrada.

Como se ha indicado anteriormente, el libro EXCEL presenta tres hojas de cálculo diferente que serán descritas a continuación. Sin embargo, la primera fase de cálculo será suficiente para poder establecer los valores necesarios de los parámetros de salida que serán empleados en el modelo de CATIA (Capítulo 4).

5.1 FASE 1 – RIGIDEZ DE LOS MUELLES

Esta primera fase de cálculo tiene por objetivo calcular la rigidez del muelle: K_m , la cual también permitirá poder calcular los parámetros de entrada al modelo digital del TMD (CATIA). Como se estableció anteriormente, los cálculos empezarán con los datos de entrada de la *Tabla 2*.

Lo primero que se describió fue el material empleado en la construcción de la mayoría de los componentes del TMD, sobre todo las partes móviles, es decir, el acero S275 y F143 (*Tabla 3*). Estos datos son fijos ya que dependen del material elegido para dichos componentes, si en futuras versiones del TMD se desea cambiar a un material diferente, solamente sería necesario cambiar dichos datos y el resto de los valores se actualizarían de inmediato.

	MATERIAL ACERO	
Modulo Elasticidad E	2,1E+11	Pa
Constante de Rigidez Tangencial G	8,08E+10	Pa
Tensión Límite σ	275 / 1430	MPa
Tensión Cortante τ	826	MPa
Densidad Acero ρ	7800	Kg/m ³

Tabla 3. Datos del Acero (S275 y/o F143)

La rigidez del TMD también tiene en cuenta las rigideces de las ballestas, así que se introducirán los valores que definen dicho componente (*Tabla 4*). El modelo puede presentar cuatro ballestas (una por cada base de apoyo) o bien ocho ballestas (dos por cada base de apoyo). Entonces, la *Tabla 4* permite elegir, a través de una lista despegable, el número de ballesta n . Luego, se tiene que el resto de los valores son los que se han establecido en el modelo CATIA y que son los que definen este componente (Apartado 4.2).

	BALLESTAS					
Numero Ballestas n	4					Uds.
Ancho - b	0,1					m
Espesor - t	0,001	0,0015	0,002	0,0025	0,003	m
Carrera	0,035					m

Tabla 4. Datos Ballestas

Una vez conocidas las dimensiones de la ballesta, se pasa a la geometría de la cuna, la cual se apoya en la mayoría de los parámetros del TMD. Se tiene que la altura de la cuna es fija ya que como se estableció, el espacio calculado era el necesario para poner las ballestas y los finales de carrera para tener una carrera de 70 mm en total.

A continuación, se presentan los cálculos necesarios para la obtención de los parámetros de entrada al modelo digital del TMD: **Longitud_Ballesta (L)** y **Ancho_Cuna (b)**. Primero se barren todos los valores posibles de uno de los parámetros y se calculan los otros en función de este (*Tabla 5*).

Como se observa en la *Tabla 5*, se barren todos los valores de la longitud de ballesta para así poder calcular un valor inicial del ancho de cuna empleando el valor del dato de entrada: **Masa Objetivo**. Sin embargo, la masa objetivo tiene en cuenta toda la masa que está suspendida en el modelo TMD. Así que será necesario recalcular el valor del ancho de cuna teniendo en cuenta solamente la masa de la cuna vacía.

$$Ancho_{CUNA INICIAL} = \frac{Masa_{OBJETIVO}}{Alto_{CUNA} * L * \rho_{S275}} \quad [3]$$

Ecuación 3. Ancho de cuna inicial b'

La segunda parte está destinada a determinar el peso de la base móvil en función de los valores de la longitud de ballesta. En primer lugar, se calcula el espacio que se deja entre la cuna y la base fija empleando la *Ecuación 1*. Después se determina el peso de cada uno de los componentes móviles (Base Móvil y Cuna) a través de su geometría. El objetivo es poder determinar el peso que se debe introducir en la cuna y así los parámetros necesarios para conseguirlo.

$$Peso_{CUNA} = Volumen_{GEOMETRIA} * \rho_{S275} \quad [4]$$

Ecuación 4. Peso Cuna

$$Peso_{BASE MOVIL} = Volumen_{GEOMETRIA} * \rho_{S275} \quad [5]$$

Ecuación 5. Peso Base Móvil

Finalmente, conocido los pesos de estas partes móviles, se calculará otra vez el parámetro ancho de cuna empleando la masa adecuada y los mismos valores que de la *Ecuación 3*.

$$Ancho_{CUNA CALCULADO} = \frac{Masa_{OBJETIVO} - Peso_{CUNA} - Peso_{BASE MOVIL}}{Alto_{CUNA} * L * \rho_{S275}} \quad [6]$$

Ecuación 6. Ancho de cuna calculada b''

El valor que se obtiene al aplicar la ecuación anterior debe ser adaptada a los valores de la lista de parámetros que establecimos en el Capítulo 4 – Apartado 1. Así que, en función del valor obtenido, los ajustamos dentro del rango de 0,18 mm a 0,5 mm que va de 0,2 en 0,2 mm. Lo que se desvía del valor exacto, se solucionará con un ajuste fino en el montaje.

GEOMETRÍA CUNA - Cubicaje a.b.c												
Alto - a	0,24											m
Longitud Ballesta - L	0,4	0,42	0,44	0,46	0,48	0,5	0,52	0,54	0,56	0,58	0,6	m
Ancho Cuna Inicial- b'	0,534	0,509	0,486	0,465	0,445	0,427	0,411	0,396	0,382	0,368	0,356	m
Espacio Cuna-Base	0,00617	0,00587	0,00560	0,00536	0,00513	0,00492	0,00473	0,00456	0,00439	0,00424	0,00410	m
Masa Móvil Vacía	35,58	35,02	34,54	34,14	33,80	33,52	33,29	33,10	32,95	32,84	32,77	Kg
Base Móvil	16,58	16,11	15,67	15,28	14,92	14,58	14,28	13,99	13,73	13,48	13,25	Kg
Ancho Calculado - b	0,465	0,444	0,425	0,407	0,391	0,376	0,362	0,349	0,337	0,326	0,315	m
Ancho Cuna - b	0,46	0,44	0,42	0,4	0,4	0,38	0,36	0,34	0,34	0,32	0,32	m

Tabla 5. Geometría Cuna (Parámetros CATIA)

Ballesta 1 mm												
Rigidez Ballesta Kb	328,13	283,45	246,53	215,75	189,89	168,00	149,35	133,36	119,58	107,63	97,22	N/m
Comprobación Reg. Elástico	137,81	125,00	113,89	104,21	95,70	88,20	81,55	75,62	70,31	65,55	61,25	MPa
Constante Muelles Km	34218,08	34396,79	34544,48	34667,59	34771,03	34858,58	34933,17	34997,12	35052,26	35100,05	35141,69	N/m

Ballesta 1,5 mm												
Rigidez Ballesta Kb	1107,42	956,63	832,02	728,15	640,87	567,00	504,06	450,10	403,58	363,25	328,13	N/m
Comprobación Reg. Elástico	206,72	187,50	170,84	156,31	143,55	132,30	122,32	113,43	105,47	98,32	91,88	MPa
Constante Muelles Km	31100,89	31704,05	32202,49	32617,98	32967,10	33262,58	33514,33	33730,16	33916,26	34077,56	34218,08	N/m

Tabla 6. Cálculo Km (1 mm y 1,5 mm espesor Ballesta)

Finalmente, se realizarán las comprobaciones pertinentes y se determinarán los valores de la rigidez del muelle K_m (Tabla 6). Estas comprobaciones se realizaron barriendo todos los espesores posibles de las ballestas (t) que establecimos en la Tabla 4.

Las tablas muestran, en primer lugar, la rigidez de la ballesta: K_b en función de su geometría (Ecuación 7). Para calcular K_b es necesario determinar la inercia de la ballesta utilizando los datos de la Tabla 4.

$$K_B = \frac{12 * E * \frac{\text{Ancho}_{BALLESTA} * t^3}{12}}{L^3} \quad [7]$$

Ecuación 7. Rigidez ballesta K_b

Luego será necesario realizar la comprobación del régimen elástico de las ballestas para ver que no plastifican durante el movimiento del TMD (Ecuación 8). Se desea que solamente trabaje en el régimen elástico, así que su tensión máxima debe ser inferior a 1430 MPa que corresponde al acero con el que trabajamos (Acero F143).

$$\frac{3 * E * t * Carrera}{L^2 * 1000000} \leq 1430 \text{ MPa} \quad [8]$$

Ecuación 8. Comprobación de Régimen Elástico

Finalmente, se calcula la rigidez de los muelles K_m empleando los datos de entrada (Ecuación 9), además de aquellos datos necesarios para el funcionamiento del TMD. El valor obtenido de K_m es el que permitirá sostener la masa objetivo y hace que el TMD funcione correctamente.

$$K_M = (\text{Frecuencia}_{OBJETIVO} * 2\pi)^2 * \text{Masa}_{OBJETIVO} - K_b * n_{BALLESTA} \quad [9]$$

Ecuación 9. Rigidez de los muelles K_m

Existen diversos criterios de selección de los datos de salida de la hoja de cálculo. Sin embargo, nuestro criterio de selección de los parámetros de salida hacía el modelo CATIA, sigue el criterio de estabilidad y seguridad, es decir, se elegirán aquellos valores que presenten tensiones máximas de ballestas baja. Generalmente, estos valores se sitúan en la parte de la derecha de las tablas, es decir, para valores altos de longitud de ballestas y ancho de cuna.

También se ofrece un segundo criterio de selección de datos de salida, basado en tener un producto compacto. Pudiendo así ofrecer una solución que no ocupe demasiado espacio donde se acople. Los datos necesarios para cumplir este criterio están situados en la parte izquierda de las tablas. Sin embargo, se tendrá valores elevados de tensiones máximas que se traduce en menor rango de seguridad.

5.2 FASE 2 – PARÁMETROS DE MUELLES HELICOIDALES

La primera fase, por si sola, es válida para poder determinar los valores de los parámetros de entrada el modelo CATIA del TMD. Sin embargo, se quería ofrecer al cliente, y sobre todo al ingeniero calculista, una mayor definición de los muelles que son necesarios para cumplir los requisitos de amortiguación de la estructura objetivo.

Se parte de los datos del cubicaje de la cuna (marcados en color azul en la *Tabla 5*) y de los diferentes de valores de espesor de las ballestas como se hizo en la *Tabla 6*. Conocidos estos valores, también se conocerán los valores de Km que fueron calculado en la fase anterior (*Tabla 9*). Estos valores de Km deben ser superiores a 0 N/m para que sean validos (se estableció un criterio que indica en color verde si cumple el criterio y de color rojo en caso contrario).

Conocidos los valores del cubicaje de la cuna, podremos establecer el número de muelles máximos que se pueden introducir en el modelo TMD, tal y como se describió en su maqueta digital. El número máximo de muelles dependen del valor del ancho de cuna (*Tabla 7*) y siempre deben ir en pares de muelles.

Ancho Cuna (mm)	N.º Muelles (Uds.)
180	2
200	4
220	4
240	4
260	4
280	4
300	6
320	6
340	6
360	6
380	8
400	8
420	8
440	8
460	10
480	10
500	10

Tabla 7. Número de muelles en función del ancho de cuna

Conocido el número de muelles, se obtendrá la constante de rigidez unitaria, es decir, la K_M que debe presentar cada uno de los muelles que se introducen en el modelo del TMD. A partir de estos valores, se podrá comenzar a determinar los parámetros que caracterizan al muelle.

$$K_{M \text{ UNITARIO}} = \frac{K_M}{N^{\circ} \text{ MUELLES}} \quad [10]$$

Ecuación 10. Constante de rigidez de los muelles unitarios

Los muelles con los que se trabajarán son de tipo helicoidales (*Figura 91*), los cuales se definen a través de los siguientes parámetros que han sido obtenidos con la herramienta SOLVER del software EXCEL. El objetivo es que la rigidez de los muelles helicoidales calculado a través de la *Ecuación 11*, presente el mismo valor obtenido a través de la *Ecuación 10*. Los parámetros que se han variado son:

- Diámetro de hilo – d
- Diámetro de espira – Φ
- Numero de espiras activas – n

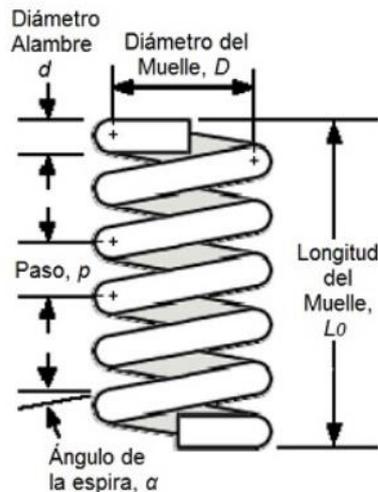


Figura 91. Parámetro de un muelle helicoidales

$$K_{M \text{ FORMULA}} = \frac{d^4 * G}{8 * \Phi^3 * n} \quad [11]$$

Ecuación 11. Rigidez de muelles helicoidales

Una vez aplicado la herramienta SOLVER, se obtendrán los valores de los parámetros d , Φ y n que definen el muelle a utilizar para obtener el K_M obtenido en la fase 1.

También será necesario determinar cuál será la elongación del muelle en estático δ (Ecuación 12) y la elongación máxima, que se alcanzará durante el movimiento del TMD: $\delta + Carrera$ (Ecuación 13). Conocer estos valores, permite buscar aquellos muelles que presenten valores de elongación máxima superior para así evitar que plastifiquen durante el movimiento.

$$\delta = \frac{Masa_{OBJETIVO} * 9,81}{K_{M UNITARIOS}} \quad [12]$$

Ecuación 12. Elongación estática de los muelles

$$\delta_{MAXIMA} = \delta + Carrera \quad [13]$$

Ecuación 13. Elongación máxima de los muelles

El objetivo es que los muelles siempre trabajen dentro del régimen elástico y no plastifiquen, como trabajan a esfuerzos cortantes τ (Fórmula 14), será entonces necesario realizar las comprobaciones pertinentes. Los muelles helicoidales que serán empleados en el modelo final del TMD, presentan las siguientes características (Tabla 8). Sin embargo, en todo momento se pueden cambiar dichos valores para que el resto de los parámetros se actualicen.

	MUELLE HELICOIDAL	
Constante de Rígidez Tangencial G	8,08E+10	Pa
Modulo Elasticidad E	2,1E+11	Pa
Tensión límite σ	1200	MPa
Comprobación $\sigma/\sqrt{3}$	692,82	MPa

Tabla 8. Propiedades Muelles helicoidales

$$\tau = \frac{Masa_{OBJETIVO} * 9,81}{n} * \left(\frac{8 * \Phi}{d^3} + \frac{4}{d^2} \right) \quad [14]$$

Ecuación 14. Tensión Cortante (Pa)

Se busca que el muelle siempre presente un esfuerzo cortante τ menor a la tensión cortante límite:

$$\tau \leq \sigma / \sqrt{3} \quad [15]$$

Ecuación 15. Comprobación esfuerzo cortante límite de los muelles helicoidales

Finalmente, como se observa en la *Tabla 9*, se muestran los valores de K_m en función de los diámetros comerciales de hilo (d) más fáciles de encontrar hoy en día. Esto facilita la búsqueda, por parte del equipo encargado de montar el TMD, de aquellos proveedores que puedan servir ese tipo de muelle. La diferencia que presenta la rigidez del muelle obtenida al principio de la *Tabla 9* respecto la calculada con la d comercial no es muy grande, así que será necesario realizar los pertinentes ajustes finos a través de las masas que pongamos en la cuna.

Generalmente, el producto TMD no sale sintonizado con exactitud del taller por diversos factores: desviaciones de la rigidez de los muelles, pesos de los componentes fabricados en taller diferentes, etc., lo que implica que sea necesario ajustarlo en campo, es decir, una vez se tenga el TMD montado en la estructura pertinente. Lo más crítico del producto es la frecuencia que depende de los muelles, de las ballestas y de la masa móvil. Dicha frecuencia depende de la estructura que debería ser medida con precisión lo cual no suele suceder. Al instalarse se debe comprobar si está bien o no sintonizada. Si no está bien ajustado y han sido instalado los muelles y ballestas, entonces solamente queda realizar el ajuste fino a través de las masas.

