



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**Introducción a los dispositivos de fuerza  
constante. Tipología y pruebas de concepto de  
algunos casos.**

**Autor:**

**López Fernández, Rubén**

**Tutor(es):**

**Lorenzana Ibán, Antolín  
Foces Mediavilla, Antonio**

**Dpto. Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno y  
Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras**

**Valladolid, julio de 2020.**





## Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo principal el estudio de los diversos dispositivos de fuerza constante que existen y las aplicaciones que tienen en la actualidad. Para ello, se analizará su comportamiento físico y los fenómenos que lo originan. Buscando entender las diferencias entre estos dispositivos y los resortes convencionales se explicará ambos mundos enumerando características y diferencias.

Además, se prototiparán alguno de estos dispositivos a fin de estudiar su comportamiento de forma experimental. Para conseguir dicho objetivo, el estudio empleará tanto objetos al alcance de todos como herramientas de impresión aditiva del laboratorio tales como la impresora 3D y diversos softwares como Catia V5 y Cura.

**Palabras clave:** Resorte, fuerza constante, pandeo, giroide, impresión 3D

## Abstract

The current work aims at studying the different constant force devices that exist as well as their current applications. In order to do so, we will analyze their physics behavior and the phenomena that originate them. Trying to understand the differences between these devices and the conventional springs we will explain both worlds numerating their characteristics and differences.

Furthermore, we will prototype some of these devices in order to study their behavior through experimentation. In order to achieve this, the study will utilize both everyday objects such as additive printing tools from the laboratory such as the 3d printer as well as different softwares such as Catia V5 and Cura.

**Key words:** Spring, constant force, bucklying, gyroid, 3D printing





## INDICE

<b>1. Capítulo 1: Introducción y objetivos</b> .....	<b>1</b>
1.1. Motivación .....	1
1.2. Introducción.....	1
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Metodología.....	4
<b>2. Capítulo 2: Resorte común</b> .....	<b>5</b>
2.1. Resortes sometidos a torsión interna .....	7
2.1.1. Resortes helicoidales de compresión .....	9
2.1.2. Resortes helicoidales de tracción .....	10
2.1.3. Resortes de torsión .....	11
2.2. Resortes sometidos a flexión interna.....	12
2.2.1. Resortes de ballesta .....	12
2.2.2. Resortes en espiral .....	14
<b>3. Capítulo 3: Dispositivos de fuerza constante</b> .....	<b>19</b>
3.1. Dispositivos basados en efecto gravitatorio .....	20
3.2. Dispositivos basados en fleje con extremo libre .....	22
3.3. Sustentador constante de catenarias.....	27
3.4. Dispositivos basados en imanes permanentes .....	30
3.5. Dispositivos basados en pandeo.....	33
3.5.1. Pandeo de Euler .....	35
3.5.2. Dispositivos basados en fenómeno snap-through .....	36
3.5.2.1. Efecto snap-through sin retorno .....	38
3.5.2.2. Efecto snap-through con retorno .....	39
3.5.3. Estructuras giroidales .....	45
<b>4. Capítulo 4: Prototipado de dispositivos de fuerza constante</b> .....	<b>49</b>
4.1. Prototipado de un dispositivo en espiral.....	49
4.2. Prototipado de un dispositivo basado en el fenómeno snap-through .....	54
4.2.1. Pruebas con el casquete .....	57
4.2.2. Pruebas con las bóvedas.....	62
<b>5. Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras</b> .....	<b>75</b>
5.1. Conclusiones .....	75
5.2. Consideraciones adicionales.....	75
5.3. Líneas futuras.....	76
5.3.1. Prototipado del gyroid .....	76
5.3.2. Estudio del prototipo obtenido .....	79
5.3.3. Prototipado del dispositivo magnético.....	79

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gráfica fuerza-desplazamiento de un resorte [1]	2
Figura 2. Comparación entre un resorte común y dispositivo en espiral [2]	3
Figura 3. Gráfica del comportamiento del módulo de Young [3]	6
Figura 4. Torsión interna de un resorte helicoidal [4]	7
Figura 5. Estado tensional en la sección del alambre de un resorte [5]	8
Figura 6. Resorte helicoidal cilíndrico compresión [6]	9
Figura 7. Resorte helicoidal cónico de compresión [7]	10
Figura 8. Precarga necesaria para comenzar el desplazamiento [4]	11
Figura 9. Resorte helicoidal de tracción [8]	11
Figura 10. Resorte de torsión [9]	12
Figura 11. Resorte de ballesta [10]	12
Figura 12. Análisis de la ballesta simplificado con cargas (izquierda) y como sólido compacto (derecha) [11]	13
Figura 13. Sección de la ballesta compuesta por placas [11]	14
Figura 14. Resorte en espiral [12]	15
Figura 15. Esquema de un resorte en espiral seccionado [13]	15
Figura 16. Resorte en espiral unido al volante de un reloj de cuerda [14]	16
Figura 17. Fenómeno de histéresis en resortes sometido a flexión [11]	17
Figura 18. Tendido de catenarias sobre las vías del tren [15]	20
Figura 19. Pantógrafo de un tren [16]	20
Figura 20. Imagen detallada del conjunto de compensación (izquierda) y esquema de funcionamiento de la polea (derecha) [43]	21
Figura 21. Dispositivo fuerza constante en espiral [17]	22
Figura 22. Esquema de funcionamiento del fleje [18]	23
Figura 23. Gráfica de fuerza-desplazamiento de diferentes modelos [2]	23
Figura 24. Dispositivo de fuerza constante en espiral (izquierda) y resorte en espiral (derecha)	24
Figura 25. Montaje en tándem [18]	25
Figura 26. Montaje en polea [17]	26
Figura 27. Aplicaciones de este dispositivo: Equilibrado de objetos pesados (izquierda), regulador de posición de objetos sustentados (centro), empuje de objetos (derecha) [2]	26
Figura 28. Dispositivo en espiral en la escobilla de una herramienta [19]	27
Figura 29. Sistema de compensado compacto, formado por un resorte en espiral y una leva [20]	28
Figura 30. Funcionamiento interno del sistema de tensado [20]	29
Figura 31. Gráfica de par-radio de la leva (izquierda) y su resultante en la gráfica de fuerza-desplazamiento útil (derecha) [20]	29
Figura 32. Dispositivo de imanes permanentes [21]	30
Figura 33. Composición del interior de un dispositivo de fuerza constante magnético [21]	30
Figura 34. Comparativa de gráficas de fuerza-desplazamiento de los resortes convencionales (izquierda) y de los dispositivos magnéticos MagSpring (derecha) [21]	31
Figura 35. Fuerza-desplazamiento del dispositivo magnético en función de su dirección de empleo [21]	31
Figura 36. Pandeo por compresión de una viga [22]	33
Figura 37. Estados de equilibrio estable (izquierda), neutro (derecha) o inestable (derecha) [30]	34
Figura 38. Diagrama de una viga biapoyada sometida a una carga P (arriba) y estado de equilibrio sobre una sección de la propia viga (abajo) [23]	35



Figura 39 Gráfica de desplazamiento transversal del punto medio frente a cargas de compresión [24]	36
Figura 40. Gráfica de carga desplazamiento de una barra curva que ha sufrido el fenómeno snap-through [25]	37
Figura 41. Bebedero portátil retráctil. Se presenta cerrado (izquierda) y abierto (derecha)	38
Figura 42. Pajitas de plástico deformables [26]	39
Figura 43. Pestaña del circuito de apagado de una tetera eléctrica [27]	39
Figura 44. Lata dispensadora de aceite [28]	40
Figura 45. Jumping Poppers [29]	40
Figura 46. Casquete con forma esférica [30]	41
Figura 47. Diagrama carga-desplazamiento de un casquete bajo el efecto snap-through [30]	41
Figura 48. Resorte de platillo [31]	42
Figura 49. Acoplamiento en paralelo [32]	43
Figura 50. Acoplamiento en serie [32]	43
Figura 51. Acoplamiento en serie-paralelo [32]	44
Figura 52. Gráfica fuerza-desplazamiento de los resortes de platillo [33]	44
Figura 53. Arandelas belleville [33]	45
Figura 54. Estructura giroidal [34]	46
Figura 55. Comparativa de diferentes estructuras TPMS en función de las capas por cada celda unidad [34]	46
Figura 56. Gráfica fuerza-desplazamiento de una estructura giroidal sometida a compresión. Cada una de las líneas corresponde a un porcentaje de densidad, como indica la leyenda superior [34]	47
Figura 57. Gráfica fuerza- desplazamiento de dos estructuras giroidales dependiendo del relleno: 7% en azul y 14% en granate [34]	48
Figura 58. Estructura giroidal deformada bajo carga de compresión [35]	48
Figura 59. Objetos de uso cotidiano empleados para el prototipo: Fidget Spinner [36] y mecanismo recogecables de aspiradora [37]	50
Figura 60. Prototipo antes del montaje	51
Figura 61. Resorte en espiral antes del montaje	51
Figura 62. Primer tramo de desplazamiento del dispositivo	52
Figura 63. Componente de rigidez de una barra empotrada [24]	52
Figura 64 Dispositivo durante su etapa de fuerza constante y su representación gráfica	53
Figura 65. Etapas del proceso de impresión en una impresora 3D	55
Figura 66. Cuadro de diálogo de software CURA	55
Figura 67. Impresora 3D Creality Ender 3 [38]	56
Figura 68. Casquete diseñado en Catia	57
Figura 69. Casquete impreso	59
Figura 70. Casquete diseñado en Catia con un taladro en su parte central	60
Figura 71. Dispositivo formado por muelles platillo [39]	60
Figura 72. Casquete con taladro impreso	61
Figura 73. Diferentes pruebas de impresión	61
Figura 74. La cúpula y la estructura de doble curvatura [40]	62
Figura 75. Bóveda y estructura curvatura simple [40]	63
Figura 76. Diseño de Bóveda realizado en Catia	63
Figura 77. Bóveda impresa	65
Figura 78. Acoplamiento de bóvedas en Catia	66
Figura 79. Croquis del diseño de la bóveda	66
Figura 80. Diferentes combinaciones de bóvedas a medida que el diseño avanzaba	67

<i>Figura 81. Prototipo impreso</i>	67
<i>Figura 82. Diferentes formas de pandeo por fenómeno snap-through de una barra curva [25]</i>	68
<i>Figura 83. Diferentes diseños de apilamiento de bóvedas durante la etapa de pruebas</i>	69
<i>Figura 84. Diseño final de Catia del dispositivo</i>	70
<i>Figura 85. Dispositivo sobre la superficie de impresión del software CURA.</i>	71
<i>Figura 86. Diversas pruebas de impresión</i>	71
<i>Figura 87. Diseño final impreso</i>	72
<i>Figura 88. Dispositivo impreso bajo carga de compresión en uno de sus extremos.</i>	72
<i>Figura 89. Prueba de célula giroidal</i>	77
<i>Figura 90. Estructura hecha de filamento Ninjaflex donde se aprecia las propiedades elásticas [41]</i>	78
<i>Figura 91. Sucesivo colapso de las capas de un cubo giroidal con células de 4,5 mm de lado a medida que la estructura cede ante una carga de compresión [42]</i>	78
<i>Figura 92. Pruebas de concepto con imanes desarrolladas en el laboratorio</i>	80





## 1. Capítulo 1: Introducción y objetivos

### 1.1. Motivación

El presente Trabajo Fin de Grado corresponde al broche final de mis estudios en el Grado de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Valladolid tras varios años en la escuela. Esta etapa me ha servido para adquirir conocimientos esenciales para mi futuro laboral y formarme para una profesión tan esencial como la de ingeniero.

La elección de este estudio se debe a dos factores decisivos: el primero es la importancia que tiene en la vida laboral de un ingeniero industrial poseer las capacidades para afrontar proyectos de diseño. Cuando el objetivo es desarrollar algo nuevo es necesario atravesar diferentes fases: lluvia de ideas, prueba y error, análisis de fallo, retroalimentación, etc. Este estudio me ayudará a adquirir estas capacidades al plantear como objetivo la creación de un prototipo desarrollado completamente en el laboratorio con una tecnología reciente sobre la que no poseía experiencia previa.

El segundo motivo viene relacionado con esto último. En la década que acaba de comenzar, al igual que los últimos años de la previa, nos encontramos comenzando a vivir la llamada “Cuarta Revolución Industrial”. Está enfocada en el desarrollo de los sistemas físicos-cibernéticos, en el “internet de las cosas” donde todos los productos y herramientas se encuentran interconectados de manera inteligente, otorgando capacidades de desarrollo no imaginadas hasta la fecha. Dentro de este aspecto encontramos un modelo de fabricación reciente: la fabricación aditiva mediante impresión 3D. Consiste en la adición de material de manera controlada, conformando el objeto capa por capa de manera automatizada y completamente independiente, donde el usuario solo tiene que otorgar a la herramienta los datos de diseño previos, otorgando flexibilidad y mejora sustancial de la calidad final. Esta tecnología posee un enorme potencial y la oportunidad de poder desarrollar mis aptitudes con ella en la realización de este TFG fue diferencial a la hora de decantarme por uno.

### 1.2. Introducción

Un resorte o muelle es un elemento mecánico ampliamente empleado en la industria desde hace siglos. Posee una geometría elástica que le permite variar su forma absorbiendo energía para posteriormente liberarla cuando deja de resistir una fuerza externa. En el diseño de la mayoría de los elementos mecánicos es deseable que la deformación producida por el estado de cargas actuantes sea lo más baja posible.

Sin embargo, los resortes mecánicos cumplen la misión de elementos flexibles pudiendo sufrir grandes deformaciones por efecto de cargas externas volviendo a recuperar su forma inicial cuando cesa la acción de las mismas, es decir, presentan una gran elasticidad.

Esta relación entre fuerza y desplazamiento va siempre relacionada de forma prácticamente proporcional. Es fácil comprender que cuanto mayor fuerza se aplique mayores serán los desplazamientos producidos. O lo que es lo mismo, cuanto mayor es el desplazamiento del resorte durante el trabajo mayor fuerza es necesario emplear. Eso se ve muy bien en una Figura 1 donde se relaciona la fuerza con la elongación.

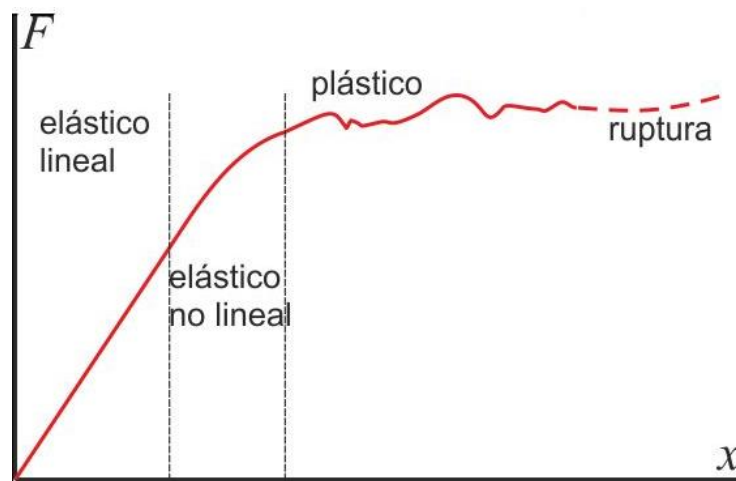


Figura 1. Gráfica fuerza-desplazamiento de un resorte [1]

La gráfica crece linealmente moviéndose en una zona denominada región elástica del material. En ese periodo el resorte es capaz de recuperar su forma inicial cuando la fuerza actuante desaparece. Si la carga crece en mayor medida se alcanza el límite de proporcionalidad, entrando en la región elástica no lineal. En ella, la línea pasa de tener una pendiente constante debido al crecimiento en igual medida tanto del eje de ordenadas como de abscisas a ser una curva debido al incremento desigual.

Si se sigue aumentando la carga soportada por el resorte se atraviesa la zona plástica. A partir de ahí el material ya no recupera su forma y se aproxima al punto donde se acaba produciendo una fractura o, en su defecto, un comportamiento irreversible, dando lugar a la plastificación del material.

Por el contrario, existen numerosos dispositivos que presentan una curva alargamiento-deformación diferente. Son los llamados dispositivos de fuerza constante. Estos dispositivos, como su propio nombre indican, se oponen de manera homogénea a la fuerza que les empuja durante todo su recorrido útil.

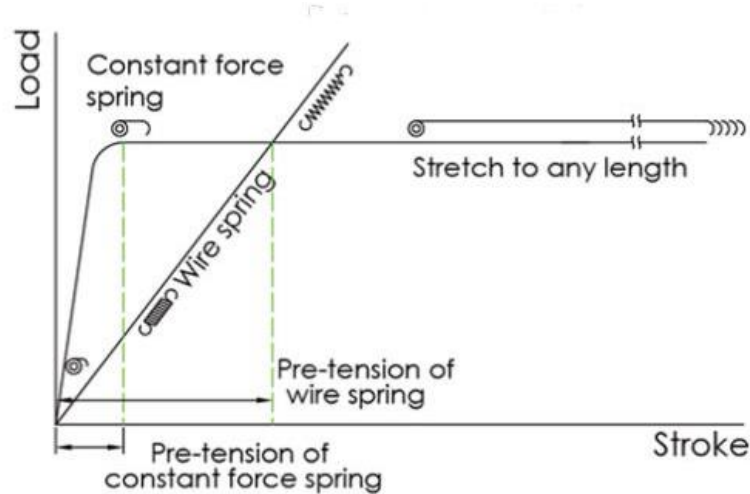


Figura 2. Comparación entre un resorte común y dispositivo en espiral [2]

En la Figura 2 se comparan los dos elementos comentados. El primero es un resorte de tracción comúnmente conocido que, como se ha explicado anteriormente, posee una gráfica creciente donde la carga ejercida y el desplazamiento obtenido son dependientes entre sí y crecen de manera proporcional.

A su vez se ilustra la curva de los dispositivos objetos de este estudio. Se trata de una línea cuasiconstante a lo largo de todo el recorrido útil del objeto. Este comportamiento permite a estos dispositivos obtener un alargamiento máximo aplicando siempre la misma cantidad de fuerza, sin necesidad de incrementos. Este efecto se obtiene de forma natural gracias a la geometría de cada uno de ellos, de modo que ninguno de los que se verán necesita ser conectado a una fuente de energía externa. Es por eso que son también dispositivos autónomos. Este comportamiento es de gran utilidad en las aplicaciones y casos que serán expuestos a lo largo de esta documentación.

### 1.3. Objetivos

El objetivo de este estudio será tener una visión global sobre los tipos de resortes comunes empleados en la actualidad así como de los dispositivos de fuerza constante existentes. En cada uno de los capítulos se hablará del comportamiento físico detrás de su funcionamiento y de las diferentes aplicaciones que tiene cada uno de ellos.

En el apartado principal del estudio, se prototipará un dispositivo de fuerza constante y se realizará la prueba de concepto de alguno de ellos. Para realizar este propósito se emplearán tanto materiales de uso común como instrumentos técnicos disponibles en el laboratorio como una impresora 3D junto con softwares de diseño asistido por ordenador (CAD).

Debido a la situación de Alerta Sanitaria acaecida durante estos últimos meses algunos objetivos del TFG se han visto afectados, de modo que ha sido necesario tomar otras alternativas como ya se expondrá a lo largo del documento.

#### 1.4. Metodología

En este primer capítulo aparece la justificación del Trabajo de Fin de Grado junto con los objetivos planteados y la metodología empleada.

En el segundo de ellos se dará un enfoque general a los resortes comunes ya que se encuentran íntimamente ligados con los dispositivos de fuerza constante objetos de este estudio.

A continuación, en el tercer capítulo se recoge los dispositivos de fuerza constante existentes en la actualidad, explicando su comportamiento, sus características y sus diversas aplicaciones en la industria.

En el cuarto apartado se realizará el prototipado y prueba de concepto de alguno de ellos empleando la impresión 3D y diversas herramientas disponibles.

Por último, se sacarán las conclusiones pertinentes y se hablará sobre líneas de trabajo futuras.



## 2. Capítulo 2: Resorte común

Un resorte consiste en un elemento mecánico que puede deformarse de manera no permanente absorbiendo energía elástica para después restituirla, total o parcialmente, en función de su característica de amortiguamiento. Se trata de un elemento comúnmente usado en la industria por su facilidad de montaje y el amplio espectro de aplicaciones que posee. Para su fabricación se emplean aceros de gran elasticidad (acero al carbono, acero al cromo-vanadio, acero al cromo-silicio, etc) aunque para algunas aplicaciones especiales puede utilizarse el cobre endurecido y el latón.

Debido al elevado valor de la maquinaria en la industria los resortes han sido estudiados con meticulosidad. Se producen en masa y se han determinado configuraciones ingeniosas para lograr una variedad de propiedades deseadas.

En la región elástica explicada anteriormente donde la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria a la que está sometido el material es lineal y constante, el comportamiento físico de los resortes se basa en Ley de Hooke (1) donde se relaciona la fuerza ejercida con el alargamiento producido. Esta fuerza siempre produce tensiones normales, es decir, en la misma dirección que la de desplazamiento del resorte:

$$F = -k * x ; k = \frac{AE}{L} \rightarrow F = -\frac{AE}{L} * x \quad (1)$$

Dónde  $F$  es la fuerza ejercida para superar la resistencia (N/m),  $x$  es la elongación provocada (m) y  $k$  es la constante elástica del resorte, solo dependiente de la forma y el material con el que se haya construido. Incluye un signo negativo ya que con él se indica que la dirección de la fuerza que ejerce debido a su rigidez es contraria a la producida por la fuerza exterior.

Esta constante está también definida por el *Módulo de Young* ( $E$ ), parámetro el cual caracteriza el comportamiento de un material elástico en función de la dirección de la fuerza a la que esté sometido siempre que ésta sea en la dirección de su eje, es decir, tracción o compresión.

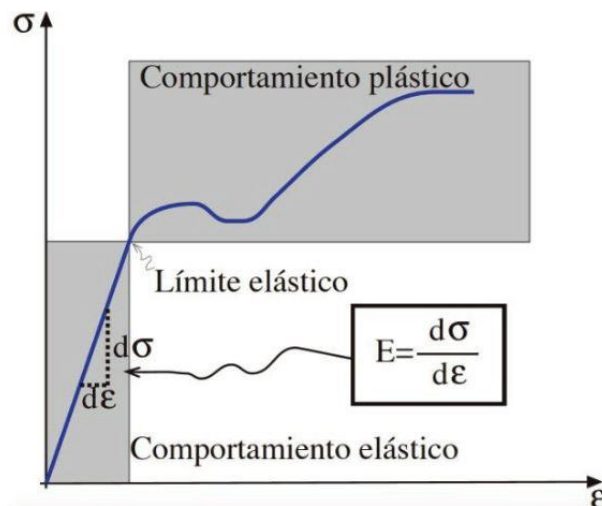


Figura 3. Gráfica del comportamiento del módulo de Young [3]

Tratándose de un material elástico, el módulo de Young (2) se define como el cociente entre la tensión ( $\sigma$ ) ejercida sobre el área de la sección transversal del elemento y la deformación unitaria ( $\epsilon$ ) (Figura 3) entendida como la variación de longitud con respecto a la longitud inicial que aparece en una barra cuando esta se somete a tracción o compresión. Además, cada material posee su propio módulo por lo que cada uno debe llevar consigo su estudio.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/S}{\Delta L/L} \quad (2)$$

Dónde  $F$  es la fuerza aplicada (N),  $S$  es la superficie sobre la que se aplica la fuerza de forma perpendicular ( $m^2$ ), y  $\Delta L$  es la variación de longitud (m) respecto a la longitud inicial  $L$  de la barra que estamos ensayando.

Para el resorte de torsión, su fórmula (3) varía ya que las tensiones provocadas por la fuerza exterior son tangenciales, pero la interpretación es la misma:

$$\tau = -k * \theta \quad (3)$$

Dónde  $\tau$  es el par torsor ejercido (Nm/m) y  $\theta$  es el ángulo girado desde la posición inicial (rad). Por su parte,  $k$  es la constante elástica del resorte equivalente a la torsión. Se define como el esfuerzo de torsión requerido para girar el resorte un ángulo de 1 rad y se mide en Nm/rad. El signo negativo hace referencia a que la dirección de esta fuerza es contraria a la dirección de giro que producida al aplicar el par de torsión.

En los sucesivos apartados se hará una división en dos grandes grupos donde se engloba cada uno de los resortes existentes. El primero grupo corresponde a los resortes que soportan esfuerzos de torsión. El segundo, engloba a los resortes que sufren internamente esfuerzos flectores.

Centrándose en el comportamiento interno de la geometría del resorte, existen dos familias generales en las que agrupar los diferentes tipos. La primera familia la componen los resortes que sufren tensiones tangenciales en su sección interna. Aquí se engloban los nombrados resortes de tracción/compresión debido a su geometría helicoidal y el propio resorte de torsión. Por otro lado, la segunda gran familia la componen los resortes en espiral y los resortes de ballesta. Estos se encuentran en un grupo propio debido a que bajo un estado de cargas su geometría sufre, al contrario que el grupo anterior, esfuerzos de flexión.

Teniendo clara esta diferenciación, se pasa a dar una tipología sobre cada uno de ellos.

