



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UNA UNIÓN  
COMPATIBLE CON VIGAS LEGO® PARA  
REPRODUCIR EL COMPORTAMIENTO DE  
UNA RÓTULA PLÁSTICA**

**Autor:**

**Carrera González, Eder**

**Tutor(es):**

**Magdaleno González, Álvaro**

**Lorenzana Ibán, Antolín**

**Departamento de C.A, I.T., M.M.C. y  
T. Estructuras**

**Valladolid, junio de 2025.**

## Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado abarca el proceso completo de desarrollo de un elemento de unión capaz de simular el comportamiento de una rótula plástica en una estructura formada por piezas LEGO®. El proceso comienza con el diseño de la pieza en CATIA V5, continúa con su fabricación mediante impresión 3D en PLA y finaliza con el ensayo experimental de la estructura en su totalidad para comparar su comportamiento real frente al comportamiento del modelo teórico simulado en SAP2000.

Este trabajo tiene además una finalidad didáctica, ya que está orientado a servir de apoyo en las prácticas de laboratorio de la asignatura de Estructuras y Construcciones Industriales del Grado en Ingeniería Mecánica, donde se estudia la formación de rótulas plásticas bajo distintas combinaciones de carga en un pórtico.

Palabras clave: LEGO, pórtico, momento de fricción máxima, rótula plástica, momento plástico.

## Abstract

*This Final Degree Project covers the complete development process of a connecting element capable of simulating the behavior of a plastic hinge within a structure built using LEGO® pieces. The process begins with the design of the component in CATIA V5, continues with its manufacturing through 3D printing in PLA, and concludes with the experimental testing of the entire structure to compare its real behavior with the theoretical model simulated in SAP2000.*

*This work also has a didactic purpose, as it is intended to support laboratory practices in the course "Structures and Industrial Construction" within the Mechanical Engineering degree, where the formation of plastic hinges under different load combinations in a frame is studied.*

*Keywords: LEGO, frame, maximum friction momento, plastic hinge, plastic moment.*



## ÍNDICE

|                   |                                                              |    |
|-------------------|--------------------------------------------------------------|----|
| Capítulo 1.       | Introducción.....                                            | 1  |
| 1.1               | Antecedentes.....                                            | 1  |
| 1.2               | Objetivos .....                                              | 4  |
| Capítulo 2.       | Marco teórico.....                                           | 7  |
| 2.1               | Fricción.....                                                | 7  |
| 2.2               | Momento Plástico .....                                       | 10 |
| Capítulo 3.       | Materiales y métodos .....                                   | 15 |
| 3.1               | Material empleado .....                                      | 15 |
| 3.3               | Requisitos de diseño.....                                    | 19 |
| 3.4               | Evolución conceptual del diseño.....                         | 20 |
| 3.5               | Modelado en CATIA V5.....                                    | 24 |
| 3.6               | Materiales y proceso de impresión 3D .....                   | 41 |
| 3.7               | Proceso experimental .....                                   | 54 |
| Capítulo 4.       | Análisis Mecánico .....                                      | 60 |
| 4.1               | Obtención del momento de fricción máximo experimental .....  | 61 |
| 4.2               | Interpretación del comportamiento mecánico de la rótula..... | 63 |
| 4.3               | Influencia de parámetros de diseño .....                     | 65 |
| Capítulo 5.       | Validación .....                                             | 67 |
| 5.1               | Resultados experimentales.....                               | 67 |
| 5.2               | Comparación con los cálculos teóricos .....                  | 71 |
| 5.3               | Ejemplo de verificación.....                                 | 82 |
| Capítulo 6.       | Conclusiones y Líneas Futuras.....                           | 85 |
| 6.1               | Evaluación del rendimiento de la pieza.....                  | 85 |
| 6.2               | Posibles mejoras y optimización del diseño.....              | 85 |
| 6.3               | Aplicaciones futuras.....                                    | 86 |
| 6.4               | Conclusión general.....                                      | 86 |
| 6.5               | Listado de piezas y costes.....                              | 87 |
| Bibliografía..... |                                                              | 90 |
| ANEXOS .....      |                                                              | 92 |

## Índice de Figuras

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Dimensiones de los módulos de LEGO .....                      | 1  |
| Figura 2. Primeros juegos LEGO Technic .....                            | 3  |
| Figura 3. Pórtico plano con detalles de nudos y apoyos. (2) .....       | 4  |
| Figura 4: Elementos de unión rotacionales de LEGO (3) .....             | 5  |
| Figura 5. Elementos de unión LEGO ensamblados .....                     | 6  |
| Figura 6. Diagrama de sólido libre aplicando una fuerza F (4).....      | 7  |
| Figura 7. Diagrama sólido libre en situación estática (4) .....         | 8  |
| Figura 8. Diagrama sólido libre en situación dinámica (4). .....        | 8  |
| Figura 9: Embrague cónico (6). .....                                    | 9  |
| Figura 10: Distribución de presiones con desgaste uniforme (6) .....    | 10 |
| Figura 11. Curva tensión-deformación (8) .....                          | 11 |
| Figura 12. Estado plástico teórico-real (8) .....                       | 12 |
| Figura 13. Ejemplos de mecanismos de colapso (10) .....                 | 13 |
| Figura 14. Conjunto de piezas LEGO .....                                | 16 |
| Figura 15. Elementos de apriete.....                                    | 16 |
| Figura 16. Célula de carga (12) .....                                   | 17 |
| Figura 17. Sistema de adquisición de datos.....                         | 17 |
| Figura 18. Medidor laser de distancia.....                              | 18 |
| Figura 19. Elementos del espacio de trabajo .....                       | 19 |
| Figura 20. Posición en la experimentación .....                         | 19 |
| Figura 21. Diseño prototipo de 45° .....                                | 21 |
| Figura 22. Impresión prototipo 45° .....                                | 22 |
| Figura 23. Segundo prototipo de 75° .....                               | 22 |
| Figura 24. Prototipo 75° .....                                          | 23 |
| Figura 25. Prototipo plano.....                                         | 24 |
| Figura 26. Canto viga LEGO.....                                         | 24 |
| Figura 27. Ancho viga LEGO .....                                        | 25 |
| Figura 28. Distancia entre ejes de viga LEGO.....                       | 25 |
| Figura 29. Distancia modular entre ejes de vigas LEGO.....              | 26 |
| Figura 30. Distancia caras paralelas cabeza hexagonal del tornillo..... | 26 |
| Figura 31. Espesor cabeza hexagonal del tornillo .....                  | 27 |
| Figura 32. Espesor de media rótula .....                                | 27 |
| Figura 33. Módulos de CATIA V5.....                                     | 30 |
| Figura 34. Árbol de operaciones de CATIA V5.....                        | 30 |
| Figura 35. Sketch.1 (boceto de la rótula).....                          | 31 |
| Figura 36. Operación de revolución.....                                 | 31 |
| Figura 37. Boceto de anclaje a vigas (Sketch.2) .....                   | 32 |
| Figura 38. Operación de extrusión.....                                  | 33 |
| Figura 39. Boceto hueco de alojamiento viga (Sketch.3) .....            | 34 |
| Figura 40. Operación de vaciado para alojamiento viga.....              | 34 |
| Figura 41. Boceto geometría del aspa .....                              | 35 |



|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 42. Operación de vaciado del aspa.....                                         | 35 |
| Figura 43. Operación de repetición de vaciado del aspa.....                           | 36 |
| Figura 44. Operación de taladrado para tornillo.....                                  | 36 |
| Figura 45. Operación de taladrado para diámetro de la cabeza de tornillo ....         | 37 |
| Figura 46. Operación de vaciado para cabeza hexagonal del tornillo .....              | 38 |
| Figura 47. Rotura del anclaje.....                                                    | 38 |
| Figura 48. Espesor cilindro.....                                                      | 39 |
| Figura 49. Espesor de anclajes voladizo .....                                         | 39 |
| Figura 50. Espesor de anclajes voladizos aumentado.....                               | 39 |
| Figura 51. Espesor cilindro tras pulido.....                                          | 40 |
| Figura 52. Ciclo de creación del PLA (14) .....                                       | 41 |
| Figura 53. Funcionamiento FFF (15) .....                                              | 44 |
| Figura 54. UltiMaker S3 (15).....                                                     | 45 |
| Figura 55. Formato de archivo de CURA .....                                           | 46 |
| Figura 56. Parámetros de impresión (paredes-relleno) .....                            | 46 |
| Figura 57. Patrón de relleno en giroide .....                                         | 48 |
| Figura 58. Parámetros de impresión (velocidad-soporte).....                           | 48 |
| Figura 59. Diámetros del soporte árbol.....                                           | 50 |
| Figura 60. Estructura completa soporte árbol .....                                    | 50 |
| Figura 61. Parámetros de impresión (placa de impresión) .....                         | 51 |
| Figura 62. Adhesión inicial tipo falda .....                                          | 53 |
| Figura 63. Posición de partida experimental .....                                     | 54 |
| Figura 64. Momento de rotura plástica con desplazamiento $\delta$ .....               | 56 |
| Figura 65. Carga Horizontal en pórtico.....                                           | 57 |
| Figura 66. Carga Vertical en pórtico .....                                            | 57 |
| Figura 67. Gráfica F-t directa SIRIUS HD-SGT .....                                    | 58 |
| Figura 68. Gráfica F- $\delta$ en caso de carga <b>horizontal</b> (sin filtros) ..... | 59 |
| Figura 69. Gráfica F- $\delta$ en caso de carga <b>vertical</b> (sin filtros) .....   | 59 |
| Figura 70. Datos experimentales despues de t=30 s .....                               | 62 |
| Figura 71. Vista ampliada del pico de fuerza máxima aplicable .....                   | 62 |
| Figura 72. Fases mecánicas de la rótula .....                                         | 64 |
| Figura 73. F- $\delta$ , carga horizontal .....                                       | 67 |
| Figura 74. Estructura deformada por carga horizontal .....                            | 69 |
| Figura 75. F- $\delta$ , carga vertical.....                                          | 69 |
| Figura 76. Estructura deformada por carga vertical .....                              | 71 |
| Figura 77. Geometría sección SAP2000 .....                                            | 72 |
| Figura 78. Propiedades del material SAP2000 .....                                     | 73 |
| Figura 79. F1 de 50 N en eje OX.....                                                  | 74 |
| Figura 80. Deformada horizontal 2RP.....                                              | 74 |
| Figura 81. Deformada horizontal 4RP.....                                              | 75 |
| Figura 82. Deformada ensayo horizontal .....                                          | 75 |
| Figura 83. Gráfica F- $\delta$ carga horizontal SAP2000 .....                         | 76 |
| Figura 84. F1 de -50 N en eje OZ.....                                                 | 77 |

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 85. Deformada vertical 1RP .....                                | 78 |
| Figura 86. Deformada vertical 3RP .....                                | 78 |
| Figura 87. Deformada ensayo vertical .....                             | 79 |
| Figura 88. Gráfica F- $\delta$ carga vertical SAP2000.....             | 79 |
| Figura 89. Comparativa experimental con SAP2000, carga horizontal..... | 81 |
| Figura 90. Comparativa experimental con SAP2000, carga vertical .....  | 81 |
| Figura 91. Pórtico a dos aguas sin carga aplicada.....                 | 82 |
| Figura 92. Pórtico a dos aguas con carga aplicada.....                 | 83 |
| Figura 93. Deformada pórtico 2 aguas SAP2000 .....                     | 83 |
| Figura 94. Gráfica F- $\delta$ pórtico a 2 aguas SAP2000 .....         | 84 |

## Índice de Tablas

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Momento de inercia, módulo y momento elástico y plástico. .... | 13 |
| Tabla 2. Factores de forma (8).....                                     | 13 |
| Tabla 3. Elementos LEGO utilizados .....                                | 15 |
| Tabla 4. Elementos de apriete .....                                     | 16 |
| Tabla 5. Software empleado del trabajo .....                            | 18 |
| Tabla 6. Resumen de parámetros de diseño .....                          | 28 |
| Tabla 7. Propiedades del PLA (15) .....                                 | 41 |
| Tabla 8. Parámetros Impresora 3D .....                                  | 53 |
| Tabla 9. Tabla F-δ carga horizontal SAP2000.....                        | 76 |
| Tabla 10. Tabla F-δ carga vertical SAP2000.....                         | 80 |
| Tabla 11. Tabla F-δ pórtico a dos aguas SAP2000 .....                   | 84 |
| Tabla 12. Desglose económico .....                                      | 87 |
| Tabla 13. Planificación temporal del trabajo .....                      | 88 |
| Tabla 14. Coste del personal del trabajo .....                          | 89 |

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1 Antecedentes

Con el fin de contextualizar el propósito de este trabajo, se presenta a continuación una breve introducción sobre los elementos educativos más representativos utilizados en el Departamento de Estructuras y Construcciones Industriales de la Escuela de Ingenierías Industriales de Valladolid, así como sobre un fenómeno fundamental en el cálculo estructural: la plastificación del material.

### 1.1.1 Historia de LEGO

Lo que hoy en día se conoce como LEGO surgió durante la década de 1930, de la mano y mente de “Ole Kirk Christiansen”, un carpintero danés con una habilidad brillante. Las primeras piezas de esta, por aquel entonces pequeña empresa, eran talladas en madera y servían, principalmente, como complementos para otros artículos del hogar. Por ejemplo, escaleras, tablas de planchar, taburetes, soportes para árboles de navidad y pequeños juguetes, todo ello de madera.

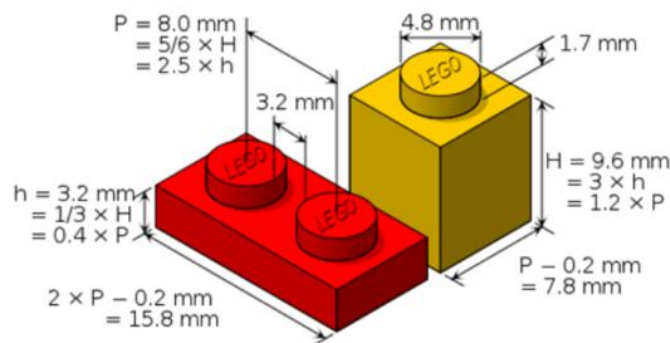


Figura 1. Dimensiones de los módulos de LEGO

El nombre de la marca es algo que capta la atención de algunos apasionados por esta. Esto se debe a que Ole y sus empleados combinaron las palabras “LEG GODT” cuyo significado es “jugar bien” en danés, de tal forma que el nombre se compondría tal y como se conoce hoy en día, con las dos primeras letras de cada palabra “LEg GOdt”

En 1947, Ole Kirk conoció a Hilary Fisher Page, un diseñador británico que trabajaba en la fábrica de juguetes “Kiddicraft”, empresa con una filosofía parecida a LEGO, salvo que creaban piezas que podían montarse entre sí, de manera sencilla. Ole apostó por esta idea de Hilary, pero esta vez con otro material, el plástico.



## Diseño y prototipado de una unión para reproducir una rótula plástica

Esta transición de la madera al plástico no fue algo sencillo ya que no conseguían tener el éxito esperado dichas piezas. Todo esto cambió en 1955, momento que alcanzaron su propósito de crear ladrillos perfectamente compatibles unos con otros, lo que supuso el modelo LEGO que conocemos hoy en día (1).

A partir de la década de 1980, LEGO desarrolló la línea **LEGO Technic** con el objetivo de ampliar las posibilidades constructivas más allá de los tradicionales ladrillos encajables. Esta nueva gama introdujo piezas técnicas como engranajes, ejes, poleas, cremalleras, rótulas, amortiguadores y conectores, permitiendo la simulación de sistemas mecánicos reales.

La aparición de LEGO Technic supuso un cambio significativo en el enfoque de la marca, pasando de construcciones estáticas a modelos con movimiento y funcionalidad mecánica, lo que abrió la puerta a una nueva dimensión creativa orientada a la **ingeniería y la tecnología**. Esta línea permite la construcción de mecanismos como transmisiones, suspensiones, mecanismos de dirección y sistemas articulados, facilitando el entendimiento de conceptos como el **movimiento relativo, la transmisión de fuerzas, la fricción o la resistencia estructural**.

Con el paso de los años, Technic evolucionó incorporando nuevas tecnologías como motores eléctricos, sensores y programación, mediante plataformas como LEGO Mindstorms o LEGO SPIKE Prime, acercándose aún más a la robótica educativa. Sin embargo, incluso sin recurrir a la electrónica, los componentes puramente mecánicos siguen siendo una herramienta potente para el aprendizaje.

Esta capacidad de representar sistemas mecánicos reales a pequeña escala, de manera segura, económica y visual, ha convertido a LEGO Technic en una **herramienta didáctica** ampliamente adoptada en ámbitos académicos, especialmente en grados de ingeniería. Su uso permite ilustrar fenómenos como la deformación estructural, la formación de mecanismos o la respuesta de sistemas ante cargas, aspectos clave para este trabajo de fin de grado. En la *Figura 2* se observan unos de los primeros juegos de LEGO Technic.



Figura 2. Primeros juegos LEGO Technic

### 1.1.2 Cálculo Plástico

En ingeniería estructural, es fundamental conocer cuál es la última carga que una estructura puede soportar antes de colapsar. Esto permite diseñar construcciones seguras, capaces de resistir situaciones excepcionales como terremotos, sobrecargas accidentales o fallos localizados. Para estimar esa capacidad última, existen diferentes modelos de análisis. Uno de ellos es el **cálculo plástico**, una herramienta muy útil en el diseño de estructuras modernas.

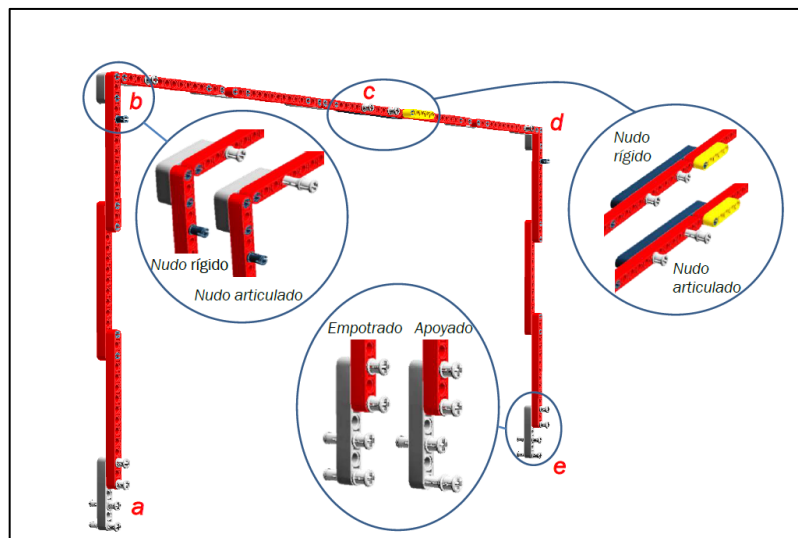
A diferencia del cálculo elástico, que sólo considera el comportamiento lineal del material hasta el límite elástico, el cálculo plástico tiene en cuenta la capacidad de ciertas secciones de seguir soportando carga incluso después de haber alcanzado su límite de elasticidad. Este enfoque permite aprovechar mejor la resistencia del material y entender cómo se comportará la estructura justo antes del colapso.

En estructuras hiperestáticas (aquellas donde los esfuerzos internos no se pueden calcular sólo con las ecuaciones de equilibrio), el cálculo plástico cobra especial importancia. Cuando una sección se plastifica, es decir, alcanza su momento plástico, se produce una redistribución de esfuerzos hacia otras partes de la estructura, lo que permite que la construcción siga en pie y soporte cargas superiores a las inicialmente previstas. Este fenómeno se traduce en la aparición de lo que se conoce como rótulas plásticas, que marcan los puntos donde la estructura ha agotado su capacidad resistente en rotación.

El análisis se basa en determinar el parámetro de carga  $\lambda$ . El cálculo de este, que indica cuánta carga adicional puede soportar la estructura hasta la

aparición de la primera rótula plástica, se realiza de forma iterativa. Este proceso permite determinar en qué puntos aparecen las rótulas y cuándo la estructura colapsa por convertirse en un mecanismo.

Este enfoque no solo tiene valor teórico, sino también didáctico. En el Departamento de Estructuras y Construcciones Industriales se ha diseñado un pórtico a escala, construido con piezas LEGO, para que el cálculo plástico pueda visualizarse de forma práctica en el aula. No obstante, surgía una limitación: las uniones mediante pines de LEGO actuaban como rótulas libres, sin mostrar claramente el fenómeno de plastificación. Esto motivó el desarrollo de una nueva pieza que permitiera introducir rótulas con resistencia al giro, simulando de manera más realista el comportamiento plástico de las estructuras. El pórtico de la *Figura 3* corresponde a una de las prácticas de la asignatura Estructuras y Construcciones Industriales, en la que no existen rótulas plásticas.



*Figura 3. Pórtico plano con detalles de nudos y apoyos. (2)*

## 1.2 Objetivos

Por ello, el objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es diseñar, mediante el software CATIA V5, un mecanismo de unión entre piezas LEGO no comercial, que permita el estudio de modelos de cálculo plástico a pequeña escala, con un enfoque configurable y reutilizable.

El mecanismo desarrollado debía ser resistente en cuanto a las propiedades del material, pero con un momento plástico inferior al de las piezas LEGO estándar, para que la rotura no ocurriera en los elementos comerciales. Además, este momento debía ser regulable, con el fin de analizar distintos

comportamientos estructurales y observar, en la medida de lo posible, deformaciones en las estructuras a escala.

Asimismo, se pretende establecer la relación entre momento y rotación en la rótula a través de lo que se denominará "momento de fricción máximo", el cual simula el comportamiento de una rótula plástica real.

A lo largo del trabajo se presentarán varios prototipos, hasta alcanzar un diseño óptimo. Se analizarán tanto los aspectos geométricos como resistentes de las propuestas, y se llevarán a cabo ensayos experimentales con el diseño final y con modelos previos. Los resultados obtenidos se compararán y se validarán a través de un modelo en el software SAP2000, reproduciendo condiciones similares a las del experimento.

### 1.2.1 Elemento referencia

Tal y como se ha expuesto en el apartado de objetivos, las piezas LEGO presentan ciertas limitaciones funcionales que se pretende resolver a través del diseño propuesto en este trabajo. En particular, se aborda la sustitución de un mecanismo compuesto por dos piezas que pueden clasificarse como tipo macho-hembra, las cuales se ensamblan mediante pestañas que permiten un giro discontinuo entre ambas.

Estas piezas, representadas en la *Figura 4*, corresponden a los identificadores 44224 (macho) y 44225 (hembra) según el catálogo de LEGO Technic referenciado en ElectricBricks (3).



*Figura 4: Elementos de unión rotacionales de LEGO (3)*

La pieza denominada “macho” se caracteriza por contener las pestañas salientes y un agujero pasante de mayor diámetro, mientras que la pieza “hembra” presenta un contorno interior ranurado con un diámetro pasante menor, diseñado para el alojamiento de dichas pestañas.

Ambas piezas comparten, además del diámetro exterior, una prolongación en forma de viga que permite su conexión con otros elementos LEGO mediante pines, es decir, cilindros de unión estándar (ver *Figura 14*). Esta configuración es la que permite integrar el conjunto en estructuras mayores construidas con LEGO Technic.

Una de las principales limitaciones detectadas es la ausencia de giro continuo entre ambas piezas. Aunque el mecanismo permite una rotación parcial entre  $45^\circ$  y  $315^\circ$ , esta se produce de forma escalonada, debido a un sistema de bloqueo cada  $15^\circ$ . Dicho bloqueo se produce por el contacto entre las pestañas de la pieza macho y las ranuras internas de la pieza hembra, tal y como se observa en la *Figura 5*, lo que impide estudiar adecuadamente ciertos fenómenos mecánicos, como el giro progresivo o la aparición de deformaciones acumuladas.



*Figura 5. Elementos de unión LEGO ensamblados*

## Capítulo 2. Marco teórico

En este apartado se desarrollarán los conceptos de fricción y momento plástico, con el objetivo de proporcionar el marco teórico necesario para comprender el análisis y las iteraciones realizadas a lo largo del trabajo.

### 2.1 Fricción

El concepto de fricción es una fuerza que se encarga de evitar el movimiento relativo entre superficies en contacto, es decir, es una fuerza que impide o dificulta el movimiento, como se muestra en la *Figura 6*. Esta fuerza es muy importante en el proceso de diseño y fabricación de piezas ya que, aunque depende en gran parte de las propiedades del material en contacto, es necesario tener en cuenta más factores como, por ejemplo, el acabado superficial de las piezas o el lubricante utilizado (si hubiese), que reduciría esta fricción.

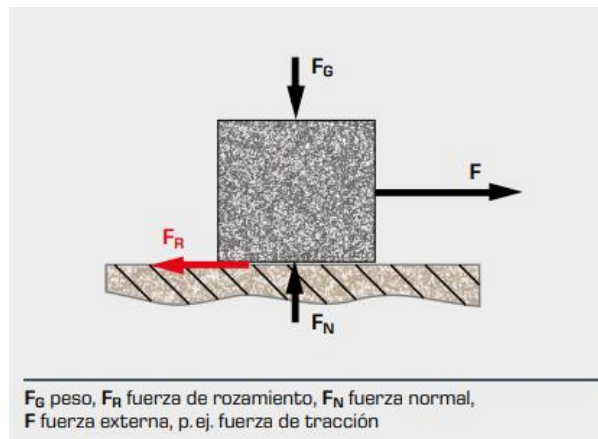


Figura 6. Diagrama de sólido libre aplicando una fuerza  $F$  (4)

#### 2.1.1 Fricción estática y dinámica

Existen dos tipos de fricción: Fricción estática (*Figura 7*) y Fricción dinámica (*Figura 8*).

- Fricción estática: es la fuerza que se encarga de frenar, en su totalidad, el movimiento relativo entre superficies. Esta fricción estática depende del coeficiente de fricción estático ( $\mu_s$ ).

Este coeficiente multiplica a la Fuerza Normal ( $F_N$ ) de la superficie de tal forma que la ecuación de la F. Fricción ( $F_f$ ) según la “Ley de Coulomb” sería:  $F_f = \mu_s * F_N$

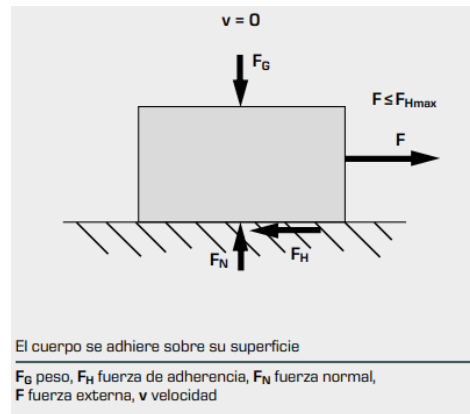


Figura 7. Diagrama sólido libre en situación estática (4)

- Fricción dinámica: una vez superada la Fuerza de fricción estática aparece una fricción menor cuyo objetivo es el mismo, oponerse al movimiento, aunque si la fuerza aplicada para conseguir el movimiento es constante entonces esta fricción dinámica no será capaz de frenar por completo el movimiento. Esta depende del coeficiente de fricción dinámico ( $\mu_k$ ) (5). 
$$F_f = \mu_k * F_N$$

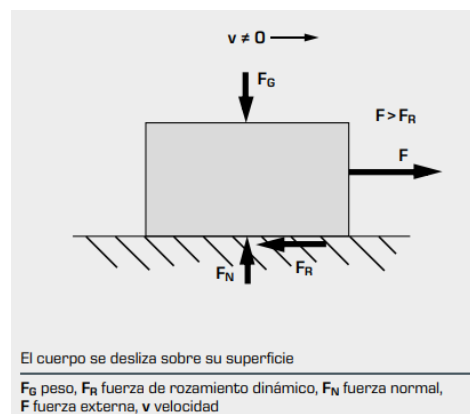


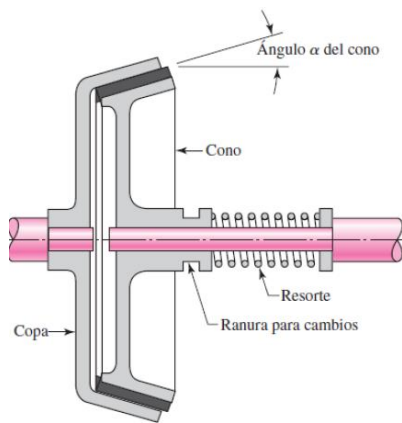
Figura 8. Diagrama sólido libre en situación dinámica (4).