GEOMETRÍA CUNA - Cubicaje a.b.c													
Alto - a												0,24	m
Longitud Ballesta - L	0,4	0,42	0,44	0,46	0,48	0,5	0,52	0,54	0,56	0,58	0,6	m	
Ancho Cuna - b	0,46	0,44	0,42	0,4	0,4	0,38	0,36	0,34	0,34	0,32	0,32	m	

Ballesta 1 mm												
Cte. Muelles Global Km	34218,08	34396,79	34544,48	34667,59	34771,03	34858,58	34933,17	34997,12	35052,26	35100,05	35141,69	N/m
Nº Muelles - i	10	8	8	8	8	8	6	6	6	6	6	Uds
Constante Muelles Unitario Km	3421,81	4299,60	4318,06	4333,45	4346,38	4357,32	5822,20	5832,85	5842,04	5850,01	5856,95	N/m
Diámetro Hilo - d	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	m
Diámetro Espira - Φ	0,040	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	m
Diámetro Espira Medio	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	m
Nº Espiras - n	21	20	19	19	19	19	17	17	17	17	16	Uds
Km Objetivo	3421,81	4299,60	4318,06	4333,45	4346,38	4357,32	5822,20	5832,85	5842,04	5850,01	5856,95	N/m
Elongación δ	1,147	0,913	0,909	0,906	0,903	0,901	0,674	0,673	0,672	0,671	0,670	m
δ + Carrera	1,182	0,948	0,944	0,941	0,938	0,936	0,709	0,708	0,707	0,706	0,705	m
Tensión Cortante τ	641,46	590,14	643,07	641,39	639,98	638,80	626,06	625,22	624,49	623,87	692,47	MPa
Diámetro hilo Estándar - d	0,0045	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	m
Km Objetivo con d estándar	3080,40	4929,76	5189,22	5189,22	5189,22	5189,22	5799,72	5799,72	5799,72	5799,72	6162,20	N/m

Tabla 9. Propiedades muelles helicoidales modelo CATIA (Espesor ballesta 1 mm)

5.3 FASE 3 – ALMACÉN DE MUELLES

Finalmente se añadió una hoja extra al libro EXCEL, donde se introducirán todos los muelles que le empresa tiene en stock. El hecho de que se tenga muelles en stock es debido a:

- Las empresas que fabrican muelles a medida no sirven de forma inmediata.
- Los pedidos a dichas empresas exigen un pedido mínimo de muelles.

Por estas razones conviene tener muelles en stock con el objetivo de reducir el tiempo de construcción de los TMD. El objetivo, entonces, de esta nueva fase es poder calcular el número de muelles necesarios de cada tipo para poder alcanzar el Km objetivo (*Tabla 10*).

Km Objetivo y Elongación	
4346,38	Km (N/m)
0,903	δ (m)
0,938	$\delta + C$ (m)



Introduzca el valor de Km que se desea conseguir (valor obtenido de las fases anteriores o conocido de antes). La $\delta + C$ debe ser menor a los deltas de cada muelle

Tabla 10. Km objetivo y Elongación Necesaria

Los cálculos realizados en dicha fase, para nuestro proyecto del TMD, presentan 3 tipos diferentes de muelles (*Tabla 11*). Los datos necesarios sobre los muelles en stock son su constante de rigidez y su elongación máxima. Los muelles que son empleados en nuestros cálculos fueron determinados a través de ensayos en laboratorio (*Tabla 12*). Los parámetros que definen los muelles helicoidales, o bien se cogen los calculados en la fase dos o bien son los que el proveedor indica.

Muelles helicoidales		
n1 - Fino	2	Uds
K1	438	N/m
delta 1	0,400	m
n2 - Mediano	1	Uds
K2	955	N/m
delta 2	0,200	m
n3 - Gordo	1	Uds
K3	6633	N/m
delta 3	0,060	m
n total	4	Uds
Km muelles	8463	Uds

Tabla 11. Tipos de muelles en el almacén (Fino, Mediano y Gordo)

Valores ensayados laboratorio				
	fino	mediano	gordo	
m1	6,05	6,05	24,27	kg
del1	200	147	126	mm
m2	17,07	24,26	48,61	kg
del2	447	334	162	mm
incr_F	108,1062	178,6401	238,7754	N
incr_del	0,247	0,187	0,036	mm
K	437,6769	955,2947	6632,65	N/m

Tipos de muelles helicoidales				
Diámetro Espira - Φ	40	40	40	mm
Diámetro Hilo - d	3	3,5	5	mm
Diámetro Espira Media - Φ	37	36,5	35	mm
N.º Espiras - n	40	34,3	24	Uds

Tabla 12. Datos laboratorio muelles almacén

A través de la herramienta SOLVER, se buscan las posibles combinaciones de muelles, que se tengan en el almacén, cuya rigidez total sea igual o los más próximo al Km objetivo. Sin embargo, existe la problemática de que la solución actual no permite elegir el tipo de muelle en función de la elongación máxima (*Tabla 10*) ya que, si la elongación necesaria es superior a la elongación máxima del muelle, este no es válido. Se propondrá una futura vía de investigación del proyecto en el capítulo 7 para solucionar este problema.

Igualmente, la herramienta construida permitirá determinar el número de muelles siempre que sean inferior a 10 unidades, ya que dicho valor corresponde al número máximo de muelles que se pueden introducir en el modelo TMD.

6 PROTOTIPO TMD

Conocido el producto TMD al completo, tanto geoméricamente como numéricamente, se pasó a la construcción de un prototipo del producto con el objetivo de validar aquellas soluciones adoptadas y poder demostrar la industrialización del producto. El objetivo es poder asegurar el correcto funcionamiento del TMD que se quiere vender al cliente además de extraer información, gracias a los ensayos realizados, para futuras mejoras del producto.

La construcción de la maqueta física del TMD (*Figura 92*) fue realizada en el laboratorio de estructuras de la escuela de ingenierías industriales (Sede Paseo del Cauce) donde también se realizó los ensayos necesarios. El prototipo construido es una versión anterior al modelo final del TMD presentado en el capítulo 4. Gracias a este prototipo se pudo obtener el modelo final del TMD.

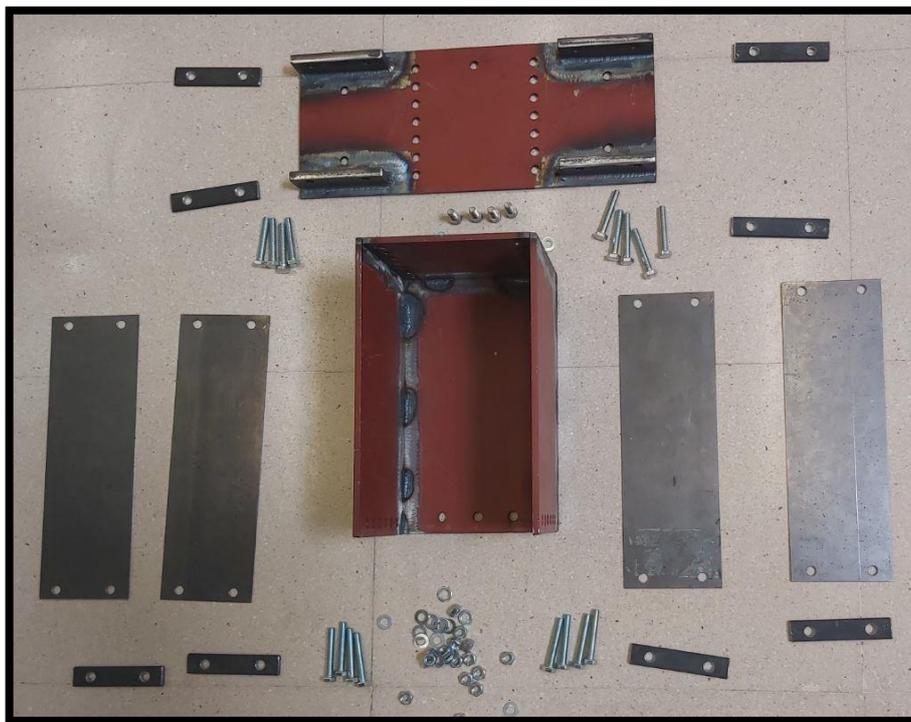


Figura 92. Despiece TMD (Maqueta Física)

La *Figura 92* muestra el despiece del prototipo TMD en el que se pueden observar todos los componentes que se definieron en el capítulo 4. Sin embargo, se tuvo que modificar algunas dimensiones para poder situarlo en el bastidor al que va acoplado el TMD y que sirvió de soporte para los ensayos realizados. También, se tuvo que ajustar el prototipo a la disponibilidad de los materiales en el laboratorio de estructuras.

6.1 BASE FIJA Y BASE MÓVIL

Las bases (*Figura 93* y *Figura 94*), como se explicó anteriormente, deben presentar la misma geometría para reducir los tiempos de construcción. Aunque las maquetas digitales de las bases se diferenciaban entre sí por la presencia de ciertos taladros, los prototipos de las bases que se han construido son exactamente iguales. El objetivo de construir las bases iguales era testear solamente las bases de apoyo de las ballestas, así como las uniones necesarias.

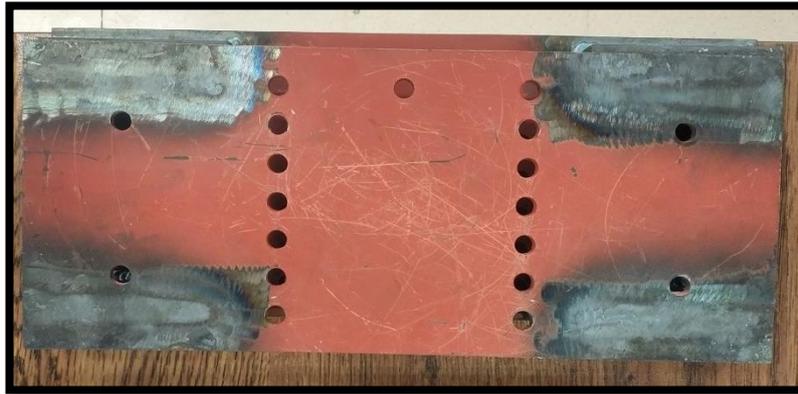


Figura 93. Parte trasera de las bases, fija y móvil (Prototipo)

Como se observa en la *Figura 93* y en la *Figura 94*, existen ciertas geometrías modificadas debido a que se tuvo que cambiar ciertas dimensiones del modelo para así introducirlas al bastidor. Algunas de las modificaciones realizadas son:

- Reducción del alto de la base fija y de la base móvil.
- Reducción del ancho de la base fija y de la base móvil.
- Base de apoyo de las ballestas que llegan hasta los extremos de las bases.
- Ausencia de los taladros destinados a la unión con los soportes de los muelles.
- Taladros destinados a la unión con la estructura, situados encima de las bases de apoyo.

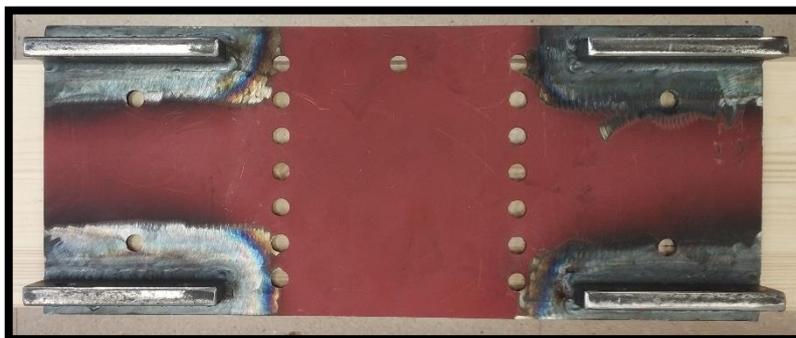


Figura 94. Parte delantera de las base, fija y móvil (Prototipo)

Sin embargo, aunque haya modificaciones de importancia como la eliminación de los taladros de la unión del soporte de muelles, los muelles también serán testeados tal y como se presentará en los siguientes apartados.

Aunque el prototipo presente modificaciones como: reducción de taladros, eliminación de ciertas geometrías o reducción de las dimensiones; en el modelo del TMD final se siguen manteniendo ya que el objetivo de la construcción de las bases es asegurarse que la solución adoptada es la adecuada. Incluso, introducir posibles modificaciones con el objetivo de tener un componente más adecuado.

La construcción de las bases parten de una placa rectangular a la cual se la sueldan cuatro pletinas, que actuarán de bases de apoyo a las ballestas. Ante de soldar dichas pletinas es necesario taladrarlas para realizar la unión con las ballestas. Una vez se tuvo todo montado, se realizaron todos los taladros necesarios tal y como se aprecia en la *Figura 93* y *Figura 94*. Una vez realizadas las comprobaciones pertinentes, se enviaron ambas bases a pintar para tener un prototipo más presentable.

Los ensayos realizados sobre el TMD ayudo a extraer la información necesaria sobre dicho componente, extrayendo las siguientes conclusiones:

- Las pletinas que actúan como bases de apoyo son adecuadas en dimensión y construcción. Así como las uniones que presentan.
- Espesor de las bases adecuada para aguantar las uniones necesarias.
- Taladros destinados a la unión con la cuna adecuados y suficiente.

6.2 CUNA Y MASAS

La cuna (*Figura 95 y Figura 96*), uno de los componentes importantes de este prototipo, presenta la misma geometría que su maqueta digital. Sin embargo, como tuvimos que modificar las dimensiones del conjunto y reducirlo, la parte trasera se tuvo que presentar como una sola placa en lugar de dos placas como estaba en la maqueta digital.



Figura 95. Vista frontal de la Cuna (Prototipo)



Figura 96. Interior de la Cuna (Prototipo)

Como se tuvo que modificar la base fija como la base móvil, la cuna también sufrió ciertas modificaciones, y así poder emplearla en el bastidor a la que irá acoplada. Las modificaciones que se pueden observar en la *Figura 95* y la *Figura 96* son:

- Reducción del alto de la cuna.
- Reducción del largo y del ancho de la cuna más allá de los límites establecidos.
- Una sola placa en lugar de dos, en el extremo de la cuna.
- Hilera de taladros situada a los laterales de la cuna.
- Espesor de toda la cuna igual
- Taladros en la base de la cuna con el mismo diámetro.

La cuna fue construida a partir de cuatro placas rectangulares soldadas entre sí. Se tuvieron que taladrar las placas antes realizar las soldaduras pertinentes. Una vez se estableció las comprobaciones necesarias, fueron enviadas a pintar. Aunque, existen ciertas modificaciones respecto al modelo digital.

Las masas (*Figura 97*), las cuales son introducidas en el interior de la cuna, presentan una geometría de lingote tal y como se presentó en la maqueta digital de dicho componente. Aunque, existen ciertas modificaciones debido a las dimensiones de la cuna.



Figura 97. Bloque de pesos (Prototipo)

La cuna, la cual fue modificada para la construcción del prototipo, implicó que las masas fuesen modificadas en consecuencia tal y como se observa en la *Figura 97*. Las modificaciones son:

- División de los lingotes en dos partes, es decir, reducción del ancho.
- Eliminación de los taladros destinados a la unión con las varillas roscadas.

Aunque el prototipo presente modificaciones como: reducción de taladros, eliminación de ciertas geometrías o reducción de las dimensiones; en el modelo del TMD final se siguen manteniendo ya que el objetivo de la construcción de la cuna y las masas es asegurarse que la solución adoptada es la adecuada. Incluso, introducir posibles modificaciones con el objetivo de tener un componente más adecuado.

Los ensayos realizados sobre el TMD ayudo a extraer la información necesaria sobre dicho componente, extrayendo las siguientes conclusiones:

- El espesor de las paredes de la cuna son suficiente para que soporten las uniones con la base móvil y la tensión de los muelles que sujetan, evitando posibles plastificaciones.
- Las uniones entre la cuna y la base móvil estaban en conflicto con las masas ya que chocaban con la cabeza de los tornillos. Así que opto por dos posibles soluciones:
 - Avellanado de los taladros en la cuna
 - Espacio entre la cuna y las masa
- Necesidad de sujetar las masas para que no choquen durante el movimiento del TMD y que no se desplazan de su posición.

6.3 MUELLES Y AMORTIGUADOR

Uno de los principales objetivos de la construcción de este prototipo era comprobar la utilidad de los muelles (*Figura 98*) para sujetar la masa de las partes móviles. Aunque en este prototipo no se han introducido los soportes de sujeción de los muelles, los muelles se situarán sobre el mismo bastidor.



Figura 98. Muelle tipo gordo (Prototipo)

Los muelles empleados en la construcción del prototipo del TMD son los que se tenían en stock en el laboratorio de estructura en la escuela de ingenierías industriales. Pudiendo a sí testear el producto con diferentes tipos de muelles y determinar cuál era el que mejor se ajustaba al prototipo (*Figura 99*).



Figura 99. Muelle situado en el prototipo TMD

Gracias a los ensayos realizados al prototipo, se pudo confirmar que el uso de los muelles son no solamente necesarios, sino que son muy útiles para que el sistema TMD funcione adecuadamente. Las dimensiones de los muelles con los que se trabajó en el prototipo presentaban un diámetro $\phi = 40$ mm tal y como se quiere emplear en el producto del TMD final.

El amortiguador (*Figura 100*), otro de los componentes de gran importancia, permitió comprobar que las dimensiones establecidas, eran las adecuadas para tener una carrera de 70 mm. Debido a las modificaciones de la cuna, el amortiguador se tuvo que situar en un lateral de la cuna, teniendo así una diferencia con el montaje previsto para el TMD comercial.