## 2.1. Resortes sometidos a torsión interna

Los resortes sometidos a torsión interna son aquellos cuya geometría está formada por un material alámbrico dispuesto en forma helicoidal, ya sea este de perfil circular, cuadrado, etc.

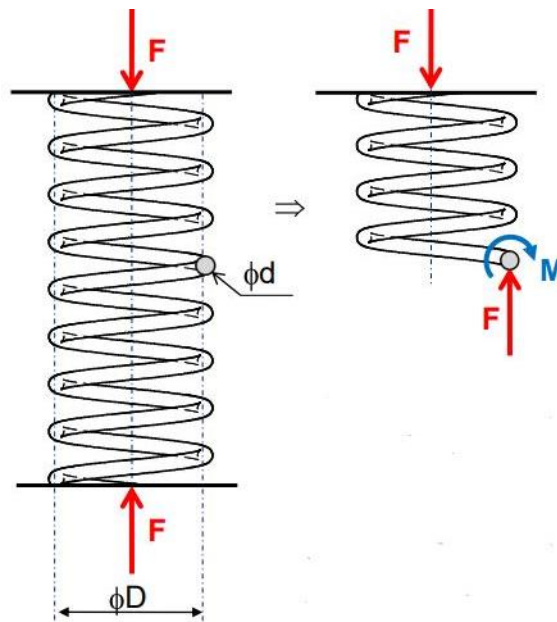


Figura 4. Torsión interna de un resorte helicoidal [4]

Pensando en el funcionamiento de este tipo de resortes centrándose en una sección cualquiera perpendicular la dirección del filamento se refleja que, durante la compresión, las espiras se comprimen siguiendo la dirección marcada por la flecha roja (Figura 4). Este movimiento genera un esfuerzo torsor en la geometría del perfil tal y como ilustra la flecha en azul.

Este momento torsor puro (Figura 5a) en las espiras del muelle, junto con el esfuerzo cortante generado (Figura 5b), genera una concentración desigual de tensiones en las fibras más interiores de la sección (Figura 5c).

Esto se produce como consecuencia de la diferencia de longitudes entre las fibras interiores y exteriores del alambre. En la zona interior ambos esfuerzos se suman, aumentando su concentración mientras que en el exterior se contrarrestan.

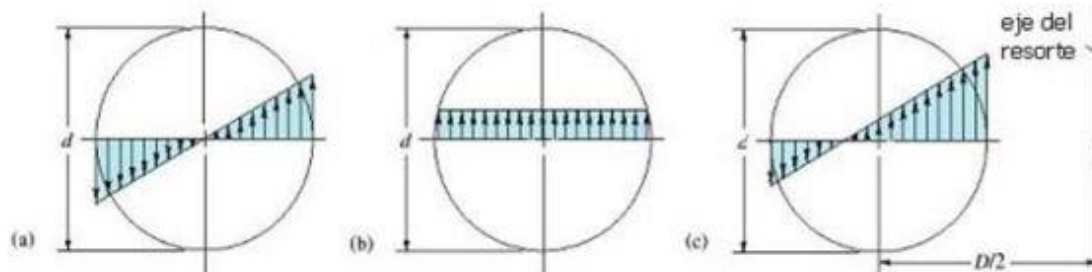


Figura 5. Estado tensional en la sección del alambre de un resorte [5]

Esto hace que las características del resorte dependan de su módulo de corte. El *módulo de corte* ( $G$ ) del material es una constante que determina la variación de forma de un material elástico cuando se le aplica un esfuerzo cortante. Esa es la diferencia principal con el *módulo de Young* ( $E$ ). Mientras que éste caracteriza la deformación de un material ante esfuerzos axiales, el módulo de corte lo hace ante esfuerzos cortantes.

Para definir  $G$  generalmente se emplean materiales lineales e isotrópicos. Un material es lineal cuando el módulo de elasticidad es constante y no depende del grado de deformación. Además, es isotrópico porque este módulo no depende de la dirección del espacio, es decir, tiene el mismo comportamiento en cualquiera de las direcciones en la que se le aplique desplazamiento.

En ese caso, el módulo de corte tiene la forma definida por la ecuación 4:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4)$$

Dónde  $E$  es el módulo de Young, y  $\nu$  es el coeficiente de Poisson. Este coeficiente es una constante que mide la relación entre el alargamiento longitudinal que sufre un material elástico cuando está sometido una fuerza en la dirección de su eje principal y el estrechamiento de la sección en la dirección perpendicular a esa fuerza.

Este valor coincide con el cociente de deformaciones, de tal forma que la fórmula (5) que habitualmente se usa para el coeficiente de Poisson es:

$$\nu = - \frac{\epsilon_{transversal}}{\epsilon_{longitudinal}} \quad (5)$$

Dónde  $\epsilon$  es la deformación que sufre la probeta durante el ensayo. Los resortes que se encuentran dentro de esta clasificación son diversos.



De este modo, conocido el módulo de corte del material del que está fabricado las espiras del muelle, existe una expresión (6) que permite calcular de manera directa la constante elástica del muelle, con la que aplicar seguidamente la Ley de Hooke.

$$k = \frac{G * d^4}{8 * D^3 * N} \quad (6)$$

Siendo D el diámetro medio del resorte, d el diámetro de cada una de las espiras y N el número de espiras existentes.

### 2.1.1. Resortes helicoidales de compresión

Los resortes de compresión están destinados a soportar esfuerzos de choque. Esto les permite disminuir su longitud cuando se aumenta la fuerza ejercida sobre ellos, convirtiéndose en los dispositivos de almacenamiento de energía disponible más eficientes. Representan la configuración más común utilizada en el mercado actual. Se caracteriza por poseer una mayor longitud en reposo que durante el trabajo. Deben fabricarse con altos estándares de calidad y cumplir ciertos requisitos principales como son: contar con una elevada resistencia máxima de fluencia y de fatiga, así como tener un bajo módulo de elasticidad. Entre los más representativos se pueden encontrar diferentes modelos:

Resorte helicoidal cilíndrico: Este tipo de resorte es de uso general, utilizándose en válvulas, engrasadores, amortiguadores, etc. Está formado por un hilo de acero de sección redonda, cuadrada u ovalada, enrollado en forma de hélice cilíndrica a la izquierda o a la derecha, y a su vez con paso uniforme o variable. (Figura 6)



Figura 6. Resorte helicoidal cilíndrico compresión [6]

Para conseguir un buen apoyo y un funcionamiento correcto, los extremos del resorte han de presentar superficies de apoyo planas y perpendiculares a su eje; por este motivo las dos espiras de los extremos (espiras de apoyo) están más próximas entre sí, de forma que se disminuye el paso. Un solo resorte puede presentar diferentes pasos en su geometría a fin de conseguir comportamientos que se adecúen más a su uso.

Resorte helicoidal cónico de compresión: Este tipo de resortes se caracteriza porque la compresión a cada paso no es proporcional. Al variar el diámetro de cada uno, la longitud del resorte varía disminuyendo de manera directamente proporcional (Figura 7). Posee la característica de que, si se conoce el espacio disponible durante el funcionamiento, podemos reducir en gran medida el diámetro del resorte, ganando espacio, por lo que les otorga ventaja frente a otros modelos.



*Figura 7. Resorte helicoidal cónico de compresión [7]*

Además, como el hilo de cada paso se enrolla dentro del hilo del paso anterior al no tener el mismo diámetro y no superponerse, se produce un rozamiento entre ellos al deslizarse. Esta fricción generada podrá ser utilizada para amortiguar vibraciones u otras perturbaciones transitorias indeseadas. Por ello, no es recomendable emplearlo para trabajos cíclicos. Sin embargo, resulta muy útil en amortiguamientos de fuerzas de choque de gran intensidad en un corto recorrido, como puede ser los amortiguadores de los vagones de ferrocarril.

### 2.1.2. Resortes helicoidales de tracción

Un resorte helicoidal de tracción está diseñado para oponerse a fuerzas de extensión que tratan de producir alargamiento en la dirección de su eje. Este ejerce una oposición hacia su interior, haciendo que la longitud en reposo sea menor que durante el trabajo para que su posición natural sea comprimida. De este modo el paso de las espiras es igual al diámetro del hilo.

La mayoría de este tipo de resortes incluye una pretensión inicial que produce la necesidad de alcanzar determinada fuerza para que las vueltas del resorte comiencen a despegarse, venciendo la fuerza interna.

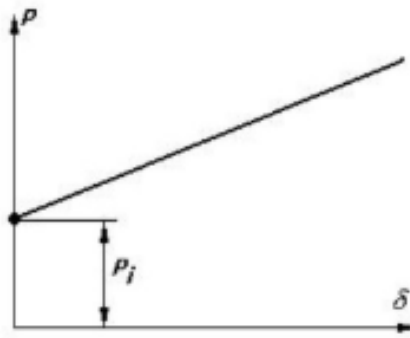


Figura 8. Precarga necesaria para comenzar el desplazamiento [4]

Como el desplazamiento no se obtiene desde el instante inicial en el que comienza la carga, se produce una gráfica como la de la Figura 8. Esta carga previamente incorporada puede ajustarse dentro de ciertos límites y su magnitud se reduce a medida que el índice del resorte aumenta.



Figura 9. Resorte helicoidal de tracción [8]

Por su modo de acción, estos resortes presentan sus extremos curvados a modo de gancho (Figura 9) cuya función es la de agarrarse al elemento externo que esté ejerciendo la fuerza de tracción.

Los más comunes serían: ganchos de centros cruzados; extremos reducidos con ganchos pivotantes; ganchos extendidos para maquinaria; ganchos estándar para maquinaria; barras con ganchos; ganchos expandidos; extremos rectangulares; extremos en forma de gota; inserciones roscadas; ganchos en forma de "V".

### 2.1.3. Resortes de torsión

El segundo gran grupo de los resortes que internamente trabajan a flexión se en los resortes de torsión. Estos se deforman al ser sometidos por sus extremos a un par torsor.



Figura 10. Resorte de torsión [9]

Están formados por un hilo de acero enrollado en forma de hélice con sus dos extremos libres (Figura 10). Estos pueden doblarse o moldearse en forma de gancho dependiendo de las necesidades de aplicación. Se utilizan en una gran cantidad de aplicaciones, como pueden ser bisagras de puertas, electrodomésticos, juguetes, en cualquier aplicación que necesite de un par torsor.

## 2.2. Resortes sometidos a flexión interna

Esta familia de resortes se caracteriza por poseer una geometría compuesta por una lámina o fleje enrollada sobre sí misma como ocurre en los resortes de torsión o agrupando varias de estas láminas y apilándolas una sobre otra, como en los resortes de ballesta. Se caracterizan porque generan amortiguamiento por flexión y su dirección de trabajo es unidireccional.

### 2.2.1. Resortes de ballesta

Los resortes de ballesta son una clase muy especial de resortes formada por varias láminas apiladas hechas por el mismo acero que se emplea en los helicoidales en otro tipo de amortiguaciones, es decir, acero aleado con silicio y manganeso.

Se emplea usualmente como sistema de amortiguación en la suspensión de vehículos pesados, aunque puede tener diversas aplicaciones.



Figura 11. Resorte de ballesta [10]

Cada hoja o lámina de acero tiene una longitud diferente respecto a la contigua, estando siempre ordenadas de mayor a menor. El tornillo central (Figura 11) que atraviesa a todas ellas es el encargado de mantenerlas unidas y se denomina tornillo de pretensado o *tornillo capuchino*. De esta forma, la hoja de mayor longitud, denominada hoja maestra, se une al bastidor del vehículo donde va a realizar su función.

Es posible analizar este resorte como un sólido compacto en equilibrio que sufre una fuerza perpendicular  $F$  en su superficie y hacia abajo en cada uno de sus extremos. Para mantener el conjunto en equilibrio, el tornillo que une toda la estructura ejerce una fuerza vertical de valor  $2F$ . Al ser simétrico, se puede dividir la sección por la mitad y analizar tan solo una parte. Así, se obtiene una viga empotrada de longitud  $L$  y de perfil cuadrado de altura  $h$  y anchura  $b$ , tal y como se aprecia en la Figura 12.

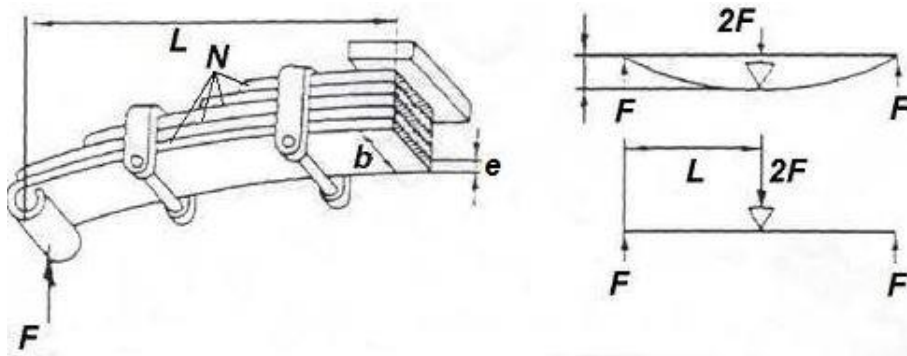


Figura 12. Análisis de la ballesta simplificado con cargas (izquierda) y como sólido compacto (derecha) [11]

El esfuerzo flector máximo se da en el centro de la viga y tiene un valor  $M_{max}=F \cdot L$  siendo  $L$  la longitud de la viga una dividida por simetría. Además, se conocen los valores de la inercia  $I$  de una viga de sección cuadrada y su módulo resistente  $W$  (6).

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}; W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (7)$$

Como la tensión máxima  $\sigma_{max}$  es el cociente entre el momento flector y el módulo resistente (7), se obtiene su valor (8)

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W} = \frac{6PL}{bh^2} \quad (8)$$

Si se divide esa viga en tantas partes  $n$  como láminas tiene la ballesta, las dimensiones cambian, como se puede apreciar en la Figura 13.

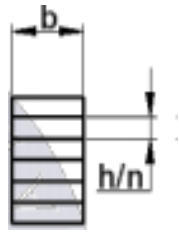


Figura 13. Sección de la ballesta compuesta por placas [11]

Para analizar la tensión que sufre cada viga de forma unitaria, tan solo basta con sustituir todas las ecuaciones donde aparezca h por h/n (9):

$$I = \frac{b * h^3}{12 * n^3} \rightarrow W = \frac{b * h^2}{6 * n^2} \quad M = \frac{P * L}{n} \quad (9)$$

De esta forma, se obtiene la tensión máxima (10) soportada por este tipo de resortes.

$$\sigma_{max} = \frac{M}{W} = \frac{6PL}{bh^2} * n \quad (10)$$

Además, debido al rozamiento que existe entre las placas, se disipa energía en cada ciclo de trabajo en forma de amortiguación, al igual que ocurre en los resortes helicoidales cónicos comentados anteriormente.

### 2.2.2. Resortes en espiral

El resorte en espiral es un resorte de torsión delgado formado por un fleje o lámina de acero que se enrolla sobre sí misma en forma de espiral. Este elemento resulta especialmente importante para este estudio ya que se asemeja mucho al dispositivo de fuerza constante en espiral, pero presenta un funcionamiento muy diferente. Por ello se hará especial hincapié a lo largo de todo el trabajo.

En este caso, el resorte presenta sus dos extremos libres (Figura 14), de modo que existe la opción de acoplar cada uno de ellos a un elemento móvil. De este modo, mediante la flexión de su superficie y la consecuente deformación, el resorte almacena energía potencial elástica para ser liberada una vez la fuerza que lo flexiona cesa.



Figura 14. Resorte en espiral [12]

Un resorte de este tipo está constituido por un fleje unido a una carcasa (normalmente elemento fijo) y a un árbol (elemento móvil). Al ejercer un par, las espiras irán eventualmente desbloqueándose de la carcasa o bloqueándose en el árbol.

Los esfuerzos principales que aparecen en el fleje son flexión, cortadura y tracción, pero estos dos últimos tienen valores despreciables frente a la flexión, por ello solo tomaremos esta como condicionante. Es por ello que este tipo de elementos se engloba dentro de los resortes que sufren flexión interna, al igual que la ballesta.

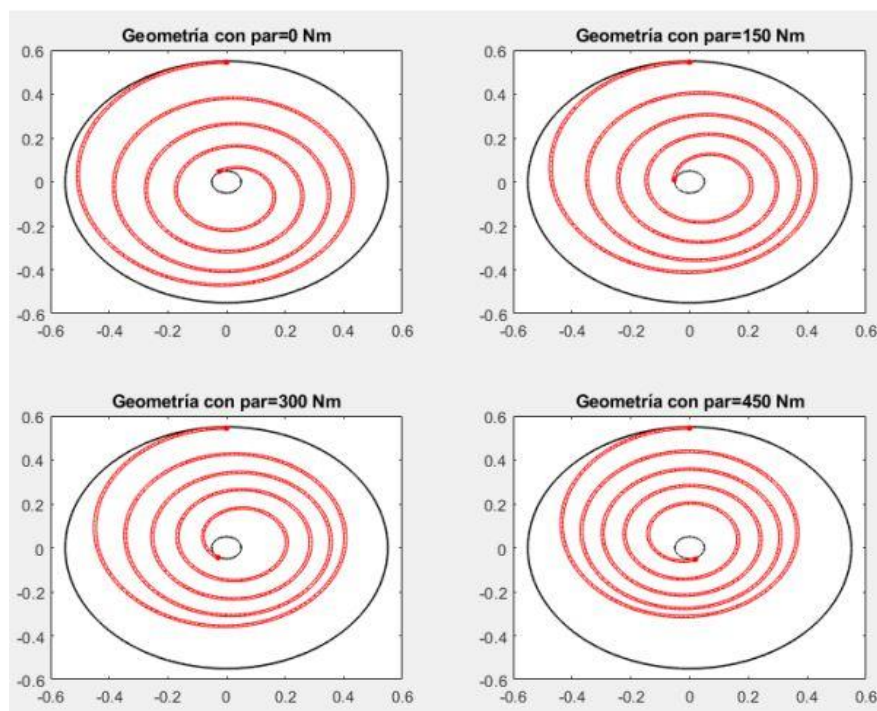


Figura 15. Esquema de un resorte en espiral seccionado [13]



Para arrojar más luz sobre su funcionamiento, en la Figura 15 aparecen en rojo las espiras del resorte en reposo. Generalmente el extremo interior del resorte se acopla al elemento móvil mientras que el exterior se mantiene fijo unido a la carcaja. Cuando el eje rota ejerciendo un par torsor varía un ángulo  $\Phi$  respecto de la posición inicial, aumenta la curvatura del fleje. Esto produce que flechte en mayor medida y que las espiras se alejen más de la periferia del tambor, acumulándose hacia el centro. A medida que aumenta esta fuerza, el resorte almacena energía potencial elástica. Gracias a su componente elástico si cesa la fuerza el propio sistema intentará restituir su estado original, pero el fleje nunca va a salir del tambor ya que ambos extremos se mantienen fijos.

Este es el funcionamiento de un resorte espiral común, donde cuanto mayor desplazamiento queramos conseguir, mayor fuerza deberemos ejercer. Un resorte simple almacena la energía correspondiente a la diferencia de curvatura entre las dos posiciones extremas, es decir, la parte exterior y la parte interior del tambor, donde el resorte está enlazado al eje.

Gracias a su comportamiento, a este tipo de resortes también se les conoce como resorte tipo cuerda de reloj por su frecuente utilización en estos aparatos. En ellos, el extremo interior se acopla a un volante tal y como se ve en la Figura 16. Sobre ese volante se genera un par mediante un contrapeso que se transfiere al resorte produciendo una flexión en él y pone en movimiento a un tren de engranajes que acaba marcando las horas.



*Figura 16. Resorte en espiral unido al volante de un reloj de cuerda [14]*



Este tipo de resortes, tanto los de ballesta como los de espiral, tienen un comportamiento singular cuando se realiza una gráfica de esfuerzo–deformación como la de la Figura 17 y se estudia su comportamiento.



Figura 17. Fenómeno de histéresis en resortes sometido a flexión [11]

Como refleja la gráfica, el esfuerzo aumenta siguiendo la curva superior de la zona amarilla. Cuando la fuerza externa desaparece, la deformación disminuye hasta retroceder el mecanismo a su posición inicial. En el resto de resortes convencionales, este movimiento de retorno se realiza siguiendo los mismos valores que durante el periodo de carga, generando gráficas donde solo aparece una curva.

En este caso se ve que el comportamiento del resorte no es el mismo cuando cede ante la fuerza que en la etapa de retorno. Esta diferencia entre la ida y la vuelta se llama histéresis. El área que se crea entre ambas curvas representa la pérdida de energía durante el movimiento. Esta pérdida de energía va asociada a la capacidad de amortiguación que tienen estos resortes a causa de la fricción existente entre las capas, que se disipa en forma de calor. Es por eso que, por ejemplo, los resortes tipo ballesta se emplean en la suspensión de vehículos pesados. El resto del área bajo la curva que no corresponde a la pérdida de calor se representa en morado y responde a la energía potencial elástica almacenada por el resorte durante su empleo.





### 3. Capítulo 3: Dispositivos de fuerza constante

En el capítulo de introducción se ha expuesto el concepto de fuerza constante y su diferencia con el comportamiento de los resortes convencionales. Este fenómeno lo emplean diversos dispositivos existentes hoy en día para generar desplazamiento empujados por una fuerza invariable en el tiempo. Además, se puede decir que son dispositivos autónomos en el sentido del uso de energía ya que el efecto de fuerza constante lo generan por su propia geometría sin necesidad de una fuente de energía externa. Esa es la principal diferencia entre estos dispositivos y otros. Por ejemplo, un motor es capaz de otorgar una fuerza constante, pero consumiendo energía eléctrica por lo que no entra dentro de este grupo.

Como se verá más adelante, todos estos dispositivos están diseñados para trabajar a compresión o a tracción. Sin embargo, cada uno posee propiedades y geometrías muy diferentes entre sí. Este tipo de elementos es muy adecuado para largas extensiones sin acumulaciones de carga, por lo que se encuentran muy presentes en la industria ya que el hecho de poder generar movimiento o empuje con una fuerza constante en el tiempo resulta muy provechoso. Están presentes en componentes mobiliario doméstico, equipamiento de gimnasio, contrapesos, soportes, frenos mecánicos, tensado de cables, máquinas-herramienta, etc. Cada uno de los dispositivos emplea un fenómeno diferente para conseguir este efecto. Se analizará cada uno de ellos agrupados en familias explicando su funcionamiento, así como de sus aplicaciones en la industria actual.

Es necesario establecer una diferenciación previa entre ellos: la recuperación de su forma tras el ciclo de trabajo.

- Restituyen su forma tras el ciclo de trabajo:
  - Dispositivos basados en efecto gravitatorio
  - Dispositivos basados en fleje con extremo libre
  - Sustentador constante de catenarias
  - Dispositivos basados en el fenómeno de pandeo
- No restituyen su forma tras el ciclo de trabajo:
  - Dispositivos basados en imanes permanentes
  - Dispositivos basados en el fenómeno de pandeo

Como ilustra la clasificación, no todos son capaces de recuperar su estado de equilibrio inicial tras someterlos a un esfuerzo. En algunos casos como en los dispositivos basados en el fenómeno de pandeo existen ejemplos de ambos tipos, como se verá más adelante.

### 3.1. Dispositivos basados en efecto gravitatorio

Este tipo de dispositivos emplea la fuerza de la gravedad para ejercer una fuerza constante que se oponga al movimiento. Poseen la característica de recuperar su posición inicial cuando la tensión deja de ser aplicada. Este apartado engloba a infinidad de componentes ya que el empleo de la fuerza gravitatoria ha sido muy recurrido desde los principios de la humanidad. Se hablará en particular del sistema de compensación de las líneas de tensión de las catenarias ya que ilustra de manera clara qué es el efecto de fuerza constante. Además, se ha elegido este ejemplo en particular porque, como se verá después, existen otros dispositivos de fuerza constante singulares diseñados exclusivamente para catenarias.



*Figura 18. Tendido de catenarias sobre las vías del tren [15]*

Los sistemas de catenarias son los tendidos de cables que circulan a lo largo de cualquier vía de tren, metro o tranvía suspendidos de forma que aportan la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del vehículo, tal y como se observa en la Figura 18. La corriente eléctrica transita a través de los cables y se transmite de la catenaria al tren a través del sistema de contacto entre ambos, denominado pantógrafo (Figura 19).



*Figura 19. Pantógrafo de un tren [16]*

El sistema de catenarias es complejo y desde su creación ha ido adquiriendo mayor complejidad y perfeccionamiento. En su forma más básica consta de un cable que transporta corriente eléctrica y que avanza a lo largo de la vía. Para mantenerse elevado, se dispone de pilares a lo largo del recorrido que incluyen una ménsula o barra en voladizo sobre la que descansa el cable. Con el desarrollo de la industria ferroviaria y el aumento de la velocidad y capacidad de los trenes se necesitan sistemas mucho más robustos. La base de cualquier sistema de catenaria es que el cable en contacto con el pantógrafo, llamado hilo de contacto, se encuentre tenso y perfectamente paralelo a las vías del tren. Para ello, se dispone de un cable que circula por encima del mismo llamado sustentador, cuyo objetivo como su propio nombre indica consiste en sustentar al hilo conductor mediante las péndolas o cables perpendiculares que los unen. Este sistema de hilos, a su vez, puede sufrir dilataciones y contracciones debidas a los cambios de temperatura entre los meses fríos y calurosos o sufrir tensiones fuera de las de diseño debido a su uso. Este es el motivo principal por el que existe un sistema de regulación de la tensión mecánica.

