



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**Caracterización estática de barras para
maquetas de estructuras hechas con
piezas de LEGO ®**

Autor:

García Negro, Laura

Tutores:

**Lorenzana Ibán, Antolín
Magdaleno González, Álvaro**

Departamento de
Construcciones Arquitectónicas.
Ingeniería del Terreno y
Mecánica de los Medios
Continuos y Teoría de
Estructuras

Valladolid, Noviembre y 2023.

Agradecimientos

A mis padres, Henar y Víctor, por brindarme la oportunidad de cursar esta carrera y no dejar que me rindiera, por las montañas rusas de emociones y aguantar mi mal humor cuando salía de la “hura”. Os lo debo todo.

A mis tutores Antolín y Álvaro, por acogerme, enseñarme tanto y darme la posibilidad de disfrutar de los últimos meses como universitaria. Ha sido la guinda a años de esfuerzo.

A Arturo, por estar siempre a mi lado y acompañarme en esta maratón; a pesar de los sacrificios, siempre confiaste. Ahora toca disfrutar.

A mi familia, por las innumerables veces que me he ido antes o no he podido ir. Esos días ya son historia.

A mis amigos, por batallar codo con codo. Pero sobre todo a Tere, por obligarnos mutuamente a seguir adelante, a pesar de querer dejarlo hasta en el último momento; a Lucía, por los podcasts relatando tus vivencias y pensamientos mientras te fumas el cigarro; y a Javi, por esa valentía en perseguir lo que realmente quieres.

Gracias a todos, esto va por vosotros.

Resumen

El trabajo de fin de grado que se expondrá a continuación se basa en la realización de la caracterización de vigas para maquetas de estructuras a través de la utilización de piezas LEGO. Más concretamente las englobadas en la sección *Technic*, debido a su enfoque más complejo y conciso frente a la construcción de estructuras.

El objetivo principal de este estudio es mostrar la capacidad de llevar a cabo, mediante la experimentación y posterior simulación, la obtención de un proceso que permita conocer cuáles serán los desplazamientos generados en la realidad, con un margen de error aceptable, sin tener que llegar a realizar el proceso físicamente.

A mayores, el presente trabajo brinda una oportunidad de enfoque educativo a la hora de aplicar los conceptos teóricos impartidos en las clases de resistencia de materiales y estructuras. De esta manera se realizaría de una forma mucho más visual y atractiva para la comprensión de futuros estudiantes.

Palabras clave: experimentación, simulación, viga biapoyada, Stud.io, SAP2000

Abstract

The end-of-degree that will be presented below is based on beams characterization for structural models through the use of LEGO. More specifically, those included in the Technic section, due to its complexity and concise approach of structures in construction.

The main objective of this study is to show the ability to carrying out, by experimentation and subsequent simulation, the procedure that allows to know what will be the displacements generated in reality, with an acceptable margin of error, without the need of physically perform the process.

In addition, this work represents an opportunity of a didactic approach when applying thoretical concept taught in the material resistance and structure classes. In this way, it would be carried out in a more visual and attractive way for the understanding of future students.

Key words: experimentation, simulation, double supported beam, Stud.io, SAP2000.

Índice

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Objetivos.....	6
1.2.1. Objetivos técnicos.....	6
1.2.2. Objetivos formativos.....	7
Capítulo 2. Marco teórico.....	9
Capítulo 3. Diseño de experimentos.....	13
3.1. Ensayos.....	13
3.2. Planteamiento.....	14
3.3. Aparatos de medida.....	19
Capítulo 4. Experimentación.....	25
4.1. Vertical.....	25
4.2. Horizontal.....	37
Capítulo 5. Tratamiento de datos.....	47
5.1. Caso horizontal.....	49
5.2. Caso vertical.....	51
Capítulo 6. Simulación.....	53
6.1. Viga mixta horizontal.....	53
6.2. Viga mixta vertical.....	64
6.3. Viga con seis cargas puntuales horizontal.....	65
6.4. Viga con seis cargas puntuales vertical.....	73
Capítulo 7. Resultados.....	75
Capítulo 8. Conclusiones y líneas futuras.....	79
8.1. Conclusiones.....	79
8.2. Consideraciones adicionales.....	79
8.3. Líneas futuras.....	80
8.4. Listado de piezas y costes.....	82
Referencias.....	89
Anexo I.....	91

Tabla de figuras

Figura 1. Medidas estándar bloques LEGO [1]	1
Figura 2. Máquina de inyección de molde de LEGO, empresa Arburg [1].....	2
Figura 3. Kit Expert Builder [2]	2
Figura 4. Guía Technic [3].....	2
Figura 5. Kit Liebherr LR 13000 [4].....	3
Figura 6. Características del bloque LEGO [5].....	4
Figura 7. Características del ABS en LEGO [6]	5
Figura 8. Etapas del método científico [8].....	8
Figura 9. Nave industrial en CYPE3D [10]	9
Figura 10. Modelo estructura edificio [11]	9
Figura 11. Modelo digital de una nave [12]	9
Figura 12. Carga puntual F centrada [13]	10
Figura 13. Carga puntual F genérica [13].....	11
Figura 14. Cargas puntuales F distribuidas.....	11
Figura 15. Vigas a utilizar en los ensayos.....	13
Figura 16. Apoyo para viga horizontal.....	14
Figura 17. Representación en Stud.io de los apoyos	15
Figura 18. Piezas a utilizar en los apoyos.....	15
Figura 19. Piezas a utilizar en las vigas	16
Figura 20. Pesaje de las diferentes masas a acoplar.....	17
Figura 21. Piezas para la colocación de los pesos	18
Figura 22. Ensamblaje soporte vertical	18
Figura 23. Ensamblaje soporte horizontal.....	18
Figura 24. Piezas pesos cargas puntuales	19
Figura 25. Ensamblaje piezas pesos puntuales.....	19
Figura 26. Sistema de adquisición de datos Sirius y software Dewesoft.....	20
Figura 27. Tecnología DualCoreADC Amplificador [16]	20
Figura 28. Módulo SIRIUS [16].....	21
Figura 29. Características de SIRIUS [16]	21
Figura 30. Software de adquisición de datos DewesoftX [17]	21
Figura 31. Panel de DewesoftX	22
Figura 32. Panasonic HL-G112-A-C5 [18]	22
Figura 33. Emplazamiento láser Panasonic	23
Figura 34. Características láser Panasonic [19]	23
Figura 35. Ensayo viga 5V.....	25
Figura 36. Renderizado Stud.io viga 5V.....	25
Figura 37. Gráfica viga 5V.....	27
Figura 38. Ensayo viga 7V.....	28
Figura 39. Renderizado Stud.io viga 7V.....	28
Figura 40. Gráfica viga 7V.....	28
Figura 41. Ensayo viga 9V.....	29
Figura 42. Renderizado Stud.io viga 9V.....	29
Figura 43. Gráfica viga 9V.....	30

Figura 44. Ensayo viga 11V.....	30
Figura 45. Renderizado Stud.io viga 11V.....	31
Figura 46. Gráfica viga 11V.....	31
Figura 47. Ensayo viga 13V.....	32
Figura 48. Renderizado Stud.io viga 13V.....	32
Figura 49. Gráfica viga 13V.....	32
Figura 50. Ensayo viga 15V.....	33
Figura 51. Renderizado Stud.io viga 15V.....	33
Figura 52. Gráfica viga 15V.....	34
Figura 53. Ensayo viga mV.....	34
Figura 54. Renderizado Stud.io viga mV.....	35
Figura 55. Gráfica viga mV.....	35
Figura 56. Ensayo viga dV.....	36
Figura 57. Renderizado Stud.io viga dV.....	36
Figura 58. Gráfica viga dV.....	36
Figura 59. Ensayo viga 5H.....	37
Figura 60. Renderizado Stud.io viga 5H.....	37
Figura 61. Gráfica viga 5H.....	38
Figura 62. Ensayo viga 7H.....	38
Figura 63. Renderizado Stud.io viga 7H.....	39
Figura 64. Gráfica viga 7H.....	39
Figura 65. Ensayo viga 9H.....	40
Figura 66. Renderizado Stud.io viga 9H.....	40
Figura 67. Gráfica viga 9H.....	40
Figura 68. Ensayo viga 11H.....	41
Figura 69. Renderizado Stud.io viga 11H.....	41
Figura 70. Gráfica viga 11H.....	41
Figura 71. Ensayo viga 13H.....	42
Figura 72. Renderizado Stud.io viga 13H.....	42
Figura 73. Gráfica viga 13H.....	42
Figura 74. Ensayo viga 15H.....	43
Figura 75. Renderizado Stud.io viga 15H.....	43
Figura 76. Gráfica viga 15H.....	43
Figura 77. Ensayo viga mH.....	44
Figura 78. Renderizado Stud.io viga mH.....	44
Figura 79. Gráfica viga mH.....	44
Figura 80. Ensayo viga dH.....	45
Figura 81. Renderizado Stud.io viga dH.....	45
Figura 82. Gráfica viga dH.....	45
Figura 83. Gráfica relación áreas con ratio C/L.....	48
Figura 84. Fallo unión conectores debido a carga.....	49
Figura 85. Gráfica recta de regresión rigidez casos horizontales.....	50
Figura 86. Gráfica recta de regresión rigidez casos verticales.....	51
Figura 87. Tipo de modelo a utilizar.....	54
Figura 88. Disposición de la cuadrícula mH.....	55

Figura 89. Sistema utilizado	55
Figura 90. Datos definidos de la cuadrícula del sistema mH	56
Figura 91. Disposición de la viga mH.....	56
Figura 92. Añadir propiedades del material	57
Figura 93 Datos de propiedades del ABS.....	57
Figura 94. Propiedades de la viga mH	58
Figura 95. Sección de la viga mH.....	59
Figura 96. Trazado de la geometría mH	59
Figura 97. Implementación del apoyo izquierdo fijo en mH.....	60
Figura 98. Implementación del apoyo derecho móvil en mH.....	60
Figura 99. Generación de cargas en mH	61
Figura 100. Asignación de cargas en mH.....	61
Figura 101. Ejemplo de 1 carga implementada.....	62
Figura 102. Opciones de análisis	62
Figura 103. Establecer las cargas a ejecutar en mH.....	63
Figura 104. Deformada generada en primera instancia	63
Figura 105. Establecimiento de la carga a mostrar en mH.....	63
Figura 106. Deformada generada por la acción de dos cargas centrales	64
Figura 107. Propiedades de la viga mV	65
Figura 108. Disposición de la cuadrícula dH.....	66
Figura 109. Datos definidos de la cuadrícula del sistema dH	67
Figura 110. Disposición de la viga dH	67
Figura 111. Propiedades de la viga dH.....	68
Figura 112. Sección de la viga dH.....	68
Figura 113. Trazado de la geometría dH	69
Figura 114. Implementación del apoyo izquierdo fijo en dH.....	69
Figura 115. Implementación del apoyo derecho móvil en dH	69
Figura 116. Generación de cargas en dH.....	70
Figura 117. Asignación de cargas en dH	70
Figura 118. Implementación de 4 cargas puntuales distribuidas.....	71
Figura 119. Representación de 4 cargas puntuales distribuidas.....	71
Figura 120. Establecer las cargas a ejecutar en dH.....	72
Figura 121. Establecimiento de la carga a mostrar en dH.....	72
Figura 122. Deformada generada por la acción de 6 cargas puntuales distribuidas	73
Figura 123. Propiedades de la viga dV	74
Figura 124. Viga Technic 4 x 6 en 45°.....	80
Figura 125. Viga Technic 1 x 11.5 doble codo.....	81
Figura 126. Viga Technic 3 x 5 en L.....	81
Figura 127. Nave industrial formada por pórticos	82
Figura 128. Piezas que constituyen los apoyos	83
Figura 129. Piezas que constituyen el soporte de los pesos	84
Figura 130. Piezas que constituyen las vigas	85
Figura 131. Piezas que constituyen el soporte de los pesos para cargas puntuales	86

Figura 132. Software SAP2000	91
Figura 133. Software Stud.io	92

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades físico-mecánicas del ABS en LEGO [7]	5
Tabla 2. Descripción de las propiedades del ABS en LEGO [7]	6
Tabla 3. Representación toma de datos viga 5V	26
Tabla 4. Valores promedio viga 5V	27
Tabla 5. Resultados viga 5V	27
Tabla 6. Resultados viga 7V	29
Tabla 7. Resultados viga 9V	30
Tabla 8. Resultados viga 11V	31
Tabla 9. Resultados viga 13V	33
Tabla 10. Resultados viga 15V	34
Tabla 11. Resultados viga mV	35
Tabla 12. Resultados viga dV	37
Tabla 13. Resultados viga 5H	38
Tabla 14. Resultados viga 7H	39
Tabla 15. Resultados viga 9H	40
Tabla 16. Resultados viga 11H	41
Tabla 17. Resultados viga 13H	42
Tabla 18. Resultados viga 15H	43
Tabla 19. Resultados viga mH	44
Tabla 20. Resultados viga dH	45
Tabla 21. Valores y ratios de las diferentes vigas	47
Tabla 22. Representación comando obtención área promedio	48
Tabla 23. Áreas promedio de las vigas	48
Tabla 24. Análisis datos vigas horizontales	49
Tabla 25. Errores generados entre rigidez real y de recta de regresión para vigas horizontales	50
Tabla 26. Análisis datos vigas verticales	51
Tabla 27. Errores generados entre rigidez real y de recta de regresión para vigas verticales	52
Tabla 28. Desplazamientos generados en la viga mH por diferentes cargas ..	64
Tabla 29. Desplazamientos generados en la viga mV por diferentes cargas ..	65
Tabla 30. Desplazamientos generados en la viga dH por diferentes cargas ..	73
Tabla 31. Desplazamientos generados en la viga dV por diferentes cargas ..	74
Tabla 32. Resultados viga mH experimentación frente a simulación	75
Tabla 33. Resultados viga mV experimentación frente a simulación	75
Tabla 34. Resultados viga dH experimentación frente a simulación	76
Tabla 35. Resultados viga dV experimentación frente a simulación	76
Tabla 36. Comparación viga dH parte experimental, simulada y prontuario ..	77
Tabla 37. Comparación viga dV parte experimental, simulada y prontuario ..	78
Tabla 38. Desglose económico apoyos	83
Tabla 39. Desglose económico soporte pesos	84
Tabla 40. Desglose económico de las vigas	85

Tabla 41. Desglose económico de los soportes para pesos para cargas puntuales.....	85
Tabla 42. Desglose económico total de piezas	87
Tabla 43. Desglose total estimado por pieza.....	88

Capítulo 1. Introducción.

1.1. Antecedentes.

Seguramente hubo un momento en la vida, cuando se es pequeño, que los descubrimientos mediante las nuevas tecnologías, los juguetes de montaje y construcción hizo querer hacer más, ver hasta dónde podía llegar la imaginación de una persona y plasmarla en la realidad.

Uno de esos tantos juguetes era Lego, con el cual se podía crear rascacielos, muros, naves... Dicha aventura tuvo sus inicios el 10 de agosto de 1932 gracias a la labor de Ole Kirk Christiansen, en Dinamarca. Inicialmente se utilizaba la madera como materia prima, ya que esta resultaba barata y fácil de mecanizar.

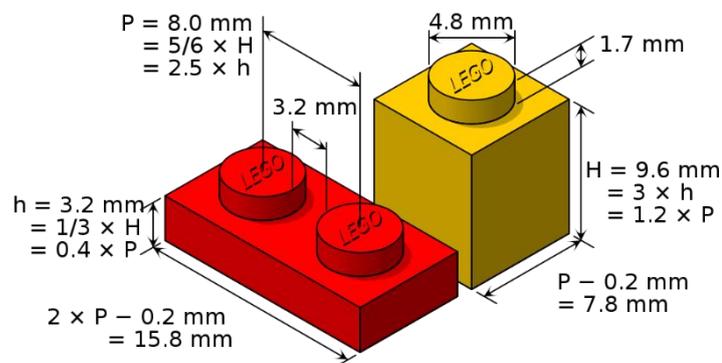


Figura 1. Medidas estándar bloques LEGO [1]

El origen del nombre de LEGO procede el acrónimo danés “*leg godt*” que significa “jugar bien”. Fue cuando en 1947 se dio el salto a utilizar plástico como materia prima, con unas medidas estipuladas como las mostradas en la figura 1. Para conseguir dichos bloques es necesario la utilización de moldeadoras por inyección como la mostrada en la figura 2. Ya que así su creación era más rápida, su durabilidad mayor, a la vez que la rentabilidad a la hora de fabricarlo aumentaba. Este moldeo se realiza mediante ingeniería de diseño, utilizando *software* de NX CAD/CAM/CAE PLM.



Figura 2. Máquina de inyección de molde de LEGO, empresa Arburg [1]

Pero, conforme los años pasaban, los elementos de los que se componían se quedaban cortos. Así que, ¿por qué quedarse ahí? Fue por ello que en 1977 nació “Expert Builder”, representado en la figura 3, que en 1984 dio paso a “Technic”, mostrado en la figura 4.



Figura 3. Kit Expert Builder [2]



Figura 4. Guía Technic [3]

Conforme pasaban los años ha ido evolucionando de forma exponencial, llegando al nivel educacional. Permitiendo desde cortas edades mostrar estructuras complejas, aunque todas ellas tienen estipulado una edad mínima de utilización dependiendo de sus componentes y dificultad, como el kit presentado en la figura 5, que no es ni nada menos que una grúa sobre orugas Liebherr LR 13000, la cual está compuesta por 2883 piezas y que, debido a lo mencionado anteriormente, está dirigida a un público de más de 18 años de edad.



Figura 5. Kit Liebherr LR 13000 [4]

A mayores, el nivel de prestaciones sigue aumentando, llegando incluso a la universidad. Es por ello que en el entorno de la ingeniería se ha fomentado su uso, puesto que, de una forma muy sencilla, se ha conseguido plasmar a un nivel más visual y entretenido el comportamiento estructural de cerchas y pórticos.

Dada su resistencia a impactos y tenacidad, siendo bastante duro y rígido, con resistencia química aceptable, baja absorción de agua y alta resistencia a la abrasión, el uso del ABS en las piezas de LEGO resulta muy interesante. El motivo por el que se llegó a la utilización de este polímero no es ni más ni menos que por su composición, como bien se explica detenidamente en la figura 6:

- A) Acrilonitrilo: líquido sintético incoloro, da resistencia a los bloques.
- B) Butadieno: gas incoloro, otorga resiliencia, es decir, evita que se rompan fácilmente los bloques.
- S) Estireno: hidrocarburo aromático líquido amarillo e incoloro que se evapora fácilmente, otorga una superficie brillante y dura a los bloques de LEGO.

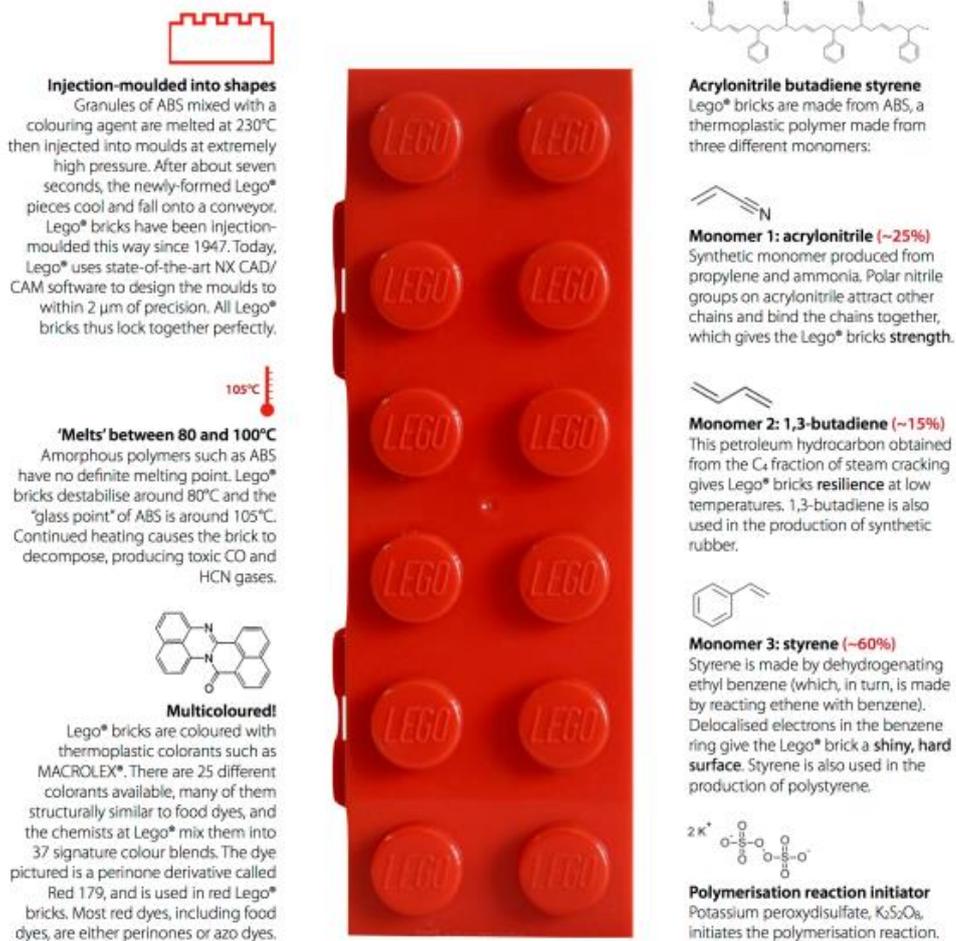


Figura 6. Características del bloque LEGO [5]

Mostrándose de una forma intuitiva la representación mediante equivalencias respecto a otros materiales, haciendo modelos a escala, es plausible recrear escenarios de una manera más didáctica y visual de estructuras industriales. Teniendo en cuenta que el ABS posee las siguientes características en cuanto a su implementación en las estructuras de LEGO, mostradas en las figuras 7 y las tablas 1 y 2:

ABS		Acrilonitrilo Butadieno Estireno	
Procesamiento			
Relación L/D	-	16/1 - 20/1	
Relación de compresión	-	2.5:1 - 3.5:1	
Secado	-	SI	
Temperatura de secado	°C	80	
Tiempo de secado	hora	3	
Nivel máximo de humedad	%	0.01 - 0.15	
Temperatura de zona frontal	°C	220 - 250	
Tiempo de residencia	min	10	
Temperatura de molde	°C	40 - 75	
Temperatura de desmoldeo	°C	80	
Velocidad tangencial	m/s	0.6	
Contrapresión	-	MEDIA	
Presión de inyección	bar	1000 - 1500	
Propiedades			
Densidad	g/cm ³	1.06	
Densidad aparente	kg/l	0.63	
Densidad en fundido	g/cm ³	0.90	
Absorción de humedad	%	0.31	
Contracción de moldeo	%	0.7	
Módulo de flexión	GPa	2.8	
Resistencia al impacto Izod	J/cm	4.1	
Temperatura tg	°C	110	
Temperatura de fusión	°C	-	
HDT	°C	97	

Figura 7. Características del ABS en LEGO [6]

Propiedades Físico - Mecánicas Physical & Mechanical Properties	
<u>Alargamiento a la Rotura (%)</u> <i>Elongation at break (%)</i>	45
<u>Coefficient de Fricción</u> <i>Coefficient of friction</i>	0,5
<u>Módulo de Tracción (GPa)</u> <i>Tensile modulus (GPa)</i>	2,1-2,4
<u>Resistencia a la Tracción (MPa)</u> <i>Tensile strength (MPa)</i>	41-45
<u>Resistencia al Impacto Izod (J m⁻¹)</u> <i>Izod impact strength (J m⁻¹)</i>	200-400
<u>Absorción de Agua - en 24 horas (%)</u> <i>Water absorption - over 24 hours (%)</i>	0.3-0.7
<u>Densidad (g cm⁻³)</u> <i>Density (g cm⁻³)</i>	1,05
<u>Resistencia a la Radiación</u> <i>Radiation resistance</i>	Aceptable <i>Fair</i>
<u>Resistencia a los Ultra-violetas</u> <i>Resistance to Ultra-violet</i>	Mala <i>Poor</i>

Tabla 1. Propiedades físico-mecánicas del ABS en LEGO [7]

Resistencia a la abrasión	Alta
Permeabilidad	Todos los grados son considerados impermeables al agua, pero ligeramente permeables al vapor.
Propiedades relativas a la fricción	No los degradan los aceites son recomendables para cojinetes sometidos a cargas y velocidades moderadas
Estabilidad dimensional	Es una de las características más sobresalientes, lo que permite emplearla en partes de tolerancia dimensional cerrada. La baja capacidad de absorción de la resina y su resistencia a los fluidos fríos, contribuyen a su estabilidad dimensional
Pigmentación	La mayoría de estas resinas, están disponibles en colores estándar sobre pedido, se pueden pigmentar aunque requieren equipo especial.
Facilidad de unión	Se unen fácilmente entre sí y con materiales plásticos de otros grupos mediante cementos y adhesivos
Cap. de absorción	Baja
Propiedades ambientales	La exposición prolongada al sol produce una capa delgada quebradiza, causando un cambio de color y reduciendo el brillo de la superficie y la resistencia a la flexión. La pigmentación en negro provee mayor resistencia a la intemperie
Resistencia química	Generalmente buena aunque depende del grado de la resina, de la concentración química, temperatura y esfuerzos sobre las partes. En general no son afectadas por el agua, sales inorgánicas, álcalis y por muchos ácidos. Son solubles en ésteres, acetona, aldehídos y en algunos hidrocarburos clorados
Formado	Se adaptan bien a las operaciones secundarias de formado. Cuando se calientan, los perfiles extruidos, se pueden doblar y estampar.
Facilidad de maquinado	Sus características son similares a las de los metales no ferrosos, se pueden barrenar, fresar, torneear, aserrar y troquelar
Acabados superficiales	Pueden ser acabados mediante metalizado al vacío y electro plateado
Resistencia a la fatiga	Se presenta para cargas cíclicas o permanentes mayores a 0.7 Kg mm ²
Recocida	Se mantiene 5° C arriba de la <u>Temp.</u> de distorsión durante 2 a 4 h.

Tabla 2. Descripción de las propiedades del ABS en LEGO [7]

1.2. Objetivos.

Para este trabajo de fin de grado se han establecido dos objetivos que se van a resumir, para una mejor descripción, en objetivos técnicos y objetivos formativos.

1.2.1. Objetivos técnicos.

Los objetivos técnicos de este trabajo comienzan por la realización de una batería de ensayos para determinar la flecha, siendo esta una respuesta

estática, de una viga biapoyada. Esta viga estará compuesta por piezas LEGO, la cual estará sometida a diversas condiciones de carga.

La ilustración de estos ensayos se realizará recurriendo a un software específico de modelado sólido, en este caso se trabajará con el programa SAP2000, ya que muestra las características necesarias para la realización de este trabajo de fin de grado.

Una vez realizados estos ensayos, se procederá a la parametrización de la viga en función de sus componentes. A la hora de establecer un marco común para todas ellas, este se representa a través de la relación entre el número de conectores y la longitud entre apoyos presentada. Es decir, se caracteriza la respuesta estática con respecto a estos parámetros de interés.

Para esta caracterización será necesario determinar las propiedades estáticas de la sección equivalente, dichas propiedades a calcular serán las áreas y las inercias. Se realizará mediante un supuesto de homogeneidad y sabiendo que el material a utilizar tiene las propiedades nominales del ABS.

Se deberá comprobar la validez de la caracterización realizada, comprobando los errores generados respecto a las condiciones ensayadas mediante los datos obtenidos a través de su simulación.

1.2.2. Objetivos formativos.

El presente trabajo de fin de grado establece unos objetivos formativos, afianzando los conocimientos adquiridos de ciencia de materiales, resistencia de materiales, estructuras, ensayos y tratamiento de datos. Estos conocimientos se han alcanzado a través de asignaturas como ciencia de los materiales, resistencia de materiales y elasticidad, resistencia y estructuras.

La base para el tratamiento de datos se establece mediante el diseño de los experimentos necesarios para tener un cómputo significativo de resultados. Estos experimentos se establecen mediante la ejecución de diversos escenarios de vigas, orientaciones y cargas. Para los escenarios se optará por diseñar las vigas con una cantidad diferente de conectores, además de diferentes piezas viga de LEGO *Technic*. En cuanto a las orientaciones bastará con dos modos, siendo el horizontal el que presenta los conectores paralelos al suelo y el vertical el que los tiene perpendiculares al mismo. En cuanto a las cargas, principalmente se establecerá unas cargas centrales; pero se observará que los ensayos son válidos para cargas puntuales distribuidas en cualquier posición.

Para estos datos se precisa aplicar el método científico, para ser exactos el trabajo se ciñe en la técnica cuantitativa debido a la recolección de datos que prueben la hipótesis planeada. Este método seguirá las siguientes etapas, representadas en la figura 8:

- **Definición y planteamiento del problema:** establecer la posibilidad de la caracterización estática de barras para maquetas para estructuras hechas con piezas LEGO.
- **Formulación de la hipótesis:** a través de las propiedades estáticas de la sección y de los componentes de las vigas, establecer una relación que permita obtener valores mediante simulación que apenas difieran de los obtenidos experimentalmente.
- **Recogida y análisis de datos:** se vuelcan los datos en tablas Excel donde estos serán estudiados.
- **Confrontación de los datos con la hipótesis.**
- **Conclusiones y generalización de los resultados:** confirmación de la hipótesis a través de la simulación de la formulación de la caracterización.
- **Nuevas predicciones.**

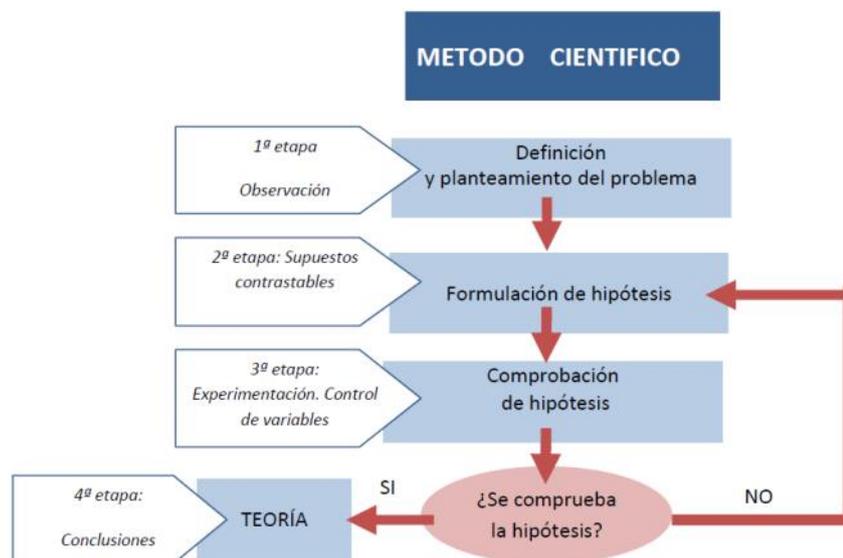


Figura 8. Etapas del método científico [8]

Capítulo 2. Marco teórico.