Una vez introducido el concepto de fricción y sus dos tipos, se procede a particularizar el tema tratado para distintas superficies, cónicas o curvas, de las cuales más adelante veremos prototipos.

### 2.1.2 Fricción en superficies cónicas

Aunque en este trabajo, el objetivo de estudio no es la caracterización de superficies cónicas, se explicarán parte de los parámetros a estudiar en el rozamiento de estas superficies.

La fricción en superficies cónicas consiste en una superficie cónica que actúa como agujero (hembra) y una que actúa como pasador o eje (macho) (ver *Figura 9*). Esta fricción consigue un efecto de cuña que, según la profundidad a la que se introduzca la superficie cónica “macho” transmite una fuerza mayor entre ambas superficies, lo que supondría una mayor resistencia al movimiento, o lo que sería igual, mayor fuerza de fricción.



*Figura 9: Embrague cónico (6).*

Para poder parametrizar la transmisión de fuerzas entre dos superficies cónicas rotativas, se debe de asumir la hipótesis de desgaste uniforme (ver *Figura 10*). Esta consiste en un igual desgaste a lo largo de toda la superficie de contacto.

Con el fin de trabajar bajo esta hipótesis, dado que el área donde se ejerce la presión ( $p$ ) es siempre la misma, la Fuerza de accionamiento axial ( $F$ ) será constante en toda esta. Ya que  $F = p \times A$ , siendo el área  $A = d \times \pi \left( \frac{D-d}{2} \right)$ , donde “ $d$ ” es el diámetro menor y “ $D$ ” el diámetro mayor, tal y como se muestra en la *Figura 9*.

El par de fricción ( $T$ ) será:  $T = \frac{\mu(D+d)F}{4\text{sen}\alpha}$  siendo  $\mu$  el coeficiente de fricción del material y  $\alpha$  el ángulo de conicidad que cuanto más grande menor efecto de cuña (menor fuerza transmite).

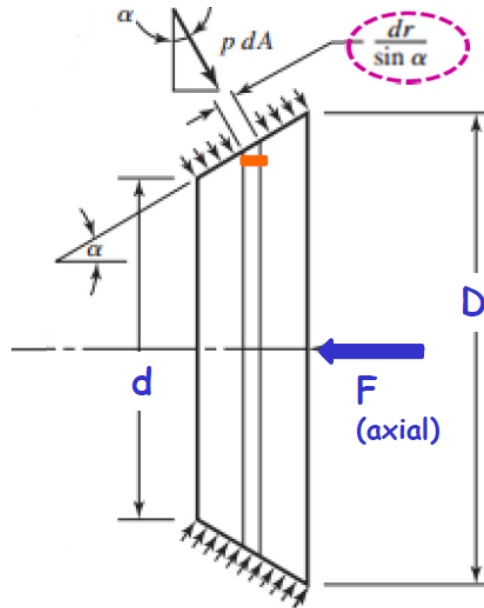


Figura 10: Distribución de presiones con desgaste uniforme (6)

Esta fricción puede darse entre dos elementos del mismo material como podría ser metal con metal, o se podría implementar un elemento de contacto intermedio según el coeficiente de rozamiento que se desee. Este elemento intermedio se encargará, aparte de transmitir otro coeficiente de rozamiento distinto (suele aumentarlo) también es útil para alargar la vida útil de estos elementos cónicos ya que, de friccionar ambas piezas, el desgaste sería notablemente precoz (7).

## 2.2 Momento Plástico

Cuando se quiere estudiar el comportamiento de una estructura frente a las cargas que actúan en ella es imprescindible conocer el comportamiento físico y mecánico de los materiales que la componen. Estos materiales tienen unas tensiones máximas admisibles las cuales, cuando se ven superadas, generan un comportamiento no lineal del material y, consecuentemente, los modelos matemáticos pasan a ser más complejos todavía. Para su estudio son necesarios modelos que incluyan un comportamiento inelástico.

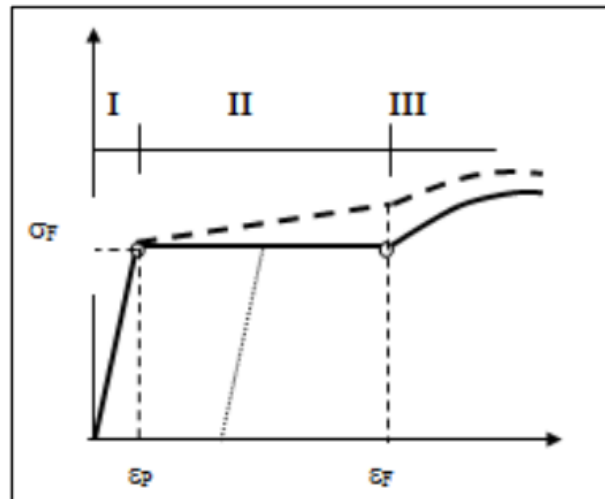


Figura 11. Curva tensión-deformación (8)

Como puede observarse en la *Figura 11*, existen tres regiones según la tensión a la que esté sometida el material: La zona (I) corresponde al periodo elástico, la zona (II) al periodo plástico y la zona (III) a grandes deformaciones.

La tensión  $\sigma$  incrementa de forma lineal hasta llegar al límite elástico  $\sigma_F$ . Durante esta zona la deformación proporcionalmente con la tensión y, bajo un decrecimiento de tensión, recupera su estado inicial al estar en la zona elástica.

Una vez traspasada la zona elástica, superando ese límite elástico, nos encontramos en la zona plástica en la que la deformación plástica  $\varepsilon_p$  aumenta a tensión constante hasta llegar al valor límite de las pequeñas deformaciones  $\varepsilon_F$ .

Al superar esta región plástica, si a materiales metálicos nos referimos, entramos en una etapa de acritud, al aparecer un endurecimiento en frío donde hay una deformación sin aumento de temperatura. Hasta que se alcanza el límite de rotura donde ya hay una rotura mecánica del material.

Es importante establecer una serie de hipótesis para poder mostrar expresiones matemáticas que facilitan el cálculo plástico. Estas hipótesis serían las siguientes, según el modelo seguido en la asignatura de Estructuras y Construcciones Industriales en Ingeniería Mecánica (9):

- Material homogéneo e isótropo
- Pequeñas deformaciones y desplazamientos
- Equilibrio estable (sin pandeo)
- Hipótesis de Navier: sección plana perpendicular a la línea media
- Comportamiento elastoplástico

### 2.2.1 Rótula Plástica

Se quieren determinar el valor de las acciones que producen:

- El colapso de la estructura por agotamiento plástico
- Rotura de alguna barra o nudo
- Deformaciones/desplazamientos excesivos

Bajo las hipótesis anteriores, existen estrategias matemáticas “sencillas” para poder resolver estos problemas. La rótula plástica es el nombre que recibe una sección determinada de una estructura que ha llegado al fallo plástico, es decir, ha aparecido una discontinuidad del material. Esto supone un colapso de la estructura al redistribuirse de nuevo los esfuerzos porque, al formarse estas roturas, dichas secciones no soportan momentos.

Cuando una sección está a punto de convertirse en rótula plástica es porque está alcanzando su Momento Máximo Resistente. Este momento se denomina Momento Plástico ( $M_p$ ) y es aquel con el que se produce esta discontinuidad del material. Puede aparecer en varias secciones a su misma vez o por separado, dependiendo del material. En el instante que aparece una rótula plástica, es decir, se llega al Momento Plástico de una sección  $M > M_p$ , se dice que la estructura ha colapsado.

En la *Figura 12* es posible diferenciar la curva del estado plástico teórico frente al real. Por otro lado, en la *Figura 13* se muestran distintos mecanismos de colapso para distintas estructuras y casos de carga.

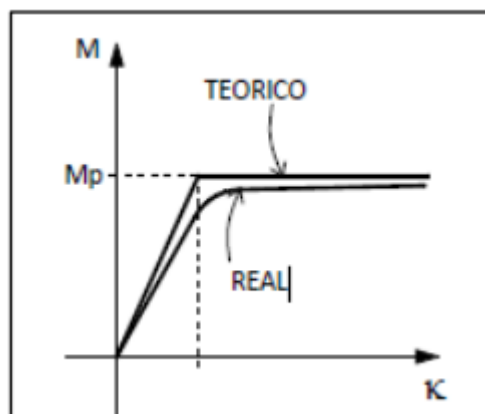


Figura 12. Estado plástico teórico-real (8)

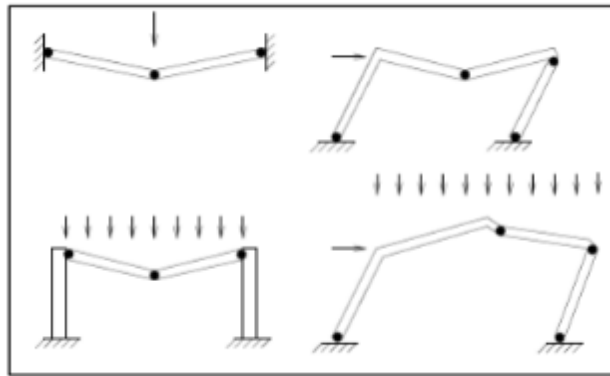


Figura 13. Ejemplos de mecanismos de colapso (10)

Al ser el Momento plástico una característica física de la sección, ya que depende de su geometría y material, se puede calcular como  $M_p = S_z \times \sigma_f$  donde  $S_z$  es el módulo plástico de la sección. Mientras que el Momento elástico  $M_e = W_z \times \sigma_f$  siendo  $W_z$  el módulo elástico de la sección (8).

A continuación, se muestra la *Tabla 1* con los valores de momentos de inercia, módulos y momentos elásticos y plásticos, valores que intervienen en el cálculo del momento plástico:

Tabla 1. Momento de inercia, módulo y momento elástico y plástico.

| SECCIÓN            | $I_z$               | $W_z$               | $S_z$            | $M_e$                        | $M_p$                     |
|--------------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------------------|---------------------------|
| Circular maciza    | $\frac{\pi R^4}{4}$ | $\frac{\pi R^3}{4}$ | $\frac{4R^3}{3}$ | $\sigma_f \frac{\pi R^3}{4}$ | $\sigma_f \frac{4R^3}{3}$ |
| Rectangular maciza | $\frac{bh^3}{12}$   | $\frac{bh^2}{6}$    | $\frac{bh^2}{4}$ | $\sigma_f \frac{bh^2}{6}$    | $\sigma_f \frac{bh^2}{4}$ |

Se definirán entonces, una relación entre el momento elástico y el momento plástico, a través del factor de forma  $f = \frac{M_p}{M_e}$ . del cual se muestran sus valores aproximados en la siguiente tabla:

Tabla 2. Factores de forma (8)

| SECCION               |  |  |  |  |  |  |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $f = \frac{M_p}{M_e}$ | 1,00                                                                                | 1,15 a 1,17                                                                         | 1,27                                                                                | 1,50                                                                                 | 1,70                                                                                  | 2,00                                                                                  |



Es importante aclarar que estos factores no han sido utilizados para el cálculo del momento plástico del elemento diseñado debido a que, en la escala del problema abordado, la fricción antes mencionada es más relevante.

## Capítulo 3. Materiales y métodos

En este apartado se detalla el proceso de diseño y desarrollo del mecanismo propuesto, llevado a cabo mediante el software CATIA V5, incluyendo las distintas iteraciones realizadas hasta alcanzar la versión final. Asimismo, se exponen los parámetros técnicos seleccionados para la impresión 3D del prototipo, con el fin de garantizar su funcionalidad y reproducibilidad.

Además, se mostrarán los elementos utilizados para la experimentación, puesto que son aquellos que van a permitir caracterizar las propiedades de la rótula creada a través de los resultados recogidos.

### 3.1 Material empleado

Se describirán los softwares utilizados durante el desarrollo del trabajo, junto con una breve explicación de su aplicación en cada fase del trabajo. Asimismo, se especifica el material empleado para la fabricación del prototipo, con el objetivo de asegurar la viabilidad mecánica y funcional del diseño.

#### 3.1.1 Elementos comerciales LEGO

Para el ensamblaje y su posterior experimentación se han utilizado distintas piezas de LEGO, aparte del material del elemento, distinto al de estas piezas comerciales.

Como su estudio es, principalmente, adaptado a un pórtico, a continuación, se mostrará una tabla que recoge el número de elementos utilizados y sus características (modelo y color) para poder, así, distinguir con facilidad las piezas. A su vez, en la *Figura 14* se encuentran dichas piezas LEGO.

*Tabla 3. Elementos LEGO utilizados*

| PIEZAS UTILIZADAS LEGO |              |                 |
|------------------------|--------------|-----------------|
| <i>Modelo</i>          | <i>Color</i> | <i>Cantidad</i> |
| Technic 32525          | Rojo         | 6               |
| Technic 32316          | Gris         | 4               |
| Eje 32073              | Gris         | 20              |
| Plate 3023             | Negro        | 12              |

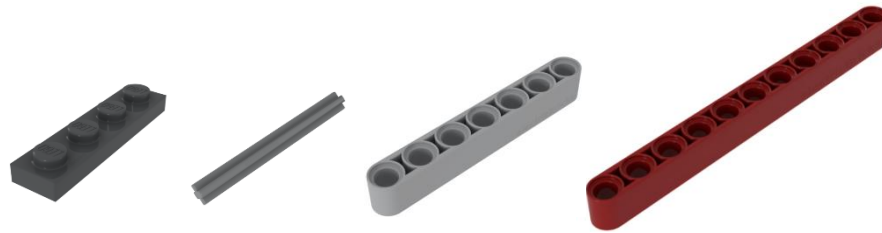


Figura 14. Conjunto de piezas LEGO

### 3.2 Elementos del mecanismo

Debido a que el mecanismo será el resultado del ensamble de dos piezas impresas en 3D, su material tendrá distintas propiedades a las piezas comerciales LEGO, que es parte del objetivo del trabajo.

Por otro lado, la pieza está compuesta también por elementos de unión convencionales como son los tornillos, arandelas, mariposas y un material similar al caucho que separará ambas piezas. Todos estos serán los encargados de transmitir la fuerza al elemento (ver *Tabla 4*).

A continuación, se muestran las propiedades de los materiales utilizados, según los catálogos de los fabricantes (11) así como una imagen de todos estos elementos en la *Figura 15*:

Tabla 4. Elementos de apriete

|                 |                                                                                                                                 |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>TORNILLO</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Material: acero</li> <li>• Longitud : 35 mm</li> <li>• Métrica: M5</li> </ul>          |
| <b>CAUCHO</b>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Shore A &lt; 50</li> <li>• Espesor: 1 mm</li> <li>• Coef. Fricción: 0,7-0,8</li> </ul> |
| <b>MARIPOSA</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Material: acero</li> <li>• Métrica: M5</li> </ul>                                      |
| <b>ARANDELA</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Material: acero</li> <li>• Diámetro: 5 mm</li> <li>• Espesor: 0,8 mm</li> </ul>        |



Figura 15. Elementos de apriete

### 3.2.1 Utillaje y elementos de ensayo

- Célula de carga **TCA.315.R4** (Figura 16). Este sensor es el encargado de medir la fuerza de aplicación, tanto de tracción como de compresión. En los ANEXOS se puede encontrar la ficha técnica del fabricante.



Figura 16. Célula de carga (12)

- Elemento de adquisición de datos **SIRIUS HD-SGT** (Figura 17). Con este dispositivo se traspasará toda la información almacenada por la célula de carga durante los ensayos. Este sistema tiene acceso a un software proporcionado por el fabricante donde se visualizan las distintas variables controladas. Para obtener un manual completo de su funcionamiento se puede visitar la web del fabricante (13).



Figura 17. Sistema de adquisición de datos

- Medidor láser **CP08MHT80** (Figura 18). Con este sensor se medirá la variación del desplazamiento que sufrirán los elementos sometidos a ensayo.



Figura 18. Medidor laser de distancia

### 3.2.2 Software de diseño, simulación y fabricación.

En la *Tabla 5* se encuentra el software que se ha utilizado en las distintas etapas del trabajo para diseñar, fabricar y validar el elemento creado con los medios facilitados por la Universidad de Valladolid.

Tabla 5. Software empleado del trabajo

| SOFTWARE      |                |
|---------------|----------------|
| Diseño        |                |
| CATIA V5      |                |
|               | PartDesign     |
|               | AssemblyDesign |
| Fabricación   |                |
| UltimakerCURA |                |
| Simulación    |                |
| SAP2000       |                |

A continuación, se muestran, en la *Figura 19* y *Figura 20*, los elementos que intervienen en la etapa de experimentación y su disposición en el espacio de trabajo. Es necesario distinguir entre las rótulas utilizadas en cada figura, debido a que corresponden con el modelo plano y el modelo de 75°, respectivamente.

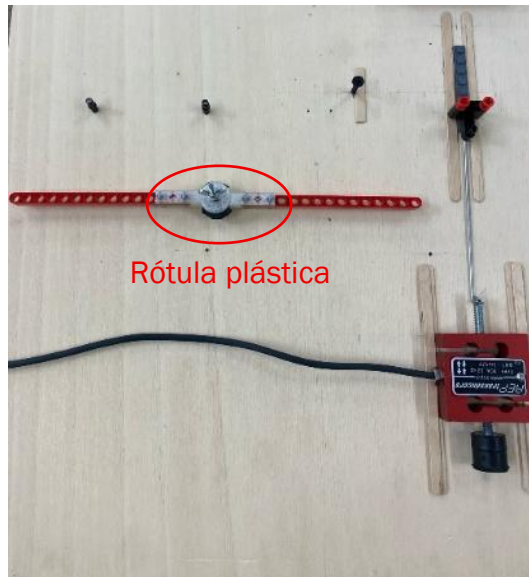


Figura 19. Elementos del espacio de trabajo

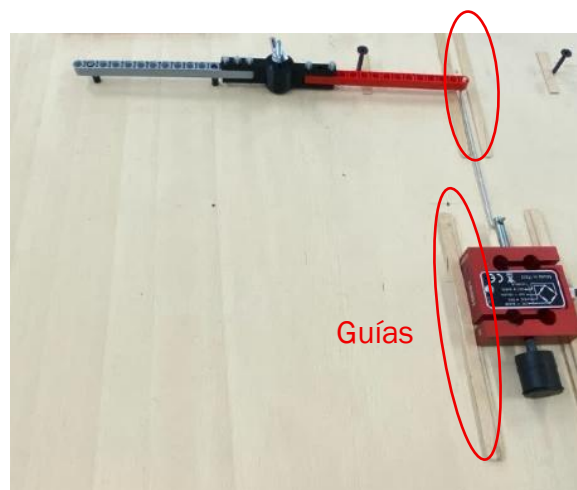


Figura 20. Posición en la experimentación

### 3.3 Requisitos de diseño

El objetivo del trabajo era muy concreto, simular rótulas plásticas con piezas de PLA. Para conseguir un resultado que se ajustase a las expectativas del trabajo, se establecieron una serie de requisitos clave que el diseño debía cumplir:

a) *Compatibilidad con piezas comerciales LEGO.*

La gran importancia de crear una pieza que pudiera integrarse en cualquier estructura educativa, o prototipo ya existente, de elementos LEGO. Esto se lograría respetando las dimensiones estandarizadas de esta empresa.

b) *Funcionalidad en la rotación.*

Una rótula estructural, por definición, permite el giro relativo entre las vigas que se unen a ella. Poder aplicar un momento creciente en la estructura hasta provocar este giro es clave para el diseño del elemento. Siempre y cuando se respete el siguiente objetivo.

c) *Resistencia adecuada.*

Uno de los mayores retos era lograr que la resistencia al giro (momento de fricción) de la pieza diseñada fuera inferior al momento plástico de las piezas LEGO. De esta forma, el fallo se produciría siempre en la pieza de PLA y no en los elementos comerciales. Este momento de fricción está influenciado por distintos factores:

- La rigidez del muelle de compresión
- El coeficiente de rozamiento entre las superficies de contacto
- El diseño geométrico de las superficies en contacto (conicidad o planitud)
- Fenómenos como el “stick-slip”, el cual se comentará más adelante.

d) *Facilidad de fabricación y montaje.*

Dado que la pieza debía ser fabricada mediante impresión 3D y, posteriormente, ensamblada manualmente, era fundamental que su diseño fuese favorable para su proceso de fabricación. Por ello, debía de ser lo más sencillo posible para evitar soportes complicados o tolerancias difíciles de conseguir. Además, el montaje debía ser intuitivo y repetible, permitiendo montar y desmontar el mecanismo sin dañar las piezas ni alterar su comportamiento mecánico entre ensayos.

### 3.4 Evolución conceptual del diseño

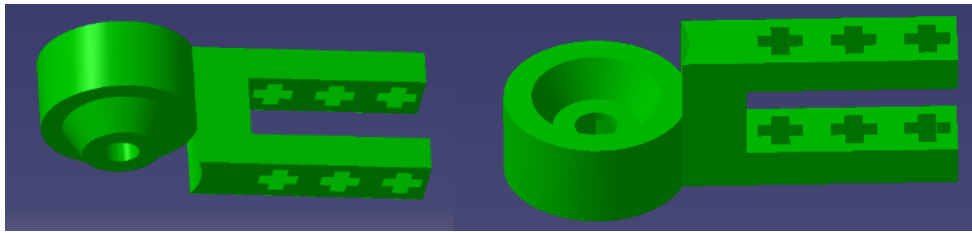
Una vez definidos los requisitos funcionales del elemento diseñado, se ha optado por la creación de una rótula con un funcionamiento análogo al de un embrague cónico. Mientras que la función principal de un embrague cónico es transmitir o interrumpir el movimiento entre dos ejes, en el caso de la rótula desarrollada, el objetivo es permitir el giro relativo entre vigas LEGO, controlando su momento resistivo.

El prototipo diseñado podría denominarse “rótula semirrígida”, ya que actúa como una sección intermedia dentro de una viga LEGO, con un momento plástico reducido respecto al del resto de la estructura. Esta diferencia permite observar con mayor claridad las deformaciones locales y simular de forma más realista el comportamiento plástico en modelos estructurales a escala.

Por lo tanto, en la etapa de diseño se han realizado tres prototipos hasta alcanzar el definitivo:

1. *Prototipo 45°.*

Este primer modelo refleja la idea conceptual básica: dos superficies cónicas con un ángulo de  $45^\circ$ , dispuestas en configuración macho-hembra. Dicho ángulo permite un acoplamiento y desacoplamiento sencillo, evitando la transmisión de fuerzas excesivas entre las piezas durante el ensamblaje o funcionamiento.



*Figura 21. Diseño prototipo de  $45^\circ$*

Una vez impreso en 3D y ensamblado el modelo, se observaron diversas no conformidades relacionadas con el ángulo y ciertos aspectos de la geometría. En particular, fue necesario incrementar el ángulo del cono, ya que la configuración inicial transmitía una fuerza insuficiente al apretar el conjunto tornillo-muelle. Esto limitaba el rango de regulación del momento de fricción, es decir, la capacidad de ajuste mediante el apriete era reducida.

Al comenzar a comprimir el muelle, este alcanzaba rápidamente su estado de compresión máxima, provocando que el material de la pieza impresa comenzara a deformarse, lo que afectaba al rendimiento funcional del sistema. Aunque se obtenía una resistencia aceptable al giro, se consideró necesario optimizar el diseño. Por ello, se propuso reducir el área perimetral del cono, con el objetivo de aumentar el área de contacto efectiva entre las superficies y, por tanto, mejorar el control sobre el momento de fricción.

En la *Figura 22* se observa el elemento impreso en 3D, cuyo ángulo es de  $45^\circ$ , el cual fue rediseñado más adelante en busca de optimizar dicha pieza.



Figura 22. Impresión prototipo 45°

## 2. Prototipo 75°.

Tras analizar las limitaciones del primer prototipo y recoger las correspondientes observaciones, se procedió al rediseño de ambas piezas con el objetivo de mejorar la transmisión de fuerzas y permitir un control más preciso del momento de fricción, garantizando así el correcto funcionamiento del sistema.

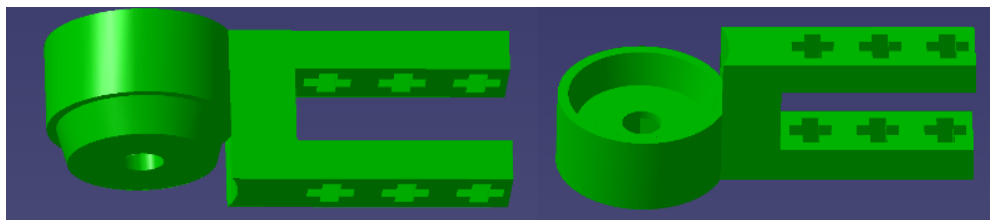


Figura 23. Segundo prototipo de 75°

En esta segunda iteración, y con el objetivo de aumentar la superficie de contacto entre piezas, se optó por reducir el área perimetral del cono, lo que permitió incrementar el área efectiva de rozamiento. Además, se modificó el ángulo del cono a 75°, como se observa en la *Figura 24*, con el fin de mejorar la transmisión de fuerza axial. Este ángulo más pronunciado favorece una mayor capacidad de ajuste mediante el sistema tornillo-muelle, permitiendo un control más fino del momento de fricción.

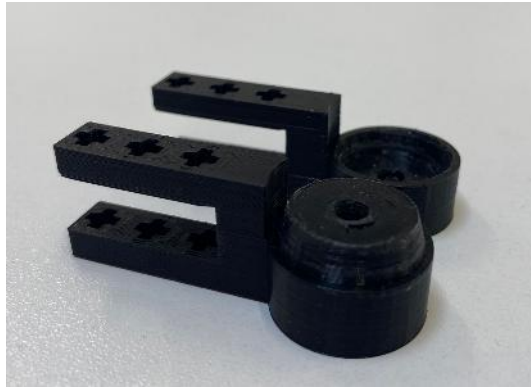


Figura 24. Prototipo 75°

Tras la impresión y experimentación con este segundo modelo, se observó una mejora significativa en el margen de apriete: el tornillo disponía de un mayor número de vueltas útiles antes de alcanzar la compresión máxima del muelle, lo que posibilitaba un ajuste más gradual y efectivo de la resistencia al giro.

No obstante, surgió un nuevo inconveniente relacionado con el fenómeno de "stick-slip" (pegado-deslizamiento), caracterizado por una alternancia entre adherencia y deslizamiento brusco. Este comportamiento se debe a la diferencia entre los coeficientes de fricción estática y dinámica, y es común en sistemas de freno, embragues, rótulas y, en general, en mecanismos de regulación por fricción, como el desarrollado en este trabajo.

### 3. Prototipo plano.

La idea inicial del diseño se basaba en el uso de superficies cónicas para permitir un mejor control de la fricción entre las piezas. No obstante, tras evaluar el comportamiento práctico del sistema, surgió una nueva propuesta con el objetivo de simplificar la geometría del mecanismo y mejorar su rendimiento.

Esta nueva solución (ver *Figura 25*) consiste en incorporar un tercer elemento intermedio, fabricado con un material de mayor coeficiente de fricción, lo que permite aumentar la resistencia al giro sin necesidad de geometrías complejas. Además, esta configuración reduce significativamente el efecto *stick-slip*, gracias a la menor diferencia entre los coeficientes de fricción estática y dinámica.



Figura 25. Prototipo plano

Es importante destacar que este rediseño se materializa en una única pieza funcional, lo que facilita tanto su producción como su sustitución, aportando ventajas en términos de mantenimiento y fiabilidad.

### 3.5 Modelado en CATIA V5

En este apartado se detalla el proceso de diseño llevado a cabo utilizando el software CATIA V5, herramienta enseñada y utilizada habitualmente en la Escuela de Ingenierías Industriales de Valladolid. Para no alargar este apartado en exceso describiendo trabajo repetitivo, tan solo se detallará el proceso de diseño del prototipo final, es decir, los anteriores no estarán dentro de este apartado ya que la metodología ha sido idéntica para todos, modificando ciertos parámetros del boceto.

