



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**CONTRASTACIÓN NUMÉRICA Y
EXPERIMENTAL DEL
COMPORTAMIENTO DE UNA
ESTRUCTURA MODULAR DE
BARRAS SOMETIDA A CARGAS
EXTERIORES**

Alumno: González Lechuga, David

Tutor: Prof. D. Fernando Suárez Guerra
Depto.: Ing. Mecánica y Minera

Octubre, 2018



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

**CONTRASTACIÓN NUMÉRICA Y
EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE
UNA ESTRUCTURA MODULAR DE BARRAS
SOMETIDA A CARGAS EXTERIORES**

D. FERNANDO SUÁREZ GUERRA, tutor del Trabajo Fin de Grado "CONTRASTACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE UNA ESTRUCTURA MODULAR DE BARRAS SOMETIDA A CARGAS EXTERIORES", que presenta el alumno DAVID GONZÁLEZ LECHUGA, da su visto bueno para la defensa y evaluación del citado trabajo en la Escuela Politécnica Superior de Linares.

Linares, OCTUBRE de 2018

EL ALUMNO:

EL TUTOR:

Índice:

1.RESUMEN.....	6
1.1 Resumen	6
1.2 Abstract	7
2.INTRODUCCIÓN.....	7
2.1Introducción histórica	8
2.2Antecedentes	10
3.OBJETIVOS.....	12
4.MATERIALES, MÉTODOS Y TÉCNICAS	13
4.1 Bastidor universal de ensayos GUNT SE-100.....	13
4.1.1Descripción técnica	14
4.2Relojes comparadores.....	19
4.3Galgas extensométricas	20
4.3.1 Ventajas de las galgas extensométricas	23
4.3.2 Desventajas de las galgas extensométricas	23
4.3.3 Limitaciones de las galgas extensométricas	23
4.3.4 Aplicaciones de las galgas extensométricas	23
4.4 Correlación Digital de Imágenes (DIC).....	24
4.4.1 Historia de la Correlación Digital de Imágenes (DIC)	26
4.4.2 Ventajas de la Correlación Digital de Imágenes (DIC)	27
4.4.3 Herramientas utilizadas para DIC.....	27
5.PROCEDIMIENTO Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS.....	29
5.1 Prólogo y puesta a punto	29
5.2Primera disposición con 50 kg.....	30
5.2.1Desplazamientos con 50 kg	32
5.2.2Deformaciones con DIC con 50 kg	46
5.2.3Deformaciones con galgas con 50 kg	47
5.2.4 Contrastación de resultados y conclusiones	49
5.2.5Primera disposición con 150 kg.....	50
5.2.6Desplazamientos con 150 kg	51
5.2.7Deformaciones con DIC con 150 kg	53
5.2.8Deformaciones con galgas con 150 kg	54
5.2.9 Contrastación de resultados y conclusiones	56
5.3Segunda disposición	57
5.3.1 Desplazamientos.....	60
5.3.2Deformaciones con galgas.....	62
5.3.3Contrastación de resultados y conclusiones	67
5.4Tercera disposición.....	68
5.4.1 Desplazamientos.....	74
5.4.2Deformaciones con galgas.....	78
5.4.3Contrastación de resultados y conclusiones	85
6.DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	86
PLANOS	87
ANEXO: Datos técnicos de equipos utilizados.	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

Índice de figuras:

Figura 2.1: Torre Eiffel. [4]	9
Figura 2.2: Seagram Building. [5]	9
Figura 2.3: Puente de Trajano en la Columna de Trajano. [6]	10
Figura 2.4: Representación de celosías de madera de la Edad Media. [7]	11
Figura 2.5: Ejemplos de tipos de celosías patentadas. [8]	11
Figura 4.1: Imagen del bastidor Universal de ensayos GUNT SE 100. [1]	13
Figura 4.2: Esquema del bastidor Universal de ensayos GUNT SE 100. [1]	14
Figura 4.3: Peso digital profesional de hasta 300 kg. [9]	15
Figura 4.4: Modelo del soporte inferior del sistema de carga.	16
Figura 4.5: Soporte inferior del sistema de carga.	16
Figura 4.6: Corchete de tornillo tensor/tensor de acero galvanizado.	16
Figura 4.7: Sistema de carga completo.	17
Figura 4.8: Esquema apoyo libre. [1]	17
Figura 4.9: Apoyo libre.	18
Figura 4.10: Esquema apoyo fijo. [1]	18
Figura 4.11: Apoyo fijo.	18
Figura 4.12: Reloj comparador.	19
Figuras 4.13: Galgas extensométricas. [12]	20
Figuras 4.14: Puente de Wheatstone. [13]	21
Figura 4.15: Equipo P3 Strain Indicator and Recorder. [14]	22
Figura 4.16: Conexión de Equipo P3 Strain Indicator and Recorder.	22
Figura 4.17: Conexión de Equipo P3 Strain Indicator and Recorder con las galgas extensométricas.	22
Figura 4.18: Imagen de speckle para procesar mediante DIC. [16]	24
Figura 4.19: Imagen de referencia e imagen deformada. [16]	24
Figura 4.20: Solución del nivel de píxel p y sus vecinos. [15]	25
Figura 4.21: Cámara Point Grey Grasshopper 3. [20]	27
Figura 4.22: Cámara Point Grey Grasshopper 3.	28
Figura 5.1: Estructura Howe.	30
Figura 5.2: Estructura Howe.	30
Figura 5.3: Elección del tipo de proyecto.	35
Figura 5.4: Cuadro de diálogo de la opción Nudos.	35
Figura 5.5: Disposición de nudos en la interfaz de Robot Structural Analysis.	36
Figura 5.6: Cuadro de diálogo de la opción Barra.	36
Figura 5.7: Esquema de estructura completa con barras.	37
Figura 5.8: Cuadro de diálogo de preferencias para el proyecto.	37
Figura 5.9: Propiedades del aluminio por defecto.	38
Figura 5.10: Propiedades del aluminio deseadas.	38
Figura 5.11: Cuadro de diálogo de la opción Sección.	39
Figura 5.12: Esquema de la estructura con la secciones de todas las barras asignadas.	39
Figura 5.13: Colocación del apoyo Izquierdo.	40
Figura 5.14: Creación del apoyo Nuevo.	40
Figura 5.15: Esquema de la estructura con los apoyos.	40
Figura 5.16: Esquema de la estructura con las uniones.	41
Figura 5.17: Cuadro de diálogo de Casos de carga.	41
Figura 5.18: Caso de carga 1 con peso propio.	42
Figura 5.19: Caso de carga 2 sin peso propio.	42
Figura 5.20: Cuadro de diálogo de Cargas	43
Figura 5.21: Esquema de la estructura con la carga.	43
Figura 5.22: Cuadro de diálogo de resultados.	44
Figura 5.23: Cálculo de desplazamiento con 50 kg en $\text{cm} \cdot 10^2$	44
Figura 5.24: Cálculo de desplazamiento con 50 kg en $\text{cm} \cdot 10^2$	45
Figura 5.25: a) Medida de desplazamiento sin carga. b) Medida de desplazamiento con 50 kg.	45
Figuras 5.26: Esquema del vuelco de la estructura.	46
Figura 5.27: Axiles en todas las barras con 50 kg.	48
Figura 5.28: Medida de deformaciones en las barras 2, 9 y 10 con 50 kg.	49