La ingeniería estructural se sustenta en modelos matemáticos simplificados que permitan estimar, con suficiente grado de precisión y con bajo esfuerzo computacional, el comportamiento tenso-deformacional de sólidos como vigas, pilares, placas, láminas o elementos de cimentación, tanto de forma aislada como combinados entre ellos formando tipologías estructurales reconocibles como puentes, bastidores de maquinaria, depósitos o edificios. Uno de los modelos más útiles y extendidos es el de "barra" [9] con el que se construyen pórticos, naves industriales o edificaciones como las mostradas en las figuras 9 y 10.

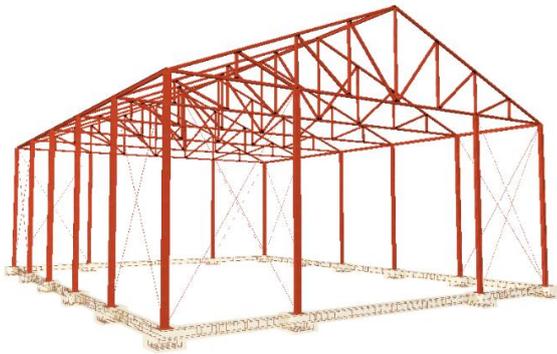


Figura 9. Nave industrial en CYPE3D [10]

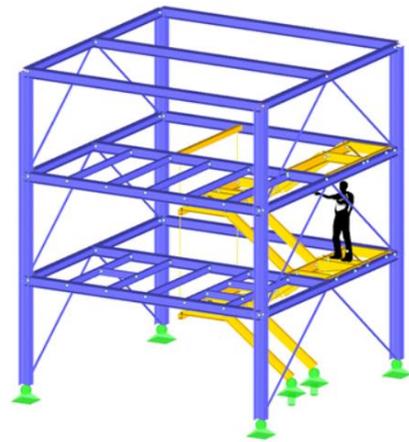


Figura 10. Modelo estructura edificio [11]

También, con objetivos docentes, se pueden construir maquetas a escala, como la mostrada en la figura 11.



Figura 11. Modelo digital de una nave [12]

Para la estimación de las tensiones y los desplazamientos bajo condiciones simples de carga es usual recurrir a formularios, tablas o prontuarios. En la figura 12 se muestra la respuesta del caso trivial de viga biapoyada con carga puntual central, usado en la batería de ensayos de caracterización.

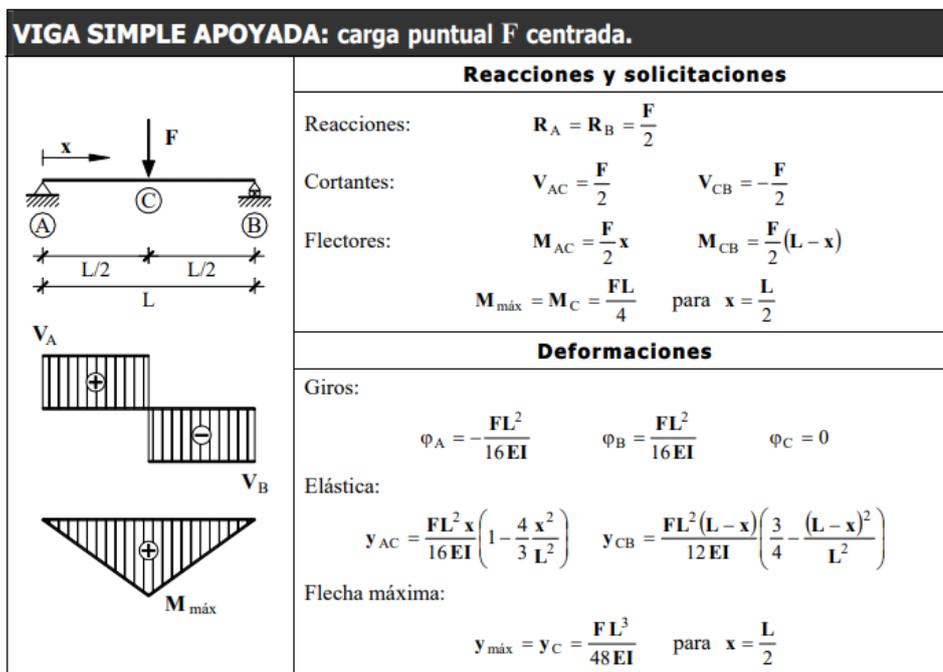


Figura 12. Carga puntual F centrada [13]

Concretamente, para dicha caracterización, se usará la expresión de la fórmula 1, mostrada a continuación. Con ella se determina la rigidez ($48EI/L^3$) para cada escenario, de donde poder obtener la inercia en el eje de flexión considerado.

$$\delta = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (1)$$

Una vez caracterizada la viga en función de las piezas que la componen, se podrá comprobar si el modelo se adapta a otras condiciones de carga; como, por ejemplo, varias cargas puntuales. Partiendo de la solución mostrada en la figura 13 y aplicando el principio de superposición, se podría obtener el desplazamiento del punto central para el caso de 6 cargas puntuales, mostrado en la figura 14, con sus respectivas cotas, ya que estas serán utilizadas a continuación para calcular la fórmula que permita obtener la flecha generada en el punto central.

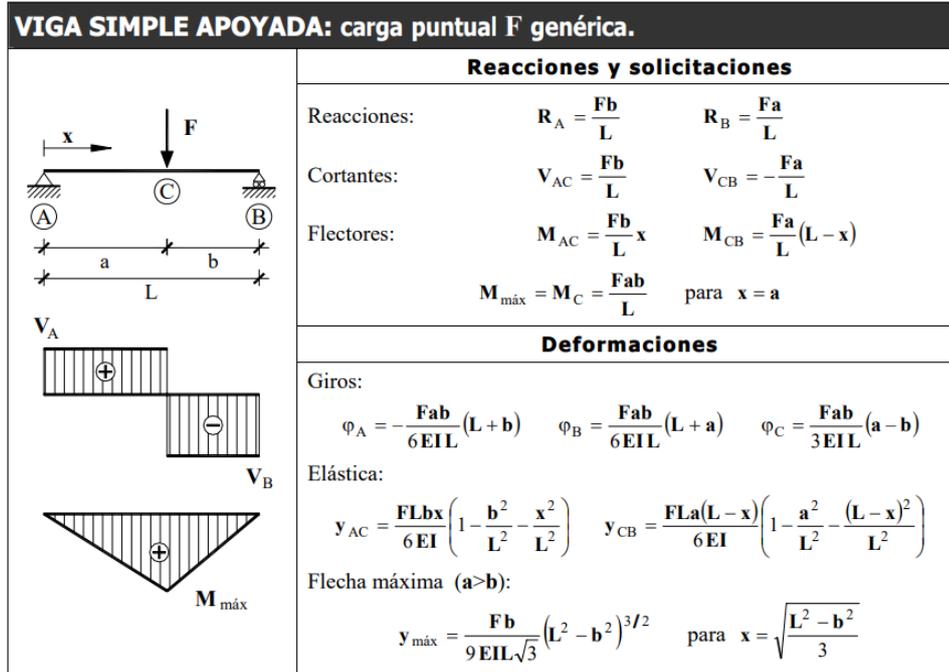


Figura 13. Carga puntual F genérica [13]

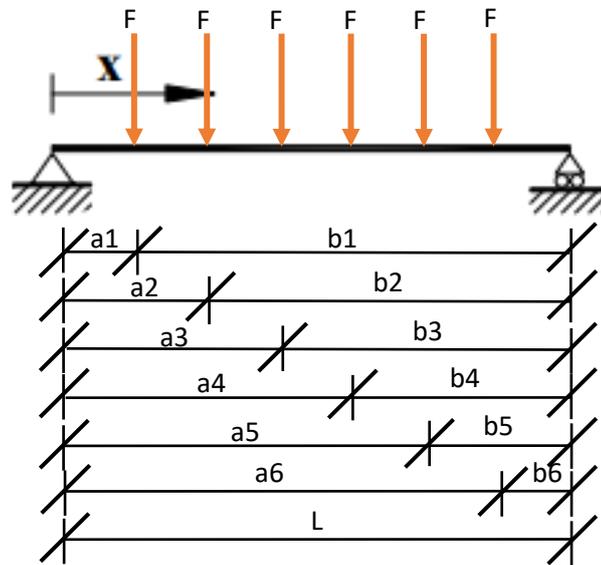


Figura 14. Cargas puntuales F distribuidas

Vistas las figuras, esta situación generaría un desplazamiento del punto central cuya fórmula 2 sería la siguiente:

$$\begin{aligned}
 d = \frac{F \cdot L^2}{6 \cdot E \cdot I} \cdot & \left((L - b_4) \cdot \left(\frac{3}{4} - \frac{(L - b_4)^2}{L^2} \right) + (L - b_5) \cdot \left(\frac{3}{4} - \frac{(L - b_5)^2}{L^2} \right) \right. \\
 & \left. + (L - b_6) \cdot \left(\frac{3}{4} - \frac{(L - b_6)^2}{L^2} \right) \right) \quad (2)
 \end{aligned}$$

Para la obtención de esta fórmula no ha sido más que necesario el considerar en el prontuario para Y_{CB} que $a=L-b$ y evaluar la delta en $x=L/2$. Hay que tener en cuenta que en el denominador se presenta el valor 6 y no 12, como el prontuario indica, porque se han doblado los tres sumandos presentados dentro del paréntesis, ya que debido a la simetría presentada por las cargas el valor generado por la de la derecha del todo será igual al de la primera a la izquierda, y así sucesivamente. Esto será necesario tenerlo en cuenta para futuros cálculos y comprobaciones.

Capítulo 3. Diseño de experimentos.

Los registros experimentales se llevarán a cabo mediante técnicas instrumentales basadas en registros de desplazamientos mediante sensores láser. Lo que permitirá obtener las destrezas que implican la recopilación de datos según sea su requerimiento.

La recopilación de datos se procesará mediante el uso eficiente de hojas de cálculo. Volcando los datos obtenidos para cada caso y elaborando las fórmulas que sean necesarias para lograr las respuestas solicitadas.

3.1. Ensayos.

La realización de un modelo lineal de los escenarios que sean posibles a través del *software* de simulación será la clave para conseguir los objetivos de este trabajo de fin de grado. Para ello se dispondrá de una recapitulación de datos experimentales, los cuales se realizarán a través de las vigas mostradas en la figura 15:

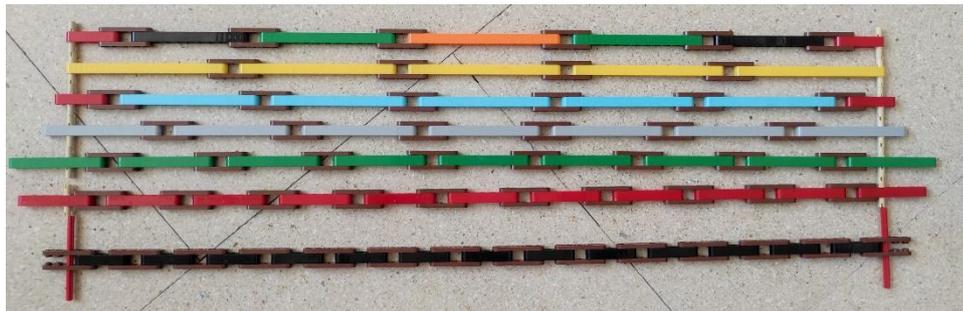


Figura 15. Vigas a utilizar en los ensayos

Esta figura 15 representa, de abajo a arriba, los ensayos que se procederán a realizar. Arriba del todo, se muestra una viga mixta, cuya composición resultará útil para justificar, más adelante, por qué se adapta, y por qué se adaptará el modelo, ante otras situaciones de carga de situación no central. Es decir, se procederá a la caracterización de distintas combinaciones de vigas y conectores, gracias a los cuales se podrá ejecutar cualquier otra combinación entre vigas y conectores, o cargas en otros puntos.

Todas ellas, como es perfectamente visible, presentan la misma longitud a pesar de estar compuestas de distintas piezas. Esto se debe a que se establece dicho marco común para reducir la complejidad en la obtención de resultados.

Se ensamblan, además de la mixta, las otras seis disposiciones de vigas, representadas con bloques de mayor número de UL (Unidades LEGO) a menos,

de arriba abajo. Empezando por bloques de 15UL y reduciendo la longitud empleada de los mismos en 2UL para cada viga, hasta llegar a los de 5UL.

Por último, con el fin de comprobar que la caracterización ha sido la correcta, se utilizará la viga correspondiente a 15UL para posicionar sobre la misma seis cargas puntuales distribuidas a lo largo de ella. Estas cargas se irán colocando una a una y la medición del desplazamiento seguirá siendo en el punto central de dicha viga.

3.2. Planteamiento.

Para las tomas de datos se plantea el siguiente escenario, donde se establecen dos apoyos, los cuales pasados al *software* de simulación SAP2000 son postulados como una fijo y uno móvil, a la izquierda y derecha respectivamente. Este planteamiento es debido a que no se quiere un sistema hiperestático y a que los apoyos reales realizados mediante piezas de LEGO *Technic* no están anclados al suelo, por lo que su desplazamiento no está impedido.

Se tomó como distancia entre apoyos de la barra unos 62,4 cm, en términos de Unidades LEGO se determinaría como 78 UL efectivas, ya que cada UL equivale a 8 mm; donde a mitad de viga, a unos 31,2 cm, se situará el enganche donde se irán colocando las masas. Dicho enganche, al tener una masa mínima en comparación con la de los pesos, no se tendrá en cuenta a la hora de establecer el peso a soportar por la viga. A mayores, como lo que se mide son los incrementos, los desplazamientos debidos al propio peso y al enganche siempre está, por lo que el incremento debido a ellos es nulo.

Una de las representaciones reales de los apoyos será la mostrada en la figura 16, la cual corresponde a una distribución de viga horizontal.

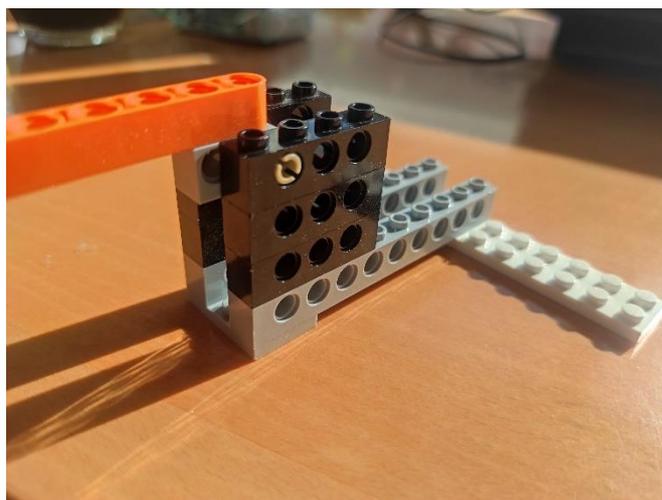


Figura 16. Apoyo para viga horizontal

Debido a que las vigas tienen diferentes puntos de anclaje según el número de conectores, habrá dos modelos que permitan dicha unión. Esto es en virtud de si el punto de apoyo de la viga se encuentra a 2 o más UL, o sólo a 1 UL.

Por otra parte, debido a la representación de la viga formada por piezas de 5 UL, será necesaria una nueva disposición a mayores. Esta nueva disposición se debe a que al final de dicha viga se encuentran los conectores, necesitando para ello un espacio mayor para su colocación. La solución que se adopta es la de doblar el espacio de 1 UL a 2 UL.

La representación de los diferentes ensamblajes se mostrará en la figura 17, ordenadas de derecha a izquierda. Las piezas a utilizar se mostrarán mediante el uso del renderizado del software Stud.io.

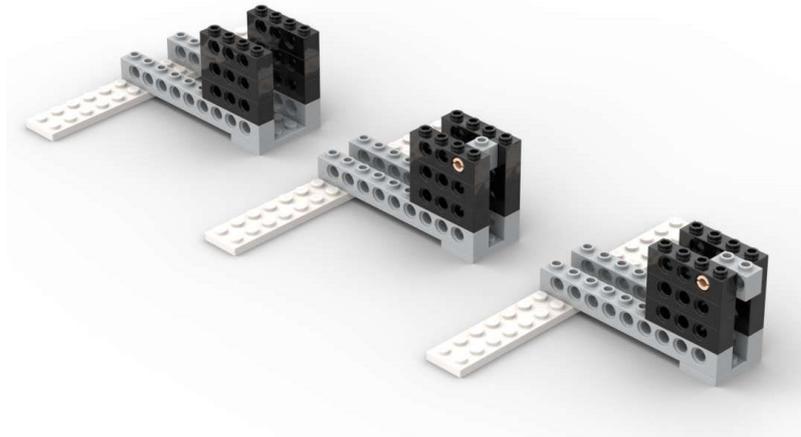


Figura 17. Representación en Stud.io de los apoyos

Para establecer dichos apoyos se ha tenido en cuenta los siguientes elementos de LEGO Technic, representados en la figura 18:

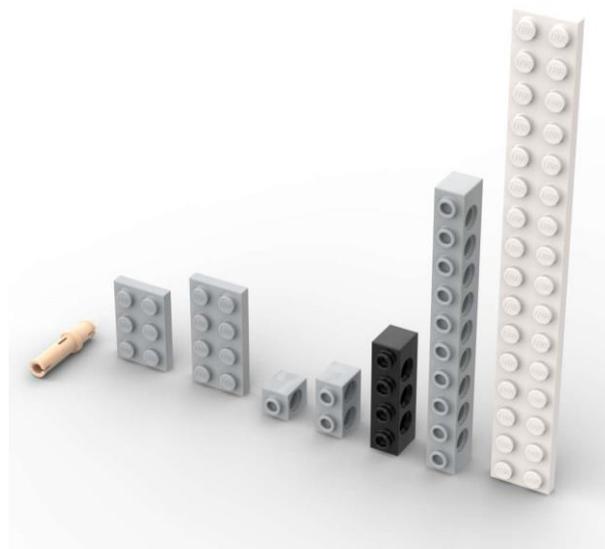


Figura 18. Piezas a utilizar en los apoyos

Por orden de representación de izquierda a derecha son:

- Pin largo *Technic* sin fricción, color tierra, código 32556.
- Plancha 2 x 3, color gris claro azulado, código 3021.
- Plancha 2 x 4, color gris claro azulado, código 3020.
- Ladrillo *Technic* 1 x 1, color gris claro azulado, código 6541.
- Ladrillo *Technic* 1 x 2 con 2 agujeros, color gris claro azulado, código 32000.
- Ladrillo *Technic* 1 x 4, negro, código 3701.
- Ladrillo *Technic* 1 x 10, gris claro azulado, código 2730.
- Plancha 2 x 16, blanco, código 4282.

Debido a los nuevos diseños de LEGO *Technic*, que permiten evitar el solapamiento que se ejercía en anteriores ocasiones, [14] y [15], para proceder a la unión de las piezas que permiten la formación de las denominadas vigas, se procede a la utilización de unos conectores que se mostrarán más adelante.

Para la realización de la parte experimental, y con el fin de recabar los suficientes datos para la obtención de una recta de regresión que muestre la rigidez vinculada al número de conectores, los ensayos se realizarán mediante la unión de piezas viga de diferentes unidades LEGO, como se mencionó en el apartado anterior. Ya que a menor UL mayor será el número de conectores necesarios para formar la viga.

Se representarán vigas de 5, 7, 9, 11, 13 y 15 UL, las cuales constan de los siguientes elementos, según su representación de izquierda a derecha en la figura 19:



Figura 19. Piezas a utilizar en las vigas

- Plancha *Technic* 1 x 5 con bordes redondeados, 4 *studs*, color marrón rojizo, código 32124.
- Viga *Technic* 1 x 5, color rojo, código 32316.
- Viga *Technic* 1 x 5, color negro, código 32316.
- Viga *Technic* 1 x 7, color rojo, código 32524.
- Viga *Technic* 1 x 9, color verde, código 40490.
- Viga *Technic* 1 x 11, color gris claro azulado, código 32525.
- Viga *Technic* 1 x 11, color negro, código 32525.
- Viga *Technic* 1 x 13, color verde, código 41239.
- Viga *Technic* 1 x 13, color azul celeste medio, código 41239.
- Viga *Technic* 1 x 15, color naranja, código 32278.
- Viga *Technic* 1 x 15, color amarillo, código 32278.

Los conectores proporcionarán la capacidad de evaluar el conjunto como una única viga a la hora de realizar su homólogo en el programa SAP2000. En dicho programa se establecen los valores del material y, a través de su rigidez, la inercia de la que dispone para que los resultados sean equivalentes, ya que ese es el objetivo de este trabajo.

Para proceder a su análisis experimental se acoplarán unas masas en la parte central de la viga, como se ha mencionado previamente. Dichas masas estarán formadas por discos de 38 gramos de masa, por lo que su peso, mediante la acción de la gravedad, será de 372,78 N. Estos discos se han pesado uno a uno para asegurar su valor, como se muestra en la figura 20.



Figura 20. Pesaje de las diferentes masas a acoplar

Debido al formato de viga en horizontal y viga en vertical, se representarán dos conjuntos de elementos de soporte para los pesos. Cuyas piezas son las siguientes, descritas de izquierda a derecha en la figura 21:

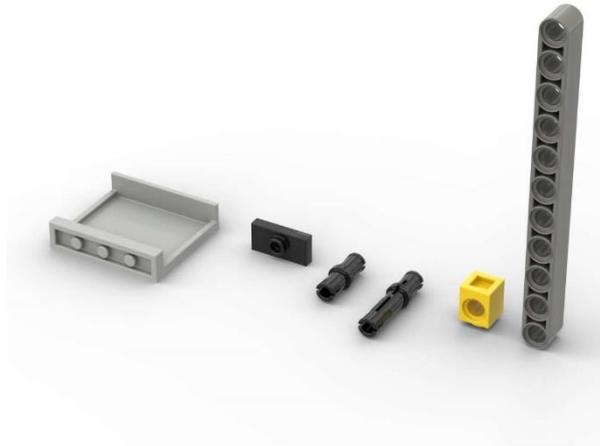


Figura 21. Piezas para la colocación de los pesos

- Panel 1 x 4 x 3 con soportes laterales y studs huecos, color gris claro azulado, código 60581.
- Plancha modificada 1 x 2 con 1 stud con soporte inferior para stud (*Jumper*), color negro, código 15573.
- Pin *Technic* con fricción, color negro, código 4459.
- Pin *Technic* 3L con fricción, color negro, código 6558.
- Ladrillo *Technic* 1 x 1, color amarillo, código 6541.
- Viga *Technic* 1 x 11, color gris oscuro azulado, código 32525.

Estas piezas serán ensambladas de las dos siguientes maneras, siendo la de la izquierda para vigas en horizontal y la derecha para vigas en vertical.



Figura 22. Ensamblaje soporte vertical



Figura 23. Ensamblaje soporte horizontal

Finalmente, en este trabajo de fin de grado, se implementará la acción de seis cargas individuales distribuidas a lo largo de la viga. Estas se irán colocando una a una, de derecha a izquierda, mientras que el láser capturará con precisión los desplazamientos generados en el punto medio de la misma.

Para la colocación de las masas se procederá a la utilización de las siguientes piezas, nombradas de izquierda a derecha en la figura 24:

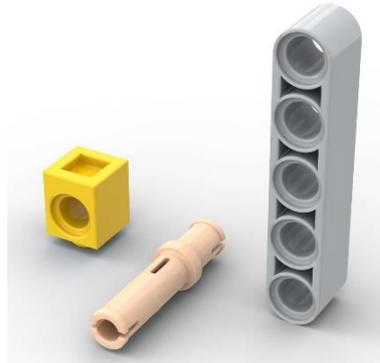


Figura 24. Piezas pesos cargas puntuales

- Ladrillo *Technic* 1 x 1, color amarillo, código 6541.
- Pin largo *Technic* sin fricción, color tierra, código 32556.
- Viga *Technic* 1 x 5, color gris claro azulado, código 32316.

Cuyo ensamblaje será el mostrado en la figura 25:



Figura 25. Ensamblaje piezas pesos puntuales

3.3. Aparatos de medida.

Para la realización de la toma de medidas se utiliza un sistema de gestión de *software* Sirius de Dewesoft para analizar los valores de medida obtenidos a través del láser Panasonic HL-G112-A-C5. Este láser se posiciona a una distancia aproximada de 16 centímetros perpendicularmente sobre el centro de la viga, aunque se debe tener en cuenta que el valor que se está midiendo será entre el cero que se ha estipulado de la viga sin deformar y el valor una vez deformada. Es decir, la distancia a la que se sitúe el aparato de medida no influye en la obtención de datos, ya que sólo interesa el incremento que se genera al añadir los pesos.

Los diferentes aparatos utilizados durante la obtención experimental de los valores serán los mostrados a continuación:

- **Sirius:** se trata de un sistema de adquisición de datos perteneciente a DEWESoft con el cual se transfieren los datos obtenidos mediante el sensor Panasonic HL-G112-A-C5 a través de los 16 canales de conexión analógicos disponibles, utilizando adaptadores DSI. La transferencia de datos se realizará mediante un puerto USB que irá conectado al ordenador, el cual tiene incorporado el *software* necesario para representar los datos. En la figura 26 se muestra su uso durante la parte experimental.

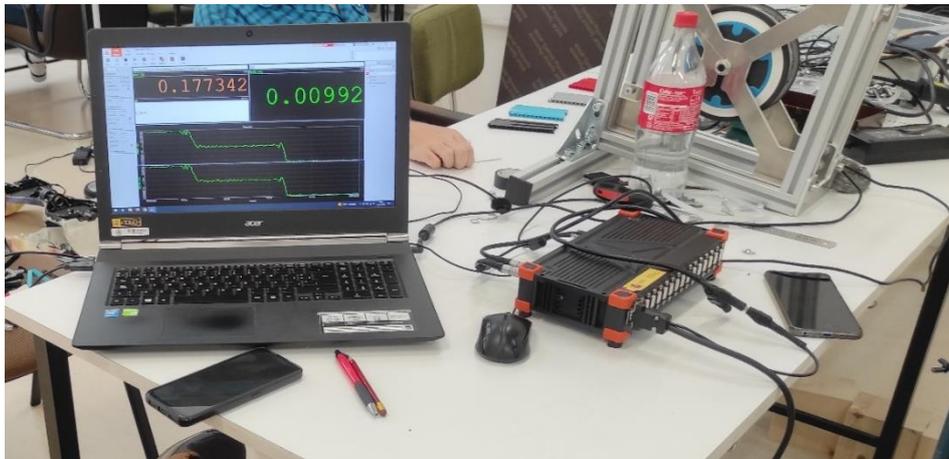


Figura 26. Sistema de adquisición de datos Sirius y software Dewesoft

Gracias a la tecnología *DualCoreADC*, mostrada en la figura 27, no hay problemas debidos a la sobrecarga de entrada, ruido o frecuencias artificiales en la señal. Ya que la relación señal/ruido es de más de 130 dB y de más de 160 dB en rango dinámico.

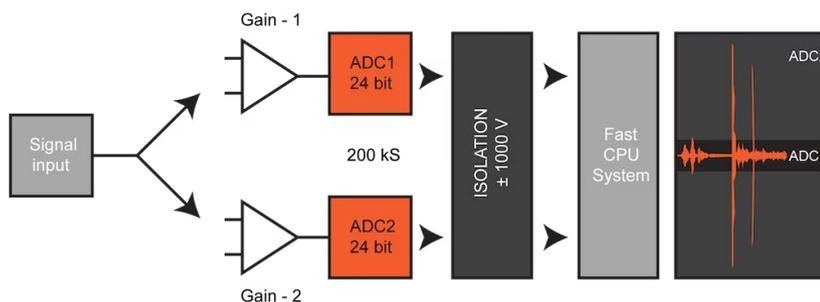


Figura 27. Tecnología DualCoreADC Amplificador [16]

En la figura 28 se muestra el módulo utilizado para la realización de la parte experimental, mientras que en la figura 29 se distinguen las diferentes características de las que se dispone.



Figura 28. Módulo SIRIUS [16]

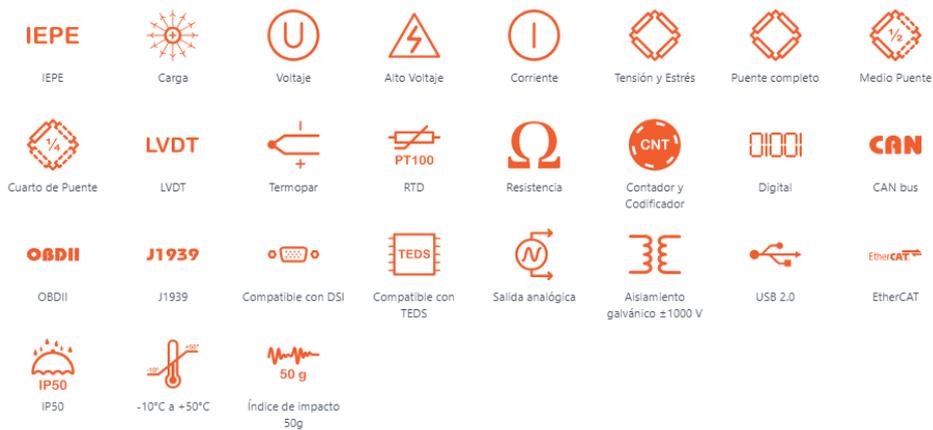


Figura 29. Características de SIRIUS [16]

- **DewesoftX:** es un programa de adquisición de datos, figura 30, donde se gestionarán las pruebas, mediciones y monitoreo. Con él se graban los datos, procesan las señales y se visualizan dichos datos.



Figura 30. Software de adquisición de datos DewesoftX [17]

Únicamente será necesario para la toma de datos el módulo “measure”, en el cual se configurará el sensor a utilizar mediante “Channel Setup”. A su vez, mediante la ventana “Recorder” mostrada en la figura 31, se

puede visualizar los datos que Sirius va registrando. Dichos datos a visualizar se compondrán del valor absoluto de distancia entre la viga y el origen del sensor, y la diferencia entre la distancia de la viga sin deformar, es decir, el origen de la viga, y la viga ya deformada. Además de la gráfica que mostrará la medición a tiempo real hasta la estabilización de la viga al incorporar el peso.



Figura 31. Panel de DewesoftX

- **Panasonic HL-G112-A-C5:** se trata de un instrumento de medida de alta precisión, el cual dispone de una pantalla digital LED que muestra los valores obtenidos por el sensor, como se ve en la figura 32.