- Parámetros del diseño

En primer lugar, fue necesario establecer una serie de parámetros geométricos para asegurar la compatibilidad del diseño con las dimensiones estándar de las piezas LEGO.

Dado que previamente se había definido la disposición de ensamblaje del mecanismo, el diseño debía ajustarse a las medidas específicas de las vigas comerciales. Por ello, el anclaje del mecanismo se diseñó teniendo en cuenta tanto el ancho como la profundidad de las vigas, garantizando así un acoplamiento preciso y funcional con los elementos originales del sistema LEGO Technic.

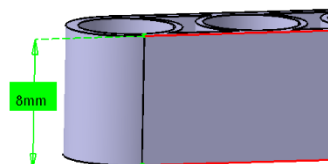


Figura 26. Canto viga LEGO

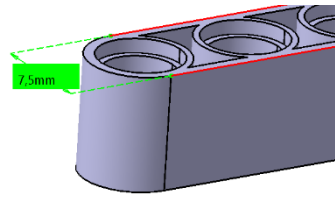


Figura 27. Ancho viga LEGO

Una vez definido el alojamiento de las vigas en la rótula (ver *Figura 26* y *Figura 27*), se procedió a diseñar los huecos de acoplamiento con geometría de aspa, ya que este tipo de forma mejora la sujeción y reduce significativamente la holgura entre el orificio y el elemento de tipo aspa.

Como es lógico, la disposición de estos huecos se ha realizado respetando la misma separación y alineación que presentan los agujeros de las vigas originales de LEGO, lo que permite la correcta conexión entre ambos elementos. En la *Figura 28* se muestra la distancia entre ejes de los orificios de las vigas, parámetro fundamental para asegurar la compatibilidad total con los elementos LEGO.

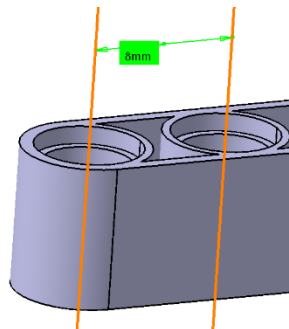
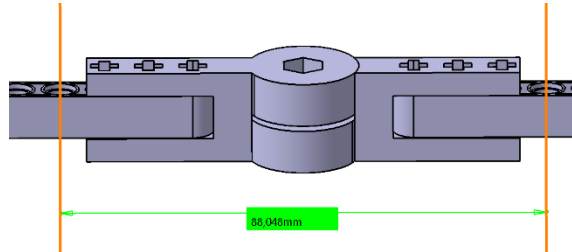


Figura 28. Distancia entre ejes de viga LEGO

Con estos tres parámetros controlados, podría asumirse que la modularidad de LEGO queda plenamente integrada en la pieza diseñada. Sin embargo, esto no es del todo exacto. Para garantizar la compatibilidad con el sistema LEGO, es fundamental respetar las dimensiones modulares, en las que las distancias entre orificios deben ser múltiplos de ocho milímetros. En el caso de la rótula, esto implica que su diámetro exterior debe estar relacionado con dichas dimensiones estandarizadas.

Tras realizar las correspondientes mediciones en el software de diseño, se definió un diámetro exterior de la rótula de 20,2 mm, ajustado para mantener la coherencia con el sistema modular. Asimismo, se amplió el

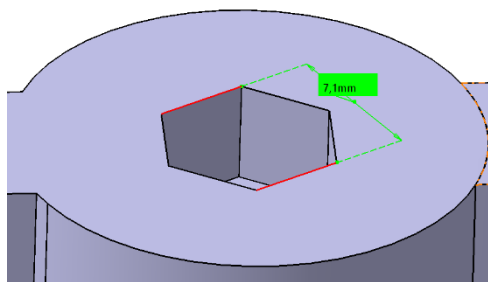
anclaje de forma que también respetase dicha lógica dimensional. Con estas proporciones, se asegura que la distancia entre los ejes de los orificios de una viga a otra sea un múltiplo de 8 mm, tal como se observa en la *Figura 29*.



*Figura 29. Distancia modular entre ejes de vigas LEGO.*

Es cierto que la distancia obtenida no es exactamente un múltiplo de 8 mm (el valor calculado es 88,048 mm), pero la aproximación es suficientemente precisa para los fines de este diseño. Cabe señalar que, dadas las tolerancias propias del proceso de impresión 3D, estas pequeñas desviaciones resultan despreciables en términos funcionales.

Finalmente, se describe la geometría del sistema central de la rótula (ver *Figura 30* y *Figura 31*), responsable de regular el momento de fricción. Dado que los ensayos se realizarán sobre una superficie plana, era imprescindible que las rótulas apoyasen una de sus caras de forma paralela a dicha base. Para ello, se diseñó un alojamiento hexagonal para la cabeza del tornillo, de forma que ésta quedase embebida en la pieza. La elección de esta cabeza hexagonal responde a su capacidad de anclaje, ya que al encajar en su alojamiento impide el giro, lo cual es fundamental para garantizar un apriete controlado.



*Figura 30. Distancia caras paralelas cabeza hexagonal del tornillo*

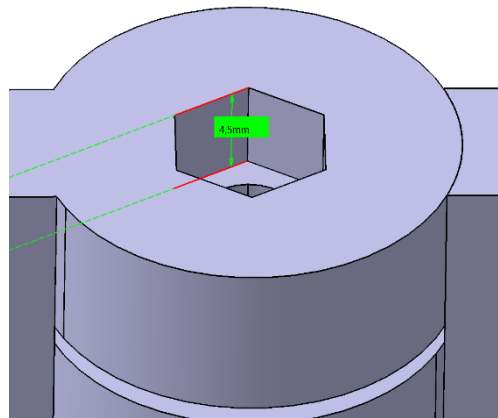


Figura 31. Espesor cabeza hexagonal del tornillo

En cuanto al ancho de los cilindros planos, representado en la *Figura 32*, encargados de comprimir el tercer elemento intermedio, responsable de generar la fricción y, por tanto, de resistir el giro, se ha tenido en cuenta que el espesor del material intermedio no debe superar 1 mm.

Estos cilindros se han diseñado con el objetivo de mantener la linealidad de las vigas, de modo que todos los elementos del conjunto queden coplanarios, asegurando así la coherencia estructural y funcional del sistema.

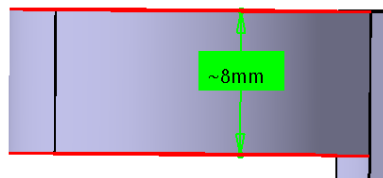


Figura 32. Espesor de media rótula

A continuación, se presenta la *Tabla 6* en la que se recogen los parámetros geométricos mencionados anteriormente. Esta recopilación tiene como objetivo facilitar la lectura, la comprensión y la consulta rápida de la información expuesta en este apartado.

Tabla 6. Resumen de parámetros de diseño

| Categoría                      | Parámetro                       | Descripción                                         | Funcionalidad                                                    |
|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| <i>Compatibilidad<br/>LEGO</i> | Ancho y profundidad del anclaje | Adaptado a las dimensiones estandarizadas de LEGO   | Permitir el ensamblaje preciso con piezas comerciales            |
|                                | Distancia entre ejes            | Basada en la geometría de las vigas LEGO            | Cumplir la modularidad de LEGO (múltiplos de 8mm)                |
|                                | Geometría de los huecos         | Forma de aspa                                       | Mejor sujeción y menor holgura con los ejes tipo aspa            |
|                                | Diámetro exterior rótula (Dext) | 20,2mm                                              | Ajustado a proporciones LEGO sin perder funcionalidad            |
|                                | Tolerancia de impresión         | Desviación mínima (0,048mm)                         | Admitida por la impresora 3D sin comprometer el ajuste funcional |
| <i>Sistema de fricción</i>     | Espesor material intermedio     | $\leq 1\text{mm}$                                   | Control del par de fricción sin interferir con el montaje        |
|                                | Ancho de cilindros planos       | Adaptado al sistema de fricción                     | Permite comprimir el material sin perder alineación entre vigas  |
|                                | Alojamiento cabeza de tornillo  | Hexagonal                                           | Bloquea el giro del tornillo durante el ajuste                   |
| <i>Montaje y ensayos</i>       | Orientación de apoyo            | Superficie de la rótula paralela al plano de ensayo | Garantiza estabilidad y repetibilidad en los ensayos             |

- Elección de módulos de trabajo

Al iniciar el software, lo primero que se debe seleccionar es el entorno de trabajo en el que se desarrollarán las operaciones de diseño. Tal y como se muestra en la *Figura 33*, CATIA V5 ofrece diversos espacios de trabajo. En el ámbito universitario, y concretamente en la Escuela de Ingenierías Industriales de Valladolid, los cuatro módulos mostrados son los más utilizados en el desarrollo de trabajos académicos.

Se caracterizan de la siguiente forma:

- *Assembly Design*: es el módulo encargado del ensamblaje de componentes, es decir, es el espacio de trabajo en el que se juntan distintos componentes “.CATPart” para poder crear mecanismos y analizar grados de libertad, colisiones...
- *Part Design*: es el núcleo dentro del diseño del trabajo. En este módulo creas los componentes por separado para poder definir su geometría correctamente restringida para predecir posibles alteraciones en caso de modificar parámetros de la pieza. Este módulo crea los archivos de tipo “.CATPart”.
- *Drafting*: la metodología de CATIA V5 es crear bocetos en 2D para que más adelante, dependiendo de las operaciones, tomen volumen. Sin embargo, esto no tendría sentido si para finalizar no hubiese unos planos técnicos que especificaran las tolerancias, dimensiones y especificaciones del componente creado. Esta es la función del módulo *Drafting*, crear los planos técnicos.
- *Generative Shape Design*: este módulo es similar a *Part Design* aunque para superficies más complejas, ya que su especialidad es crear volúmenes mediante superficies. Este espacio de trabajo no va a ser necesario en este trabajo.



Figura 33. Módulos de CATIA V5

Una vez explicado el funcionamiento de cada módulo, se procede a iniciar el diseño de la pieza en el entorno Part Design, que permitirá definir la geometría de la pieza y realizar operaciones para dar volumen a esta.

### 3.5.1 Metodología de diseño

Una vez descritos los parámetros que deben controlarse y definido el espacio de trabajo en el que se llevará a cabo el diseño, se procederá a detallar paso a paso las operaciones realizadas para la creación de la rótula.

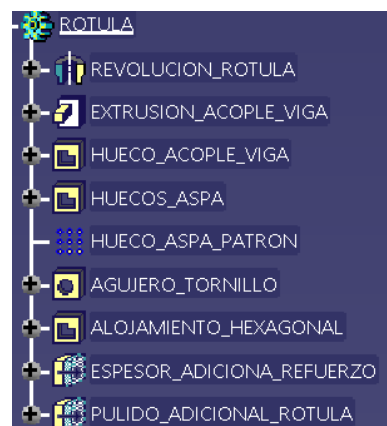


Figura 34. Árbol de operaciones de CATIA V5

- REVOLUCIÓN\_RÓTULA

En esta primera operación se definen los parámetros base de la rótula, como su diámetro y espesor, según el estudio previo realizado para garantizar su correcta integración con las piezas LEGO.

En primer lugar, se debe crear un boceto, denominado *sketch*, en el cual se dibujará mediante una serie de líneas el perfil que posteriormente adquirirá volumen. Es fundamental tener claro desde esta etapa el tipo de extrusión que

se va a aplicar, con el fin de adaptar el boceto adecuadamente y evitar errores en operaciones futuras.

Un aspecto clave en esta fase es restringir completamente el *sketch*. Como se observa en la *Figura 35*, las líneas de color verde indican que han sido restringidas, es decir, están definidas por cotas y relaciones geométricas que impiden su modificación mediante un simple desplazamiento del cursor. Para modificar dichas líneas, es necesario ajustar sus cotas o restricciones. En este caso, las restricciones aplicadas son únicamente de alineación con los ejes de referencia. La línea discontinua mostrada corresponde a un eje, que será necesario para la operación de extrusión.

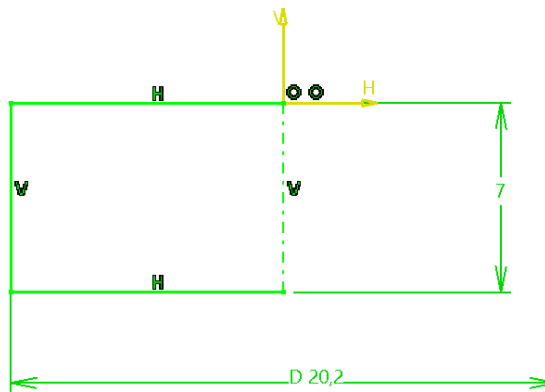


Figura 35. Sketch.1 (boceto de la rótula)

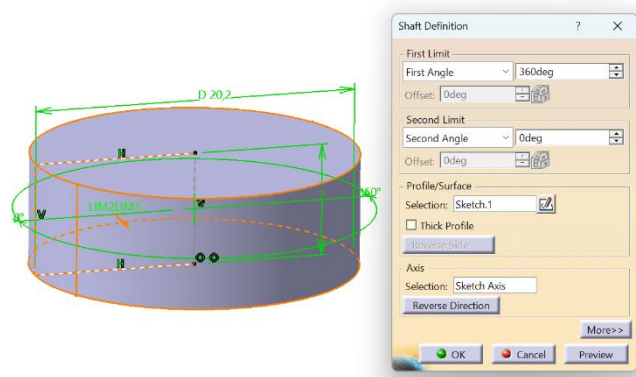


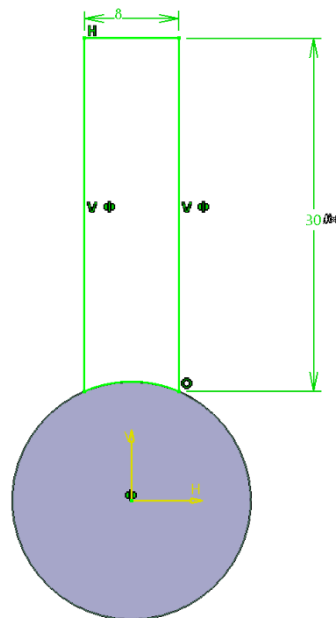
Figura 36. Operación de revolución

- EXTRUSIÓN\_ACOPLA\_VIGA

La siguiente operación corresponde a la creación del acople con las vigas LEGO. Para esta parte del diseño, como se mostrará más adelante, se ha optado por realizar dos operaciones principales: una extrusión y un vaciado. Esta elección permite mantener las operaciones sencillas y fácilmente comprensibles.

En la *Figura 37* se puede observar cómo se ha generado un boceto (*sketch*) restringido en relación con la operación de revolución anterior, lo que garantiza que el nuevo volumen se acople de forma coherente con el cuerpo base ya definido. Además, se ha aplicado una condición de simetría en la altura del boceto con respecto a un plano medio creado específicamente para ello. Gracias a esta simetría, cualquier modificación en el espesor (por ejemplo, si se aumenta a más de 8 mm) se reflejará de manera equilibrada hacia ambos lados del plano, manteniendo la proporcionalidad del diseño.

La longitud total de esta extrusión es de 30 mm, valor que responde a la disposición de los tres agujeros de las vigas LEGO, espaciados a 8 mm entre sí ( $3 \times 8 \text{ mm} = 24 \text{ mm}$ ). Los 6 mm adicionales se han considerado para reproducir con precisión el hueco correspondiente al agujero más cercano a la rótula, manteniendo una distancia adecuada con respecto al extremo y permitiendo el correcto posicionamiento posterior de una pared de refuerzo estructural.



*Figura 37. Boceto de anclaje a vigas (Sketch.2)*

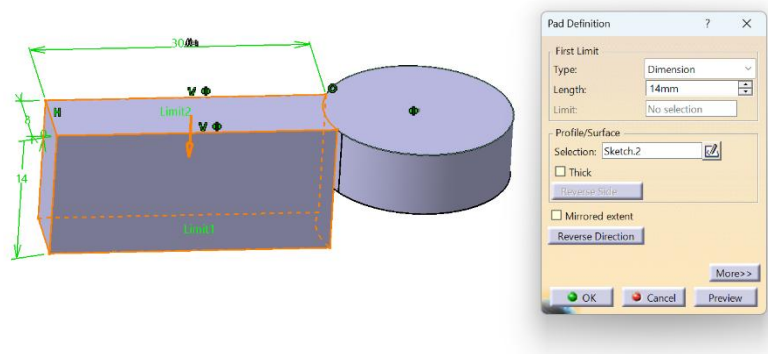


Figura 38. Operación de extrusión

Se ha realizado una extrusión de 14 mm sobre el *Sketch.2* con el objetivo de generar el volumen necesario para alojar el hueco interior donde se insertará la viga LEGO. Esta longitud se ha definido de forma que permita obtener, tras una operación posterior de vaciado, una geometría funcional para el ensamblaje.

Además, dado que el diseño debe garantizar simetría respecto al plano medio con el fin de mantener la linealidad de las vigas en el conjunto, se ha optado por distribuir los 14 mm en dos mitades de 7 mm a cada lado. Así, se asegura que la rótula quede centrada y perfectamente alineada con los ejes de las vigas LEGO una vez ensambladas.

- HUECO\_ACOPLE\_VIGA

Para generar el hueco donde se acoplará la viga LEGO, se realiza un nuevo boceto (*Sketch.3*) sobre una de las caras planas de la extrusión previamente creada. Esta elección de superficie es adecuada, ya que garantiza una referencia plana y perpendicular para la operación de vaciado posterior.

En este boceto se define la geometría del hueco, garantizando que su posición esté centrada respecto al plano medio de la extrusión, con el fin de mantener la simetría del conjunto. Se ha establecido un espesor de pared de 7 mm a cada lado del hueco, lo que permite conservar tanto la resistencia mecánica como la modularidad con respecto al sistema LEGO.

La altura del hueco se ha fijado en 8,2 mm, valor ligeramente superior a la altura nominal de la viga LEGO (8 mm, según se muestra en la *Figura 26*). Esta tolerancia de 0,2 mm se ha introducido intencionadamente para facilitar el acoplamiento de la viga sin comprometer la firmeza del ensamblaje.

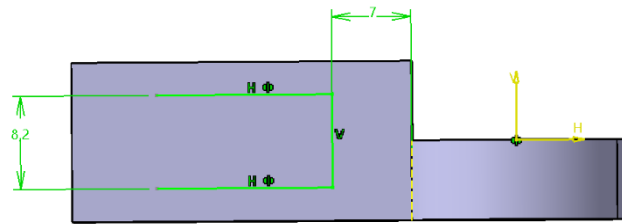


Figura 39. Boceto hueco de alojamiento viga (Sketch.3)

Puede surgir la duda sobre por qué el *Sketch.3* no se extiende hasta el límite completo de la extrusión, finalizando aparentemente dentro del volumen. Esta elección es totalmente intencionada ya que, al tratarse de un boceto abierto, la operación de vaciado genera automáticamente un contorno cerrado proyectando líneas imaginarias infinitas desde los extremos del sketch en la dirección del perfil abierto.

De esta forma, se define una zona de corte que abarca todo el volumen delimitado por ese contorno proyectado. Así, el vaciado se ejecuta correctamente, eliminando el material en el área deseada y generando el hueco interior necesario, como se muestra en la *Figura 40*.

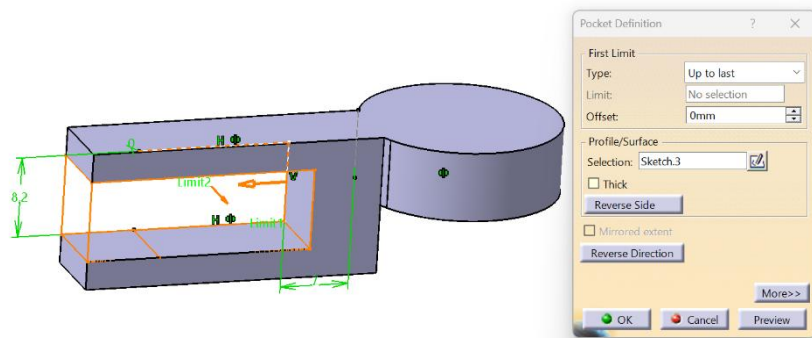


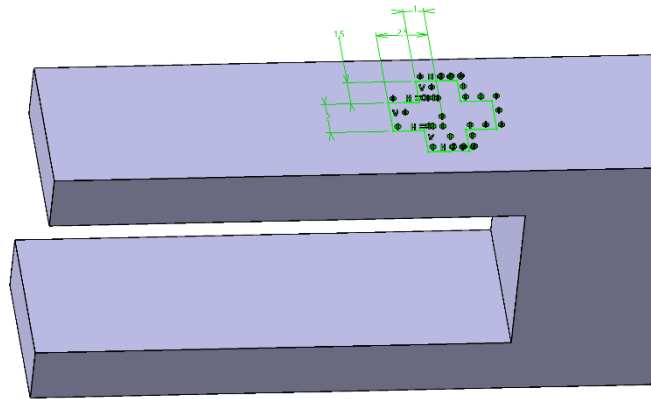
Figura 40. Operación de vaciado para alojamiento viga

- HUECOS\_ASPIA

Una vez ejecutada la operación de vaciado que permite el encaje de la viga LEGO Technic dentro del cuerpo de la pieza diseñada, el siguiente paso fue crear los orificios necesarios para asegurar un correcto anclaje del mecanismo. Para ello, se llevó a cabo una medición detallada de las piezas tipo aspa comerciales de LEGO, con el objetivo de ajustar al máximo las dimensiones y minimizar posibles holguras.

A partir de estas mediciones, se generó un nuevo boceto sobre un plano paralelo a la cara interior del hueco previamente creado, ubicado de forma que atravesara el primer agujero de las vigas normalizadas de LEGO. Esta

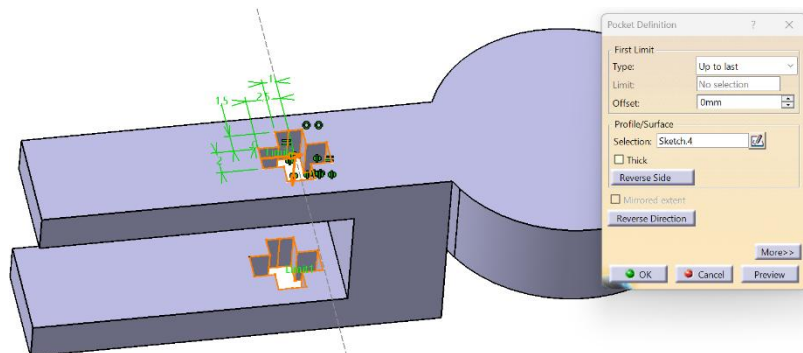
disposición permite una alineación precisa con el sistema modular del conjunto. El resultado de esta operación se muestra en la *Figura 41*.



*Figura 41. Boceto geometría del aspa*

Todos los símbolos verdes de la *Figura 41* son restricciones de simetría respecto del plano medio amarillo.

Posteriormente, se realizó un vaciado desde la cara exterior donde se esboza el aspa hasta la cara exterior opuesta, para generar los alojamientos de los pines (ver *Figura 42*).



*Figura 42. Operación de vaciado del aspa*

En lugar de repetir manualmente la operación de vaciado para cada uno de los alojamientos de los pines, se optó por emplear la herramienta denominada “*Rectangular Pattern*”. Esta función permite replicar una operación según una dirección establecida, definiendo parámetros como el espaciado entre repeticiones, la dirección del patrón y el número total de repeticiones deseadas. De este modo, se automatiza el proceso y se garantiza una distribución uniforme y precisa de los huecos, como se muestra en la *Figura 43*.

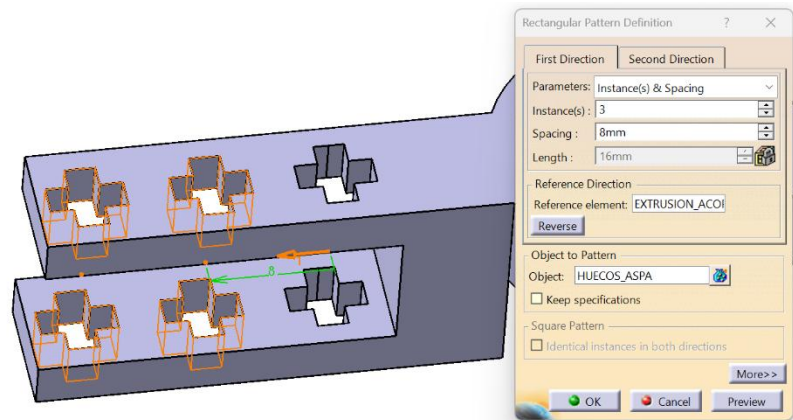


Figura 43. Operación de repetición de vaciado del aspa

- AGUJERO\_TORNILLO

Finalizada la fase de diseño correspondiente a la unión con la Viga Technic, se procedió a definir el alojamiento del tornillo de ajuste. Esta operación se realizó mediante la herramienta “*Hole Definition*”, que permite generar orificios con diferentes características geométricas.

En este caso, se optó por un agujero pasante con doble diámetro, de forma que pueda alojarse correctamente la cabeza del tornillo, tal y como se explicó en apartados anteriores.

En la pestaña “*Extension*” (ver Figura 44), se definió la métrica del tornillo, eligiéndose un tornillo de tipo M5, adecuado tanto por su capacidad de transmisión de carga como por su disponibilidad estándar.

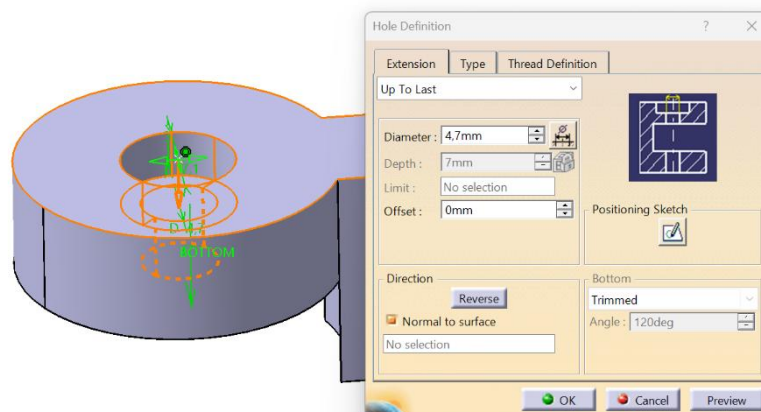


Figura 44. Operación de taladrado para tornillo

En la segunda pestaña, “*Type*” (Figura 45) se definirá el segundo diámetro encargado de alojar la cabeza del tornillo, la cual debía de tener 7,1 mm de diámetro y un valor ligeramente superior a 2,7 mm de profundidad. Por lo que,

para asegurar las tolerancias y su posterior impresión 3D, se determinaron 3 mm de profundidad para dicho alojamiento.

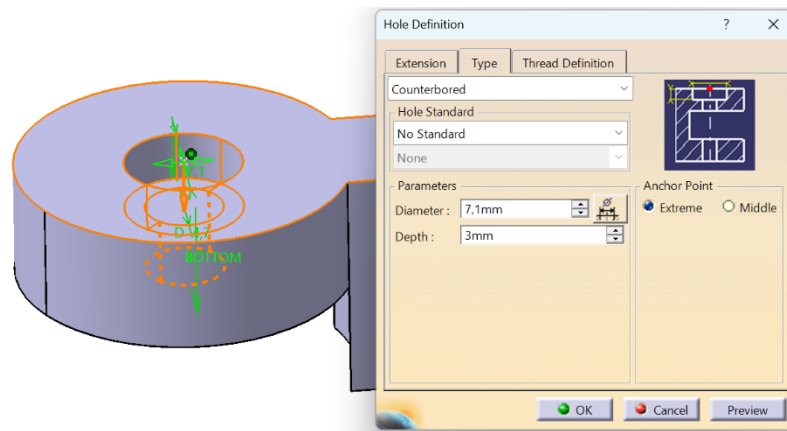


Figura 45. Operación de taladrado para diámetro de la cabeza de tornillo

- ALOJAMIENTO\_HEXAGONAL

Por último, se implementó la geometría antigiro para la cabeza del tornillo, como se mencionó previamente.