Figura 5.29: Diagrama de Momentos con 150 kg.	50
Figura 5.30: Diagrama de Cortantes con 150 kg.	50
Figura 5.31: Diagrama de Axiles con 150 kg.	51
Figura 5.32: Cálculo de desplazamiento con 150 kg en $\text{cm} \cdot 10^2$	52
Figura 5.33: Cálculo de desplazamiento con 150 kg en $\text{cm} \cdot 10^2$	52
Figura 5.34: a) Medida de desplazamiento sin carga. b) Medida de desplazamiento con 150 kg.	53
Figuras 5.35: Alejamiento de la barra respecto a la cámara al cargarla.	54
Figura 5.36: Axiles en todas las barras con 150 kg.	55
Figura 5.37: Medida de deformaciones en las barras 2, 9 y 10 con 150 kg.	56
Figura 5.38: Esquema de la Viga Vierendeel con 80 kg de carga.	57
Figura 5.39: Viga Vierendeel con 80 kg de carga.	58
Figura 5.40: Diagrama de Momentos Flectores con 80 kg.	58
Figura 5.41: Diagrama de Axiles con 80 kg.	59
Figura 5.42: Diagrama de Cortantes con 80 kg.	59
Figura 5.43: Desplazamientos con 80 kg en cm.	60
Figura 5.44: Desplazamientos con 80 kg en cm.	61
Figura 5.45: a) Medida de desplazamiento sin carga. b) Medida de desplazamiento con 80 kg.	61
Figura 5.46: Ubicación de las galgas instaladas en la estructura.	62
Figura 5.47: Ubicación de las galgas instaladas en la estructura.	63
Figura 5.48: Ley de Navier para flexión pura.	64
Figura 5.49: Hipótesis de Bernouilli-Navier.	64
Figura 5.50: Medida de deformaciones en las barras 1 y 6 con 80 kg.	66
Figura 5.51: Tirante de acero y tensor de su extremo.	68
Figura 5.52: Esquema de la estructura sin tirante con 50 kg de carga aplicada en su nudo en voladizo.	69
Figura 5.53: Esquema de la estructura con tirante con 50 kg de carga aplicada en su nudo en voladizo.	69
Figuras 5.54: Sistema de anclaje vertical del apoyo izquierdo.	70
Figuras 5.55: Estructura sin tirante.	70
Figuras 5.56: Estructura con tirante.	71
Figura 5.57: Diagrama de Momentos con 50 kg sin tirante.	71
Figura 5.58: Diagrama de Momentos con 50 kg con tirante.	72
Figura 5.59: Diagrama de Axiles sin tirante con 50 kg.	72
Figura 5.60: Diagrama de Axiles con tirante con 50 kg.	73
Figura 5.61: Diagrama de Cortantes sin tirante con 50 kg.	73
Figura 5.62: Diagrama de Cortantes con tirante con 50 kg.	74
Figura 5.63: Desplazamientos sin tirante en cm con 50 kg.	75
Figura 5.64: Desplazamientos sin tirante en cm con 50 kg.	75
Figuras 5.65: a) Medida de desplazamiento sin carga. b) Medida de desplazamiento 50 kg.	76
Figura 5.66: Desplazamientos con tirante en cm con 50 kg.	77
Figura 5.67: Desplazamientos con tirante en cm con 50 kg.	77
Figura 5.68: a) Medida de desplazamiento sin carga. b) Medida de desplazamiento 50 kg.	78
Figura 5.69: Ubicación de las galgas instaladas en la estructura.	79
Figura 5.70: Ubicación de las galgas instaladas en la estructura.	79
Figura 5.71: Diagrama de Axiles sin tirante con 50 kg.	80
Figura 5.72: Diagrama de Momentos con 50 kg sin tirante.	80
Figura 5.73: Medida de deformaciones en las barras 2 y 5 con 50 kg.	82
Figura 5.74: Diagrama de Axiles con tirante con 50 kg.	82
Figura 5.75: Diagrama de Momentos con 50 kg con tirante.	83
Figura 5.76: Medida de deformaciones en las barras 2 y 5 con 50 kg.	84

Índice de tablas:

Tabla 5.1: Esfuerzos axiales de cada barra en kN. Caso 0.	32
Tabla 5.2: Esfuerzos axiales de cada barra en kN. Caso 1.	34
Tabla 5.3: Cálculo del desplazamiento vertical en G.	34
Tabla 5.4: Tabla comparativa de los tres métodos de cálculo del desplazamiento del nudo G.	46
Tabla 5.5: Deformaciones teóricas en todas las barras con 50 kg.	47
Tabla 5.6: Deformaciones teóricas en las barras 2, 9 y 10 con 50 kg.	47
Tabla 5.7: Deformaciones en Robot de todas las barras con 50 kg.	48
Tabla 5.8: Deformaciones en Robot de las barras 2, 9 y 10 con 50 kg.	48
Tabla 5.9: Medida de deformaciones en las barras 2, 9 y 10 con 50 kg.	48
Tabla 5.10: Esfuerzos de cálculo del dimensionamiento de la estructura.	51
Tabla 5.11: Tabla comparativa de los tres métodos de cálculo del desplazamiento del nudo G.	53
Tabla 5.12: Deformaciones teóricas en todas las barras con 150 kg.	54
Tabla 5.13: Deformaciones teóricas en las barras 2, 9 y 10 con 150 kg.	55
Tabla 5.14: Deformaciones en Robot de todas las barras con 150 kg.	55
Tabla 5.15: Deformaciones en Robot de las barras 2, 9 y 10 con 150 kg.	55
Tabla 5.16: Medida de deformaciones en las barras 2, 9 y 10 con 150 kg.	56
Tabla 5.17: Tabla comparativa de los tres métodos de cálculo del desplazamiento del nudo 2.	62
Tabla 5.18: Tabla de esfuerzos en la estructura con 80 kg.	65
Tabla 5.19: Cálculo teórico de deformaciones en las barras 1 y 6 con 80 kg.	66
Tabla 5.20: Medida de deformaciones en las barras 1 y 6 con 80 kg.	66
Tabla 5.21: Tabla comparativa de los tres métodos de cálculo del desplazamiento del nudo E sin tirante.	76
Tabla 5.22: Tabla comparativa de los tres métodos de cálculo del desplazamiento del nudo E con tirante.	78
Tabla 5.23: Cálculo teórico de deformaciones en las barras 2 y 4 con 50 kg.	81
Tabla 5.24: Medida de deformaciones en las barras 2 y 4 con 50 kg.	81
Tabla 5.25: Cálculo teórico de deformaciones en las barras 2 y 4 con 50 kg.	83
Tabla 5.26: Medida de deformaciones en las barras 2 y 5 con 50 kg.	84

1. RESUMEN

1.1 Resumen

En este trabajo de fin de grado se realiza la contrastación numérica y experimental del comportamiento de distintas estructuras modulares de barras sometidas a cargas exteriores.