El sistema básico es el de contrapesos mediante poleas. Este sistema recibe el nombre de conjunto de compensación. Es el encargado de la regulación automática de la tensión mecánica de la catenaria independientemente de la temperatura ambiental existente. Dicho conjunto está formado por: polea, contrapeso y aislador. Este último es necesario para evitar que la polea esté en contacto con el cable de tensión por el que circula la corriente. De esta forma, el dispositivo forma un sistema de sólido rígido donde el momento producido por los contrapesos se iguala a la tensión del cable manteniendo este recto en todo momento.

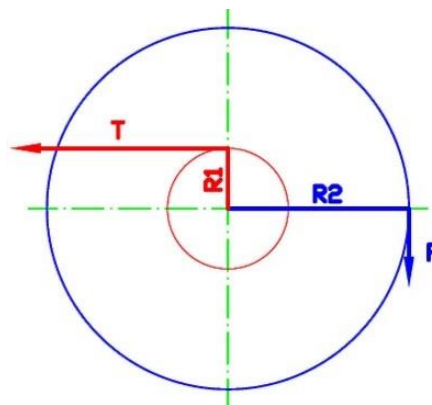


Figura 20. Imagen detallada del conjunto de compensación (izquierda) y esquema de funcionamiento de la polea (derecha) [43]

El momento ejercido por el contrapeso debe ser igual a la tensión a la que está sometido el cable de la catenaria (Figura 20). Para mantener el sistema en equilibrio, la fuerza que ejerce el contrapeso multiplicado por la distancia hasta el eje de rotación debe de ser igual a la tensión de la línea multiplicada por la distancia desde su línea de acción hasta el centro de la polea. (11). Como los radios son diferentes siendo el del contrapeso siempre mayor que el de la tensión del cable, es posible compensar fuerzas muy grandes con contrapesos mucho menores gracias a esta relación.

$$P * R2 = T * R1 \rightarrow \frac{P}{R1} = \frac{T}{R2} \quad (11)$$

Tal y cómo se ha comentado al principio del apartado, este tipo de dispositivos retorna a su posición inicial cuando las fuerzas cesan. En este caso no existe una posición inicial concreta ya que la fuerza y el peso se encuentran constantemente unidos. Por tanto, lo que se indica con esto es que este sistema tiene capacidad de retorno para seguir compensando, aunque la tensión disminuya. Esto implica que no tiene recorrido en un solo sentido como sí tiene alguno de los dispositivos de fuerza constante que se ilustrarán más adelante.

### 3.2. Dispositivos basados en fleje con extremo libre

El tipo de dispositivo de fuerza constante más empleado en la actualidad es el modelo en espiral. Se trata de una variedad formada por un fleje o lámina de metal con un espesor muy fino que se enrolla sobre sí misma de forma que cada capa descansa sobre la anterior (Figura 21). Al tener esa geometría, cuando se aplica una extensión el resorte, también llamado a este gesto “deflexión”, se vence la curvatura que posee de fábrica que es prácticamente constante.



Figura 21. Dispositivo fuerza constante en espiral [17]

En este tipo de dispositivos solo el extremo final está libre. Este posee un orificio a través del que se une la fuerza de carga exterior. A medida que este se desenrolla ejerce una fuerza casi constante debido a que el tambor de la bobina conserva su geometría, aumentando su diámetro a medida que se extrae del tambor el fleje. De este modo que la resistencia que opone al movimiento siempre sea la misma.

Existen cuatro factores críticos al considerar un diseño de este tipo de dispositivos, como el diámetro interior del tambor ( $DI$ ), el diámetro exterior ( $DE$ ), la carga ejercida sobre el resorte, y la altura a la que se aplica la carga.

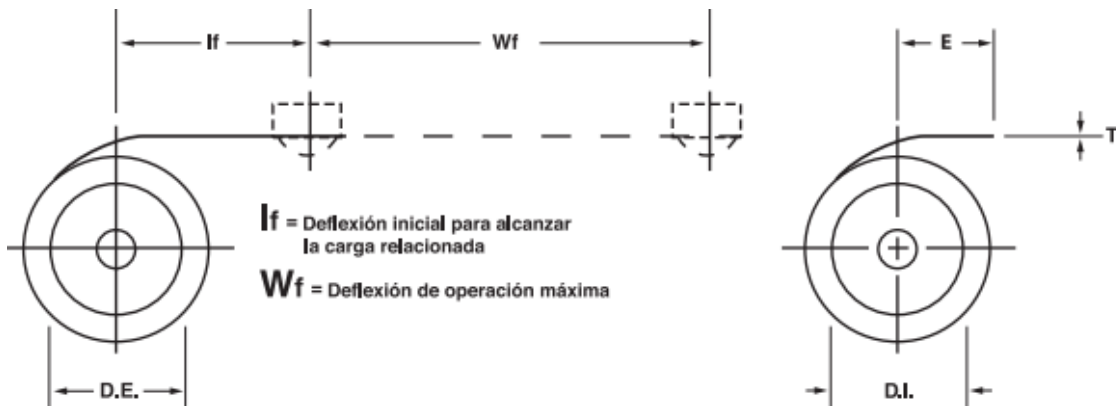


Figura 22. Esquema de funcionamiento del fleje [18]

La altura a la que se aplica la carga es la distancia desde el orificio en el que se acopla la fuerza externa hasta el eje del tambor. (Figura 22) Es un factor clave debido a que el resorte no ofrece una respuesta constante desde el primer instante de acción. Es necesaria una deflexión inicial  $L_f$ , para alcanzar la carga necesaria.

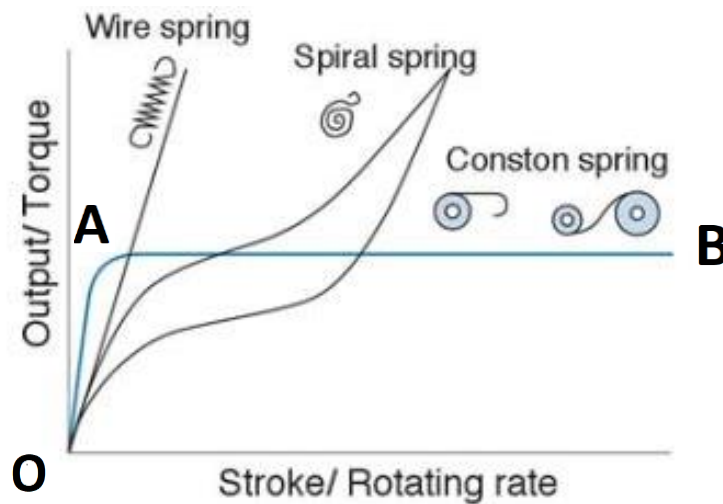


Figura 23. Gráfica de fuerza-desplazamiento de diferentes modelos [2]

En la Figura 23 que compara diferentes modelos se puede apreciar que el único que no se comporta de manera estable a lo largo de todo su recorrido es el de fuerza constante.



En primer lugar, observando el resorte de compresión se puede reconocer el comportamiento típico de un resorte helicoidal. La fuerza aumenta a la vez que la elongación, provocando que cuando se aproxima el límite del recorrido del resorte se requiera una fuerza mayor hasta alcanzar la zona plástica. En segundo lugar, aparecen los resortes en espiral donde se aprecia el movimiento que se comentó anteriormente. Esta forma indica que bajo una fuerza actuante el resorte se deforma de una manera diferente a la que tiene cuando la fuerza cesa y se retorna a su posición inicial debido a la pérdida de energía en ambos tramos por disipación calorífica.

Por último, en azul, está reflejado el comportamiento del dispositivo de fuerza constante. En el tramo  $OA$  la fuerza crece a un ritmo mayor que la elongación. Esta es la fuerza inicial necesaria para poner en marcha el dispositivo debido a que en los primeros instantes la fuerza ejercida se emplea en corregir la curvatura que presenta el fleje. Una vez se haya superado esa etapa se alcanza la longitud  $L_f$  de deflexión inicial y se inicia el comportamiento de fuerza constante en sí mismo. Ese comportamiento se corresponde con el tramo  $AB$  de la gráfica. Este comportamiento continúa en el tiempo hasta alcanzar la deflexión de operación máxima  $W_f$ .

Para entender el funcionamiento de este tipo de resortes es necesario comprender la diferencia entre un resorte espiral simple, y un dispositivo en espiral de fuerza constante, que se ven en la Figura 24. Ambos están formados por un fleje definido por sus características principales: material, sección (ancho y canto) y longitud. Todas ellas dotarán de unas propiedades específicas al dispositivo.



Figura 24. Dispositivo de fuerza constante en espiral (izquierda) y resorte en espiral (derecha)

La principal diferencia entre ambos es el modo de empleo:

Un resorte en espiral se puede encontrar envuelto o no en un tambor y ninguno de sus extremos se encuentra libre. Generalmente el extremo exterior se encuentra acoplado a una superficie fija como puede ser un cajetín mientras que el extremo interior es el punto al que se transmite el movimiento externamente, ya bien sea por un elemento móvil o un eje que rota.



Un dispositivo de fuerza constante en espiral presenta la forma fuertemente pretensado sobre sí mismo siempre. Además, es el extremo exterior el que se separa del tambor debido a la fuerza que se le aplica mientras que el interior se mantiene siempre en su posición.

Generalmente se fabrican en acero inoxidable 301, con una temperatura de servicio de  $\pm 200$  °C.

Cuando los requerimientos de esfuerzo sobrepasan a los soportados por un solo resorte, existen dos combinaciones que aportan diferentes soluciones en función de nuestras necesidades:

- Montaje en tandem:

Esta disposición se usa al emplear el dispositivo en tareas de contrapeso. Si se apila espalda con espalda cada tambor (Figura 25) se consigue que en el extremo donde se aplica la fuerza se tenga en el doble de resistencia. Además, este método proporciona una extensión estable en deflexiones largas ya que evita posibles pandeos del material.



Figura 25. Montaje en tandem [18]

- Montaje en polea:

La tira que generalmente se encuentra fuertemente enrollada sobre su propio tambor en esta disposición tiene su extremo libre unido a otro tambor (Figura 26). De este modo, el primer tambor que en un principio tiene sobre sí fuertemente enrollado el fleje se mantiene fijo, mientras que en el nuevo tambor acoplado al extremo del fleje es donde se aplica el par torsor. De este modo se provoca el desenrollamiento del primero para apilarse en el segundo. Así, se requiere el doble de fuerza ya que el extremo que se libera del tambor inicial no se encuentra suelto sino que se le obliga a enrollarse sobre otro.



Figura 26. Montaje en polea [17]

Un solo dispositivo no tiene capacidad de mantener la posición intermedia: se alarga mientras se aplica la fuerza y cuando ésta desaparece se retrae hasta su posición inicial. Por el contrario, en polea es posible mantener una posición constante en cualquiera de las etapas de alargamiento del fleje ya que al estar enrollado sobre otro una fuerza contraresta a la otra.

Mientras que el resorte en tándem suma toda la fuerza disponible en un solo punto al comenzar a ejercer la carga, el montaje en polea duplica la fuerza de un solo resorte, ofreciendo una suma de fuerzas en espacios mínimos. Se ejerce así una fuerza aumentada para resistir el desenrollamiento.

En cuanto a las aplicaciones, el resorte de fuerza constante es idóneo para largas extensiones sin una carga de acumulación.

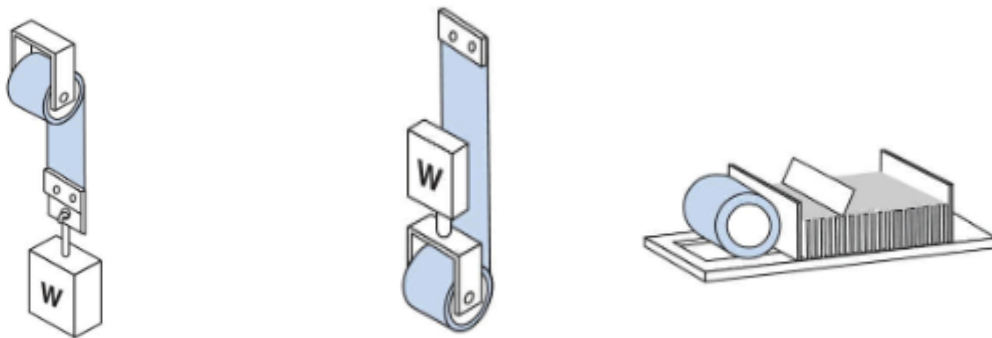


Figura 27. Aplicaciones de este dispositivo: Equilibrado de objetos pesados (izquierda), regulador de posición de objetos sustentados (centro), empuje de objetos (derecha) [2]

Entre las aplicaciones para los resortes formados por un solo tambor se encuentran las de equilibrado de objetos pesados (Figura 27 izquierda) donde la fuerza del resortes es igual al peso del objeto acoplado. Esto se usa en ventanas de trenes, en la regulación de la posición de monitores suspendidos en el aire como las máquinas de rayos X, etc. Es posible aplicarlo también para ajustar la posición exacta de objetos sustentados (Figura 27 centro) como la regulación de la altura de los trípodes, o los monitores de ordenadores con altura regulable.

Otra aplicación es la de emplear la fuerza del resorte para empujar objetos (Figura 27 derecha), como en las máquinas expendedoras para llevar los paquetes al borde o en la palanca de cambios de un coche automático. Aquí, el extremo libre se encuentra fijo y el resorte por sí mismo proporciona el trabajo, como ocurre con las escobillas de carbón de los aparatos eléctricos (Figura 28). En este tipo de máquinas, los motores deben mantener una presión sobre el rotor y para ello es necesario que la fuerza de las escobillas sea constante.



Figura 28. Dispositivo en espiral en la escobilla de una herramienta [19]

En cuanto a la vida útil, este tipo de resortes soporta entre 2.500 y 25.000 ciclos, antes de ceder a causa de la fatiga. Este número varía en función de la carga que soporta y el tamaño del resorte. Este tipo de resortes ofrece deflexiones de hasta un metro, con lo que otorga mucha más ventajas sobre los resortes convencionales de alambre, además de que la carga que ofrecen es mucho más estable.

### 3.3. Sustentador constante de catenarias

En el primer apartado de este capítulo se habló acerca de los sustentadores de las líneas de tensión de las catenarias. En esa ocasión el efecto físico detrás del montaje consistía en el empleo de la fuerza gravitatoria. En la actualidad se emplea un sistema de sustentación basado en un dispositivo que por su geometría tiene la capacidad de generar desplazamiento con una fuerza constante por sí mismo sin necesitar de emplear la fuerza de la gravedad. (Figura 29)



*Figura 29. . Sistema de compensado compacto, formado por un resorte en espiral y una leva [20]*

Este segundo sistema de regulación de la tensión mecánica es el que usa resortes en espiral. Estos proporcionan una fuerza variable, según lo más o menos tenso que se encuentre el sistema de sustentador-hilo conductor. Por sí mismo, este sistema no es capaz de mantener una tensión constante con lo que no entraría en la clasificación sobre la que trata el estudio. Sin embargo, estos dispositivos llevan acoplados una leva, o lo que es lo mismo, una polea de diámetro variable. Este sistema de “resorte + leva” provoca que la posición angular de la leva esté directamente relacionada con cada elongación del resorte de modo que esta compense la constante de Hooke, generando un dispositivo de fuerza constante funcional. Se trata de un elemento muy compacto que puede trabajar en cualquier dirección ya que tan solo depende de la disposición en la que se instale. Esto le otorga una gran ventaja respecto a los resortes gravitatorios.

Dentro de la carcasa se aloja un resorte en espiral, manteniendo su extremo exterior acoplado a la caja y el interior se encuentra unido a una leva que gira en mayor o menor ángulo dependiendo del estado tensional del cable (Figura 30). Su geometría variable produce que el resorte en espiral que lleva acoplado genere siempre la misma fuerza.

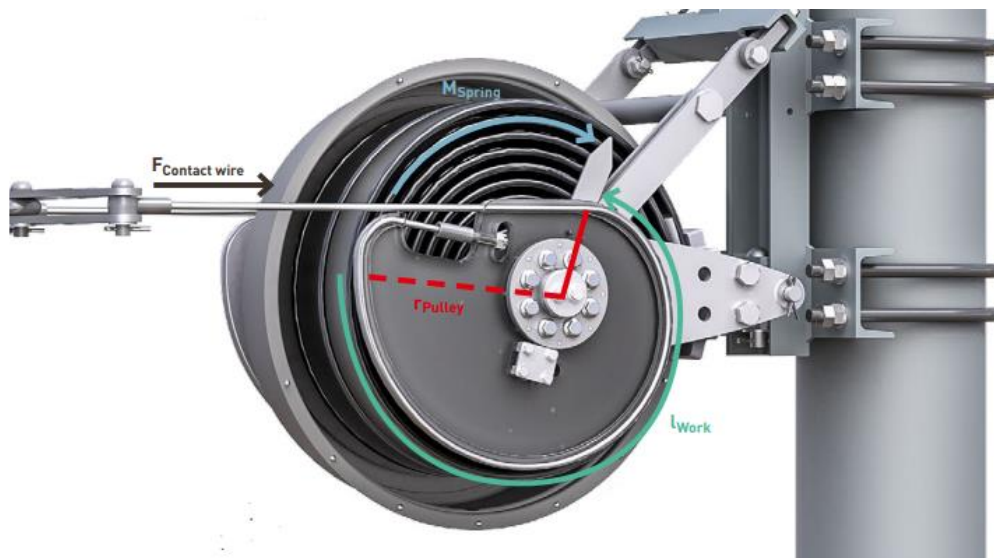


Figura 30. Funcionamiento interno del sistema de tensado [20]

El modo de empleo es el siguiente: la fuerza  $F$  que genera el cable es función del cociente entre el momento  $M_{resorte}$  y el radio  $r_{leva}$ . Esta fuerza produce un par en el resorte que evidentemente es variable. La compensación se produce a través del radio variable de la leva, lo que produce que la elongación útil del resorte  $l_{work}$  se vea siempre provocada por una fuerza constante.

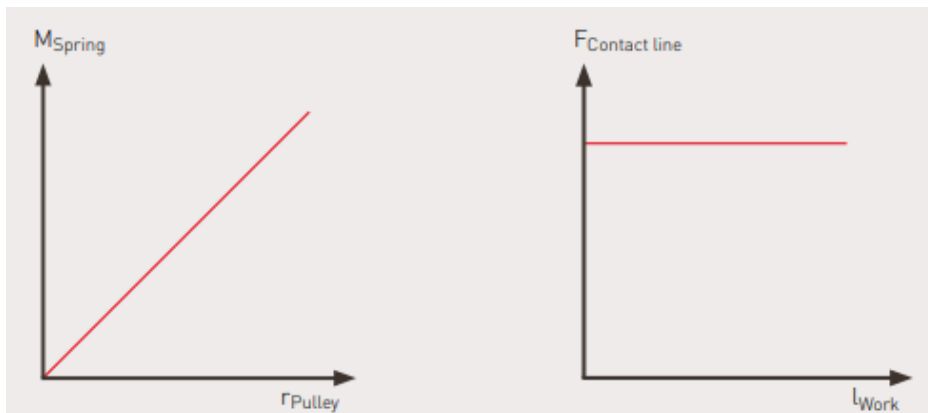


Figura 31. Gráfica de par-radio de la leva (izquierda) y su resultante en la gráfica de fuerza-desplazamiento útil (derecha) [20]

El cable de la catenaria ejerce una tensión constante en el contacto. El grado de rotación del eje da como resultado un par o momento variable de forma lineal que se compensa con el radio variable de la leva. Esto produce una fuerza de tracción constante sobre todo el rango de trabajo del dispositivo (Figura 31). Como se puede ver en la gráfica superior, el par varía con el radio de la leva, lo que produce una compensación dependiendo de la posición angular en la que se encuentre. De este modo el resultado es un trabajo útil constante del resorte de compensación en todo su recorrido.

### 3.4. Dispositivos basados en imanes permanentes

Este modelo de dispositivo de fuerza constante presenta un diseño completamente diferente a los anteriores. Se trata una especie de pistón formado por un vástago y un estator que lo rodea (Figura 32) de modo que a lo largo de todo el recorrido el desplazamiento se realiza de forma constante, independientemente de la fuerza que se le presente.



Figura 32. Dispositivo de imanes permanentes [21]

Estos elementos reciben el nombre de dispositivos basados en imanes permanentes. Este tipo de componentes ejerce una fuerza constante en toda su área de trabajo, lo que le permite actuar como contrapeso o a modo de amortiguación ya que genera una fuerza independiente del desplazamiento. La principal diferencia entre este tipo de dispositivos y el resto de los que aquí se enumeran es que estos no recuperan por sí mismos su forma inicial una vez la fuerza deja de actuar, como se vio en la clasificación realizada al principio del capítulo.

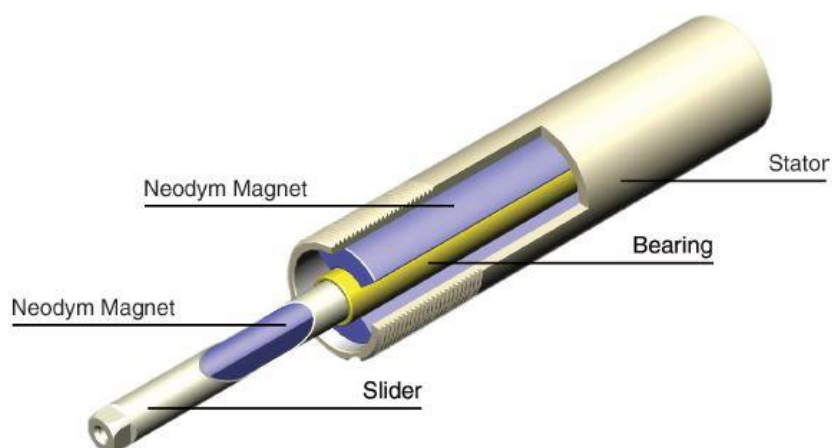


Figura 33. Composición del interior de un dispositivo de fuerza constante magnético [21]

El funcionamiento se basa en la oposición que ejerce la atracción entre los imanes permanentes frente a la fuerza que empuja el vástago a lo largo del estator. Esto significa que este sistema no requiere ningún tipo de fuente de alimentación externa: ni estar conectado a la vía de corriente, ni el empleo de aire comprimido o lubricación hidráulica (Figura 33). En detalle, el vástago avanza libremente hasta que la fila de imanes de ambos componentes se alinea y ejercen atracción mutua de modo que el desplazamiento se ve frenado. Esta oposición al movimiento se mantiene durante unos instantes hasta que la fuerza ejercida exteriormente provoca que los imanes se desalineen permitiendo el avance del vástago. Esto se repite en el tiempo provocando un efecto acelerado-frenado que se sostiene a lo largo de todo el recorrido.

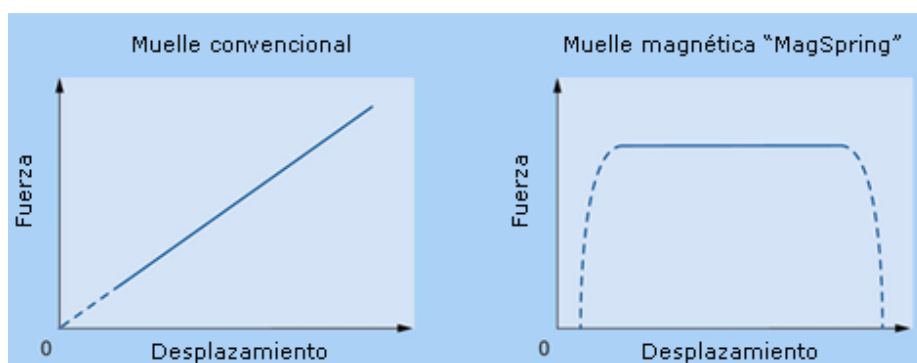


Figura 34. Comparativa de gráficas de fuerza-desplazamiento de los resortes convencionales (izquierda) y de los dispositivos magnéticos MagSpring (derecha) [21]

En la Figura 34 se compara la gráfica de un resorte convencional frente al dispositivo magnético, en este caso de la marca *MagSpring*. Es posible observar que se consigue el efecto de fuerza constante ya que el desplazamiento aumenta mientras que la fuerza necesaria se mantiene en un mismo valor. En el punto en el que dos filas de imanes se alinearían, la curva subiría ligeramente exigiendo un poco más de fuerza exterior y bajaría en el momento en el que los imanes se desalineasen.