Dado que el tornillo empleado en los ensayos posee una cabeza hexagonal, se diseñó un alojamiento con la misma geometría, lo cual garantiza un apriete eficaz sin necesidad de herramientas en esa parte.

Este alojamiento se realizó con el mismo espesor definido anteriormente (3 mm), permitiendo que la cabeza del tornillo quede completamente encajada y evitando su giro durante el ajuste.

El procedimiento seguido fue similar al de la operación “HUECOS\_ASPIA”: se generó un boceto hexagonal centrado en el eje del taladro realizado en la operación anterior. El resultado de esta operación se muestra en la *Figura 46*.

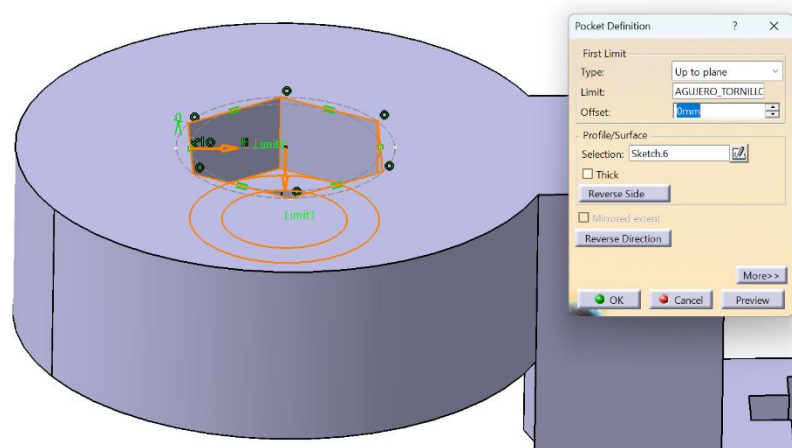


Figura 46. Operación de vaciado para cabeza hexagonal del tornillo

Este podría considerarse el final de la etapa de diseño del elemento. Sin embargo, durante las pruebas iniciales se detectó una debilidad estructural en la unión con la viga (ver Figura 47), concretamente en el espesor de los anclajes laterales que incorporan los taladros tipo espiga.

Esta limitación comprometía la rigidez del conjunto y su capacidad para transmitir el momento deseado sin deformaciones, por lo que fue necesario abordar una nueva fase de rediseño centrada en reforzar esta zona crítica.



Figura 47. Rotura del anclaje

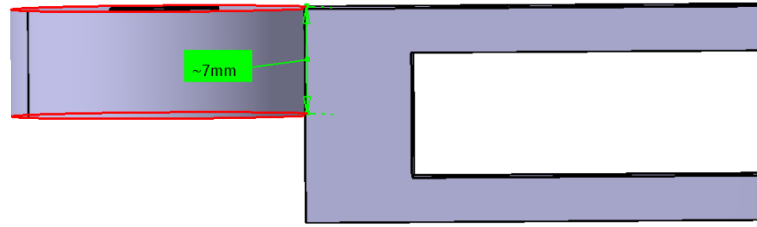
- ESPESOR\_ADICIONAL\_REFUERZO

Inicialmente, se optó por no incrementar en exceso las dimensiones de la pieza, estableciendo un espesor de 2,9 mm para los anclajes (Figura 49). No obstante, tras la impresión del primer prototipo, se observó que estos voladizos presentaban una resistencia insuficiente a flexión.

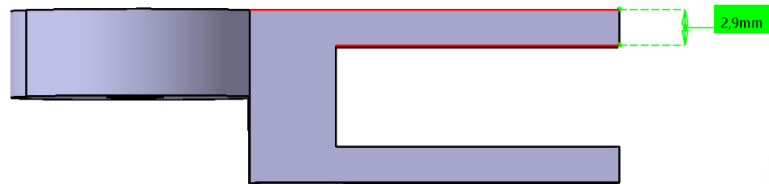
Esta debilidad estructural provocaba que, al someter la pieza a esfuerzos, especialmente en las esquinas de unión, se generaran deformaciones o incluso

roturas que impedían el correcto funcionamiento del conjunto. Esta problemática puede apreciarse en la *Figura 47*.

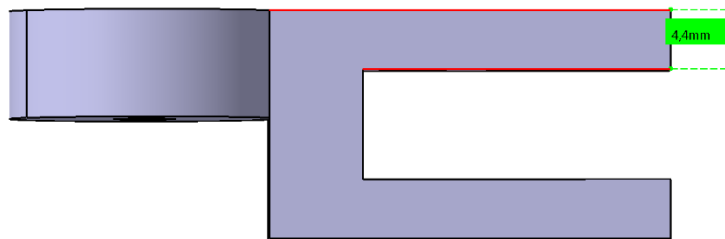
Como propuesta se incrementó dicho espesor para aumentar la resistencia a flexión de la pieza y evitar las posibles roturas durante el montaje de esta (ver *Figura 50*).



*Figura 48. Espesor cilindro*



*Figura 49. Espesor de anclajes voladizo*



*Figura 50. Espesor de anclajes voladizos aumentado*

Como se aprecia en la *Figura 49*, debido a la parametrización referenciada dentro del software CATIA V5, al aumentar el espesor de los anclajes, también se incrementa la altura del cilindro central (rótula), ya que su superficie está construida de forma continua.

Para asegurar que se mantiene la linealidad coplanaria entre las vigas LEGO, es necesario realizar una verificación geométrica sencilla. Dado que existe un material intermedio de 1 mm de grosor, el espesor del cilindro debe cumplir la siguiente relación:  $\frac{\text{Dist\_max}}{2} - 0,5$  donde:

- Dist\_max es la distancia total entre las caras exteriores de los anclajes.
- $\frac{Dist\_max}{2}$  representa el plano medio del sistema.
- 0,5 mm restantes corresponden a la mitad del espesor del material intermedio.

De este modo, se garantiza que las dos vigas queden alineadas en un mismo plano, incluso tras modificar el espesor de los anclajes.

El valor esperado sería:  $\frac{Dist\_max}{2} - 0,5 = \frac{4,4+8,1+4,4}{2} - 0,5 = 8,45 - 0,5 = 7,95 \approx 8 \text{ mm}$  ; Este valor corresponde con el espesor correcto del cilindro para mantener la alineación coplanaria de las vigas LEGO, cumpliendo así el requisito geométrico establecido.

Por otro lado, si no se modifica el espesor del cilindro tras aumentar el espesor de los anclajes, el valor real obtenido sería:  $7 + (4,4 - 2,9) = 7 + 1,5 = 8,5 \text{ mm}$ .

#### • PULIDO\_ADICIONAL\_RÓTULA

Es por ello por lo que resulta necesario implementar una operación adicional de retirada de material, concretamente un rebaje en la cara inferior del cilindro. Esta operación actúa como un mecanizado que permite eliminar 0,5 mm de espesor, ajustando así la geometría del cilindro a los 8 mm requeridos.

De este modo, se garantiza la correcta alineación coplanaria de las Vigas Technic, asegurando que el sistema cumpla con los requisitos de modularidad y ensamblaje establecidos por el estándar LEGO, como se puede observar en la *Figura 51*.

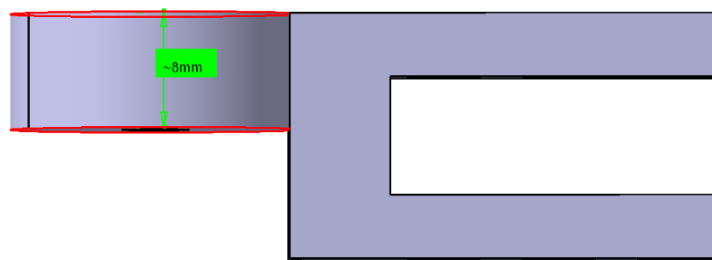


Figura 51. Espesor cilindro tras pulido

Siendo, por lo tanto, este proceso el final de la etapa de diseño dentro del software CATIA V5. Con todas las modificaciones implementadas y los parámetros ajustados, se obtiene una geometría final optimizada para su función, compatible con las piezas LEGO Technic, y lista para su prototipado mediante impresión 3D y posterior evaluación experimental.

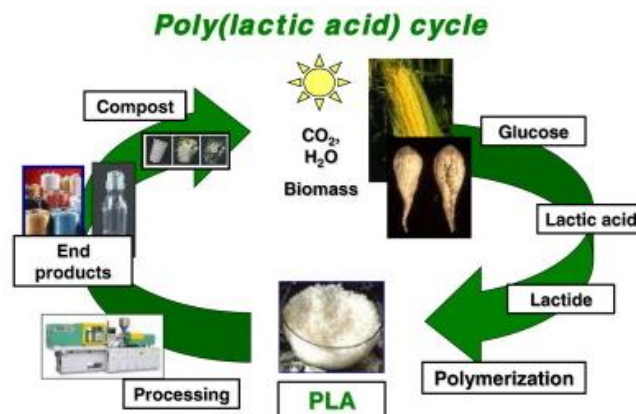
### 3.6 Materiales y proceso de impresión 3D

A continuación, se describe la fase de fabricación de la pieza mediante impresión 3D, utilizando PLA (ácido poliláctico) como material base. Durante esta etapa, se han considerado tanto las propiedades mecánicas del PLA, relevantes para el correcto funcionamiento de la rótula, como los parámetros de configuración de la impresora, esenciales para garantizar una correcta adherencia entre capas y una adecuada resolución de los detalles geométricos.

#### 3.6.1 Ácido Poliláctico (PLA)

El ácido poliláctico es un polímero biodegradable (ver *Figura 52*), producido con materiales reciclados, con una gran variedad de utilidades (biomedicina, embalaje, fibras textiles...). Gracias a su facilidad de impresión, buena calidad superficial y baja contracción durante el enfriamiento, el PLA se ha convertido en uno de los materiales más utilizados en impresión 3D.

Sin embargo, a pesar de sus interesantes prestaciones, presenta ciertas limitaciones mecánicas, por lo que es común encontrar este material reforzado con otras fibras para obtener los acabados y propiedades requeridas, como por ejemplo el tratamiento térmico del sulfato de calcio, que mejora su rigidez y resistencia térmica (14).



*Figura 52. Ciclo de creación del PLA (14)*

Las propiedades de este polímero, mostradas en la *Tabla 7*, dependen en gran medida de su peso y estructura molecular, por lo que, sus características mecánicas podrían variar. Estas propiedades son de carácter informativo debido a que no han sido utilizadas a lo largo del trabajo.

*Tabla 7. Propiedades del PLA (15)*

#### PROPIEDADES MECÁNICAS



|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| Módulo de elasticidad a tracción      | 2346,5 MPa |
| Esfuerzo de tracción a la deformación | 49,5 MPa   |
| Esfuerzo de tracción a la rotura      | 45,6 MPa   |
| Resistencia a la flexión              | 103 MPa    |
| PROPIEDADES TÉRMICAS                  |            |
| Temperatura de fusión                 | 145-160 °C |

### 3.6.2 Fabricación mediante impresión 3D

El método de fabricación por impresión 3D, también conocido como fabricación aditiva, se basa en la producción de objetos mediante la adición secuencial de capas de material, una sobre otra, hasta obtener la geometría final del componente. Esta tecnología permite la fabricación tanto de piezas de pequeñas dimensiones como de mayor tamaño, en función del volumen útil de la impresora utilizada.

Aunque la impresión 3D fue desarrollada en los años 80, no fue hasta décadas más tarde cuando alcanzó un nivel de desarrollo tecnológico que la hizo accesible, eficiente y fiable para aplicaciones tanto industriales como domésticas. En sus primeras etapas, esta técnica presentaba limitaciones relacionadas con el alto coste, los largos tiempos de fabricación y la escasa precisión. Sin embargo, los avances en materiales, hardware y software han permitido su consolidación como una alternativa viable a los métodos de fabricación tradicionales, especialmente en el prototipado rápido y la personalización de piezas.

La base fundamental para poder operar con una impresora 3D es convertir el diseño a un lenguaje “G-code”, interpretable por el sistema de la impresora. Esta conversión se realiza mediante programas denominados *slicers* (como Cura, PrusaSlicer o Simplify3D), que dividen el modelo en capas y definen los parámetros de impresión (altura de capa, velocidad, temperatura, etc.), generando así el conjunto de instrucciones que la impresora seguirá durante la fabricación.

Existen diferentes formas de imprimir en 3D:

- *FFF* (fabricación de filamento fundido) o FDM (modelado por deposición fundida, que utiliza bobinas de filamento.
- *SLA* (estereolitografía), basada en una tecnología que solidifica la resina fotosensible.
- *OPB* (fusión de leche en polvo), una serie de métodos basados en el polvo que fusionan partículas con potentes láseres.
- El chorro de material o aglutinante, en el que se depositan diminutas gotas de material sobre un lecho de polvo.

El método de impresión con el que se ha realizado el trabajo es *FFF* (fabricación de filamento fundido), el cual funciona de la siguiente manera:

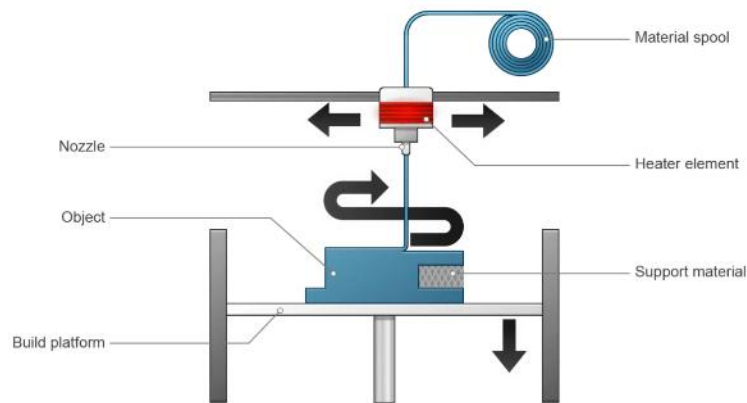


Figura 53. Funcionamiento FFF (15)

Como se aprecia en la *Figura 53*, la impresora consta de 5 elementos principales entre los cuales se encuentra:

- El material (*Material spool*) del cual va a estar conformado la pieza a fabricar, generalmente distintos tipos de polímeros termoestables. Este material se coloca fuera de la cápsula de impresión, enrollado para poder ir tirando de él según va fundiendo el material.
- Calentador (*Heater element*), encargado de calentar el material hasta fundirlo para que pueda pasar a través de la boquilla.
- Ventilador, encargado de refrigerar el sistema de calentamiento del filamento. Operación indispensable en la ingeniería.
- Boquilla (*Nozzle*), por la cual atraviesa el filamento fundido para conformar la pieza desde la capa inferior hasta la superior.
- Plataforma de impresión (*Build platform*), es la base del elemento impreso, donde se apoyará y sobre la que se extruirá el material capa por capa.

En el Departamento de C.A., I.T., M.M.C. y T. de Estructuras de la Universidad de Valladolid, disponen de una impresora conocida como UltiMaker S3, la misma que en la *Figura 54*.

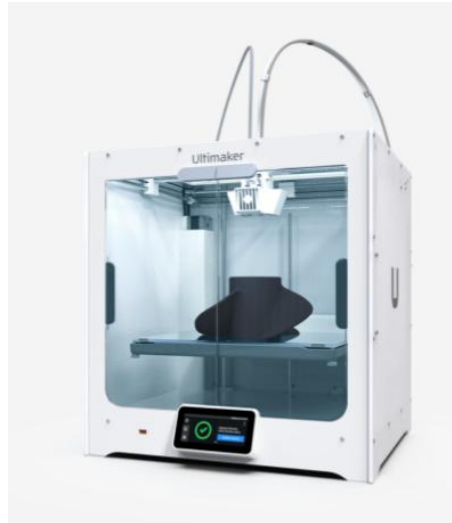


Figura 54. UltiMaker S3 (15)

Para trabajar con ella existen distintas aplicaciones, aunque la más utilizada es Ultimaker Cura que, como su propio nombre indica, pertenece a la entidad Ultimaker, por lo que la interfaz impresora-aplicación es más fácil (16).

A continuación, con el fin de explicar el funcionamiento de la impresora y describir los parámetros que se han modificado para su óptima impresión, se procede a detallar la metodología utilizada en el trabajo:

- Metodología de impresión

Dentro del programa *Cura*, se necesita convertir el archivo desde CATIA V5 cuya extensión es “.CATPart” al código de trabajo del programa con el que trabaja la impresora “.stl”. Esta conversión (*Figura 55*) es necesaria para poder visualizar el diseño de CATIA V5 dentro de *Cura*.

Una vez abierto el archivo “.stl” en *Cura*, comienza la etapa de configuración de la impresión, modificando una serie de parámetros que podrán ahorrar tiempo de fabricación y/o mejorar las características de la pieza.

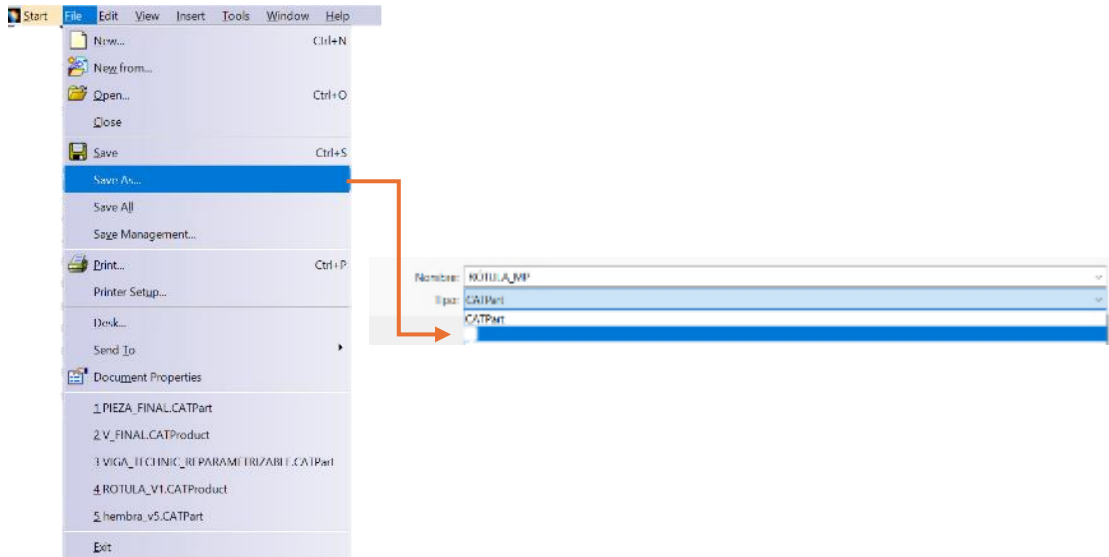


Figura 55. Formato de archivo de CURA

A continuación, se describirán los parámetros los cuales se han considerado más relevantes para el elemento diseñado (Figura 56, Figura 58, Figura 61):

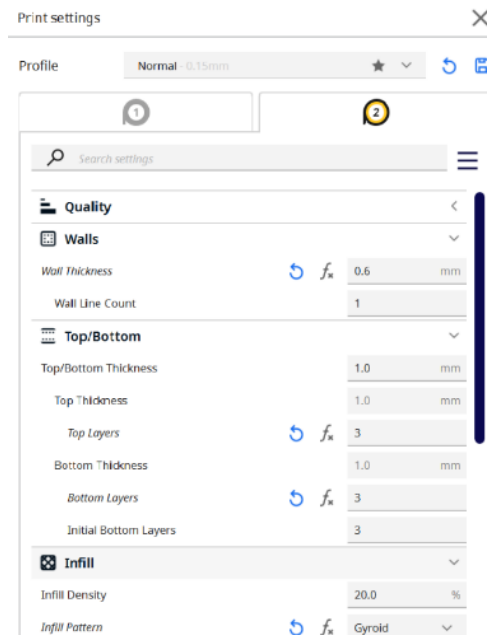


Figura 56. Parámetros de impresión (paredes-relleno)

- Paredes (Walls)

En este apartado se podrán modificar una gran cantidad de parámetros relacionados con el contorno de la pieza a imprimir, aunque los más destacados son:

- Espesor de pared (Wall thickness): En este trabajo se ha optado por incrementar en 0,2mm el máximo espesor de la boquilla, en cuyo caso es 0,4mm. Por lo que el espesor de la pared sería 0,6mm.
  - Capas por pared (Wall line count): Depende directamente del espesor de pared, es decir, en este caso al tratarse de un espesor de 0,6mm, el programa identifica que no es necesario crear dos capas para la pared debido a que el espesor mínimo que puede extruir la boquilla elegido por el programa es 0,3mm. Por lo tanto, con una capa de pared sería suficiente. Si quisiéramos aumentar la rigidez de la pieza podríamos aumentar el número de capas de pared.
- Superficie/Base (*Top/Bottom*)

La opción para modificar la parte por la que se empieza a imprimir y por la que terminará la impresora es de gran interés debido a que, según distintas utilidades de la pieza, interesaría modificar o bien su espesor o su número de capas.

En este caso la elección del espesor de la base y la superficie podría hacerse de forma distinta, pero se eligió que fuese idéntica en este aspecto por lo que 1mm era suficiente para dichas dimensiones del trabajo. Aplicando este espesor, automáticamente el programa de *Cura* cree necesario crear 3 capas (*Bottom layer* y *Top layer*) para poder alcanzar ese valor (*Figura 56*).

- Relleno (*Infill*)

El relleno de la pieza determinará su densidad y, por lo tanto, su resistencia.

- Densidad de relleno (*Infill density*): Este parámetro será elegido según las prestaciones de la pieza. Cuanto más denso más resistente, aunque, también será más costoso y lento de fabricar. Por lo que, teniendo en cuenta el objetivo del trabajo, el relleno elegido es del 20%.
- Patrón de relleno (*Infill pattern*): la elección del patrón de relleno es de vital importancia al estar relacionado directamente con tiempo y resistencia interior de la pieza. La elección de un relleno tipo giroide es crucial para optimizar la impresión. Este patrón

crea superficies tal y como se muestran en la *Figura 57* en color naranja, con un aspecto similar a ondulaciones que conforman el interior de la piza.

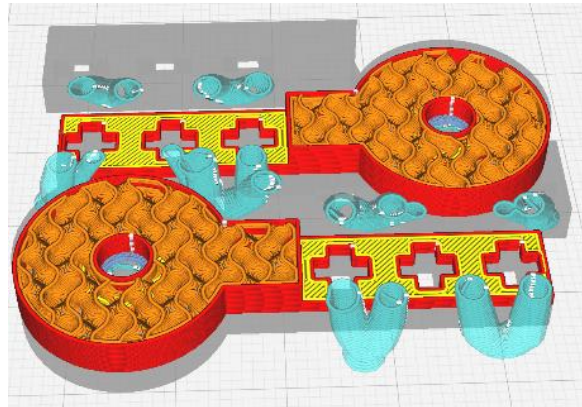


Figura 57. Patrón de relleno en giroide

A continuación, en la *Figura 58* se muestran más parámetros configurables en Cura:

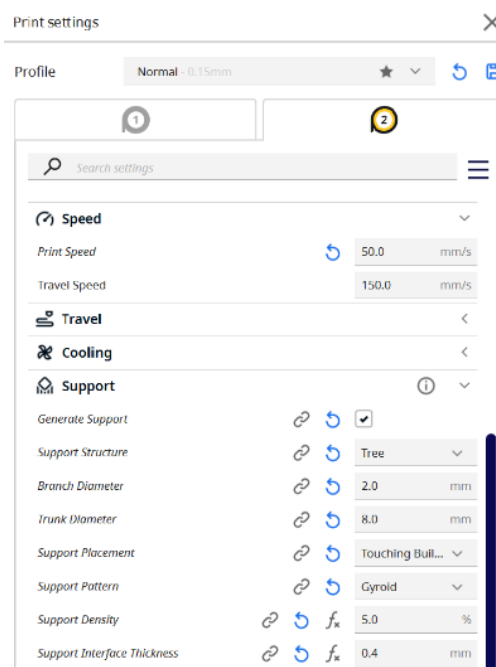


Figura 58. Parámetros de impresión (velocidad-soporte)

- Velocidad (Speed)

En este apartado se puede configurar la velocidad a la que trabajará la impresora en cualquiera de sus operaciones, como pueden ser:

- Velocidad de impresión (*Print speed*): corresponde con aquella relacionada a la extrusión de la pieza, es decir, extruirá más material por segundo, por lo que realizará más milímetros de pieza por segundo, en caso de aumentarla. En este trabajo se ha configurado una velocidad de impresión de 50 mm/s (*Figura 58*), valor inferior al límite máximo recomendado por el fabricante (70 mm/s).
- Velocidad de traslación (*Travel speed*): no solo se debe configurar la velocidad de movimiento al extruir sino, también, se debe configurar la velocidad a la que se mueve la boquilla al desplazarse de un punto a otro sin extruir. Esta velocidad debe ser mayor que la de impresión, aunque hay que tener en cuenta las dimensiones del conjunto de la boquilla y de la pieza, debido a una posible colisión entre ambos.

Es común introducir el modelo de la impresora en el programa de *Ultimaker Cura*, por lo que el programa tiene en cuenta dichas dimensiones y advertiría al usuario. Sin embargo, en caso de haber modificado la impresora o no ser detectada por el programa, esta velocidad de traslación puede ser perjudicial para la extrusión.

- Soporte (*Support*)

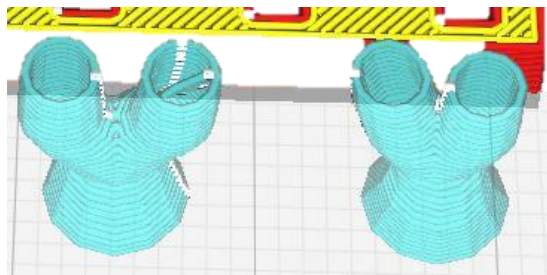
Este parámetro tiene varias configuraciones dependiendo de distintas elecciones que se hagan en su estructura. Además, el acabado y el tiempo de impresión dependen en gran medida de este parámetro:

- Generación de soporte (*Generate support*): es la opción principal para marcar si el objeto va a tener elementos voladizos los cuales no van a apoyar sobre nada y tienen una dimensión considerable, incapaces de sostenerse por si solos mientras se imprimen. Si no se marca esta casilla entonces no se desplegarían las siguientes opciones.

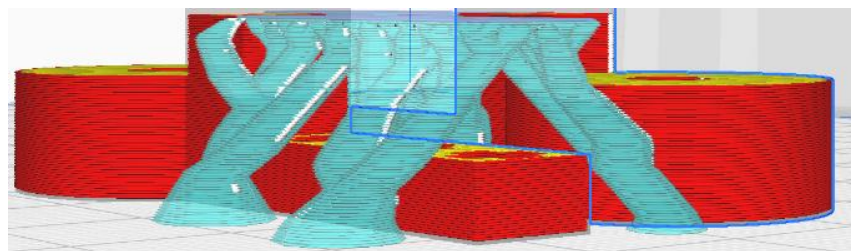
- Estructura del soporte (Support structure): al igual que en el apartado de “Relleno” se debe elegir la estructura de estos soportes ya que, usualmente, el objetivo es reducir el tiempo de impresión de estos soportes siendo lo más fiables posibles y fáciles de quitar posteriormente. En este trabajo se ha elegido la estructura tipo “árbol” debido a que es una de las elecciones más optimizadas siempre y cuando se modifiquen de forma correcta las siguientes elecciones:

- *Diámetro de la rama (Branch diameter): 2mm*
- *Diámetro del tronco (Trunk diameter): 8mm*

Como se aprecia en la *Figura 59*, se distinguen los dos diámetros del árbol, de tal modo que de un mismo tronco nacen varias ramas, las cuales según van creciendo van disminuyendo su diámetro (*Figura 60*) para adherirse mejor a la pieza y conseguir un buen acabado.



*Figura 59. Diámetros del soporte árbol*



*Figura 60. Estructura completa soporte árbol*

- Posicionamiento del soporte (Support placement): el soporte debe estar impreso sobre algo, si no es la propia placa de impresión debe ser otra base creada por el usuario. Sin embargo, lo más sencillo es marcar la opción de “*Touching Buildplate*” (contacto con impresión), como si fuese elemento de la pieza

para conseguir que el soporte realice su función correctamente, sujetar.