El objetivo final es la comparación de resultados obtenidos experimentalmente con los resultados obtenidos de forma teórica. Este estudio teórico se realiza en asignaturas de estructuras como Elasticidad y Resistencia de Materiales I y II, Mecánica de Máquinas, Métodos Avanzados de Diseño Mecánico y Teoría de Estructuras.

Esto permite complementar de manera clave los contenidos desarrollados en clase, utilizando estas técnicas en las prácticas de laboratorio. Además así poder poner en funcionamiento máquinas adquiridas en el traslado al nuevo campus y que actualmente se encuentran en desuso.

Para ello se estudiarán diferentes configuraciones, mediante la adición o eliminación de barras. Las distintas configuraciones se estudiarán mediante la técnica DIC de correlación digital de imágenes, equipos de galgas extensométricas y relojes comparadores, tanto de estructuras reticuladas como articuladas.

Existen equipos similares en otras universidades, pero no de estas dimensiones ni exactamente las mismas características. El laboratorio de Medios Continuos y Teoría de Estructuras cuenta con un bastidor universal de ensayos y un juego de barras de distintas medidas junto con placas de unión de distinta geometría, diseñadas y fabricadas en la propia escuela.

Mediante este trabajo de fin de grado se pretende poner en valor este equipamiento, dándole uso docente ya que los alumnos podrán comprobar como la teoría que es explicada en clase se asemeja a los resultados obtenidos en laboratorio.

1.2 Abstract

In this end-of-grade project, the numerical and experimental testing of the behavior of different modular structures of bars subjected to external loads is carried out.

The final objective is the comparison of results obtained experimentally with the results obtained theoretically. This theoretical study is carried out in subjects of structures such as Elasticity and Strength of Materials I and II, Mechanics of Machines, Advanced Methods of Mechanical Design and Theory of Structures.

This allows to complement in a key way the contents developed in class, using these techniques in the laboratory practices and also to put into operation machines acquired in the move to the new campus that are currently not used.

To do this, different configurations will be studied, through the addition or removal of bars. The different configurations will be studied using the DIC technique of digital image correlation, strain gauges equipment and dial indicators.

There are similar equipments in other universities, but not of these dimensions or exactly the same characteristics. The Laboratory of Continuous Media and Theory of Structures has a universal test frame and a set of bars of different sizes together with different types of union plates, designed and manufactured in the school.

Through this end-of-grade project we intend to value this equipment; giving it a teaching use and students will be able to see how the theory that is explained in class resembles reality.

2. INTRODUCCIÓN

Actualmente en la Escuela Politécnica Superior de Linares se imparten diversas asignaturas de cálculo de estructuras y cuyos temarios recogen el estudio de estructuras de barras, tanto reticuladas como articuladas. Estos temarios estudian métodos de cálculo como son el Método de los Nudos, Método de las Secciones o de Ritter, Método del Principio de Trabajos Virtuales, Método del Teorema de Castigliano, Método de Cross, Método de Elementos Finitos o Cálculo Matricial.

Hasta ahora las prácticas impartidas en estas asignaturas se centran en la resolución de problemas con ayuda de software informático de cálculo de estructuras, como por ejemplo Revit, Robot Estructural Analysis, Matlab, Abaqus o Cype. Esto es útil e interesante para el alumno, ya que le ayuda a entender los conocimientos explicados en las clases teóricas comparando los resultados obtenidos numéricamente a la vez que se familiariza con estos programas que se utilizan actualmente en la profesión.

No obstante, el alumnado no tiene una visualización directa de estructuras reales, lo que hace más difícil comprender lo que los cálculos numéricos realizados en clase significan e implican en las estructuras reales, concretamente las deformaciones de las barras, los desplazamientos en los nudos y las tensiones y esfuerzos calculados.

Además, el laboratorio de Teoría de Estructuras y Medios Continuos dispone de bastante equipamiento entre el que resalta un bastidor universal de ensayos GUNT SE-100 [1], que da la posibilidad de aplicar una carga de hasta 400kN repartida en dos puntos distintos.

En el Trabajo de Fin de Grado de Diego García Torres [2], antiguo alumno de la Escuela Politécnica Superior de Linares, se realizó el estudio y diseño del actual juego de barras y placas de unión que se ha utilizado para este trabajo.

Debido a que la carga aplicable en este banco es excesiva para estas barras y podría dañarlas o deformarlas, también es interesante ingeniar en este proyecto otro sistema de aplicación de carga más adecuado para estas estructuras.

Este equipo se obtuvo cuando se hizo el traslado al nuevo campus y por ahora se encuentra en desuso ya que no se han realizado las contrastaciones de resultados necesarias y la puesta en marcha de distintos equipos que posibiliten su utilización en las prácticas de estructuras. Con este trabajo se contribuirá directamente a la puesta en marcha de este equipamiento, la cual le dará un uso docente para la formación de los alumnos.

2.1 Introducción histórica

Las celosías planas son estructuras compuestas por barras rectas que se encuentran unidas entre sí, las cuales trabajan principalmente a compresión o a tracción.

Con la triangulación, se obtienen estructuras estables y muy rígidas, esto permite poder cubrir luces de grandes dimensiones. Las deformaciones son muy pequeñas y están vinculadas a los acortamientos y alargamientos de las barras producidos por los esfuerzos axiales que se producen debido a las cargas exteriores.

En estas estructuras, las flexiones de las barras son muy pequeñas o incluso se llegan a despreciar. La triangulación se utiliza para formar una viga simple, una celosía plana, una cúpula, una bóveda o mallas espaciales de grandes dimensiones.

Grandes ejemplos de este tipo de estructuras se pueden ver en la actualidad como por ejemplo la Torre Eiffel, una estructura de hierro diseñada por el ingeniero Gustave Eiffel para la Exposición universal de París en 1889, compuesta principalmente por triangulaciones que le proporcionan gran rigidez ante esfuerzos horizontales como el viento (ver figura 2.1). Otro ejemplo de este tipo de estructuras, es el Seagram Building, un edificio de 158 metros de altura diseñado por Mies van der Rohe, que se compone de tres partes diferenciadas en altura, hormigón armado en sus primeras 17 plantas, celosías triangulares en las siguientes 12 plantas y el resto de la estructura de pórticos rígidos (ver figura 2.2). [3]



Figura 2.1: Torre Eiffel. [4]



Figura 2.2: Seagram Building. [5]

2.2 Antecedentes

Ya en el siglo I antes de Cristo, los romanos construyeron tejados con celosías trianguladas de madera para eliminar las cargas laterales en los apoyos.