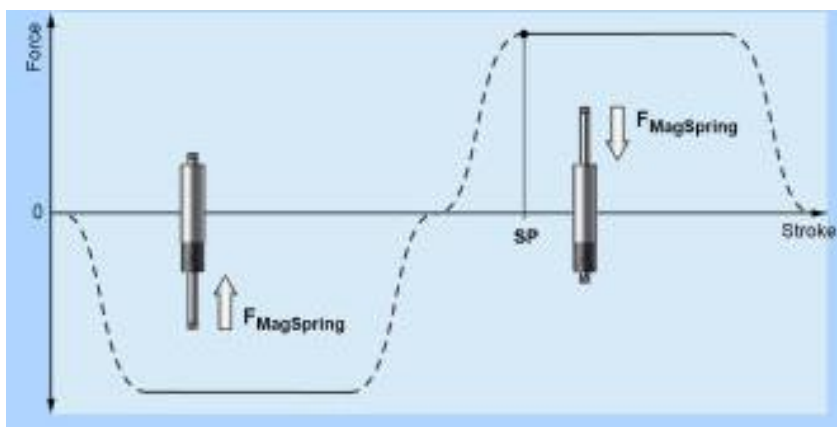


Figura 35. Fuerza-desplazamiento del dispositivo magnético en función de su dirección de empleo [21]



En esta nueva gráfica (Figura 35) se aprecia el mismo funcionamiento del dispositivo magnético pero esta vez hace comparando el comportamiento bajo fuerzas en ambos sentidos. En estado de no carga, el control deslizante se encuentra centrado en el estator, mientras que en la carga el extremo de trabajo se extiende fuera del mismo. Debido a esta posición de descanso el deslizador puede ser tirado o empujado en ambos sentidos. La fuerza necesaria aumenta de 0 a la fuerza nominal en un rango corto de carrera. Una vez ahí, dentro de la zona de trabajo, la fuerza actúa de forma constante. La posición de inicio (SP) marca la distancia entre el final del estator y el extremo de trabajo, donde se ejerce la fuerza, al comienzo del rango de fuerza constante.

Esta fuerza garantiza una funcionalidad a lo largo de todo el recorrido a prueba de fallos, cuando se trate de compensación de peso vertical. Las aplicaciones que nos permiten darle gran utilidad a este tipo de resorte son el posicionamiento y aplicación de fuerzas dinámicas en vertical, además partiendo de la ventaja que el tamaño del instrumento es relativamente pequeño y se puede acoplar en espacios reducidos.

A continuación, se enumerarán las aplicaciones más comunes de este tipo de resortes:

- Compensación del peso: Para una instalación vertical los motores lineales y otros accionamientos directos deben ejercer sin interrupción una fuerza constante con el fin de actuar en contra de la fuerza de gravedad. Con este tipo de resortes podemos compensar el peso de manera controlada y completamente pasiva.
- Función de fuerza constante: Gracias a la fuerza constante de la curva de desplazamiento son posibles muchas otras aplicaciones. Algunas de ellas son la aplicación de retenciones en un gran recorrido, el apoyo con fuerzas unilaterales en tareas en las que sean necesario ejercerlas, como los accionamientos.
- Posición de mantenimiento seguro: Algunos diseños de este tipo de resortes actúan como seguros cuando se produce el corte de suministro en cualquier tipo de maquinaria. Se emplean para evitar que los ejes verticales de cualquier máquina hagan tope con su posición inferior, causando cualquier daño a la máquina o al producto que esté siendo producido.



### 3.5. Dispositivos basados en pandeo

El pandeo es un fenómeno de inestabilidad elástica donde un elemento esbelto sufre una deformación en la dirección transversal a la de su estructura a causa de un esfuerzo que sobrepasa la capacidad de resistencia del material (Figura 36).

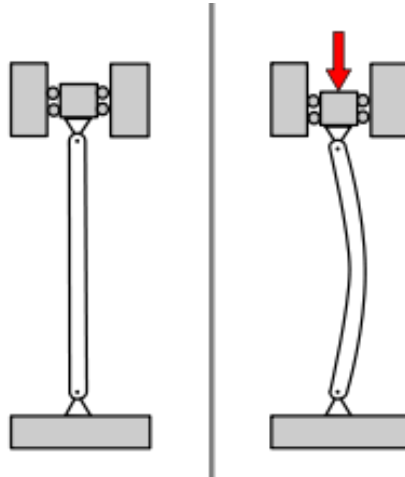


Figura 36. Pandeo por compresión de una viga [22]

Esta deformación suele estar provocada por esfuerzos de compresión (pandeo de Euler), pero también puede estar provocada por esfuerzos cortantes como se verá que sucede en varios de estos dispositivos. Cuando la carga ejercida aumenta su valor de forma progresiva alcanza un valor en el cual el elemento esbelto deja de limitarse a acortar su altura, sino que además curva su eje en la dirección transversal. Cuando esto ocurre el elemento continúa curvándose hasta llegar al colapso definitivo, aunque no se incremente el valor de la carga. Ese es el comportamiento que emplea este tipo de dispositivos para lograr un efecto de fuerza constante.

Para ello es necesario hablar del equilibrio o estabilidad. En estructuras existen 3 tipos diferentes de estabilidad:

- Equilibrio estable:

Una estructura posee un equilibrio estable cuando pequeñas perturbaciones no son capaces de causar grandes movimientos lo que transformaría una estructura en un mecanismo. Un mecanismo no puede resistir cargas y por tanto no es útil. Pero también una estructura posee equilibrio estable cuando, bajo cargas, sufre un estado desplazado, pero al liberarla vuelve a su configuración inicial. Un ejemplo visual es el de la pelota en el fondo de una ladera (Figura 38 izquierda), entre dos zonas inclinadas. Si se ejerce una fuerza sobre ella es posible que la pelota se desplace si el esfuerzo es lo suficientemente grande, pero al cesar volverá a su estado inicial. Esto es una estructura en equilibrio estable.

- Equilibrio neutro o indiferente:

Este se produce cuando no está claro si la estructura se encuentra en equilibrio o no. Una pequeña perturbación provoca grandes movimientos, pero puede darse que la estructura vuelva a su posición original sin ejercer un trabajo exterior. En el ejemplo de la pelota (Figura 37 centro) se coloca sobre una superficie llana. Si la fuerza perturbadora desplaza ligeramente la pelota, no regresa a su posición de equilibrio original ni continúa alejándose al eliminar la fuerza. Este tipo de equilibrio se denomina equilibrio neutral. Además, esta posición de equilibrio puede darse de fase intermedia entre dos fases de equilibrio estable, ya que la perturbación lleva de una a otra.

Esto es lo que ocurre generalmente en el pandeo durante los instantes en los que la estructura se está deformando. Si el equilibrio es neutral, no hay cambio en la energía durante un desplazamiento en el sistema de fuerza conservador.

- Equilibrio inestable:

Sucede cuando la estructura cambia su geometría bajo la aplicación de una carga y esta no vuelve a su posición inicial en ningún momento. Aquí, la pelota ante cualquier causa externa va a perder su posición sin retorno por lo que pequeñas cargas causan grandes desplazamientos (Figura 38 derecha).

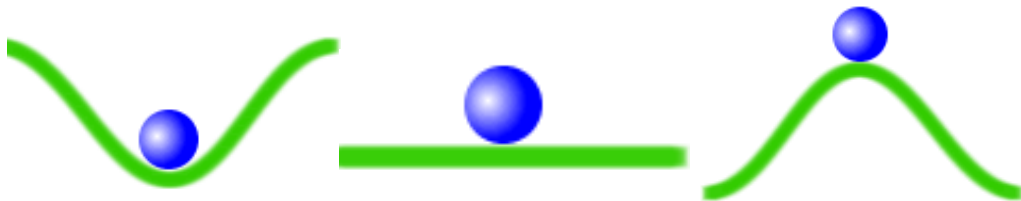


Figura 37. Estados de equilibrio estable (izquierda), neutro (derecha) o inestable (derecha) [30]

Cuando se supera la carga crítica la estructura abandona la zona de equilibrio estable donde mantenía su posición oponiéndose a la fuerza externa. En ese instante entra en una zona de equilibrio neutro donde el elemento continúa curvándose, aunque el valor de la carga no se vea afectado. Esto se traduce en un aumento del desplazamiento donde la carga ejercida en esos instantes no varía. Si se crea una estructura donde varias estructuras pandeen de manera consecutiva y ordenada se consigue que la fuerza se mantenga estable, variando ligeramente sin superar nunca la carga crítica de rotura. Como la deformación o desplazamiento conseguido no deja de crecer, el conjunto representa un efecto de fuerza constante como los que se han comentado en los apartados anteriores.

Existen diferentes tipos de pandeo que generan este efecto, por lo que en este apartado del capítulo se hablará sobre cada uno de ellos.

### 3.5.1. Pandeo de Euler

El fenómeno básico de pandeo se produce en vigas o barras esbeltas cuando estas están sometidas a una carga de compresión por cualquiera de sus extremos y en la dirección de su eje. Esta carga genera desplazamientos transversales a la dirección principal de la fuerza, provocando el fallo del material. Lo curioso de este fenómeno es que la fuerza requerida para producir esta deformación en el material es menor que la carga máxima de compresión que provocaría la plastificación de la estructura. Esta carga, denominada *carga crítica de pandeo* es la responsable de producir el fenómeno de inestabilidad elástica y fue Leonhard Euler (1707-1783) el primero que dio un valor para ello.

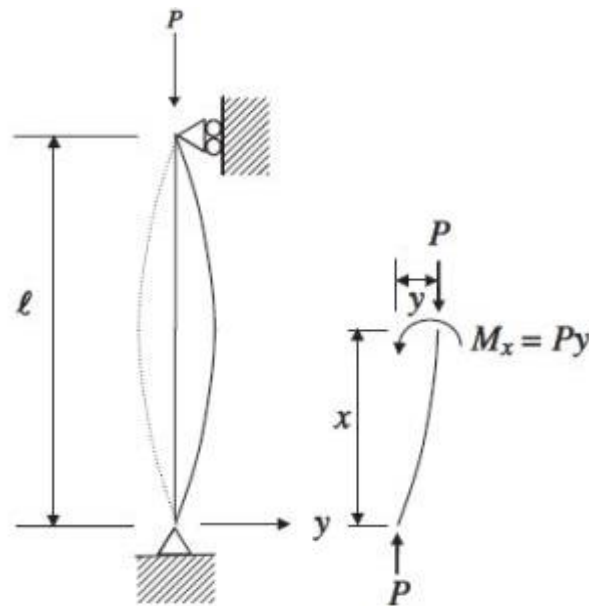


Figura 38. Diagrama de una viga biapoyada sometida a una carga  $P$  (arriba) y estado de equilibrio sobre una sección de la propia viga (abajo) [23]

Partiendo de la base de una viga biapoyada de longitud  $L$  donde se aplica una carga  $P$  de compresión en su apoyo móvil. Tras imponer el equilibrio de la parte inferior de la Figura 38 se puede llegar a la conocida expresión (12):

$$P_{critica} = \frac{\pi^2}{L^2} * E * I \quad (12)$$

Siendo  $I$  el momento de inercia y  $E$  el módulo de Young.

Lo interesante de este fenómeno, con aplicación a dispositivos de fuerza constante, se puede visualizar cuando se representa (Figura 39) el desplazamiento transversal del punto medio (eje horizontal) frente a la carga de compresión (eje vertical).

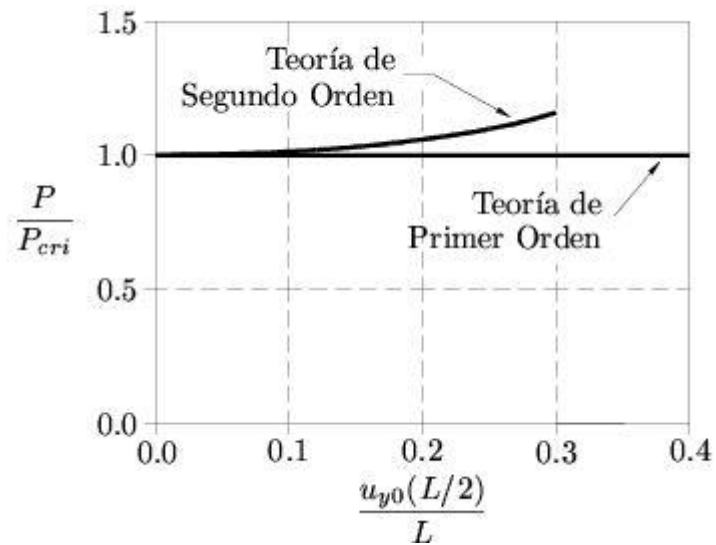


Figura 39 Gráfica de desplazamiento transversal del punto medio frente a cargas de compresión [24]

Hasta que la carga no vale  $P = P_{cr}$  dicho desplazamiento es nulo. Para  $P=P_{cr}$ , en la Teoría del Primer Orden, el desplazamiento es indeterminado (línea horizontal); o lo que es lo mismo, el desplazamiento aumenta sin aumentar la carga. Además, si cesa la carga, la barra recupera la posición recta, lo que significa que el dispositivo de fuerza constante es reversible. Este comportamiento es el ideal, con alguna ligera discrepancia en la práctica.

Experimentalmente un ensayo se parecería más a la línea creciente mostrada en la figura (Teoría del Segundo Orden), lo que significa que para que aumente el desplazamiento transversal hay que aumentar un poco la carga, siendo por tanto un dispositivo de fuerza casi constante.

### 3.5.2. Dispositivos basados en fenómeno snap-through

En los apartados previos se han comentado cada uno de los tipos de dispositivos de fuerza constante que existen en la actualidad. Detrás de cada uno de ellos existe un efecto físico que produce dicho comportamiento. En las catenarias se empleaba la fuerza gravitatoria en algunos casos y en otros la combinación de un resorte y una leva. Los dispositivos en espiral eran un efecto físico en sí mismo ya que es su propia geometría la que produce este comportamiento. En los elementos magnéticos, la disposición en serie de los imanes era la que producía el efecto de “frenado”, evitando que la curva de fuerza-elongación se disparase.

En este apartado se hablará del tipo de dispositivos de fuerza constante que emplea el fenómeno snap-through buckling. Este fenómeno se produce cuando una barra curva o una superficie esférica, como puede ser un casquete o una bóveda, cede ante la presión de una carga transversal viendo alterada su forma durante un corto periodo de tiempo. En esos instantes la curva de fuerza-desplazamiento se reduce para luego volver a aumentar.

Observando una barra curva apoyada en sus dos extremos de forma que no se permita desplazamiento en ninguno de los dos ejes. Se carga la barra con una fuerza vertical  $P$  y se estudia su comportamiento. A medida que se va aplicando esta carga la barra comienzan a trabajar a compresión y el desplazamiento aumenta ligeramente mientras la fuerza crece. Si la compresión aumenta y sobrepasa el límite de la estructura la barra puede pandear, en cuyo caso los desplazamientos transversales aumentan bruscamente de tal manera que cambia la configuración, quedando el vértice por debajo de los apoyos, produciendo que la barra comience a trabajar a tracción (Figura 40).

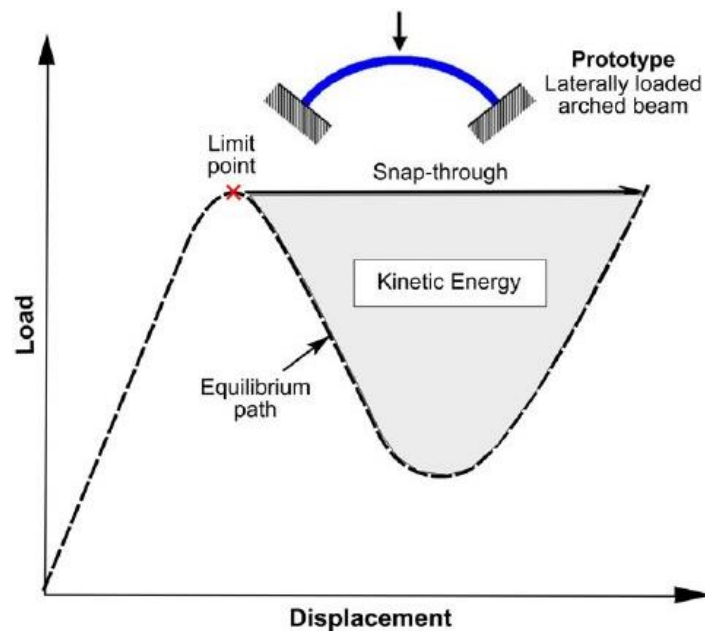


Figura 40. Gráfica de carga desplazamiento de una barra curva que ha sufrido el fenómeno snap-through [25]

En la gráfica superior se observa el comportamiento de dicho arco. La zona de equilibrio estable es aquella en la que la barra conserva su curvatura. Al seguir aumentando la carga es la propia compresión la que provoca la inestabilidad (pandeo) que produce que el vértice se desplace. Durante los instantes del pandeo el desplazamiento de la barra sigue aumentando mientras que la fuerza necesaria para ello se estanca. En este punto la barra tiene un equilibrio inestable, ya que la perturbación ha provocado que la geometría cambie.

Si el vértice de la barra se mantiene por encima de los apoyos la gráfica sigue el camino marcado por el tramo horizontal. En el caso en el que la barra voltee y pase a la posición invertida, el sistema finalmente se vuelve estable de nuevo a medida que la barra cae más y entra en tracción, siguiendo el tramo donde la fuerza decae. Esta reducción de la fuerza empleada se debe a que a partir de la horizontal es la propia geometría de la barra la que induce el movimiento. Existen infinitud de sistemas de desplazamiento de la barra en función del punto donde apliquemos la fuerza.

Para la mayoría de situaciones prácticas, este efecto supone una falla del sistema debido a la cantidad de desplazamiento involucrado, por lo que se considera un signo de inestabilidad a evitar. Sin embargo, existen aplicaciones que se aprovechan de ello y se les da utilidad. Como se dijo al principio del capítulo, se puede realizar una diferenciación clara dentro de los dispositivos que responden a este fenómeno entre los que recuperan la forma inicial una vez ha cesado la fuerza y los que no.

#### 3.5.2.1. Efecto snap-through sin retorno

Una de las aplicaciones más empleadas es la de diseñar objetos, generalmente de plástico, con la capacidad de alterar su geometría para comprimirse y ganar espacio. Como no retoman su forma inicial tras la fuerza aplicada, es necesario para ello aplicar una fuerza en el sentido contrario, de modo que se alterne entre ambas posiciones.



*Figura 41. Bebedero portátil retráctil. Se presenta cerrado (izquierda) y abierto (derecha)*

Tal y como se ven en la Figura 41, existen recipientes como bebederos portátiles de perros, coladores, cuencos, etc. Están diseñados para ser transportados o para ganar espacio a la hora de almacenarlos.

Este efecto es el mismo que siguen las pajitas capaces de doblarse y estirarse. Estas pajitas están fabricadas en polipropileno y poseen en su parte central unos pliegues que se aprecian en la Figura 42 y que permiten aumentar y disminuir su longitud. Cada uno de los pliegues sigue un efecto de pandeo similar al del bebedero, de modo que también es necesario aplicar fuerza tanto para estirarlo como para retraerlo.

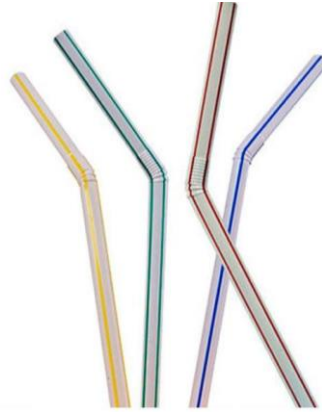


Figura 42. Pajitas de plástico deformables [26]

### 3.5.2.2. Efecto snap-through con retorno

Si bien existen aplicaciones en los que el objeto es incapaz de recuperar su posición inicial, la mayoría de objetos que actúan bajo este fenómeno son capaces de restituir su estado previo a la carga. Por ello se engloban en este apartado.

En muchas ocasiones se sustituye la barra curva por una pequeña cúpula o casquete, de muy poca profundidad. Por ejemplo, las teteras eléctricas disponen de un sistema de apagado automático compuesto por una pequeña placa metálica con forma abombada introducida dentro del termostato, en el conducto por el que pasa el vapor.



Figura 43. Pestaña del circuito de apagado de una tetera eléctrica [27]



La placa posee una apertura interior (Figura 43) por la que el flujo de vapor atraviesa hasta salir al exterior. Cuando el agua hierve, aumenta el caudal de vapor ejerciendo una fuerza sobre la pestaña de la placa. En ese momento la pestaña padea, cambiando su dirección y haciendo contacto con un circuito eléctrico que corta la corriente. Cuando el vapor reduce su flujo, esta pestaña retoma su posición inicial.

Una lata de aceite con dispensador, posee un sistema muy ingenioso que emplea este fenómeno. La base de esta lata de aceite tiene forma de plano abombado o pequeña cúpula (Figura 44). Al igual que la barra curva, la base cambiará súbitamente cuando se aplica la fuerza suficiente, pasando a la posición invertida. Cuando esto sucede, el volumen de la lata se reduce ligeramente y expulsa una cantidad determinada de aceite por la punta. En el momento en el que cesa la ejercida fuerza con el dedo, la cúpula retrocede a su posición inicial creando un vacío en el interior del depósito y permitiendo que entre el aire y rellene el espacio dejado por el aceite.



*Figura 44. Lata dispensadora de aceite [28]*

Otro ejemplo es el de los juguetes llamados Jumping Poppers. Se trata de un casquete de goma con forma esférica (Figura 45) que, cuando se dobla sobre sí mismo, es decir, se le obliga a pandear y se apoya sobre una superficie plana, este al cabo de un tiempo recobra su forma original y salta.



*Figura 45. Jumping Poppers [29]*



Este efecto es posible gracias al material elástico del que están formados estos juguetes. En reposo, la parte exterior y más larga está sometida a compresión, mientras que la parte interior del casquete está sometida a tracción. Cuando se dobla e invierte su curvatura, se crea el efecto inverso en cada una de las capas. La exterior pasa a trabajar a tracción mientras que la interior trabaja a compresión. Pese a que los esfuerzos se invierten en ambas capas, la distancia entre dos puntos de la curva permanece invariable. Esto produce que el juguete se encuentre en una situación inestable ya que la parte interior soporta más esfuerzo del que soportaba antes, provocando que busque retomar su estado inicial.

### DISPOSITIVOS DE PLATILLO O ARANDELAS BELLEVILLE

El efecto snap-through está detrás del funcionamiento de las arandelas Belleville. El fenómeno completo no sucede porque implica que la arandela se voltee completamente. En este tipo de resortes se emplea la primera parte, donde la estructura cede a la carga, pero sin rebasar la horizontal.

Al tener una mayor aplicación en la industria, es necesario tener un apartado en concreto para ellos.

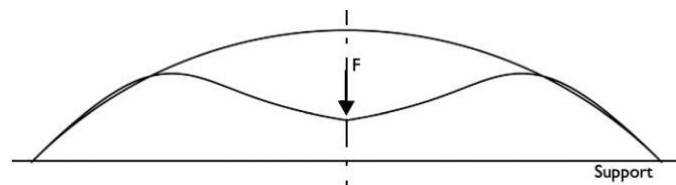


Figura 46. Casquete con forma esférica [30]

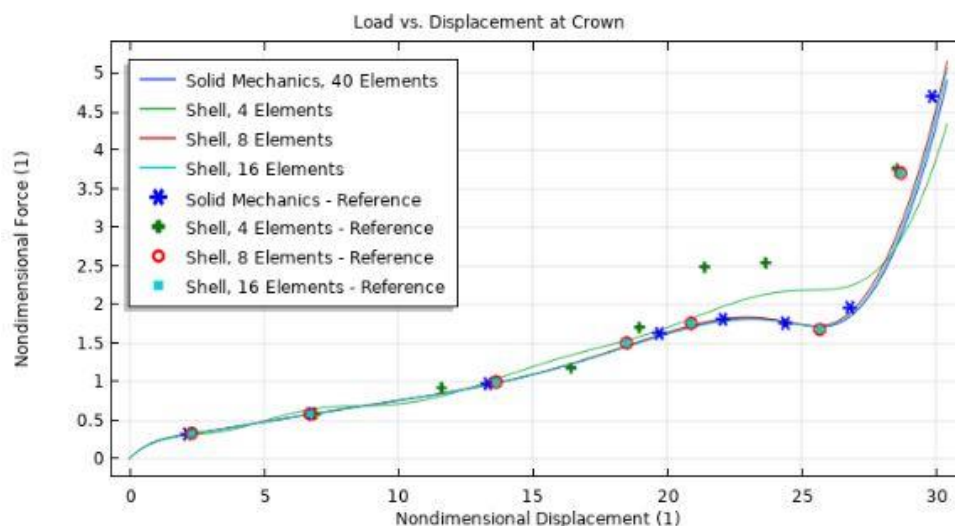


Figura 47. Diagrama carga-desplazamiento de un casquete bajo el efecto snap-through [30]

Si se somete una cúpula como la de la Figura 46 al desplazamiento que se indica, la curva de la Figura 47 refleja que con una carga en torno a 1,75 N el centro de la cúpula comienza a desplazarse, reduciendo en ese punto la fuerza implicada. Una vez se alcanza el punto límite que soporta la estructura, si no se permite que esta supere la horizontal se consigue un desplazamiento donde la fuerza se mantiene constante durante unos instantes mientras el desplazamiento continúa. Este fenómeno se aprovecha en esta clase de dispositivos al apilar cada una de estas arandelas una sobre la otra.

Los dispositivos de platillo o arandelas Belleville son componentes de tipo arandela diseñados para ser cargados axialmente ofreciendo una fuerza elástica proporcional a la deformación a la que son sometidas. (Figura 48).



*Figura 48. Resorte de platillo [31]*

Su principal característica es que son elementos sumamente precisos ya que siguen fielmente los valores teóricos que se les presuponen, lo cual les otorga la ventaja de que es fácil prever su comportamiento (tanto deflexión como carga necesaria) y escoger la composición de la forma más correcta. Por su geometría, sufren deflexiones pequeñas bajo cargas fuertes, lo cual es ideal para emplearlo en espacios reducidos. Se puede emplear cargándolos de forma constante o intermitente, otorgando grandes prestaciones en cargas dinámicas.