- Patrón del soporte (*Support pattern*): al igual que el patrón de relleno de la pieza base debe de estar descrito, el relleno del soporte también. Por ello se ha seguido el mismo patrón de giroide, para optimizar la impresión sin empeorar el acabado.
- Densidad del soporte (*Support density*): esta configuración está directamente relacionada con la densidad de la pieza. Esto se debe a las exigencias estructurales del soporte, es decir, si la pieza base no es densa (no pesa demasiado). Un soporte muy ligero podrá soportar aquellas partes voladizas, en este caso del 5% sería suficiente. No serviría en absoluto establecer una densidad elevada en un soporte, ya que su finalidad es ayudar a la construcción, como bien podría ser un *pilar de apoyo* en una obra civil.
- Espesor conexión soporte (*Support interface thickness*): como se ha comentado anteriormente, las ramas del soporte tipo árbol no contactan directamente con la superficie de la pieza impresa, sino que se crea una pequeña plataforma apoyada en dichas ramas para proporcionar así una superficie de apoyo uniforme y, además, facilitar su retirada posteriormente. Por ello se debe establecer el espesor de esta superficie, para este caso de 0,4mm.

Es necesario tener en cuenta la influencia, negativa, del espesor en el acabado superficial (si la parte de la pieza es pequeña y el espesor es excesivo).

Como últimos parámetros (*Figura 61*), pero no menos importantes:

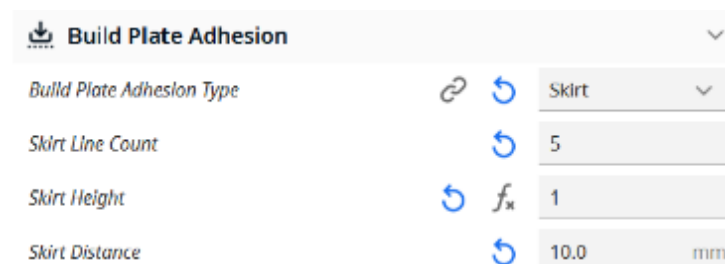


Figura 61. Parámetros de impresión (placa de impresión)

- Adhesión a la placa de impresión (*Build plate adhesion*)

Aunque se describa en último lugar, es la primera acción que realiza la impresora. Ninguna pieza es buena si no tiene una buena sujeción a la placa de impresión y por ello esta adhesión se comprueba inicialmente de la siguiente forma:

- Tipo de adhesión a la placa de impresión (*Build plate adhesion type*): existen varios tipos de estructuras que forman parte de un purgado inicial para asegurar una buena calidad del filamento.

Se ha configurado la adhesión tipo “*Skirt*” (falda) (ver *Figura 62*) ya que es sencilla de hacer y, como se comenta, es para garantizar una buena adhesión a la placa. Si esta primera capa que extruye la boquilla no se adhiere correctamente, resulta ser un indicio de problemas sobre adhesión.

Al configurar este tipo, aparecen tres desplegables:

- Número de líneas de falda (*Skirt line count*): valor elegido con la finalidad de purgar más material o menos. En este trabajo con 5 líneas se ha garantizado una buena calidad de impresión.
- Altura de la falda (*Skirt Height*): normalmente no interesa hacer un purgado alto. Es suficiente con 1 capa de impresión.
- Distancia de la falda (*Skirt distance*): cuanto más alejado esté, más será el tiempo de impresión, aunque el tiempo de trayecto sea rápido, todo aquello que suponga grandes distancias va a repercutir negativamente en la optimización. Sin embargo, la elección ha sido 10 mm de distancia para entender la labor de esta función.

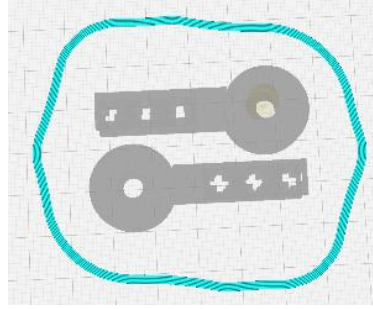


Figura 62. Adhesión inicial tipo falda

Para mayor claridad, se recoge a continuación una tabla que resume los principales parámetros de impresión modificados y empleados en el desarrollo de las piezas.

Tabla 8. Parámetros Impresora 3D

| Paredes                     |               |
|-----------------------------|---------------|
| Espesor de pared            | 0,6 mm        |
| Capas por pared             | 1             |
| Superficie/Base             |               |
| Capas superiores            | 3             |
| Capas inferiores            | 3             |
| Relleno                     |               |
| Densidad de relleno         | 20%           |
| Patrón de relleno           | Giroide       |
| Velocidad                   |               |
| Velocidad de impresión      | 50 mm/s       |
| Velocidad de traslación     | 150 mm/s      |
| Soporte                     |               |
| Estructura del soporte      | Árbol         |
| Diámetro tronco             | 8 mm          |
| Diámetro rama               | 2 mm          |
| Posicionamiento del soporte | Tocando placa |
| Patron del soporte          | Giroide       |
| Densidad del soporte        | 5%            |
| Espesor conexión soporte    | 0,4 mm        |
| Adhesión placa impresión    |               |
| Tipo de adhesión            | Falda         |
| Número de líneas de falda   | 5             |
| Altura falda                | 1             |
| Distancia falda             | 10mm          |

Como se ha expuesto anteriormente, el proceso de fabricación aditiva mediante impresión 3D implica una gran variedad de parámetros ajustables. No obstante, en este trabajo se han abordado los más destacados con el fin de garantizar una impresión adecuada de la pieza diseñada. Si bien sería posible realizar un estudio más exhaustivo de este tipo de fabricación en el software *Ultimaker Cura*, dicho análisis excede el alcance y los objetivos de este trabajo.

### 3.7 Proceso experimental

Una vez obtenida la pieza definitiva, se han realizado pruebas para caracterizar de manera aproximada el momento plástico del elemento, es decir, el momento de fricción máximo. Estas pruebas se han realizado con las herramientas del aparatado previo de *Utillaje y elementos de ensayo*, y ahora se pretende explicar el proceso experimental que se ha llevado a cabo con dicho utillaje.

- *Preparación de la mesa de trabajo*

Con el fin de recoger los datos de la manera más precisa y sencilla, al efectuarse el proceso de carga manualmente, se prepara la mesa de trabajo de la siguiente manera:

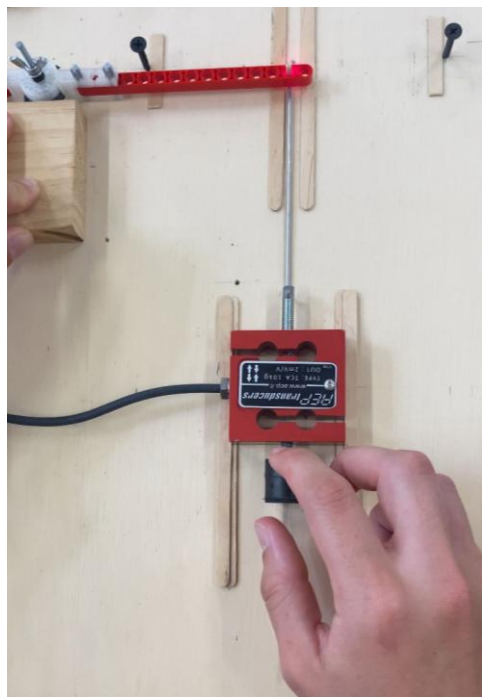


Figura 63. Posición de partida experimental

Como se aprecia en la *Figura 63*, hay pegados unos palos de madera simulando una serie de guías tanto para el gancho, encargado de tirar de la viga simulando esa carga a flexión, como para el aparato de medición de fuerza nombrado anteriormente (TCA.315.R4). Estas guías

son de gran utilidad para poder efectuar las cargas de manera uniforme, teniendo en cuenta que son realizadas de forma manual.

Una vez anclado la rótula por la parte de su izquierda (según la imagen), se debe de asegurar que se encuentre fija a la mesa de trabajo y para ello se ha implementado un tope de madera como el de la figura, cuya única función es asegurar la posición de la rótula. Además, si esta posición no fuese fija y se permitiera su desplazamiento, por muy leve que fuese, supondría recoger muestras falsas o poco representativas de lo que se busca realmente.

- *Proceso de carga para la caracterización del momento plástico*

Para poder realizar la experimentación era necesaria una carga regular y frecuente. De este modo se simularía, aunque no perfectamente, el trabajo realizado por las máquinas. Por lo que los datos recogidos serían de más utilidad para la posterior conclusión.

La acción que simularía la carga a flexión constaría en tirar del elemento de medición (TCA.315.R4), lentamente y de forma continua, hasta llegar, o bien de forma visual o interpretando la gráfica de medición de fuerza, al giro de la rótula por deslizamiento. Una vez alcanzado este punto del experimento era necesario volver a colocar en su posición inicial la viga y volver a aplicar la carga. Este proceso se realizaba varias veces para poder observar un patrón de repetición, siempre y cuando las cargas hubiesen sido similares. (ver *Figura 64*)

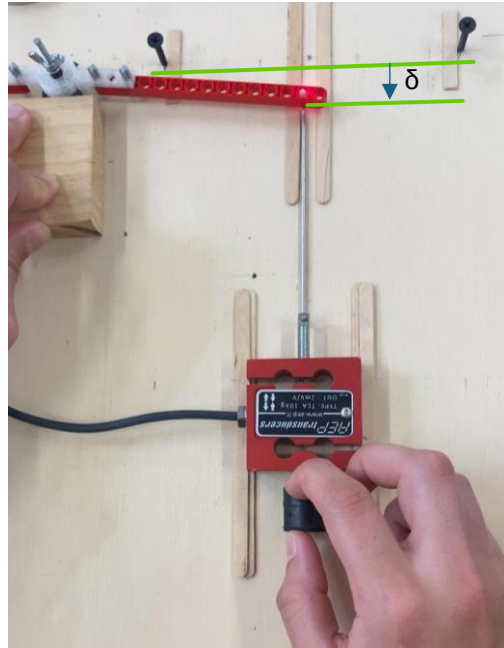


Figura 64. Momento de rotura plástica con desplazamiento  $\delta$

- Proceso de carga en el pórtico de LEGO  
Una vez caracterizado el momento plástico de las rótulas semirrígidas, con el objetivo de que todas ellas presenten un momento de fricción máximo uniforme (o, al menos, muy similar), se procede a experimentar con el pórtico estudiado en la asignatura.

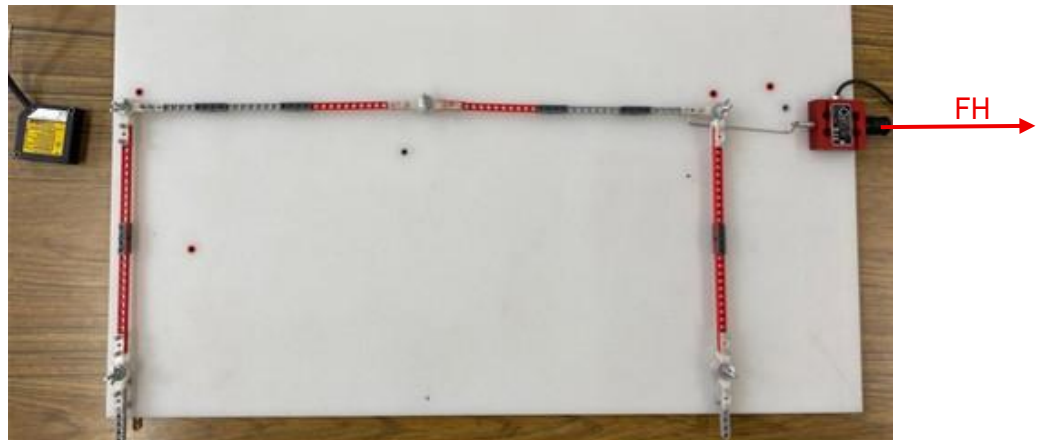
Como primer paso, es necesario establecer las distintas situaciones de carga a las que se someterá dicho pórtico. Para simplificar los ensayos, se han definido dos estados de carga individuales: uno correspondiente a una carga horizontal y otro a una carga vertical. Por tanto, se analizarán dos casos de carga independientes, denominados respectivamente:

1. Carga Horizontal FH
2. Carga Vertical FV

### CARGA HORIZONTAL

Este estado de carga consiste en aplicar una fuerza horizontal sobre uno de los extremos de las vigas superiores del pórtico. En concreto, se ejercerá una fuerza hacia el exterior del pórtico, actuando sobre la esquina superior derecha. Esta ubicación ha sido seleccionada debido a la presencia de una posible rótula plástica, ya que, bajo este tipo de carga, representa un mecanismo probable de colapso. Por este motivo, se ha implementado en dicha unión la rótula semirrígida diseñada

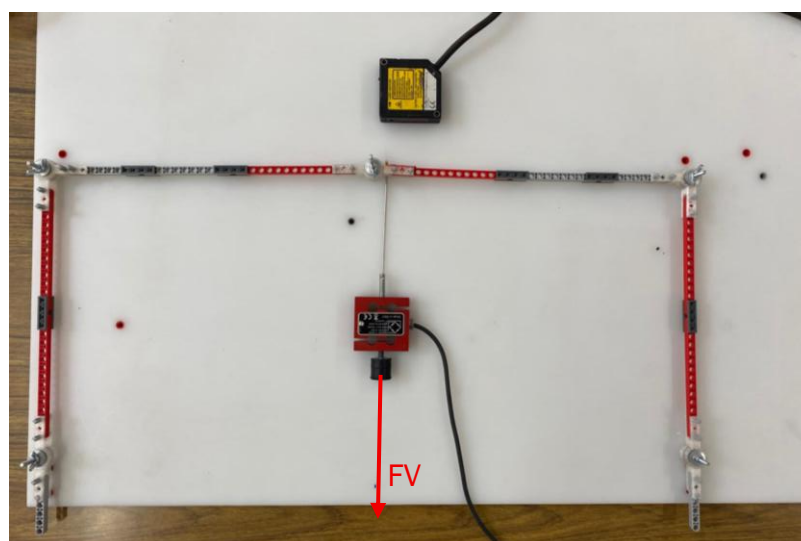
previamente. En La *Figura 65* se observa el sentido y la ubicación de la fuerza que se aplica en el ensayo de carga horizontal.



*Figura 65. Carga Horizontal en pórtico*

### CARGA VERTICAL

Este estado de carga consistirá en aplicar una fuerza vertical descendente en el centro del dintel del pórtico, en coincidencia con una posible zona de formación de rótula plástica. La carga se aplicará de forma reiterada y progresiva, con el objetivo de observar el comportamiento del sistema y analizar la posible formación de un mecanismo de colapso. A continuación, se muestra en la *Figura 66* la disposición experimental empleada, junto con el sentido de aplicación de la carga:

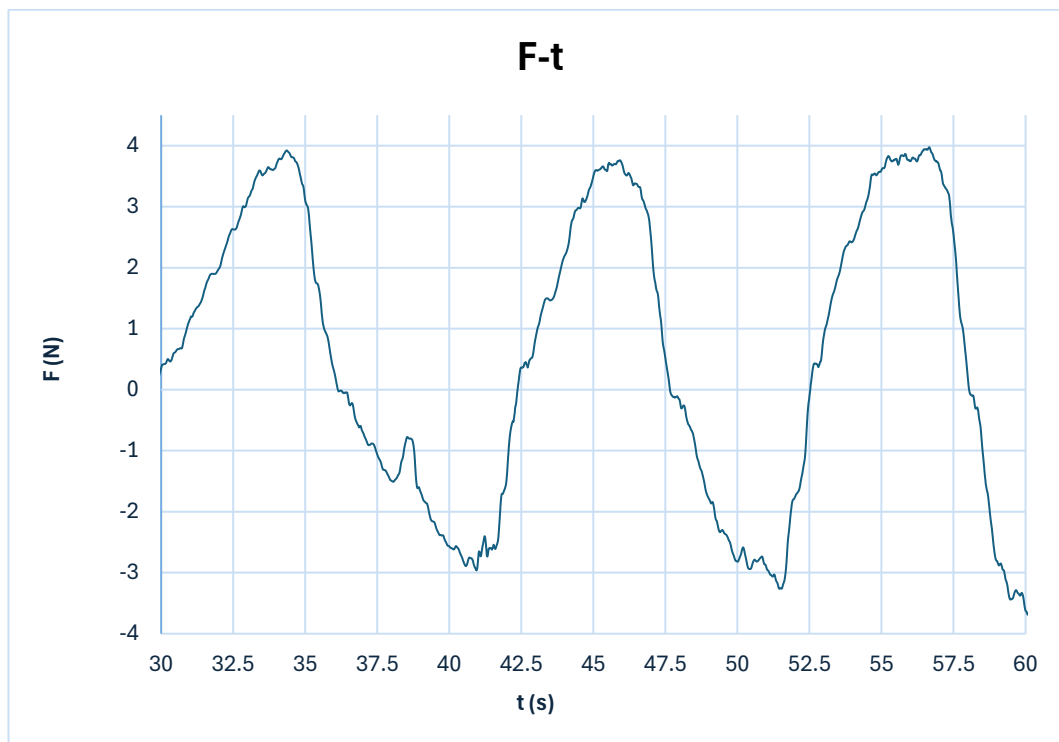


*Figura 66. Carga Vertical en pórtico*

- *Recogida de datos*

El hardware encargado de recoger los datos es el anterior mencionado SIRIUS HD-SGT (*Figura 17*). Este dispositivo puede recoger información cada 0,001 segundo, o lo que es igual, cada milisegundo. Esto añade una alta precisión en la toma de datos.

A través de un ordenador se mostraba una gráfica en tiempo real de las variables Fuerza-tiempo, donde se podía mirar los ciclos de carga y la uniformidad de los valores.



*Figura 67. Gráfica F-t directa SIRIUS HD-SGT*

Como se observa en la *Figura 67*, existe una frecuencia determinada y una similitud en las cargas realizadas en la experimentación. Sin embargo, se necesita aplicar una serie de filtros, los cuales se comentarán en el siguiente capítulo, para poder analizar y comprender los datos adquiridos.

Es importante destacar que la gráfica anterior en la que se enfrentan fuerza y tiempo no es la más representativa para el fenómeno estudiado, pero sí es orientativa en cuanto a esa repetibilidad ocasionada por el fallo plástico antes mencionado.

Gracias al software utilizado para este trabajo, se han recogido datos que facilitan la comprensión del comportamiento del pórtico bajo las distintas casuísticas. Tras recoger los datos, tanto de la fuerza ejercida como del desplazamiento de los puntos a estudiar (aquellos que plastificarían), se han realizado, mediante Excel, gráficas que relacionan dichas variables entre sí. Estas gráficas, mostradas en la *Figura 68* y *Figura 69*, serán tratadas minuciosamente, a través de unos filtros de datos, para comprenderlas de la mejor manera posible en el siguiente apartado.

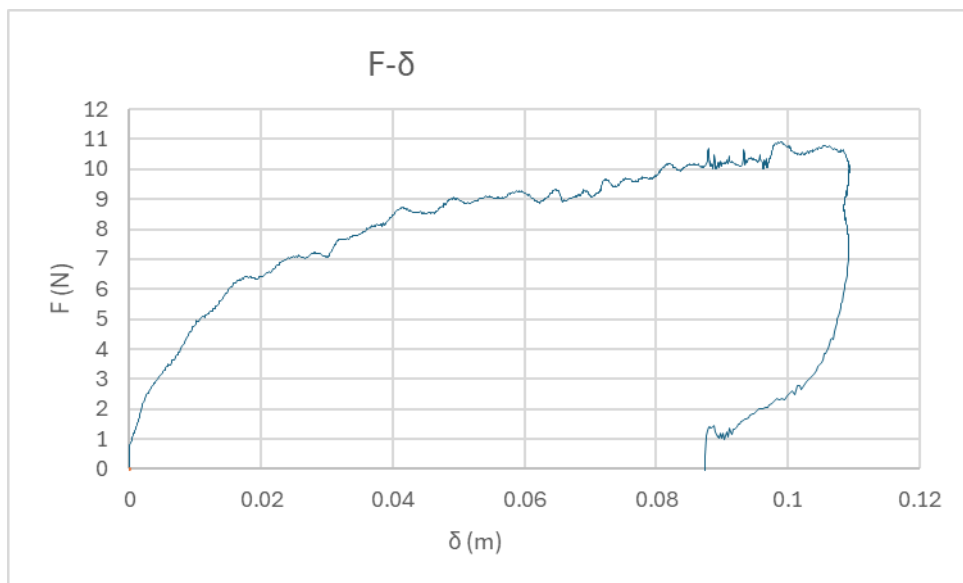


Figura 68. Gráfica  $F-\delta$  en caso de carga **horizontal** (sin filtros)

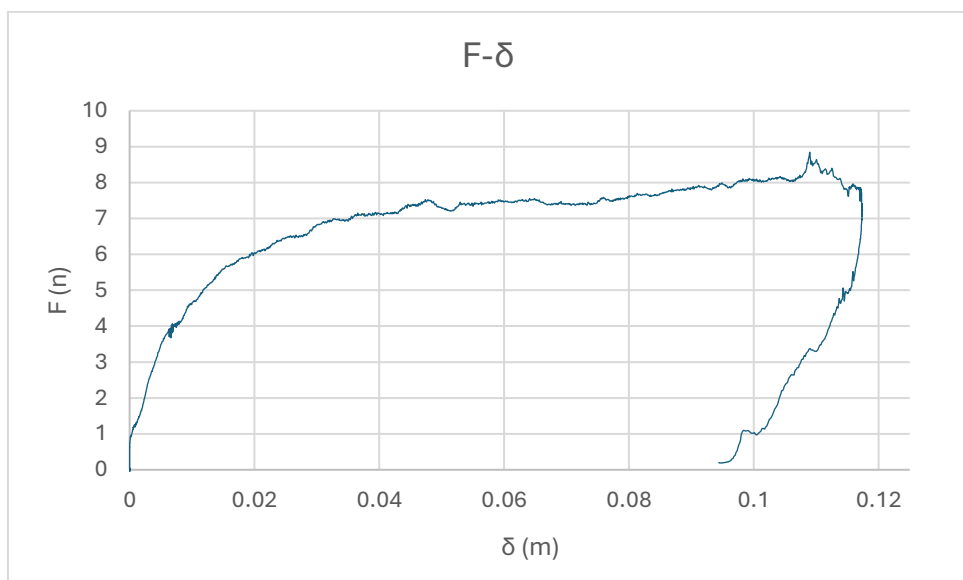


Figura 69. Gráfica  $F-\delta$  en caso de carga **vertical** (sin filtros)

## Capítulo 4. Análisis Mecánico

En este apartado se analiza el comportamiento mecánico de las rótulas desarrolladas, con el objetivo de determinar el momento máximo que pueden resistir antes de permitir el giro relativo entre las vigas LEGO. Como se ha explicado anteriormente, este momento límite se interpreta como el momento plástico del sistema, al considerar que el mecanismo de fallo no es por rotura del material, sino por **superación del rozamiento que mantiene bloqueado el giro**.

Para llevar a cabo este análisis, se han adoptado dos conjuntos de **hipótesis** fundamentales:

- Hipótesis de cálculo plástico
  - Material homogéneo e isótropo
  - Pequeñas deformaciones y desplazamientos
  - Equilibrio estable (sin pandeo)
  - Hipótesis de Navier: sección plana perpendicular a la línea media
  - Comportamiento elastoplástico

- Hipótesis de fricción
  - Presión uniforme

Para poder adoptar esta hipótesis de fricción, se ha de especificar el cumplimiento de ciertos requisitos:

- Material intermedio (caucho) se deforma de manera homogénea
- La superficie de contacto está bien alineada y plana (sin errores de mecanizado)
- La fuerza normal se reparte simétricamente sobre el área de contacto.

Estas hipótesis permiten modelar el sistema como una unión friccional con rigidez ajustable, cuyo momento de fricción máximo equivale al momento plástico de las secciones más críticas, según los modelos de ensayo. En los siguientes apartados se detallará cómo se han obtenido estos valores, y cómo se comporta la rótula en función de los parámetros de diseño, con el objetivo de contrastar los resultados experimentales con los obtenidos mediante el modelo numérico en SAP2000.

## 4.1 Obtención del momento de fricción máximo experimental

Para comprender adecuadamente el funcionamiento del mecanismo, es necesario caracterizar el momento plástico de la rótula, ya que este parámetro permite introducir condiciones más realistas en el modelo numérico desarrollado con SAP2000.

Para ello, se diseñó un ensayo experimental que consistía en cargar una viga de forma que simula un empotramiento mediante una rótula impresa en 3D, tal y como se muestra en la *Figura 63* y *Figura 64*. Conociendo la fuerza aplicada (por la célula de carga) y el instante en que se produce el deslizamiento (determinado por observación visual), se pudo estimar el momento de fricción máximo.

El cálculo se basa en la expresión:  $\text{Momento} = \text{Fuerza} \times \text{distancia de aplicación}$ , asumiendo que la rótula actúa como un empotramiento ficticio. La configuración del ensayo puede observarse en la *Figura 64*. Para determinar este momento, se calculó el valor medio aproximado de la fuerza máxima soportada por la rótula antes del deslizamiento, valor que representa la variable experimental crítica y que depende de la uniformidad entre muestras.

En la *Figura 67* se aprecia la repetibilidad experimental, que, pese a que el procedimiento de carga es manual, refleja con cierta claridad el comportamiento característico de la rótula. No obstante, fue necesario filtrar los datos para reducir el efecto del ruido provocado principalmente por la acción humana al aplicar la carga. Para este filtrado, se emplearon promedios móviles de 5 y 11 valores, calculados mediante Excel, con el objetivo de encontrar una representación más precisa del momento plástico.

Finalmente, y para simplificar la presentación de resultados, se ha optado por representar únicamente el promedio de 11 valores, tomado a partir del instante  $t = 30$  s, momento en el que se observa mayor repetibilidad. Esto se debe a que, tras cada episodio de deslizamiento, la viga se recolocaba manualmente en su posición inicial, lo cual quedaba registrado por el sistema de adquisición de datos.