Incluso construyeron puentes con grandes luces como por ejemplo el puente de Trajano sobre el Danubio, con una luz de vano de más de 30 metros y 19 metros de altura. Este puente estaba compuesto por celosías y arcos de madera.

Actualmente no quedan restos de este puente, pero sí referencias en libros de Palladio y en la columna de Trajano. (Ver figura 2.3).

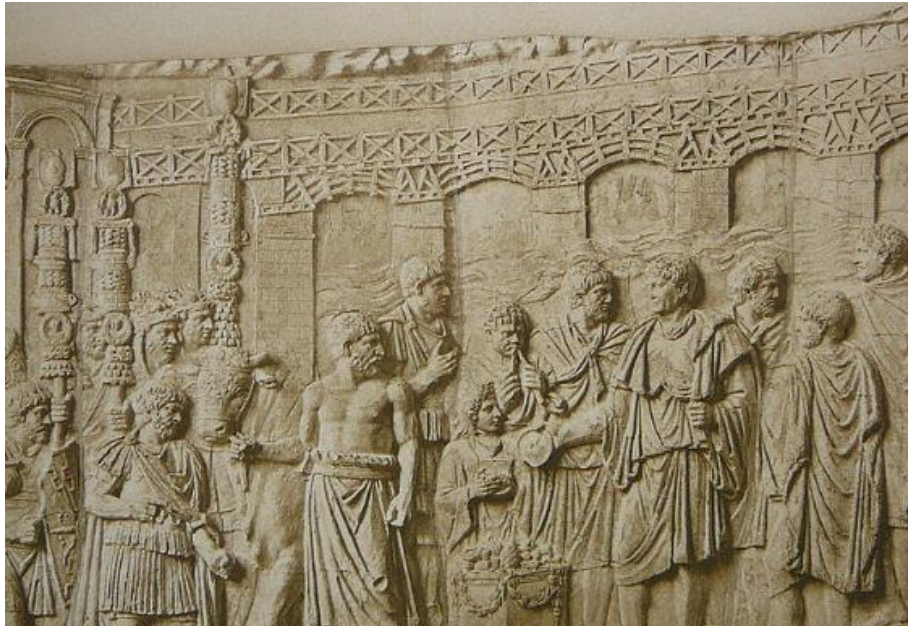


Figura 2.3: Puente de Trajano en la Columna de Trajano. [6]

También se construyeron muchas cubiertas de madera en iglesias góticas, sobre sus bóvedas, y muchos tejados de madera en la Edad Media. Estas construcciones tenían celosías de madera para proteger el interior de los edificios de los esfuerzos provocados por el viento o las adversidades. (Ver figura 2.4).

Se considera que el precursor de este tipo de estructuras fue Andrea Palladio en el siglo XVI, ya que escribió “Los cuatro libros de Arquitectura” en 1570 donde describía como se comportan las estructuras trianguladas en puentes, a pesar de haberse utilizado estas estructuras desde mucho tiempo antes.

El mayor desarrollo de este tipo de estructuras comenzó al introducir el hierro como el principal material en su construcción, en el siglo XIX, del cual finalmente se pasó al acero estructural.

Casi todos los ingenieros de la especialidad de estructuras patentaron un tipo de celosía y todas ellas se fueron utilizando en diferentes puentes, como por ejemplo las celosías Pratt, Warren, Howe o Lattice (ver figura 2.5).

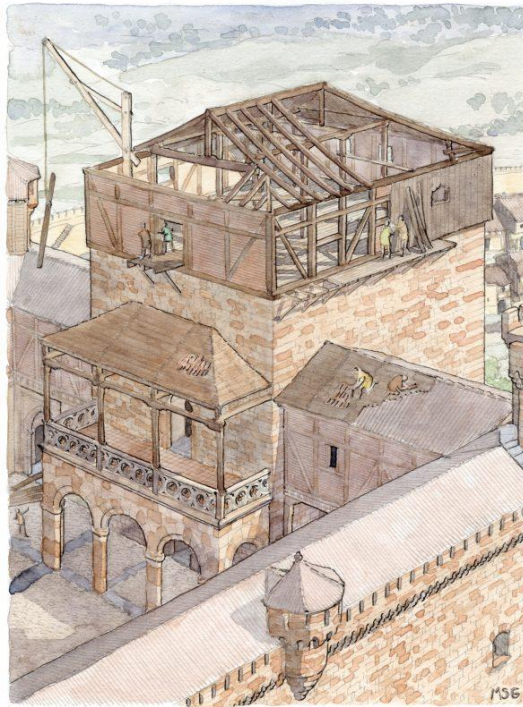


Figura 2.4: Representación de celosías de madera de la Edad Media. [7]

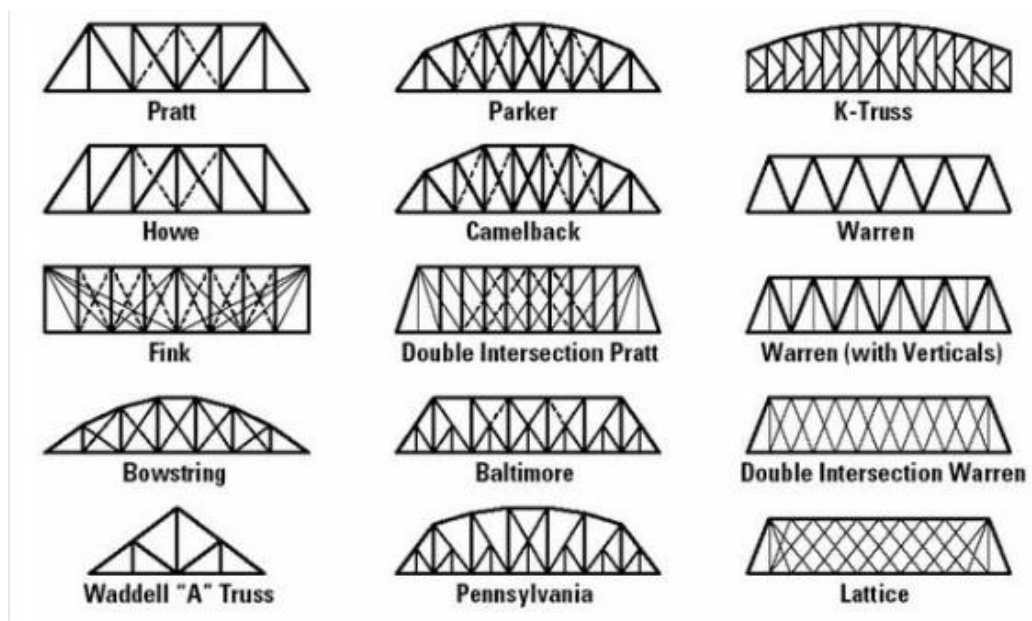


Figura 2.5: Ejemplos de tipos de celosías patentadas. [8]

Actualmente las celosías se encuentran presentes en gran variedad de construcciones, entre las cuales destacan puentes, arriostramientos en edificios de altura, grandes luces, etc.