Figura 100. Amortiguador (Prototipo)

El amortiguador empleado es un amortiguador de dirección ajustable universal construido en aluminio, el cual se obtuvo a través de internet por un proveedor externo. Una vez comprobado el correcto funcionamiento del amortiguador, fue instalado.

Gracias a los ensayos realizados, se extrajeron las siguientes conclusiones:

- Se determinó que el amortiguador era el adecuado y que según la dureza que se establezca en el amortiguador, el producto TMD comenzará más rápidamente o no a amortiguar las vibraciones.
- Se comprobó que la mejor posición del amortiguador es en el plano de simetría del TMD, es decir, en mitad de la base fija y de la cuna.

6.4 BALLESTAS Y TACOS

Las ballestas y los tacos (*Figura 101*), componentes destinados a guiar el movimiento del TMD, presentan la misma geometría que se estableció en su maqueta digital. La introducción de ciertas modificaciones obligo a modificar algunas dimensiones de las ballestas.



Figura 101. Ballestas y tacos (Prototipo)

Como la cuna y el resto de componente se tuvieron que modificar para poder posicionarlo dentro del bastidor, entonces algunas de las dimensiones de las ballestas fueron modificadas:

- Reducción del espesor de la ballesta
- Reducción del largo de la ballesta más allá de los límites establecidos
- Se mantuvo el ancho de las ballestas.

La construcción de la ballesta parte de una placa rectangular de bajo espesor a la cual se le realiza los taladros pertinentes para realizar la unión de la ballesta con las bases. El taco, por el contrario, es una placa rectangular de pequeñas dimensiones y de espesor mayor que la ballesta.

Gracias a los ensayos realizados sobre el TMD, se pudieron extraer las siguientes conclusiones sobre dicho componente:

- La geometría y la funcionalidad de las ballestas son las adecuadas.
- El taco asegura un buen funcionamiento de la ballesta, sin embargo, la zona de la ballesta que queda por debajo de dicho componente deja de ser útil durante el movimiento del TMD.
- El espesor de las ballestas y la rigidez de los muelles empleados están relacionados. A mayor rigidez de los muelles, menor espesor de las ballestas a emplear.

6.5 EXPERIMENTACIÓN - ENSAYOS

Una vez se realizó el ensamblaje de todos los componentes necesarios del prototipo TMD (*Figura 102*): Base fija, base móvil, cuna, ballestas, etc., se realizaron los ensayos pertinentes para comprobar el correcto funcionamiento del prototipo. Los objetivos de dichos ensayos son:

- Extraer la máxima información posible sobre futuras mejoras del producto.
- Comprobar y asegurar el funcionamiento del conjunto TMD tal y como era de esperar.
- Validar las soluciones tecnológicas introducidas en el nuevo producto TMD como por ejemplo los muelles.

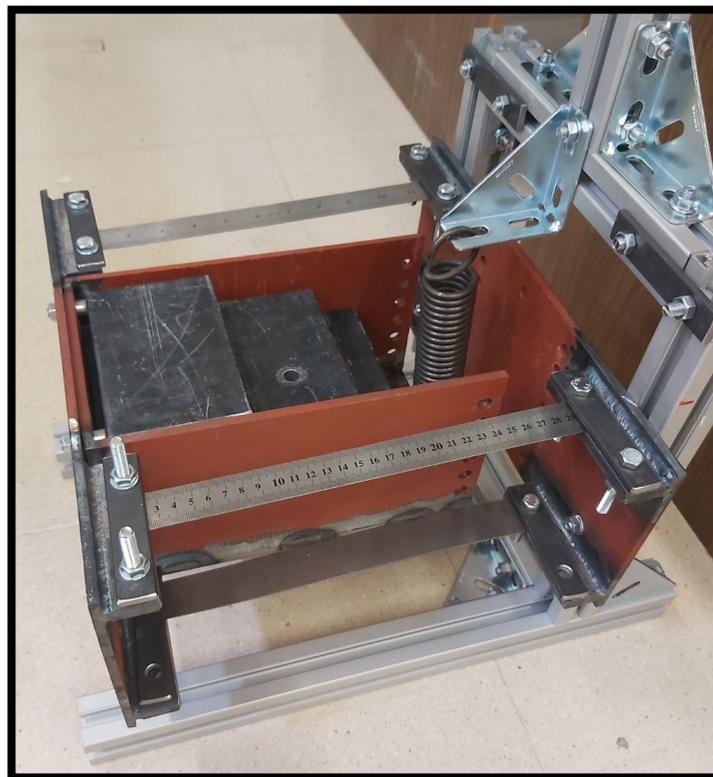


Figura 102. Prototipo TMD

Los ensayos realizados permitieron determinar algunas de las mejores finales de algunos de los componentes tal y como se explicó en el capítulo 4. También, ayudó a determinar algunas de las líneas de mejora o posibles vías de desarrollo (Capítulo 7)

Los componentes fueron montados tal y como se indicó en el capítulo 4, solamente que en este caso se decidió montar la base fija en un bastidor que a su vez fue colocado sobre la estructura que se empleó para realizar los ensayos. La estructura empleada es un puente en madera colgante (*Figura 103*), el cual está situada dentro del laboratorio de estructura de la escuela de ingenierías industriales (Paseo del Cauce).



Figura 103. Puente de madera colgante (Estructura de ensayo)

Se comenzó la experimentación comprobando que cuando la cuna está cargada y solamente esta sostenida por las ballestas, estas se deforman (*Figura 104*). La deformación de las ballestas es debido a que como establecimos anteriormente, no participa en la rigidez del conjunto ya que solamente tiene la función de guiar al TMD. El espesor de estas ballestas es menor a las que se empleaba anteriormente y por ello ahora se deforman.

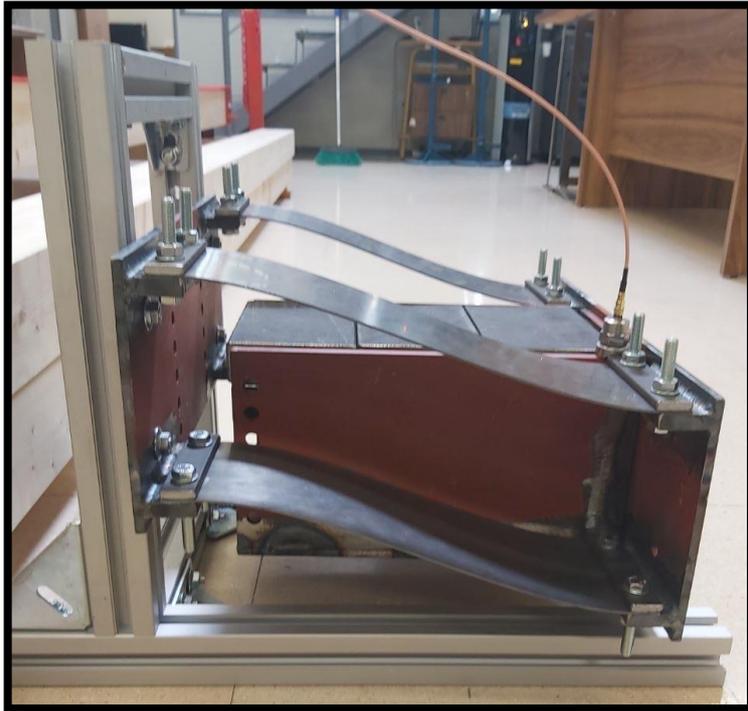


Figura 104. TMD sin muelle y cargado (Prototipo)

Sin embargo, el nuevo modelo del TMD emplea muelles para solucionar este problema para así descargar las ballestas. Así que los muelles sujetarán el peso de las partes móviles (Figura 105) haciendo que las ballestas se queden horizontales en estático. El hecho de que los muelles sujeten el peso hace que estén deformado desde un inicio.



Figura 105. TMD con muelles y cargado (Prototipo)

Se confirmó, entonces, que el uso de los muelles y su posicionamiento era el ideal ya que descargaba las ballestas. Gracias a los muelles introducidos, se pudo comprobar que las dimensiones de las ballestas podrían ser reducidas ya que presentaban demasiada rigidez.

A lo largo del proyecto, sobre en todos los últimos meses, se fueron realizando diversos ensayos sobre la estructura de la *Figura 103* para comprobar el funcionamiento del TMD en diversos casos:

- Con y sin amortiguador acoplado al TMD.
- Con y sin muelles conectados a la cuna.
- La cuna cargada al completo, al 75%, al 50% y vacía completamente.
- Regulando la dureza del amortiguador
- Etc.

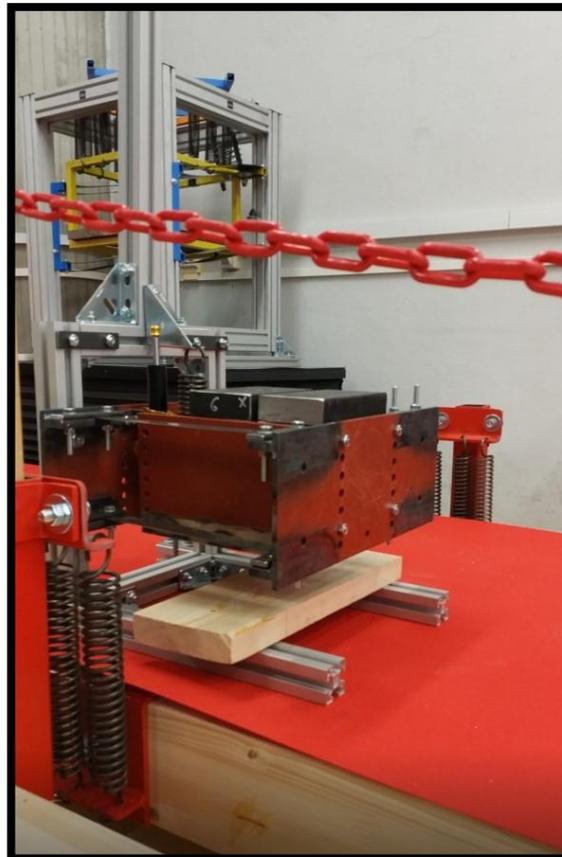


Figura 106. Ensayo del TMD sobre el puente colgante

7 CONCLUSIONES

Concluido el proyecto de industrialización del producto TMD ya se dispone de toda la información necesaria para dar sentido el Trabajo de Fin de Máster y así poder extraer conclusiones sobre éste.

La principal conclusión que se ha extraído del proyecto es que la industrialización de un producto conlleva la modularidad de su maqueta digital debido a que no existe una única solución frente al amortiguamiento de las vibraciones. Como se puede observar en el capítulo destinado a la parte numérica del producto, existen diversos criterios frente el amortiguamiento de las vibraciones, solamente depende del ingeniero responsable de determinar cuál es el que mejor se ajusta a las exigencias del posible cliente.

El proceso de industrialización de un producto intenta aunar por un lado el funcionamiento mecánico y por el otro, las partes mecánicas que le definen. Trasladado a nuestro producto TMD, dichas partes están definidas por:

- Funcionamiento mecánico → Definición del comportamiento del TMD en función de la frecuencia que se desea amortiguar a través de la rigidez y el peso de los diferentes componentes implicados. En el proyecto, se ha realizado a través de la parte numérica del producto (Capítulo 5) donde se parten de dos datos de entrada (Frecuencia y Masa objetivo) con el objetivo de obtener las dimensiones de las partes mecánicas.
- Parte mecánica → Definición de las partes que constituyen el producto TMD a través de sus dimensiones como de otros parámetros: rigidez de los muelles, peso de las partes móviles, etc. En el proyecto, se ha realizado a través de la construcción de la maqueta digital en la cual sus dimensiones se apoyarán en el uso de parámetros, determinados por el funcionamiento mecánico, permitiendo obtener una gama de producto amplia.

Así que el proceso de industrialización, desde un punto de vista general, intenta aunar el fichero CATIA, que contiene la maqueta digital, y el fichero EXCEL, que contiene los cálculos del funcionamiento mecánico. Importante que todo esté basado en el uso de parámetros ya que no exista una solución única ante las exigencias del cliente, sino que podemos presentar varias soluciones siempre basado en criterios de diseño: fatiga, pandeo, compacto, etc.

El rol del ingeniero en este proceso de industrialización es clave (*Figura 107*). Por un lado, se necesita los conocimientos necesarios sobre la creación de maquetas digitales parametrizadas, es decir, conocimientos sobre el empleo de softwares destinados a la concepción asistida por ordenador (CAO). Por otro lado, se necesita tener nociones sobre los sistemas de amortiguamiento de vibraciones, así como conocimientos sobre dicho fenómeno físico, es decir, conocimientos sobre las ecuaciones que rigen dicha tecnología.

7.1 CONSIDERACIONES ADICIONALES

Cuando se empezó la construcción de la maqueta digital ya existía un prototipo de dicho producto, el cual sirvió de punto de partida para la industrialización, así como un fichero CATIA que contenía los componentes que lo constituían. Sin embargo, dicho fichero no pudo ser de gran ayuda debido a que:

- El modelo no estaba parametrizado, sino que las dimensiones fueron establecidas para una solución única, además de que faltaban la introducción de ciertos componentes de peso como los muelles.
- El fichero solamente podía ser abierto en los ordenadores de la escuela, lo que implicó que solamente pudiésemos ver cómo eran las geometrías de ciertos componentes antes de la situación de cierre que sobrevino en mitad del proyecto debido a la pandemia global.

Uno de los objetivos del trabajo fin de máster era el estudio geométrico y topológico de los componentes modificados a través la impresión 3D de estos. El objetivo, era el empleo de nuevas tecnologías con el objetivo de realizar la mejora continua del producto. Sin embargo, se tuvo que modificar dicho objetivo debido a la situación de cierre que sufrió la escuela de ingenierías industriales debido al Covid-19.

Aunque la situación sufrida obligó a suspender dicha parte del proyecto, se decidió realizar un prototipo del producto que se había diseñado para sustituir dicha parte. El objetivo, seguía siendo estudiar el comportamiento del TMD, así como sacar líneas de mejorar de los componentes. Así que, el tutor del TFM (D. Antolín Lorenzana Ibán) como su compañero de laboratorio (D. Álvaro Magdaleno González), me ofrecieron la posibilidad de participar en la construcción de dicho prototipo tal y como se ha descrito en el capítulo 6 de dicho informe.

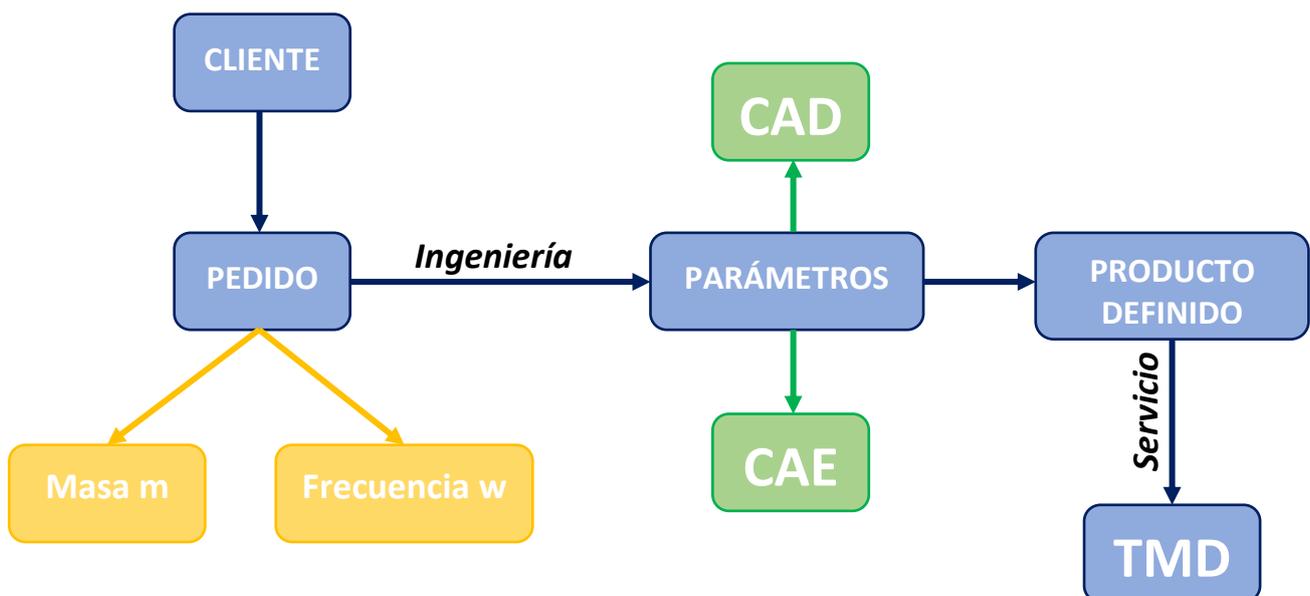


Figura 107. Esquema del proceso de pedido de un cliente

Finalmente, este trabajo de fin de máster me ha permitido observar la importancia del ingeniero en el mundo laboral gracias a que he podido profundizar en el dominio de la concepción como así en el diseño de dispositivos de absorción de vibraciones. He podido observar la importancia de industrializar un producto por diversos motivos:

- Emplear una maqueta digital para industrializar un producto, permite reducir los costes y tiempos que se dedicaban antes en la construcción de una maqueta física.
- Si se quiere industrializar un producto, es necesario tener una maqueta digital basados en parámetros que puedan variarse en función de las exigencias del cliente, así pues, se creará una amplia gama del producto.
- La industrialización no puede basarse solamente en su maqueta digital, sino que las geometrías, componentes, dimensiones, etc. deben obtenerse a través de cálculos numéricos para que el producto pueda funcionar.
- Necesidad de controlar los parámetros tanto de cálculo como de la maqueta siguiendo un criterio preestablecido, sabiendo que no existe una única solución frente a dicha problemática. Siendo este último aspecto, uno de los puntos de mayor importancia que me ha marcado en este proyecto.