A la hora de combinar arandelas individualmente, existen dos opciones: en serie o en paralelo, lo cual otorga diferentes propiedades en función a los requerimientos necesarios.

- Acoplamiento en paralelo: Se trata de colocar las arandelas en la misma dirección “encajando” unas dentro de las otras, creando una suma de arandelas que actúan como una única (Figura 49). Es decir, poseen la misma carrera elástica que una sola de las arandelas, pero el esfuerzo de compresión soportado antes de ceder se multiplica por el número de arandelas que formen el conjunto.

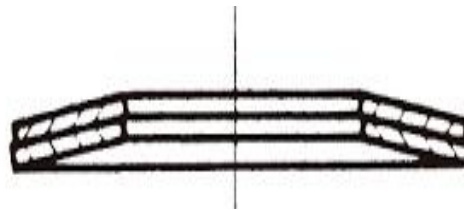


Figura 49. Acoplamiento en paralelo [32]

El cálculo no es tan trivial debido a que la fuerza no aumenta de manera directamente proporcional, ya que es necesario tener en cuenta la fuerza que se disipa en forma de rozamiento entre las arandelas, lo que hace necesario una mayor carga que en el modelo ideal. Esta composición permite combinar arandelas de diferentes espesores para obtener gráficas de alargamiento frente a fuerza formadas por diferentes tramos. Esto se debe a que las arandelas de menor grosor requieren una fuerza inferior hasta llegar al punto al que su forma se va viendo doblegada hasta el aplanamiento.

- Acoplamiento en serie: En esta otra combinación las arandelas se colocan contrapeadas, es decir, apilando cada una de ellas en el sentido contrario a la anterior.

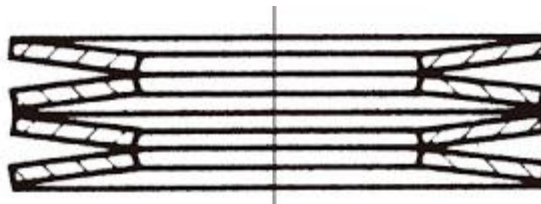


Figura 50. Acoplamiento en serie [32]

En este caso las arandelas son del mismo espesor y material, dispuestas de tal forma que el aplanamiento de cada una de ellas se va desarrollando de manera continua desde la primera que soporta la fuerza ejercida hasta la de la posición más alejada (Figura 50). Es decir, este acoplamiento soporta el esfuerzo de un solo resorte, pero tiene una flecha o desplazamiento proporcional al número de resortes empleados. De esta forma se consigues una mayor elongación con una misma fuerza aplicada.

- Combinación serie-paralelo: De esta forma se combina ambos tipos de disposiciones, otorgando al conjunto una flecha mayor que la que tendría con una combinación en paralelo y con una fuerza resistente mayor que la que tendría en serie. En el ejemplo de la Figura 51, se aprecia una composición formada por 4 paquetes interpuestos formados a su vez por dos resortes en paralelo, lo que otorga a la composición un doble esfuerzo necesario para provocar una flecha cuádruple.

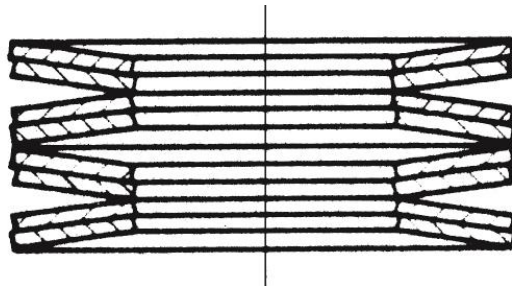


Figura 51. Acoplamiento en serie-paralelo [32]

En cuanto a su actuación como dispositivo de fuerza constante, se puede apreciar en la Figura 52. En primer lugar, todos los dispositivos pasan por una zona dónde su comportamiento se asemeja al de un resorte convencional, ya que el crecimiento de la fuerza y el desplazamiento es bastante parejo. Tras esto se llega a un punto donde está curva se aplana y pasa a una fase dónde la deformación aumenta sin que lo haga la fuerza necesaria.

Además, se reflejan muy bien las combinaciones explicadas anteriormente. Partiendo de la base de un solo componente (Figura 52a) donde se muestra su curva de fuerza desplazamiento hasta el punto en el que se vuelve constante. Las disposiciones en serie, caso de la Figura 52b, poseen el doble de desplazamiento, pero requiere la misma fuerza que en el caso del componente único. Se emplean en situaciones que requieran un gran desplazamiento.

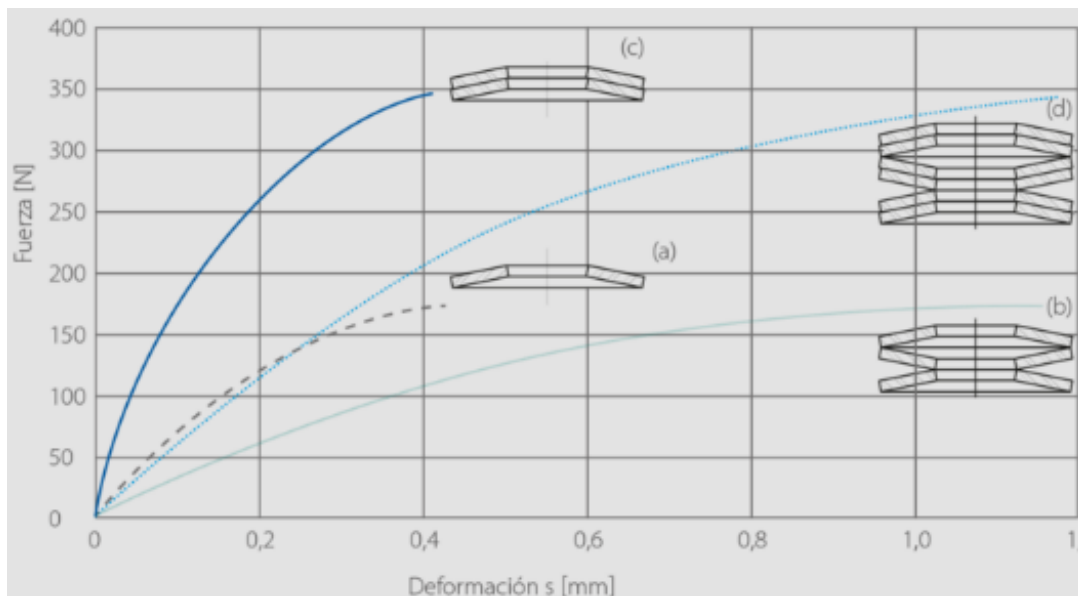


Figura 52. Gráfica fuerza-desplazamiento de los resortes de platillo [33]

Con el efecto contrario, está la disposición en paralelo, caso Figura 52c. Si se apilan los discos en la misma dirección se obtiene el mismo desplazamiento que usando uno solo de ellos, pero la fuerza requerida se multiplica tantas veces como el número de elementos que haya.

Por último, en el caso de la Figura 52d se representa una combinación de serie-paralelo, donde aumenta tanto el desplazamiento conseguido como la fuerza requerida.



Figura 53. Arandelas belleville [33]

Los materiales de fabricación más habituales son el acero al cromo vanadio (Figura 53), acero inoxidable y, dependiendo del espesor, aceros al carbono para espesores finos y aceros especiales para grandes espesores y altas exigencias de temperatura y corrosión. Debido al poco espacio que requiere su montaje y la polivalencia de su uso, el abanico de aplicaciones es muy amplio:

- Válvulas, bridas, acoplamientos.
- Embragues
- Resortes de retorno en cilindros y pistones
- Frenos de resorte
- Sujeción de cabezal de herramientas
- Ajuste del cable de teleféricos

El acoplamiento en serie permite obtener mayores alargamientos con la misma fuerza ejercida para una sola arandela, mientras que el acoplamiento en paralelo obtiene el mismo desplazamiento que tendría una única arandela, pero con la fuerza necesaria para producirlo proporcional al número de las mismas que conformen el conjunto.

### 3.5.3. Estructuras giroidales

En la búsqueda de diferentes vías de desarrollo para este estudio se ideó el empleo de estructuras giroidales para prototipar un dispositivo de fuerza constante ya que presenta un comportamiento bajo cargas adecuado. El giroide es una superficie descubierta en 1970 por Alan Schoen. Pertenece a la familia de las superficies mínimas periódicas triplicadas (*en inglés Triply Periodic Minimal Surface: TPMS*).

Las TPMS son superficies con curvatura media cero y se caracterizan por minimizar el área local, lo que significa que tienen las simetrías de un grupo cristalográfico (Figura 54). Ejemplos de TPMS que se encuentran en la naturaleza son las estructuras en conchas de mariposas y escarabajos. Esta geometría es muy porosa y por tanto muy ligera. Se comportan muy bien bajo cargas de compresión, ya que su composición presenta una serie de capas multiplicadas y distribuidas según un patrón, las cuales minimizan la concentración de tensiones.

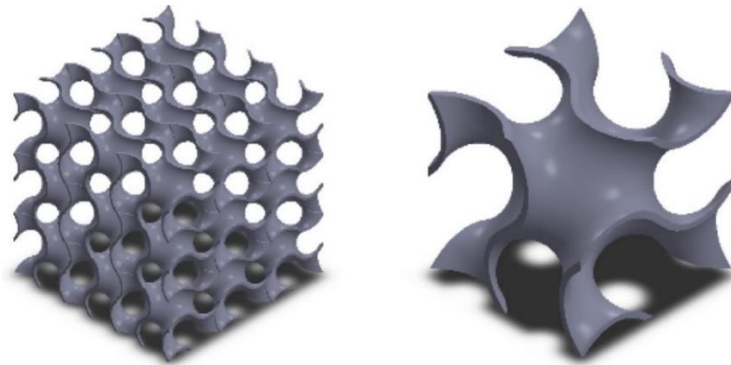


Figura 54. Estructura giroidal [34]

Las TPMS pueden ser utilizadas para crear composites y estructuras celulares periódicas. Estas dividen el espacio en fases continuas, permitiendo crear materiales con refuerzos interconectados. Además, gracias a su ligereza y robustez, se emplean en aplicaciones médicas como prótesis e injertos óseos. En conjunto se puede considerar como un material micro estructurado, en vez de un material homogéneo e isótropo. Con impresoras 3D se han desarrollado TPMS cerámicos y plásticos. Los más recientes incluyen acero inoxidable 316L.

Uno de los TPMS más populares es el giroide, empleado para crear estructuras con características mecánicas robustas. La diferencia entre este tipo y el resto de familiares reside en que el giroide posee dos capas por cada celda unidad mientras el resto de TPMS posee una capa.

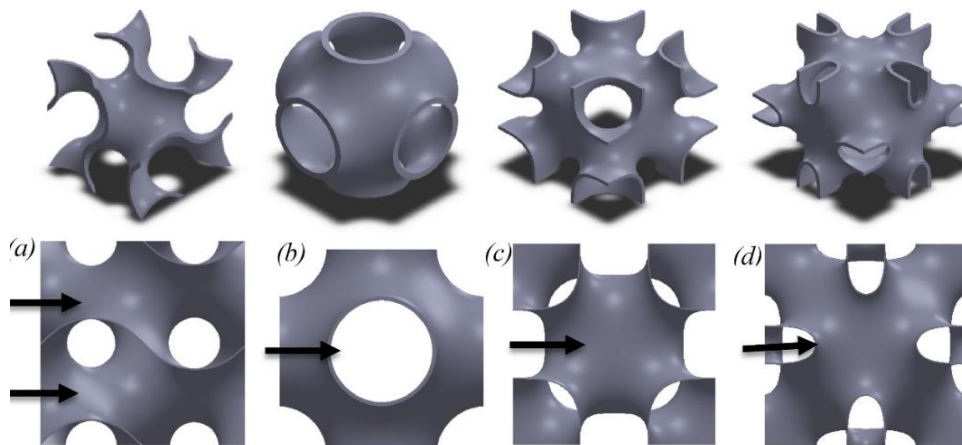


Figura 55. Comparativa de diferentes estructuras TPMS en función de las capas por cada celda unidad [34]



La Figura 55 ilustra las capas existentes y su deformación bajo cargas de compresión. Este hecho y el conocimiento de su comportamiento bajo la aplicación de cargas indica que puede actuar muy bien como dispositivo de fuerza constante. Además, el comportamiento de los TPMS es muy similar al fenómeno snap-through tan reproducido en numerosos casos.

Recientes estudios han estudiado la respuesta a cargas de compresión de estructuras giroidales en función de la densidad del relleno con el que son fabricadas.

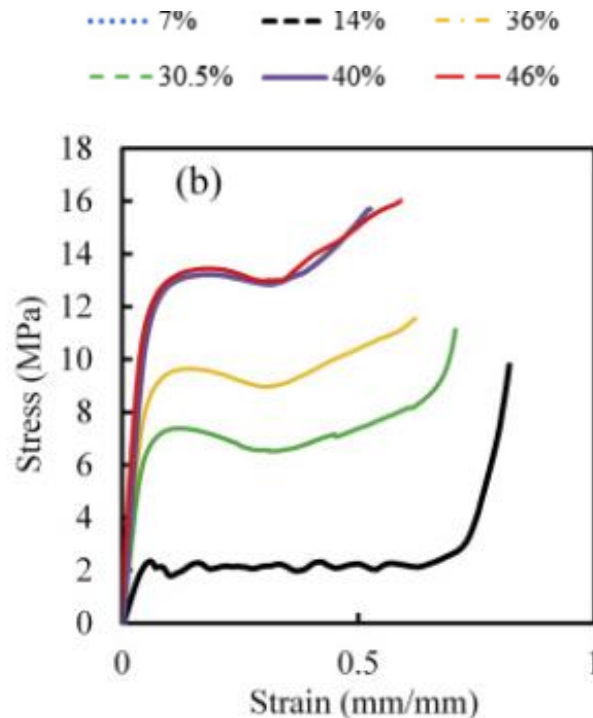


Figura 56. Gráfica fuerza-desplazamiento de una estructura giroidal sometida a compresión. Cada una de las líneas corresponde a un porcentaje de densidad, como indica la leyenda superior [34]

En la Figura 56 se presentan esos mismos comportamientos. Las curvas fuerza-desplazamiento comienzan con una respuesta elástica típica donde la fuerza ejercida crece provocando pocos desplazamientos. Como es lógico, en las estructuras que poseen un mayor porcentaje de relleno la carga necesaria para provocar el colapso de la estructura es mayor. En estas densidades la fuerza crece hasta que se alcanza el punto máximo que la estructura es capaz de soportar y plastifica. Es ahí cuando el esfuerzo entra en una región donde su valor se declina, como ocurría en el efecto snap-through (Figura 40).

Para la aplicación de dispositivo de fuerza constante lo interesante está en la curva en negro, la de densidad de un 14%. Se observa (Figura 57) que en un principio el comportamiento es similar al de los casos con mayor densidad. La curva asciende con una pendiente constante hasta que alcanza el límite ante el que el material cede.

Como es lógico este punto se produce antes ya que al tener menos densidad soporta menos carga. Tras ese punto, la gráfica presenta un comportamiento más sostenido, seguido por una oscilación debido a cada uno de los fenómenos de snap-through.

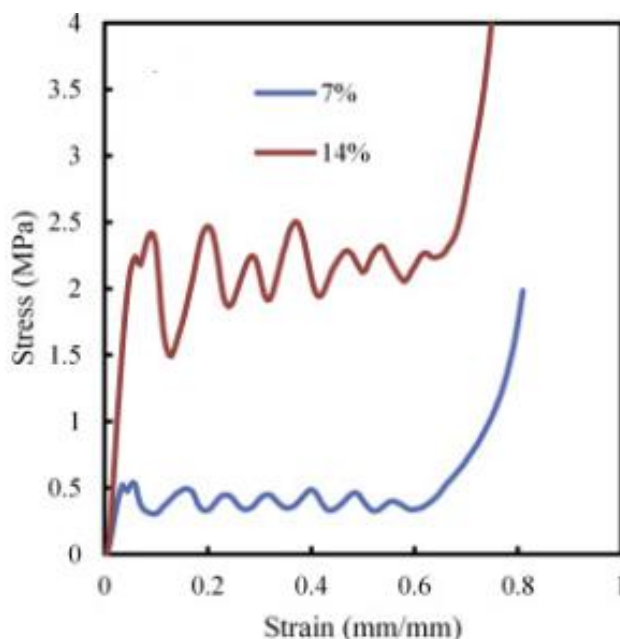


Figura 57. Gráfica fuerza- desplazamiento de dos estructuras girodales dependiendo del relleno: 7% en azul y 14% en granate [34]

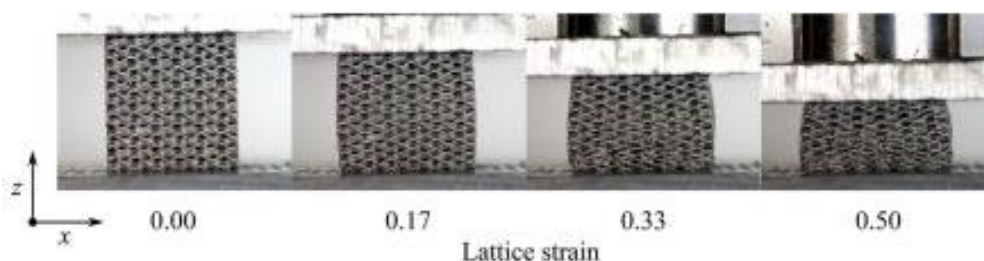


Figura 58. Estructura girodial deformada bajo carga de compresión [35]

En relación a la Figura 58 es posible observar cómo cada una de las capas de la estructura colapsan de manera ordenada propagando la deformación. Cuando la primera capa cede aparece en la gráfica la pendiente negativa ya que en esos instantes la fuerza necesaria para producir la deformación es menor que la que se necesitó en el instante en el que comenzaba a ceder. Una vez la carga pasa a la siguiente capa, la fuerza requerida aumenta hasta alcanzar de nuevo la máxima que la capa es capaz de soportar, lo que se corresponde con la pendiente positiva. Una vez sobrepasado ese instante, vuelve la bajada.

La intención inicial de este capítulo del TFG era emplear la impresora 3D del departamento para realizar varias pruebas de esta estructura y testearlas con una célula de carga para posteriormente graficar y estudiar el comportamiento como dispositivo de fuerza constante.





## 4. Capítulo 4: Prototipado de dispositivos de fuerza constante

Al principio del estudio se habló de manera general sobre los resortes comunes que existen en el mercado, analizando su comportamiento y clasificándolos en función de los esfuerzos que sufrirían.

El capítulo siguiente estuvo dedicado a hablar acerca sobre los dispositivos de fuerza constante. Se habló sobre la tipología de los elementos que se encuentran en la actualidad, con sus aplicaciones y los fenómenos físicos en los que se basa cada uno. Además, se expusieron las estructuras giroidales y la propiedad de generar desplazamiento con una fuerza invariable y cómo se podría aprovechar para construir un dispositivo nuevo.

En este último apartado del TFG se tratará de prototipar algún modelo de dispositivo de fuerza constante empleando alguno de los fenómenos físicos que siguen los ya comentados.

En un primer lugar, se estudiará el comportamiento de un dispositivo en espiral, construyendo uno propio y analizándolo durante su uso. Para ello, se emplearán utensilios que se pueden encontrar fácilmente debido a las circunstancias externas en las que se ha desarrollado este estudio. Además, se tratará de diseñar completamente de cero un modelo nuevo de este tipo de dispositivos empleando el fenómeno snap-through buckling ya explicado con anterioridad. Para ello, se empleará la impresora 3D del departamento de la Universidad, utilizando como material base el PLA, otorgando una característica de bajo coste muy competitiva en este tiempo.

### 4.1. Prototipado de un dispositivo en espiral

El dispositivo de fuerza constante en espiral constituye el más utilizado en la actualidad para este tipo de requerimientos y que agrupa prácticamente todas las ventas de mercado. El diseño y funcionamiento se explicó en su apartado correspondiente por lo que en esta ocasión se prototipará uno de cero. Debido a las circunstancias en las que se ha desarrollado este estudio, ha sido imposible acudir a la escuela, por lo que usar las herramientas disponibles en el laboratorio de estructuras dejó de ser una opción. Se optó por tanto por usar elementos al alcance de todos que se encuentran fácilmente en cualquier hogar.

Para construirlo, se empleó un Fidget Spinner. Este juguete está formado por tres brazos los cuales contienen en sus extremos un taladro donde se aloja un peso unidos por una parte central con un rodamiento que permite un giro suave.



*Figura 59. Objetos de uso cotidiano empleados para el prototipo: Fidget Spinner [36] y mecanismo recogecables de aspiradora [37]*

Generalmente están hechos de plástico y metal (Figura 59 izquierda), aunque existen diversos modelos y formas. Este será el objeto empleado como tambor, acoplando el fleje a cada uno de los agujeros, de modo que con el giro que posee se pueda enrollar o desenrollar la espiral.

El otro componente necesario es el fleje. Para ello, se empleará el muelle de un mecanismo recogecables de una aspiradora vieja (Figura 59 derecha). El mecanismo de un recogecables es muy simple. Se emplea un resorte en espiral como los estudiados al principio del documento alojado en una carcasa. En uno de sus extremos se acopla el cable, el cual se estira para conectarlo a la corriente, bloqueando el resorte. Cuando se libera, este trata de retornar a su forma inicial de reposo provocando la retracción del cable.

Tal y como se ha comentado antes, este tipo de instrumentos está diseñado para aplicar siempre la fuerza en el extremo libre del exterior de la bobina, teniendo este un pasador al que unir una fuerza para estirarlo y alejarlo del tambor. En este caso se empleará una cuerda sobre la que ejercer la fuerza de tracción (Figura 60).



Figura 60. Prototipo antes del montaje

La premisa de este tipo de dispositivos es que este se encuentre progresivamente curvado sobre sí mismo en forma de espiral (Figura 61). Es decir, en condiciones normales ya posee la forma curva sin necesidad de emplear una bobina o tambor sobre el que enrollarlo.



Figura 61. Resorte en espiral antes del montaje

En el extremo exterior del fleje se aplica una fuerza inicial ( $F_1$ ). Es conveniente recordar que, aunque se trate del extremo libre, se encuentra fuertemente enrollado debido a la geometría previa. Esto significa que no tiene ninguna zona carente de curvatura sobre la que tirar.

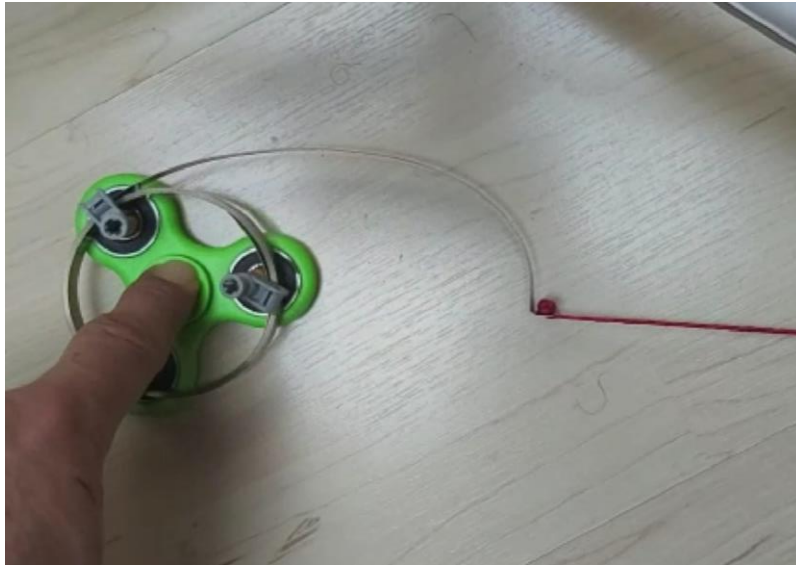


Figura 62. Primer tramo de desplazamiento del dispositivo

Durante los primeros instantes, la fuerza es empleada únicamente en enderezar una primera zona del fleje, es decir, reducir su curvatura. En este periodo es cuando el dispositivo se comporta como un resorte convencional (Figura 62). La fuerza aumenta de forma prácticamente proporcional a la deflexión. Observando la Figura 23 anterior, en estos instantes el dispositivo se encuentra en el *tramo OA* de crecimiento. Esto sucede porque en este periodo se puede afirmar que el fleje se está comportando como una viga en voladizo como la de la Figura 63.