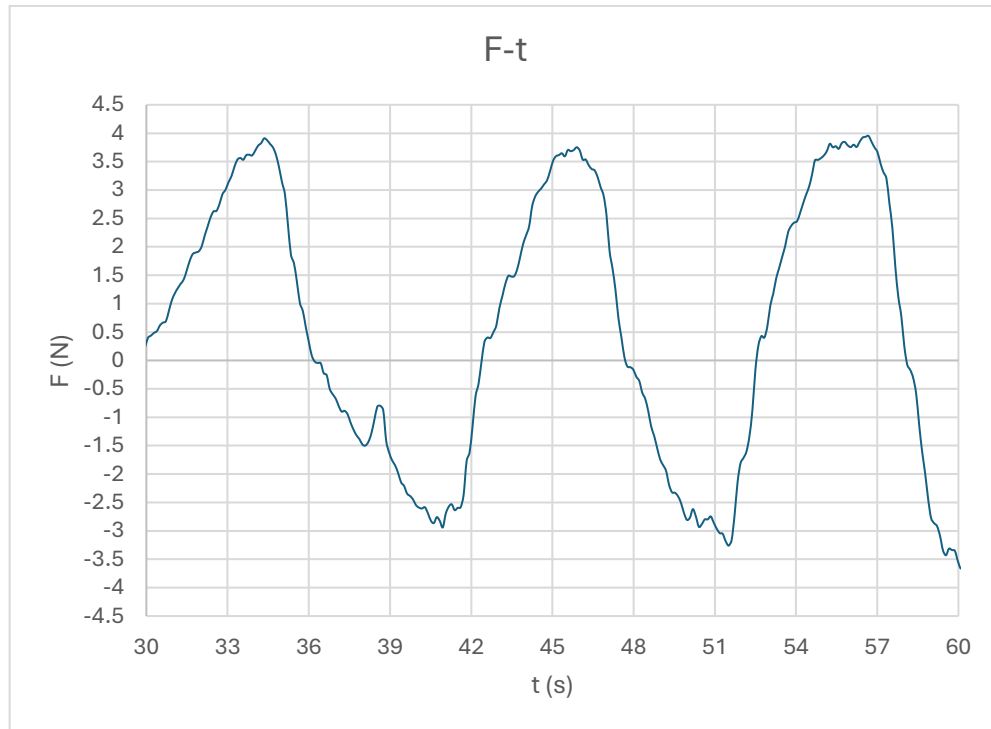


Figura 70. Datos experimentales despues de  $t=30$  s

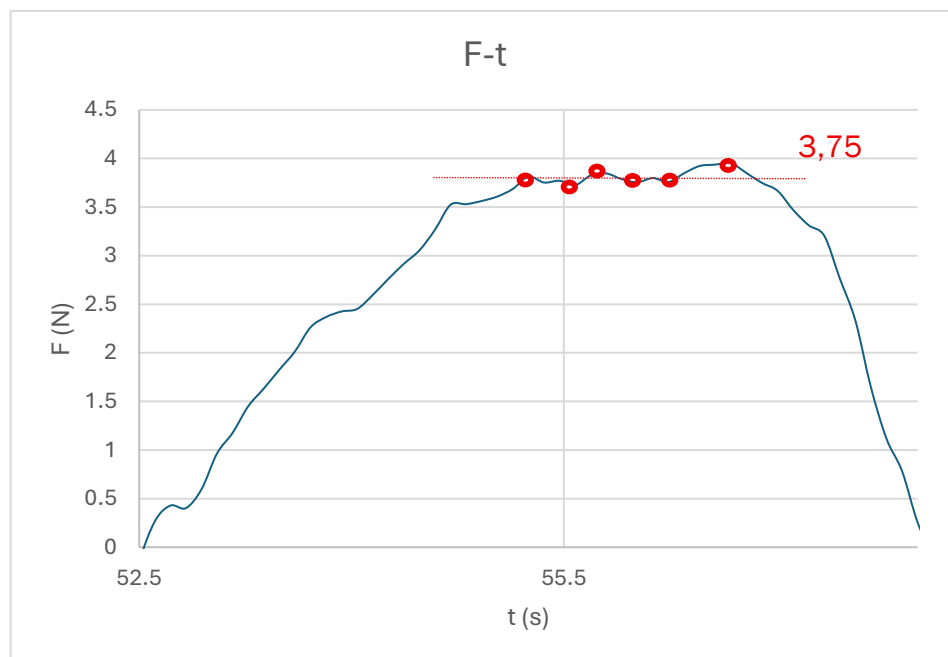


Figura 71. Vista ampliada del pico de fuerza máxima aplicable

Como se observa en la *Figura 70*, existe una uniformidad en el valor máximo de la fuerza de fricción que puede soportar la rótula antes del deslizamiento. Se ha registrado un valor medio máximo de aproximadamente 3,75 N, cogiendo los valores de los puntos rojos mostrados en la *Figura 71*.

Cabe señalar que estos **resultados dependen del nivel de apriete** aplicado en cada rótula. En este caso, se ha fijado un apriete consistente en tres vueltas completas desde el primer contacto de la tuerca mariposa con la arandela, lo que proporciona una rigidez constante y un mayor rango de ajuste.

Con este valor de fuerza máxima y una distancia entre el punto de aplicación de la carga y el eje de rotación de  $L = 0,132 \text{ m}$ , se calcula el momento plástico de la rótula como:  $M_p = F_{m\acute{a}x} \times L = 3,75 \times 0,132 = 0,495 \text{ N m}$

En conclusión, mediante este procedimiento experimental ha sido posible caracterizar el momento plástico de la rótula, lo que permitirá introducir este parámetro en el modelo numérico desarrollado en SAP2000 y así realizar una comparación directa entre el comportamiento experimental y el comportamiento teórico simulado.

## 4.2 Interpretación del comportamiento mecánico de la rótula

Con el fin de comprender hasta qué punto el comportamiento de la rótula desarrollada se asemeja al de una rótula plástica ideal, en este apartado se interpretan los resultados del experimento específico realizado para caracterizar su momento de fricción máximo. Este momento, obtenido de forma experimental, se asume como el momento plástico de la rótula, ya que representa el umbral a partir del cual se permite el giro relativo entre piezas.

El análisis de la respuesta mecánica de la rótula desarrollada permite identificar tres fases que suceden de forma progresiva durante la aplicación de la carga, como se aprecian en la *Figura 72*. Estas etapas reflejan el comportamiento típico de una unión friccional sometida a carga creciente, y son fundamentales para comprender cómo se transfiere el momento hasta alcanzar el deslizamiento.

Por otro lado, como se ha mencionado antes, esta gráfica no es la más representativa para el fenómeno de cálculo plástico, sin embargo, da información aproximada sobre la fuerza de fricción máxima soportada por la rótula bajo las condiciones de apriete previamente definidas.



- Fase 3: Movimiento con fricción constante

Una vez superado el umbral de fricción, tal y como se describe en el Marco teórico, se produce una transición en el coeficiente de fricción del sistema: se pasa de una fricción estática a una dinámica, lo cual permite el giro continuo de la rótula incluso bajo una fuerza constante o decreciente.

Desde el punto de vista estructural, esta fase representa un comportamiento rotacional libre, en el cual la rótula deja de transmitir momento flector, comportándose como una rótula plástica ideal. Esto posibilita una redistribución de esfuerzos dentro de la estructura, tal y como se espera en un mecanismo de colapso.

Esta fase fue especialmente relevante en el diseño del componente, dado que el fenómeno de *stick-slip* es característico de sistemas de fricción, pero no está presente en las rótulas plásticas reales, ya que estas implican fisuración del material y no un mecanismo reversible. Por este motivo, se optó por utilizar caucho como material intermedio de fricción, al ofrecer un coeficiente de fricción estático y dinámico más cercano, lo cual reduce significativamente el efecto de *stick-slip* y mejora la regularidad del comportamiento rotacional.

### 4.3 Influencia de parámetros de diseño

El comportamiento mecánico de la rótula no es únicamente función de su geometría o material, sino que está altamente condicionado por los parámetros de diseño, los cuales se han elegido minuciosamente para poder ajustar su respuesta estructural. Esta característica ofrece una gran versatilidad al sistema, permitiendo controlar el momento de fricción máximo y, por lo tanto, su rigidez rotacional. A continuación, se describen los factores más influyentes en dicho comportamiento:

1. Número de arandelas con caucho

En lugar de un muelle convencional, se ha utilizado un sistema compuesto por arandelas metálicas con una cara revestida de caucho, que actúan como elementos deformables. Este sistema permite una respuesta progresiva frente a la compresión, cuantas más arandelas se añadan, mayor es la capacidad de deformación total del conjunto, comportándose de manera similar a muelles en serie. Así, se incrementa el recorrido de apriete útil y se suaviza el comportamiento friccional.

2. Nivel de apriete (número de vueltas de la tuerca)

El número de vueltas de apriete de la tuerca mariposa es el parámetro principal que regula la precarga sobre las arandelas. A mayor apriete, mayor compresión del conjunto y, por tanto, mayor presión normal entre

las superficies en contacto. Esto se traduce directamente en un aumento de la fuerza de fricción, lo que permite ajustar el momento plástico de cada rótula de forma sencilla.

### 3. Material y superficie de contacto

El comportamiento friccional está fuertemente influido por las características de los materiales en contacto. En este caso, el cuerpo de la rótula ha sido impreso en PLA, mientras que las arandelas son metálicas con una cara de caucho. Este caucho mejora la adaptabilidad al contacto y aumenta el coeficiente de fricción, contribuyendo a estabilizar el comportamiento.

El estado superficial del PLA, especialmente en zonas de fricción, así como la limpieza o desgaste del caucho, son factores que pueden alterar el comportamiento y deben ser controlados durante la fabricación y el montaje.

### 4. Geometría del sistema de fricción

La forma y disposición de las superficies en contacto también afectan a la distribución de la presión normal. Aunque en este trabajo se ha mantenido constante, modificaciones en el ángulo cónico o en el área efectiva de contacto permitirían afinar aún más la respuesta del sistema, adaptándolo a diferentes necesidades estructurales o de carga.

## Capítulo 5. Validación

Este capítulo presenta los resultados obtenidos en los ensayos experimentales con las rótulas implementadas en el pórtico. Además, se compararán con el modelo estructural simulado en el programa SAP2000, con el objetivo de validar su capacidad predictiva respecto al comportamiento real de la pieza.

### 5.1 Resultados experimentales

#### 5.1.1 Carga horizontal

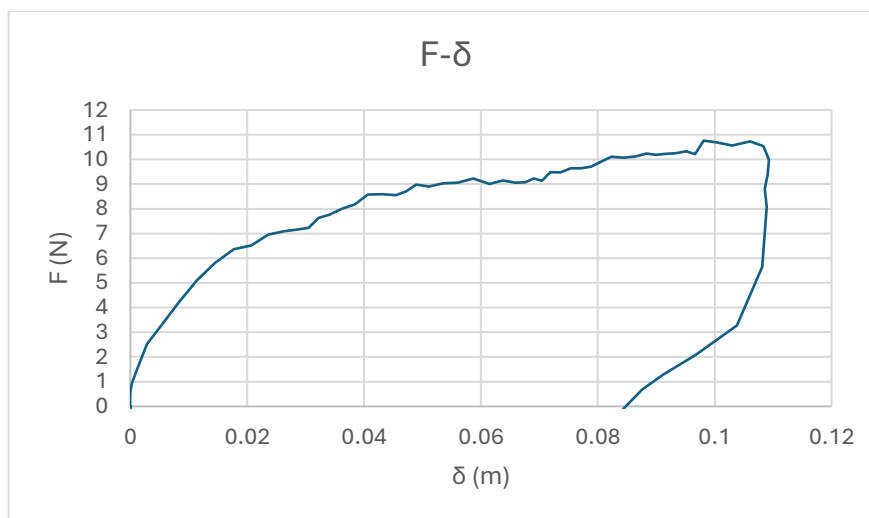


Figura 73. F-  $\delta$ , carga horizontal

Debido a que se ha realizado una reducción de ruido en los datos recogidos, respecto a la *Figura 68*, se puede apreciar con mayor claridad el gráfico que representa la evolución de la Fuerza (eje vertical, en Newton) frente al desplazamiento (eje horizontal, en metros) del experimento correspondiente a la *Figura 65*.

En una primera apreciación de la gráfica, se pueden ver dos pendientes correspondientes a la formación de las rótulas plásticas y, debería de existir (teóricamente) un aumento de la deformación sin aumento de carga. Aunque, al ser un proceso experimental, existen deformaciones grandes y nunca se apreciaba este comportamiento teórico por lo que se dejó de aplicar la carga al llegar a una deformación excesiva.

En la *Figura 73*, se pueden distinguir cuatro etapas durante la carga horizontal del pórtico, las cuales son:

#### 1. Región elástica o inicial ( $0 \leq \delta \leq 0,03$ m):

- Durante esta etapa, se puede observar una relación casi lineal de la fuerza y el desplazamiento. Esta muestra representa un

comportamiento elástico del elemento, el cual simula una sección más del a viga.

- La pendiente en esta región corresponde con la rigidez global del sistema.
- La fricción aún no ha sido superada por lo que la carga se acumula progresivamente

## 2. Región de comportamiento lineal por tramos ( $0,03 \leq \delta \leq 0,08$ m):

La pendiente comienza a reducir progresivamente, aunque sigue con una tendencia ascendente. Por lo tanto:

- Aparece una no linealidad progresiva, es decir, la rigidez del sistema disminuye a medida que aumenta el desplazamiento.
- Esto puede deberse a la compresión del material de fricción (caucho) y/o al inicio de desplazamiento parcial de la rótula.
- Comienza a desarrollarse la fricción dinámica, debido a que ya se han creado algunas rótulas, aunque se podía seguir cargando la estructura.

## 3. Régimen estable con oscilaciones ( $0,08 \leq \delta \leq 0,105$ m):

La curva se aplanan ligeramente con pequeñas oscilaciones. Esto se debe a que:

- El sistema se encuentra en una fase casi estable de fricción dinámica.
- Las oscilaciones pueden deberse a pequeños deslizamientos del caucho, por lo que hay pérdida de agarre.
- Se aumenta más lentamente la carga aplicada.

## 4. Descarga ( $0,105 \rightarrow 0$ m):

La curva de descarga no sigue el mismo patrón que la curva de carga. Esto se debe a:

- Deformación residual (ver *Figura 74*), es decir, el sistema no vuelve al punto de origen, lo que implica una deformación permanente que se asemeja al problema real.

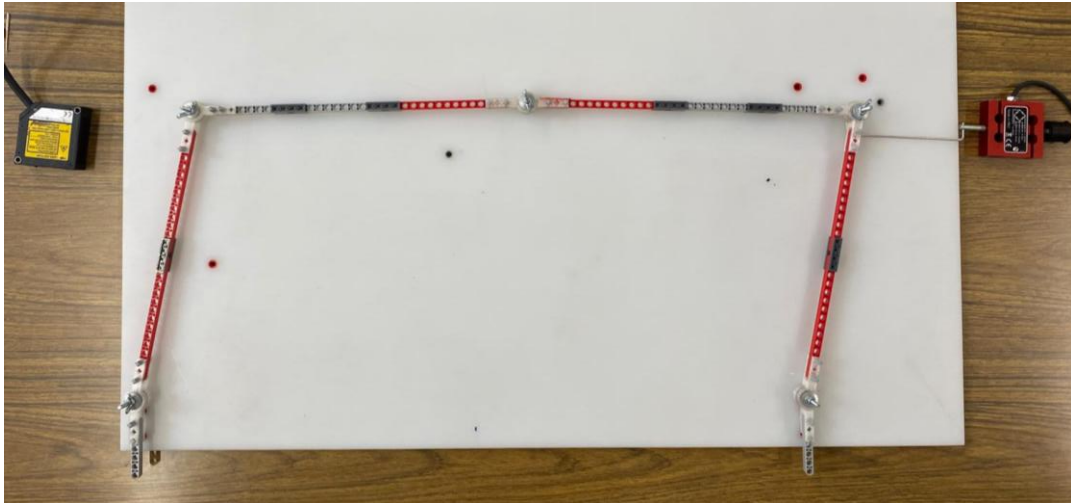


Figura 74. Estructura deformada por carga horizontal

### 5.1.2 Carga vertical

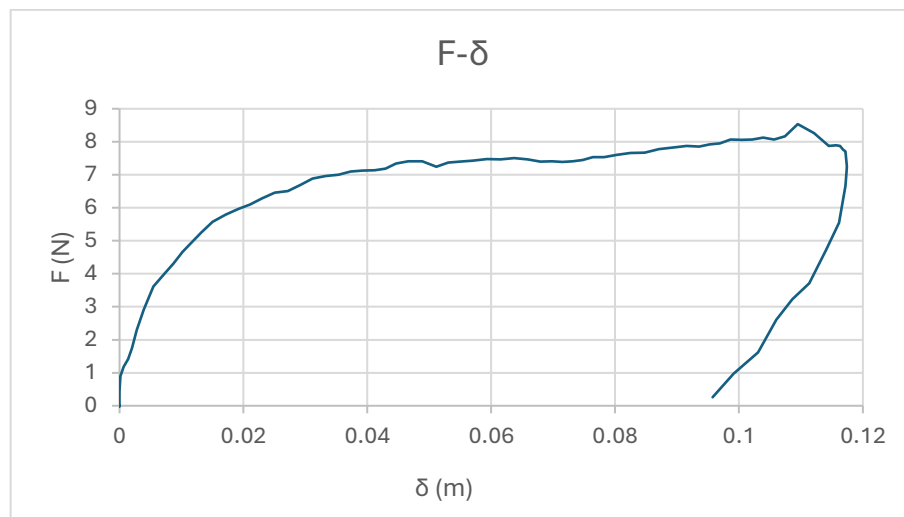


Figura 75.  $F$ -  $\delta$ , carga vertical

Con el fin de mostrar con mayor resolución los resultados obtenidos de la experimentación, se ha realizado una filtración de datos al igual que en el ensayo de carga horizontal. De igual forma se ha obtenido una relación Fuerza-Desplazamiento como se muestra en la *Figura 75*, donde se pueden apreciar distintas fases:

**1. Región elástica o inicial ( $0 \leq \delta \leq 0,02$  m):**

Es la zona donde se aprecia el comportamiento inicial lineal elástica, donde se aprecia:

- Una rigidez inicial del sistema. La carga crece proporcionalmente con el desplazamiento.

- En esta región no existe aún deslizamiento, es decir, el pórtico está bajo exigencias estructurales óptimas.
- 2. Región de comportamiento lineal por tramos ( $0,02 \leq \delta \leq 0,08$  m):**  
Se observa un decrecimiento de la pendiente, es decir, hay un aumento más ligero de la carga mientras que el desplazamiento sigue aumentando. Esto se debe a distintos factores:
- Compresión avanzada del caucho de fricción.
  - Reducción progresiva de la rigidez del sistema.
  - Ha comenzado el deslizamiento parcial de los puntos críticos (rótulas plásticas).
- 3. Región de fricción estable ( $0,08 \leq \delta \leq 0,105$  m):**  
Aparece de nuevo un incremento de fuerza, más pequeño que en la zona de rigidez, pero mayor que en la región no lineal. Esto podría indicar que:
- El caucho se ha deformado creando rugosidades que ejercen más presión sobre las caras en contacto.
  - Deja de aumentar la carga aplicada.
- 4. Descarga ( $0,105 \rightarrow 0$  m):**  
Una vez alcanzado un desplazamiento elevado, se finaliza el proceso de carga. Como se ha observado en el ensayo con carga horizontal, existe una deformación residual que impide al pórtico volver a su estado inicial.

En la *Figura 76* se muestra la deformación ocasionada por el experimento de carga vertical. Es importante apreciar la curvatura de las vigas puesto que es una representación acertada del problema teórico.

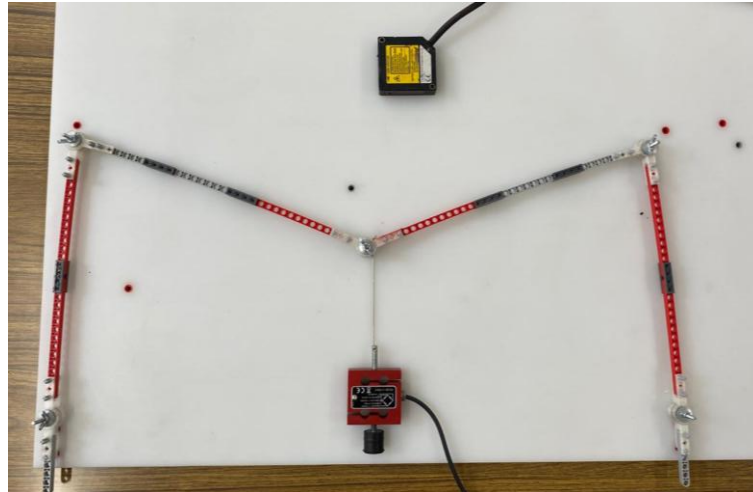


Figura 76. Estructura deformada por carga vertical

## 5.2 Comparación con los cálculos teóricos

Una vez descritos los ensayos experimentales, se procede a contrastar los resultados obtenidos con el modelo numérico desarrollado en SAP2000. Con el objetivo de facilitar el análisis y la comprensión del comportamiento estructural, se abordarán por separado los casos de carga horizontal y vertical. Esta distinción permite realizar una comparación más precisa entre la respuesta observada en los ensayos físicos y la prevista por el modelo teórico.

- Metodología de recogida de datos en SAP2000

Con el objetivo de representar de forma realista el comportamiento observado en los ensayos experimentales, se procedió a la modificación de las propiedades del material asignado en SAP2000 a los elementos que simulan la rótula diseñada. Esta pieza no presenta plastificación estructural en el sentido convencional, ya que su resistencia al giro se basa en el rozamiento generado por un sistema de arandelas comprimidas mediante tornillo. Por tanto, la plastificación en el modelo numérico debía reflejar el momento máximo de fricción observado experimentalmente antes del inicio del giro.

Para lograr esta equivalencia, se ha seguido un procedimiento inverso al habitual. En primer lugar, se calculó el módulo plástico  $Z$  de la sección transversal de la rótula, tomando como referencia la geometría real de la viga LEGO (Figura 77). A partir del resultado de ese cálculo, y del momento de fricción máximo medido experimentalmente ( $M_p = 0,495 \text{ Nm}$ ), se obtuvo la tensión de fluencia teórica necesaria para cumplir la relación:

$$f_y = \frac{M_p}{Z}$$

Obteniendo este valor de  $f_y$ , se procedió a crear un nuevo material en SAP 2000 el cual se denominó “MODIFICADO LEGO”, con las siguientes propiedades (ver Figura 78):

- Módulo de elasticidad E: 3 GPa
- Tensión de fluencia (calculada)  $f_y$ : 3,87 MPa

Este enfoque permitió que SAP2000 calculase internamente un momento plástico equivalente a 0.495 Nm, coherente con el límite de fricción observado en los ensayos. A su vez, el módulo de elasticidad fue ajustado para representar correctamente la rigidez inicial de la rótula antes del inicio del deslizamiento, tal y como se muestra en una práctica realizada en la asignatura de Estructuras y Construcciones Industriales (2).

Por lo tanto, esta modificación constituyó el cambio más relevante dentro del modelo numérico, ya que permitió trasladar con precisión el comportamiento físico del sistema de freno por fricción al entorno simulado, facilitando así una comparación válida entre ambos contextos.

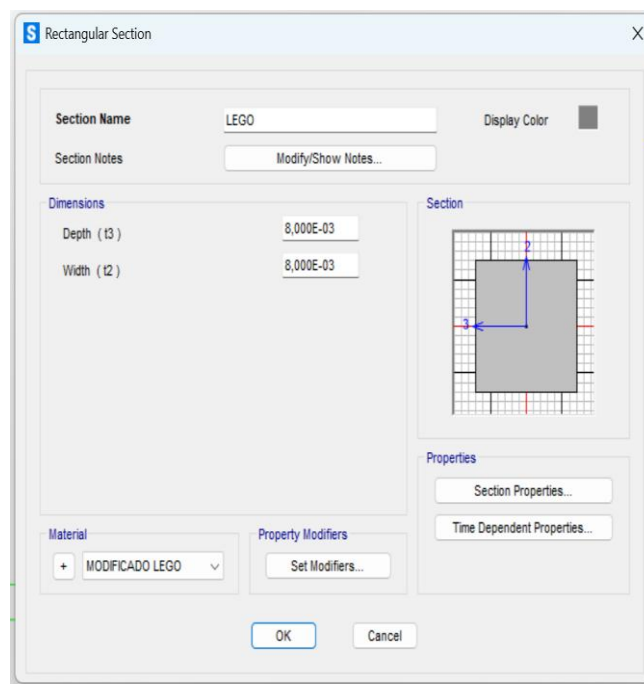


Figura 77. Geometría sección SAP2000

The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box in SAP2000. The material is named 'MODIFICADO LEGO' with a green display color. It is classified as 'Steel' with grade 'S275'. The weight and mass properties are set to 1240 and 126,4448 respectively, with units 'N, m, C'. The isotropic properties include a modulus of elasticity of 3,000E+09, Poisson's ratio of 0,36, a coefficient of thermal expansion of 6,800E-05, and a shear modulus of 1,103E+09. The other properties for steel materials are all set to 3870000. The 'Switch To Advanced Property Display' checkbox is unchecked. The dialog has 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom.

| General Data                    |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| Material Name and Display Color | MODIFICADO LEGO      |
| Material Type                   | Steel                |
| Material Grade                  | S275                 |
| Material Notes                  | Modify/Show Notes... |

| Weight and Mass        |          | Units   |
|------------------------|----------|---------|
| Weight per Unit Volume | 1240,    | N, m, C |
| Mass per Unit Volume   | 126,4448 |         |

| Isotropic Property Data             |           |
|-------------------------------------|-----------|
| Modulus Of Elasticity, E            | 3,000E+09 |
| Poisson, U                          | 0,36      |
| Coefficient Of Thermal Expansion, A | 6,800E-05 |
| Shear Modulus, G                    | 1,103E+09 |

| Other Properties For Steel Materials |          |
|--------------------------------------|----------|
| Minimum Yield Stress, Fy             | 3870000, |
| Minimum Tensile Stress, Fu           | 3870000, |
| Expected Yield Stress, Fye           | 3870000, |
| Expected Tensile Stress, Fue         | 3870000, |

☐ Switch To Advanced Property Display

OK Cancel

Figura 78. Propiedades del material SAP2000

- **Aplicación de carga horizontal**

En SAP2000 se define el estado de carga y se define una fuerza que ejecutará progresivamente el modelo. Como se aprecia en la figura, hay aplicada una fuerza horizontal (eje X)  $F1$  de 1 N, algo que puede parecer insuficiente, pero es un valor orientativo, SAP2000 aplicará carga progresivamente hasta llegar a la formación de rótulas plásticas.

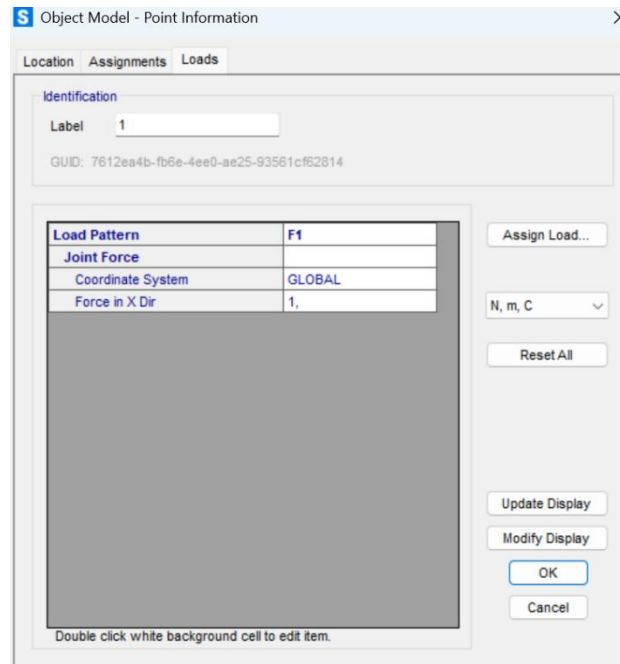


Figura 79. F1 de 50 N en eje OX

Una vez simulado el modelo, el programa presenta la deformada de la estructura por pasos o *STEPS*. Estos pasos representan el momento en el que se forman rótulas plásticas (círculos verdes) siguiendo el orden de formación de estas.

En la *Figura 80* se pueden observar la formación de las dos primeras rótulas plásticas, para este estado de carga, que suceden simultáneamente. Por lo tanto, esto indica una correcta definición de las condiciones de contorno en el modelo.

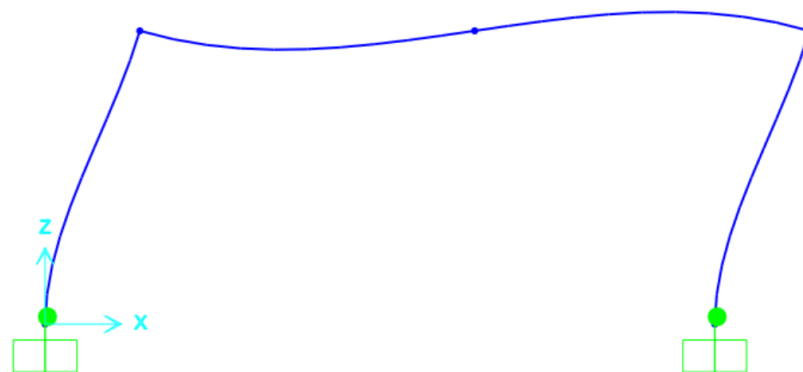
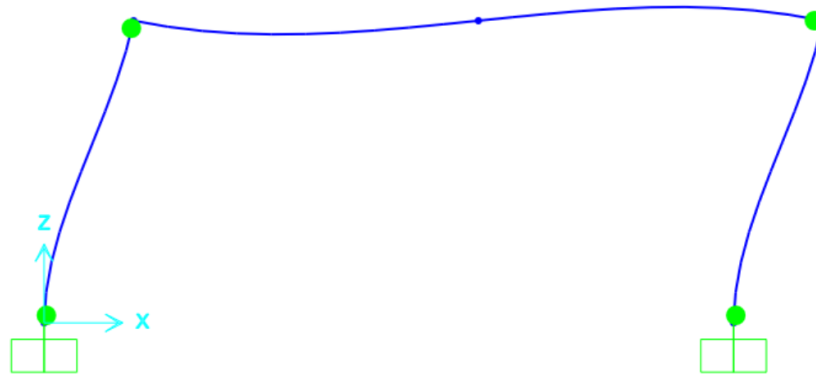


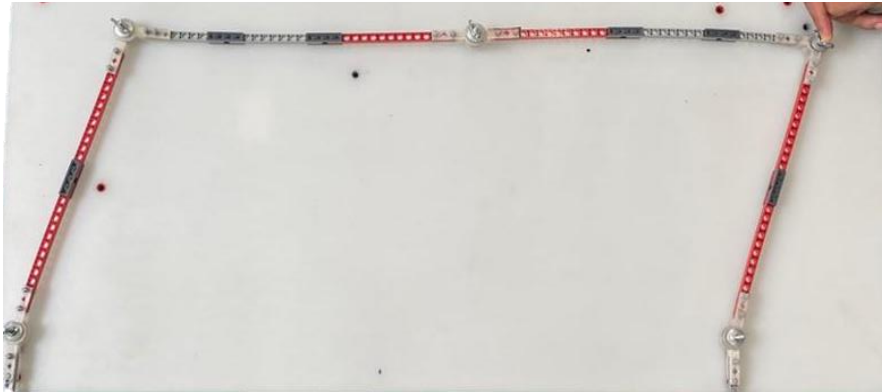
Figura 80. Deformada horizontal 2RP

Por otro lado, en la *Figura 81*, se aprecia el momento en el que ya se han formado las cuatro rótulas plásticas, que correspondería con el mecanismo de colapso de esta estructura. Este caso se puede observar en el ensayo real en

la *Figura 82*, donde se ve claramente la estructura deformada muy similar a las creadas por el SAP2000.