7.2 VÍAS DE INVESTIGACIÓN

Los objetivos establecidos al principio del informe fueron obtenidos a lo largo de los meses que duró el proyecto de fin de máster. Sin embargo, también se descubrieron futuras líneas de investigación en este proyecto de industrialización del TMD, así como posibles mejoras al producto para hacerlo más atractivo a los clientes. Estas líneas futuras de investigación podrían ser:

- Introducción de un nuevo parámetro en el modelo final del TMD (maqueta digital) para poder presentar una mayor gama del producto y tener mayor rango de trabajo frente a las exigencias del cliente. Este parámetro sería el espesor de la ballesta, ya que, a mayor valor de espesor menor ancho de cuna, lo que implicaría un producto más compacto.
- Aumento del alto de la cuna, la base fija como la base móvil para poder tener los muelles, así como el amortiguador “embebidos”.
- Automatizar los cálculos realizados en el fichero EXCEL a través del lenguaje VBA (Virtual Basic), permitiendo así reducir los tiempos de obtención de los parámetros de salida, así como permitiendo el uso de dicho documento a personas menos experimentadas en la tecnología TMD.
- Construir un segundo prototipo del TMD que permita el estudio completo de la maqueta digita presentado en este informe. Así poder tener una maqueta física fiel al producto que se quiere vender.
- Introducción de nuevas tecnologías dentro del producto TMD que estén destinadas al control del amortiguamiento y que permita tener un solo producto que pueda trabajar en diferentes frecuencias. Por ejemplo, una estrategia de control de la fuerza (ATMD Force Feedback Control Strategy) [12].

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. R. Fragua, «Maqueta digital, prototipado y caracterización experimental de un nuevo concepto de TMD a escala real,» Universidad de Valladolid - Escuela de Ingenierías Industriales (EII), Valladolid, 2017.
- [2] J. Jia, *Modern Earthquake Engineering*, Berlin: Springer, 2017.
- [3] ArcelorMittal, «ArcelorMittal - Proyecto Torre Titania,» [En línea]. Available: https://constructalia.arcelormittal.com/es/casos_practicos/espana/torre_titania. [Último acceso: 07 Agosto 2020].
- [4] Siemens, «Siemens Digital Industries Software,» [En línea]. Available: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/products/collaboration/digital-mockup.html>. [Último acceso: 08 Agosto 2020].
- [5] D. Système, «3DS,» [En línea]. Available: <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/catia/>. [Último acceso: 28 Julio 2020].
- [6] T. 101, "Taipei 101," [Online]. Available: <https://www.taipei-101.com.tw/en/observatory/feature/damper>. [Accessed 09 Agosto 2020].
- [7] T. F1, «Technical F1 - Dictionary,» [En línea]. Available: http://www.formula1-dictionary.net/mass_damper.html. [Último acceso: 09 Agosto 2020].
- [8] MAURER, «MAURER - Amortiguadores,» [En línea]. Available: <https://www.maurer.eu/es/productos/amortiguadores/de-masa-sintonizados/index.html>. [Último acceso: 09 Agosto 2020].
- [9] GERB, «GERB,» [En línea]. Available: <https://www.gerb.com/es/campos-de-aplicacion/amortiguador-de-masas-sintonizadas.html>. [Último acceso: 09 Agosto 2020].
- [10] F. J. J. Calvo, «Fundamentos de programación de VBA en Catia V5. Aplicación al diseño paramétrico de perfiles y alas NACA de 4 dígitos,» Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Sevilla, 2015.
- [11] J. A. Urbieto, «Amortiguadores y suspensión,» Laboratorio de Automoción, Tecnun, Navarra, 2003.
- [12] X. W. & D. Yun, «Force Feedback Control Method of Active Tuned Mass Damper,» *Enrico Zappino*, 30 Octubre 2017.

ANEXOS

PLANOS TMD FINAL

A continuación, se presentarán los planos (página 116 a la página 128), los cuales están asociados a cada uno de los componentes que definen el modelo final del TMD, que se emplean para la construcción de dicho producto.

Como se tiene que el modelo es función de tres parámetros, los planos presentados serán para un caso concreto en el que los valores empleados son:

- **Espesor Ballestas** → 3 mm
- **Longitud Ballesta** → 500 mm
- **Ancho Cuna** → 400 mm

Los planos que se presentarán son:

1. Ballesta
2. Base Fija
3. Base Móvil
4. Cuna
5. Masa
6. Escuadra Fin Carrera
7. Soporte Muelles Derecho
8. Soporte Muelles Izquierdo
9. Escuadra Unión Amortiguador
10. Varilla Roscada
11. Taco
12. Tope Goma Hembra → Destinado a determinar el proveedor que mejor se ajusta
13. Tope Goma Macho → Destinado a determinar el proveedor que mejor se ajusta

PLANOS PROTOTIPO TMD

Los planos presentados a continuación (página 130 a la página 143), son los que se emplearon para la construcción del prototipo y los que fueron enviados a los responsables de cada taller. Como se observará en los planos, la geometría de ciertos componentes no coincide con el resultado final que se presentó en el capítulo correspondiente, aunque las dimensiones siguieron siendo las mismas.

El prototipo, en este caso, está apoyado en solo dos parámetros así que los planos presentados serán solamente para un caso concreto y el que se empleó para la construcción del prototipo:

- **Longitud Ballesta** → 400 mm
- **Ancho Cuna** → 180 mm

Los planos que se enviaron a los talleres correspondientes se tuvieron que poner en extensión DWG donde luego, como por ejemplo en el corte por plasma, la propia maquina lo pasa a gcode/CNC. Estos planos eran:

1. Ballesta
2. Base Fija
3. Base Móvil
4. Cuna
5. Masa
6. Escuadra Fin Carrera
7. Soporte Muelles Derecho
8. Soporte Muelles Izquierdo
9. Escuadra Unión Amortiguador
10. Varilla Roscada
11. Taco
12. Tope Goma Hembra → Destinado a determinar el proveedor que mejor se ajusta
13. Tope Goma Macho → Destinado a determinar el proveedor que mejor se ajusta

H G F E D C B A

4

4

3

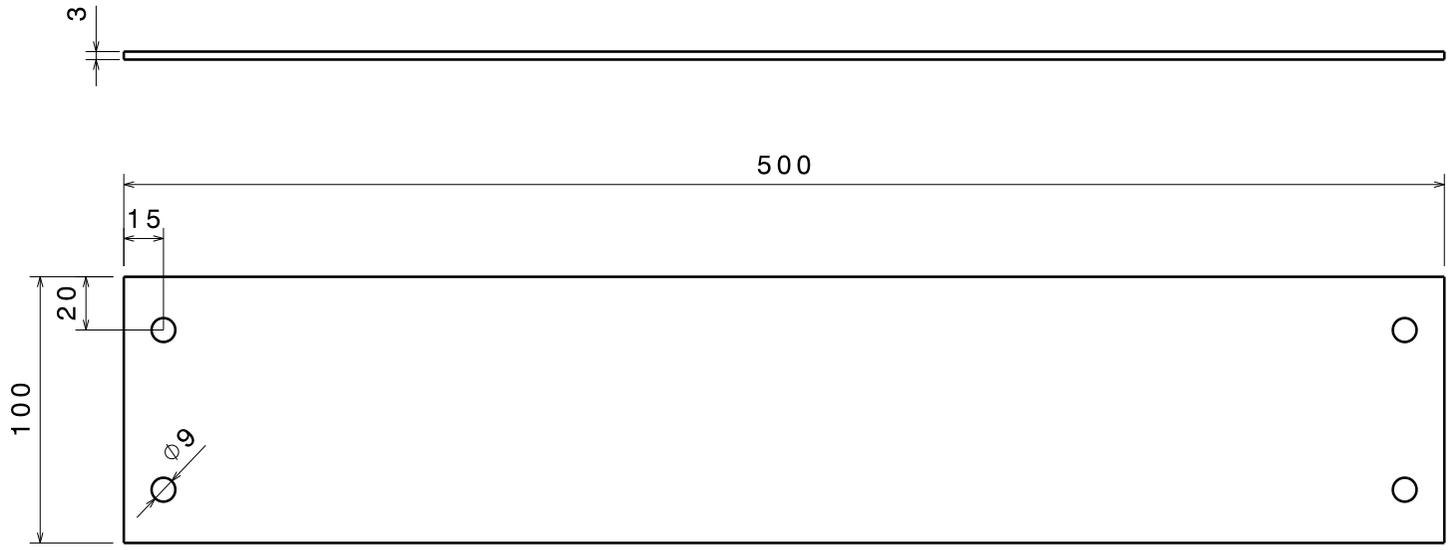
3

2

2

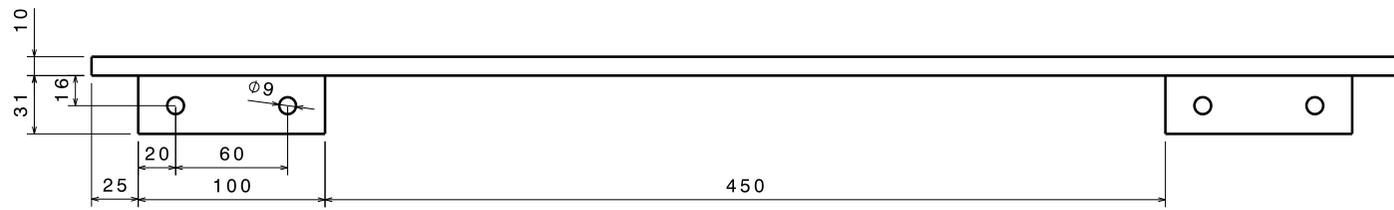
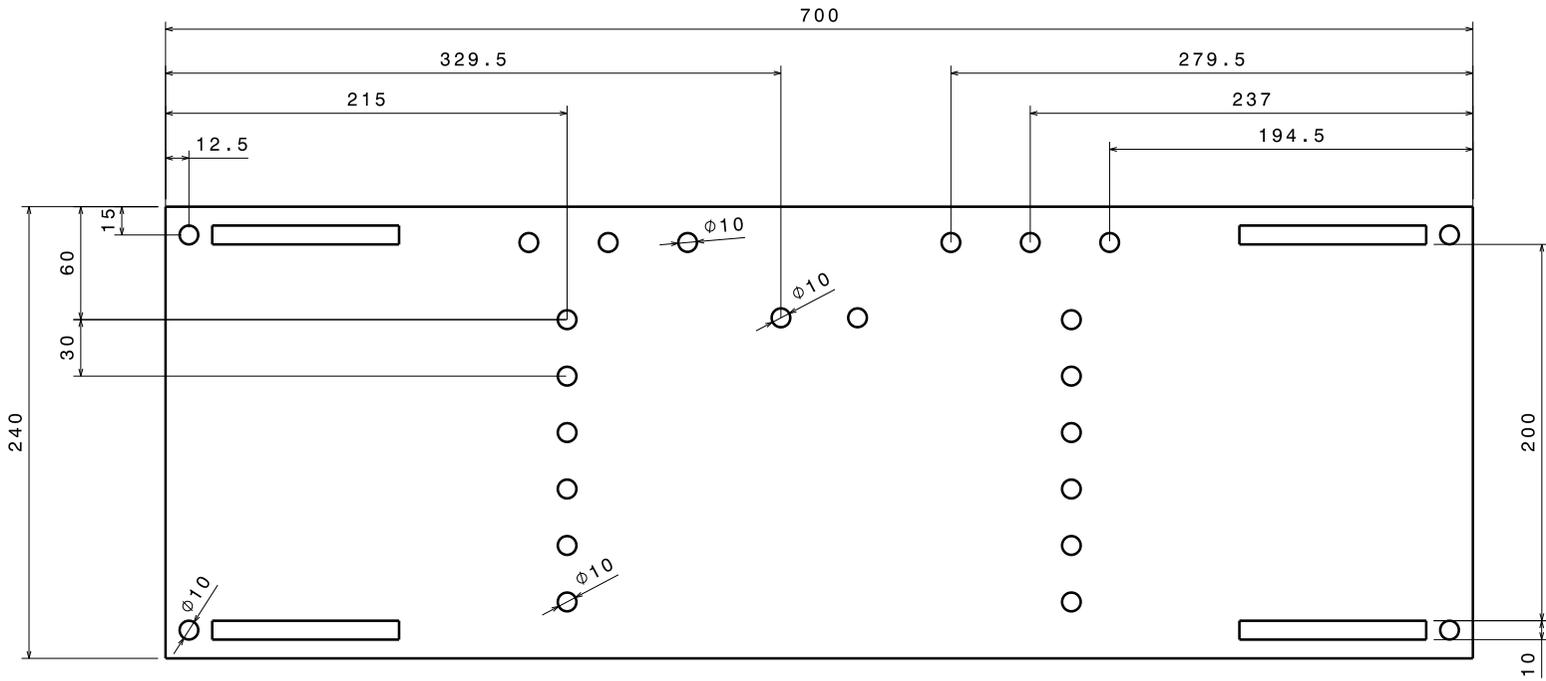
1

1

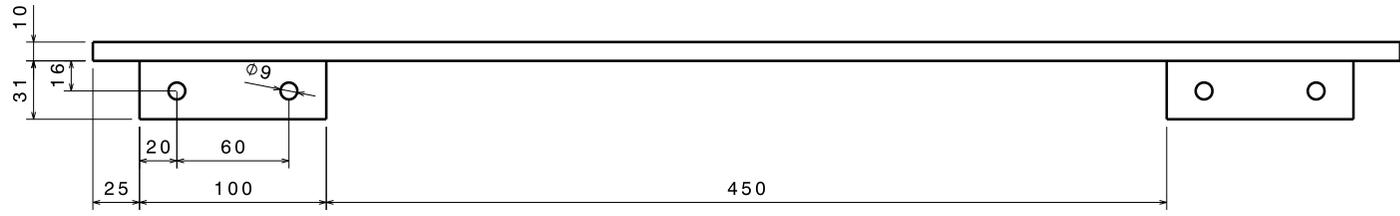
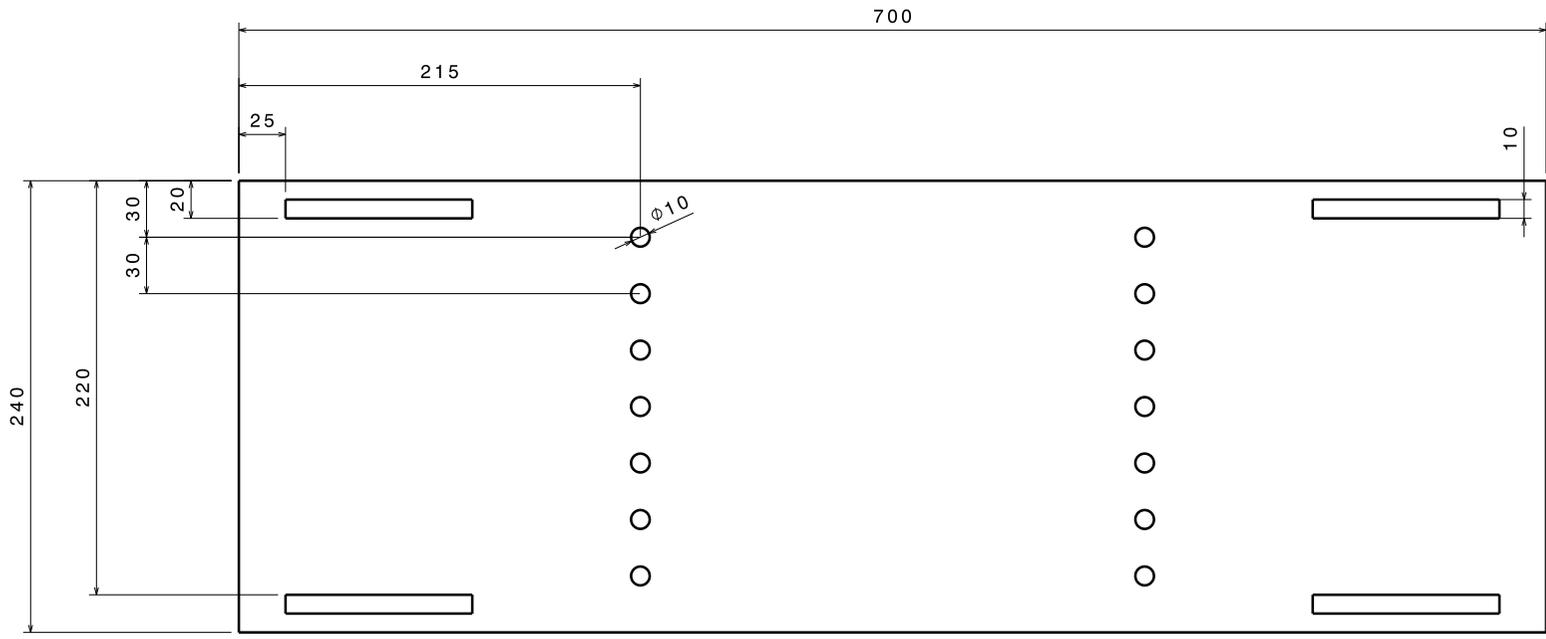