El material por excelencia utilizado es el acero y se emplean habitualmente perfiles tubulares o laminados. [3]

3. OBJETIVOS

Los principales objetivos de este trabajo de fin de grado son los siguientes:

- Poner en funcionamiento el equipamiento nombrado y dar la posibilidad de su utilización en prácticas de laboratorio para mejorar la formación de los alumnos de las asignaturas de estructuras.
- Ingeniar el sistema o dispositivo de aplicación de carga adecuado para las estructuras del laboratorio de Teoría de Estructuras y Medios Continuos, de forma que se obtengan resultados que se aprecien pero sin llegar a dañar ni deformar la estructura.
- Obtener resultados experimentales razonables de desplazamientos mediante los relojes comparadores y que coincidan, o se asemejen con los resultados obtenidos numéricamente y mediante software informáticos en distintas disposiciones de la estructura.
- Obtener resultados experimentales de deformaciones en las barras mediante la medición con galgas extensométricas y con la técnica DIC de correlación digital de imágenes, los cuales sean iguales o se aproximen a los resultados obtenidos numéricamente y mediante software informáticos en distintas disposiciones de la estructura.
- Comparar los resultados obtenidos de deformaciones con ambas técnicas y establecer el orden de precisión de ambas y así poder comparar su validez y exactitud.
- Realizar nuevas configuraciones estructurales añadiendo elementos nuevos a la estructura, como tirantes. Así se podrá comprobar su comportamiento y añadirlos como punto de innovación para las prácticas docentes.

4. MATERIALES, MÉTODOS Y TÉCNICAS

En este apartado se explicarán las técnicas llevadas a cabo y el equipamiento utilizado para los ensayos de este Trabajo de Fin de Grado.

4.1 Bastidor universal de ensayos GUNT SE-100

El bastidor de ensayos universal GUNT SE-100 [1] sirve, preferentemente, para experimentos de flexión, carga y presión en soportes, barras, entramados y otros componentes del área de las estructuras y la ingeniería de la construcción.

En la figura 4.1 se ofrece una vista general de dicho bastidor de ensayos.



Figura 4.1: Imagen del bastidor Universal de ensayos GUNT SE 100. [1]

El bastidor ha sido diseñado especialmente para componentes de gran tamaño, ya que tiene un diseño con doble marco y un espacio interior de 600 milímetros, lo cual proporciona un espacio considerable para ensayos de todo tipo de estructuras.

El bastidor es capaz de soportar cargas de prueba de hasta 300kN aplicadas en un único punto o dos cargas de hasta 200kN aplicadas en dos puntos distintos. Los dispositivos de carga se desplazan sobre rodillos en la parte superior del marco y pueden posicionarse en cualquier lugar, en el interior del bastidor.

Los elementos del bastidor están constituidos por perfiles en U y los ángulos del bastidor tienen un diseño de nudos rígidos, cada uno con 9 tornillos de alta resistencia. Todo el conjunto tiene un peso de 3 toneladas y se monta sobre 4 elementos de apoyos regulables y antivibratorios.

En conjunto, con el juego de accesorios y la carga aplicada hidráulicamente sus posibilidades de aplicación son casi ilimitadas. Su diseño permite un montaje rápido y sencillo.

4.1.1 Descripción técnica

- **Bastidor Universal de ensayos**

La figura 4.2 muestra un esquema del bastidor donde las principales partes están indicadas con números.

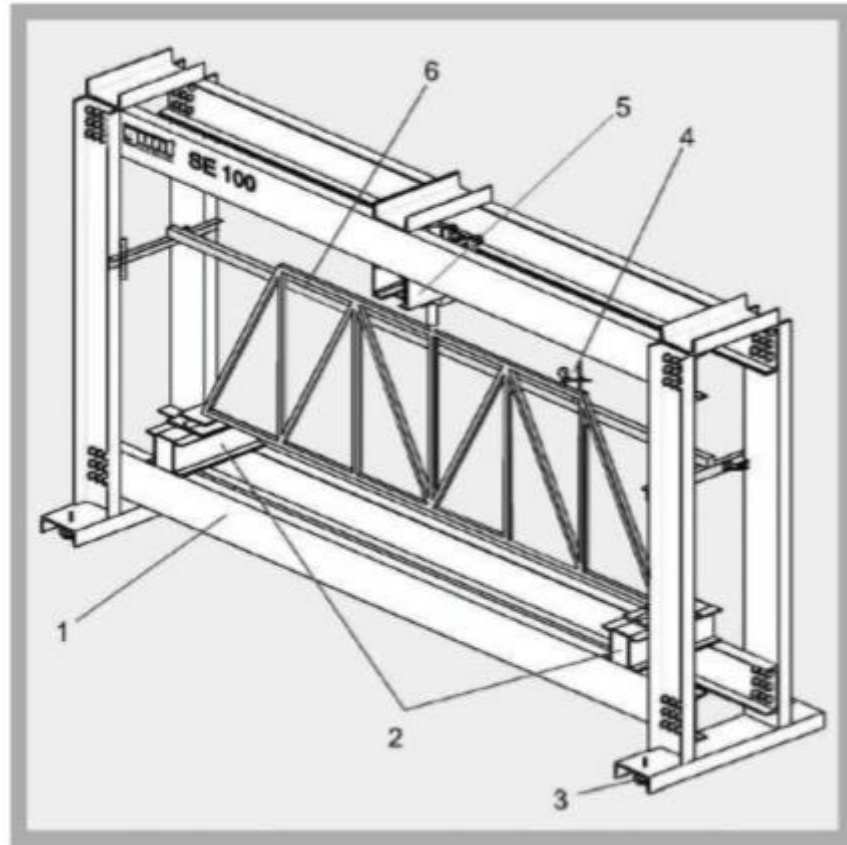


Figura 4.2: Esquema del bastidor Universal de ensayos GUNT SE 100. [1]

Donde:

- 1 - Bastidor de ensayo universal SE 100 de perfiles de acero U 400.
- 2 - Juego de accesorios estándar (apoyos). Soportes SE 100.01.
- 3 - Pedestal de la máquina.
- 4 - Juego de relojes de medición SE 100.03.
- 5 - Dispositivo de carga SE 100.02.
- 6 - Entramado plano SE 100.04.