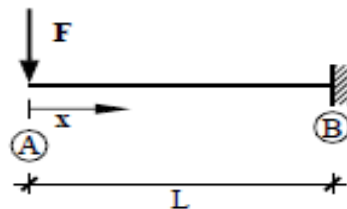


Figura 63. Componente de rigidez de una barra empotrada [24]

El punto A sería el extremo del fleje y el punto B sería la zona donde se comienza a separar del tambor. A medida que esta fuerza continúa la longitud efectiva aumenta, es decir, se separa mayor cantidad del fleje de la bobina. Además, por equilibrio existe una componente de la fuerza que favorece el giro del conjunto, es decir, se va desenrollando. Esto produce que cada vez requiera menos fuerza para separar el fleje. Si cada vez existe mayor longitud efectiva la *L* aumenta y la resultante de la rigidez disminuye. Este es el punto en el que la pendiente de la gráfica de fuerza-desplazamiento comienza a disminuir. La deflexión sigue la ecuación 13:

$$y = \frac{F * L^3}{3EI} \quad (13)$$

De donde es fácil deducir la fuerza necesaria (14)

$$F = \frac{3EI * y}{L^3} \quad (14)$$

Esa y de la ecuación se puede entender como deflexión útil ya que, como se indica antes, no todo el desplazamiento provocado es útil, sino que al principio se invierte en enderezar la curvatura del fleje. Por tanto, esa deflexión útil que comienza tras la deflexión inicial dónde es del orden de un cuarto del perímetro de la bobina (15), que depende siempre de su radio R. Si se realizan los cálculos con el diámetro exterior, al que llamaremos  $\varphi$ , se obtiene:

$$y = \frac{\pi * R}{2} ; \varphi = 2R \rightarrow y = \frac{\pi * \varphi}{4} \quad (15)$$

La longitud útil, por su parte, también dependerá de del diámetro exterior y tiene un valor aproximado de medio perímetro (16).

$$L = \pi * R \rightarrow L = \frac{\pi * \varphi}{2} \quad (16)$$

Si se lleva ambos elementos a la fuerza necesaria y se desarrolla, es posible obtener la fuerza necesaria (17) en ese momento para desenrollar el fleje y reducir su curvatura a la vez que se genera desplazamiento útil.

$$F = \frac{E * b * t^3}{2 * \pi^2 * \varphi^2} \quad (17)$$

Dónde b es el ancho del fleje y t es el grosor.

La fuerza que se está ejerciendo no es transversal al fleje por lo que no tiene solo componente normal. Se trata de un esfuerzo combinado con una componente axial y otra de flexión. Cuando se ejerza una fuerza que supere al rozamiento llega un momento en el que el trabajo (producto de la fuerza por la distancia recorrida) se invierte en enderezar la parte del fleje que se está desenrollando y como se desenrolla siempre de igual manera no necesita mayor fuerza para hacerlo.



Figura 64 Dispositivo durante su etapa de fuerza constante y su representación gráfica

En esta situación la fuerza ya no aumenta. Al tener una parte del fleje recta esta energía es constante para cada incremento puesto que las secciones del fleje curvo son iguales y comienza la etapa en la que se comporta como un dispositivo de fuerza constante (Figura 64). Volviendo a observar la Figura 23, el fleje ha pasado al *tramo AB* donde la fuerza no aumenta mientras que el desplazamiento lo hace hasta la deflexión máxima de la espiral. En esta zona constante, es posible entender el sistema del resorte como un contrapeso en una polea al igual que ocurriría con los compensadores de las catenarias. En esta situación, si se aplica el desplazamiento el peso sube ganando energía potencial. Si se deja de aplicar el desplazamiento, el peso baja y recupera. Esto no significa que la fuerza esté cambiando, siempre es la misma.

Cuando cesa la fuerza el resorte por sí mismo tiende a volver a su posición natural. Se trata de un proceso reversible, ya que la “viga” siempre ha sido curva, pero al estirarse se ha enderezado un poco debido a la deflexión. La componente del flector sigue actuando, aunque el axil ya no se esté ejerciendo y es la causante del retorno.

#### 4.2. Prototipado de un dispositivo basado en el fenómeno snap-through

El fenómeno snap-through es la base del funcionamiento de los resortes de platillo y las arandelas Belleville. Si se reproduce este movimiento a una escala mayor, apilando cada una de las arandelas es posible ver que, como se ha explicado en los apartados anteriores, el desplazamiento provocado por la fuerza se va expandiendo desde la arandela más próxima a la misma hasta la última del conjunto. Este efecto secuenciado a lo largo del tiempo da como resultado una gráfica de fuerza-desplazamiento prácticamente constante en el tiempo, asumiendo como normales las ligeras subidas y bajadas.

El enfoque principal de este TFG era diseñar un dispositivo de fuerza constante desde cero empleando este efecto. Tras este diseño, utilizando la impresora 3D del departamento, se produciría un prototipo. Una vez creado, se ensayaría con células de carga para estudiar su comportamiento y crear las gráficas fuerza-desplazamiento asociadas, así como todas las que arrojasen datos sobre el comportamiento del dispositivo. Con estos ensayos se harían los cambios pertinentes y se deducirían conclusiones acerca de su viabilidad.

El objetivo era lograr un diseño nuevo de un dispositivo de este tipo que fuera completamente lowcost y funcional, pero debido a la situación provocada por la alerta sanitaria no se pudo lograr en su totalidad.



## Proceso de impresión



Figura 65. Etapas del proceso de impresión en una impresora 3D

El proceso de conformado mediante la fabricación aditiva consta de tres fases (Figura 65). La primera de ellas es el diseño del prototipo en un software de diseño asistido por ordenador (CAD). En este caso se empleará el programa *Catia V5* en su extensión *Part Design*. Se trata de un programa líder en el diseño integrado de ingeniería y construcciones en ámbitos informáticos 3D, con múltiples extensiones como pueden ser el diseño de componentes, ensamblajes, superficies, etc. Se hablará de este proceso en un apartado propio al tratarse del más extenso, explicando cada una de las pruebas y los cambios realizados.

Cuando se genera un archivo en CAD, este tiene la extensión *.stl*. Este formato no es legible por una impresora 3D de modo que el siguiente paso consiste en obtener el código G. Para ello se emplea un software capaz de generar este código creando las capas de fabricado y definiendo parámetros de impresión. En nuestro caso se ha empleado el software *Ultimaker Cura*, un software libre que trabaja con archivos CAD y permite configurar todos los parámetros necesarios tanto de la impresora como del diseño.

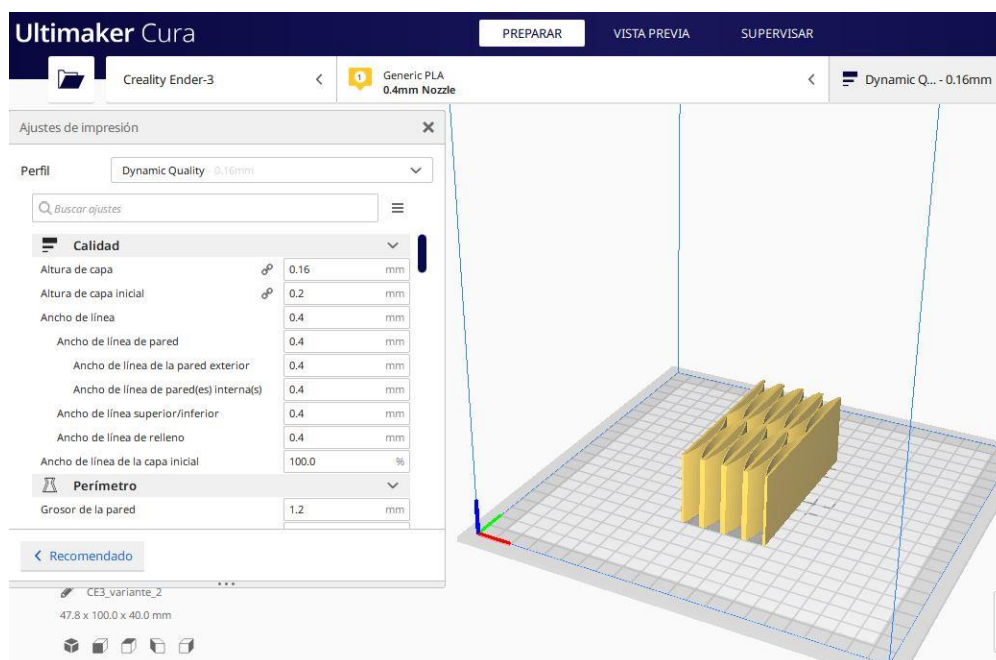


Figura 66. Cuadro de diálogo de software CURA

En este software (Figura 66), el primer paso es seleccionar qué modelo de impresora es la empleada para posteriormente calibrar y establecer las diferentes opciones de impresión. La impresora empleada es la Creality Ender 3 (Figura 67). Se trata de un modelo con una de las mejores relaciones calidad-precio del mercado, que emplea la tecnología FDM (Modelado por Deposición Fusiónada) y posee las características indicadas en la Tabla 1

Tecnología	FMD
Volumen de impresión (mm)	220 x 220 x 250
Nº Cabezales	1
Diámetro cabezal (mm)	0.4
Velocidad impresión (mm/s)	200
Resolución de capa (mm)	0.1
Precisión impresión (mm)	± 0.1

Tabla 1. Características de la impresora 3D Creality Ender 3



Figura 67. Impresora 3D Creality Ender 3 [38]

El material empleado es el ácido poliláctico (PLA). Se trata de un material versátil, que permite el contacto con el agua sin alterarse, biodegradable, fácil de imprimir y con buena precisión dimensional y acabado superficial. Sufrir contracciones a causa del enfriamiento del plástico durante la impresión, por lo que se debe procurar mantener en espacios cerrados sin corrientes de aire durante el funcionamiento. Con este material no es necesario mantener la cama de impresión caliente, pero siempre es beneficioso para un buen agarrado del material.



En cuanto a las características técnicas:

- Baja temperatura de fusión (145 °C)
- Rigidez flexional considerablemente buena (103 MPa)
- Resistente (83 Shore dureza)
- Buena resistencia al impacto (5.1 KJ/m<sup>2</sup>)

Además, se trata de uno de los materiales más económicos que emplean este tipo de tecnologías. El precio ronda los 20-30 €/kg, lo que le otorga una ventaja considerable al tratarse de materiales lowcost.

Uno de los objetivos primeros que se plantearon para este TFG es que fuera considerablemente barato ya que, si bien existen en la actualidad otros dispositivos de fuerza constante, todos tienen un precio superior al que se podría conseguir si en un futuro el diseño progresase y en una línea futura se comercializara. Este fue uno de los motivos por los que se eligió el PLA debido a su precio económico. Además, es el más empleado ya que tiene el mayor número de aplicaciones y unas propiedades generales buenas.

#### 4.2.1. Pruebas con el casquete

Cuando comenzó el diseño del dispositivo, el primer objeto fijado como referencia fueron los Jumping Poppers de los que se habló en el apartado de los dispositivos que funcionan mediante pandeo. La geometría buscada era la de un casquete de esfera que tuviera el suficiente grosor para provocar el efecto snap-through, pero con el espesor mínimo, para que se pudiera forzar a mano.

##### Primera prueba

Los Jumping Poppers tienen una mayor concavidad debido al material plástico con el que están hechos. Además, esa concavidad junto con el mayor grosor de sus paredes produce el salto brusco del objeto, efecto claramente indeseado en este caso.

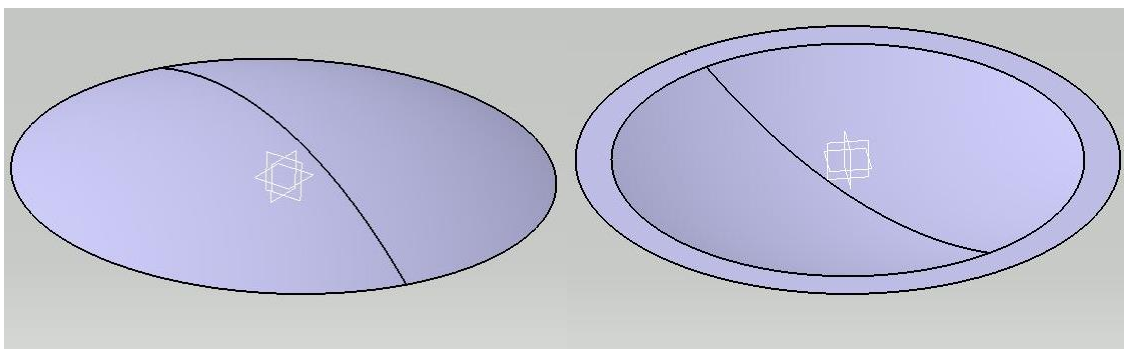


Figura 68. Casquete diseñado en Catia

El objetivo aprovechar la primera parte del efecto snap-through donde la propia forma del material lleva al pandeo, pero no se llega a la zona donde la parte central atraviesa la horizontal y el objeto se voltea sobre sí mismo.

Tras varias pruebas, el diseño que más se ajustaba a las exigencias es el de la Figura 68. En estas primeras fases el objetivo era hacer pruebas de resistencia con la impresora y probar diferentes modelos, por lo que los dispositivos impresos eran de tamaño pequeño. En este caso este casquete tiene 5 cm de diámetro y 1,5 cm de profundidad. Por otro lado, el espesor era de 0.7 mm ya que se comprobó tras diferentes pruebas que era el idóneo. En el software Cura se emplearon los parámetros (Tabla 2) más convenientes tras pruebas previas.

<b>Temperatura extrusor</b>	220 °C
<b>Temperatura cama</b>	80 °C
<b>Velocidad de impresión</b>	50 mm/s
<b>Relleno</b>	50 %
<b>Altura de capa</b>	0.16 mm
<b>Ancho de capa</b>	0.4 mm

*Tabla 2. Parámetros de impresión del primer diseño*

La menor altura de capa que la impresora es capaz de obtener es 0,12 mm. En estas pruebas se empleó una altura de capa de 0,16 mm, la cual sigue siendo muy baja, lo que otorga una mayor calidad, pero a cambio un tiempo de impresión mayor. La temperatura tanto del extrusor como de la cama se mantendrán así en todas las impresiones.

Al tratarse de una impresión pequeña, una velocidad de 50 mm/s es adecuada ya que los tiempos no son muy elevados y con una velocidad menor se consiguen acabados de mayor calidad. En este caso la duración del proceso de impresión es de 49 min, empleando 1,17 m de material con un peso de 3 g.

Se optó por un relleno del 50% ya que es el que más se adecua a lo deseado. Por debajo de este porcentaje la estructura se vuelve demasiado endeble y pierde su forma prácticamente al usarlo por primera vez. Por encima de este valor presenta una composición demasiado rígida, lo que hace imposible su pandeo.

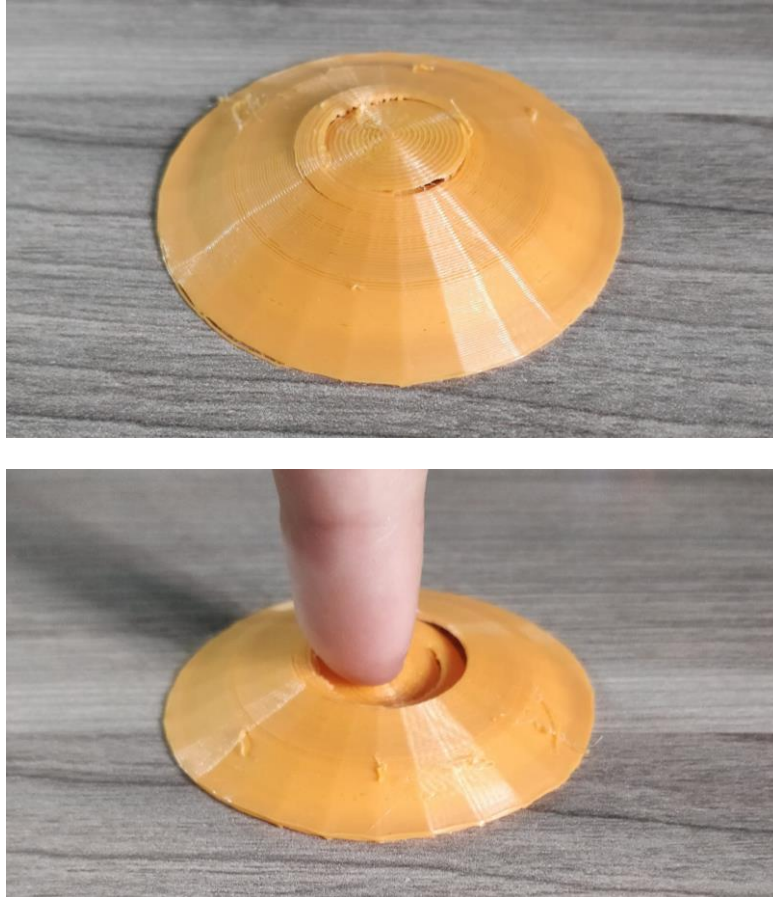


Figura 69. Casquete impreso

Tras diferentes impresiones se comprobaron los resultados. La pieza se comportaba de una forma no deseada, ya que solo cedía y pandeaba la punta del casquete, es decir, un área formada por una circunferencia próxima al final superior de la pieza. El resto del casquete se mantenía inamovible. Por encima de ese relleno la pieza se volvía completamente rígida por lo que se optó a bajarlo para conseguir que fuese toda el área del casquete el que pandease. Tras varias pruebas, se vio que por debajo del 50% de relleno se volvía demasiado frágil, al ser usado por primera vez la pieza se deformaba y no volvía a su forma inicial una vez cesaba la aplicación de la fuerza (Figura 69). Por este motivo, este primer diseño fue descartado.

### Segunda prueba

Tras esta primera prueba, se comprobó que era imposible generar un dispositivo de fuerza constante con la geometría de un Jumping Popper empleando PLA. Al ver que los problemas residían en la punta del casquete, en este segundo diseño se realizó un taladro en el centro (Figura 70).

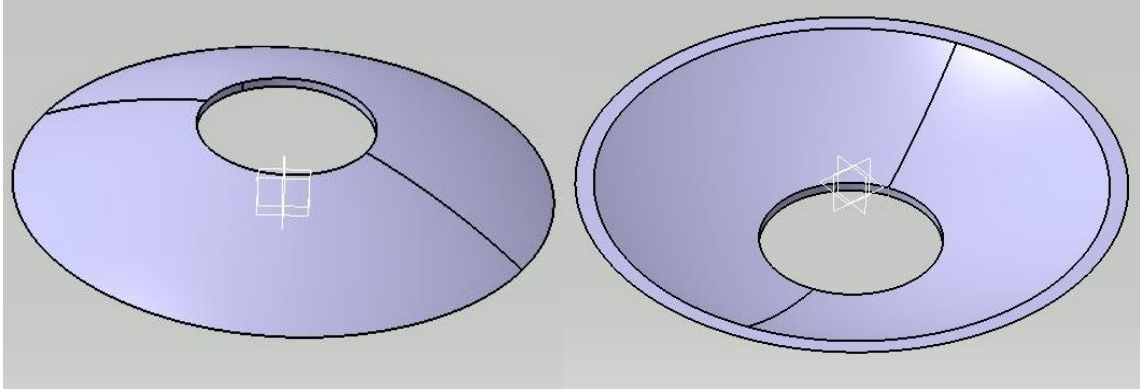


Figura 70. Casquete diseñado en Catia con un taladro en su parte central

A su vez se trató de reducir la concavidad ya que así la estructura sería menos rígida ante fuerzas externas de compresión. Este diseño contaba con 6 cm de diámetro frente a los 5 cm del anterior y con 1 cm de profundidad frente a 1,5 cm del anterior. Por otro lado, el taladro concéntrico posee un diámetro de 2 cm y el espesor del material continúa siendo 0,7 mm. Los parámetros de impresión fueron los mismos que para el modelo anterior, probando con diferentes rellenos del material.

El planteamiento inicial era, una vez obtenida una pieza con el funcionamiento deseado, fabricar un dispositivo similar al de los muelles de platillo (Figura 71). Consistía en crear una hilera de piezas dispuestas una tras otra para aumentar la longitud efectiva del dispositivo de fuerza constante. A través del taladro se acoplaría un vástago de forma que quedase unido a la primera capa de la hilera. Su movimiento constante a lo largo del eje se transmitiría por toda la geometría actuando esta como amortiguante capaz de generar desplazamiento con una fuerza constante.



Figura 71. Dispositivo formado por muelles platillo [39]

En este caso, la duración de la impresión es de 45 min. Se emplea 1,10 m de material con un paso de 3 g. Una vez se imprimió la primera de las piezas, se observó que surgían los mismos problemas que con la primera prueba. Aun disminuyendo la profundidad del casquete y realizando el taladro para evitar los conflictos con la parte superior por ser la más endeble (Figura 72) no se comportaba correctamente.



Figura 72. Casquete con taladro impreso

Las paredes se volvían demasiado rígidas con un porcentaje de relleno alto y muy débiles con un relleno bajo. No se conseguía el efecto deseado bajo las cargas de compresión y posee una vida útil muy baja. Además, la calidad de la impresión era baja.

Las pruebas realizadas con la impresora fueron numerosas (Figura 73) tanto en el primer diseño como en el segundo, pero en todas se obtuvieron resultados poco satisfactorios. Por tanto, ese segundo diseño fue también descartado. Esta geometría se comercializa en las arandelas Belleville y los platillos debido a que están fabricados con metal conformado, con propiedades y comportamientos bajo compresión demostradas. Ya que en la impresora 3D era imposible lograr realizar casquetes de calidad con PLA se buscó otro diseño.



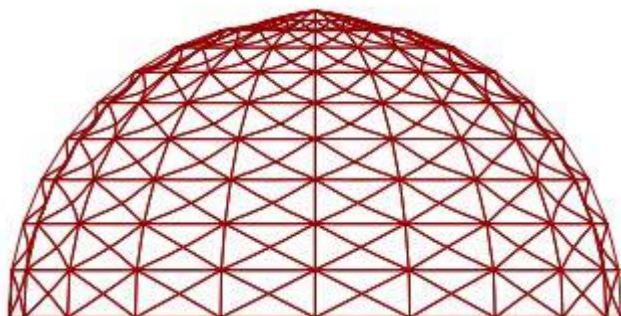
Figura 73. Diferentes pruebas de impresión

#### 4.2.2. Pruebas con las bóvedas

Tras comprobar que el diseño de un casquete con PLA no obtenía los resultados esperados, se debía cambiar de geometría. La base seguía siendo una superficie curva que cediese ante una carga de compresión y tuviera desplazamiento efectivo controlado.

El snap-through sigue siendo el efecto detrás del funcionamiento del dispositivo. La pieza debe soportar una cantidad de esfuerzo de compresión hasta ceder, donde la fuerza desciende a la vez que el desplazamiento transversal en la zona central de la superficie curva aumenta. Una vez la fuerza sobrepasa, esta primera capa no opone resistencia y el proceso se debe repetir en la siguiente fila de la hilera, generando la gráfica con la forma de los dientes de sierra que a la larga se convierte en una cuasi fuerza constante.

Todas las pruebas realizadas anteriormente se habían hecho con estructuras de doble curvatura. Este tipo de estructuras se caracteriza porque toda su geometría está formada por dos curvas que se entrelazan en cada punto de la estructura (Figura 74) dotándolo de mayor rigidez. Este efecto se ha empleado en la arquitectura durante siglos ya que es la base fundamental del funcionamiento de las cúpulas.



*Figura 74. La cúpula y la estructura de doble curvatura [40]*

Sin embargo, en contra de lo que parece seguir la lógica de buscar siempre las estructuras lo más estables y resistentes posibles, en este estudio era necesario hacerlas más endebles en cierto modo, más susceptibles a las cargas externas.

Antes del descubrimiento de las ventajas que se tenía en la construcción el uso de la doble curvatura la arquitectura se había basado en la simple curvatura (Figura 75). Consiste en la creación de estructuras mediante la combinación de una línea recta y una curva.



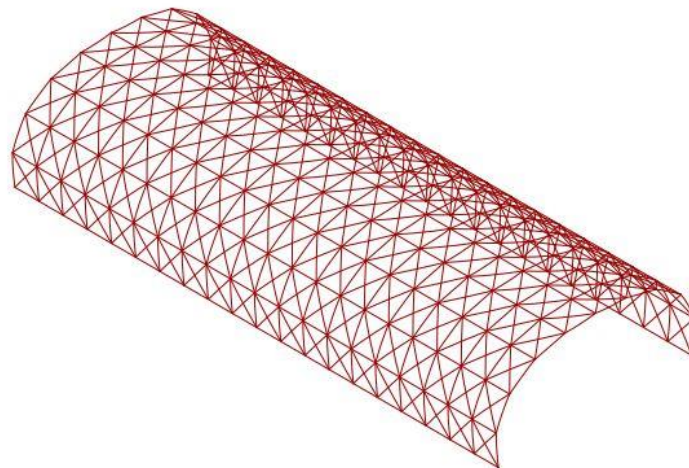


Figura 75. Bóveda y estructura curvatura simple [40]

Este método de construcción, más antiguo, se fue sustituyendo progresivamente por el de doble curvatura al poseer propiedades más favorables a la hora de construir, lo cual otorgaba mayores posibilidades. Sin embargo, mediante los primeros ensayos de impresión se había visto que los diseños de doble curvatura no eran capaces de tener el comportamiento deseado por ser, curiosamente, demasiado rígido, cosa que en cualquier otra situación habría supuesto una ventaja. El diseño se transformó en una sección de bóveda de cañón, que posee la forma curva en su parte superior, sobre la que ejerceremos la fuerza.

### Tercera prueba

Es necesario recordar que el fenómeno snap-through solo se da si la barra curva se encuentra biapoyada, es decir, que la distancia entre los dos extremos se mantenga constante. Es por esto que para terminar el diseño se optó por unir los extremos de la bóveda con una superficie plana, lo cual serviría como base sobre la que apoyar el conjunto. Tras diseñar la pieza en Catia se obtuvo la geometría que aparece en la Figura 76.