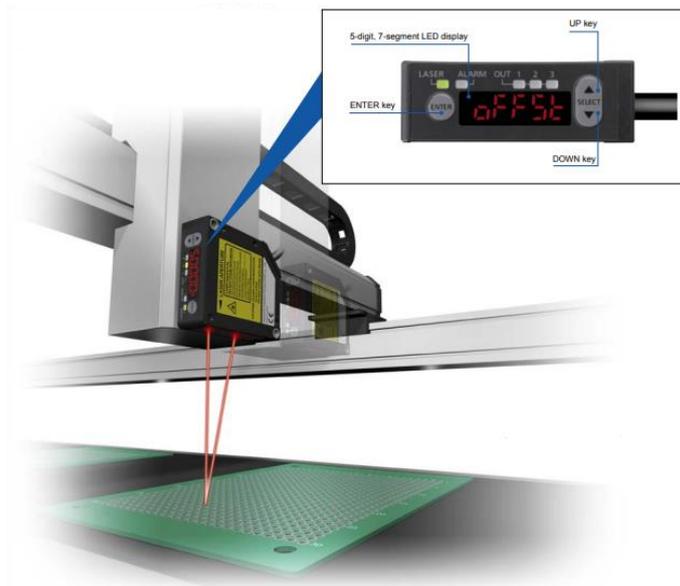


Figura 32. Panasonic HL-G112-A-C5 [18]

Pero, en este caso, dicha pantalla no es de utilidad, ya que se manejan los valores a través del software de Dewesoft, especificado anteriormente, que se dispondrá en el ordenador. El emplazamiento del láser se muestra en la figura 33, disponiendo como ayuda para su posicionamiento de un trípode.



Figura 33. Emplazamiento láser Panasonic

Las especificaciones del producto de forma resumida se muestran a continuación, en la figura 34:



Fabricante	PANASONIC
Tipo de sensor	distancia
Clase de sensor	de láser
Modo de act.	reflectivo
Material de carcasa	PBT
U_{alim}	24V DC
Corriente de trabajo máx.	100mA
Temperatura de trabajo	-10...45°C
Clase de impermeabilidad	IP67
Conf. sal.	PNP/NPN
Número de salidas digitales	3
Clase de salida 1	de transistor
Serie de fabricante	HL-G
Clase de láser	2

Figura 34. Características láser Panasonic [19]

Capítulo 4. Experimentación.

Establecidos los parámetros a tener en cuenta para la puesta del planteamiento del trabajo, se procede a la realización de la toma de datos con la siguiente batería de ensayos, dividiendo los mismos en vertical u horizontal.

Para todos se establece un marco común mediante la presentación de una figura con la que se muestre la puesta real de la experimentación, otra figura que muestre la renderización obtenida a través de Stud.io, y una tabla con los datos obtenidos.

4.1. Vertical.

Ensayo 5V

Para este primer ensayo se dispondrá del mayor número de conectores, por lo cual se utilizarán vigas *Technic* de 5 UL. Siendo así que, para completar las 78 UL efectivas de la viga, se necesitarán 14 conectores a cada lado, habiendo un total de 28. La figura 35 muestra su puesta para los diferentes ensayos.

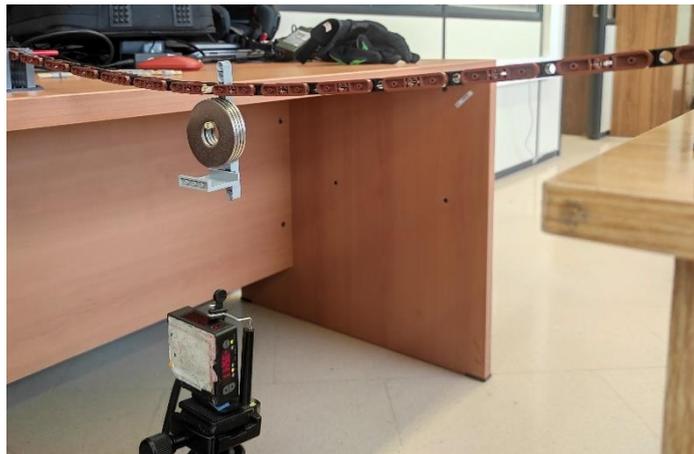


Figura 35. Ensayo viga 5V

La figura 36, con la representación en Stud.io, es la siguiente:



Figura 36. Renderizado Stud.io viga 5V

Para la realización del ensayo se procederá a incorporar las masas, una a una, mientras el láser trasvasa los datos al *software*, donde este vuelca por cada segundo 100 valores a la hoja de Excel.

Gracias a dicho Excel se analizará la toma de datos, tabla 3, partiendo por tener en la primera columna el tiempo real desde el segundo cero. Mientras, en la segunda columna, se tendrá el valor de distancia, en metros, obtenido mediante el láser; al cual, mostrado en la tercera columna, se le restará el primer dato. De esta manera se tendrá la operación de incremento de partida ya lista.

Time	5V	
s	m	
0	0,079231	0
0,01	0,079233	1,5423E-06
0,02	0,079235	4,1425E-06
0,03	0,079234	2,4885E-06
0,04	0,079234	2,9355E-06
0,05	0,079231	-8,196E-08
0,06	0,079231	-2,161E-07
0,07	0,07923	-6,631E-07
0,08	0,07923	-9,909E-07
0,09	0,079232	9,6112E-07
0,1	0,079232	1,274E-06
0,11	0,079234	3,1441E-06
0,12	0,079232	8,7917E-07
0,13	0,079236	4,6045E-06
0,14	0,079233	1,6391E-06
0,15	0,079234	2,3544E-06
0,16	0,079234	2,6152E-06
0,17	0,079235	3,6582E-06
0,18	0,079234	3,2783E-06
0,19	0,079235	3,9265E-06
0,2	0,079234	2,8312E-06
0,21	0,079234	2,8163E-06
0,22	0,079234	2,5034E-06
0,23	0,079235	3,7253E-06

Tabla 3. Representación toma de datos viga 5V

La carga y descarga de pesos se realiza dos veces, para comprobar la linealidad del desplazamiento obtenido y asegurar la validez de los datos registrados. Para un análisis más visual, se genera la gráfica dispuesta en la figura 37, cuya disposición será la de tener en el eje de ordenadas los segundos y en el de abscisas los valores de incremento del desplazamiento.

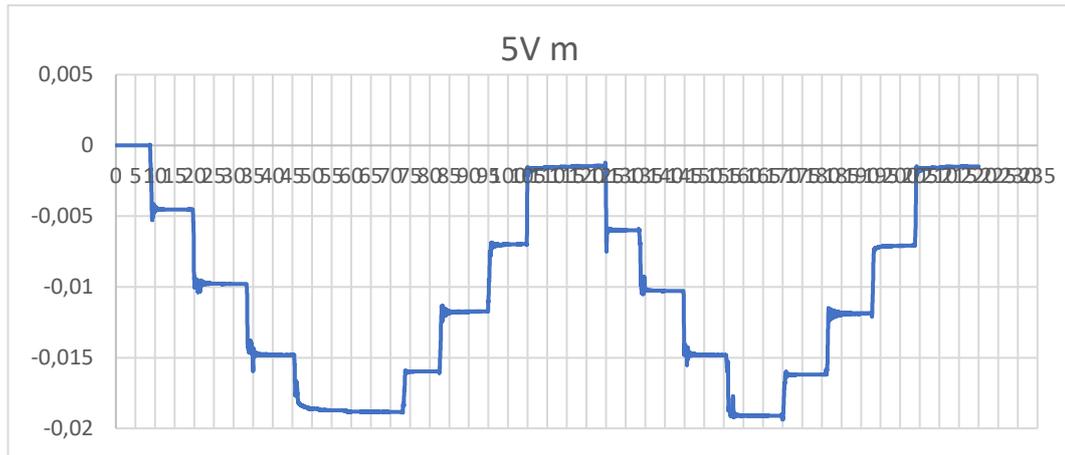


Figura 37. Gráfica viga 5V

Con esta distribución, se procede a elaborar una tabla de datos que muestre los resultados. Para ello, se tomará como referencia entorno al segundo 5 el dato de partida, con el promedio que mide el láser entre el segundo de antes y después, tomando 200 valores en total. Para visualizar la fórmula utilizada se muestra la tabla 4:

E3		={PROMEDIO(INDICE(\$C1:\$C30000;_x!fn.SEQUENCE(100*\$E\$1;1;100*(E2-\$E\$1/2);1)))}																							
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U				
1	Time	5V		amplitud Temporal	2	CARGA					DESCARGA					CARGA					DESCARGA				
2	s	m		en torno al segundo	5	17	30	42	65	80	91	102	120	131	140	152	165	177	190	200	215				
3	0	0,079231	0	promedio	0,000010	-0,004537	-0,009781	-0,014816	-0,018825	-0,015961	-0,011743	-0,006983	-0,001456	-0,005991	-0,010273	-0,014816	-0,019100	-0,016192	-0,011877	-0,007092	-0,001503				

Tabla 4. Valores promedio viga 5V

Así pues, entre la primera referencia y la segunda se mostrará el incremento que se ha generado al añadir un nuevo peso. Para mostrar la rigidez no hace falta nada más que realizar el siguiente cálculo:

$$F = K \cdot \text{delta} \rightarrow K = \frac{\text{masa} \cdot g}{\text{incremento desplazamiento}} \quad (3)$$

Con lo que, finalmente, se obtiene el cómputo total de valores para la viga 5V, mostrados en la tabla 5:

amplitud temporal	2	CARGA					DESCARGA					CARGA					DESCARGA				
en torno al segundo	5	17	30	42	65	80	91	102	120	131	140	152	165	177	190	200	215				
promedio	0,000010	-0,004537	-0,009781	-0,014816	-0,018825	-0,015961	-0,011743	-0,006983	-0,001456	-0,005991	-0,010273	-0,014816	-0,019100	-0,016192	-0,011877	-0,007092	-0,001503				
incremento (m)		0,004547	0,005244	0,005035	0,004009	-0,002863	-0,004219	-0,004759	-0,005527	0,004535	0,004281	0,004544	0,004284	-0,002908	-0,004315	0,00	-0,01				
rigidez (N/m)		81,98	71,08	74,04	92,99	-130,18	-88,36	-78,32	-67,45	82,20	87,07	82,04	87,03	-128,20	-86,40	-77,90	-66,70				
promedios					80,02				-91,08				84,58				-89,80				

Tabla 5. Resultados viga 5V

Ensayo 7V

Se reduce el número de conectores a utilizar en la viga, por lo que la viga *Technic* a utilizar será de 7 UL. Dicha disposición hace que el número de conectores necesarios para formar la viga sea de 20, teniendo 10 a cada lado, como se muestra en la figura 38.

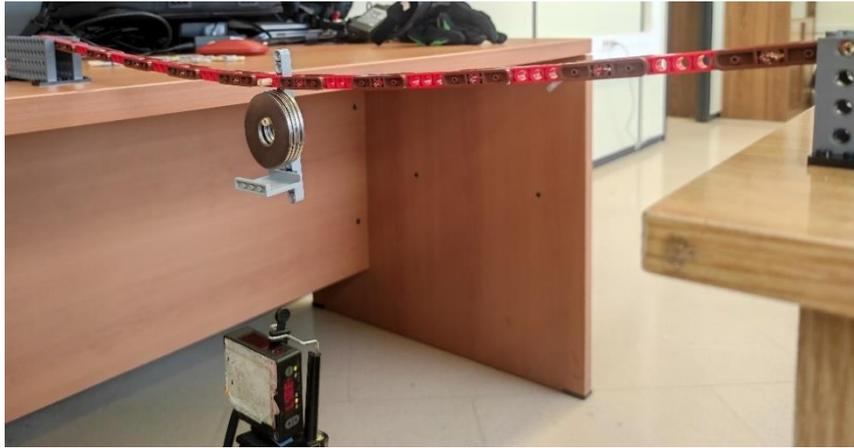


Figura 38. Ensayo viga 7V

A pesar de que hay un excedente de UL a los extremos, estos no se involucran en los cálculos, ya que únicamente se evalúa la viga entre apoyos. Para una mejor visualización, se muestra la figura 39 realizada mediante el programa Stud.io:



Figura 39. Renderizado Stud.io viga 7V

Al igual que en el anterior ensayo, se realiza el Excel correspondiente, el cual muestra la figura 40:

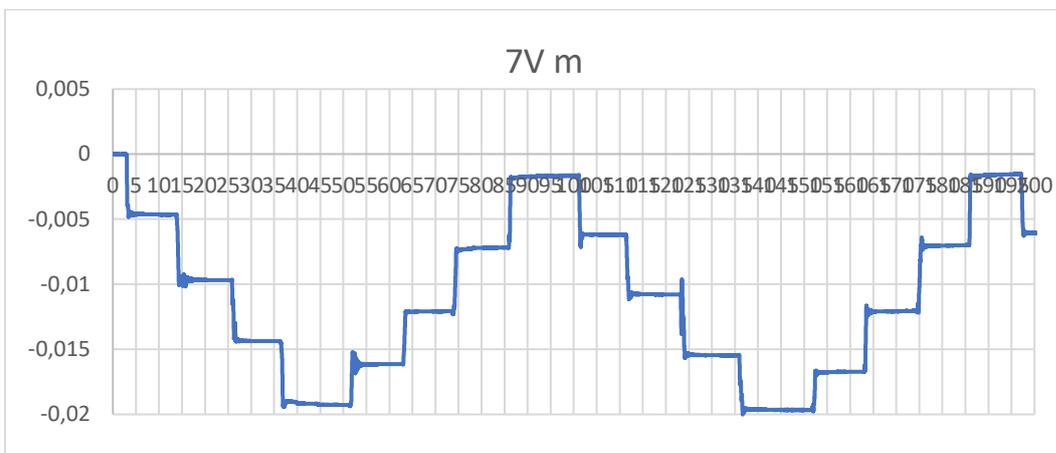


Figura 40. Gráfica viga 7V

Finalmente, los datos obtenidos para una viga vertical formada por vigas *Technic* de 7 UL son los de la tabla 6:

amplitud temporal	CARGA				DESCARGA				CARGA				DESCARGA				
en torno al segundo	1	12	22	34	48	60	71	84	97	110	120	133	150	160	172	184	195
promedio	-0,000008	-0,004650	-0,009694	-0,014387	-0,019283	-0,016147	-0,012085	-0,007189	-0,001666	-0,006192	-0,010791	-0,015470	-0,019670	-0,016739	-0,012070	-0,007016	-0,001568
incremento (m)	0,004643	0,005043	0,004693	0,004896		-0,003136	-0,004062	-0,004896	-0,005523	0,004526	0,004599	0,004679	0,004200	-0,002931	-0,004669	-0,01	-0,01
rigidez (N/m)	80,29	73,91	79,43	76,15		-118,87	-91,77	-76,14	-67,49	82,36	81,06	79,66	88,75	-127,18	-79,84	-73,75	-68,43
promedios				77,44					-88,57				82,96				-87,30

Tabla 6. Resultados viga 7V

Ensayo 9V

Continuando con la reducción en el número de conectores, la siguiente viga se formará con vigas *Technic* de 9 UL. Esto supondrá una utilización de 16 conectores, teniendo 8 a cada lado.

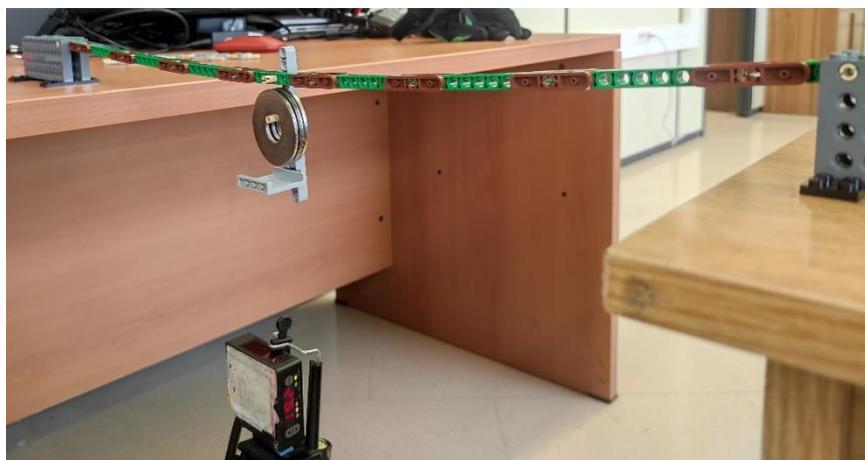


Figura 41. Ensayo viga 9V

Así pues, su representación a través de Stud.io será la de la figura 42:



Figura 42. Renderizado Stud.io viga 9V

Tal y como se ha estado realizando con anterioridad, se hace el Excel correspondiente y se muestra la figura 43:

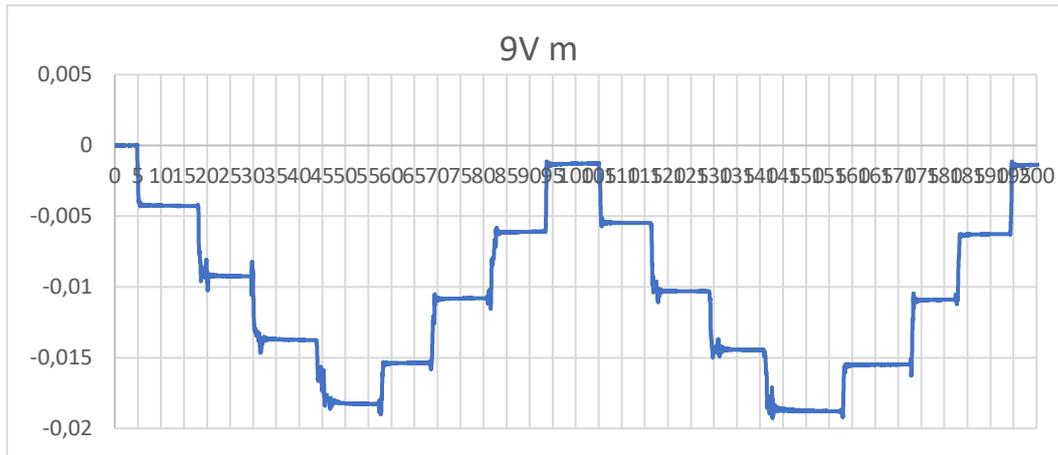


Figura 43. Gráfica viga 9V

Finalmente, los datos obtenidos para una viga vertical formada por vigas *Technic* de 9 UL son los de la tabla 7:

amplitud temporal en torno al segundo	2	CARGA				DESCARGA				CARGA				DESCARGA				201
	3	15	27	41	55	65	77	90	103	114	125	137	155	170	180	194		
promedio	0,000001	-0,004275	-0,009237	-0,013749	-0,018266	-0,015375	-0,010813	-0,006104	-0,001274	-0,005478	-0,010309	-0,014438	-0,018788	-0,015478	-0,010898	-0,005227	-0,001362	
incremento (m)	0,004276	0,004962	0,004512	0,004517	-0,002890	-0,004563	-0,004709	-0,004830	0,004205	0,004831	0,004129	0,004350	-0,003310	-0,004580	-0,01	0,00		
rigidez (N/m)		87,19	75,12	82,62	82,53	-128,97	-81,70	-79,17	-77,17	88,66	77,17	90,29	85,70	-112,64	-81,39	-65,73	-96,44	
promedios					81,86				-91,75				85,45				-89,05	

Tabla 7. Resultados viga 9V

Ensayo 11V

Este ensayo, continuando con la dinámica anterior, se compone de vigas *Technic* de 11 UL. Lo cual supone la utilización de 12 conectores, siendo 6 a cada lado. Como bien se observa en la figura 44:



Figura 44. Ensayo viga 11V

Así pues, su representación a través de Studio será la de la figura 45:



Figura 45. Renderizado Stud.io viga 11V

La gráfica obtenida a través del Excel generado es la de la figura 46:

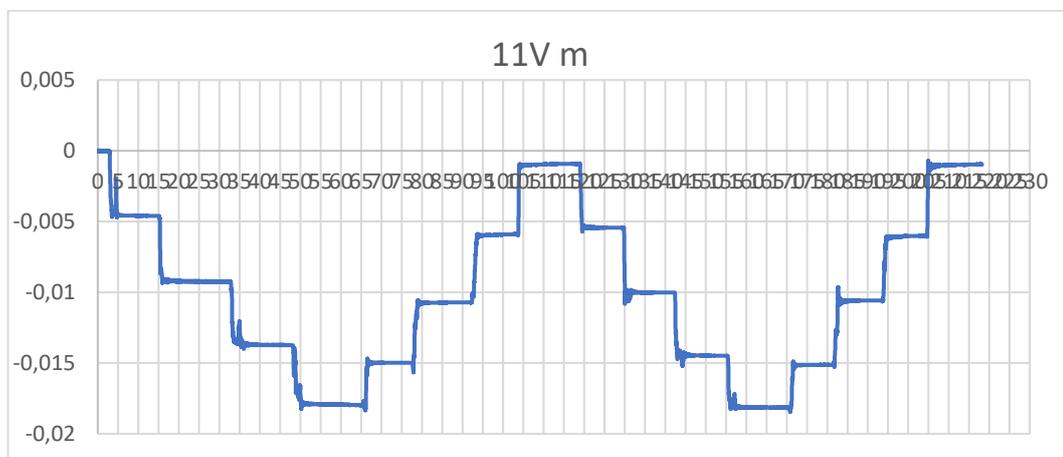


Figura 46. Gráfica viga 11V

Y los datos recopilados mediante la misma son los de la tabla 8:

amplitud temporal	2	CARGA					DESCARGA					CARGA					DESCARGA				
en torno al segundo	1,2	13	30	45	60	75	90	102	115	127	140	153	166	180	192	203	215				
promedio	0,000000	-0,004593	-0,009245	-0,013729	-0,017937	-0,014977	-0,010710	-0,005902	-0,000920	-0,005434	-0,010009	-0,014480	-0,018143	-0,015128	-0,010575	-0,006012	-0,000970				
incremento (m)	0,004593	0,004651	0,004484	0,004209	-0,002960	-0,004267	-0,004808	-0,004981	0,004514	0,004575	0,004471	0,003662	-0,003014	-0,004553	0,00	-0,01					
rigidez (N/m)		81,16	80,15	83,14	88,57	-125,93	-87,36	-77,53	-74,84	82,59	81,48	83,37	101,80	-123,66	-81,88	-81,69	-73,94				
promedios					83,25				-91,41				87,31				-90,29				

Tabla 8. Resultados viga 11V

Ensayo 13V

Aumentando el número de UL, se dispone de vigas *Technic* de 13 UL. Lo que dará un número total de 12 conectores, siendo 6 a cada lado, como se ve en la figura 47. A pesar de que esta viga está compuesta por cuatro piezas de 13 UL y dos piezas de 5 UL, se demostrará más adelante que, al tener el mismo número de conectores que en el ensayo anterior, la rigidez se mantiene dentro de unos valores coherentes.



Figura 47. Ensayo viga 13V

La representación mediante el programa Stud.io es la siguiente, en la figura 48:



Figura 48. Renderizado Stud.io viga 13V

La gráfica obtenida a través del Excel generado se representa a través de la figura 49:

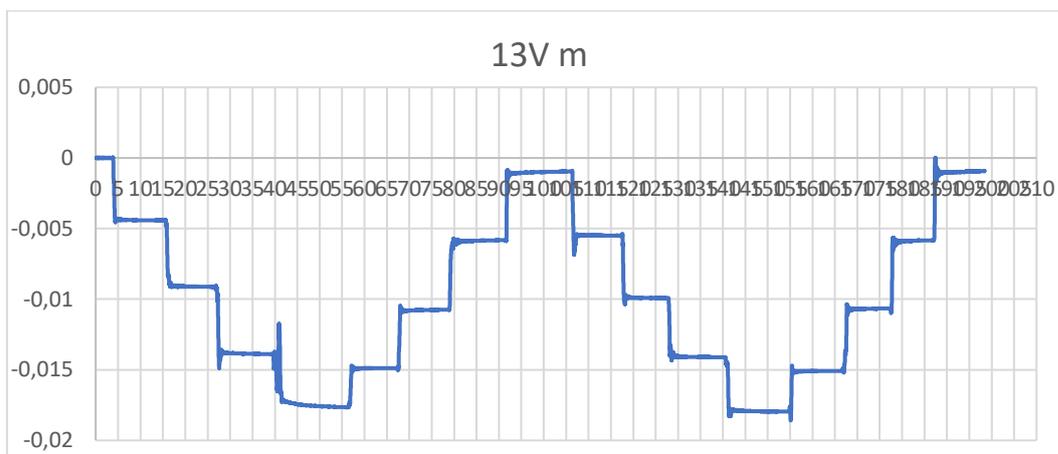


Figura 49. Gráfica viga 13V

Y los datos recopilados mediante la misma son los de la tabla 9:

amplitud temporal	2	CARGA				DESCARGA				CARGA				DESCARGA			
en torno al segundo	3	13	23	35	54	65	75	88	100	115	125	136	150	164	175	185	195
promedio	-0,000011	-0,004421	-0,009117	-0,013874	-0,017643	-0,014885	-0,010761	-0,005841	-0,000986	-0,005495	-0,009918	-0,014107	-0,017952	-0,015092	-0,010663	-0,005842	-0,000957
incremento (m)	0,004410	0,004696	0,004757	0,003768	0,002758	0,004124	0,004920	0,004854	0,004508	0,004423	0,004189	0,003845	0,002860	0,004428	0,00	0,00	0,00
rigidez (N/m)		84,53	79,39	78,36	98,93	-135,18	-90,38	-75,77	-76,80	82,69	84,27	88,99	96,96	-130,32	-84,18	-77,31	-76,32
promedios					85,30				-94,53				88,23				-92,03

Tabla 9. Resultados viga 13V

Ensayo 15V

Para este ensayo se toma el mayor número de UL por viga *Technic* disponibles, que es de 15 UL. Para lo cual serán necesarios un total de 8 conectores, es decir, 4 conectores por lado, como bien se observa en la figura 50:

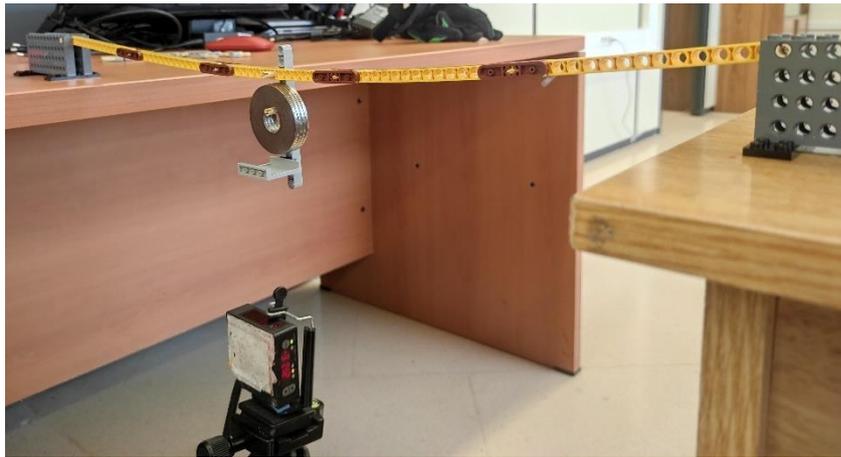


Figura 50. Ensayo viga 15V

La representación mediante Stud.io es la de la figura 51:



Figura 51. Renderizado Stud.io viga 15V

La representación gráfica de los datos recopilados en el Excel se muestra en la figura 52:

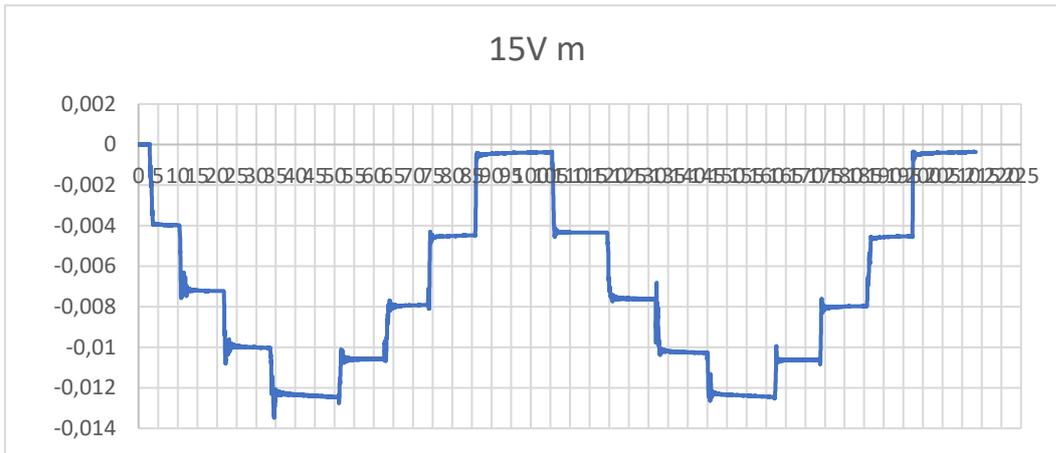


Figura 52. Gráfica viga 15V

Y los datos obtenidos a través de la gráfica son, finalmente, los de la tabla 10:

amplitud temporal en torno al segundo	2	9	20	31	45	60	70	83	100	115	130	143	160	170	185	195	210
promedio	-0,000034	-0,003974	-0,007221	-0,010012	-0,012397	-0,010584	-0,007930	-0,004489	-0,000396	-0,004340	-0,007622	-0,010264	-0,012432	-0,010616	-0,007871	-0,004529	-0,000380
incremento (m)	0,003941	0,003247	0,002790	0,002385	-0,001813	-0,002654	-0,003441	-0,004093	0,003944	0,003282	0,002642	0,002168	-0,001816	-0,002745	0,00	0,00	0,00
rigidez (N/m)		94,60	114,81	133,60	156,30	-205,67	-140,45	-108,34	-91,08	94,52	113,59	141,07	171,98	-205,23	-135,81	-111,54	-89,84
promedios				124,83				-136,39					130,29				-135,61

Tabla 10. Resultados viga 15V

Ensayo mV

Con el fin de caracterizar la viga para cualquier número de conectores, se realiza el ensayo de una viga mixta para la comprobación de los datos obtenidos. Para ello, se dispondrá de una viga de 15 UL, dos de 13 UL, dos de 11 UL y dos de 5 UL. Representada dicha disposición a través de la figura 53

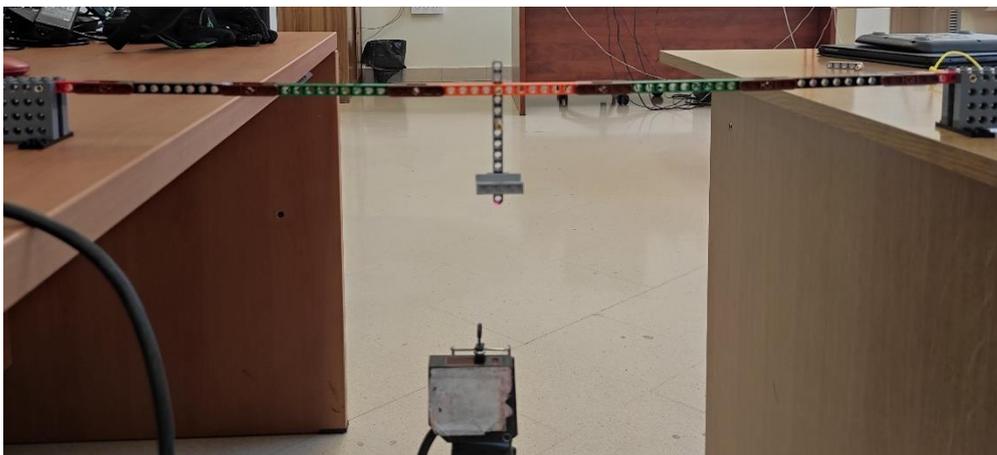


Figura 53. Ensayo viga mV

Su representación en Studio es la de la figura 54:



Figura 54. Renderizado Stud.io viga mV

La gráfica representativa de los datos recopilados en Excel es la siguiente, figura 55:

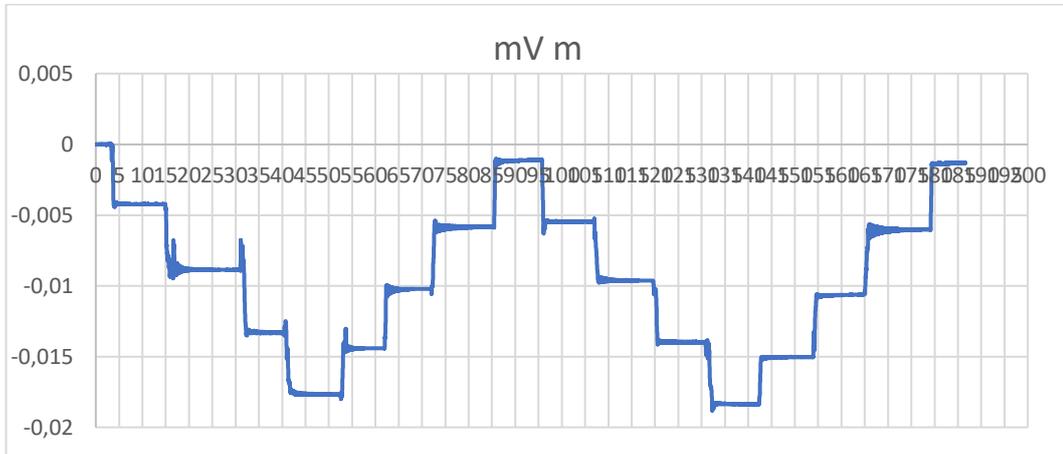


Figura 55. Gráfica viga mV

Los datos que se han obtenido a través de la gráfica son los representados por la tabla 11:

amplitud temporal	2		CARGA				DESCARGA				CARGA				DESCARGA			
en torno al segundo	3	13	29	37	50	60	70	83	93	105	118	128	140	150	163	176	185	
promedio	-0,000646	-0,004220	-0,008865	-0,013295	-0,017663	-0,014407	-0,010212	-0,005830	-0,001112	-0,005449	-0,009624	-0,013972	-0,018358	-0,015031	-0,010623	-0,006012	-0,001304	
incremento (m)	0,003574	0,004645	0,004430	0,004369	-0,003257	-0,004195	-0,004382	-0,004718	0,004337	0,004176	0,004348	0,004386	-0,003326	-0,004409	0,00	0,00	0,00	
rigidez (N/m)	104,30	80,25	84,16	85,33	-114,46	-88,86	-85,08	-79,01	85,95	89,27	85,74	85,00	-112,07	-84,55	-80,85	-79,18	-89,16	
promedios					88,51				-91,85				86,49					

Tabla 11. Resultados viga mV

Ensayo dV

Como objeto de este trabajo de fin de grado, se realiza la toma de datos de cargas puntuales a través de una viga formada por 4 conectores a cada lado. Es decir, como se puede observar, es la misma que la del ensayo 6, ya que las vigas Technic son de 15 UL. La figura 56 muestra el ensayo habiendo efectuado las 6 cargas.