This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		TMD - Modelo Final		
DRAWN BY Arturo LAASS		DRAWING TITLE BALLESTA		
DATE 30/06/2020	CHECKED BY A. LORENZANA	DATE 30/06/2020	SIZE A3	DRAWING NUMBER 1
DESIGNED BY XXX	DATE XXX	SCALE 1:2	WEIGHT(kg) XXX	REV 0
				SHEET 1/1

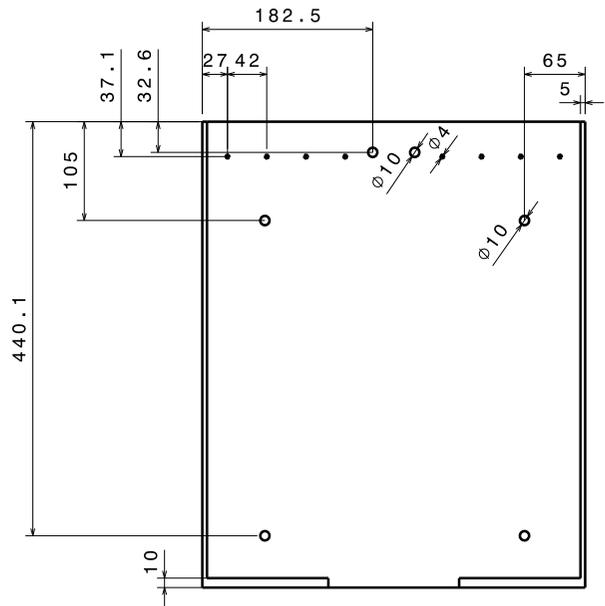
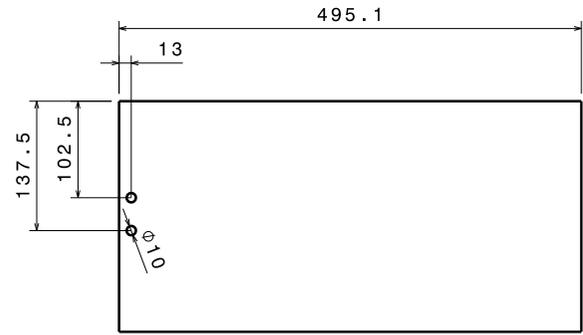
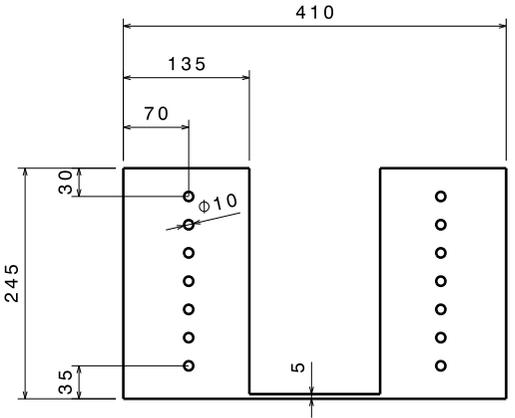
H G F E D C B A



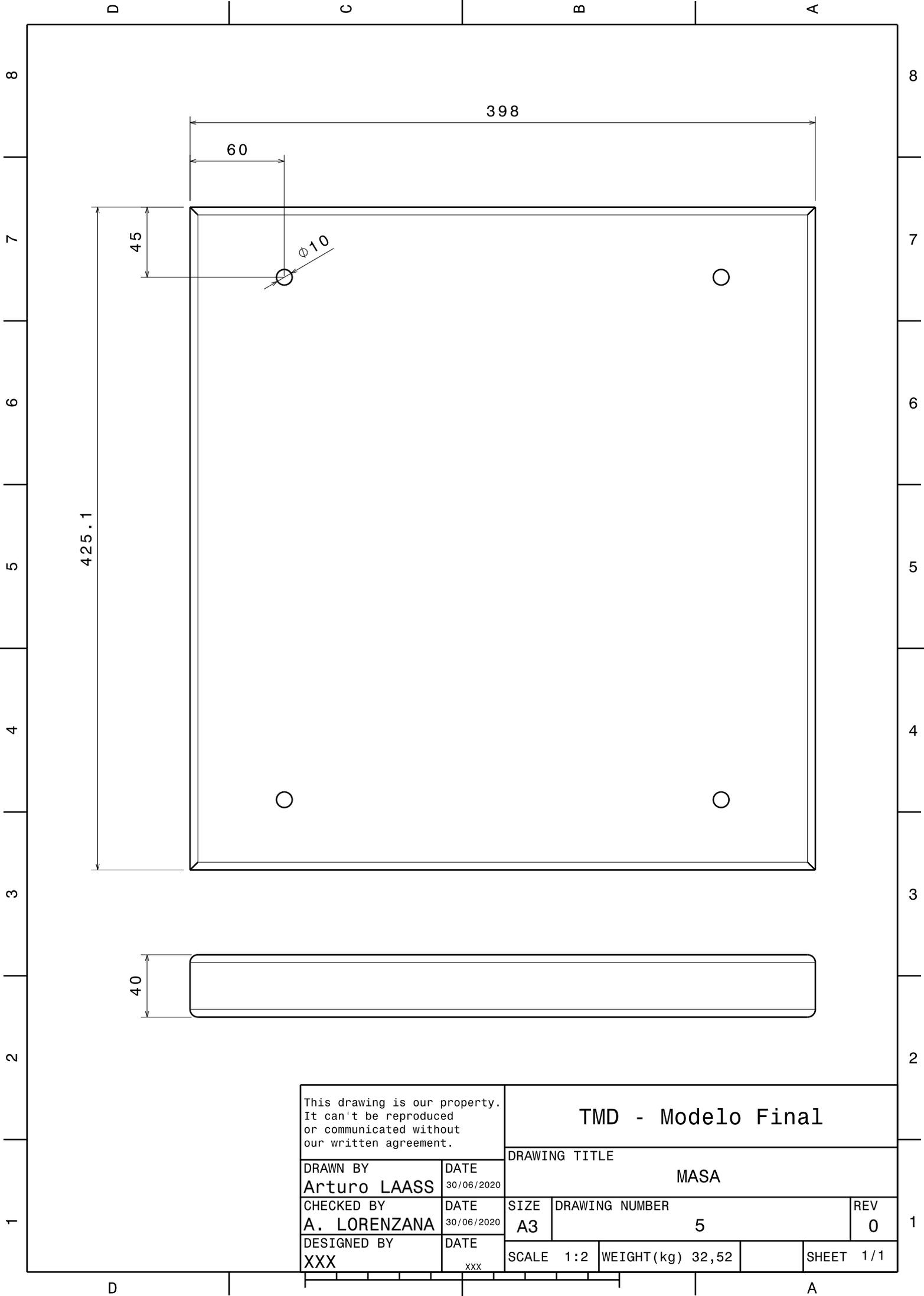
This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		TMD - Modelo Final		
DRAWN BY Arturo LAASS		DRAWING TITLE BASE FIJA		
DATE 30/06/2020	CHECKED BY A. LORENZANA	DATE 30/06/2020	SIZE A2	DRAWING NUMBER 2
DESIGNED BY XXX	DATE xxx	SCALE 1:2	WEIGHT (kg) 1,78	REV 0
			SHEET 1/1	



This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		TMD - Modelo Final		
DRAWN BY Arturo LAASS		DRAWING TITLE BASE MOVIL		
DATE 30/06/2020	CHECKED BY A. LORENZANA	SIZE A2	DRAWING NUMBER 3	REV 0
DESIGNED BY XXX	DATE xxx	SCALE 1:2	WEIGHT (kg) 14,05	SHEET 1/1



This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		TMD - Modelo Final		
DRAWN BY Arturo LAASS		DRAWING TITLE CUNA		
DATE 30/06/2020	DATE 30/06/2020	SIZE A2	DRAWING NUMBER 4	REV 0
DESIGNED BY XXX	DATE xxx	SCALE 1:2	WEIGHT (kg) 22,10	SHEET 1/1



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

TMD - Modelo Final

DRAWN BY
Arturo LAASS

DATE
30/06/2020

DRAWING TITLE
MASA

CHECKED BY
A. LORENZANA

DATE
30/06/2020

SIZE
A3

DRAWING NUMBER
5

REV
0

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SCALE
1:2

WEIGHT(kg) **32,52**

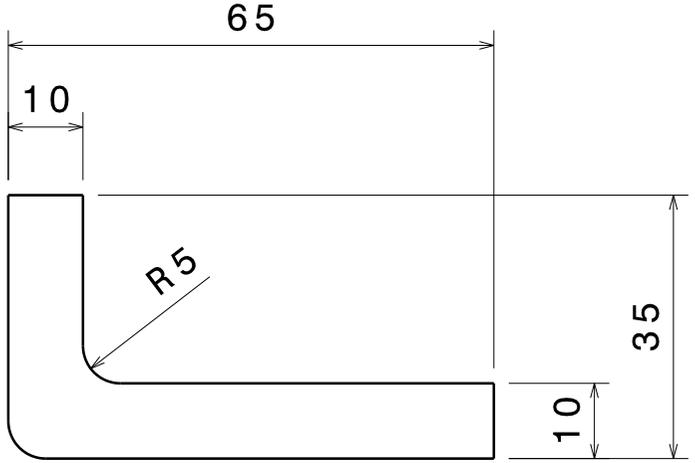
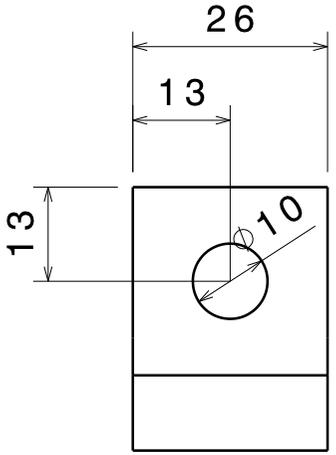
SHEET

1/1

D C B A

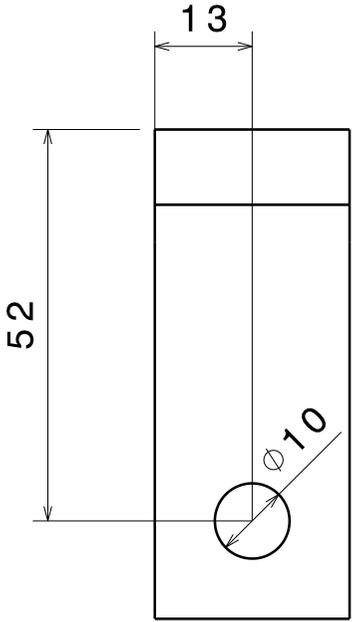
4

4



3

3



2

2

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

TMD - Modelo Final

DRAWN BY
Arturo LAASS

DATE
30/06/2020

DRAWING TITLE
ESCUADRA FIN DE CARRERA

CHECKED BY
A. LORENZANA

DATE
30/06/2020

SIZE
A4

DRAWING NUMBER
6

REV
0

DESIGNED BY
XXX

DATE
xxx

SCALE **1:1**

WEIGHT (kg) **XXX**

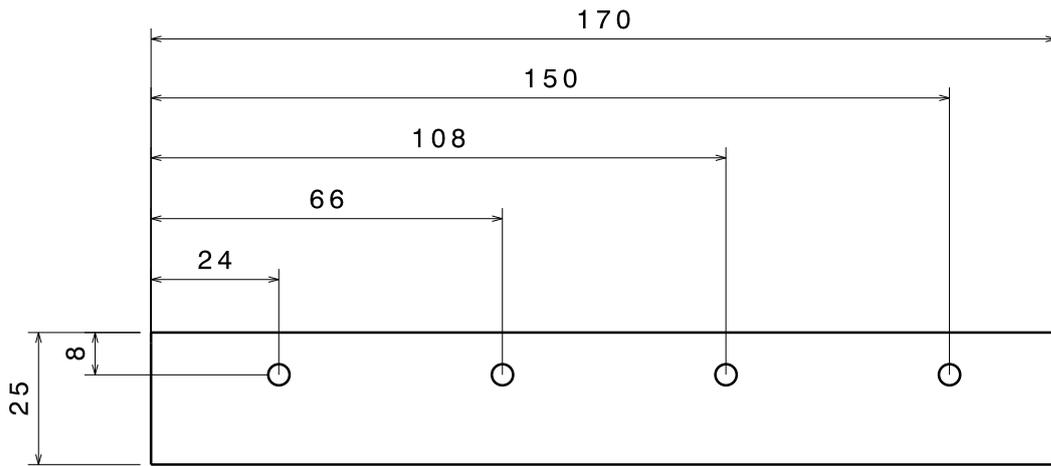
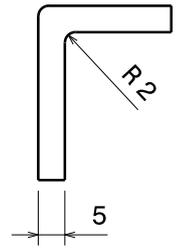
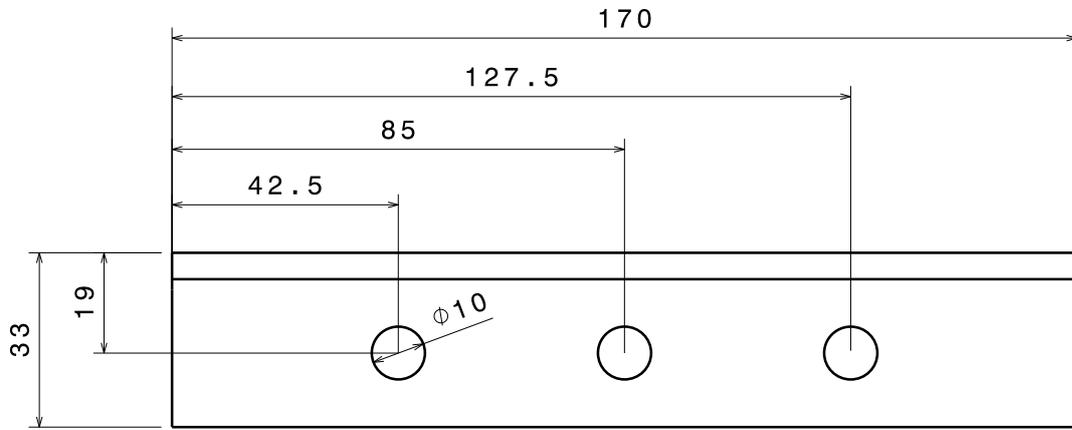
SHEET **1/1**