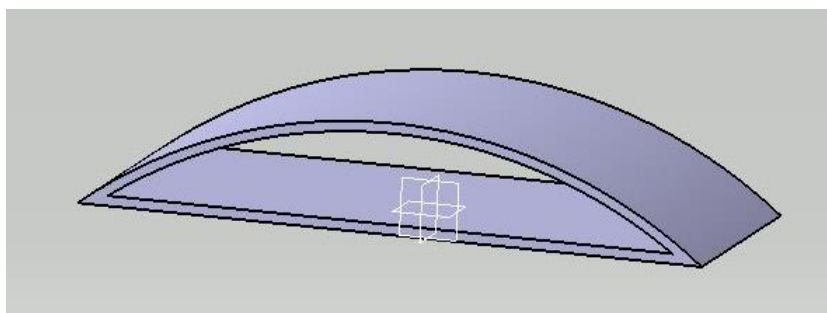


Figura 76. Diseño de Bóveda realizado en Catia

Las dimensiones de la pieza son de 5 cm de base y la superficie curva pertenece a una circunferencia de 8 cm de diámetro. El espesor de la pieza tras varias pruebas se comprobó que el más conveniente era el de 0,6 mm. Por último, el ancho de la pieza es de 4 cm. Los parámetros de impresión (Tabla 3) cambiaron ligeramente sobre los anteriores.

<b>Temperatura extrusor</b>	220 °C
<b>Temperatura cama</b>	80 °C
<b>Velocidad de impresión</b>	70 mm/s
<b>Relleno</b>	30 %
<b>Altura de capa</b>	0.12 mm
<b>Ancho de capa</b>	0.4 mm

Tabla 3. Parámetros de impresión del nuevo diseño

Se mantuvo las temperaturas tanto del extrusor como de la cama, ya que son las más indicadas para el PLA. La velocidad de impresión ascendió de 50 mm/s a 70 mm/s ya que esta pieza posee una geometría menos comprometida al no tener voladizos y se permite una mayor velocidad.

Se redujo la altura de capa a 0,12 mm, la menor resolución capaz de reproducir este modelo de impresora lo cual le otorga una mayor calidad, pero también un mayor tiempo de impresión. El porcentaje de relleno se dejó en 30% ya que al tener un espesor tan bajo el relleno será igual de compacto con cualquier porcentaje elegido. El tiempo de impresión es de 1 h y 20 min, empleando 1,5 m de material plástico.



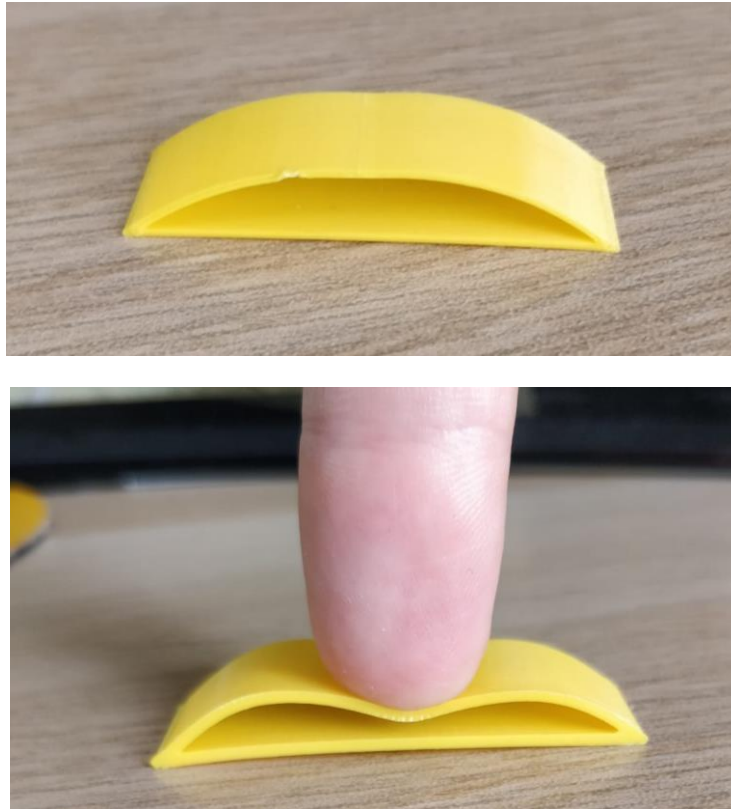


Figura 77. Bóveda impresa

Como se ve en la Figura 77, la calidad de la impresión es bastante buena. Posee una estructura que soporta la fuerza ejercida manualmente durante un tiempo limitado hasta que cede y se desplaza su parte superior como se puede apreciar en las imágenes. Además, tras cesar la fuerza, la pieza retoma su forma original, lo cual es esencial para este tipo de dispositivos.

#### Cuarta prueba

Este nuevo diseño se asemeja mucho más a lo deseado que los anteriores por lo que se empleó para crear el diseño final. El objetivo sigue siendo formar un dispositivo mediante la superposición de hileras de cada una de estas piezas formando una especie de “acordeón”.

Por tanto, la siguiente prueba fue apilar cada uno de estos “casquetes” formando un patrón (Figura 78) para comprobar su comportamiento. Se unieron dos de estas partes contrapuestas tal y como se realiza en los dispositivos de arandelas Belleville.

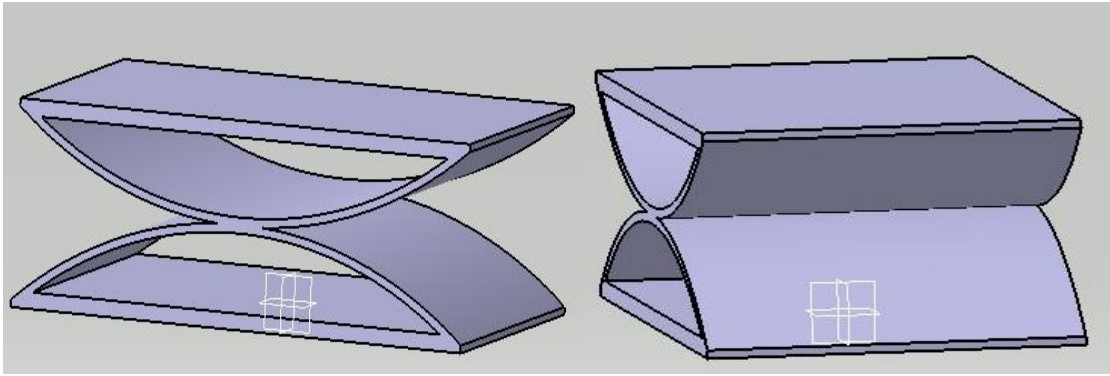


Figura 78. Acoplamiento de bóvedas en Catia

Se realizó un cambio en la geometría de las piezas, aplanando ligeramente la parte superior de la zona curva. Esto se hizo para reforzar la unión de las dos partes ya que de la otra forma la unión sería puntual y mucho más endeble. La zona plana sería muy pequeña, de 5 mm, pero suficiente para otorgar una unión rígida. El grosor sigue siendo de 0,6 mm. Una vez hecho ese cambio, la geometría de la pieza queda tal como se ve en la Figura 79.

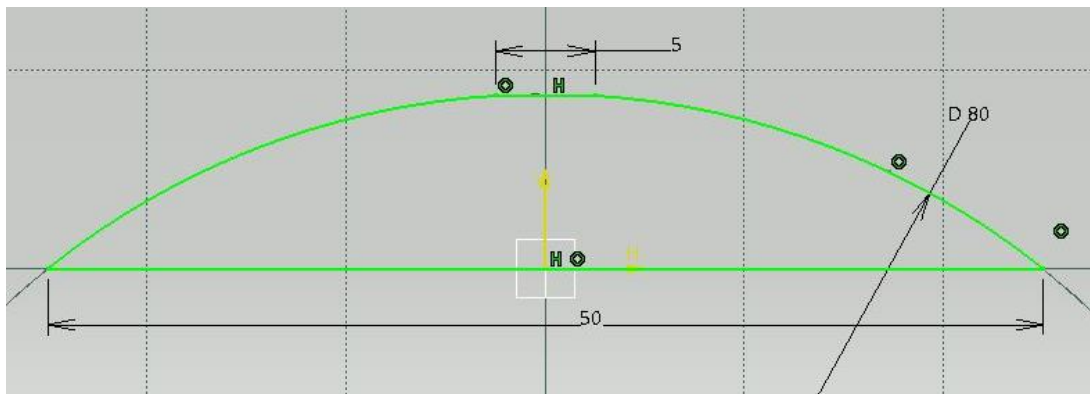


Figura 79. Croquis del diseño de la bóveda

El tiempo de impresión fue de 1 h y 10 m, empleando los mismos parámetros que los indicados al principio ya que dieron buenos resultados en la primera impresión. Se emplearon 3,11 m de hilo con un peso de 12 g.

Una vez impresa la pieza se observó que tenía menor estabilidad. Al sufrir la fuerza de compresión ejercida exteriormente el conjunto no tenía la anchura suficiente para tener desplazamiento tan solo en el eje vertical, sino que además sufría torsión y se desplazaba transversalmente. Es por eso que se decidió aumentar la anchura efectiva del dispositivo y dotarle de mayor estabilidad ante la compresión añadiendo otras dos piezas al lado, creando una especie de cuadrícula.

### Quinta prueba

Añadimos dos piezas contrapuestas más al dispositivo inicial, aumentando la anchura sobre la que se ejercerá la compresión. De este modo, trataremos de evitar que la pieza pandee hacia una dirección no deseada. Tras realizarlo en Catia, se obtuvo el diseño de la Figura 80.

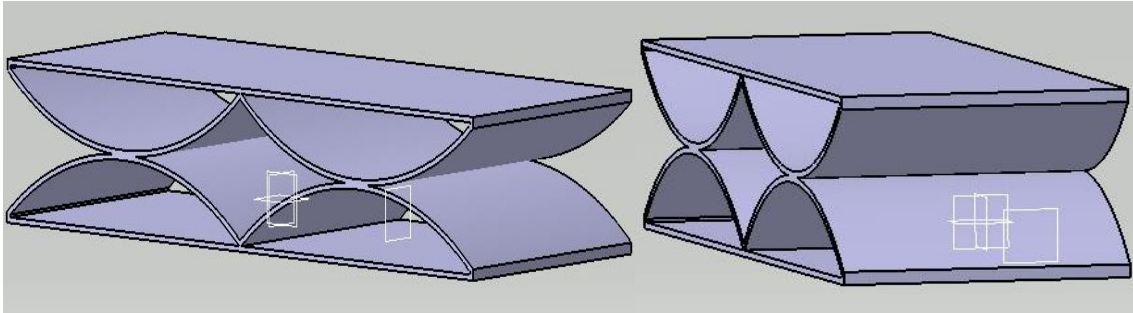


Figura 80. Diferentes combinaciones de bóvedas a medida que el diseño avanzaba

El tiempo de impresión fue de 3 h y 2 min, empleando los mismos parámetros para cada una de las impresiones. Se emplearon 7,61 m de hilo con un peso de 23 g.

Tras este tiempo, se obtuvieron los resultados deseados que se aprecian en la figura 81. Los parámetros de impresión siguen siendo válidos ya que se reproduce una pieza robusta pero que a su vez es capaz de ceder ante la compresión y recobrar su forma original tras un alto número de repeticiones.



Figura 81. Prototipo impreso

Tras esta impresión se pudieron sacar varias conclusiones útiles:

El diseño con el patrón de cuatro “bóvedas” puestas una frente a otra funciona de la manera deseada. Soporta la compresión cediendo con cierta cantidad de fuerza. Su desplazamiento es solo en el eje vertical por lo que la geometría no se desvía ni se retuerce sobre sí misma como ocurría en la prueba anterior.

Es necesario dotar de mayor grosor a la base inferior y superior del dispositivo. Estas dos superficies son las que van a soportar la compresión y para ello se necesita que tengan un espesor mayor para que se mantenga horizontal durante todo el recorrido. De esta forma la fuerza se reparte la presión de manera uniforme sobre toda la superficie.

La forma de pandeo que presenta este prototipo es una bifurcación antisimétrica (Figura 82 derecha). Los arcos resisten la carga generada por una combinación de compresión axial y acciones de flexión. Bajo estas acciones, cuando los desplazamientos laterales y las rotaciones de giro están completamente restringidas, se produce este fenómeno.

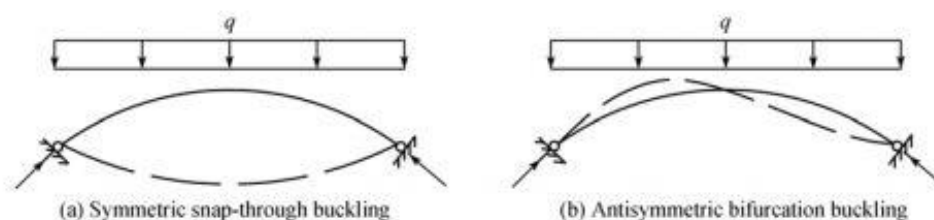


Figura 82. Diferentes formas de pandeo por fenómeno snap-through de una barra curva [25]

### Sexta prueba

Tras comprobar con la prueba anterior que el diseño se conducía por el camino pretendido, se pasó a imprimir modelos de dimensiones mayores. Añadiendo los cambios deducidos de la última prueba se diseñaron varios modelos diferentes que fueron descartados posteriormente.

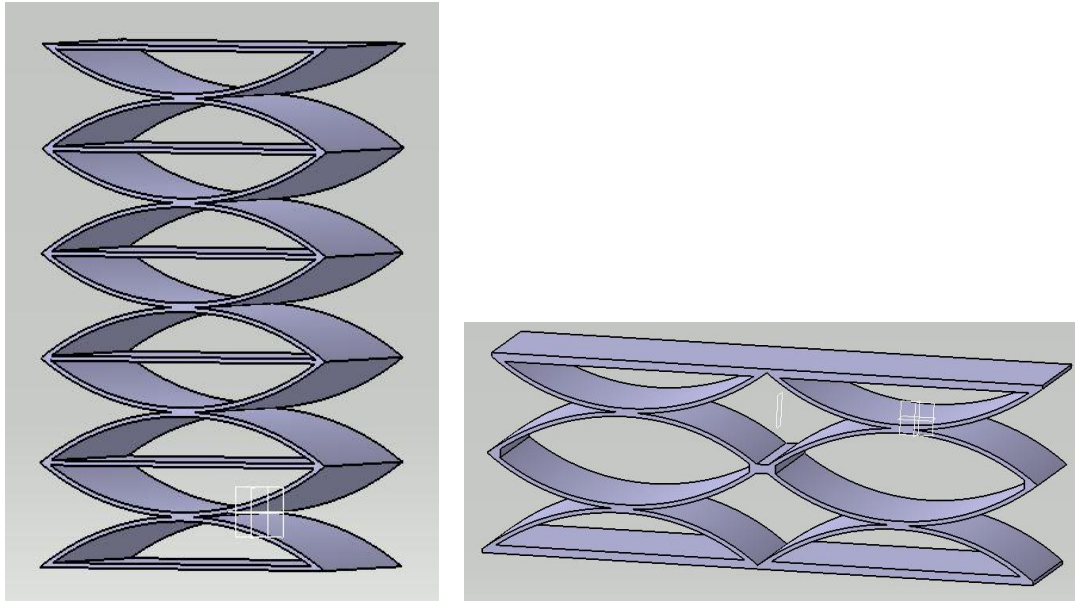


Figura 83. Diferentes diseños de apilamiento de bóvedas durante la etapa de pruebas

En la Figura 83 se puede ver un dispositivo formado por varias piezas situadas una tras otra en posiciones alternas. Esta prueba se descartó ya que sufría el mismo problema que las anteriores. Al tener una altura mayor, pero sin aumentar la anchura efectiva, cuando se aplicaba fuerza de compresión sobre los extremos la estructura pandeaba transversalmente y perdía la forma. Al tener este inconveniente solo era útil para estar empleado apoyado en horizontal sobre una superficie plana.

Por otro lado, en la parte inferior de la figura, se observa un diseño donde se empleó un patrón para colocar dos hileras de forma contigua solucionando el problema de la anchura. Se emplearon así ocho piezas apiladas de forma contrapuesta alcanzando mayor altura. Este modelo incluía la característica de suprimir la parte horizontal de cada unión de las bóvedas con el propósito de aligerar y ahorrar material de impresión.

Tras imprimirlo y probarlo, el prototipo sufrió una fractura en varias de las uniones y que sin la superficie horizontal la zona central se volvía demasiado débil. Esto se debe a que, si se suprime esa zona, los extremos de la viga curva no mantienen su distancia constante durante el trabajo, por lo que se distancian y conduce al colapso completo de la estructura.

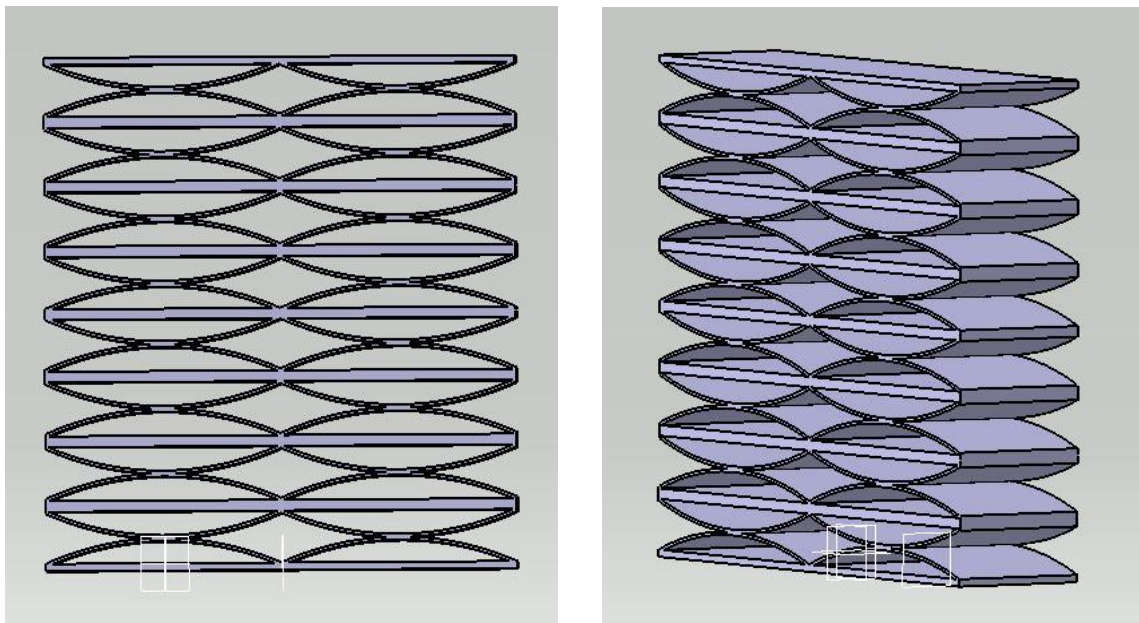
### Séptima prueba

Tras el fracaso con los prototipos anteriores se decidió simplificarlo y emplear la geometría de la prueba nº5 para generar la estructura completa. En primer lugar, se corrigió el error que provocaba que las superficies exteriores fueran demasiado endebles aumentando el grosor de ambas.



Además, se modificó ligeramente el perfil (Anexo I) suavizando las curvas y dando menor profundidad a cada una de las bóvedas. En este caso la base de cada una de las bóvedas posee 50 mm de longitud, que intersectamos con una circunferencia de 140 mm de diámetro, por los 80 mm que tenía anteriormente. La zona plana sobre la que se unirá cada una de las partes posee 5 mm de longitud. La anchura de la pieza pasa a ser de 30 mm. En el caso del espesor se mantiene en 0,6 mm. Las bases sobre las que se apoya el resorte pasan a tener 1,35 mm de espesor por los 0,70 mm del diseño previo, lo que aumenta su rigidez y evita que colapsen ante la presión manteniéndose firmes. Las medidas de este dispositivo pueden consultarse en el Anexo I.

El motivo por el que se redujo la profundidad de la bóveda es para que la zona central de la superficie curva se encontrase más próxima a la horizontal, provocando un pandeo más suave y menos lesivo para la geometría, a cambio de reducir el desplazamiento efectivo. Esto no resulta un problema realmente ya que se puede aumentar si nuestras necesidades lo requieren alargando la geometría del dispositivo añadiendo mayor cantidad de bóvedas a la hilera. Tras estos cambios el diseño queda tal y como se ve en la Figura 84.



*Figura 84. Diseño final de Catia del dispositivo*

Como se puede apreciar, se reforzó cada una de las superficies planas dotándolas de mayor grosor para asegurar que tan solo tuviera pandeo las zonas curvas. El tiempo de impresión fue de 8 h y 36 min, empleando los mismos parámetros para cada una de las impresiones. Se emplearon 25 m de hilo con un peso de 75 g.

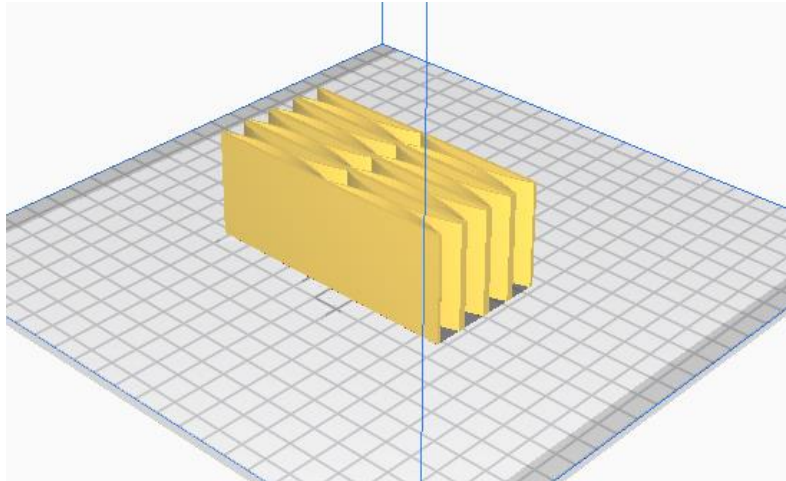


Figura 85. Dispositivo sobre la superficie de impresión del software CURA.

La impresión se tuvo que realizar volcando el dispositivo 90° (Figura 85) ya que de esta forma se facilitaba mucho al no tener zonas en voladizo que sufrirían durante el proceso de impresión, como ocurría con las primeras pruebas.

Las primeras pruebas fueron poco provechosas ya que existían problemas durante el proceso de impresión (Figura 86). En ocasiones el plástico se despegaba de la cama soporte debido al reducido grosor del perfil. En otras ocasiones los porcentajes de relleno eran erróneos y conducían a geometrías muy endebles.

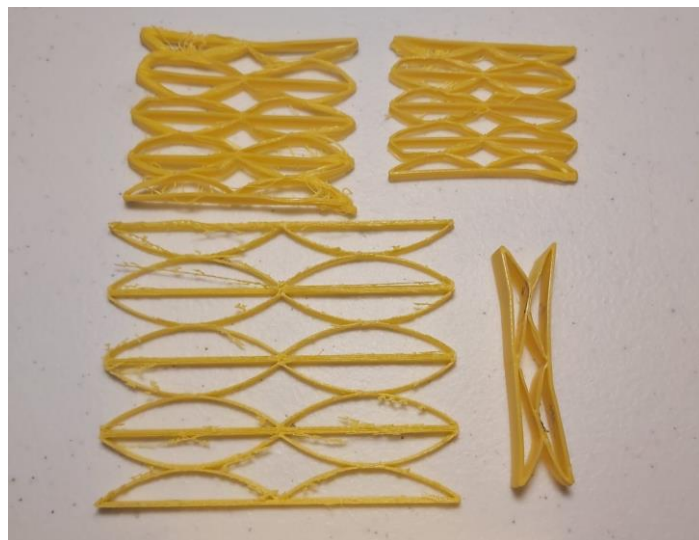


Figura 86. Diversas pruebas de impresión

Tras varias pruebas de impresión se obtuvieron resultados muy satisfactorios. Es importante mantener la impresora en una sala aislada donde no sufra corrientes de aire ya que el material que reposa sobre la mesa de impresión se contrae y la geometría no encaja con la que genera el extrusor, conduciendo a los errores anteriores.





Figura 87. Diseño final impreso

El prototipo posee una robustez muy adecuada (Figura 87) a las exigencias. Los acabados son limpios y no se aprecian fallos durante el impresionado. Como se observa, todas las capas del dispositivo pandean del mismo modo siguiendo una geometría constante, y recobran su forma una vez la fuerza de compresión finaliza.