*Figura 81. Deformada horizontal 4RP*



*Figura 82. Deformada ensayo horizontal*

Aunque la apreciación visual sea coherente y bastante acertada, es necesario comprobar numéricamente si el ensayo se asemeja a los cálculos hechos por SAP2000. Por ello, esta aplicación es capaz de proporcionar los datos de los desplazamientos y la fuerza alcanzada en cada punto de formación de rótulas (*STEPS*). Estos se pueden apreciar tanto gráficamente (*Figura 83*) como numéricamente (*Tabla 9*).

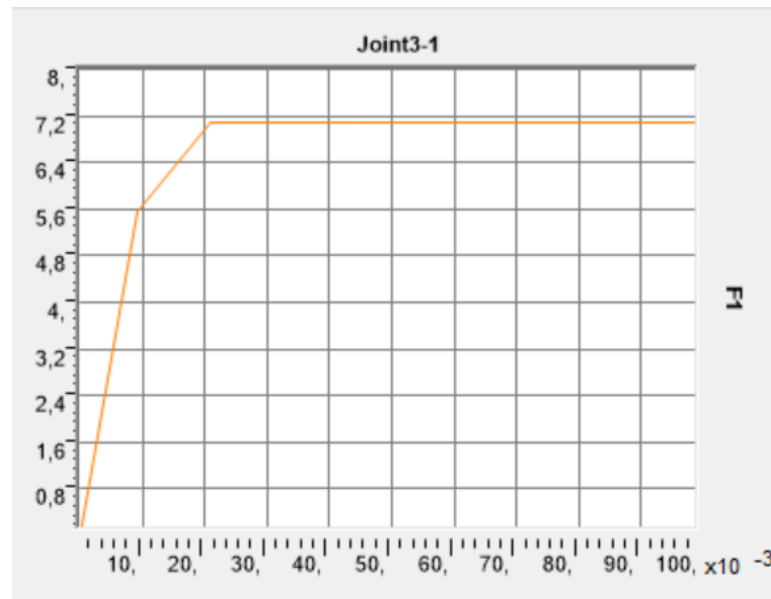


Figura 83. Gráfica F- $\delta$  carga horizontal SAP2000

Tabla 9. Tabla F- $\delta$  carga horizontal SAP2000

```

SAP2000 v26.2.0 File: TFG N, m, C Units PAGE 1
m/d/yy h:mm:ss

Universidad de Valladolid

NON LINEAR STATIC DATA

CASE Carga no lineal
FUNCTION Joint3-1: Joint 3 Displacement UX
FUNCTION F1: Function F1
  
```

| STEP | FUNCTION<br>Joint3-1 | FUNCTION<br>F1 |
|------|----------------------|----------------|
| 0,   | 0,                   | 0,             |
| 1,   | 0,00905              | 5,5465         |
| 2,   | 0,02077              | 7,07657        |
| 3,   | 0,04425              | 7,07657        |
| 4,   | 0,04425              | 7,07661        |
| 5,   | 0,05869              | 7,07661        |
| 6,   | 0,0587               | 7,07663        |
| 7,   | 0,1                  | 7,07664        |

Con la finalidad de diferenciar objetivamente el ensayo experimental con el de SAP2000 es necesario tener en cuenta los valores de F1 y desplazamiento (*Joint3-1*) que aparecen en la *Tabla 9*. El valor del desplazamiento es el del punto 3, que es el referido a la esquina superior derecha del pórtico, mientras que los valores de la fuerza son aquellos en los que se ha producido una rótula plástica. El colapso de la estructura se produce cuando aumenta

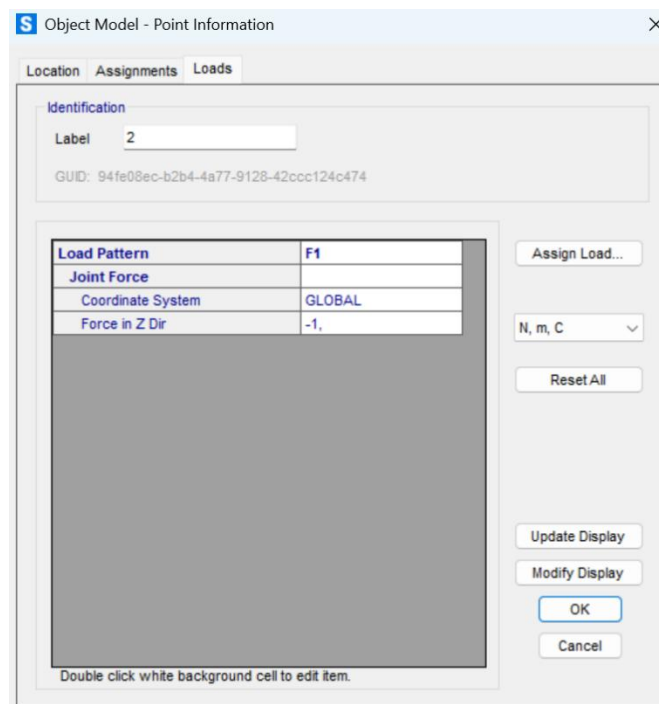
desplazamiento, pero la fuerza no, es decir, **STEP 2 → Desplazamiento = 0,02077 m → Fuerza = 7,07 N.**

Este valor de F1 que aparece en la tabla es el factor que multiplica a la carga que se ha definido inicialmente, en cuyo caso, su valor es una unidad. Por lo que, si se observa de nuevo la *Figura 73*, existe una diferencia notable entre gráficas. Sin embargo, cualitativamente se ha logrado una respuesta experimental similar a la teórica, mientras que cuantitativamente no es precisa.

- **Aplicación de carga vertical**

Una vez realizada la comparación en el ensayo de carga horizontal, se comparará de manera similar el caso de carga vertical. Donde se encontrarán problemas parecidos a los hallados en el caso de carga horizontal.

Al igual que en el anterior ensayo, primero se define una carga de referencia para que SAP2000 la escale mediante factores. En la *Figura 84* se observa el mismo valor de 1 N pero esta vez en el sentido negativo del eje OZ, ya que la carga será transversal a la sección en el punto medio del pórtico y hacia abajo.



*Figura 84. F1 de -50 N en eje OZ*

A continuación, se observa la deformada en el *STEP 1* (*Figura 85*), donde la primera rótula plástica en formarse es justamente aquella donde se aplica la carga F1. Es notable la curvatura que adopta la estructura en esta fase de la carga.

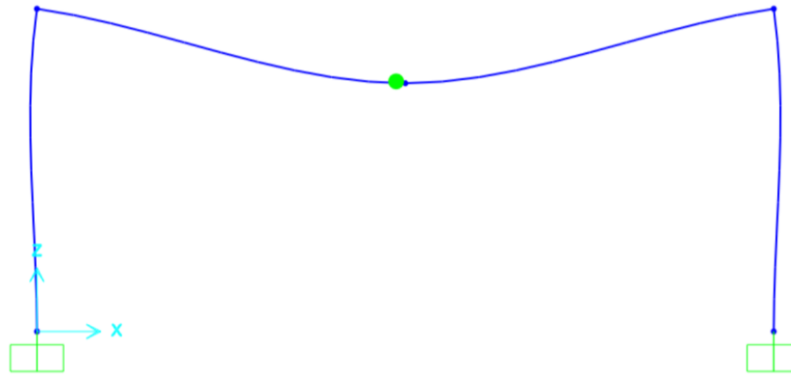


Figura 85. Deformada vertical 1RP

Como SAP2000 aumenta la carga progresivamente hasta llegar al colapso, se puede observar la formación de las dos siguientes rótulas en el STEP 2 (Figura 86), donde la carga se incrementado de tal manera que se ha formado un mecanismo.

Por lo que se observa en la Figura 87, existe similitud entre ambos ensayos, por lo que es posible, de nuevo, corroborar el acierto en la definición del problema en SAP2000. Es cierto que la curvatura de la parte horizontal del pórtico no es apreciable de igual forma en el experimento físico debido a las idealizaciones del modelo teórico.

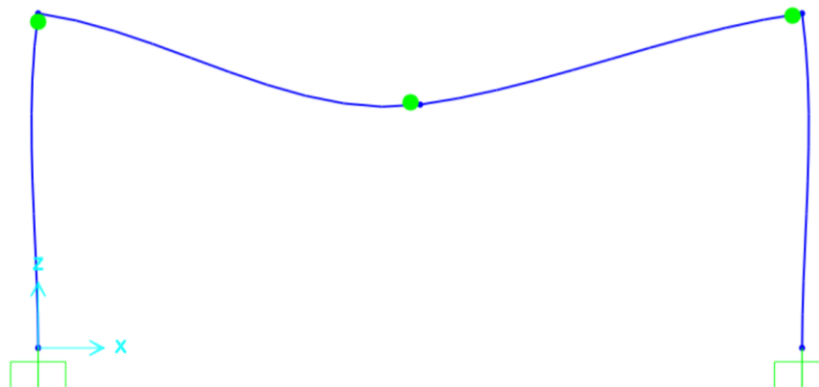


Figura 86. Deformada vertical 3RP

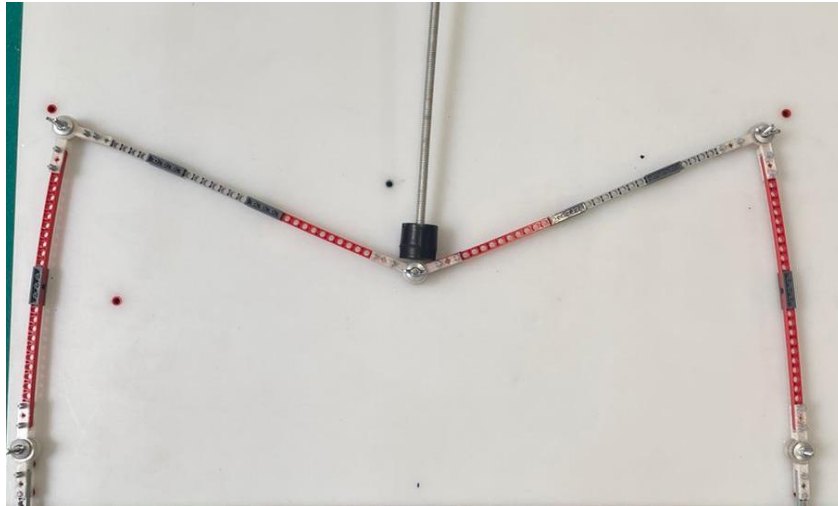


Figura 87. Deformada ensayo vertical

Para comparar de manera correcta el ensayo de carga horizontal, también se debe focalizar la atención en la carga de colapso. En SAP2000 se encuentra el colapso total de la estructura en: **STEP 2** → **Fuerza de colapso  $\approx 6,2$  N; desplazamiento =  $-0,01909$  m** (sentido negativo del eje OZ) como se observa en la *Tabla 10*.



Figura 88. Gráfica F- $\delta$  carga vertical SAP2000

Tabla 10. Tabla F-δ carga vertical SAP2000

```

SAP2000 v26.2.0 File: TFG N, m, C Units PAGE 1
m/d/yy h:mm:ss

Universidad de Valladolid

NON LINEAR STATIC DATA

CASE Carga no lineal
FUNCTION Joint2: Joint 2 Displacement UZ
FUNCTION F1: Function F1
  
```

| STEP | FUNCTION<br>Joint2 | FUNCTION<br>F1 |
|------|--------------------|----------------|
| 0,   | 0,                 | 0,             |
| 1,   | -0,01077           | 5,24974        |
| 2,   | -0,01909           | 6,192          |
| 3,   | -0,05779           | 6,19201        |
| 4,   | -0,05779           | 6,19204        |
| 5,   | -0,06244           | 6,19204        |
| 6,   | -0,06244           | 6,19206        |
| 7,   | -0,1               | 6,19206        |

Si se observa la *Figura 75*, existe una similitud, tanto cualitativa como cuantitativa, entre los ensayos teóricos y experimentales. Es cierto que existen, al igual que en la carga horizontal, desviaciones notables en los resultados, pero el concepto de rótula plástica es apreciable en los cambios de pendiente de ambos, aunque en el ensayo experimental no sean tan visibles.

- Conclusión de la comparación teórica-experimental

Es interesante comparar cualitativamente los resultados experimentales con los cálculos teóricos (SAP2000). Para ello, en la *Figura 89* y *Figura 90* se superponen las gráficas de ambos procesos de carga. En las condiciones ideales la curva carga-desplazamiento sigue la típica poligonal de pendiente decreciente. En ambos casos la poligonal se compone de 3 tramos, siendo el último de ellos horizontal (describiendo el movimiento del mecanismo de colapso) que se inicia con un desplazamiento de unos 0,02 m.

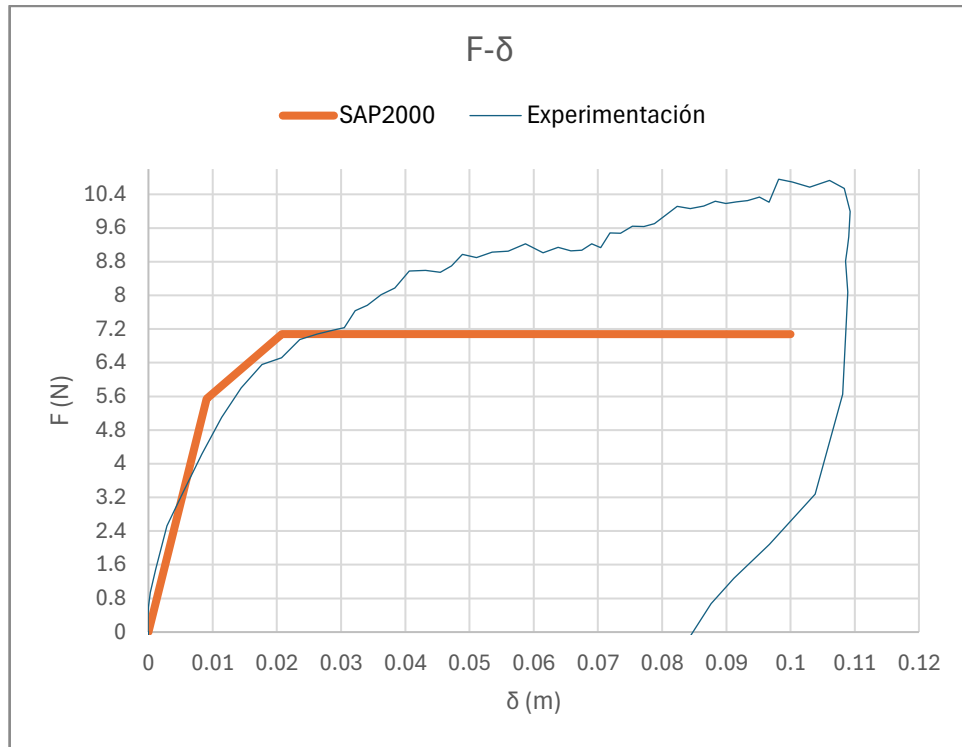


Figura 89. Comparativa experimental con SAP2000, carga horizontal

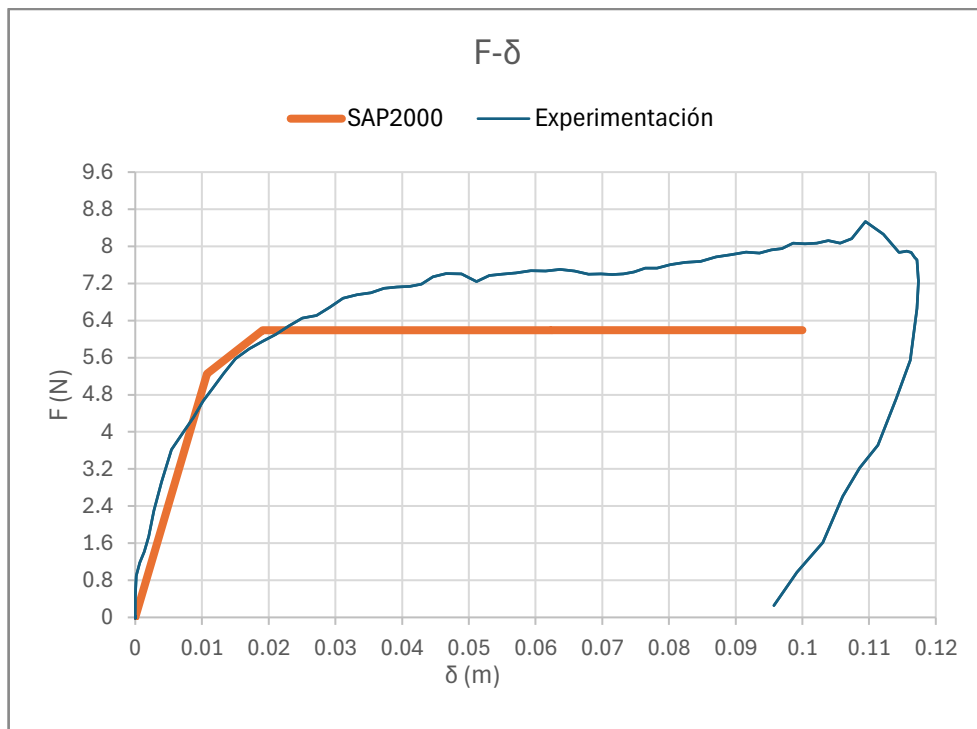


Figura 90. Comparativa experimental con SAP2000, carga vertical

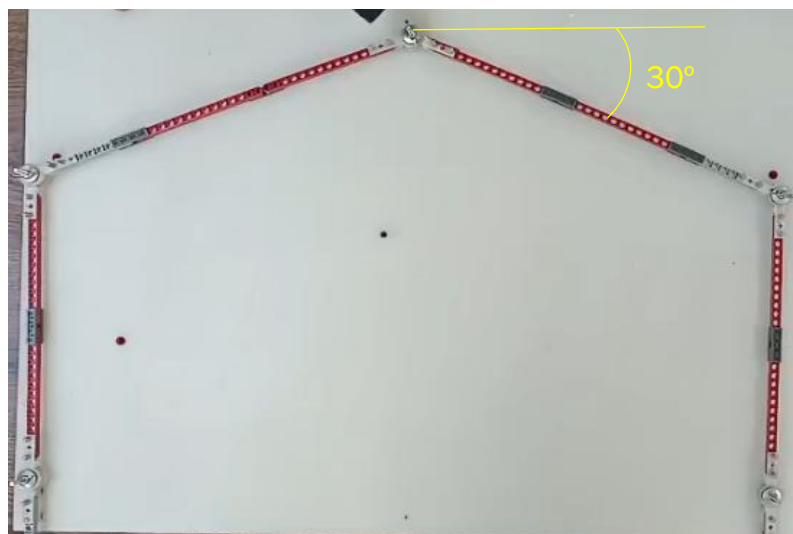
## Diseño y prototipado de una unión para reproducir una rótula plástica

En los ensayos experimentales es mucho más complicado identificar la típica poligonal. Ni siquiera en el primer tramo, de comportamiento teóricamente elástico-lineal, se reconoce una zona de pendiente mantenida. A pesar de ser claramente distintas las respuestas experimentales y computacionales, se pueden identificar un comportamiento **cualitativamente similar**, donde la rigidez del conjunto va disminuyendo. Por razones que cabrían investigar, posiblemente sustentadas en la precariedad de la ejecución de las uniones, la simplicidad del banco de ensayos, el rozamiento con el propio tablero, la imprecisión dimensional del montaje global y posiblemente el incumplimiento de alguna de las hipótesis de cálculo (entre ellas, la suposición de pequeños desplazamientos), no se llega a un movimiento como mecanismo a carga constante, sino que para que siga aumentando el desplazamiento hay que seguir aumentando la carga. Realmente este es el comportamiento teórico que se tendría de haberse considerado el comportamiento real con endurecimiento plástico. De esta manera se podría asemejar el tramo desde los 0,02 m hasta la descarga (a partir de 0,105 m) como un tramo lineal de pendiente positiva, aunque suficientemente pequeña.

En definitiva, aunque el modelo numérico permite capturar la tendencia general del comportamiento estructural, los resultados obtenidos deben interpretarse con cautela, entendiendo que la simplificación de las condiciones reales puede conducir a desviaciones significativas en los resultados.

### 5.3 Ejemplo de verificación

Con la finalidad de corroborar una aproximada caracterización del problema simplificado en SAP2000, se procede a experimentar con dicho software una nueva estructura con una cargas horizontal y vertical. Esta carga se aplicará sobre el pórtico tal y como se muestra en la *Figura 91* con un ángulo de  $30^\circ$ .



*Figura 91. Pórtico a dos aguas sin carga aplicada*

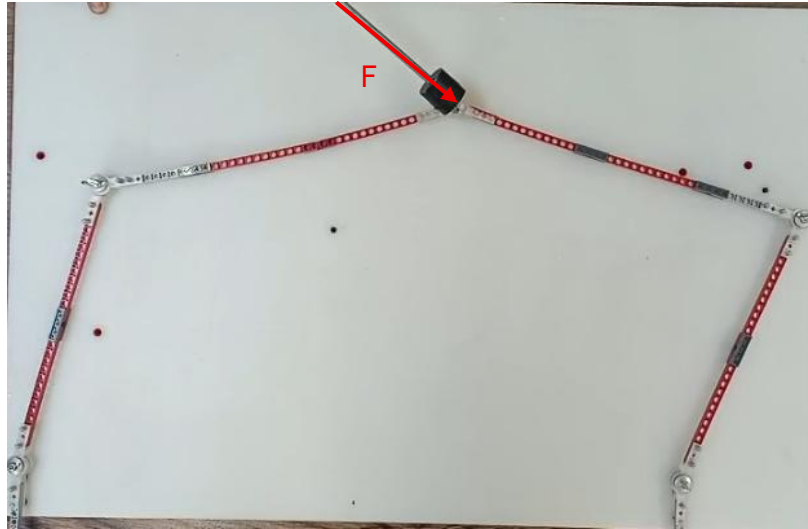


Figura 92. Pórtico a dos aguas con carga aplicada

Una vez impuestas las condiciones del problema se obtienen los resultados mostrados en la *Figura 93* y *Figura 94*, donde se observa una similitud en la deformación y el comportamiento de la estructura, cuya gráfica  $F-\delta$  sigue un patrón similar al de la experimentación con el pórtico simple.

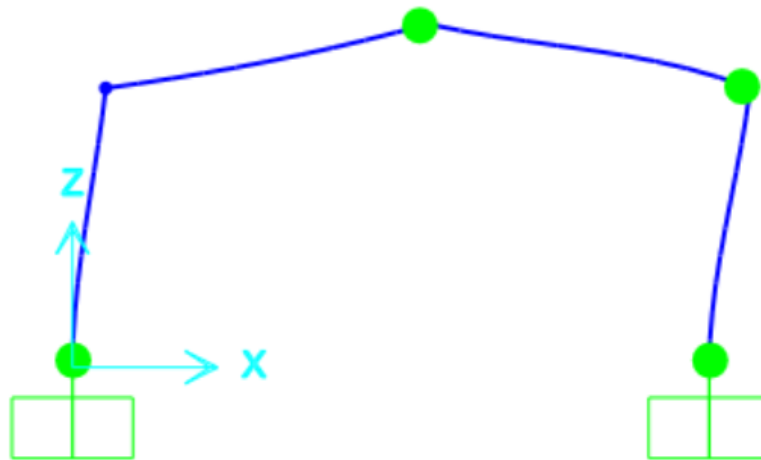


Figura 93. Deformada pórtico 2 aguas SAP2000

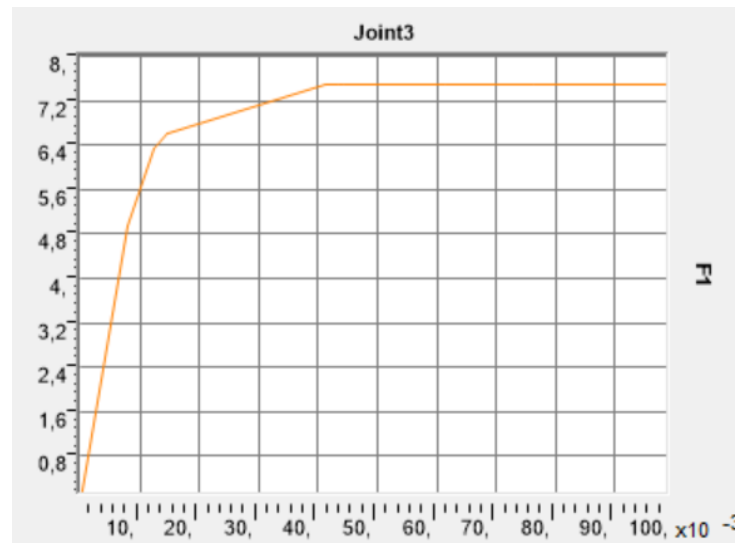


Figura 94. Gráfica F- $\delta$  pórico a 2 aguas SAP2000

Tabla 11. Tabla F- $\delta$  pórico a dos aguas SAP2000

SAP2000 v26.2.0 File: TFG\_PRUEBA\_CARGA\_ANGULO N, m, C Units PAGE 1  
m/d/yy h:mm:ss

Universidad de Valladolid

NON LINEAR STATIC DATA

CASE Carga no lineal  
FUNCTION Joint3: Joint 3 Displacement UX  
FUNCTION F1: Function F1

| STEP | FUNCTION<br>Joint3 | FUNCTION<br>F1 |
|------|--------------------|----------------|
| 0,   | 0,                 | 0,             |
| 1,   | 0,00801            | 4,95751        |
| 2,   | 0,01247            | 6,34829        |
| 3,   | 0,01446            | 6,61638        |
| 4,   | 0,04128            | 7,47736        |
| 5,   | 0,0434             | 7,47736        |
| 6,   | 0,0434             | 7,47739        |
| 7,   | 0,04425            | 7,47739        |
| 8,   | 0,04425            | 7,47741        |
| 9,   | 0,06144            | 7,47741        |
| 10,  | 0,06144            | 7,47742        |
| 11,  | 0,07639            | 7,47742        |
| 12,  | 0,07639            | 7,47744        |
| 13,  | 0.1                | 7.47745        |

Por lo tanto, se puede asegurar que el modelo creado en SAP2000 y la experimentación realizada siguen un patrón similar de comportamiento que, aunque carece de precisión analítica, confirma la validación cualitativa del trabajo y, además, se observa que la curva carga-desplazamiento tiene tres tramos lineales frente a los dos que tenía el experimento simple. Esto se puede comprobar en la *Tabla 11* en la que aparecen cuatro *STEPS* hasta que se llega al colapso total de la estructura. De esta manera se representa con mayor claridad el fenómeno de cálculo plástico.