La descripción técnica del banco se encuentra más detalladamente en el anexo.

- **Dispositivos de carga**

Las barras, junto con las placas de unión utilizadas en este Trabajo de Fin de Grado, fueron diseñadas y fabricadas en el Trabajo de Fin de Grado del antiguo alumno Diego García Torres [2], en el cual se decidió hacer las barras con perfiles huecos cuadrados de aluminio de 30x30x3 milímetros de sección y las placas de unión con chapas de acero de 3 milímetros de espesor.

Dado que los esfuerzos de cálculo que se utilizaron y a los que se comprobaron en dicho trabajo estos elementos fueron muy inferiores a la carga aplicable mediante el dispositivo de carga original del banco, los dispositivos de carga del bastidor no son adecuados para el tipo de estructura a estudiar.

Ha sido necesario idear un nuevo sistema de aplicación de carga que se adecúe al orden de carga que es necesario aplicar para no dañar la estructura.

El sistema de aplicación de carga ingeniado para el orden de carga requerido se trata de un sistema muy sencillo, compuesto por un peso digital profesional de hasta 300 kg [9], cuyos datos técnicos se pueden ver en el anexo y el cual se puede ver en la figura 4.3. También se compone de un soporte de acero diseñado con Autodesk Inventor y realizado en el propio taller del campus, el cual se puede ver en las figuras 4.4 y 4.5 y cuyas características geométricas se pueden ver en el apartado de planos. Dicho soporte se le ha incorporado un tornillo con anilla en su parte superior y una tuerca de métrica 4 junto con dos arandelas de acero de métrica 4 como se puede ver en la figura 4.5.

También se han utilizado dos corchetes de tornillo tensor/tensor de acero galvanizado, los cuales se pueden ver en la figura 4.6.



Figura 4.3: Peso digital profesional de hasta 300 kg. [9]

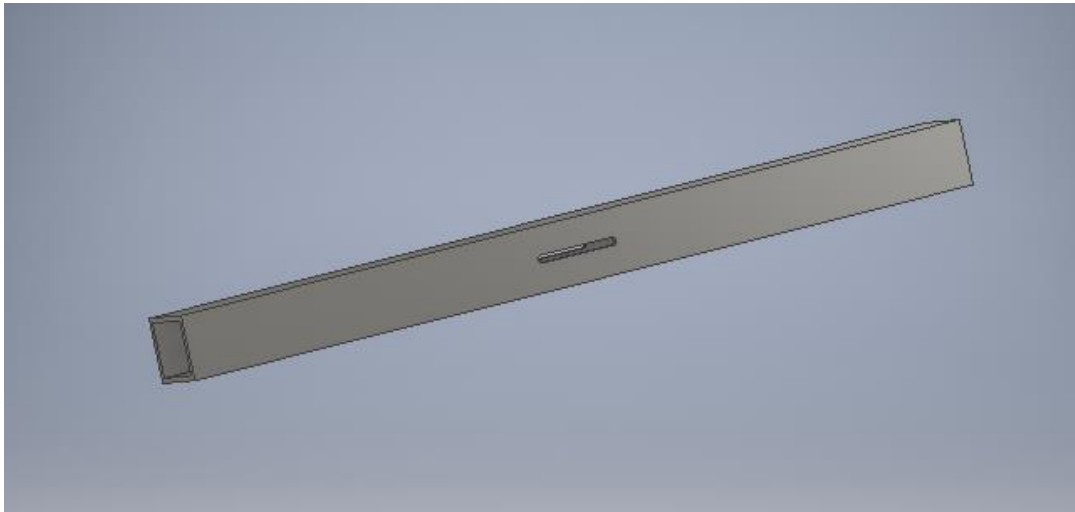


Figura 4.4: Modelo del soporte inferior del sistema de carga.



Figura 4.5: Soporte inferior del sistema de carga.



Figura 4.6: Corchete de tornillo tensor/tensor de acero galvanizado.

El funcionamiento de este sencillo sistema consiste en girar los corchetes para que los tornillos se enrosquen en ellos y produzcan tensión y así poder leer en el peso

digital la carga aplicada a la estructura fácilmente. El sistema de carga completo montado queda como se puede ver en la figura 4.7.



Figura 4.7: Sistema de carga completo.

- **Tipos de apoyo**

- Apoyo libre**

El apoyo libre permite el giro y desplazamientos horizontales con poca fricción. Tal y como muestra la figura 4.8, éste se monta con un caballete de soporte (1), una placa grande de apoyo (2), un rodamiento de apoyo libre (3) y una placa pequeña de apoyo (4). Este tipo de apoyo se puede ver en la figura 4.9.



Figura 4.8: Esquema apoyo libre. [1]

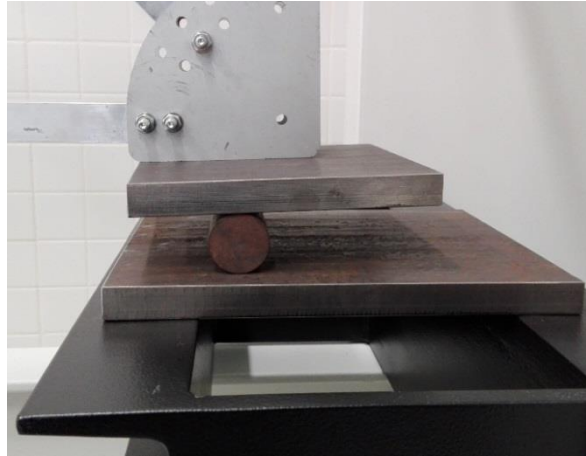


Figura 4.9: Apoyo libre.

-Apoyo fijo

El apoyo fijo solo permite el giro con poca fricción. La figura 4.10 muestra un esquema del mismo, que se monta con un caballete de soporte (1), una placa grande de apoyo (2), un rodamiento de apoyo fijo (3) y una placa pequeña de apoyo (4). Este tipo de apoyo se puede ver en la figura 4.11.



Figura 4.10: Esquema apoyo fijo. [1]

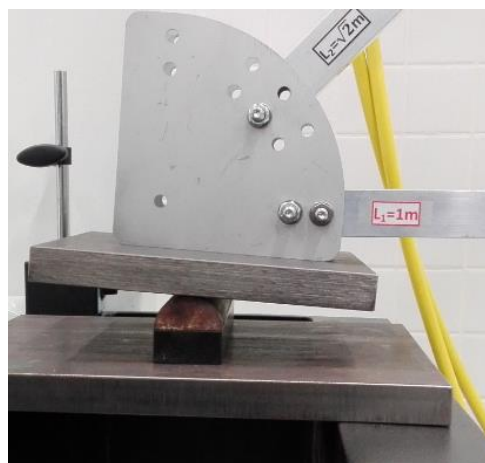


Figura 4.11: Apoyo fijo.