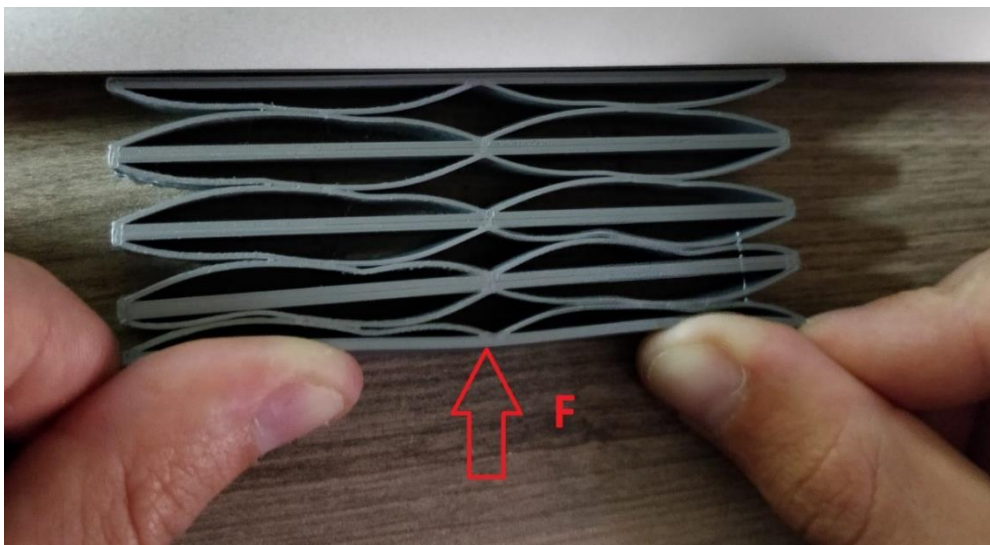


Figura 88. Dispositivo impreso bajo carga de compresión en uno de sus extremos.



En la Figura 88 se observa cómo se comporta el dispositivo durante el trabajo. La fuerza de compresión se aplica en la base inferior de la pieza mientras que el extremo contrario reposa sobre una superficie plana. Es posible apreciar que no pandean todas las superficies al mismo tiempo, sino que el desplazamiento se transmite desde la zona más próxima al lugar donde se ejerce la fuerza hasta la superficie opuesta. En el momento de la imagen se aprecia como las primeras bóvedas han cedido a causa del fenómeno snap-through mientras que las más alejadas de la fuerza se mantienen uniformes.

Este efecto es el que produce que se hable de un dispositivo de fuerza constante ya que cada uno de los “niveles” aumenta la fuerza necesaria para producir la deformación mientras que esta desciende durante los instantes en los que la superficie ha pandeado.

Estas gráficas son precisamente las que estaban planeadas para elaborarse. Una vez que se tuviera un diseño prometedor que en un principio funcionara tal y cómo se deseaba, se planeaba emplear los instrumentos del departamento para testear correctamente los prototipos. Con una célula de carga se podría medir el desplazamiento sufrido por el conjunto y además ejercer la fuerza de manera uniforme sobre toda la superficie, cosa imposible sin las herramientas del departamento.

Por los acontecimientos que se han dado en estos meses ha sido imposible continuar con ese proceso, por lo que solo hemos podido hablar de la fase de diseño.





## 5. Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras

### 5.1. Conclusiones

Las conclusiones generales que se pueden obtener de este trabajo son menores que las que se hubiera sacado si el estudio se hubiera podido desarrollar hasta el final de la etapa de prototipado. Debido a que los prototipos no se pudieron testear en el laboratorio y elaborar nuestras propias gráficas y resultados, las conclusiones no son tan claras como las que se hubieran obtenido. Si bien este hecho es innegable, es posible sacar algunas conclusiones del estudio.

En primer lugar, se ha estudiado el fenómeno de fuerza constante y de los diferentes efectos que lo provocan. Se ha dado a conocer también los numerosos dispositivos que actúan bajo este fenómeno y sus aplicaciones en el día a día tal y cómo se había propuesto de objetivo al principio del estudio. Este conocimiento ha sido sin duda muy enriquecedor ya que se han tocado temas de estudio apenas visto en el grado, como la introducción a la fabricación aditiva y numerosos dispositivos aquí vistos.

En segundo lugar, se ha logrado el objetivo de diseñar desde cero un dispositivo de fuerza constante. La parte principal del estudio era desarrollar un artilugio buscando este efecto mediante una tecnología lowcost disponible en el laboratorio de estructuras. Esta etapa conllevó muchas pruebas y diferentes versiones lo que otorgó la experiencia de comprender cómo funciona un proceso de diseño. Con la finalización del prototipo se ha logrado la consecución parcial de los objetivos, ya que debido a la alerta sanitaria este proceso ha tenido que ser interrumpido.

### 5.2. Consideraciones adicionales

Respecto a la elaboración del presente Trabajo de Fin de Grado, no se ha empleado ningún material perjudicial para el medio ambiente ni se ha contaminado. Para el uso de la impresora se ha empleado PLA, material plástico que una vez terminada su vida útil es perfectamente desechable si se deposita en los contenedores correspondientes.

Además, para la realización de alguna prueba se han reutilizado materiales que ya se disponía de ellos anteriormente, como puede ser el cable recogedor de una aspiradora rota, que hubiera acabado en el contenedor de no haberlo usado para este cometido. Por ello se ha ahorrado costes y consumo de material que hubiera acarreado más contaminación a la hora de desecharlo. La impresora empleada ha sido la del laboratorio por lo que, al igual que en mi caso, sucesivos alumnos pueden emplearla para realizar sus estudios sin necesidad de comprar una propia, con el consiguiente gasto que acarrearía.

Es posible realizar también una estimación de las horas invertidas en este trabajo y del coste que eso supone. Un ingeniero en formación percibe un sueldo estimado de unos 20.000€/año, empleando aproximadamente 1.800€/mes. Esto supone una media de un coste de 11,20€/hora.

Para la realización de este estudio se han empleado 2000 horas en la fase de recopilación de información, estudio e interpretación para posteriormente redactar. A eso hay que sumarle unas 30 horas de diseño en el software Catia, y las horas “no productivas” que transcurrían mientras la impresora 3D trabajaba. Se pueden estimar en unas 40 horas. Además, la familiarización con el software Cura y la impresión aditiva conllevó unas horas de aprendizaje previas y diferentes pruebas con fallos causados por parámetros de impresión incorrectos derivados del proceso de aprendizaje. Ese tiempo llevó unas 20 h aproximadamente.

En total se han invertido unas 300 h en este estudio, que con el coste por hora calculado anteriormente asciende a un total de 3.360€. Además, el gasto de filamento de impresión asciende a algo más de 30€, ya que en conjunto se ha empleado un rollo completo de un 1kg de peso. Ha sido una inversión productiva y sin duda merece la pena por la cantidad de conocimiento obtenido y experiencia en tecnologías con las que no estaba familiarizado.

Es por ello que se considera cumplidos los objetivos planteados, integrando conocimientos y adquiriendo capacidades complementarias a las obtenidas a lo largo de los años académicos del grado.

### 5.3. Líneas futuras

Las líneas futuras de este estudio están claras en este caso, ya que varias partes experimentales se vieron paralizadas a causa del Estado de Emergencia de estos últimos meses. De cara a desarrollos futuros se propone explorar las diferentes vías que quedaron truncadas, que se detallarán a continuación.

#### 5.3.1. Prototipado del gyroid

En el Capítulo 3 se habla acerca de estructuras giroidales, sus características y su empleo en la actualidad. Cuando se planteó esta posibilidad, al conocer que con bajas densidades el material tenía la capacidad de deformarse con una carga constante, el objetivo era poder obtener este tipo de estructuras mediante impresión aditiva en la impresora 3D.

Una vez descubiertos los parámetros adecuados para imprimir esta estructura y que conservara sus características se podría diseñar una red de este tipo, con forma cilíndrica, para introducir dentro de una guía a modo de émbolo y someterlo a pruebas. De este modo, al igual que con las estructuras anteriores de bóvedas, se obtendrían gráficas sobre su comportamiento sobre las que podríamos sacar conclusiones.

En la Figura 89 se puede observar una prueba de una célula giroidal impresa en el laboratorio para hacer calibraciones en cuanto a espesor, precisión de las tolerancias, acabado, etc. Esa célula es el patrón que se reproduce a lo largo de toda la estructura hasta alcanzar las dimensiones del diseño.



*Figura 89. Prueba de célula giroidal*

En este caso, esta prueba sirvió para comprobar que era necesario reducir el espesor de la pieza, ya que con el que había resultaba una estructura demasiado rígida, lo cual iba a imposibilitar su uso a compresión.

Con lo sucedido en estos meses y la poca antelación con la que ocurrió no se pudo seguir realizando pruebas con la impresora del departamento por lo que esta rama del estudio quedó paralizada prácticamente desde el principio. Por eso, se pasó a obtener información sobre pruebas ya hechas con este tipo de superficies para conocer qué parámetros son los más recomendables, qué materiales poseen las propiedades más acordes y así no dejar tan huérfana esta parte del estudio. Además, sirve como guía a una línea de trabajo futura sobre la que desarrollar un estudio.

En primer lugar, este tipo de estructuras giroidales impresas en 3D no poseen las características de elasticidad necesarias para poder deformarse y retomar su forma inicial si están hechas de PLA. Se debe de emplear materiales con mejores propiedades elásticas. En la actualidad existe un filamento denominado Ninjaflex que agrupa las características más idóneas para nuestro estudio.

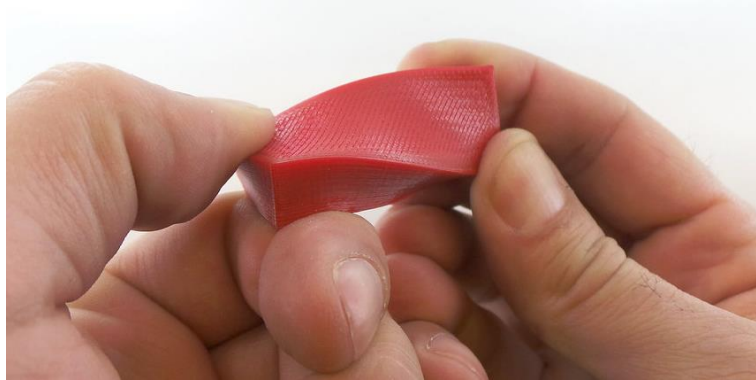


Figura 90. Estructura hecha de filamento Ninjaflex donde se aprecia las propiedades elásticas [41]

El Ninjaflex es un filamento flexible con grandes propiedades elásticas (Figura 90), lo que otorga la capacidad de flexibilidad y elasticidad a las piezas además de una calidad estética de acabados alta. La composición principal es el elastómero termoplástico (TPE). La dureza de este filamento es de 85ª en la escala Shore, un valor bastante bueno tratándose de un material plástico. Además, presenta una excelente resistencia a la abrasión por lo que puede ser expuesto a temperaturas de trabajo altas.

Se han realizado diversas pruebas sometiendo a estructuras giroidales a cargas para ver su comportamiento hasta el colapso, pruebas planeadas para realizarse en el departamento.

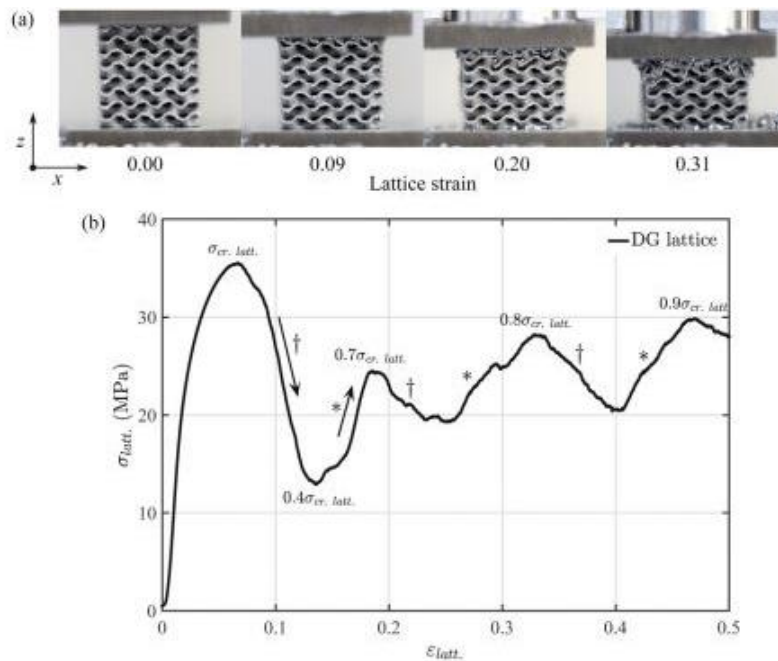


Figura 91. Sucesivo colapso de las capas de un cubo giroidal con células de 4,5 mm de lado a medida que la estructura cede ante una carga de compresión [42]





En la Figura 91 se ve el resultado de una prueba sometiendo un cubo giroidal de 4,5mm de tamaño de célula a una carga de compresión y se estudia su comportamiento. Cada frame del cubo comprimiéndose corresponde con una sección de la gráfica fuerza-desplazamiento inferior.

Como hemos explicado anteriormente, se aprecia una curva ascendente hasta alcanzar el punto donde la capa más próxima a la cara donde se ejerce la fuerza cede, transmitiendo toda la carga al segundo, repitiéndose el proceso. En conjunto, esa gráfica tiene una carga sostenida en el tiempo mientras que el desplazamiento crecería continuamente, lo cual es el efecto buscado. Por ello, se trata de una vía de estudio futura muy prometedora.

### 5.3.2. Estudio del prototipo obtenido

Como era comprensible, el estudio del comportamiento de los prototipos impresos en el laboratorio debe de ser una línea de trabajo futura.

Se debe de estudiar su respuesta a cargas de compresión uniformes y ver cómo varía el desplazamiento bajo esas fuerzas. Para estudiarlo y obtener las conclusiones convenientes, así como realizar cambios en el diseño si es oportuno, se deben emplear las herramientas del laboratorio de estructuras. La experimentación de todas las piezas impresas y el estudio de gráficas y resultados puede convertirse en un TFG en sí mismo.

### 5.3.3. Prototipado del dispositivo magnético

Otro de los objetivos del TFG en el capítulo del prototipado era realizar una prueba de concepto de los dispositivos de fuerza constante magnéticos. Tal y como se vio en el apartado correspondiente, basan su comportamiento en la fuerza de atracción entre las superficies imantadas del vástago y del estator que frenan el movimiento. De este modo cuando se les aplique una carga invariable, este dispositivo otorga un desplazamiento sostenido en el tiempo. Es por ello que su uso principal reside en el amortiguamiento de grandes cargas en maquinaria industrial.

Este apartado, al igual que el de la estructura giroidal, quedó prácticamente anulado desde el principio a causa del cierre de la Escuela. Se pudieron realizar pequeñas pruebas introductorias sobre el tema como se aprecia en la Figura 92.



*Figura 92. Pruebas de concepto con imanes desarrolladas en el laboratorio*

El conjunto de imanes de la parte izquierda de la imagen presenta un taladro en su interior en el que se aloja el pequeño imán de la derecha. Si se deja caer a través de ese orificio es posible apreciar como el desplazamiento se ve reducido a causa de la atracción magnética entre ambos imanes.

Esta fue un pequeño test acerca del comportamiento de este dispositivo. Si las condiciones hubieran sido adecuadas se hubiera desarrollado en mayor medida estudiando en profundidad el efecto y se hubieran obtenido las conclusiones oportunas en forma de gráficas, resultados, etc. Es por ello que este apartado es en sí mismo una nueva línea de trabajo futura.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Apuntes de Departamento de Física Aplicada, Universidad de Sevilla, [En línea]. Available: [http://laplace.us.es/wiki/index.php/Din%C3%A1mica\\_del\\_oscilador\\_arm%C3%B3nico\\_\(CMR\)](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Din%C3%A1mica_del_oscilador_arm%C3%B3nico_(CMR)). [Último acceso: junio 2020].
- [2] Especificaciones Técnicas de Takachiho-America Inc, «takachiho-america.com,» [En línea]. Available: <http://www.takachiho-america.com/products/constonspring/>. [Último acceso: mayo 2020].
- [3] R. Porras y J. Arias-Trujillo, «El aprendizaje cooperativo como metodología para estudiar las propiedades mecánicas de los materiales en la Ingeniería Civil,» *ResearchGate*, 2016.
- [4] Apuntes de Elementos de Máquinas, Universidad Carlos III de Madrid, «uc3m.es,» [En línea]. Available: <http://163.117.136.247/ingenieria-mecanica/elementos-de-maquinas/material-de-clase-1/teoriaresortes.pdf>. [Último acceso: junio 2020].
- [5] Escuela Mecánica Cátedra de Diseño, «Resorte Mecánico,» *Universidad de los Andes*, 2010.
- [6] Catálogo comercial de CAT, «cat.com,» [En línea]. Available: <https://parts.cat.com/es/catcorp/7M-1405>. [Último acceso: junio 2020].
- [7] Catálogo comercial de Mecatehnic, «mecatehnic.com,» [En línea]. Available: [https://www.mecatehnic.com/es-ES/resorte-conico-para-manija-de-puerta-ventana-para-escarabajo-karmann-ghia-furgoneta-split-bay-window\\_VB20309.htm](https://www.mecatehnic.com/es-ES/resorte-conico-para-manija-de-puerta-ventana-para-escarabajo-karmann-ghia-furgoneta-split-bay-window_VB20309.htm). [Último acceso: junio 2020].
- [8] Catálogo comercial de WURTH, «wurth.com,» [En línea]. Available: <https://www.wurth.com.do/muelleresorte-de-traccion-13x70x25mm>. [Último acceso: junio 2020].
- [9] Catálogo comercial de NewComb Spring Corp, «newcombspring.com,» [En línea]. Available: <https://www.newcombspring.com/es/products/torsion-springs>. [Último acceso: junio 2020].
- [10] Catálogo comercial de IMAL, «imal.com,» [En línea]. Available: <http://www.imal.com.co/productos/ballestas/>. [Último acceso: junio 2020].

- [11] Apuntes de Khan Academy, «khanacademy.org.» [En línea]. Available: <https://es.khanacademy.org/science/physics/work-and-energy/hookes-law/a/what-is-elastic-potential-energy>. [Último acceso: mayo 2020].
- [12] Catálogo comercial de Lesjöfors, «directindustry.es.» [En línea]. Available: <https://www.directindustry.es/prod/lesjoefors/product-14154-587137.html>. [Último acceso: junio 2020].
- [13] Á. Matilla Mesonero, Artist, *Modelización del comportamiento de sistemas elásticos no lineales para junta de rigidez variable*. [Art]. Universidad Politécnica de Madrid, 2019.
- [14] Especificaciones técnicas de Smith & Smoorcer, «smithsmoorcer.com.» 10 marzo 2016. [En línea]. Available: [https://www.smithsmoorcer.com/es/blog/5\\_el-sistema-oscilante-del-reloj-automatico.html](https://www.smithsmoorcer.com/es/blog/5_el-sistema-oscilante-del-reloj-automatico.html). [Último acceso: mayo 2020].
- [15] Apuntes de Structuralia, «structuralia.com.» 07 septiembre 2016. [En línea]. Available: <https://blog.structuralia.com/electrificacion-ferroviaria-averias-frecuentes-y-su-resolucion>. [Último acceso: mayo 2020].
- [16] Modelos de Catenarias de ADIF, «adif.es.» Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, [En línea]. Available: [http://www.adif.es/es\\_ES/comunicacion\\_y\\_prensa/fichas\\_de\\_actualidad/ficha\\_actualidad\\_00070.shtml](http://www.adif.es/es_ES/comunicacion_y_prensa/fichas_de_actualidad/ficha_actualidad_00070.shtml). [Último acceso: mayo 2020].
- [17] Catálogo comercial de Lee Spring, «leespring.com.» [En línea]. Available: <https://www.leespring.com/constant-force-springs>. [Último acceso: mayo 2020].
- [18] Especificaciones técnicas de Raymond Associated Spring, «powerspring.com.» [En línea]. Available: [http://www.powerspring.com.tw/constant\\_force\\_spring.php](http://www.powerspring.com.tw/constant_force_spring.php). [Último acceso: mayo 2020].
- [19] Catálogo comercial de BEISA, «carbonesnagu.com.» [En línea]. Available: <https://carbonesnagu.com.mx/porta-escobillas-y-dedos-de-presion/>. [Último acceso: mayo 2020].
- [20] Manual comercial de Tensorex, «pfisterer.com.» [En línea]. Available: [https://www.pfisterer.com/fileadmin/pfisterer/downloads\\_en/TENSOREX-C-PI-EN.pdf](https://www.pfisterer.com/fileadmin/pfisterer/downloads_en/TENSOREX-C-PI-EN.pdf). [Último acceso: mayo 2020].
- [21] Catálogo comercial de Limnot, «limnot-usa.com.» [En línea]. Available: [https://linmot-usa.com/wp-content/uploads/2019/08/Application-report-MagSpring\\_EN.pdf](https://linmot-usa.com/wp-content/uploads/2019/08/Application-report-MagSpring_EN.pdf). [Último acceso: mayo 2020].
- [22] L. Ortiz Berrocal, Resistencia de Materiales, McGraw-Hill, 2007.



- [23] C. Andrés Pérez, Artist, *Estabilidad Estructural*. [Art]. Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, 2015.
- [24] Dep. Estructuras y Construcciones Industriales, «Estabilidad estructural: pandeo de barras,» Universidad de Valladolid.
- [25] R. Burgueño y N. Hu, «Buckling-induced smart applications: Recent advances and trends,» *ResearchGate*, 2015.
- [26] Catálogo comercial de Jocafri, «jocafri.es,» [En línea]. Available: <https://jocafri.es/pajita-tricolor>. [Último acceso: junio 2020].
- [27] W. Chris, «Explainthatstuff,» 22 marzo 2020. [En línea]. Available: <https://www.explainthatstuff.com/how-electric-kettles-work.html>. [Último acceso: junio 2020].
- [28] A. d. D. Drang, «leancrew.com,» 12 febrero 2011. [En línea]. Available: <https://leancrew.com/all-this/2011/02/oil-can-what/>. [Último acceso: junio 2020].
- [29] Catálogo comercial de Baker Ross, «bakerross.co.uk,» [En línea]. Available: <https://www.bakerross.co.uk/festive-friends-jumping-poppers>. [Último acceso: abril 2020].
- [30] T. Forrister, «Verification Model: Postbuckling Analysis of a Spherical Cap,» *COMSOL*, 2019.
- [31] Catálogo comercial de SPIROL, «interempresas.net,» [En línea]. Available: <http://www.interempresas.net/Ferreteria/FeriaVirtual/Producto-Resortes-muelles-de-platillo-Spirol-55733.html>. [Último acceso: abril 2020].
- [32] Especificaciones técnicas de Utilnorm, «utilnorm.com,» [En línea]. Available: <http://www.utilnorm.com/producto.php?familia=6&producto=277>. [Último acceso: abril 2020].
- [33] Especificaciones técnicas de Schnorr, «schnorr-group.com,» [En línea]. Available: <https://www.schnorr-group.com/es/areas-de-expertise-tecnologias/muelles-de-disco/>. [Último acceso: abril 2020].
- [34] D. Abueidda W., M. Elhebeary, A. Cheng-Shen Shiang y P. Siyuan, «Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellular structures: Experimental and finite element study,» *Elsevier*, 2019.
- [35] I. Maskery, N. Aboulkhair, A. Aremu, C. Tuck y I. Ashcroft, «Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices,» *Elsevier*, 2017.

- [36] Catálogo comercial de PowerPlanet , «powerplanetonline.com,» [En línea]. Available: <https://www.powerplanetonline.com/fidget-spinner>. [Último acceso: mayo 2020].
- [37] Catálogo comercial de Electrotodo, «electrotodo.es,» [En línea]. Available: <https://www.electrotodo.es/cable-aspirador-bosch-00751933>. [Último acceso: mayo 2020].
- [38] Catálogo comercial de Creality, «creality.com,» [En línea]. Available: <https://www.creality.com/ender-3-3d-printer-p00244p1.html>.
- [39] Catálogo comercial de Unceta, «ecommerce.unceta.es,» [En línea]. Available: <https://ecommerce.unceta.es/muelle-belleville-din-2093-xm154.html>.
- [40] I. Requena Ruiz, Artist, *Análisis de tipologías estructurales: Bóveda, lámina, cúpula y paraboloides*. [Art]. Universitat Rovira i Virgili Tarragona.
- [41] Especificaciones técnicas de Enthings, «enthings.com,» [En línea]. Available: <https://enthings.com/consumibles-3d/comprar-filamento-flexible-para-impresora-3d-ninjabflex/>. [Último acceso: junio 2020].
- [42] I. Maskery, N. Aboulkhair, A. Aremu, C. Tuck y I. Ashcroft, «Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices,» *Elsevier*, vol. 16, pp. 24-29, 2017.
- [43] Apuntes de Maquinarias y Trenes F.G.V, «ferrolae.com,» 14 noviembre 2006. [En línea]. Available: <http://ferrolae.blogspot.com/2006/11/fotos-de-catenaria.html>. [Último acceso: mayo 2020].



Universidad de Valladolid

Introducción a los dispositivos de fuerza constante.  
Tipología y pruebas de concepto de algunos casos.



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

## ANEXO I: Plano del dispositivo final



D C B A

4

3

2

1

4

3

2

1

94.77

1.35

2

5

1.4

2.8

R70

0.6



100

30

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

Universidad de Valladolid

DRAWING TITLE

DRAWN BY  
**Rubén López**

DATE  
29/06/2020

Dispositivo fuerza constante

CHECKED BY  
**Rubén López**

DATE  
29/06/2020

SIZE  
**A4**

DRAWING NUMBER  
**Boveda\_v4**

REV  
**X**

DESIGNED BY  
**Rubén López**

DATE  
29/06/2020

SCALE 1:1

WEIGHT (kg) 0,08

SHEET 1/1

D

A