## Capítulo 6. Conclusiones y Líneas Futuras

### 6.1 Evaluación del rendimiento de la pieza

El diseño desarrollado ha demostrado ser funcional y adecuado para su propósito, el cual era simular el comportamiento de una rótula plástica en estructuras con piezas LEGO. La pieza ha sido capaz de resistir cargas crecientes hasta alcanzar el momento de fricción máximo de manera controlada, permitiendo el giro relativo entre vigas que reproduce, de forma aproximada, el fenómeno de plastificación.

En cuanto al sistema de regulación de la fricción implementado, basado en arandelas metálicas con caucho y un tornillo de apriete, ha permitido ajustar de forma efectiva el momento de fricción máximo. Además, el comportamiento observado en los ensayos ha sido coherente con la experimentación teórica de SAP2000. Sin embargo, no se ha logrado reproducir con exactitud el fenómeno teórico, probablemente debido a ciertos factores experimentales que sería necesario estudiar con mayor profundidad.

### 6.2 Posibles mejoras y optimización del diseño

Aunque los resultados han sido satisfactorios, el trabajo deja margen de mejora en varios aspectos:

- Aumento de la densidad de impresión del elemento para evitar posibles roturas durante el montaje. En algunos casos, se han detectado fallos en la zona de anclaje viga-rótula al insertar o extraer los pines, lo que obligó a reimprimir la pieza. Un incremento en la densidad reduciría este riesgo sin comprometer la funcionalidad.
- Incremento del número de arandelas de apriete, lo que permitiría aumentar la rigidez del conjunto y ampliar el rango de regulación del momento de fricción.
- Diseño de geometrías que reduzcan el efecto “stick-slip”, mediante superficies amortiguadas o acabados que reduzcan la diferencia entre fricción estática y dinámica.

### 6.3 Aplicaciones futuras

El componente diseñado puede aplicarse en varios ámbitos:

- Docencia en cálculo plástico, tal y como se muestra en las clases prácticas de laboratorio de Estructuras y Construcciones Industriales.
- Aplicación en modelos a escala de pórticos a dos aguas y estructuras de mayor complejidad, con fines didácticos orientados a la enseñanza del comportamiento plástico y la redistribución de esfuerzos en uniones estructurales.
- Experimentación con simulación simplificada como introducción al SAP2000.
- Desarrollo de prototipos mecánicos de bajo coste como mecanismos de freno con rotación ajustable.

### 6.4 Conclusión general

Este Trabajo Fin de Grado ha permitido desarrollar, fabricar y validar un mecanismo de unión estructural compatible con piezas LEGO, capaz de simular de forma ajustada el comportamiento de una rótula plástica. Desde la concepción del diseño hasta su análisis numérico y validación experimental, el trabajo ha recorrido todas las etapas del desarrollo de un componente funcional, con un enfoque didáctico, pero también técnico.

El diseño de la pieza se ha centrado en conseguir un momento de fricción regulable que permitiera caracterizar el comportamiento rotacional de la unión, garantizando que el fallo se produzca en la rótula antes que en las piezas comerciales. Gracias al uso de impresión 3D, el elemento ha podido adaptarse fácilmente a las necesidades del sistema, y ha mostrado un rendimiento satisfactorio durante los ensayos. La aplicación del software SAP2000 ha permitido contrastar la evolución estructural del conjunto con los resultados experimentales, identificando tanto coincidencias en la secuencia de colapso como diferencias en las cargas de rotura.

Estas discrepancias han puesto de manifiesto las limitaciones de los modelos numéricos frente a las condiciones reales, especialmente cuando se trabaja con materiales poco resistentes como el PLA o mecanismos basados en fricción. La necesidad de adaptar las propiedades del material en SAP2000, o de considerar simplificaciones geométricas, ha evidenciado la importancia de validar cualquier modelo teórico mediante la experimentación directa.

Más allá del objetivo cumplido, el trabajo ha mostrado que es posible simular comportamientos estructurales complejos a pequeña escala, con medios accesibles, y con resultados suficientemente representativos como para ser

utilizados en la formación en ingeniería. La pieza desarrollada, además de cumplir con los requisitos técnicos, ha abierto la posibilidad de construir mecanismos de análisis estructural versátiles, reproducibles y económicos.

Finalmente, este trabajo refuerza la necesidad de integrar simulación y experimentación en el estudio de sistemas no convencionales, como los que combinan fricción, impresión 3D y estructuras modulares. Este enfoque no solo mejora el aprendizaje, sino que también puede servir como base para futuras líneas de desarrollo orientadas a la docencia, la investigación o incluso el prototipado funcional.

## 6.5 Listado de piezas y costes

Con el objetivo de valorar la viabilidad económica del prototipo desarrollado, a continuación, se presenta un desglose de los componentes utilizados para la fabricación y el montaje de la rótula, así como su coste por unidad.

Este análisis incluye tanto las piezas impresas en 3D como los elementos comerciales empleados (17) (tornillos, arandelas, elementos de fricción...), considerando precios orientativos obtenidos de proveedores estándar o estimaciones realistas para pequeñas cantidades.

Tabla 12. Desglose económico

| MATERIAL UTILIZADO |          |               |                 |
|--------------------|----------|---------------|-----------------|
| Pieza              | Cantidad | Coste ud. (€) | Coste total (€) |
| Technic 32525      | 6        | 0,15          | 0,9             |
| Technic 2316       | 4        | 0,1           | 0,4             |
| Eje 32073          | 20       | 0,02          | 0,4             |
| Plate 3023         | 12       | 0,04          | 0,48            |
| Tornillo M5        | 5        | 0,34          | 1,7             |
| Mariposa           | 5        | 1,1           | 5,5             |
| Arandela           | 5        | 0,1           | 0,5             |
| Cucho              | 5        | 0,1           | 0,5             |
| PLA                | 10       | 0,6           | 6               |
| <b>TOTAL</b>       |          |               | <b>16,38 €</b>  |

### 6.5.1 Costes de horas de trabajo

Además de los materiales utilizados, se ha considerado el coste humano derivado del tiempo dedicado al desarrollo del Trabajo Fin de Grado. Esta estimación se ha realizado tomando como referencia el salario bruto por hora de un ingeniero en formación, de acuerdo con valores orientativos publicados en el BOE y recogidos en contratos formativos actuales.

Para ello, se ha contabilizado el número aproximado de horas invertidas en tareas de diseño, modelado 3D, fabricación, ensayo, análisis de resultados y redacción de la memoria tal y como se muestra en la *Tabla 13*, aplicando dos escenarios: uno conservador (basado en el salario mínimo en prácticas) y otro más representativo del coste real de contratación en un entorno técnico profesional.

*Tabla 13. Planificación temporal del trabajo*

| ACTIVIDAD                             | DURACIÓN (horas) |
|---------------------------------------|------------------|
| ESTUDIO PREVIO                        | 90               |
| Búsqueda y lectura de antecedentes    | 50               |
| Recopilación de información relevante | 30               |
| Reuniones con el tutor                | 10               |
| DISEÑO DE MODELOS                     | 30               |
| Diseño rótula plástica                | 30               |
| FABRICACIÓN                           | 20               |
| Impresión 3D                          | 20               |
| MONTAJE                               | 3                |
| Montaje para la experimentación       | 3                |
| ENSAYO                                | 12               |
| Ensayos mecánicos                     | 12               |
| SIMULACIÓN EN SAP2000                 | 6                |
| Simulación pórticos                   | 6                |
| INFORME FINAL                         | 120              |
| Redacción del trabajo                 | 90               |
| Presentación final del trabajo        | 30               |
| <b>TOTAL</b>                          | <b>281</b>       |

Teniendo en cuenta una jornada laboral completa de 8 horas diarias, lo que supone que 281 horas de trabajo signifiquen 35 días laborales, a 5,15 €/h (18) para ingenieros en formación y 19,62 €/h (19) como coste técnico profesional supone el coste reflejado en la *Tabla 14*.

*Tabla 14. Coste del personal del trabajo*

| COSTE DEL PERSONAL        |                      |           |
|---------------------------|----------------------|-----------|
| Escenarios                | Retribución por hora | TOTAL     |
| Ingeniero en formación    | 5,15 €/h             | 1447,15 € |
| Coste técnico profesional | 19,62 €/h            | 5513,22€  |

Para estimar el coste total se debe sumar el coste material calculado en la *Tabla 12*. Por lo que el trabajo, para los distintos escenarios mencionados anteriormente, supondría un coste de 5529,6 € para el caso de persona técnica profesional y 1463,53 € para el caso de ingeniero en formación.

## Bibliografía

1. Sadurní, J. M. Historia National Geographic. [En línea] 2023.  
[https://historia.nationalgeographic.com.es/a/ole-kirk-christiansen-el-creador-de-lego-el-juego-de-construccion-mas-famoso-del-mundo\\_17770](https://historia.nationalgeographic.com.es/a/ole-kirk-christiansen-el-creador-de-lego-el-juego-de-construccion-mas-famoso-del-mundo_17770).
2. Magdaleno, Álvaro y Lorenzana, Antolín. *Laboratorio de estructuras. Vigabiapoyada, pórtico recto y crujía arriostrada*. Valladolid : s.n.
3. electricbricks. [En línea] <https://www.electricbricks.com/> . [Último acceso: 1 de julio de 2025]
4. Gunt, Hamburg. Rozamiento estático y dinámico. *Equipment for Engineering Education*. [En línea] [Citado el: 26 de junio de 2025.]  
<https://www.gunt.de/es/productos/mecanica-y-diseno-mecanico/estatica/rozamiento-estatico-y-dinamico/glct-1:pa-150:ca-5>.  
[Último acceso: 1 de julio de 2025]
5. Sepulveda, Elba M. Física en Línea. [En línea] 22 de 2 de 2025. [Citado el: 11 de 4 de 2025.] <https://fisicaenlinea.com/2025/02/22/la-friccion-resiste-el-movimiento/>. [Último acceso: 1 de julio de 2025]
6. Herráez, Marta y Romano, F. Diseño de Máquinas, Cálculo y ensayo de elementor de máquinas. Frenos y Embragues. s.l. : Escuela de Ingenierias Industriales. Universidad de Valladolid.
7. Altabey, Wael A. *Fundamentals of Machine Component Design*. s.l. : Elsevier, 2023.
8. Duran, Ángel Guasch. *Módulo de cálculo plástico para programa de cálculo matricial de estructuras* . 2014.
9. Arquitectos, Vórtize. [En línea] [Citado el: 22 de 4 de 2025.]  
<https://www.vortize.com/blog/diagrama-tension-deformacion/>. [Último acceso: 1 de julio de 2025]
10. Carlborg, G. Rus. *Cálculo plástico de estructura de barras*. s.l. : Tercera edición, 2008.
11. Vargort. Productos de caucho. [En línea]  
<https://www.vargort.com/productos/caucho-epdm/arandelas-de-caucho-epdm/>. [Último acceso: 1 de julio de 2025]
12. Carretero, Jesús Alfonso Arozamena. *Diseño y simulación de cartelas para pórticos a escala reducida hechos mediante piezas ensamblables*. Valladolid : s.n., 2024.

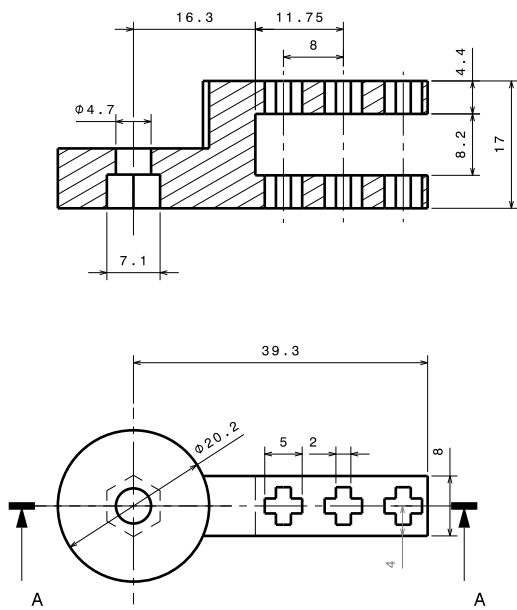
13. DEWESoft. [En línea] <https://dewesoft.com/es/productos/sirius>. [Último acceso: 1 de julio de 2025]
14. *PLA composites: From production to properties*. Dubois, Philippe y Murariu, Marius. s.l. : Advanced drug delivery reviews, 2016, Vol. 107.
15. Ultimaker. *Ficha de datos técnicos - PLA Ultimaker*. 2017.
16. Dassault, Systems. *Dassault Systems*. [En línea] <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/3d-printing#Brick-13c11f03-3933-4895-99d0-08d8dc574715>. [Último acceso: 1 de julio de 2025]
17. stock, Rational. [En línea] <https://www.rationalstock.es/cesta>. [Último acceso: 1 de julio de 2025]
18. SEPE. *SMI*. [En línea] 2025. <https://www.sepe.es>. [Último acceso: 1 de julio de 2025]
19. Alos, Maria José Vivo. *Contratación del estado*. 2025.



## ANEXOS

ANEXO 1. Plano Rótula Plástica

ANEXO 2. Ficha técnica



|                                                     |                         |                                                                                                  |                     |
|-----------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Component Name:<br><b>Rótula</b>                    |                         | Expresión Gráfica en la Ingeniería<br><b>Universidad de Valladolid</b>                           |                     |
|                                                     |                         | DENOMINACIÓN<br>PROTOTIPADO A ESCALA DE UNIONES CON LIMITACIÓN<br>DE MOMENTO Y CAPACIDAD DE GIRO |                     |
| SCALE<br><b>2:1</b>                                 | DATE<br><b>5/6/2025</b> | SIGNATURE<br><i>Trabajo de Fin de Grado</i>                                                      | SHEET<br><b>1/1</b> |
| Apellidos y Nombre:<br><b>EDER CARRERA GONZÁLEZ</b> |                         | Titulación:<br><b>Ingeniería Mecánica</b>                                                        |                     |



Linearità - Isteresi  
 $\leq \pm 0.03\%$   
 Linearity - Hysteresis

FACILE APPLICAZIONE  
 EASY APPLICATION

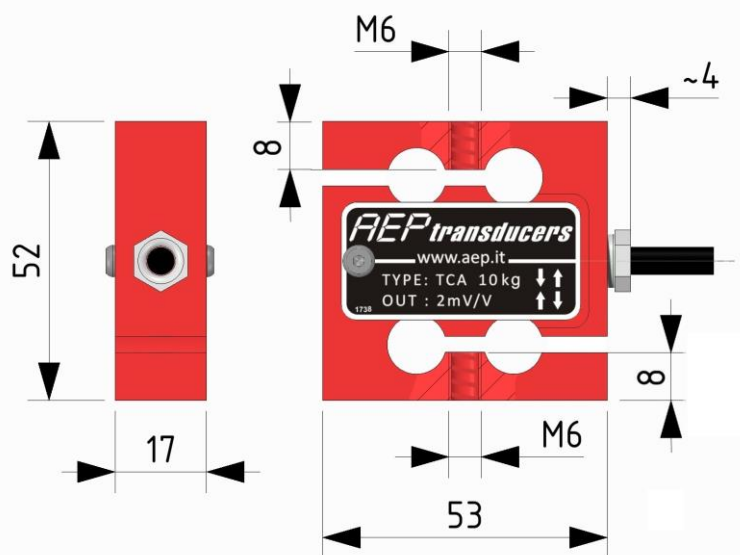
STOP PROTEZIONE CONTRO  
 I SOVRACCARICHI  
 OVERLOAD PROTECTION

Download on [www.aep.it](http://www.aep.it)  
 CE RoHS

Cella di carico estensimetrica in ALLUMINIO per la misura di carichi statici e dinamici in **COMPRESSIONE** e **TRAZIONE**  
 ALUMINUM strain gauges Load cell for the measurement of static and dynamic loads in **COMPRESSION** and **TENSION**

## Dimensioni *Dimensions*

[mm]



| CODICE<br><i>CODE</i> | Carico nominale<br><i>Nominal load</i> | Frequenza naturale<br><i>Natural frequency</i> |
|-----------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|
| CTCA1K5               | 1 kg                                   | ~ 0.22 kHz                                     |
| CTCA2K5               | 2 kg                                   | ~ 0.50 kHz                                     |
| CTCA5K5               | 5 kg                                   | ~ 0.75 kHz                                     |
| CTCA10K5              | 10 kg                                  | ~ 1.00 kHz                                     |
| CTCA25K5              | 25 kg                                  | ~ 1.50 kHz                                     |
| CTCA50K5              | 50 kg                                  | ~ 2.00 kHz                                     |

## Dati Tecnici

## Technical Data



|                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CARICO NOMINALE                                                                                                                                                                                                               | NOMINAL LOAD                                                                                                                                                                                                        | <b>1<sup>(1)</sup> - 2<sup>(1)</sup> - 5<sup>(1)</sup> kg<sup>(2)</sup></b><br><b>10 - 25 - 50 kg<sup>(2)</sup></b> |
| SENSIBILITA' NOMINALE<br>TOLLERANZA DI CALIBRAZIONE                                                                                                                                                                           | NOMINAL SENSITIVITY<br>SENSITIVITY TOLERANCE                                                                                                                                                                        | <b>2 mV/V</b><br>$\leq \pm 0.1\%$                                                                                   |
| EFFETTO TEMPERATURA (10 °C)<br>a) sullo zero<br>b) sulla sensibilità                                                                                                                                                          | TEMPERATURE EFFECT (10 °C)<br>a) on zero<br>b) on sensitivity                                                                                                                                                       | $\leq \pm 0.025\%$<br>$\leq \pm 0.021\%$                                                                            |
| LINEARITA'<br>ISTERESI<br>RIPETIBILITA'                                                                                                                                                                                       | LINEARITY<br>HYSTERESIS<br>REPEATABILITY                                                                                                                                                                            | $\leq \pm 0.03\%$<br>$\leq \pm 0.03\%$<br>$\leq \pm 0.01\%$                                                         |
| RESISTENZA DI INGRESSO<br>RESISTENZA DI USCITA<br>RESISTENZA DI ISOLAMENTO<br>BILANCIAMENTO DI ZERO<br>ALIMENTAZIONE DI RIFERIMENTO<br>ALIMENTAZIONE NOMINALE<br>ALIMENTAZIONE MAX.                                           | INPUT RESISTANCE<br>OUTPUT RESISTANCE<br>INSULATION RESISTANCE<br>ZERO BALANCE<br>RECOMMENDED SUPPLY VOLTAGE<br>NOMINAL SUPPLY VOLTAGE<br>MAXIMUM SUPPLY VOLTAGE                                                    | $440 \pm 20 \Omega$<br>$350 \pm 2 \Omega$<br>$>5 \text{ G}\Omega$<br>$\leq \pm 1\%$<br>10 V<br>1-15 V<br>18 V       |
| VALORI MECCANICI LIMITE RIFERITI AL<br>CARICO NOMINALE:<br>a) carico di servizio<br>b) carico limite<br>c) carico di rottura<br>d) massimo carico trasversale<br>e) carico dinamico limite<br>FRECCIA MAX. AL CARICO NOMINALE | MECHANICAL LIMIT VALUES<br>REFERRED TO NOMINAL LOAD:<br>a) service load<br>b) max permissible load<br>c) breaking load<br>d) max transverse load<br>e) max permissible dynamic load<br>DISPLACEMENT AT NOMINAL LOAD | 120 %<br>150 %<br>>300 %<br>50 %<br>50 %<br>$\sim 0.3 \text{ mm}$                                                   |
| TEMPERATURA DI RIFERIMENTO<br>CAMPO NOMINALE DI TEMPERATURA<br>TEMPERATURA DI ESERCIZIO<br>TEMPERATURA DI STOCCAGGIO                                                                                                          | REFERENCE TEMPERATURE<br>TEMPERATURE NOMINAL RANGE<br>SERVICE TEMPERATURE<br>STORAGE TEMPERATURE                                                                                                                    | +23 °C<br>-10 / +40 °C<br>-20 / +70 °C<br>-20 / +80 °C                                                              |
| PESO<br>CLASSE DI PROTEZIONE (EN 60529)<br>MATERIALE DELLA CELLA<br>LUNGHEZZA CAVO                                                                                                                                            | WEIGHT<br>PROTECTION CLASS (EN 60529)<br>EXECUTION MATERIAL<br>CABLE LENGTH                                                                                                                                         | $\sim 0.3 \text{ kg}$<br>IP20<br>Alluminio / Aluminum<br>3 m                                                        |

<sup>(1)</sup> Complete di protezione contro i sovraccarichi in TRAZIONE e COMPRESSIONE (Max. 500% F.S.).  
Supplied with overload protection TENSION and COMPRESSION (Max. 500% F.S.).

<sup>(2)</sup> A richiesta calibrazioni in N.  
N calibrations on request

## Collegamenti Elettrici Electrical Connections



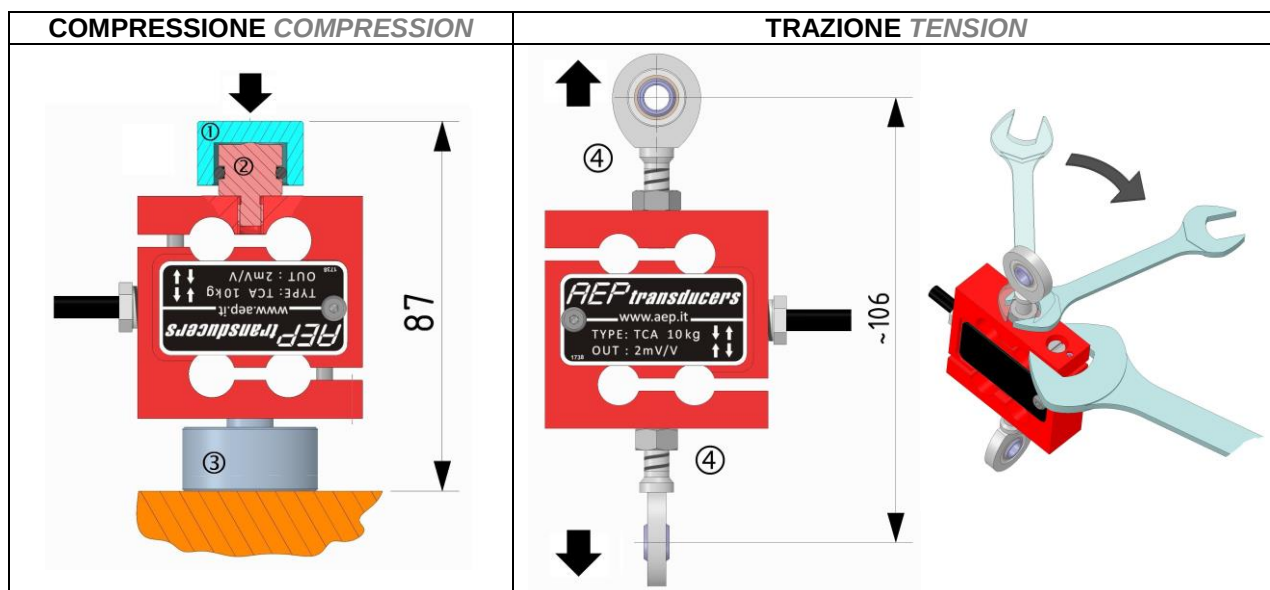
| Load Cell | OUTPUT                                            | CABLE                                                    | CAVO                                                        |
|-----------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|           | EXCITATION+<br>EXCITATION -<br>OUTPUT+<br>OUTPUT- | Red<br>Black<br>White<br>Yellow<br>Shield <sup>(3)</sup> | Rosso<br>Nero<br>Bianco<br>Giallo<br>Schermo <sup>(3)</sup> |

<sup>(3)</sup> Collegato al corpo della cella di carico  
Connected to the body of the load cell.

Cavo schermato PVC 70°C, Ø 4.2mm a 4 conduttori stagnati  
PVC 70°C shielded cable, Ø 4.2mm with 4 tinned conductors.

## Applicazioni

## Applications



**ATTENZIONE**



**WARNING**

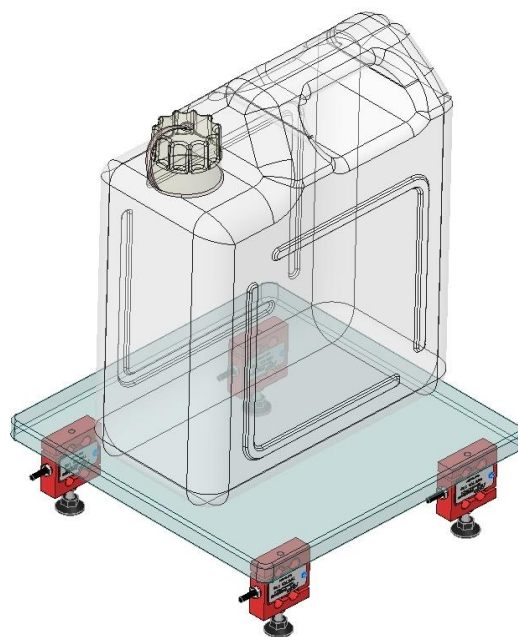
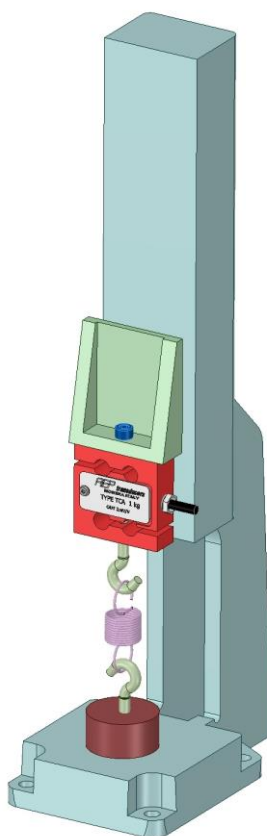
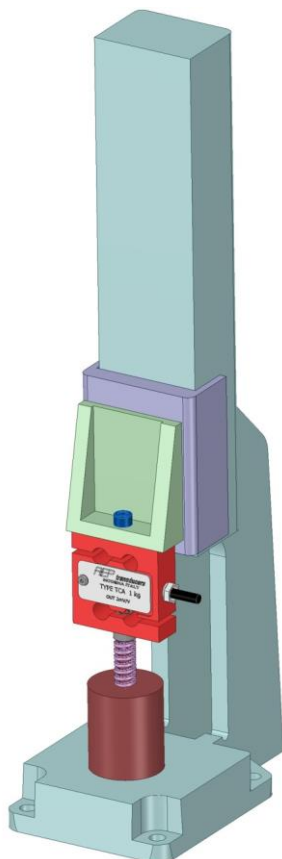


Verificare che la forza generata durante il montaggio degli accessori non superi il carico nominale.

Il peso del cavo può influire sulla misura, è pertanto consigliabile posizionarlo nella zona fissa, dalla parte opposta al carico.

*Be sure that the force exerted when assembling accessories does not exceed nominal load.*

*Cable weight can influence measurement, it is therefore recommended to place it at the opposite site of the load.*



| CODE:   |   | ACCESSORI (opzionali)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | ACCESSORIES (optional)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CTIC13  | ① | Testa di carico.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Loading head.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| CTS18M6 | ② | Testa di carico sferica.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Spherical loading head.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| CBC32M6 | ③ | Base di carico.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Mounting plate.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| CACCEM6 | ④ | Teste a snodo sferico.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Knuckle joints.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| KITCT   | ⑤ | <b>KIT di accessori per eseguire prove in COMPRESSIONE e TRAZIONE sui materiali.</b><br>(A) Gancio per prove a trazione.<br>(B) Prolunga filettata corta.<br>(C) Prolunga filettata lunga.<br>(D) Punta conica per prove a compressione.<br>(E) Punta dentata per prove a compressione.<br>(F) Punta a scalpello per prove a compressione.<br>(G) Punta piana per prove a compressione.<br>(H) Bussola filettata. | <b>Accessory KIT for TENSION and COMPRESSION test of materials.</b><br>(A) Hook for tension test.<br>(B) Short extension threaded.<br>(C) Long extension threaded.<br>(D) Conical tip for compression test.<br>(E) Notched tip for compression test.<br>(F) Chisel tip for compression test.<br>(G) Flat Tip for compression test.<br>(H) threaded sleeve. |