Figura 56. Ensayo viga dV

Su representación en Stud.io, con los ensamblajes en los cuales irán posicionados los pesos, es la de la figura 57:



Figura 57. Renderizado Stud.io viga dV

Como se ha hecho anteriormente, los datos recopilados mostrados en Excel a través de una gráfica son los siguientes, figura 58:

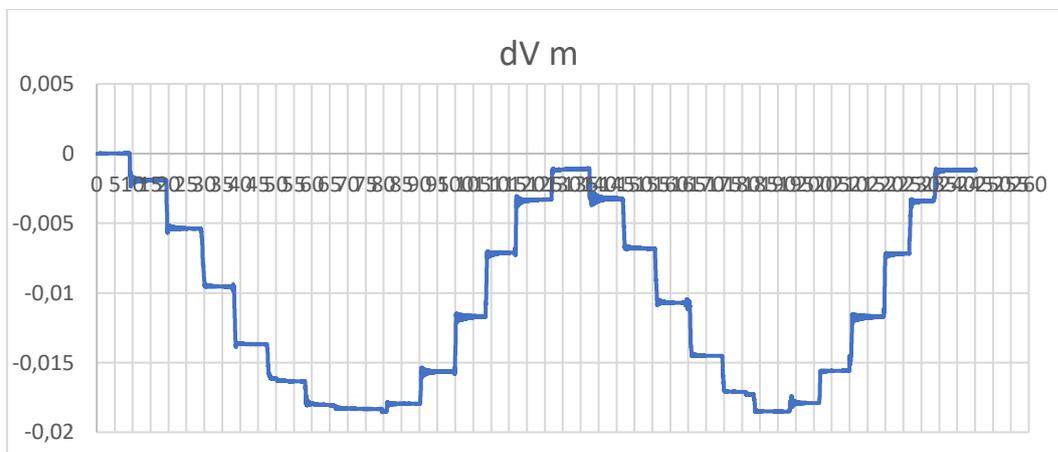


Figura 58. Gráfica viga dV

Por lo cual, la tabla 12 de valores obtenidos es:

amplitud temporal	2				
en torno al segundo	5	75	135	190	240
promedio	0,000011	-0,018319	-0,001104	-0,018505	-0,001183
incremento (m)	0,018329	-0,017215	0,017401	-0,017322	
rigidez (N/m)		20,34	-21,65	21,42	-21,52

Tabla 12. Resultados viga dV

4.2. Horizontal

De forma homóloga, se realizan los mismos ensayos que antes, pero posicionando la viga de forma que los conectores estén paralelos al suelo. Es decir, se hace un giro de 90 grados. Por lo que, para evitar repeticiones de contenido, se muestran directamente las imágenes y las tablas con los datos correspondientes. Ya que los ensayos según el número de UL de las vigas se rigen por el mismo orden que en el de vertical.

Ensayo 5H

El ensayo de la viga 5H se muestra con la figura 59, formada por elementos de 5 UL:



Figura 59. Ensayo viga 5H

Por lo siguiente, la figura 60 representa el renderizado, que se ha ido realizando también en las vigas de disposición horizontal, de la viga 5H.



Figura 60. Renderizado Stud.io viga 5H

Datos obtenidos a través del láser y el Excel, figura 61:

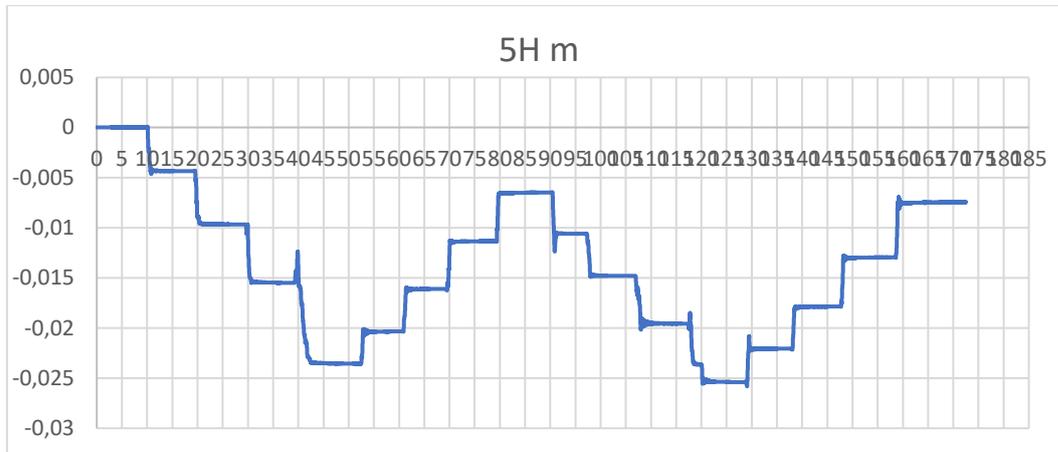


Figura 61. Gráfica viga 5H

Por consiguiente, los resultados obtenidos en Excel de la viga 5H serán los de la tabla 13:

	CARGA				DESCARGA				CARGA				DESCARGA				
amplitud temporal en torno al segundo promedio	5	15	25	35	47	57	65	75	85	95	103	113	125	134	144	154	170
incremento (m)	0,000019	-0,004345	-0,009658	-0,015471	-0,023530	-0,020354	-0,016116	-0,011356	-0,006515	-0,010599	-0,014797	-0,019546	-0,025375	-0,022065	-0,017865	-0,012972	-0,007465
rigidez (N/m)		85,42	70,16	64,13	46,26	-117,37	-87,96	-78,32	-77,00	91,28	88,80	78,49	63,96	-112,63	-88,77	-76,18	-67,70
promedios					66,45				-90,16				80,63				-86,32

Tabla 13. Resultados viga 5H

Ensayo 7H

Figura 62, real, y figura 62, por Studio, de la viga formada por elementos de 7 UL:

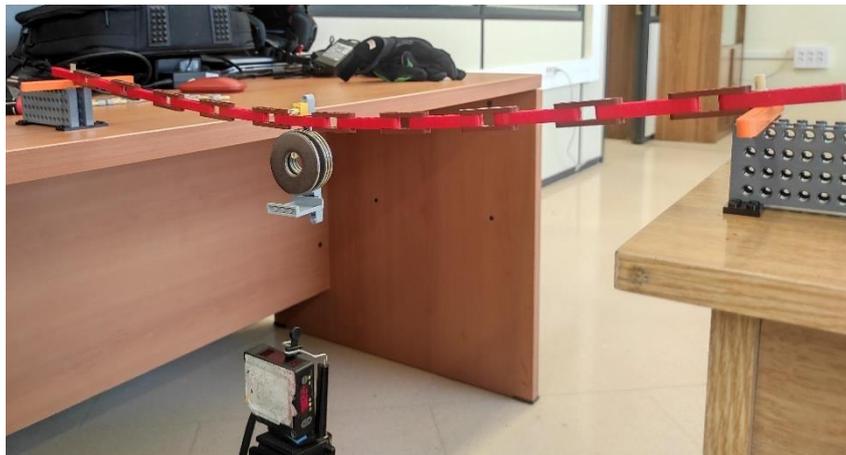


Figura 62. Ensayo viga 7H



Figura 63. Renderizado Stud.io viga 7H

Datos obtenidos a través del láser y el Excel, figura 64:

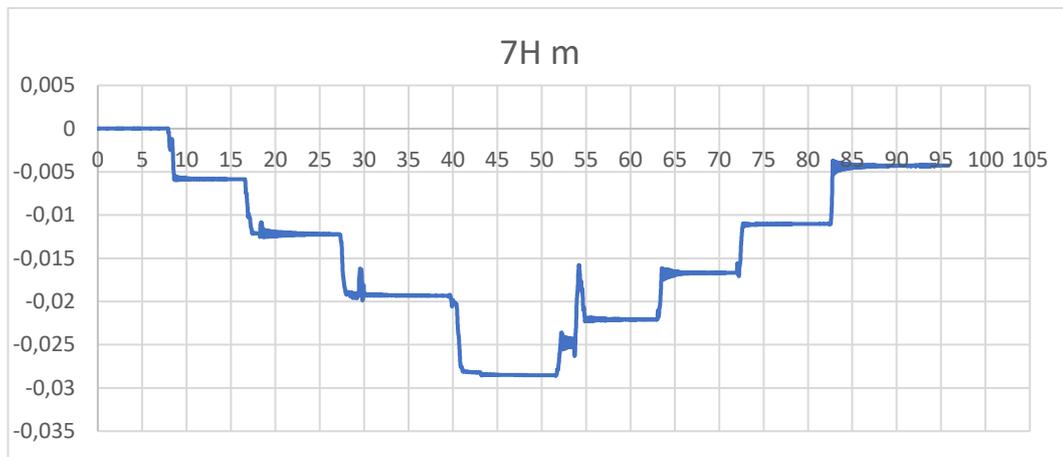


Figura 64. Gráfica viga 7H

Los resultados de la viga 7H se mostrarán a continuación en la tabla 14:

amplitud temporal en torno al segundo	2	CARGA					DESCARGA			
	5	15	25	37	50	61	70	80	94	
promedio	0,000015	-0,005849	-0,012217	-0,019315	-0,028528	-0,022081	-0,016682	-0,011018	-0,004279	
incremento (m)		0,005864	0,006369	0,007098	0,009214	-0,006447	-0,005399	-0,005664	-0,006739	
rigidez (N/m)		63,57	58,53	52,52	40,46	-57,82	-69,04	-65,82	-55,32	
promedios					53,77				-62,00	

Tabla 14. Resultados viga 7H

Ensayo 9H

Figura 65, real, y la figura 66, por Stud.io, de la viga formada por elementos de 9 UL:

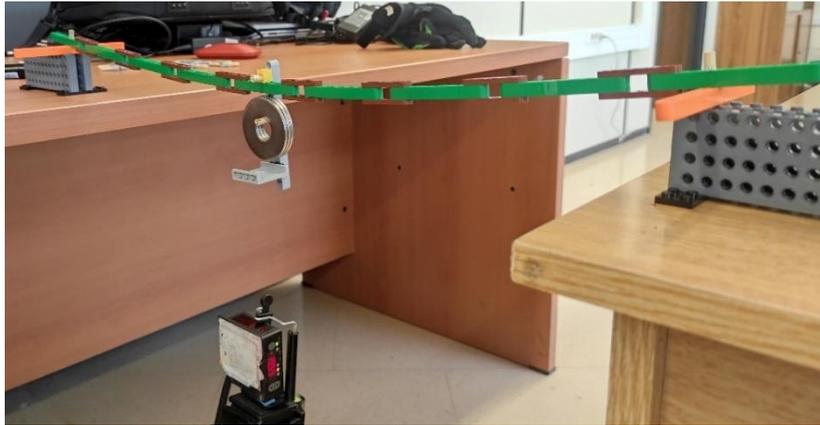


Figura 65. Ensayo viga 9H



Figura 66. Renderizado Stud.io viga 9H

Datos obtenidos a través del láser, figura 67, y el Excel, tabla 15:

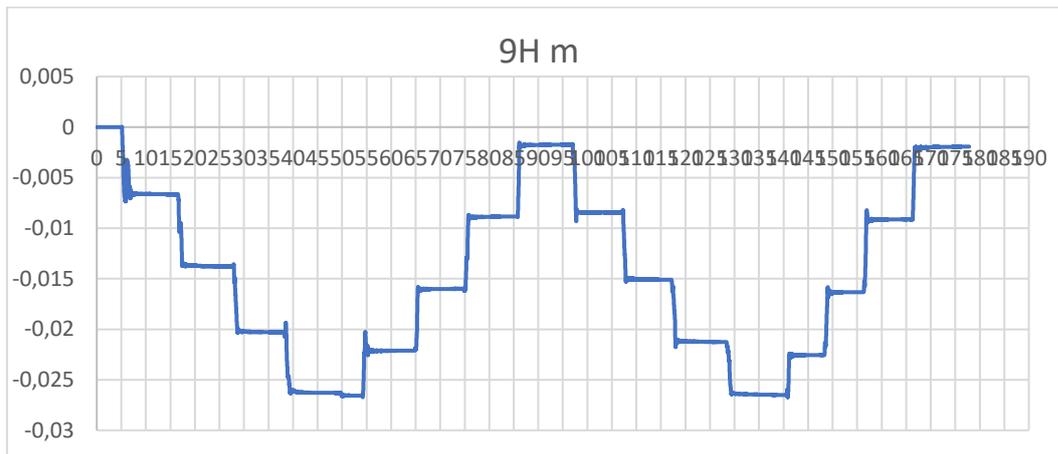


Figura 67. Gráfica viga 9H

	2	CARGA				DESCARGA				CARGA				DESCARGA			
amplitud temporal en torno al segundo	3	15	25	35	50	62	73	83	94	105	115	125	137	146	154	164	175
promedio	-0,000005	-0,006652	-0,013782	-0,020288	-0,026445	-0,022118	-0,016003	-0,008855	-0,001736	-0,008450	-0,015092	-0,021241	-0,026483	-0,022553	-0,016326	-0,009120	-0,001947
incremento (m)		0,006648	0,007129	0,006506	0,006156	-0,004326	-0,006115	-0,007148	-0,007119	0,006714	0,006641	0,006149	0,005242	-0,003930	-0,006227	-0,01	-0,01
rigidez (N/m)		56,07	52,29	57,29	60,55	86,17	60,96	52,15	52,37	55,52	56,13	60,62	71,12	94,86	59,87	51,73	51,97
promedios					56,55				-62,91				60,85				-64,61

Tabla 15. Resultados viga 9H

Ensayo 11H

Figura 68, real, y la figura 69, por Stud.io, de la viga formada por elementos de 11 UL:



Figura 68. Ensayo viga 11H



Figura 69. Renderizado Stud.io viga 11H

Datos obtenidos a través del láser, figura 70, y el Excel, tabla 16:

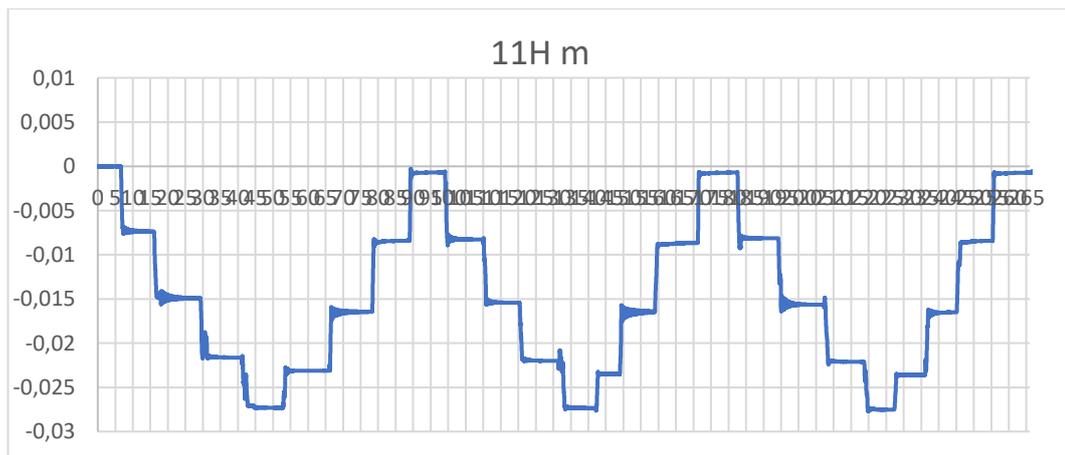


Figura 70. Gráfica viga 11H

	2	CARGA				DESCARGA				CARGA				DESCARGA			
amplitud temporal en torno al segundo	5	14	26	39	50	66	75	86	95	107	117	130	140	146	157	169	180
promedio	-0,000017	-0,007374	-0,014910	-0,021634	-0,027303	-0,021312	-0,015446	-0,008417	-0,000697	-0,008262	-0,015423	-0,021985	-0,027338	-0,023456	-0,015464	-0,008657	-0,000710
incremento (m)	0,007358	0,007535	0,006724	0,005669	0,005991	-0,004866	-0,008029	-0,007720	0,007565	0,007161	0,006562	0,005352	-0,003882	-0,006992	-0,01	-0,01	-0,01
rigidez (N/m)		50,66	49,47	55,44	65,76	-62,22	-76,61	-46,43	-48,29	49,27	52,06	56,81	69,65	-96,03	-53,32	-47,75	-46,91
promedios					55,33				-58,39				56,95				-61,00

Tabla 16. Resultados viga 11H

Ensayo 13H

Figura 71, real, y figura 72, por Stud.io, de la viga formada por elementos de 13 UL:



Figura 71. Ensayo viga 13H



Figura 72. Renderizado Stud.io viga 13H

Datos obtenidos a través del láser, figura 73, y el Excel, tabla 17:

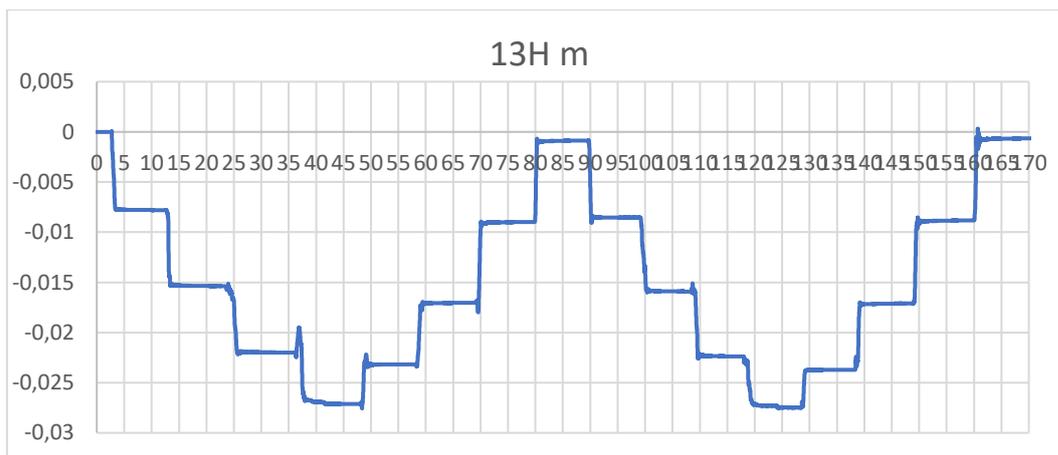


Figura 73. Gráfica viga 13H

amplitud temporal en torno al segundo	2	CARGA				DESCARGA				CARGA				DESCARGA			
	1,5	10	20	33	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165
promedio	-0,000004	-0,007790	-0,015360	-0,021993	-0,027114	-0,023174	-0,017049	-0,009006	-0,000892	-0,008549	-0,015898	-0,022377	-0,027462	-0,023720	-0,017123	-0,008850	-0,000686
incremento (m)	0,007785	0,007570	0,006633	0,005122	-0,003940	-0,006126	-0,008043	-0,008113	0,007657	0,007348	0,006480	0,005085	-0,003742	-0,006597	-0,01	-0,01	
rigidez (N/m)		47,88	49,24	56,20	72,79	-94,61	-60,86	-46,35	-45,95	48,68	50,73	57,53	73,31	-99,62	-56,51	-45,06	-45,66
promedios					56,53				-61,94				57,56				-61,71

Tabla 17. Resultados viga 13H

Ensayo 15H

Figura 74, real, y figura 75, por Stud.io, de la viga formada por elementos de 15 UL:



Figura 74. Ensayo viga 15H



Figura 75. Renderizado Stud.io viga 15H

Datos obtenidos a través del láser, figura 76, y el Excel, tabla 18:

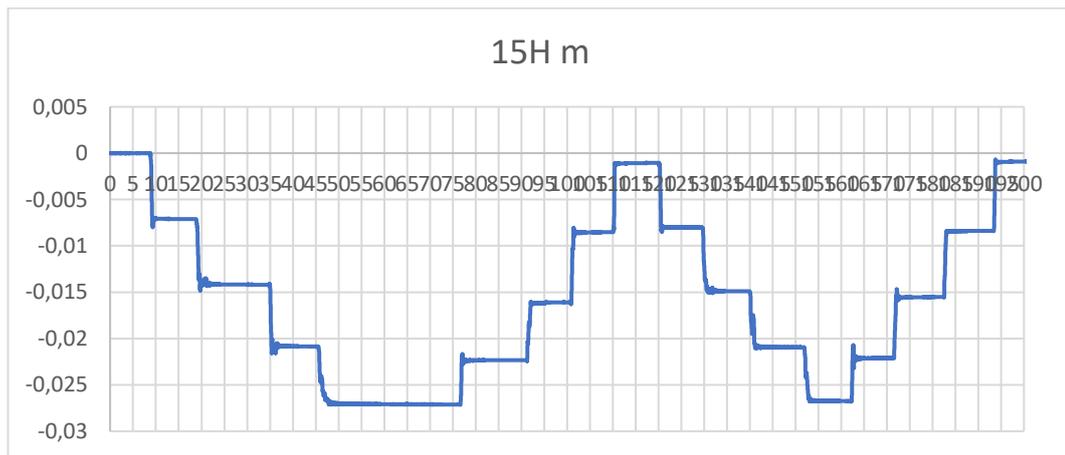


Figura 76. Gráfica viga 15H

amplitud temporal en torno al segundo	2	CARGA				DESCARGA				CARGA				DESCARGA				200
	5	15	30	43	70	88	98	108	118	128	138	150	160	170	180	190		
promedio	-0,000002	-0,007099	-0,014185	-0,020858	-0,027102	-0,022328	-0,016092	-0,008531	-0,001061	-0,008023	-0,014892	-0,020949	-0,026738	-0,022107	-0,015526	-0,008381	-0,000900	
incremento (m)	0,007097	0,007086	0,006673	0,006244	-0,004774	-0,006236	-0,007562	-0,007469	0,006962	0,006869	0,006057	0,005789	-0,004632	-0,006581	-0,01	-0,01		
rigidez (N/m)		52,53	52,61	55,86	59,70	-78,08	-59,78	-49,30	-49,91	53,55	54,27	61,55	64,39	-80,49	-56,65	-52,17	-49,83	
promedios					55,17				-59,27				58,44				-59,78	

Tabla 18. Resultados viga 15H

Ensayo mH

Figura 77, real, y figura 78, por Stud.io, de la viga formada por elementos mixtos:

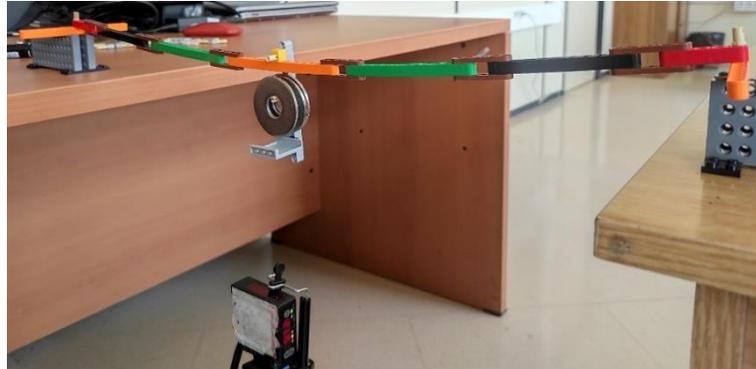


Figura 77. Ensayo viga mH



Figura 78. Renderizado Stud.io viga mH

Datos obtenidos a través del láser, figura 79, y el Excel, tabla 19:

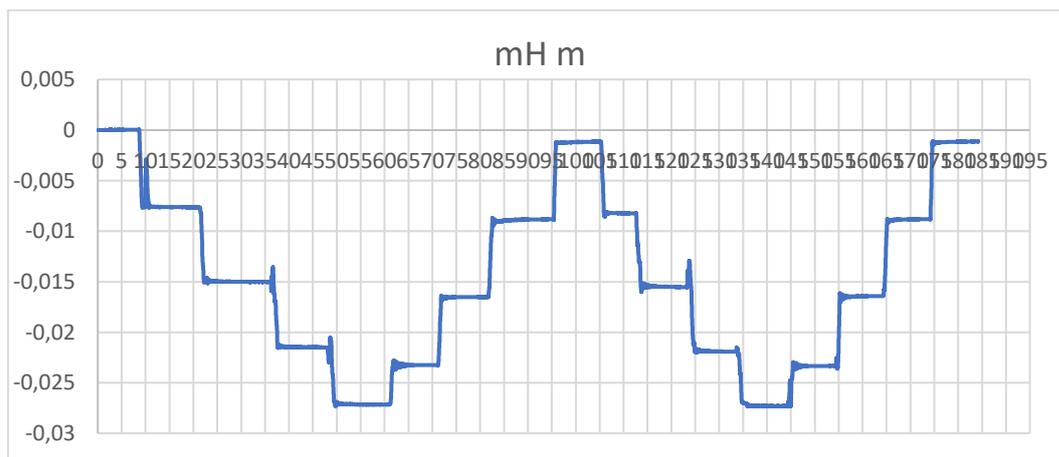


Figura 79. Gráfica viga mH

amplitud temporal en torno al segundo	2	CARGA				DESCARGA				CARGA				DESCARGA			
	5	20	35	45	60	70	80	93	104	110	120	130	140	153	163	173	180
promedio	0,000024	-0,007626	-0,015015	-0,021492	-0,027159	-0,023240	-0,016501	-0,008832	-0,001151	-0,008222	-0,015509	-0,021899	-0,027301	-0,023329	-0,016418	-0,008804	-0,001149
incremento (m)		0,007650	0,007389	0,006477	0,005667	-0,003919	-0,006739	-0,007670	-0,007681	0,007071	0,007287	0,006390	0,005402	-0,003972	-0,006911	-0,01	-0,01
rigidez (N/m)		48,73	50,45	57,56	65,78	-95,12	-55,32	-48,61	-48,53	52,72	51,16	58,34	69,01	-93,85	-53,94	-48,96	-48,70
promedios					55,68				-61,89				57,81				-61,36

Tabla 19. Resultados viga mH

Ensayo dH

Figura 80, real, y figura 81, por Stud.io, de la viga formada por elementos de 15 UL con cargas puntuales:

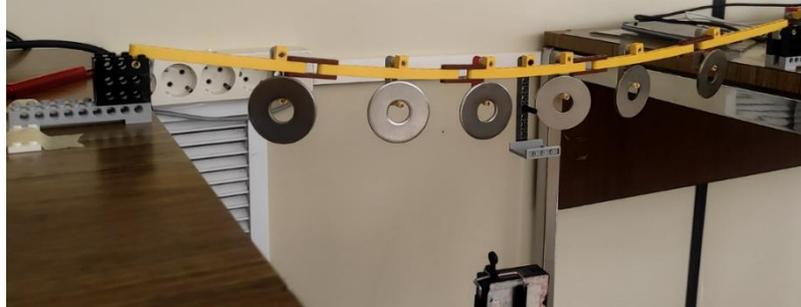


Figura 80. Ensayo viga dH



Figura 81. Renderizado Stud.io viga dH

Datos obtenidos a través del láser, figura 82, y el Excel, tabla 20:

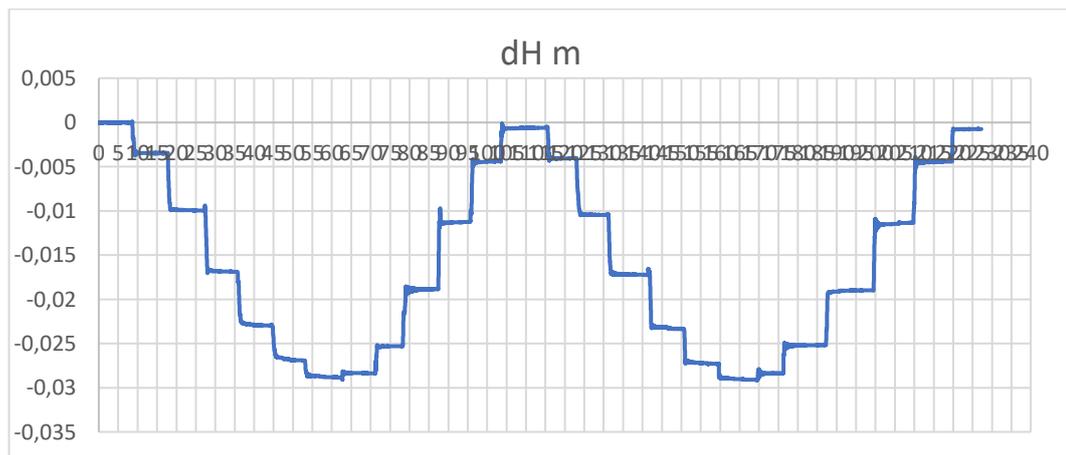


Figura 82. Gráfica viga dH

amplitud temporal	2				
en torno al segundo	5	60	110	165	225
promedio	-0,000011	-0,028807	-0,000621	-0,029017	-0,000743
incremento (m)		0,028796	-0,028186	0,028396	-0,028273
rigidez (N/m)		12,95	-13,23	13,13	-13,18

Tabla 20. Resultados viga dH

Capítulo 5. Tratamiento de datos.