4.2 Relojes comparadores

Los relojes comparadores [10] (ver en la figura 4.12) son instrumentos de metrología que se utilizan para medir diferencias de cotas por medición indirecta del desplazamiento de la punta de contacto del palpador una vez que el aparato está fijado en un soporte.

Este instrumento consiste en un conjunto de engranajes que amplifican el desplazamiento del palpador en un movimiento circular de las agujas del reloj sobre una esfera graduada con una precisión hasta de micras.

La esfera de estos relojes puede girarse y colocar el cero en la posición de la aguja y así leer la medida por comparación. Este instrumento debe estar fijado a una base o a un soporte, en este caso se utilizarán soportes magnéticos, lo que facilita su fijación al bastidor en la posición deseada.

Este dispositivo se suele utilizar en la fabricación de piezas o todo tipo de conjuntos para obtener medidas rápidas y precisas, por lo que es muy utilizado sobre todo en fabricación en serie.

Para hacer la lectura de este instrumento, primero se mira la manecilla pequeña que mide milímetros y después la manecilla grande que mide las décimas de milímetro.

- **Juego de relojes de medición SE 100.03**

Para la medición de desplazamientos en los nudos, el laboratorio dispone de un juego de relojes comparadores cuyos datos técnicos son los siguientes [1]:

- Trayectoria de medición:	30 mm
- Resolución:	0,001 mm
- Diámetro de carcasa:	58 mm



Figura 4.12: Reloj comparador.

4.3 Galgas extensométricas

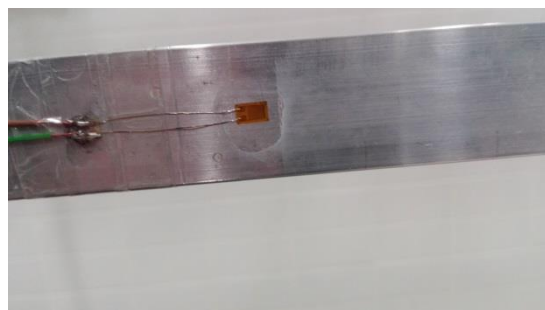
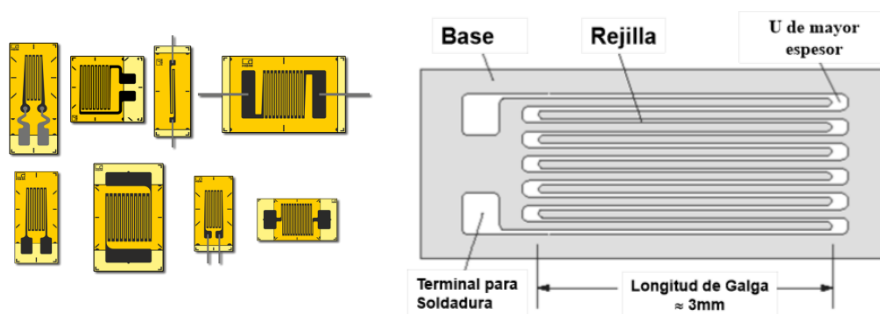
Las galgas extensométricas [11] (ver en la figuras 4.13) son sensores que miden diferentes magnitudes como carga, deformación, posición, presión o par, gracias al efecto piezorresistivo de algunos materiales, por el cual cambian su valor de resistencia al someterlos a esfuerzos o deformaciones en uno de sus ejes.

Un esfuerzo que deforme la galga hace que cambie su resistencia eléctrica. Este cambio de resistencia se debe a la reducción de la sección, al aumento de su longitud o al cambio de su resistividad.

Estos sensores fueron inventados por los ingenieros Arthur C. Ruge y Edward E. Simmons en 1938. Consisten en una rejilla de hilo metálico muy fino en la cual la mayor parte de ella se encuentra dispuesta en una dirección, unida a una base aislante muy delgada y flexible. La rejilla en sus extremos tiene dos partes más gruesas para soldar los cables de conexión a los instrumentos de medida. La galga se pega al elemento cuya deformación se desea medir mediante algún adhesivo, como por ejemplo cianoacrilato. La lámina se deforma según lo hace el elemento al que está adherida cambiando su resistencia eléctrica.

Idealmente para medir esfuerzos en un punto concreto las galgas deberían ser puntuales, por lo que su tamaño suele ser muy reducido. Otras características de estos sensores son los materiales con los que son fabricadas ya que tienen que ser duras para generar respuestas rápidas, o la temperatura de trabajo y el factor de galga, que indican la sensibilidad que tiene la galga.

Los materiales más utilizados para su fabricación son aleaciones metálicas como el constantán, el nicrom, aleaciones de hierro, cromo y aluminio o elementos semiconductores como el germanio y el silicio.

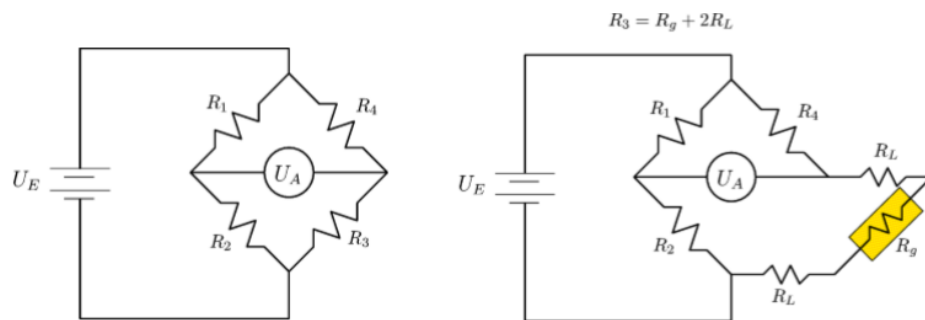


Figuras 4.13: Galgas extensométricas. [12]

Para tratar la variación de voltaje o la señal, se utiliza un puente de Wheatstone (ver figuras 4.14), que es un conjunto de 4 resistencias enlazadas en un círculo cerrado, entre las cuales una de ellas es la resistencia de medida. Esto puede provocar problemas como son sensibilidad insuficiente o cambios bruscos en las resistencias debidos a cambios de temperatura.

La técnica más utilizada para obtener una señal eléctrica como resultado en el puente de Wheatstone es el método de deflexión, que lo que hace es medir la diferencia de tensión entre ambas ramas o bien medir la corriente en un brazo central.

Para usar correctamente el puente de Wheatstone hay que tener en cuenta que los cambios de temperatura en el cableado pueden provocar resultados erróneos y además es muy importante calibrar el puente y equilibrarlo, para que no haya tensión a la salida del puente, por lo que hay que comprobar que el puente está dando resultados correctos haciendo la calibración adecuadamente. [11]



Figuras 4.14: Puente de Wheatstone. [13]

En el puente de Wheatstone, la lectura del galvanómetro es nula cuando:

$$R_1 \times R_3 = R_2 \times R_4$$

Si se sustituye R_1 por una galga extensométrica y se convierte R_3 en una resistencia variable, se puede calibrar el sistema hasta que la tensión de salida en el puente sea nula.