1

1

D

A



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

TMD - Modelo Final

DRAWN BY
Arturo LAASS

DATE
30/06/2020

DRAWING TITLE
SOPORTE MUELLE DERECHO

CHECKED BY
A. LORENZANA

DATE
30/06/2020

SIZE
A3

DRAWING NUMBER
7

REV
0

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SCALE 1:1

WEIGHT(kg) 0,04

SHEET 1/1

D

C

B

A

8

8

7

7

6

6

5

5

4

4

3

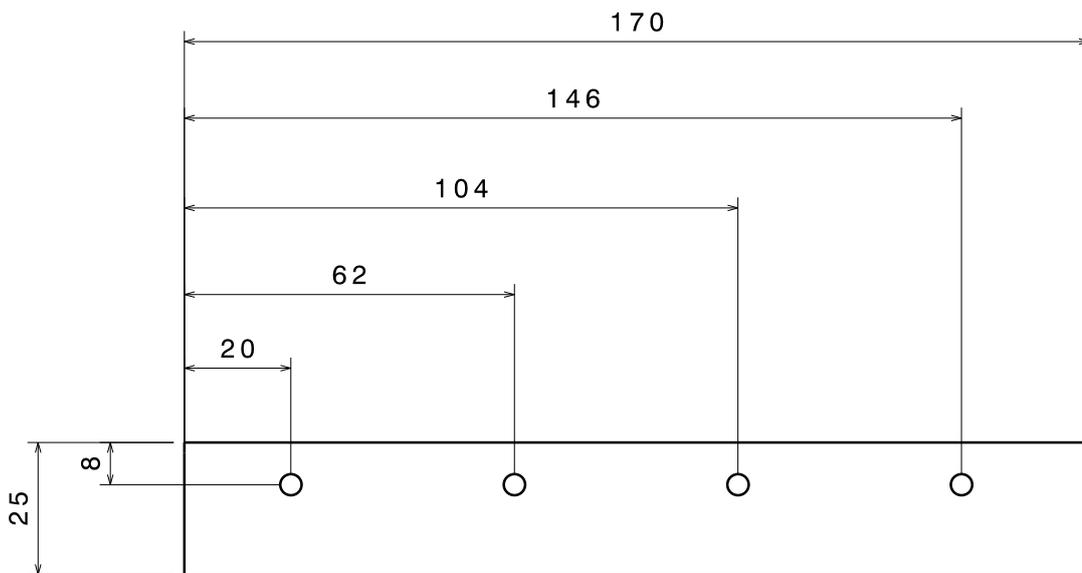
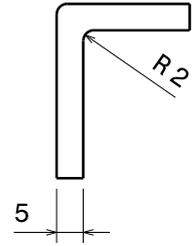
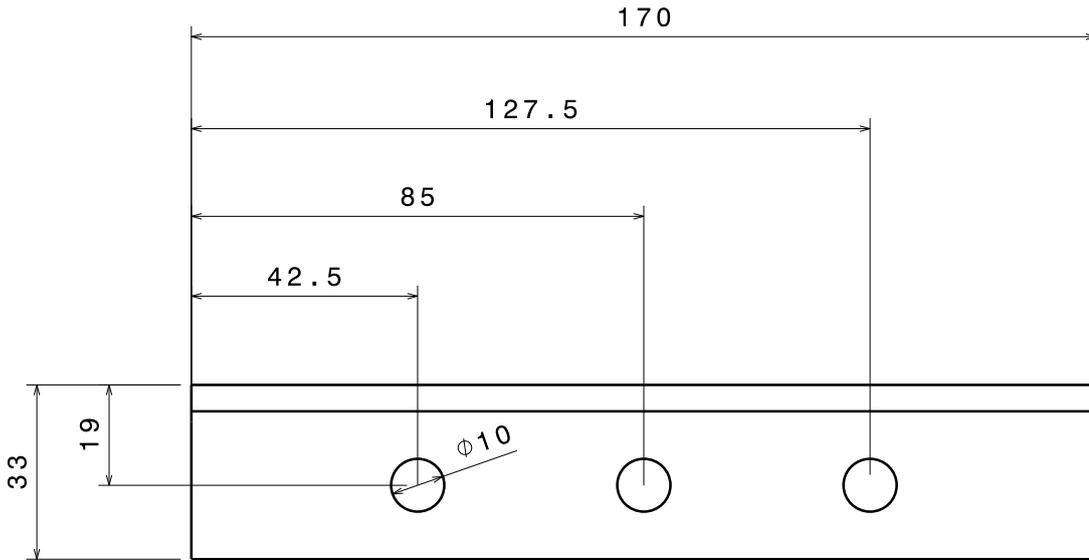
3

2

2

1

1



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

TMD - Modelo Final

DRAWN BY
Arturo LAASS

DATE
30/06/2020

DRAWING TITLE
SOPORTE MUELLE IZQUIERDO

CHECKED BY
A. LORENZANA

DATE
30/06/2020

SIZE **A3** DRAWING NUMBER **8** REV **0**

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SCALE 1:1 WEIGHT(kg) 0,04 SHEET 1/1

D

A

D

C

B

A

4

4

3

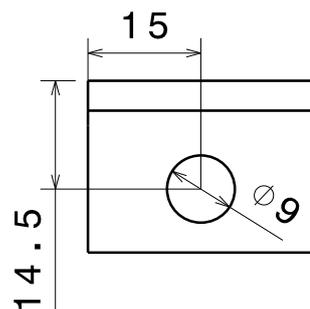
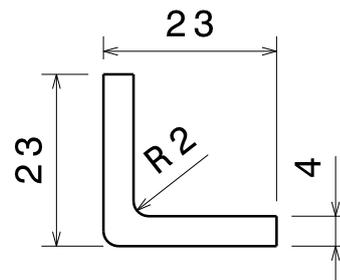
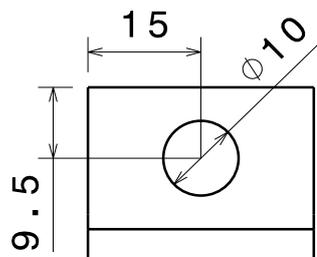
3

2

2

1

1



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

TMD - Modelo Final

DRAWING TITLE

ESCUADRA UNION AMORTIGUADOR

DRAWN BY
Arturo LAASS

DATE
30/06/2020

CHECKED BY
A. LORENZANA

DATE
30/06/2020

SIZE
A4

DRAWING NUMBER

9

REV
0

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SCALE **1:1**

WEIGHT (kg)

XXX

SHEET **1/1**

D

A

D

C

B

A

4

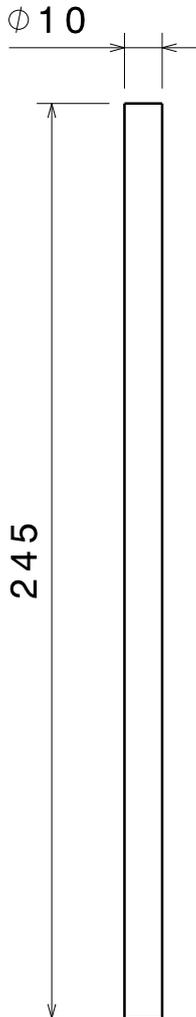
4

3

3

2

2



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

TMD - Modelo Final

DRAWN BY
Arturo LAASS

DATE
30/06/2020

DRAWING TITLE

VARILLA ROSCADA

CHECKED BY
A. LORENZANA

DATE
30/06/2020

SIZE
A4

DRAWING NUMBER

10

REV

0

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SCALE

1:2

WEIGHT (kg)

XXX

SHEET

1/1

D

A

1

1

D

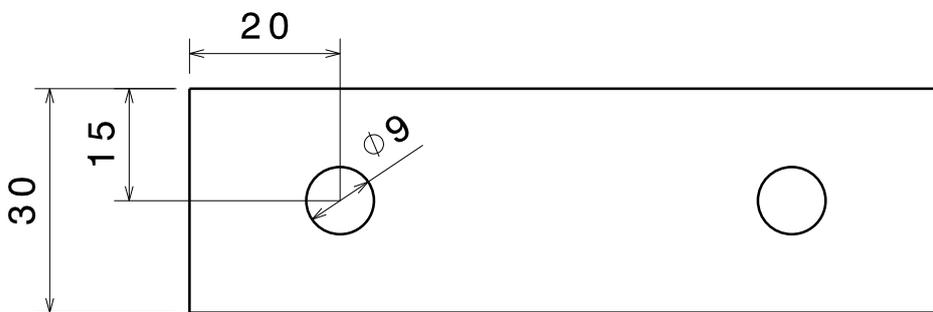
C

B

A

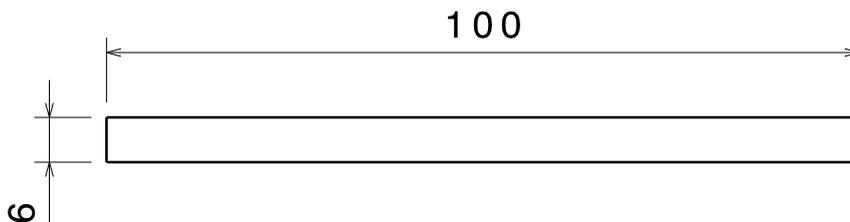
4

4



3

3



2

2

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

TMD - Modelo Final

DRAWN BY
Arturo LAASS

DATE
30/06/2020

DRAWING TITLE

TACO

CHECKED BY
A. LORENZANA

DATE
30/06/2020

SIZE
A4

DRAWING NUMBER

11

REV
0

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SCALE

1:1

WEIGHT (kg)

XXX

SHEET

1/1

1

1

D

A

D

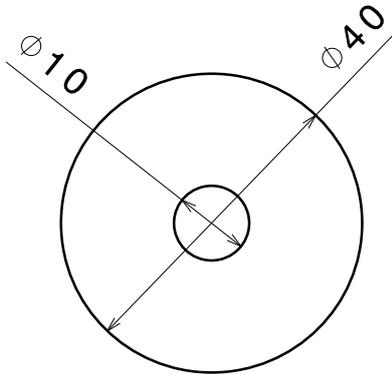
C

B

A

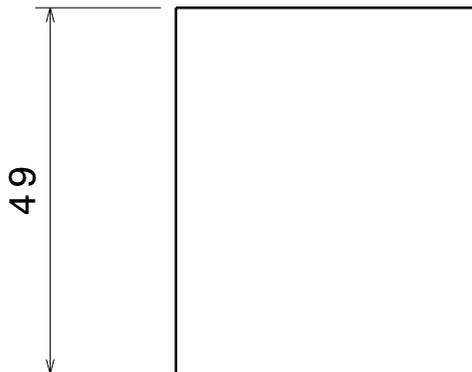
4

4



3

3



2

2

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

TMD - Modelo Final

DRAWING TITLE

TOPE GOMA HEMBRA

DRAWN BY
Arturo LAASS

DATE
30/06/2020

CHECKED BY
A. LORENZANA

DATE
30/06/2020

SIZE
A4

DRAWING NUMBER

12

REV
0

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SCALE

1:1

WEIGHT (kg)