Debido a la evaluación del comportamiento de la viga a flexión, el área de la misma no es relevante a la hora de proceder con la simulación, ya que no se ve involucrada en los cálculos. A pesar de ello, en SAP2000 se debe establecer un valor para el área. Siendo distinta según el número de conectores necesarios, se mide la masa de las vigas de forma individual y se establece su longitud efectiva.

El tratamiento de estos datos se realiza mediante Excel, a través de la siguiente tabla, en la cual se muestran los diferentes ensayos realizados según las UL de las vigas *Technic* implicadas, el número de unidades de dichas vigas, las UL efectivas de dichas vigas *Technic*, las restantes, el número de conectores (teniendo en cuenta que sólo interesa los de un lado, es decir, la mitad, para conocer la longitud en UL de la viga) y el número de UL del que se compone un conector. Con todo esto, se llega a la comprobación de que, entre apoyos, el número de UL son 78.

A través de estos datos, se generan los ratios que relacionan el número de conectores con las diferentes variables, tabla 21. Finalmente, se observa que el ratio más convincente e ilustrativo de la acción que supone el número de conectores para la caracterización de la viga es el de conectores/longitud.

Ensayo	Vigas	UL_efectivas	Resto_efectiv	Conectores	UL_C	Total UL	Relación V/C	Relación C/V	Ratio C/L
5	13	1	0	13	5	78	0,2	5	0,1666667
7	9	3	1	10	5	78	0,56	1,7857143	0,1282051
9	7	5	3	8	5	78	0,95	1,0526316	0,1025641
11	5	7	13	6	5	78	1,6	0,625	0,0769231
13	5	9	3	6	5	78	1,6	0,625	0,0769231
15	5	11	3	4	5	78	2,9	0,3448276	0,0512821
Mixta	1	43	5	6	5	78	1,6	0,625	0,0769231

Tabla 21. Valores y ratios de las diferentes vigas

Mientras, para la obtención de área promedio se ha procedido al pesaje de diez piezas de viga *Technic* de 15 UL con la finalidad de obtener una mayor precisión a la hora de conocer cuánto pesa realmente una unidad de UL. Mismo procedimiento se ha llevado a cabo para la obtención de la masa de un conector.

Sabiendo la densidad del ABS, el número de UL que faltan de contabilizar para la obtención del área promedio y la masa de los elementos involucrados, se obtiene el área promedio para cada viga a través de la siguiente relación:

$$\text{Área} = \frac{\text{masa}}{\text{longitud} \cdot \text{densidad}} \quad (4)$$

Que a través de Excel sería mediante el siguiente comando, mostrado en la tabla 22:

Ensayo	Vigas	UL efectivas V	Resto efectivo V	Conectores	UL C	Total UL	Relación V/C	Relación C/V	Ratio C/L	UL Área	Área	Gráfica	Densidad ABS	Pieza	Masa pieza	Masa UL
5	13	1	0	13	5	78	0,2	5	0,16666667	0	0,025523413	0,025616667	1050	15	3,87	0,258
7	9	3	1	10	5	78	0,56	1,785714286	0,128205128	5	0,026798223	0,026789744	Conector		0,71	
9	7	5	3	8	5	78	0,95	1,052631579	0,102564103	7	0,027581441	0,027571795				
11	5	7	13	6	5	78	1,6	0,625	0,076923077	17	0,028364652	0,028353846				
13	5	9	3	6	5	78	1,6	0,625	0,076923077	7	0,028364652	0,028353846				
15	5	11	3	4	5	78	2,9	0,344827586	0,051282051	-1	0,029147863	0,029135897	UL_V			
Mixta	1	43	5	6	5	78	1,6	0,625	0,076923077		0,028364652	0,028353846	72			

Tabla 22. Representación comando obtención área promedio

Finalmente, se tendría el promedio de áreas para cada situación, pudiendo relacionarlo con el ratio que se ha estado utilizando previamente. Así pues, se podría obtener el área promedio de la viga únicamente conociendo el número de conectores del que se compone, ratio clave para la caracterización que se ha estado persiguiendo durante la realización de este trabajo.

Dicho lo cual, la tabla 23 de valores obtenida es:

Ensayo	Vigas	UL efectivas V	Resto efectivo V	Conectores	UL C	Total UL	Relación V/C	Relación C/V	Ratio C/L	UL Área	Área	Gráfica	Densidad ABS	Pieza	Masa pieza	Masa UL
5	13	1	0	13	5	78	0,2	5	0,16666667	0	0,025523413	0,025616667	1050	15	3,87	0,258
7	9	3	1	10	5	78	0,56	1,785714286	0,128205128	5	0,026798223	0,026789744	Conector		0,71	
9	7	5	3	8	5	78	0,95	1,052631579	0,102564103	7	0,027581441	0,027571795				
11	5	7	13	6	5	78	1,6	0,625	0,076923077	17	0,028364652	0,028353846				
13	5	9	3	6	5	78	1,6	0,625	0,076923077	7	0,028364652	0,028353846				
15	5	11	3	4	5	78	2,9	0,344827586	0,051282051	-1	0,029147863	0,029135897	UL_V			
Mixta	1	43	5	6	5	78	1,6	0,625	0,076923077		0,028364652	0,028353846	72			

Tabla 23. Áreas promedio de las vigas

Por lo que la gráfica que relaciona el ratio C/L, figura 83, en el eje de abscisas, con el área promedio obtenida, en el eje de ordenadas, para la obtención de la fórmula correspondiente es:

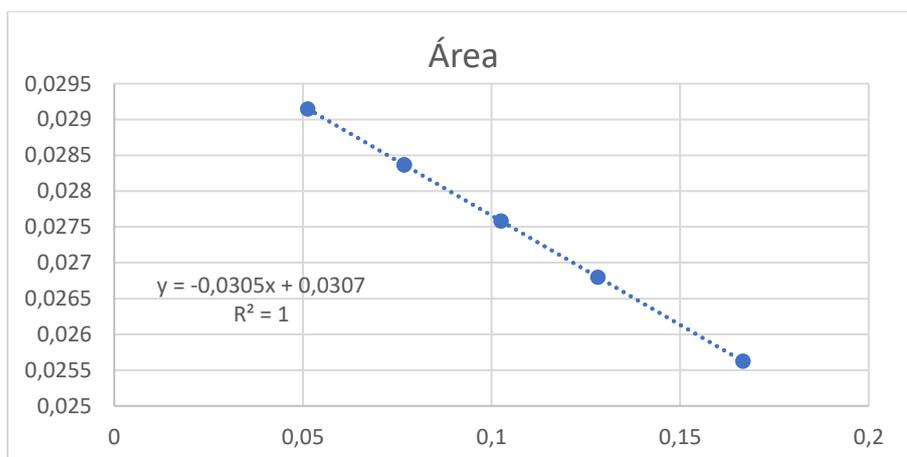


Figura 83. Gráfica relación áreas con ratio C/L

Siendo, por lo tanto, la fórmula a implementar para la obtención del área de cualesquiera vigas, la siguiente:

$$\text{Área} = -0,0305 \cdot \text{ratio}(C/L) + 0,0307 \quad (5)$$

Como bien se puede observar, el resultado sigue una recta completamente lineal, afianzando los valores que se obtengan para futuras caracterizaciones gracias a la recta de regresión obtenida y representada en la misma gráfica.

5.1. Caso horizontal.

Para el análisis de los datos que se han obtenido de la parte experimental en el caso de las vigas dispuestas en posición horizontal, se aglutinan los valores de las rigideces correspondientes a cada caso para cada tramo de carga y descarga correspondiente. Obteniendo, de esta manera, la tabla 24 en Excel:

Horizontal																										
C/L	Caso	K1	K2	K3	K4	D1	D2	D3	D4	% residual	K1	K2	K3	K4	D1	D2	D3	D4	% residual							
0,167	5H	85,42	70,16	64,13	46,26	-117,37	-87,96	-78,32	-77,00	-27,77%	91,28	88,80	78,49	63,96	-112,63	-88,77	-76,18	-67,70	-3,745%							
0,128	7H	63,57	58,53	52,52	40,46	-57,82	-69,04	-65,82	-55,32	-15,05%	63,57	58,53	52,52	40,46	-57,82	-69,04	-65,82	-55,32								
0,103	9H	56,07	52,29	57,29	60,55	-86,17	-60,96	-52,15	-52,37	-6,55%	55,52	56,13	60,62	71,12	-94,86	-59,87	-51,73	-51,97	-0,795%							
0,077	11H	50,66	49,47	55,44	65,76	-62,22	-76,61	-46,43	-48,29	-2,49%	49,27	52,06	56,81	69,65	-96,03	-53,32	-47,75	-46,91	-0,049%							
0,077	13H	47,88	49,24	56,20	72,79	-94,61	-60,86	-46,35	-45,95	-3,28%	48,68	50,73	57,53	73,31	-99,62	-56,51	-45,06	-45,66	0,752%							
0,051	15H	52,53	52,61	55,86	59,70	-78,08	-59,78	-49,30	-49,91	-3,91%	53,55	54,27	61,55	64,39	-80,49	-56,65	-52,17	-49,83	0,605%							
0,076	mH	48,73	50,45	57,56	65,78	-95,12	-55,32	-48,61	-48,53	-4,32%	52,72	51,16	58,34	69,01	-93,85	-53,94	-48,96	-48,70	0,00%							
promedio	carga	57,07				descarg				-65,22	-9,84%				carga 60,86				descarg -65,26				-0,65%			

Tabla 24. Análisis datos vigas horizontales

En ella se establecen las diferentes columnas, partiendo de la relación entre el número de conectores y la longitud, para cada caso. Seguidamente, los casos de carga se muestran con la inicial “K”, mientras que los de descarga se muestran con una “D”. Mientras, la columna que encabeza el “% residual” indica el porcentaje de desplazamiento que no se ha podido recuperar respecto al estado inicial en dicho tramo de carga-descarga.

Respecto al análisis residual, es fácilmente visible la diferencia que hay en los porcentajes entre el primer tramo y el segundo tramo de carga-descarga. Una posible explicación a esto es que, debido a que las uniones no son perfectas (cabe recordar que es un ensayo experimental y que, por ende, cabe tener errores), estas, con el aumento de la carga y la descarga, tienden a soltarse. Es por ello que se observó la situación generada en la figura 84:

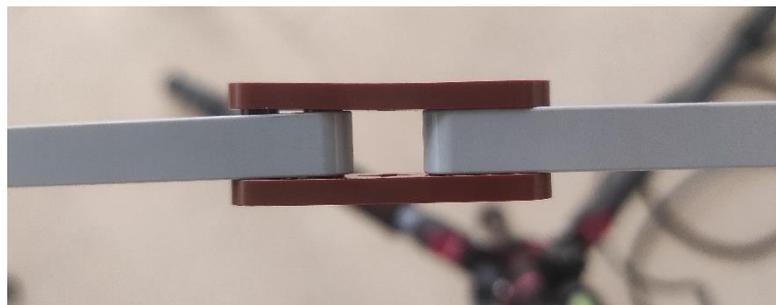


Figura 84. Fallo unión conectores debido a carga

Aunque sea más visible el estado de desacople de la parte de arriba a la izquierda de la imagen, también en el resto se vislumbra esa misma situación, aunque en menor medida.

Además, en la primera descarga del primer escalón siempre se marca una rigidez mucho más grande. La hipótesis que se supone es la de que, debido al

rozamiento o a la fricción seca de Coulomb, se genera un cambio de dirección en las piezas, ensamblajes y pines. Es decir, hay un momento en el que la fricción está sujetando la estructura durante dicho cambio de dirección, hasta que se suelta.

Por lo tanto, se utiliza el segundo tramo de carga-descarga para el análisis de resultados, ya que es el que resulta más estable. Teniendo como recta de regresión la representada en la figura 85, teniendo en el eje de abscisas la relación conectores-longitud y en las ordenadas la rigidez:

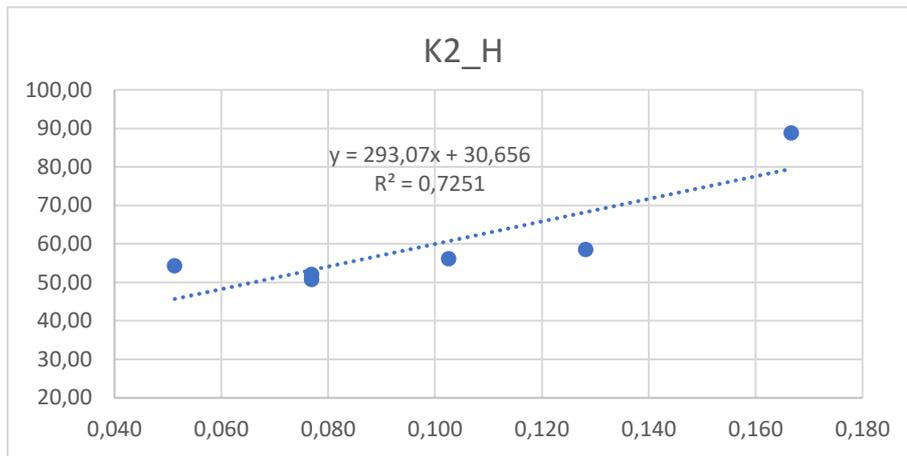


Figura 85. Gráfica recta de regresión rigidez casos horizontales

Con la fórmula de la recta de regresión mostrada se puede obtener la rigidez de cualquier viga en horizontal según la relación conectores-longitud que presente.

$$Rigidez_H = 293,07 \cdot ratio(C/L) + 30,656 \quad (6)$$

Según la recta de regresión generada para la rigidez en casos de vigas horizontales, se puede observar el error que se ha generado para los diferentes casos ensayados. Para un mejor análisis, se dispone de la tabla 25, mostrada a continuación:

Viga	5H	7H	9H	11H	13H	15H
K2 real	88,80	58,53	56,13	52,06	50,73	54,27
K2 recta regresión	79,50	68,23	60,71	53,20	53,20	45,69
Error	10,48%	-16,56%	-8,17	-2,19%	-4,87%	15,82%
Error promedio	-0,92%					

Tabla 25. Errores generados entre rigidez real y de recta de regresión para vigas horizontales

$$Rigidez_V = -149,04 \cdot ratio(C/L) + 102,41 \quad (7)$$

Obtenida la recta de regresión, se procede como en el caso de vigas horizontales, mostrando así qué error se ha generado respecto a la rigidez real obtenida mediante los ensayos a través de la tabla 27:

Viga	5H	7H	9H	11H	13H	15H
K2 real	87,07	87,07	87,07	87,07	87,07	87,07
K2 recta regresión	77,57	77,57	77,57	77,57	77,57	77,57
Error	10,91%	-2,77%	-12,90%	-11,62%	-7,92%	16,57%
Error promedio	-1,29%					

Tabla 27. Errores generados entre rigidez real y de recta de regresión para vigas verticales

Como era de esperar, ya que en el caso de las vigas horizontales no ha habido mayor problema, la recta de regresión para casos de viga vertical apenas genera un error promedio, aunque para los casos particulares estos también sean dispares. Por lo tanto, la recta de regresión para casos de vigas verticales entra dentro de los valores aceptables para poder utilizarla para futuros cálculos, tal y como se verá posteriormente.

Capítulo 6. Simulación.

Para cumplir con los objetivos de este trabajo de fin de grado, se realiza la simulación de los ensayos de la viga mixta y la viga con cargas puntuales distribuidas, ejercidos previamente. El fin de esto es que se compruebe y verifique que, dado un número de conectores, la caracterización de la viga permite calcular el desplazamiento central generado según las diferentes cargas que se implementen.

Se debe tener en cuenta que, para la obtención de los resultados de la batería de ensayos correspondientes a la rigidez, no se ha utilizado los casos de carga puntual distribuida, ni para el horizontal ni para el vertical. Es decir, no se ha utilizado dicha viga para su caracterización, pero se pueden comparar los valores obtenidos con los que se generarán posteriormente en simulación para verificar si se cumplen los objetivos.

Para esta simulación se utilizará el programa SAP2000, en el cual se deberán introducir los valores de dicha caracterización. Una vez introducidos, se realizará la comprobación con los ensayos reales y se establecerá si estos son válidos.

Teniendo en cuenta los valores de la tabla para el ABS, se puede establecer que el valor del módulo de elasticidad es conocido y tiene como valor 2,25 GPa. Por lo que, teniendo ya el valor del módulo de elasticidad, podemos calcular el valor de la inercia correspondiente a la viga a través de la recta de regresión del segundo tramo de carga y descarga.

6.1. Viga mixta horizontal.

Siendo la recta de regresión de las vigas en horizontal, donde r es el ratio C/L:

$$KH = 293 \cdot r + 30,656 = 293 \cdot 0,076292308 + 30,656 \rightarrow KH = 53,009$$

La obtención de la inercia promedio en función de dicha relación entre el número de conectores y la longitud sería a través de la siguiente función:

$$IH = \frac{L^3 \cdot KH}{48 \cdot E} = \frac{(78 \cdot 0,008)^3 \cdot 53,009}{48 \cdot 2,25 \cdot 10^9} = 1,1926 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4$$

Se estipula, por tanto, que las propiedades del material a utilizar en vigas horizontales mediante la estructura creada con LEGO *Technic* son los siguientes:

- Módulo de elasticidad (E)= 2,25·10⁹ N/m².
- Inercia (I)= 1,1926·10⁻¹⁰ m⁴.

- Densidad (ρ) = 1.050 Kg/m³.
- Coeficiente de Poisson (ν) = 0,394.
- Área (A) = 0,02836 m².

Se comienza asignando el tipo de modelo que se necesita. Para ello, aparece la siguiente ventana de la figura 87, donde se seleccionan las siguientes opciones y en “*Select Template*” se pincha en “*Grid Only*”, para automáticamente generarse otra ventana.

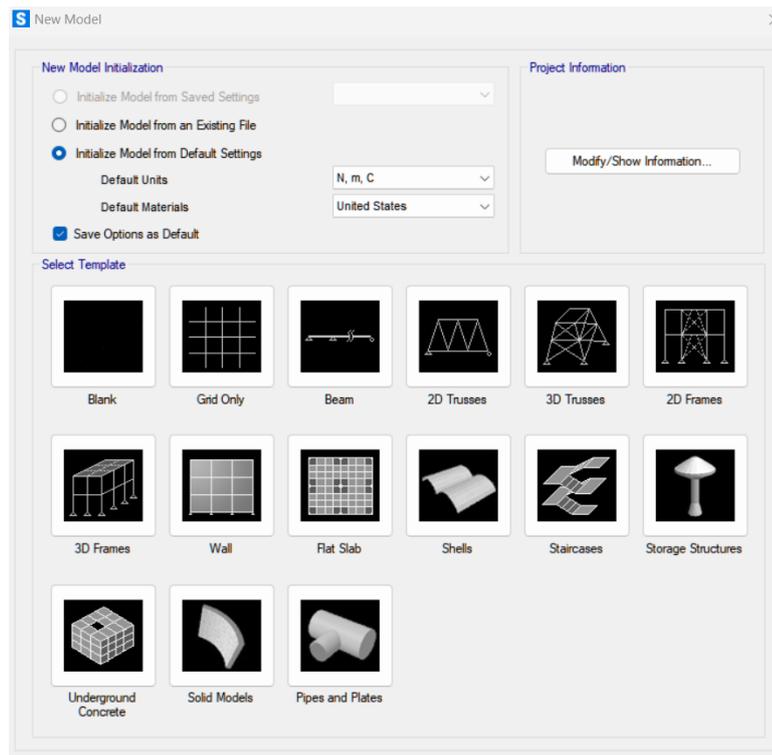


Figura 87. Tipo de modelo a utilizar

Se establece la longitud de la viga y la distancia del punto medio, que es objeto de estudio, ya que es donde se han colocado las masas en el ensayo experimental. Esto se consigue estableciendo los siguientes valores mostrados en la figura, ya que se tienen tres puntos a tener en cuenta. Siendo estos los correspondientes a los dos apoyos y al punto central donde se incorporan las masas y se mide el desplazamiento. Es por ello que en “*Number of Grid Lines*” en “*X direction*” se establece el valor de 3.

Mientras, para facilitar la distribución de dichos tres puntos, y teniendo en cuenta que estos están a igual distancia, se insta a que en “*Grid Spacing*” en “*X direction*” aparezca el valor de 0,312 m correspondiente, como bien muestra la figura 88.

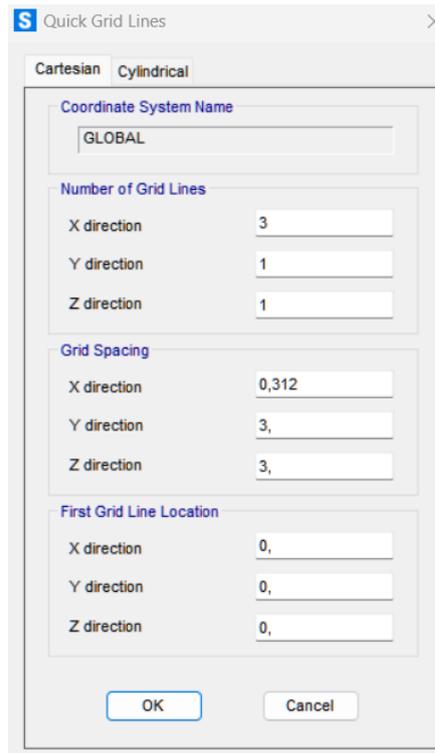


Figura 88. Disposición de la cuadrícula mH

Para definir el sistema se pulsa con el botón derecho en el espacio en blanco para posteriormente pinchar en “Edit Grid Data...”, donde se abrirá lo mostrado en la figura 89.

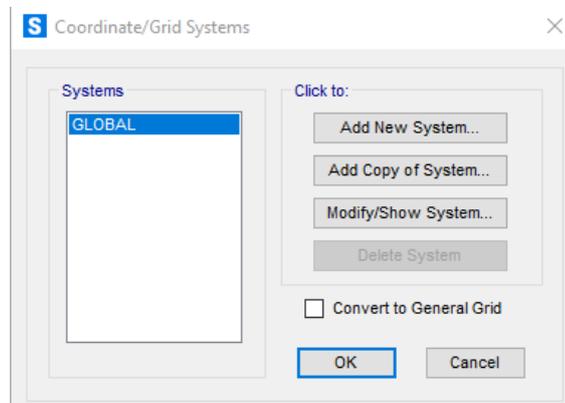


Figura 89. Sistema utilizado

Una vez en ella, se modifica el sistema pinchando en “Modify/Show System...”. Teniendo en cuenta el valor de espaciado presentado anteriormente, no hace falta modificar los datos que se presentan en la figura 90.

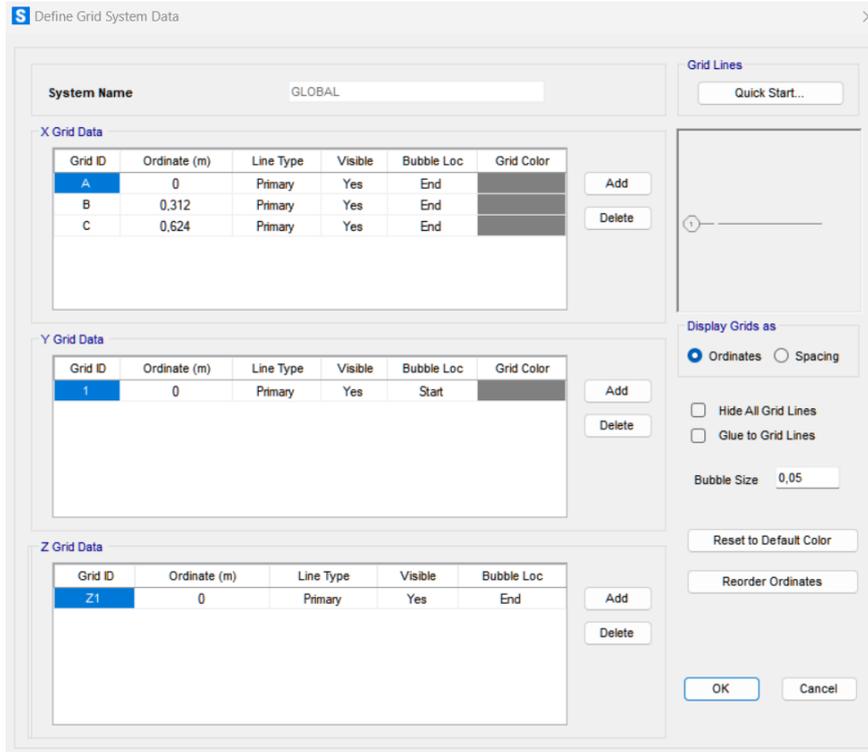


Figura 90. Datos definidos de la cuadrícula del sistema mH

Dando al “OK” se mostrará la representación de la viga, en la figura 91, de esta manera :

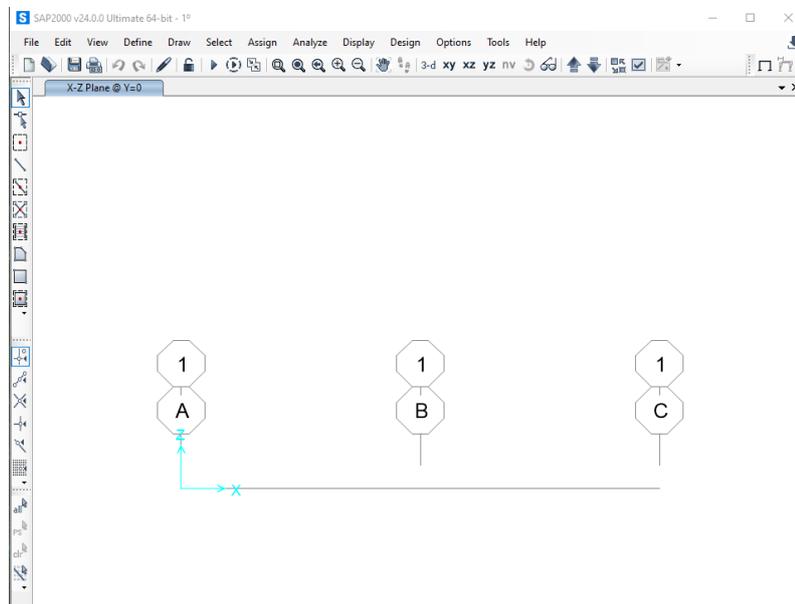


Figura 91. Disposición de la viga mH

A continuación, se define el material a emplear, el cual establece LEGO Technic y que se ha definido anteriormente. Al visualizar la pestaña superior “Define” y se pincha en “Materials...”, donde se generará un nuevo material, como bien

muestra la figura 92, ya que SAP2000 no recoge a LEGO *Technic* entre sus preestablecidos.

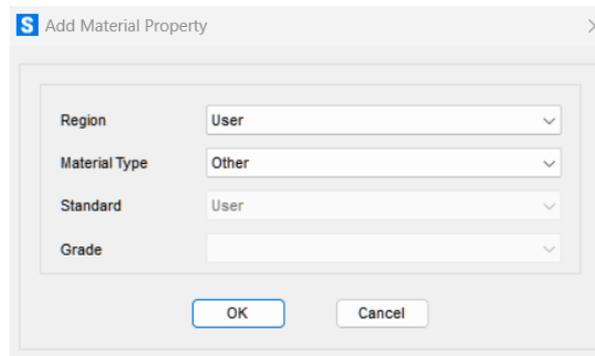


Figura 92. Añadir propiedades del material

Como no se realizan cambios de temperatura, el coeficiente de expansión térmica es indiferente. Por lo que sólo es necesario rellenar el resto de propiedades. A tener en cuenta que en “Weight and Mass” se solicita el peso por unidad de volumen para obtener la masa por unidad de volumen; por lo que, conociendo la densidad, esta se multiplica por la gravedad para obtener dicho peso por unidad de volumen, como bien se muestra en la figura 93.

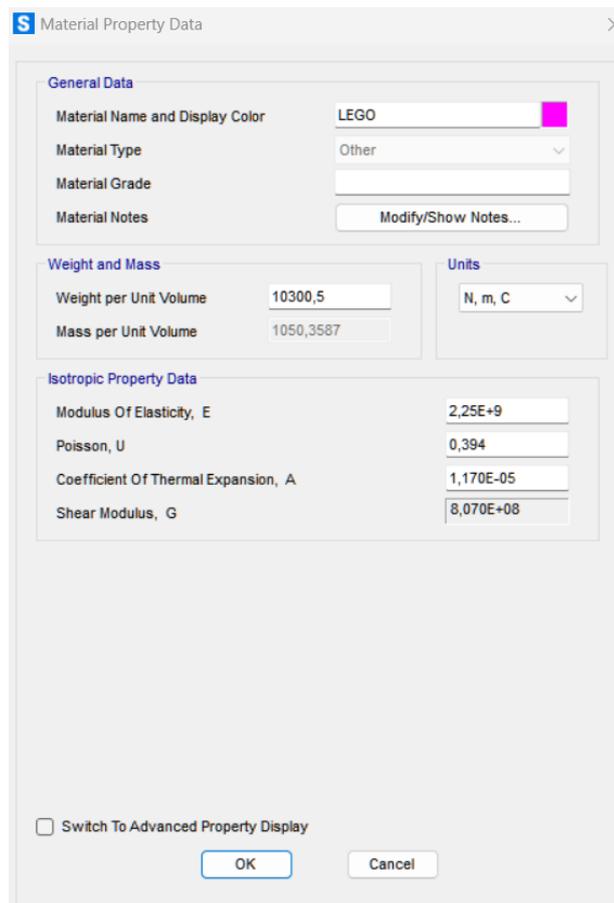


Figura 93 Datos de propiedades del ABS

Para establecer las magnitudes de la sección se procede a ir a “Define” → “Section Properties...” → “Frame Sections...” donde se introducirán los valores correspondientes a la viga, figura 94. Como estos valores no están preestablecidos en el programa, se deben introducir manualmente. Es por ello que en “Frame Section Property Type” se debe seleccionar “Other”, para posteriormente indicar el tipo “General”.

Section Name: LEGOMIX			
Properties			
Cross-section (axial) area	0.02836	Section modulus about 3 axis (top)	1.
Moment of Inertia about 3 axis	1.1926e-10	Section modulus about 3 axis (bottom)	1.
Moment of Inertia about 2 axis	1.1926e-10	Section modulus about 2 axis (left)	1.
Product of Inertia about 2-3	0.	Section modulus about 2 axis (right)	1.
Torsional constant	1.	Warping Constant (Cw)	0.
Shear area in 2 direction	0.	Plastic modulus about 3 axis	1.
Shear area in 3 direction	0.	Plastic modulus about 2 axis	1.
CG offset in 3 direction	0.	Radius of Gyration about 3 axis	1.
CG offset in 2 direction	0.	Radius of Gyration about 2 axis	1.
Shear Center Offset (x3)	0.		
Shear Center Offset (x2)*	0.		

* Value is not used in analysis

Figura 94. Propiedades de la viga mH

Debido a que únicamente interesa la flexión respecto al eje Z, la inercia en X no es objeto de este estudio, así que se introduce la misma, por tener algún valor.

A la hora de introducir los valores de la sección de la viga, en la figura 95, de área 0,02836 m², se establece un ancho y una altura iguales, ya que, al ser una sección generada, esta no estará definida, al ser del tipo “General”. Esta altura y anchura serán las correspondientes a 1 UL, es decir, 8 mm.

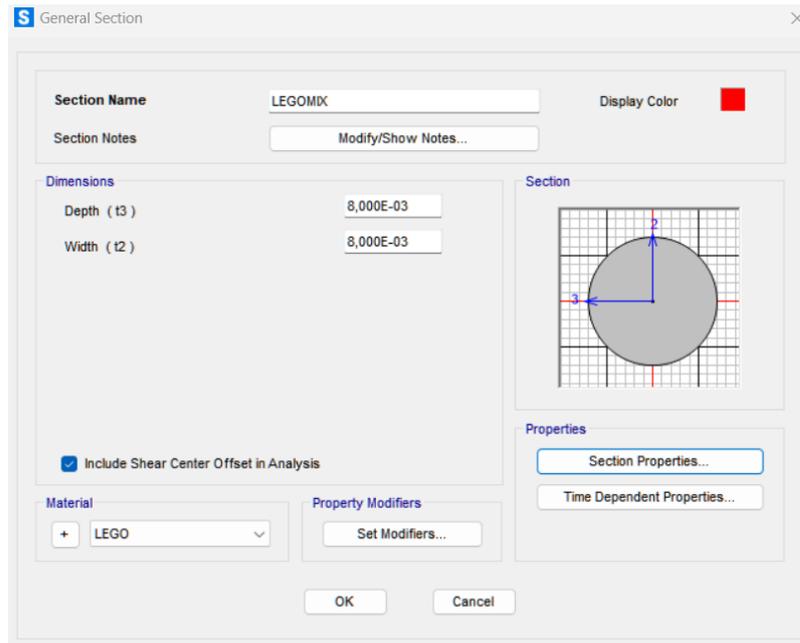


Figura 95. Sección de la viga mH

El siguiente paso será el de trazar la geometría. Para ello se procede a utilizar las “Herramientas de dibujo”, concretamente “Frames”, la cual permite trazar barras. Para que esto sea más rápido se utilizará “Quick Draw Frame/Cable”. En este caso se establece una barra estilo “Straight Frame”, es decir, una barra recta.

Al pinchar en ambas regiones de la viga se observa cómo se ha cambiado el color de la misma, mostrando en la figura 96 que la viga tiene las características que se buscaban.

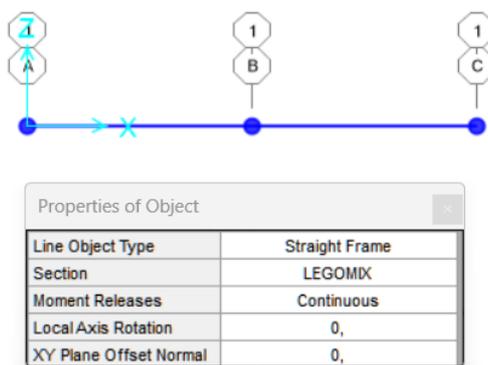


Figura 96. Trazado de la geometría mH

Es hora de aplicar las condiciones de contorno, donde se posicionará el apoyo fijo y móvil, a la izquierda y derecha, respectivamente. Para ello se selecciona el “Grid Point” del punto de interés, y después se pincha en “Assign” → “Joint”

→ “*Restraints*”. En dicha ventana, mostrada en la figura 97 y 98, se marcarán los grados de libertad que sean necesarios restringir, aunque una forma más rápida de maniobrar la ofrece el propio programa, pudiendo hacer selección en una de las cuatro opciones de “*Fast Restraints*”.

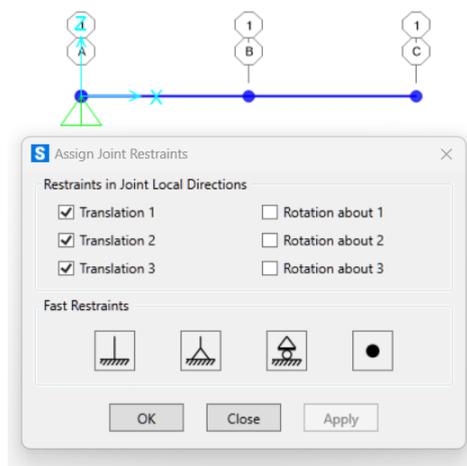


Figura 97. Implementación del apoyo izquierdo fijo en mH

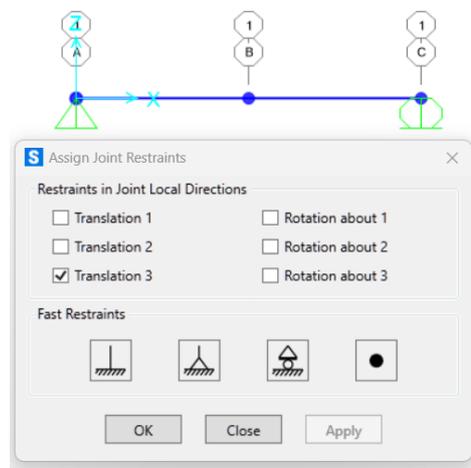


Figura 98. Implementación del apoyo derecho móvil en mH

Para introducir la carga en el punto medio a la estructura se utilizará “*Load Cases*”. Primero generando la carga a través de “*Define*” → “*Load Patterns*” → “*Add New Load Pattern*”. Como se pretende incorporar hasta cuatro masas de 38 g, se establecen los siguientes “*Load Pattern Name*” de tipo “*Other*” mostrados en la figura 99.

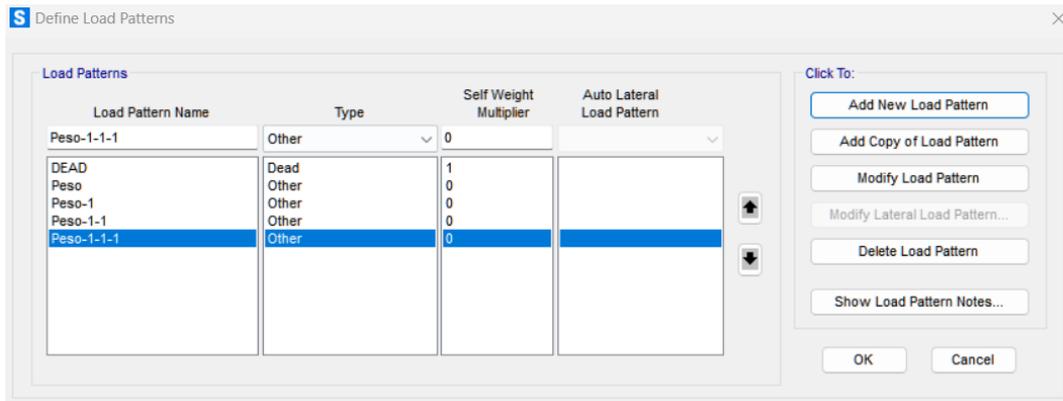


Figura 99. Generación de cargas en mH

Se procede a asignar el valor de la fuerza ejercida por el peso al punto medio de la viga, mostrado en la figura 100 y 101, el cual se selecciona previamente, a través de “Assign” → “Joint Loads” → “Forces...”. En el cual se establece el valor de la fuerza para el caso que se realizará, que en este caso serán los valores de la masa que se ha ido incorporando. Es decir, siendo la masa de 38 g, el peso por cada una de ellas será de 0,3728 N.

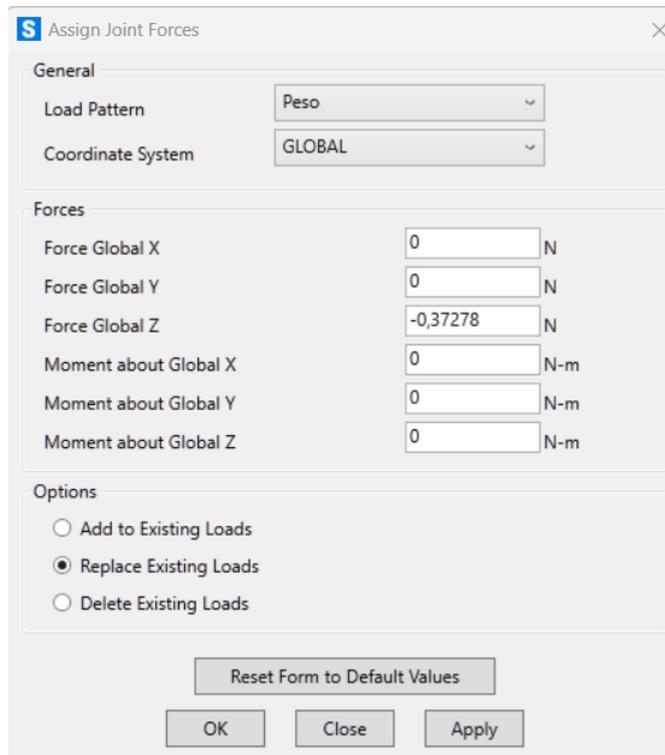


Figura 100. Asignación de cargas en mH

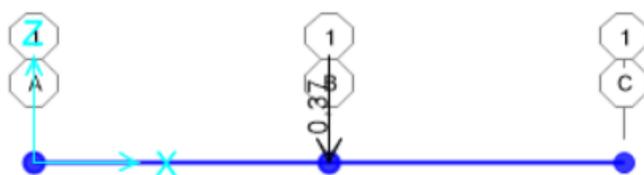


Figura 101. Ejemplo de 1 carga implementada

Se repite, para la misma posición, para cada uno de los pesos que se quieren incorporar. Basta con multiplicar el valor de “Force Global Z” por el número de masas que se incorporan en cada caso. Es decir, para “Peso-1” se multiplica por dos, para “Peso-1-1” se multiplica por tres, y para “Peso-1-1-1” se multiplica por cuatro.

Para el cálculo y la visualización de los resultados sólo queda indicar que se establece un análisis plano. Para ello, se pincha en “Analyze” → “Set Analysis Options...” y se activa la opción de “Fast DOFs” de “XZ Plane”, como bien muestra la figura 102.

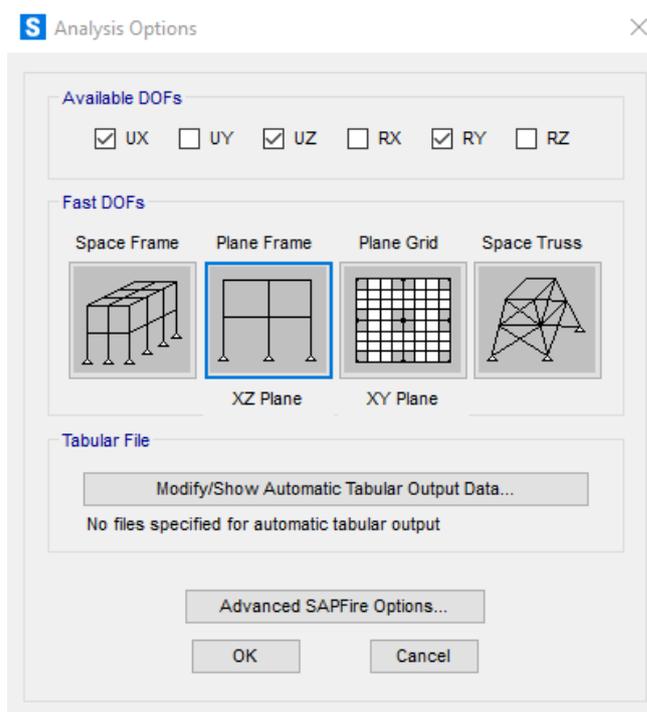


Figura 102. Opciones de análisis

Finalmente, se procede a lanzar el cálculo a través del icono del “Play”, abriéndose una ventana, figura 103, con el caso de carga que se ha creado. Se establece que únicamente actuarán las cargas que se han incorporado y no las correspondientes a “DEAD” ni “MODAL”, ya que sólo se quiere calcular los casos de los pesos.

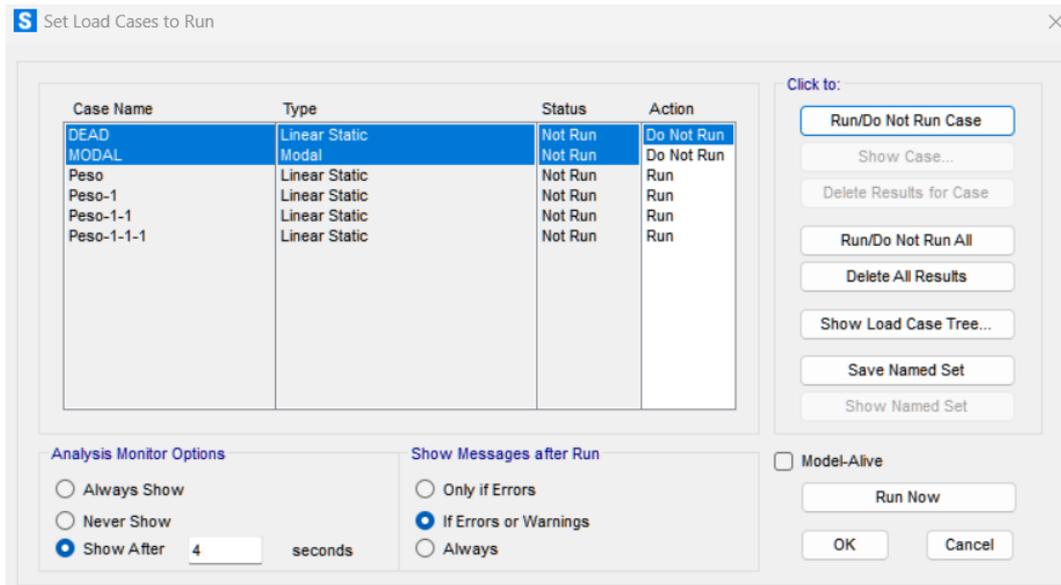


Figura 103. Establecer las cargas a ejecutar en mH

SAP2000 representará la figura 104 con la deformada generada debido a la carga incorporada, pero se debe implementar qué escenario es el que se quiere mostrar.



Figura 104. Deformada generada en primera instancia

Para ver el desplazamiento generado se dirige el cursor a “Show Deformed Shape”, donde se abrirá la figura 105, en la cual se selecciona la carga a visualizar de entre las cuatro que se han ido incorporando.

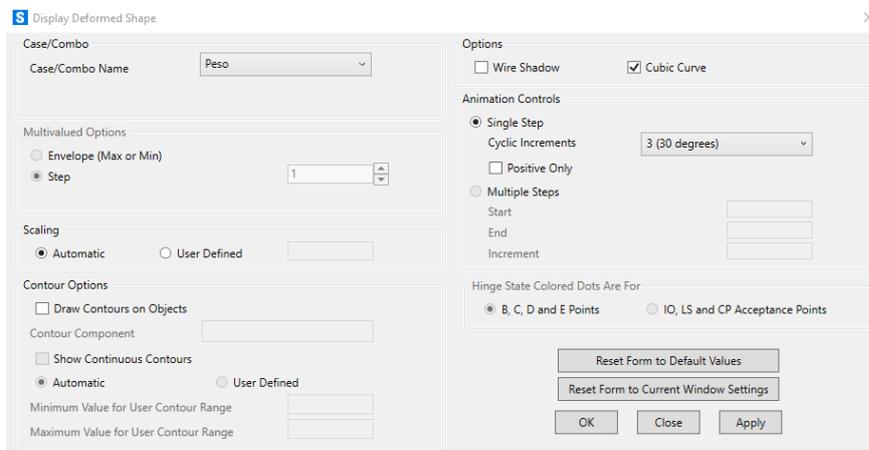


Figura 105. Establecimiento de la carga a mostrar en mH

Para resumir la presentación de los casos se mostrará un único ejemplo de cómo estos se realizan. Es por lo cual que se observa que el desplazamiento generado por el peso de 2x38 g introducido en el punto medio de la viga es el mostrado a continuación en la figura 106:



Figura 106. Deformada generada por la acción de dos cargas centrales

Finalmente, los valores obtenidos mediante simulación para cada una de las cargas incorporadas son los mostrados en la tabla 28:

	Peso	Peso-1	Peso-1-1	Peso-1-1-1
SAP	-0,00703	-0,01263	-0,02110	-0,02813

Tabla 28. Desplazamientos generados en la viga mH por diferentes cargas

6.2. Viga mixta vertical.

Debido a que la viga presenta, en principio, las mismas características físicas que la anterior, únicamente cambia el posicionamiento de la misma, es por lo cual que su rigidez será otra. Se procede, por tanto, a realizar la obtención de dichos datos a través de la recta de regresión calculada para vigas en posicionamiento vertical, teniendo en cuenta la relación conectores-longitud que presenta esta disposición.

$$KMV = -149,04 \cdot r + 102,41 = -149,04 \cdot 0,076292308 + 102,41 \rightarrow KMV = 91,0394$$

$$IMV = \frac{L^3 \cdot KMV}{48 \cdot E} = \frac{(78 \cdot 0,008)^3 \cdot 91,0394}{48 \cdot 2,25 \cdot 10^9} = 2,0481 \cdot 10^{-10} m^4$$

Comentado lo anterior, en SAP2000 se realiza el mismo procedimiento que con la viga mixta horizontal hasta el momento de definir los valores de la sección,

figura107, donde se introducirá el nuevo valor de la inercia, aunque el área sigue manteniéndose igual.

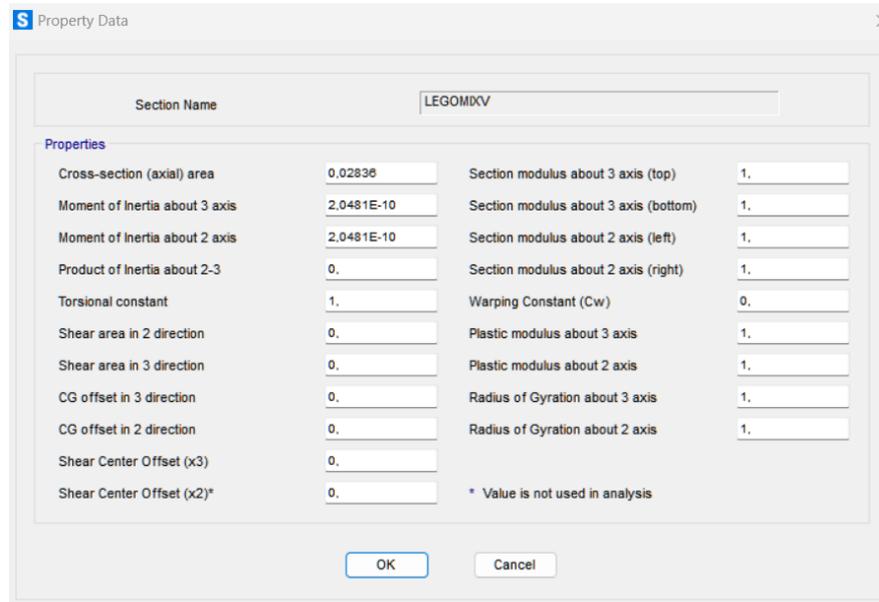


Figura 107. Propiedades de la viga mV

Continuando con el procedimiento, siendo este el mismo al ser los mismos valores de pesos aplicados a la misma altura que en el anterior, se presentan en la tabla 29 los valores de los desplazamientos generados por las diferentes cargas.

	Peso	Peso-1	Peso-1-1	Peso-1-1-1
SAP	-0,00409	-0,00819	-0,01228	-0,01638

Tabla 29. Desplazamientos generados en la viga mV por diferentes cargas

6.3. Viga con seis cargas puntuales horizontal.

Una vez obtenidos los resultados mediante simulación de los ensayos de distribución mixta sólo queda continuar con el siguiente, el cual se trata de la viga con cargas puntuales distribuidas a lo largo de la misma; en este caso, siendo el de la horizontal. Se procede a obtener, igual que con el ensayo previamente mostrado, los valores característicos de la viga utilizada.

Por lo que, teniendo ya el valor del módulo de elasticidad, podemos calcular el valor de la inercia correspondiente a la viga a través de la rigidez previamente calculada y la relación conectores-longitud que se ha estado investigando.

$$KDH = 293 \cdot r + 30,656 = 293 \cdot 0,05128205 + 30,656 \rightarrow KDH = 46,681$$

$$IDH = \frac{L^3 \cdot KDH}{48 \cdot E} = \frac{(78 \cdot 0,008)^3 \cdot 46,681}{48 \cdot 2,25 \cdot 10^9} = 1,0502 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4$$

Se estipula, por tanto, que las propiedades del material a utilizar en el primer ensayo mediante la estructura creada con LEGO *Technic* son los siguientes:

- Módulo de elasticidad (E)= 2,25·10⁹ N/m².
- Inercia (I)= 1,0502·10⁻¹⁰ m⁴.
- Densidad (ρ) =1.050 Kg/m³.
- Coeficiente de Poisson (ν) =0,394.
- Área (A)= 0,02915 m².

Para la realización de la simulación en SAP2000 no queda más que seguir el procedimiento realizado en el anterior caso. Pero teniendo en cuenta los cambios de variables necesarios para realizar dicha simulación.

Primero, la distribución de los puntos a evaluar a lo largo de la viga. Ya que esta vez se tienen seis cargas puntuales y el láser que mide el incremento de desplazamiento en el punto central. Es por lo cual que se establecen nueve puntos en la dirección X, siendo estos los dos apoyos, las seis cargas y el punto central donde se mide el desplazamiento generado.

Además, como en el caso de las vigas mixtas, se estipula un espaciado de 0,096 m en la dirección X para facilitar el futuro posicionamiento de los nueve puntos. La figura 108 mostrará todos los valores definidos:

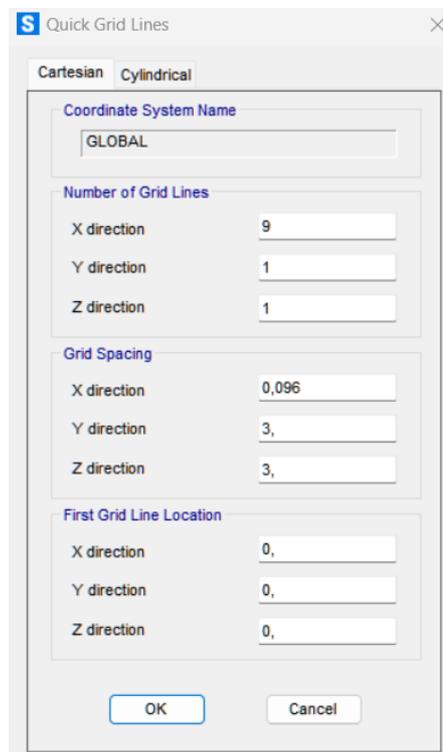


Figura 108. Disposición de la cuadrícula dH

Se sigue la siguiente distribución a través de la aplicación del espaciado entre los diferentes puntos: 0,096 - 0,096 - 0,08 - 0,04 - 0,04 - 0,08 - 0,096 - 0,096 metros. Los cuales se han implementado en “Define Grid System Data”, figura 109, como se hizo con la viga mixta.

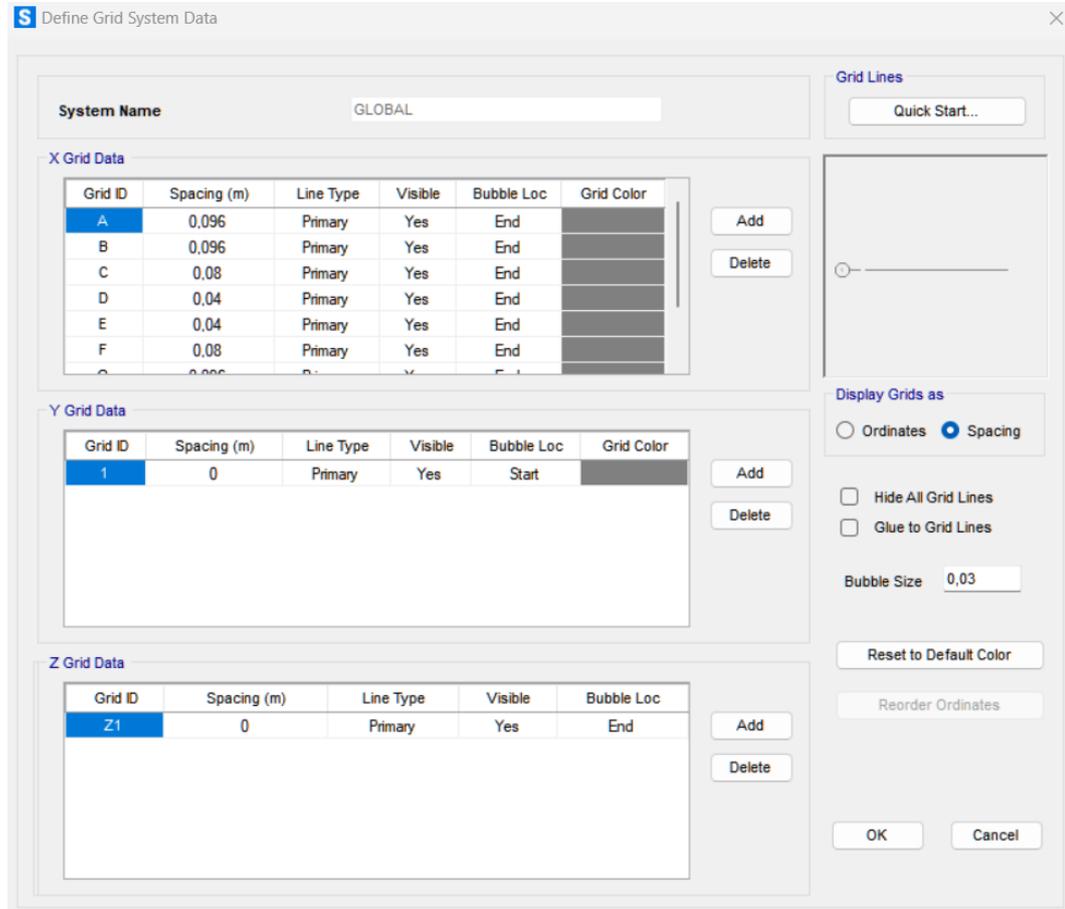


Figura 109. Datos definidos de la cuadrícula del sistema dH

La representación de los puntos que se quieren evaluar será la de la figura 110:

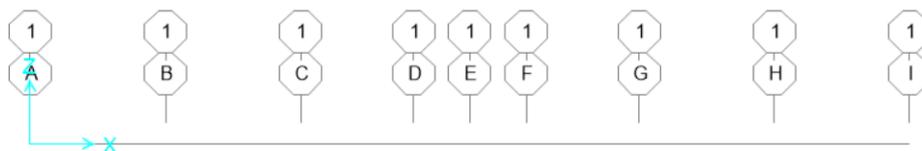


Figura 110. Disposición de la viga dH

El material a emplear tendrá un nuevo valor de inercia, es por ello que se debe generar uno nuevo e introducir los valores calculados previamente en “Materia Property Data” y en “Property Data”, figura 111.

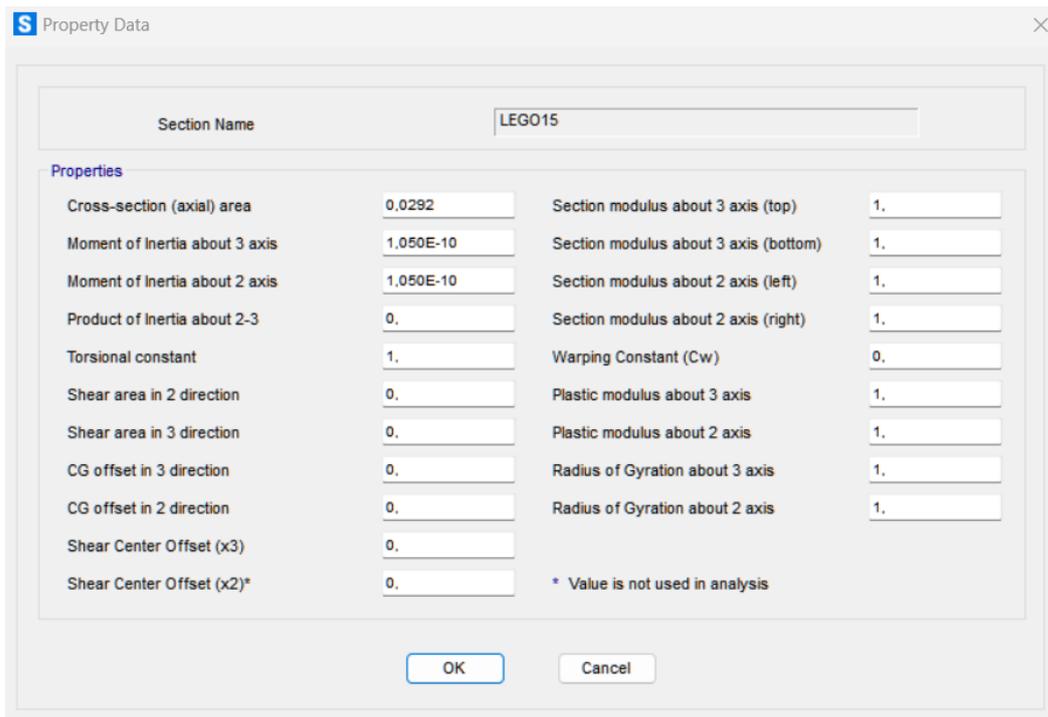


Figura 111. Propiedades de la viga dH

Con el nuevo área promedio, el cual es el mismo que para la viga de 15 UL, ya que se ha utilizado la misma composición, se establecen los valores en “General Section”, figura 112.