XXX

SHEET

1/1

D

A

1

1

D

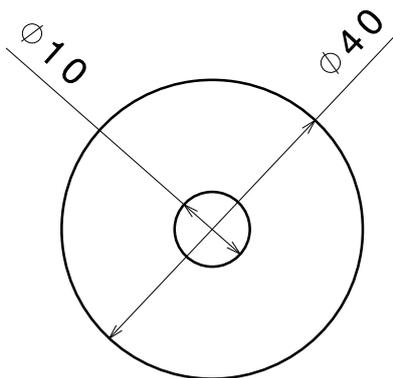
C

B

A

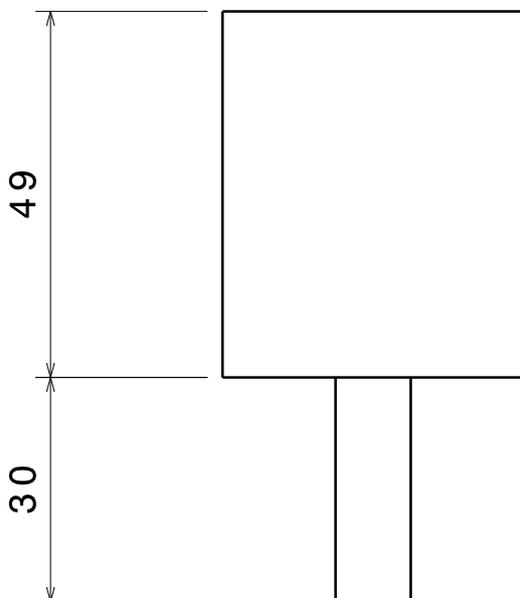
4

4



3

3



2

2

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

TMD - Modelo Final

DRAWING TITLE

TOPE GOMA MACHO

DRAWN BY
Arturo LAASS

DATE
30/06/2020

CHECKED BY
A. LORENZANA

DATE
30/06/2020

SIZE
A4

DRAWING NUMBER
13

REV
0

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SCALE **1:1**

WEIGHT (kg) **XXX**

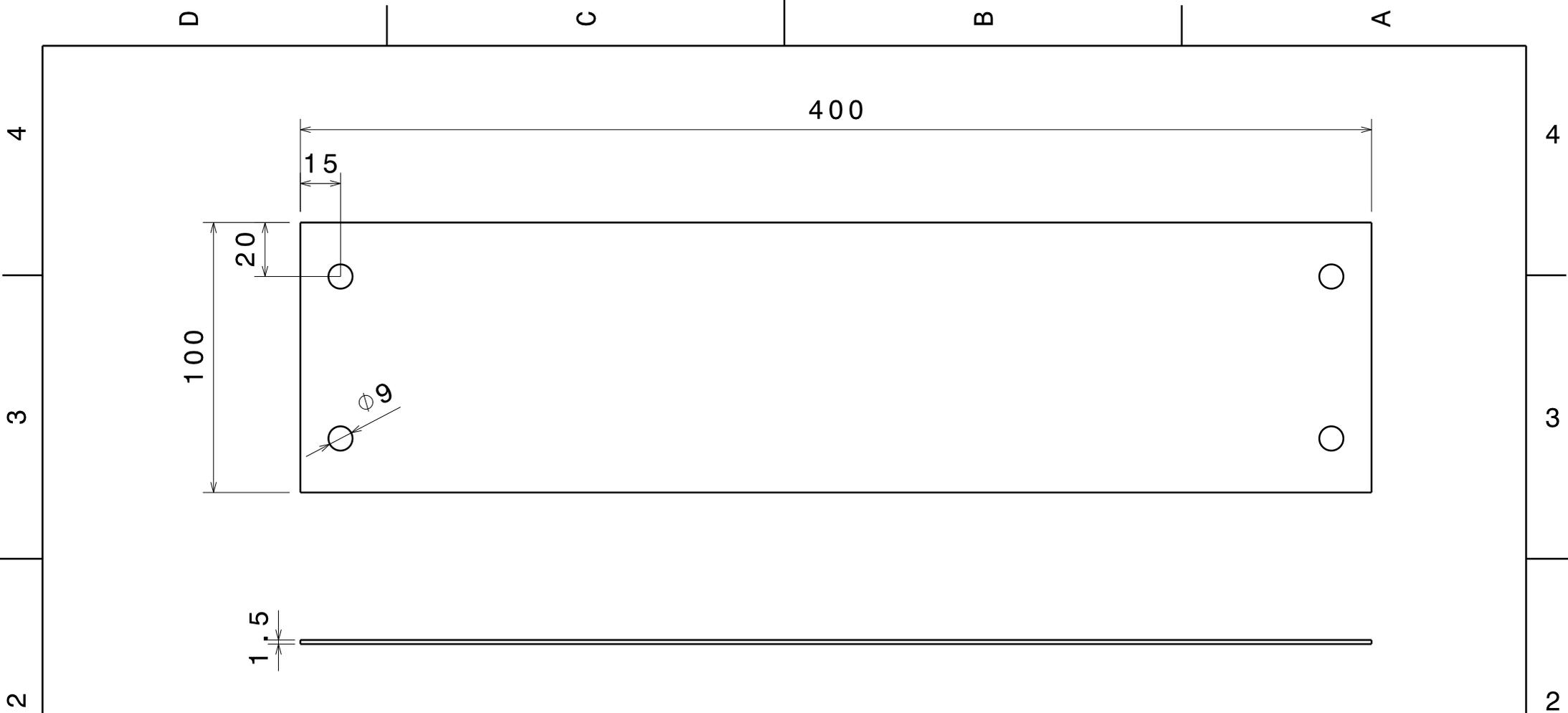
SHEET **1/1**

D

A

1

1



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

TMD - PROTOTIPO

DRAWN BY
Arturo LAASS

DATE
30/06/2020

DRAWING TITLE
BALLESTA

CHECKED BY
A. LORENZANA

DATE
30/06/2020

SIZE
A4

DRAWING NUMBER
1

REV
0

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SCALE **1:2**

WEIGHT (kg) **0,47**

SHEET **1/1**



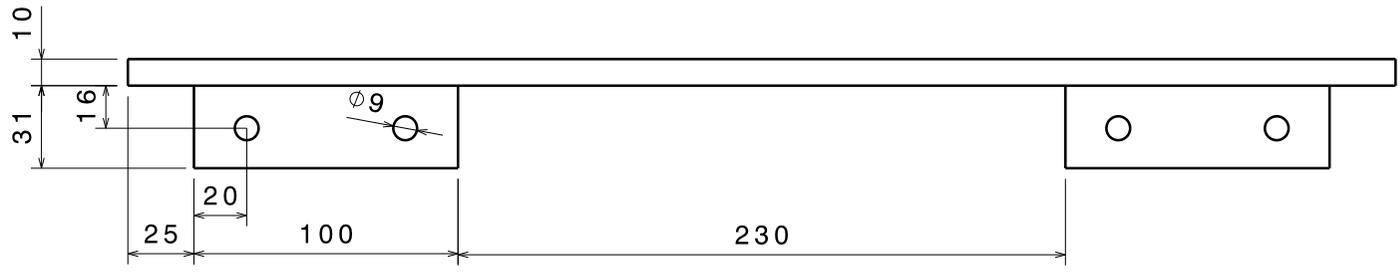
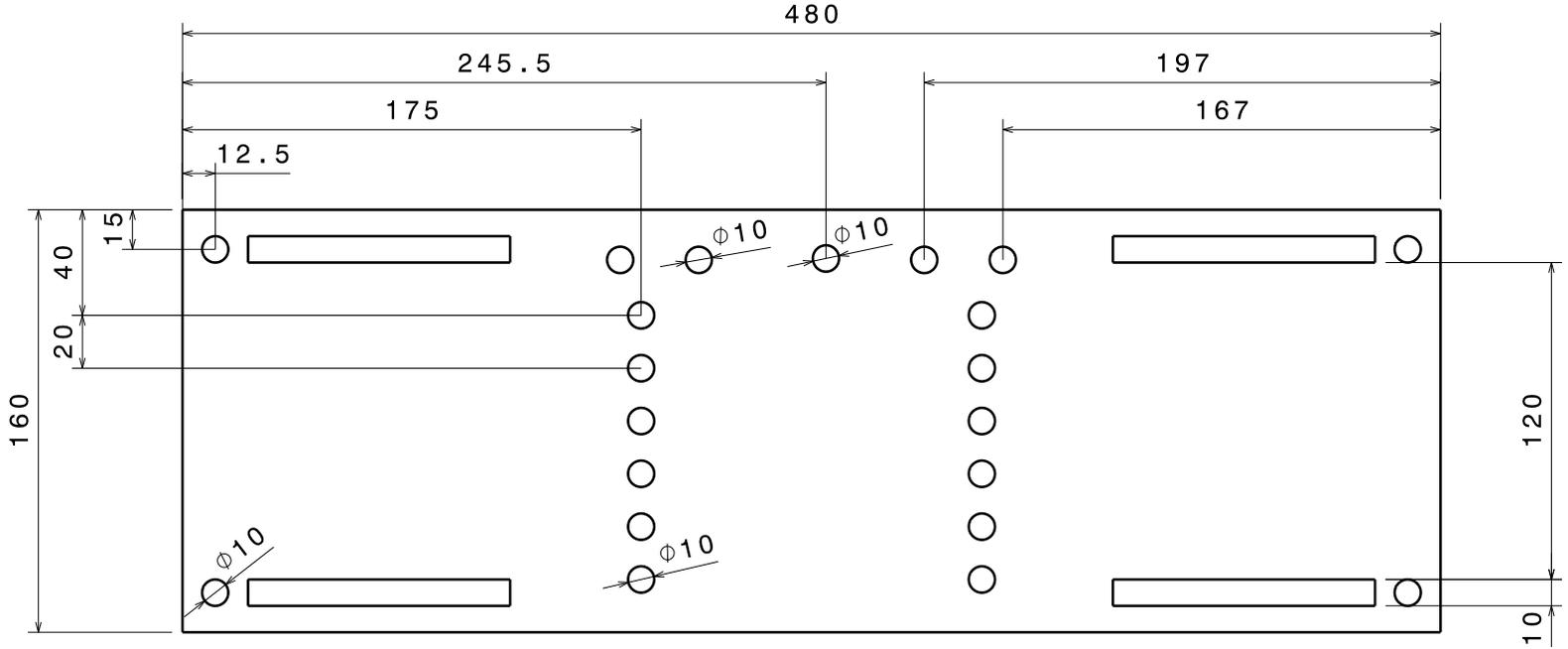
H G F E D C B A

4

3

2

1



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

TMD - Prototipo

DRAWN BY
Arturo LAASS

DRAWING TITLE
BASE FIJA

CHECKED BY
A. LORENZANA

DATE 30/06/2020
SIZE **A3**
DRAWING NUMBER **2**
REV **0**

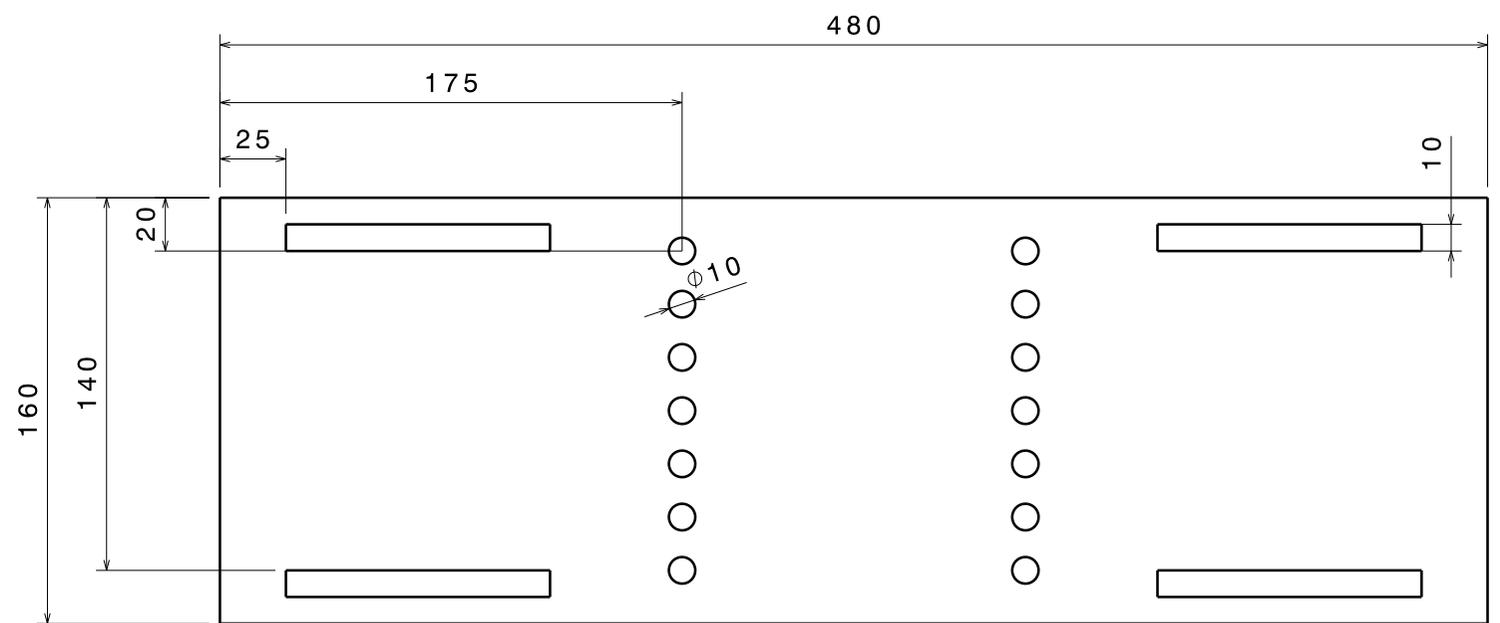
DESIGNED BY
XXX

DATE **XXX**
SCALE **1:2**
WEIGHT(kg) **XXX**
SHEET **1/1**

H G F E D C B A

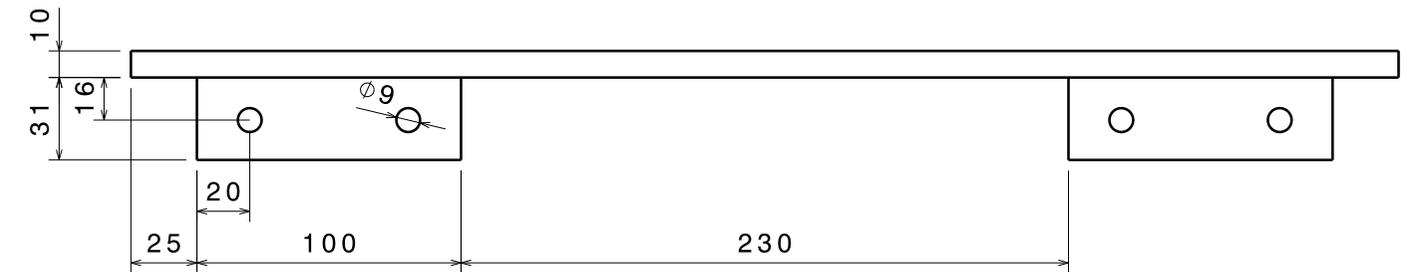
H G F E D C B A

4



3

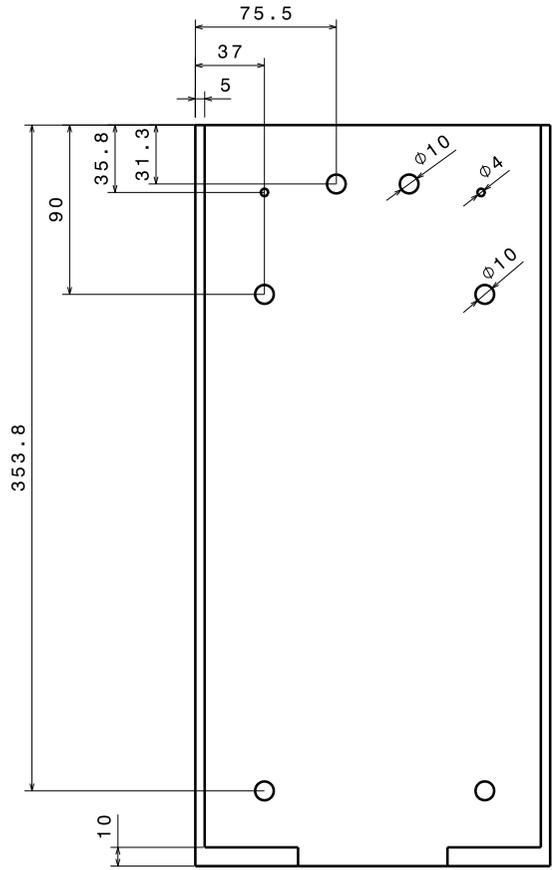
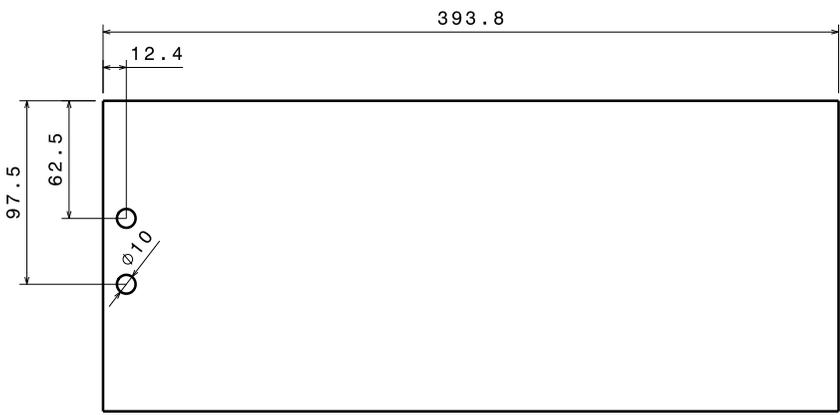
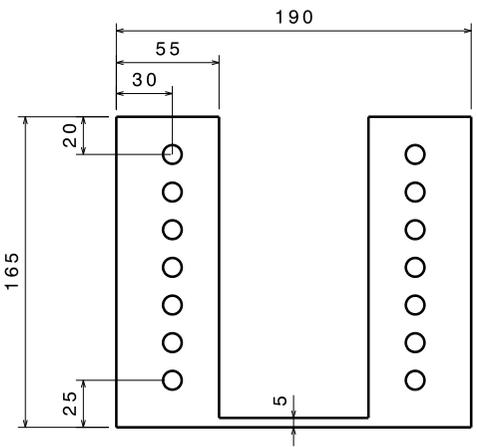
2



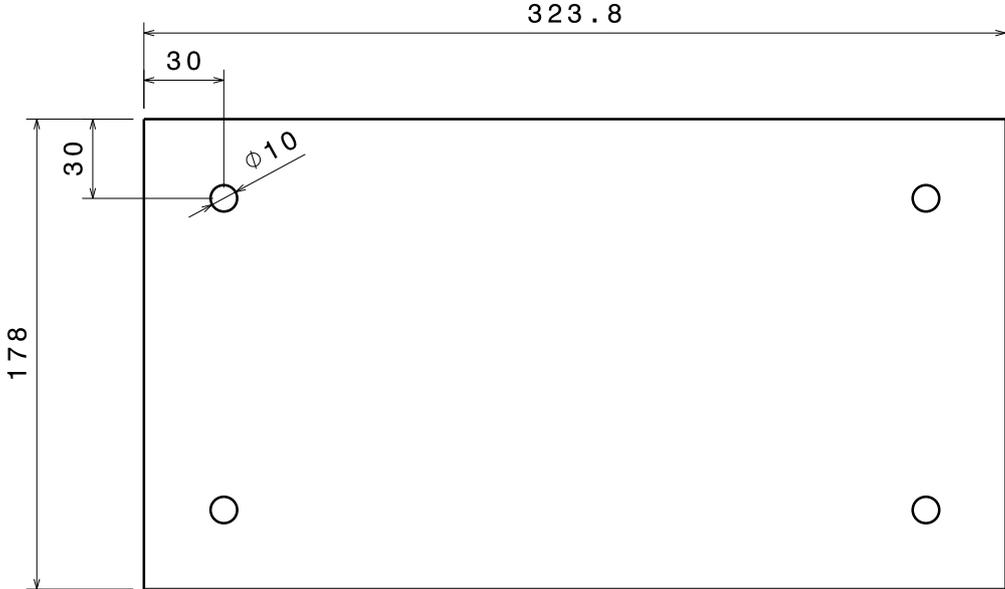
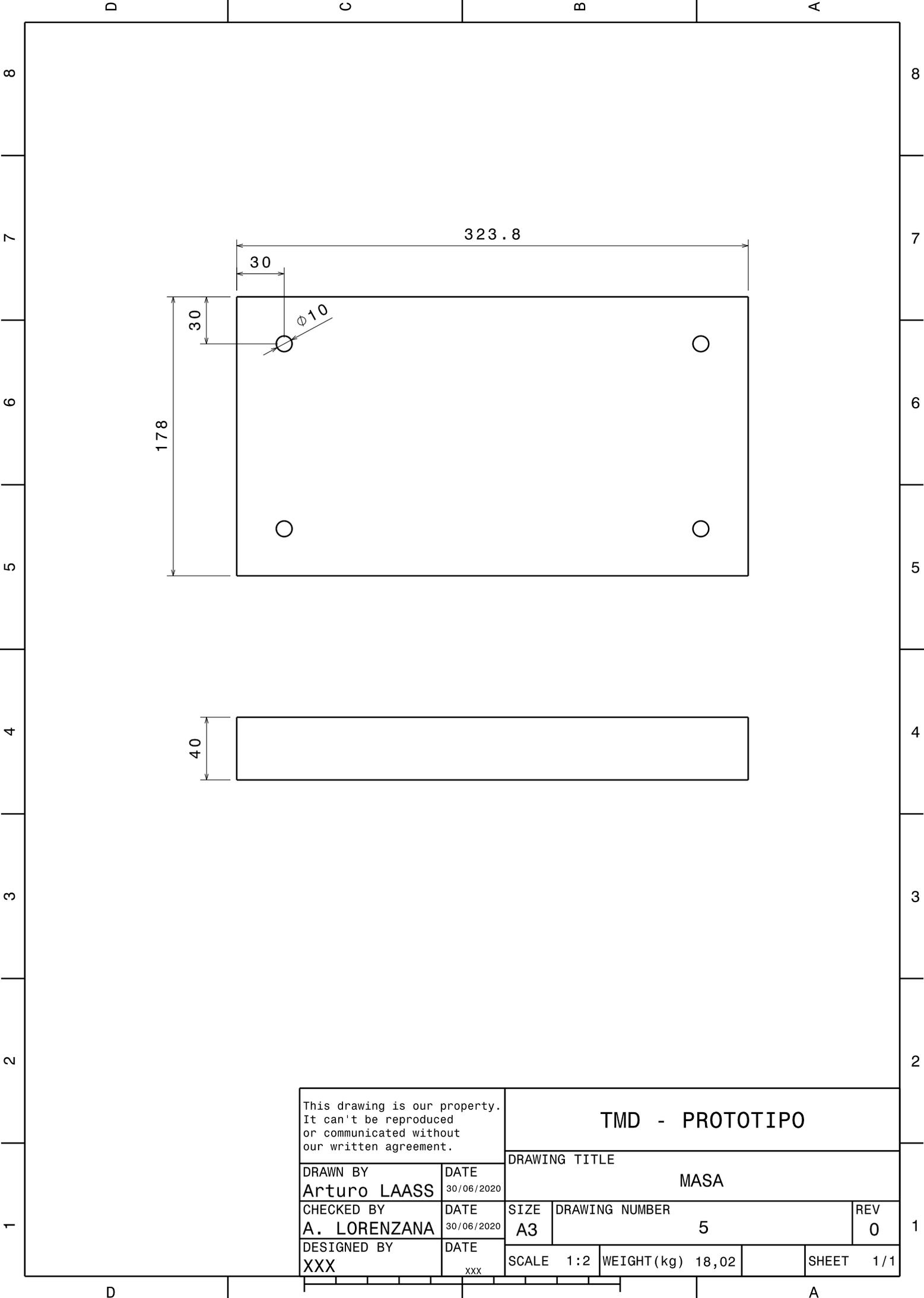
1