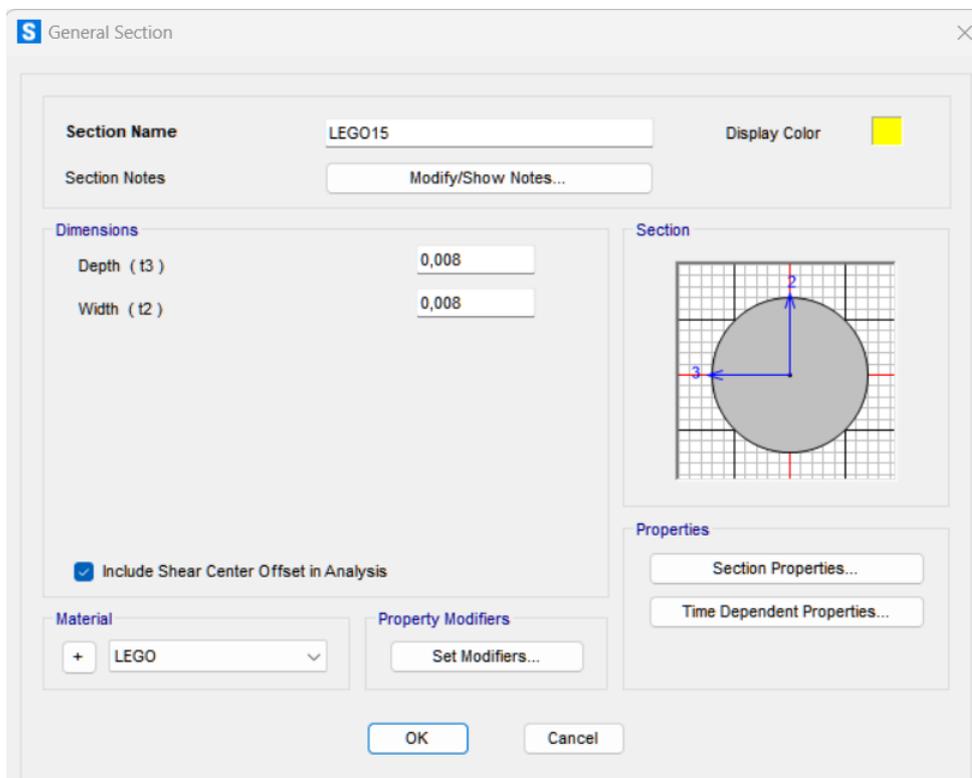


Figura 112. Sección de la viga dH

La distribución a generar es la de la figura 113:

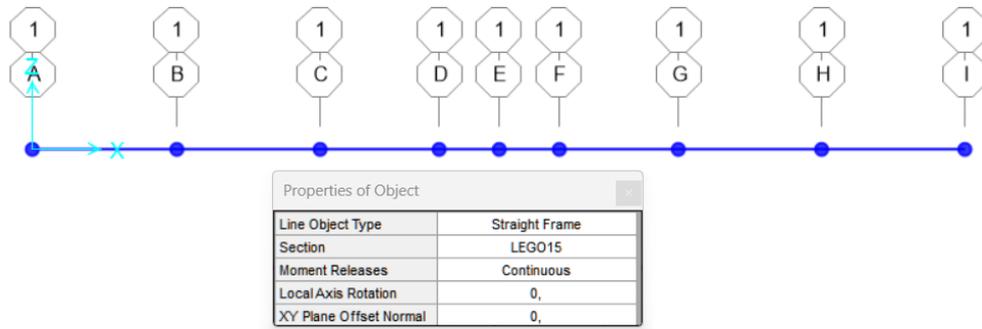


Figura 113. Trazado de la geometría dH

Se incorporan los apoyos fijo y móvil en los extremos, como muestra la figura 114 y 115.

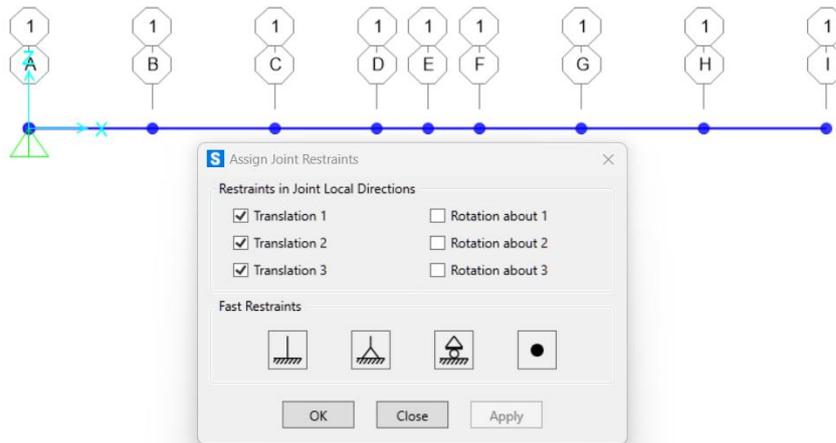


Figura 114. Implementación del apoyo izquierdo fijo en dH

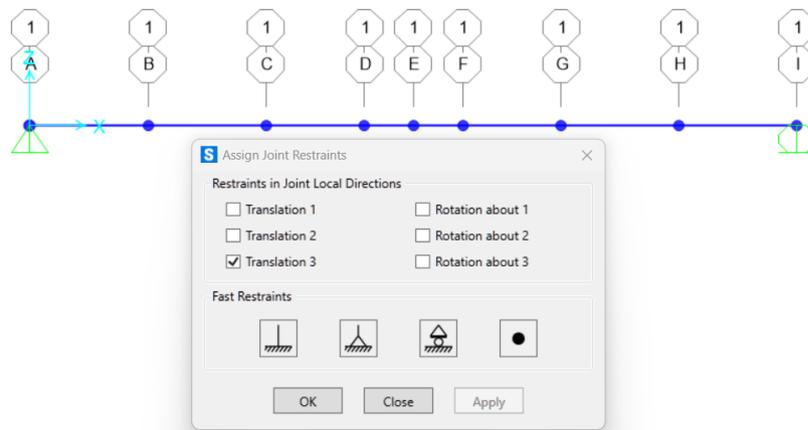


Figura 115. Implementación del apoyo derecho móvil en dH

A continuación, estando la viga ya bien montada, se procede a establecer la carga de los diferentes puntos. Para lo cual se sigue como en anterioridad, definiendo las cargas que se van a integrar mediante “Define Load Patterns”, figura 116. El nombramiento de las cargas sigue el mismo procedimiento que en el caso de las mixtas, sólo que en este caso corresponde al número de cargas que se han ido distribuyendo sobre la viga de derecha a izquierda.

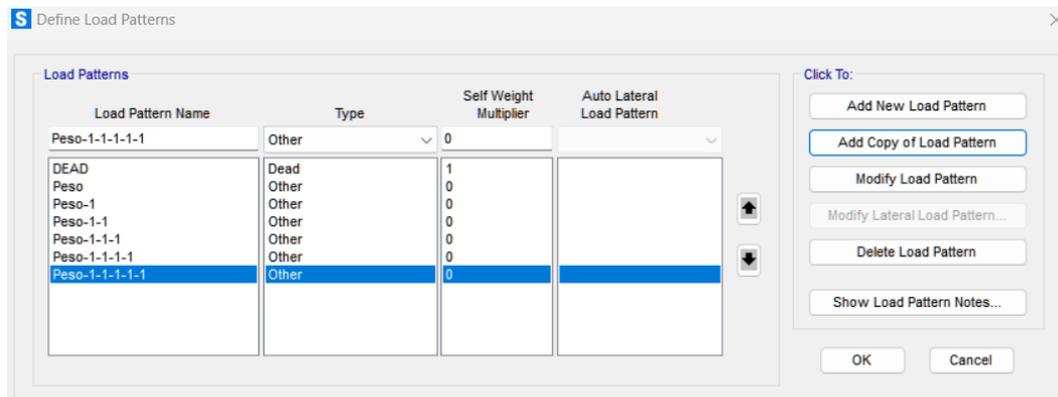


Figura 116. Generación de cargas en dH

Se asigna a cada una de ellas el valor de los pesos que se han ido incorporando, figura 117. Al ser estos de 38 g, el peso en cada uno de ellos será de 0,3728 N.

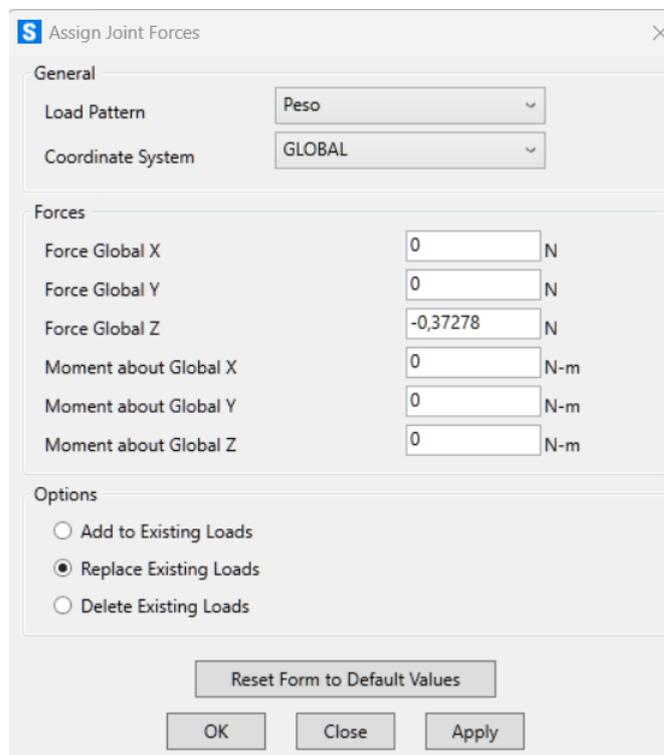


Figura 117. Asignación de cargas en dH

Para implementar los pesos, se ha ido seleccionando de derecha a izquierda, siendo el punto “H” para “Peso”, “H” y “G” para “Peso-1” y así sucesivamente, teniendo en cuenta que “E” es la posición donde estaría apuntando el láser, pues es el punto central donde se mide el desplazamiento, y que los puntos “A” e “I” son los apoyos, según muestra la figura 118 y 119.

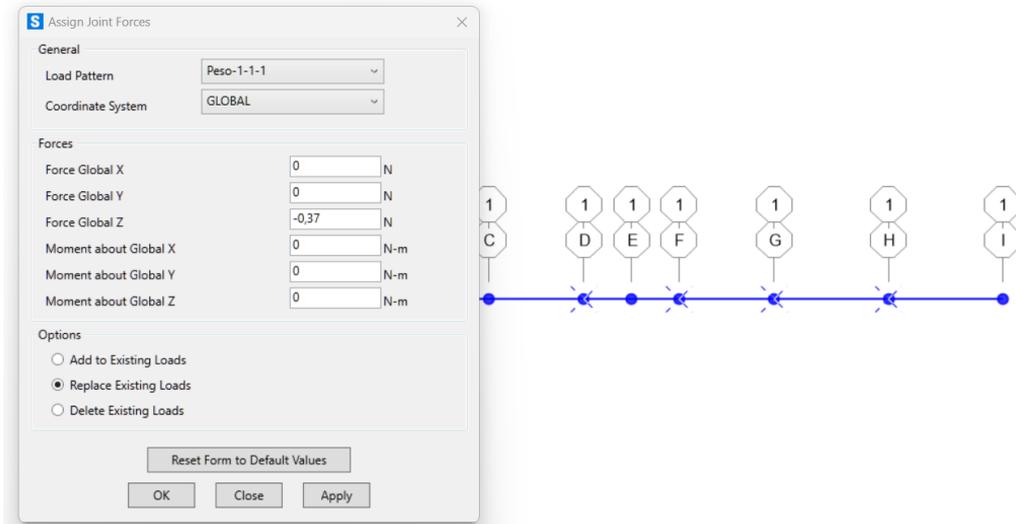


Figura 118. Implementación de 4 cargas puntuales distribuidas

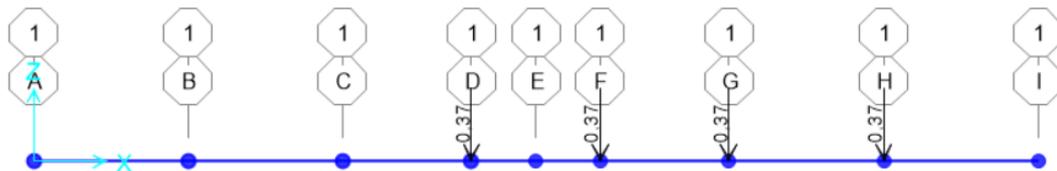


Figura 119. Representación de 4 cargas puntuales distribuidas

Una vez se han establecido el posicionamiento de cada distribución de cargas, se ejecuta el programa según los pasos que se han dado con anterioridad y restringiendo la acción tanto del caso “DEAD” como el del “MODAL”, mostrado en la figura 120.

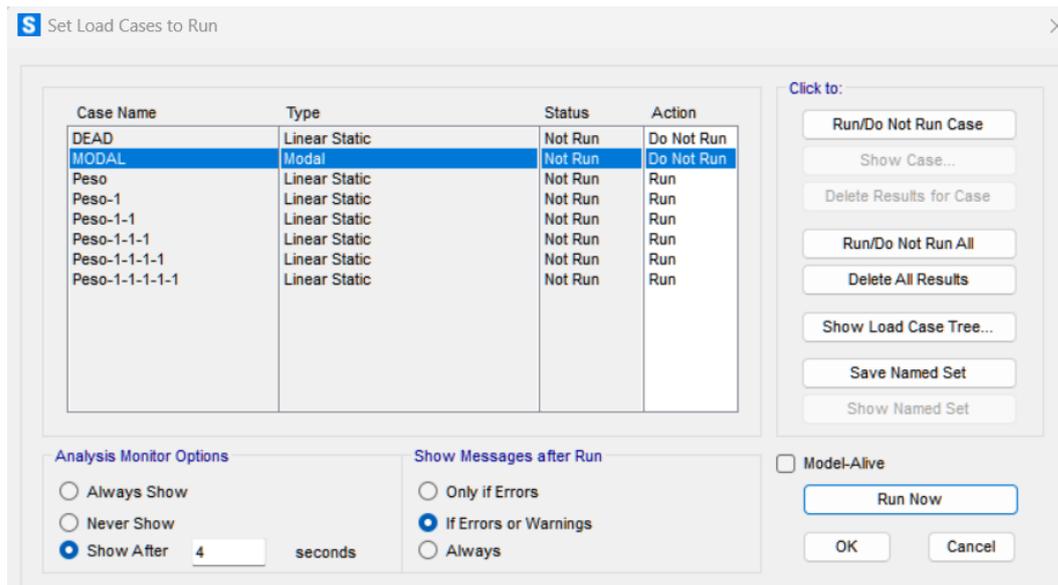


Figura 120. Establecer las cargas a ejecutar en dH

Finalmente, se mostrará el desplazamiento según el caso que se solicite en la figura 121.

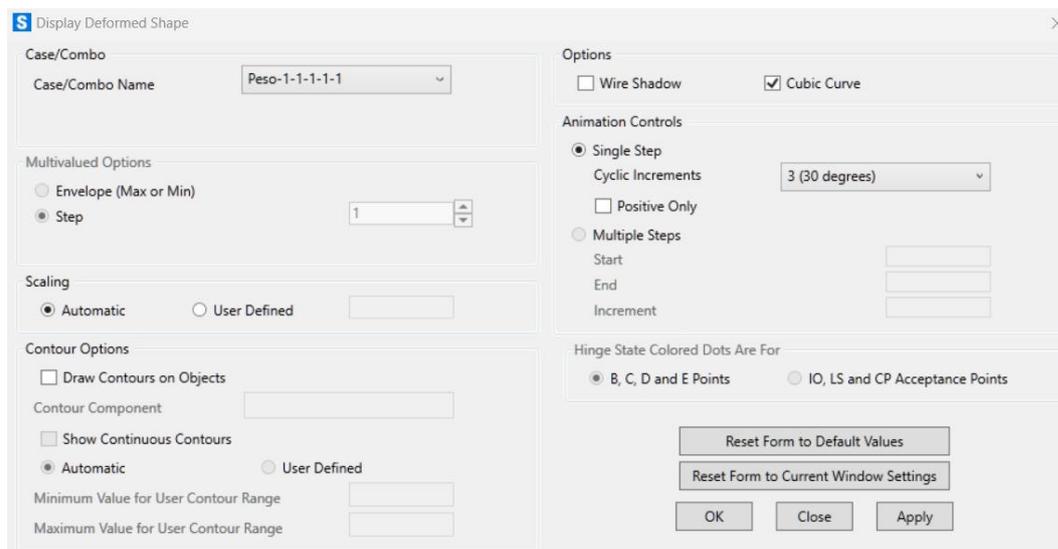


Figura 121. Establecimiento de la carga a mostrar en dH

Para la visualización de los datos se procede como en anterioridad. Por lo que la representación del desplazamiento obtenidos según la distribución peso-1-1-1-1-1, es decir, con las seis cargas como se ha mostrado en una figura 121, es la de la figura 122:

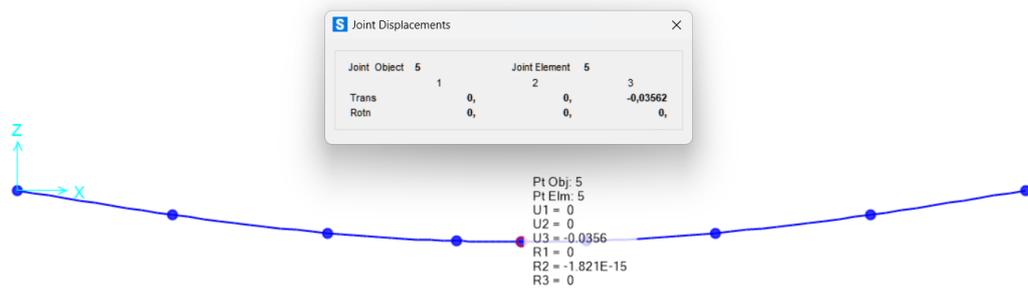


Figura 122. Deformada generada por la acción de 6 cargas puntuales distribuidas

Para aglutinar los resultados, estos se han añadido a la siguiente tabla 30, tal y como se ha estado haciendo con anterioridad:

	Peso	Peso-1	Peso-1-1	Peso-1-1-1	Peso-1-1-1-1	Peso-1-1-1-1-1
SAP	-0,00357	-0,01001	-0,01781	-0,02561	-0,03205	-0,03562

Tabla 30. Desplazamientos generados en la viga dH por diferentes cargas

6.4. Viga con seis cargas puntuales vertical.

Al igual que en la simulación anterior, se introducen los valores característicos de una viga para seis cargas puntuales, pero con la consideración de que los conectores están perpendiculares al suelo, por lo que tiene un posicionamiento vertical y la inercia será otra.

Siguiendo la recta de regresión correspondiente a vigas verticales, y la relación entre conectores y longitud, se obtiene que la inercia es:

$$KDV = -149,04 \cdot r + 102,41 = -149,04 \cdot 0,05128205 + 102,41 \rightarrow KDV = 94,769$$

$$IDV = \frac{L^3 \cdot KDV}{48 \cdot E} = \frac{(78 \cdot 0,008)^3 \cdot 94,769}{48 \cdot 2,25 \cdot 10^9} = 2,1320 \cdot 10^{-10} m^4$$

Por lo que los valores característicos de la viga con cargas puntuales distribuidas a lo largo de la misma, siendo el ratio C/L correspondiente a una viga de 15 UL, se establecerán en la figura 123 de propiedades, como se muestra a continuación.

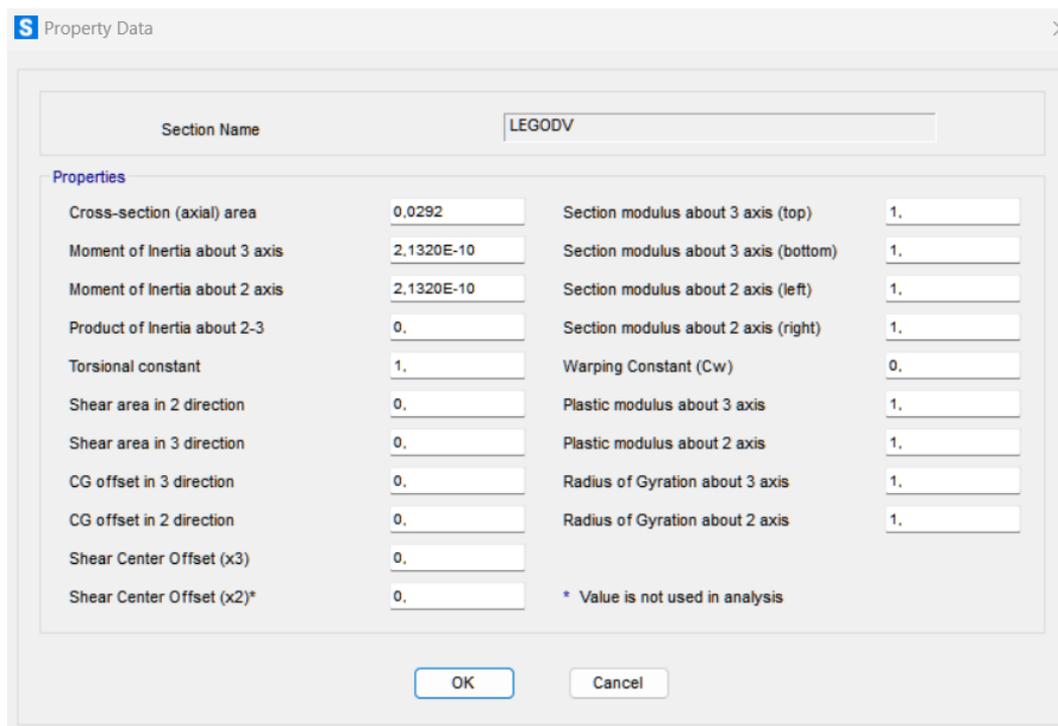


Figura 123. Propiedades de la viga dV

El procedimiento a considerar es el mismo que para el caso anterior, ya que lleva la misma distribución de cargas en las mismas posiciones y para las mismas distancias. Por lo que, para evitar repeticiones de contenido, se muestra la siguiente tabla 31 con los resultados obtenidos mediante simulación.

	Peso	Peso-1	Peso-1-1	Peso-1-1-1	Peso-1-1-1-1	Peso-1-1-1-1-1
SAP	-0,00176	-0,00493	-0,00877	-0,01261	-0,01579	-0,01754

Tabla 31. Desplazamientos generados en la viga dV por diferentes cargas

Capítulo 7. Resultados.

Para la evaluación de los datos obtenidos se procederá a analizar detenidamente, paso por paso, los valores que se han adquirido. Para resumir el conjunto de desplazamientos obtenidos según la carga incorporada y el tipo de viga, se han creado las siguientes tablas en Excel. En dichas tablas se dispone de los valores que se generaron experimentalmente en los dos tramos de carga, denominados “K1” y “K2”.

Como lo que se quiere evaluar es el desplazamiento generado desde el origen, se crea la fila de “incr.absoluto (m)”. Y se añade el valor del error en términos de porcentaje entre el valor real que se ha obtenido experimentalmente y el valor obtenido mediante la simulación. Para aquellos valores que se aproximen más a los generados se marcarán estos en azul y los otros en rojo.

En la tabla 32, correspondiente a la viga “mH”, se observa que el segundo tramo de carga tiene un promedio de error más ajustado a los valores obtenidos mediante la parte experimental. Aún con ello, en ambos tramos de carga, el valor correspondiente a la segunda carga tiene un error elevado; aunque, para el tramo de carga que se ha dado por válido, este no se sale del rango de aceptación.

amplitud temporal en torno al segundo	K1					K2				
	5	20	35	45	60	104	110	120	130	140
promedio	0,000024	-0,007626	-0,015015	-0,021492	-0,027159	-0,001151	-0,008222	-0,015509	-0,021899	-0,027301
incremento (m)		-0,007650	-0,007389	-0,006477	-0,005667		-0,007071	-0,007287	-0,006390	-0,005402
incr.absoluto (m)	0	-0,007650	-0,015039	-0,021516	-0,027183	0	-0,007071	-0,014358	-0,020748	-0,026150
SAP		-0,00703	-0,01263	-0,0211	-0,02813		-0,00703	-0,01263	-0,0211	-0,02813
error		-8,10%	-16,02%	-1,93%	3,48%		-0,58%	-12,03%	1,70%	7,57%
				promedio	-5,64%				promedio	-0,84%

Tabla 32. Resultados viga mH experimentación frente a simulación

Mientras, para la tabla 33, correspondiente a “mV”, el tramo de carga óptimo es el correspondiente al primero. Pero, si se enfoca el resultado a cada incorporación de carga, se ve cómo el primer valor se dispara con respecto al resto. Sin embargo, aunque el segundo tramo de cargas muestra un error promedio mayor, los cuatro porcentajes de error para cada incorporación de carga apenas difieren entre ellos.

amplitud temporal en torno al segundo	K1					K2				
	3	13	29	37	50	93	105	118	128	140
promedio	-0,000646	-0,004220	-0,008865	-0,013295	-0,017663	-0,001112	-0,005449	-0,009624	-0,013972	-0,018358
incremento (m)		0,003574	0,004645	0,004430	0,004368		0,004337	0,004175	0,004348	0,004386
incr.absoluto (m)	0	-0,003574	-0,008219	-0,012649	-0,017017	0	-0,004337	-0,008512	-0,012860	-0,017246
SAP		-0,00409	-0,00819	-0,01228	-0,01638		-0,00409	-0,00819	-0,01228	-0,01638
error		14,44%	-0,35%	-2,92%	-3,74%		-5,70%	-3,78%	-4,51%	-5,02%
				promedio	1,86%				promedio	-4,75%

Tabla 33. Resultados viga mV experimentación frente a simulación

En cuanto a la tabla 34, para “dH”, se observa un incremento sustancial del error generado entre la parte experimental y la simulación. Aún con ello, el primer tramo de carga tiene los valores más significativos, siendo estos más cercanos a los datos experimentales. Y, aunque los errores promedio son elevados, estos se encuentran dentro del rango aceptable. Sin embargo, conforme aumentan las cargas, el error va aumentando.

amplitud temporal en torno al segundo	K1										K2					
	5	15	25	34	43	52	60	110	120	129	133	148	157	165		
promedio	-0,000011	-0,003465	-0,009934	-0,016861	-0,022943	-0,026890	-0,028807	-0,000621	-0,004051	-0,010449	-0,017105	-0,023308	-0,027247	-0,029017		
incremento (m)		-0,003454	-0,009922	-0,016850	-0,022932	-0,026878	-0,028796		-0,003430	-0,009828	-0,016484	-0,022687	-0,026626	-0,028396		
incr.absoluto (m)	0,00	-0,003454	-0,009922	-0,016850	-0,022932	-0,026878	-0,028796	0,00	-0,003430	-0,009828	-0,016484	-0,022687	-0,026626	-0,028396		
SAP		-0,00357	-0,01001	-0,017810	-0,025610	-0,032050	-0,035620		-0,00357	-0,01001	-0,017810	-0,025610	-0,032050	-0,035620		
error		3,37%	0,88%	5,70%	11,68%	19,24%	23,70%		4,07%	1,85%	8,05%	12,88%	20,37%	25,44%		
promedio				10,76%							12,11%					

Tabla 34. Resultados viga dH experimentación frente a simulación

Finalmente, para la tabla 35, de “dV”, aunque los errores promedios son parecidos, es fácil distinguir que el primer tramo de carga presenta unos errores más favorables. A mayores, es perceptible el cómo según se incorporan las cargas el error va disminuyendo, salvo por el último valor. Sin embargo, en el segundo tramo sí que se genera esta disminución de error en su totalidad.

amplitud temporal en torno al segundo	K1							K2						
	5	15	25	35	44	54	73	132	143	153	162	171	180	189
promedio	0,000011	-0,001920	-0,005366	-0,009541	-0,013675	-0,016328	-0,018311	-0,001128	-0,003232	-0,006805	-0,010706	-0,014509	-0,017097	-0,018502
incremento (m)		0,001931	0,003446	0,004174	0,004134	0,002653	0,001984		0,002104	0,003573	0,003901	0,003802	0,002589	0,001404
incr.absoluto (m)	0	-0,00193	-0,00538	-0,00955	-0,01369	-0,01634	-0,01832	0	-0,002104	-0,005677	-0,00958	-0,01338	-0,01597	-0,01737
SAP		-0,00176	-0,00493	-0,00877	-0,01261	-0,01579	-0,01754		-0,00176	-0,00493	-0,00877	-0,01261	-0,01579	-0,01754
error		-8,8%	-8,3%	-8,2%	-7,9%	-7,9%	-4,3%		-16,4%	-13,2%	-8,4%	-5,8%	-1,1%	1,0%
promedio							-6,8%							-7,3%

Tabla 35. Resultados viga dV experimentación frente a simulación

Vistos los resultados para las vigas con cargas puntuales distribuidas, se podría afianzar el procedimiento, en el caso de viga horizontal, sustituyendo los valores conocidos en la fórmula 2 presentada en el capítulo 2 de marco teórico.

$$d = \frac{F \cdot L^2}{6 \cdot E \cdot I} \cdot \left((L - b4) \cdot \left(\frac{3}{4} - \frac{(L - b4)^2}{L^2} \right) + (L - b5) \cdot \left(\frac{3}{4} - \frac{(L - b5)^2}{L^2} \right) + (L - b6) \cdot \left(\frac{3}{4} - \frac{(L - b6)^2}{L^2} \right) \right) \quad (2)$$

Por lo que, los valores a sustituir en la presente fórmula para 6 cargas implementadas en una viga horizontal serían:

$$L = 0,624 \text{ m}$$

$$b5 = 0,192 \text{ m}$$

$$b4 = 0,272 \text{ m}$$

$$b6 = 0,096 \text{ m}$$

$$E = 2,25 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$I = 1,0502 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4$$

Teniendo en cuenta el resto de valores aplicados, correspondientes a las propiedades de la viga y a las cargas aplicadas, y sustituyéndolos, la fórmula quedaría de esta manera:

$$d = \frac{0,373 \cdot 0,624^2}{6 \cdot 2,25 \cdot 10^9 \cdot 1,0502 \cdot 10^{-10}} \cdot \left((0,642 - 0,272) \cdot \left(\frac{3}{4} - \frac{(0,642 - 0,272)^2}{0,642^2} \right) + (0,642 - 0,192) \cdot \left(\frac{3}{4} - \frac{(0,642 - 0,192)^2}{0,642^2} \right) + (0,642 - 0,096) \cdot \left(\frac{3}{4} - \frac{(0,642 - 0,096)^2}{0,642^2} \right) \right) = 0,0310 \text{ m}$$

Se procede a realizar el resto de cálculos para el resto de cargas aplicadas. La presente tabla 36 representa los datos obtenidos previamente y los que se han calculado mediante la utilización del prontuario:

amplitud temporal en torno al segundo	K1						K2							
	5	15	25	34	43	52	60	110	120	129	133	148	157	165
promedio	-0,000011	-0,003465	-0,009934	-0,016861	-0,022943	-0,026890	-0,028807	-0,000621	-0,004051	-0,010449	-0,017105	-0,023308	-0,027247	-0,029017
incremento (m)		-0,003454	-0,009922	-0,016850	-0,022932	-0,026878	-0,028796		-0,003430	-0,009828	-0,016484	-0,022687	-0,026626	-0,028396
incr.absoluto (m)	0,00	-0,003454	-0,009922	-0,016850	-0,022932	-0,026878	-0,028796	0,00	-0,003430	-0,009828	-0,016484	-0,022687	-0,026626	-0,028396
SAP		-0,00357	-0,01001	-0,017810	-0,025610	-0,032050	-0,035620		-0,00357	-0,01001	-0,017810	-0,025610	-0,032050	-0,035620
		3,37%	0,88%	5,70%	11,68%	19,24%	23,70%		4,07%	1,85%	8,05%	12,88%	20,37%	25,44%
			promedio	10,76%						promedio	12,11%			
Prontuario	-0,0008	-0,0071	-0,0155	-0,0239	-0,0302	-0,0310		-0,0008	-0,0071	-0,0155	-0,0239	-0,0302	-0,0310	
	76,84%	28,44%	8,01%	-4,22%	-12,36%	-7,65%		76,68%	27,76%	5,97%	-5,35%	-13,42%	-9,17%	
			promedio	14,84%						promedio	13,74%			

Tabla 36. Comparación viga dH parte experimental, simulada y prontuario

Lo primero que se puede observar es un cambio en el tramo que tiene menor error promedio. Pero, en ambos casos, el error generado sobrepasa los valores aceptables. A mayores, los primeros valores para los errores de las dos primeras cargas son demasiado elevados, procediendo a estabilizarse con los obtenidos posteriormente.

Al igual que para la viga horizontal, se realiza el caso e la viga vertical con 6 cargas puntuales, siendo sus valores:

$$L = 0,624 \text{ m}$$

$$b5 = 0,192 \text{ m}$$

$$b4 = 0,272 \text{ m}$$

$$b6 = 0,096 \text{ m}$$

$$E = 2,25 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$I = 2,1320 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4$$

Realizando el mismo procedimiento que para la viga horizontal vista anteriormente, se calculan los siguientes datos, generando la tabla 36 para su análisis.

Caracterización estática de barras para maquetas de estructuras hechas con piezas LEGO®

amplitud temporal en torno al segundo	K1							K2						
	5	15	25	35	44	54	73	132	143	153	162	171	180	189
promedio	0,000011	-0,001920	-0,005366	-0,009541	-0,013675	-0,016328	-0,018311	-0,001128	-0,003232	-0,006805	-0,010706	-0,014509	-0,017097	-0,018502
incremento (m)		0,001931	0,003446	0,004174	0,004134	0,002653	0,001984		0,002104	0,003573	0,003901	0,003802	0,002589	0,001404
incr.absoluto (m)	0	-0,00193	-0,00538	-0,00955	-0,01369	-0,01634	-0,01832	0	-0,002104	-0,005677	-0,00958	-0,01338	-0,01597	-0,01737
SAP		-0,00176	-0,00493	-0,00877	-0,01261	-0,01579	-0,01754		-0,00176	-0,00493	-0,00877	-0,01261	-0,01579	-0,01754
error		-8,8%	-8,3%	-8,2%	-7,9%	-3,4%	-4,3%		-16,4%	-13,2%	-8,4%	-5,8%	-1,1%	1,0%
						promedio	-6,8%						promedio	-7,3%
Prontuario		-0,0004	-0,0035	-0,00763	-0,01176	-0,01487	-0,0153		-0,0004	-0,0035	-0,00763	-0,01176	-0,01487	-0,0153
		79,28%	34,91%	20,12%	14,07%	8,99%	16,77%		80,99%	38,35%	20,34%	12,11%	6,88%	12,22%
			promedio	29,02%						promedio	28,48%			

Tabla 37. Comparación viga dV parte experimental, simulada y prontuario

Comparando la tabla 37 con la 38 se observa claramente las similitudes que comparten, siendo entre ellas el cambio en el tramo de menos error promedio, el sobrepasar los valores considerados como aceptables y el cómo, según aumentan las cargas incorporadas, dichos valores se van estabilizando. Generando con ello una linealidad en cuanto a los resultados calculados.

Capítulo 8. Conclusiones y líneas futuras.

8.1. Conclusiones.

El trabajo realizado presenta la solidez en la posibilidad de caracterizar de forma estática el conjunto de bloques que formen una viga, teniendo como marco relacional el ratio conectores-longitud.

Esta caracterización se ha llevado a cabo a través de la recopilación de datos de manera experimental, la cual ha sido realizada presencialmente en el taller de estructuras, comparándolos con los realizados mediante simulación a través del programa SAP2000.

Como se ha estado viendo en el capítulo anterior, los resultados obtenidos permiten validar el trabajo realizado, puesto que se ha llegado a obtener unos valores dentro de los rangos catalogados como permisibles. Por lo que queda demostrable la posibilidad de realizar un estudio simulado de los posibles desplazamientos generados por las cargas que se implementen en cualquier viga.

Es decir, sabiendo la longitud y el número de conectores, independientemente de si se trata de una viga con una combinación de bloques parejos o mediante una distribución mixta, y la carga que va a ser implementada en cualquier punto de la viga y para cualesquiera masas que se deseen imponer, se obtendrá el desplazamiento generado, habiendo un margen de error aceptable con respecto al que se obtendría de forma real.

Sin embargo, hay un marco común para las vigas que presentaban cargas puntuales distribuidas, y es que se debe delimitar su representación a cargas de menor masa, puesto que al aumentar esta los valores se disparan, invalidando los resultados.

8.2. Consideraciones adicionales.

Durante el proceso experimental se debe tener en cuenta la posibilidad de fallos de montaje, ya que las uniones no son perfectas, pudiendo generarse desacoples. Estos fallos en las uniones ya se observaron en el capítulo 6, donde se mostró el fallo en la unión generado después de haber realizado los dos tramos de carga y descarga sobre una de las vigas. Esta situación ha sido generada por un exceso de carga, puesto que los resultados observados verifican que son válidos para pequeñas cargas. Por lo que, para futuras ocasiones sería conveniente reducir el peso de las masas.

Además, debido a que no se trata de una viga homogénea, sino de un conjunto de elementos unidos entre sí, se presenta una fricción entre los diferentes elementos. Por lo que, como se observó también en dicho capítulo mencionado en el párrafo anterior, en el primer escalón del tramo de descarga se presenta una rigidez mayor que con respecto a los escalones posteriores. Para solventar esta situación se debería perfeccionar la superficie de los elementos de unión, reduciendo así su fricción.

En cuanto a los aspectos económicos, estos se verán desglosados en un subapartado posterior según el conjunto de elementos del que formen parte.

8.3. Líneas futuras.

Aspectos de mejora de cara a futuras realizaciones en cuanto al presente trabajo serían principalmente en el ámbito experimental, ya que como es bien sabido el fallo humano y de situación son comunes en este tipo de ensayos.

Para mejorar los resultados obtenidos podría haberse procurado mejores condiciones en cuanto a:

- Conexiones entre piezas.
- Apoyos más fiables.
- Soportes, para la colocación de los pesos, más estables.

Los conectores utilizados, junto con las piezas BEAM, dan como resultado vigas rectas de distintas longitudes. Una manera de ampliar el trabajo sería usando conectores angulares o BEAM en ángulo, dando como resultado tipologías planas denominadas pórticos.

Algunos de estos ejemplos se muestran en las siguientes figuras 124, 125 y 126, permitiendo múltiples combinaciones según el ángulo de ejecución que presentan:

6629 Amarillo. Viga Technic 4 x 6 en 45°



Tipo de producto: Pieza

Categoría: Technic, Viga

LEGO® Design ID: 6629

LEGO® Element ID: 4112281, 4162120, 4188311, 6375945, 662924

LEGO® color: Bright yellow

Color: Amarillo

Precio: 0.30€

Stock: 1

Figura 124. Viga Technic 4 x 6 en 45°

32009 Amarillo. Viga technic 1 x 11.5 doble codo



Tipo de producto: Pieza

Categoría: [Technic, Viga](#)

LEGO® Design ID: 32009

LEGO® Element ID:4111996, 6257104, 6271150

LEGO® color: Bright yellow

Color: Amarillo

Precio: 0.35€

Stock: 19

Figura 125. Viga Technic 1 x 11.5 doble codo

32526 Amarillo. Viga Technic 3 x 5 en L



Tipo de producto: Pieza

Categoría: [Technic, Viga](#)

LEGO® Design ID: 32526

LEGO® Element ID:4144022

LEGO® color: Bright yellow

Color: Amarillo

Precio: 0.25€

Stock: 47

Figura 126. Viga Technic 3 x 5 en L

Para esta tipología se podrían haber hecho tanto ensayos como simulaciones, al igual que se ha procedido en la realización del presente trabajado de fin de grado. Así mismo, con los resultados obtenidos, cabría haber hecho simulaciones de estructuras tridimensionales como la indicada en la figura 127:

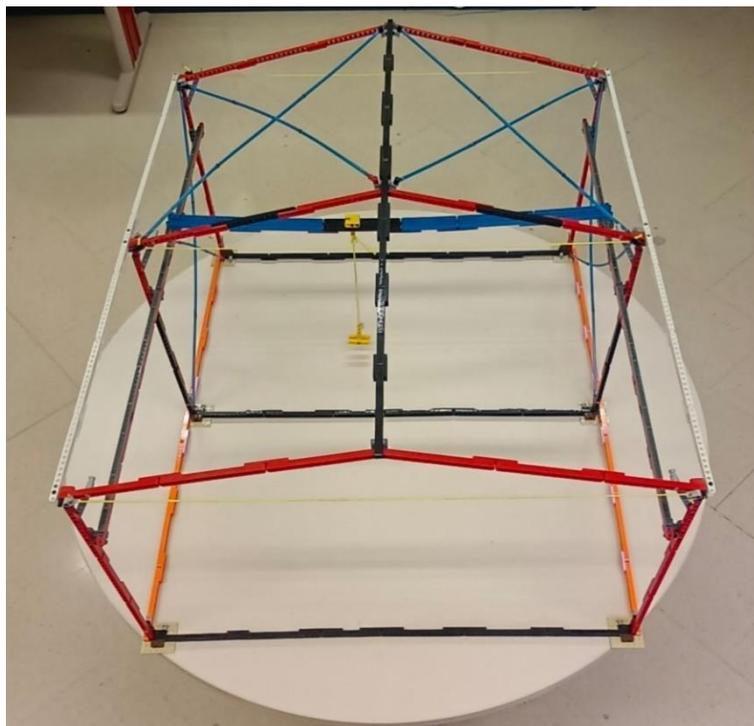


Figura 127. Nave industrial formada por pórticos

Simultáneamente a este TFG se está desarrollando otro tendente a caracterizar dinámicamente el amortiguamiento, abriendo la posibilidad a hacer simulaciones dinámicas.

8.4. Listado de piezas y costes.

Con el fin de obtener el desglose económico de las piezas utilizadas durante el trabajo de fin de grado, se mostrarán las tablas indicadas. Estas tablas incluyen una breve descripción de la pieza involucrada, su código identificativo, el coste unitario por pieza y la cantidad utilizada. A mayores, las tablas 38, 39, 40 y 41, vendrán precedidas de las figuras 128, 129, 130 y 131, respectivamente con sus piezas correspondientes, en orden de izquierda a derecha.

APOYOS				
Descripción	Código	Coste unitario	Cantidad	Coste
Tierra. Pin largo <i>Technic</i> sin fricción	32556	0,10	2	0,20
Gris Claro Azulado. Plancha 2 x 3	3021	0,11	2	0,22
Gris Claro Azulado. Plancha 2 x 4	3020	0,18	2	0,36
Gris Claro Azulado Ladrillo <i>Technic</i> 1 x 1	6541	0,15	2	0,30

Gris Claro Azulado. Ladrillo <i>Technic</i> 1 x 2 con 2 agujeros	32000	0,15	2	0,30
Negro. Ladrillo <i>Technic</i> 1 x 4	3701	0,25	12	3,00
Gris Claro Azulado. Ladrillo <i>Technic</i> 1 x 10	2730	0,46	4	1,84
Blanco. Plancha 2 x 16	4282	0,60	2	1,80
TOTAL			28	7,42

Tabla 38. Desglose económico apoyos

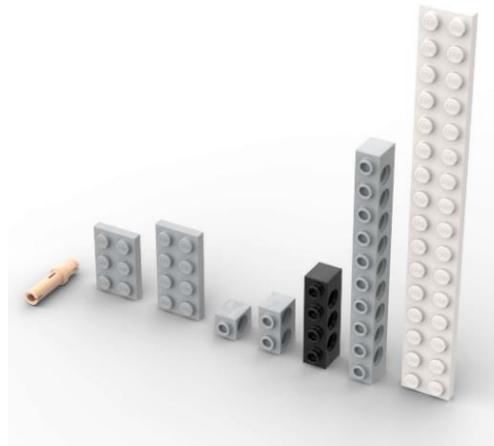


Figura 128. Piezas que constituyen los apoyos

SOPORTE PESOS				
Descripción	Código	Coste unitario	Cantidad	Coste
Gris Claro Azulado. Panel 1 x 4 x 3 con soportes laterales y studs huecos	60581	0,21	1	0,21
Negro. Plancha modificada 1 x 2 con 1 stud con soporte inferior para stud (Jumper)	15573	0,07	1	0,07
Negro. Pin <i>Technic</i> con fricción	4459	0,08	1	0,08

Negro. Pin <i>Technic</i> 3L con fricción	6558	0,27	1	0,27
Amarillo. Ladrillo <i>Technic</i> 1 x 1	6541	0,10	1	0,10
Gris Oscuro Azulado. Viga <i>Technic</i> 1 x 11	32525	0,33	1	0,33
TOTAL			6	1,06

Tabla 39. Desglose económico soporte pesos

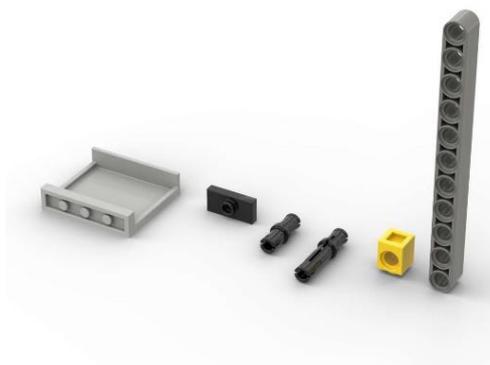


Figura 129. Piezas que constituyen el soporte de los pesos

VIGAS				
Descripción	Código	Precio unitario	Cantidad	Coste
Marrón Rojizo. Plancha <i>Technic</i> 1 x 5 con bordes redondeados, 4 studs	32124	0,15	28	4,20
Rojo. Viga <i>Technic</i> 1 x 5	32316	0,18	2	0,36
Negro. Viga <i>Technic</i> 1 x 5	32316	0,23	13	2,99
Rojo Viga <i>Technic</i> 1 x 7	32524	0,24	11	2,64
Verde Viga <i>Technic</i> 1 x 9	40490	0,24	9	2,16
Gris Claro Oscuro	32525	0,50	2	1,00

Viga <i>Technic</i> 1 x 11				
Negro. Viga <i>Technic</i> 1 x 11	32525	0,40	7	2,80
Verde. Viga <i>Technic</i> 1 x 13	41239	0,25	2	0,50
Azul Celeste Medio. Viga <i>Technic</i> 1 x 13	41239	0,60	5	3,00
Naranja. Viga <i>Technic</i> 1 x 15	32278	1,16	1	1,16
Amarillo. Viga <i>Technic</i> 1 x 15	32278	0,94	5	4,70
TOTAL				25,51

Tabla 40. Desglose económico de las vigas



Figura 130. Piezas que constituyen las vigas

SOPORTE PESOS CARGAS PUNTUALES				
Descripción	Código	Coste unitario	Cantidad	Coste
Amarillo. Ladrillo <i>Technic</i> 1 x 1	6541	0,10	6	0,60
Tierra. Pin largo <i>Technic</i> sin fricción	32556	0,10	12	1,20
Gris Claro Azulado. Viga <i>Technic</i> 1 x 5	32316	0,16	6	0,96
TOTAL			24	2,76

Tabla 41. Desglose económico de los soportes para pesos para cargas puntuales

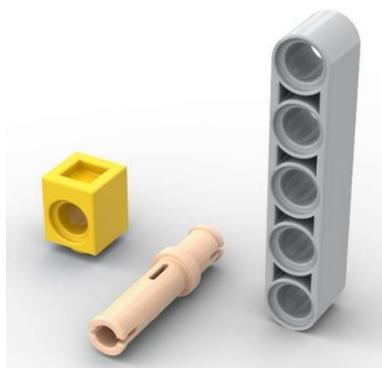


Figura 131. Piezas que constituyen el soporte de los pesos para cargas puntuales

TOTAL DE PIEZAS				
Descripción	Código	Coste unitario	Cantidad	Coste
Tierra. Pin largo <i>Technic</i> sin fricción	32556	0,10	14	1,40
Gris Claro Azulado. Plancha 2 x 3	3021	0,11	2	0,22
Gris Claro Azulado. Plancha 2 x 4	3020	0,18	2	0,36
Gris Claro Azulado Ladrillo <i>Technic</i> 1 x 1	6541	0,15	2	0,30
Gris Claro Azulado. Ladrillo <i>Technic</i> 1 x 2 con 2 agujeros	32000	0,15	2	0,30
Negro. Ladrillo <i>Technic</i> 1 x 4	3701	0,25	12	3,00
Gris Claro Azulado. Ladrillo <i>Technic</i> 1 x 10	2730	0,46	4	1,84
Blanco. Plancha 2 x 16	4282	0,60	2	1,80
Gris Claro Azulado. Panel 1 x 4 x 3 con soportes laterales y <i>studs</i> huecos	60581	0,21	1	0,21
Negro. Plancha modificada 1 x 2 con 1 <i>stud</i> con soporte inferior para <i>stud</i> (<i>Jumper</i>)	15573	0,07	1	0,07
Negro.	4459	0,08	1	0,08

Pin <i>Technic</i> con fricción				
Negro. Pin <i>Technic</i> 3L con fricción	6558	0,27	1	0,27
Amarillo. Ladrillo <i>Technic</i> 1 x 1	6541	0,10	7	0,70
Gris Oscuro Azulado. Viga <i>Technic</i> 1 x 11	32525	0,33	1	0,33
Marrón Rojizo. Plancha <i>Technic</i> 1 x 5 con bordes redondeados, 4 studs	32124	0,15	28	4,20
Rojo. Viga <i>Technic</i> 1 x 5	32316	0,18	2	0,36
Negro. Viga <i>Technic</i> 1 x 5	32316	0,23	13	2,99
Rojo Viga <i>Technic</i> 1 x 7	32524	0,24	11	2,64
Verde Viga <i>Technic</i> 1 x 9	40490	0,24	9	2,16
Gris Claro Oscuro Viga <i>Technic</i> 1 x 11	32525	0,50	3	1,50
Negro. Viga <i>Technic</i> 1 x 11	32525	0,40	7	2,80
Verde. Viga <i>Technic</i> 1 x 13	41239	0,25	2	0,50
Azul Celeste Medio. Viga <i>Technic</i> 1 x 13	41239	0,60	5	3,00
Naranja. Viga <i>Technic</i> 1 x 15	32278	1,16	1	1,16
Amarillo. Viga <i>Technic</i> 1 x 15	32278	0,94	5	4,70
Gris Claro Azulado. Viga <i>Technic</i> 1 x 5	32316	0,16	6	0,96

Tabla 42. Desglose económico total de piezas

COSTE TOTAL LEGO= 36,75 €

Con esta última tabla 42, se obtiene el coste total de lo que supone la parte experimental del trabajo utilizando piezas LEGO. Esta cantidad asciende a 36,75 €. Pero se debe tener en cuenta que las piezas han podido ser reutilizadas, no necesitando de unas nuevas en el caso de ser requeridas para un ensayo, es por ello que se ha rentabilizado su realización.

Por lo tanto, el coste estimado por pieza teniendo en cuenta el número total de ellas que ha sido necesario para la realización del trabajo es el presente en la tabla 43:

TOTAL ESTIMADO POR PIEZA LEGO	
PIEZAS	144
COSTE	36,75
COSTE POR PIEZA	0,2552

Tabla 43. Desglose total estimado por pieza

Un aspecto que se puede tener en cuenta es cuánto ha costado de media cada viga, teniendo en cuenta que se han realizado un total de 16 ensayos, entra en la consideración de a 2,30 € la viga.

Referencias

- [1] K. Encyclopedia, «Lego Facts for Kids,» 16 Octubre 2023. [En línea]. Available: <https://kids.kiddle.co/Lego>.
- [2] EBay, «Pack, 1977 Vintage años 70 Lego Set Expert Builder Power,» [En línea]. Available: <https://www.ebay.es/itm/203739809425>.
- [3] BricLinck, «Dutch, 1984 Medium Technic,» [En línea]. Available: <https://www.bricklink.com/v2/catalog/catalogitem.page?C=c84nlt#T=S&O={%22iconly%22:0}>.
- [4] LEGO, «13000, Grúa sobre Orugas Liebherr LR,» [En línea]. Available: <https://www.lego.com/es-es/product/liebherr-crawler-crane-lr-13000-42146>.
- [5] J. K. Monash, «Chemistry of Lego,» 15 Julio 2014. [En línea]. Available: <https://jameskennedymonash.wordpress.com/2014/07/15/how-are-lego-bricks-made-the-chemistry-of-lego/>.
- [6] Facebook, «Inyección por moldeo,» 15 Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://www.facebook.com/moldeoporinyeccion/photos/a.1816212621978862/2233555090244611/?type=3>.
- [7] Recicla3D, «Proyecto Recicla 3D (Plabs 3D),» [En línea]. Available: <https://recicla3dplabs.wordpress.com/caracteristicas-del-abs/>.
- [8] Y. Castán, «Instituto Aragonés de Ciencias de la Salud,» [En línea]. Available: <https://claustrouniversitariodeoriente.edu.mx/pedagogia-linea/introduccionalmetodocientificoysusetapas.pdf>.
- [9] J. M. Gere, Timoshenko. Resistencia de Materiales, Parainfo, 2002.
- [10] R. Carmona Muñoz, «Easycte,» [En línea]. Available: <https://easycte.com/como-calcular-nave-industrial-galpon-cype3d/>.
- [11] Dlubal, «Software de análisis y dimensionamiento de estructuras.,» 16 Junio 2020. [En línea]. Available: <https://www.dlubal.com/es/descargas-e-informacion/ejemplos-y-tutoriales/modelos-para-descargar/000375>.
- [12] J. Retortillo González, Propuesta de un puesto de prácticas a escala sobre el desarrollo del proceso constructivo de una nave industrial., Valladolid: Universidad de Valladolid, 2023.

- [13] J. L. Suarez, Prontuario básico de estructuras simples, Alicante: Universidad de Alicante, 2012.
- [14] A. L. Tapioles, MODELOS A ESCALA REALIZADOS CON STUDLESS-BEAM DE LEGO: SIMULACIÓN MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS Y APLICACIÓN DOCENTE COMO SOPORTE A PRÁCTICAS, Valladolid: Universidad de Valladolid, 2014.
- [15] F. A. Cordovés, Simulación mediante elementos tipo barra de maquetas de estructuras tridimensionales., Valladolid: Universidad de Valladolid, 2018.
- [16] S. Modular, «Dewesoft,» [En línea]. Available: <https://dewesoft.com/es/productos/sirius>.
- [17] DewesoftX, «Dewesoft,» [En línea]. Available: <https://dewesoft.com/es/productos/dewesoftx>.
- [18] Panasonic, «TEM (Electronic Components),» [En línea]. Available: <https://www.tme.eu/Document/b343814c6454ff731731cf5e43596457/HL-G103-A-C5.PDF>.
- [19] Panasonic, «TEM (Electronic Components), Descripción de catálogo,» [En línea]. Available: https://www.tme.eu/html/ES/sensores-laser-de-distancia-serie-hl-g1/ramka_27093_ES_pelny.html.

Anexo I

La realización de la simulación del presente trabajo fue posible mediante el uso de los siguientes programas. Los cuales sirvieron para la obtención del modelo a través de las pesquisas que se establecieron en la parte experimental, y la representación de la batería de ensayos mediante su diseño en 3D.

- **SAP2000:** se trata de un programa de elementos finitos donde, gracias a su interfaz gráfico en 3D, se puede realizar la modelación, análisis y dimensionado de la estructura que atañe. Estas funciones se ven representadas en la figura 132.

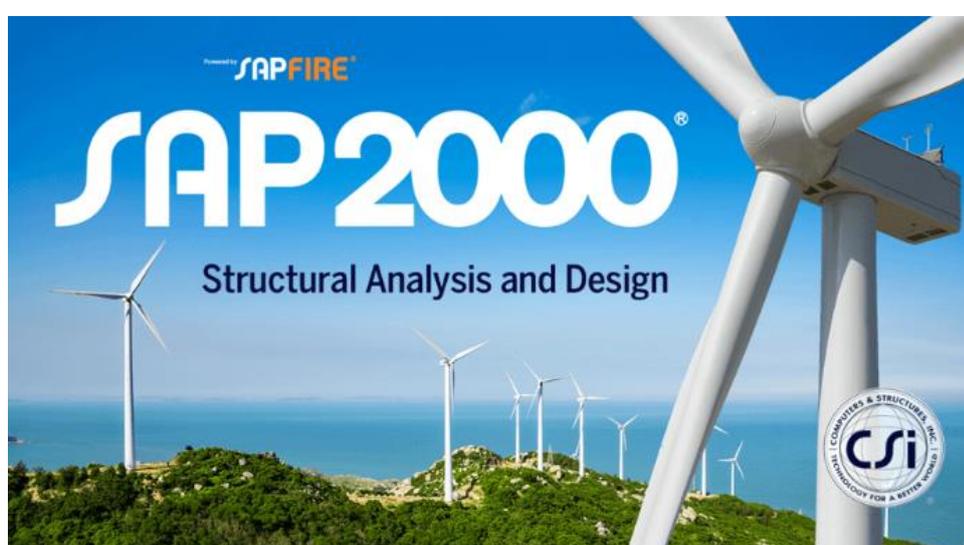


Figura 132. Software SAP2000

La simplicidad del modelado permite que sea utilizado en el desarrollo de edificios, puentes, presas y una larga variedad de estructuras que requieren de inspección y desarrollo.

Además, a este proceso se le puede sumar la generación de cargas sísmicas, viento, etc.; analizando y verificando con ello la resistencia de estructuras de hormigón, acero, aluminio y refrigeración según las diferentes leyes mundiales.

En resumidas cuentas, se trata de un *software* cuyas soluciones resultan muy eficientes y productivas, otorgando un diseño tanto a modelos estáticos muy sencillos utilizados en el análisis 2D como a modelos más complejos y de grandes dimensiones, siendo estos en 3D, donde su análisis es mucho más avanzado.

Para el caso a seguir, a pesar de disponer de diferentes escenarios, se seguirá un modelo 2D con modelado lineal y estático. Para ello, en apartados anteriores, se dedicó una guía de cómo se ha procedido a la

representación de la simulación de los diferentes casos realizados.

- **Studio 2.0.:** software de diseño para trabajar con LEGO, gracias al cual se puede diseñar y representar la estructura que se ha formado a través de las piezas reales.

La realización de varias estructuras de LEGO es posible usando sus sets o piezas. El sistema se encarga de analizar la estabilidad de la estructura y las posibles colisiones entre piezas para que luego se pueda construir de forma realista. Además, como se muestra en la figura 133, hay maquetas ya predefinidas.

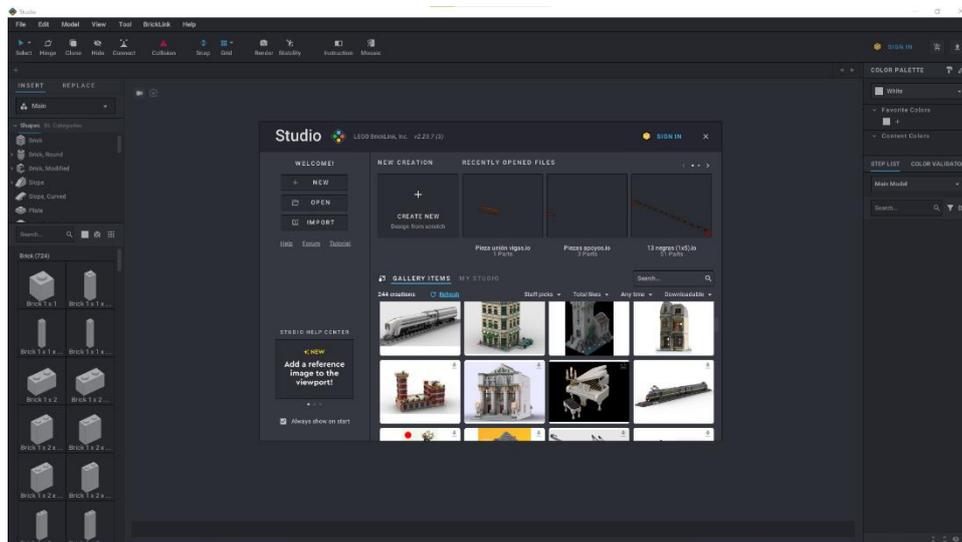


Figura 133. Software Stud.io

Está integrado con *BrickLink* para pedir online las piezas que se quieran utilizar, además de un generador de comandos, la renderización de diseños, además de la posibilidad de importar kits oficiales de LEGO.