This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		TMD - Prototipo		
DRAWN BY Arturo LAASS		DRAWING TITLE BASE MOVIL		
DATE 30/06/2020	CHECKED BY A. LORENZANA	DATE 30/06/2020	SIZE A3	DRAWING NUMBER 3
DESIGNED BY XXX	DATE XXX	SCALE 1:2	WEIGHT(kg) XXX	REV 0
			SHEET	1/1

H G B A



This drawing is our property. It can't be reproduced or communicated without our written agreement.		DRAWING TITLE		
DRAWN BY Arturo LAASS		CUNA		
DATE 30/06/2020	SIZE A2	DRAWING NUMBER 4	REV 0	
CHECKED BY A. LORENZANA	DATE 30/06/2020	SCALE 1:2	WEIGHT (kg) 9,03	SHEET 1/1
DESIGNED BY XXX	DATE xxx			



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

TMD - PROTOTIPO

DRAWN BY
Arturo LAASS

DATE
30/06/2020

DRAWING TITLE
MASA

CHECKED BY
A. LORENZANA

DATE
30/06/2020

SIZE
A3

DRAWING NUMBER
5

REV
0

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SCALE 1:2 WEIGHT(kg) 18,02

SHEET 1/1

D

8

7

6

5

4

3

2

1

D

C

B

A

8

7

6

5

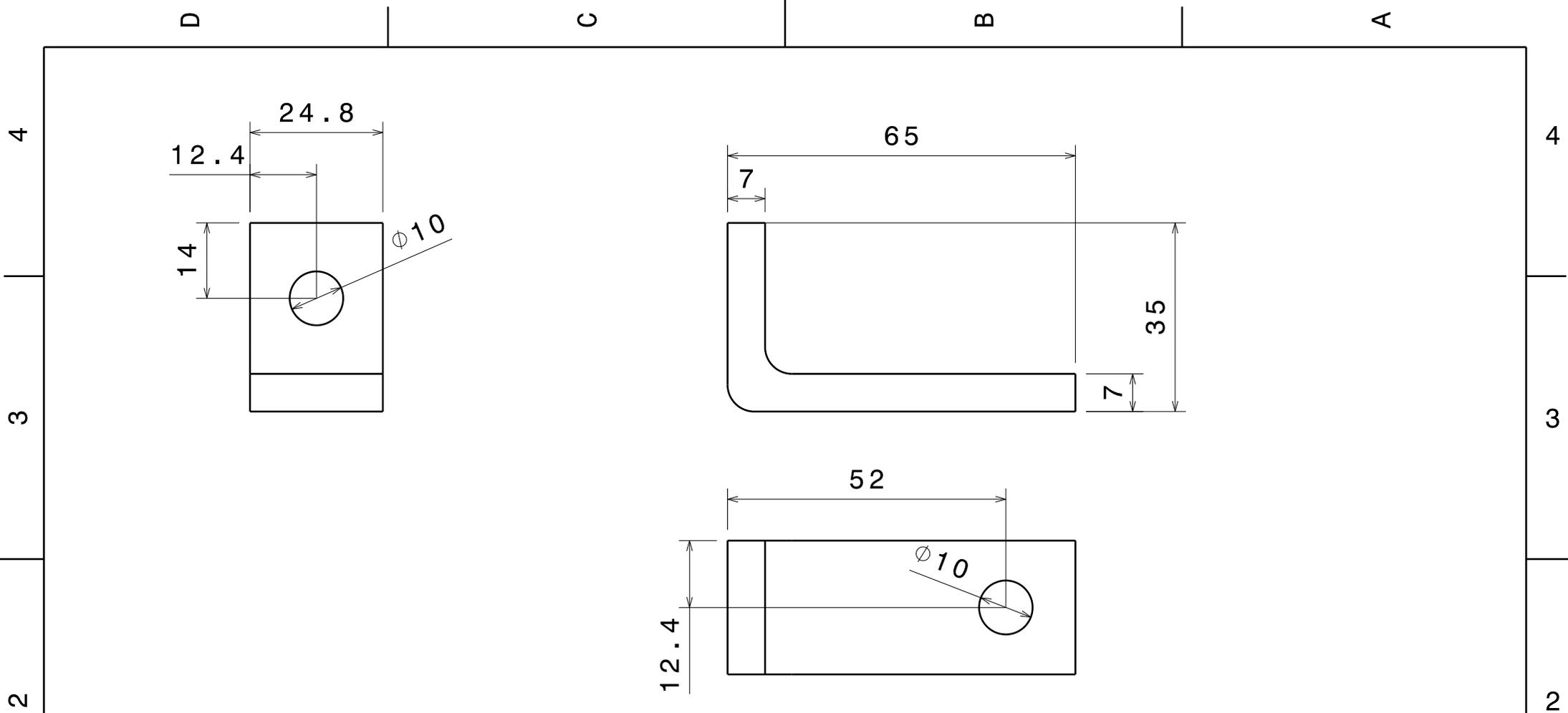
4

3

2

1

A



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

TMD - PROTOTIPO

DRAWN BY Arturo LAASS	DATE 30/06/2020
---------------------------------	--------------------

DRAWING TITLE
ESCUADRA FIN DE CARRERA

CHECKED BY A. LORENZANA	DATE 30/06/2020
-----------------------------------	--------------------

SIZE A4	DRAWING NUMBER 6	REV 0
-------------------	----------------------------	-----------------

DESIGNED BY XXX	DATE XXX
---------------------------	-------------

SCALE 1:1	WEIGHT (kg) XXX	SHEET 1/1
--------------	--------------------	--------------

D

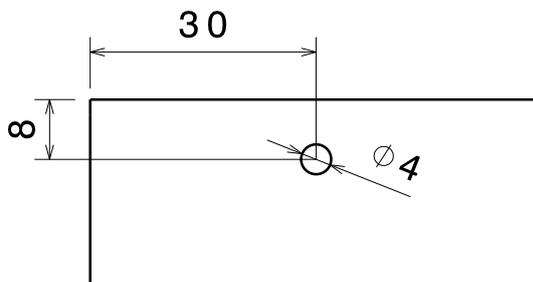
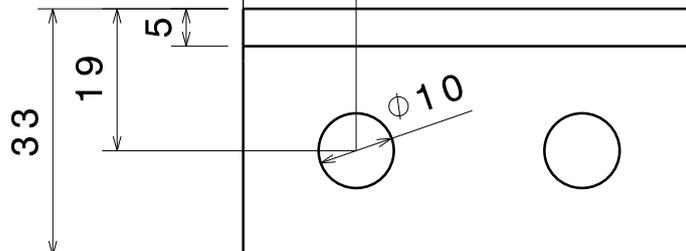
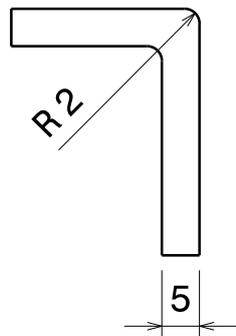
C

B

A

4

4



3

3

2

2

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

TMD - PROTOTIPO

DRAWING TITLE

SOPORTE MUELLES DERECHO

DRAWN BY
Arturo LAASS

DATE
30/06/2020

CHECKED BY
A. LORENZANA

DATE
30/06/2020

SIZE
A4

DRAWING NUMBER
7

REV
0

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SCALE **1:1**

WEIGHT (kg) **0,02**

SHEET **1/1**

1

1

D

A

D

C

B

A

4

4

3

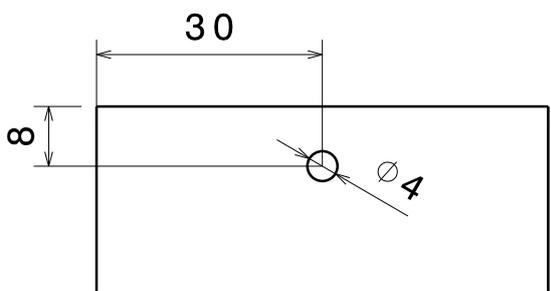
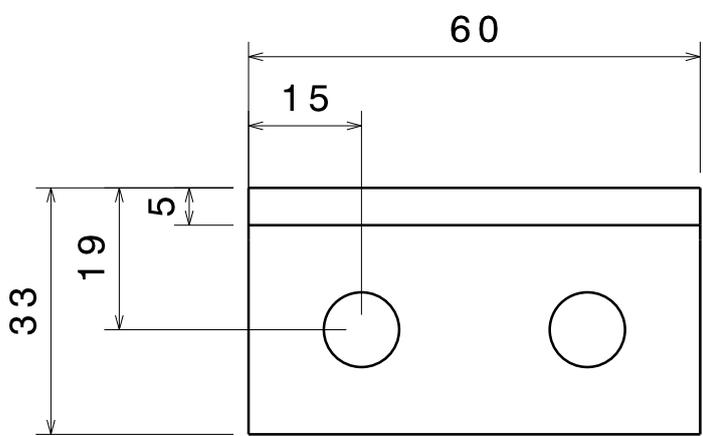
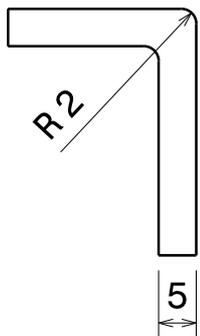
3

2

2

1

1



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

TMD - PROTOTIPO

DRAWING TITLE
SOPORTE MUELLES IZQUIERDO

DRAWN BY
Arturo LAASS

DATE
30/06/2020

CHECKED BY
A. LORENZANA

DATE
30/06/2020

SIZE
A4

DRAWING NUMBER
8

REV
0

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SCALE **1:1**

WEIGHT (kg) **0,02**

SHEET **1/1**

D

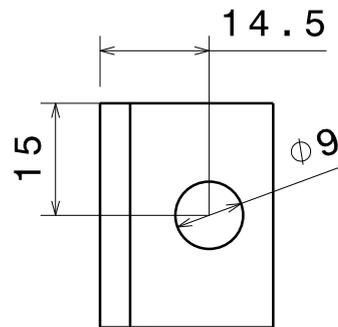
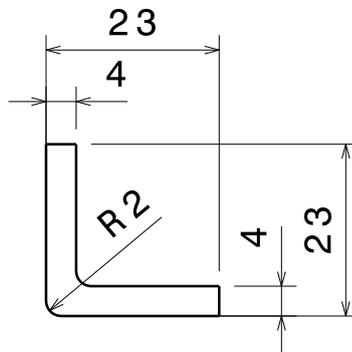
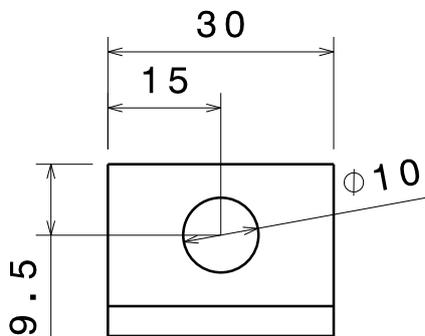
A

D

C

B

A



4

4

3

3

2

2

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

TMD - PROTOTIPO

DRAWING TITLE

ESCUADRA UNION AMORTIGUADOR

DRAWN BY
Arturo LAASS

DATE
30/06/2020

CHECKED BY
A. LORENZANA

DATE
30/06/2020

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SIZE
A4

DRAWING NUMBER

9

REV
0

SCALE **1:1**

WEIGHT (kg)

XXX

SHEET **1/1**

1

1

D

A

D

C

B

A

4

4

3

3

2

2

∅ 10

165

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

TMD - PROTOTIPO

DRAWING TITLE

VARILLA ROSCADA

DRAWN BY
Arturo LAASS

DATE
30/06/2020

CHECKED BY
A. LORENZANA

DATE
30/06/2020

SIZE
A4

DRAWING NUMBER
10

REV
0

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SCALE **1:2**

WEIGHT (kg) **XXX**

SHEET **1/1**

D

A

1

1

D

C

B

A

4

4

3

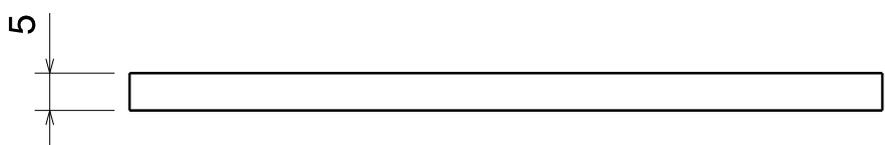
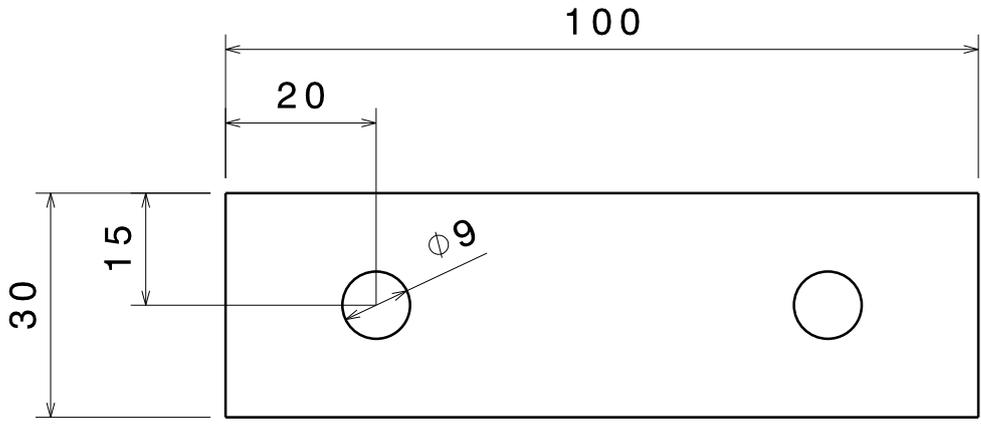
3

2

2

1

1



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

TMD - PROTOTIPO

DRAWING TITLE

TACO

DRAWN BY
Arturo LAASS

DATE
30/06/2020

CHECKED BY
A. LORENZANA

DATE
30/06/2020

SIZE
A4

DRAWING NUMBER
11

REV
0

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SCALE **1:1**

WEIGHT (kg) **XXX**

SHEET **1/1**

D

A

D

C

B

A

4

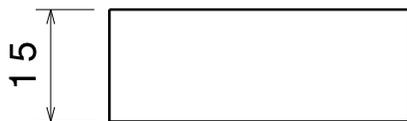
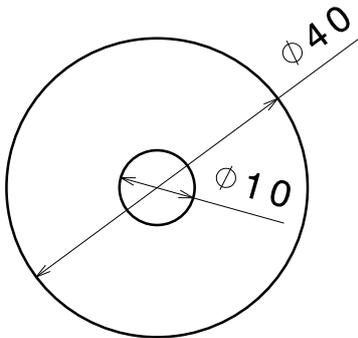
4

3

3

2

2



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

TMD - PROTOTIPO

DRAWING TITLE

TOPE GOMA HEMBRA

DRAWN BY
Arturo LAASS

DATE
30/06/2020

CHECKED BY
A. LORENZANA

DATE
30/06/2020

SIZE
A4

DRAWING NUMBER
12

REV
0

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SCALE **1:1** WEIGHT (kg) **XXX**

SHEET **1/1**

D

A

1

1

D

C

B

A

4

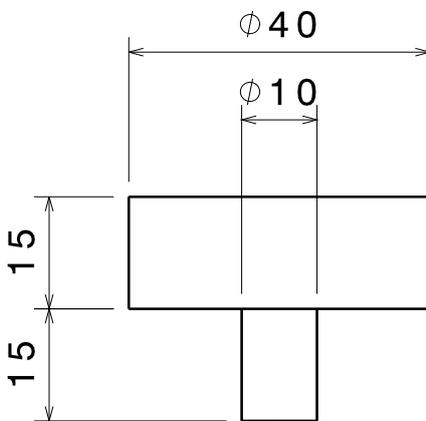
4

3

3

2

2



1

1

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

TMD - PROTOTIPO

DRAWING TITLE

TOPE GOMA MACHO

DRAWN BY
Arturo LAASS

DATE
30/06/2020

CHECKED BY
A. LORENZANA

DATE
30/06/2020

SIZE
A4

DRAWING NUMBER
13

REV
0

DESIGNED BY
XXX

DATE
XXX

SCALE **1:1**

WEIGHT (kg) **XXX**

SHEET **1/1**

D

A