Aplicada la deformación, la lectura de la tensión en el galvanómetro, U_A , está relacionada con la variación de la resistencia R_g y la tensión U_E de la fuente de alimentación, por tanto la deformación, ϵ , se obtiene como se puede ver en la expresión (4.1):

$$E = \frac{V_0}{4} \times \frac{\Delta R}{R} \Rightarrow \epsilon = \frac{4 \times E}{V_0 \times S_a} \quad (4.1)$$

Donde E es el módulo de elasticidad del material de la galga, S_a es el factor de sensibilidad de la galga y V_0 es la tensión en la rama.

Para la lectura de la medida de las galgas extensométricas se ha utilizado un equipo modelo P3 Strain Indicator and Recorder portátil con entrada de cuatro canales simultáneos [14], el cual se puede ver en la figura 4.15 y cuyos datos técnicos se pueden ver en el anexo. La conexión de dicho equipo se puede ver en la figuras 4.16 y 4.17.



Figura 4.15: Equipo P3 Strain Indicator and Recorder. [14]

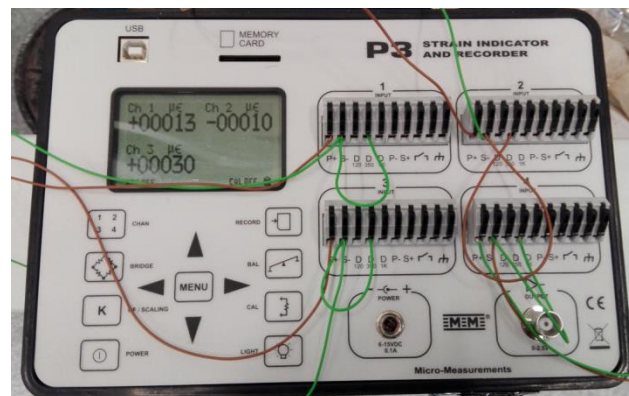


Figura 4.16: Conexión de Equipo P3 Strain Indicator and Recorder.

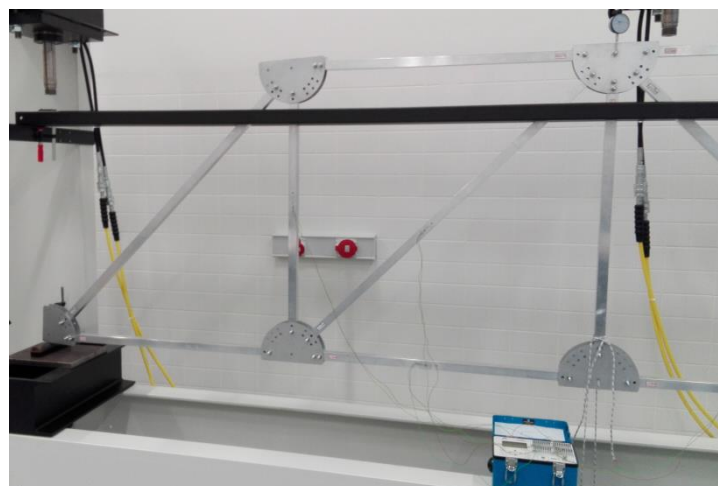


Figura 4.17: Conexión de Equipo P3 Strain Indicator and Recorder con las galgas extensométricas.

4.3.1 Ventajas de las galgas extensométricas

Entre las ventajas de este tipo de sensores destacan:

- Tienen un tamaño pequeño, por lo que no requieren de mucho espacio.
- Funcionan alimentadas tanto con corriente continua como con alterna.
- Su rápida respuesta con frecuencia excelente.
- Sirven para medidas estáticas como para dinámicas.
- Es relativamente fácil compensar la temperatura.
- No les influyen los campos magnéticos.

4.3.2 Desventajas de las galgas extensométricas

A pesar de tener muchas ventajas, este tipo de sensores también tienen desventajas a tener en cuenta como pueden ser:

- Tienen una señal de salida demasiado débil.
- Disponen de poco rango de movimiento, por lo que si la deformación se excede de este rango la galga no funcionará bien.
- Les influyen mucho las vibraciones y los cambios de temperatura.
- Las galgas van perdiendo adhesión con el tiempo y cada vez funcionan peor.
- Pueden llegar a resultar caras si se desea utilizarlas en casos puntuales y de pequeña envergadura.
- Tienen poca estabilidad.

4.3.3 Limitaciones de las galgas extensométricas

- El esfuerzo en las galgas no debe superar su esfuerzo de fluencia, es decir no superar el margen elástico.
- La propia deformación disponible de la galga.
- Las galgas solo obtienen datos de medida para las direcciones para las que se han diseñado, por lo que si hay esfuerzos perpendiculares a la galga se necesitará colocar otra galga en dirección perpendicular a la primera.

4.3.4 Aplicaciones de las galgas extensométricas

Estos pequeños sensores han resultado muy útiles en todo tipo de ámbitos, todo tipo de situaciones en las que sea necesario medir deformaciones o esfuerzos en elementos que cumplan la Ley de Hooke. Por ejemplo, son muy utilizadas en puentes, grúas, automóviles, hormigón armado, edificios, aviones o vagones de tren.

Es frecuente la necesidad de medir en muchos puntos distintos, por lo que las galgas se convierten en una de las mejores opciones ya que son fáciles de manipular, sobre todo para propósitos de desarrollo e investigación.

En el campo de la ingeniería civil se utilizan para controlar las deformaciones y grietas en elementos estructurales como muros, puentes o vigas, ya que ayudan a conocer el comportamiento real de la estructura y así no depender solo del diseño.

En medicina también tienen muchas aplicaciones en aparatos ortopédicos, sensores dentales, sensores en ligamentos y tendones, simuladores de articulaciones, pinzas de mano o incluso transfusiones de sangre o transductores de túnel carpiano ya que permiten medir variables biológicas como la temperatura, presión y flujos en diferentes órganos del cuerpo humano.

Su campo de aplicación llega incluso hasta la agronomía donde sirven para controlar el riego del agua y verificar su uso adecuado entre otra multitud de aplicaciones, lo que las hace una herramienta indispensable en ingeniería. [11]

4.4 Correlación Digital de Imágenes (DIC)

La Correlación Digital de Imágenes (DIC) [15] es utilizada experimentalmente como una técnica en la cual se toman imágenes durante un ensayo y a partir de ellas mediante un software informático, se pueden obtener los desplazamientos y deformaciones producidas en los elementos. Para poder analizar mediante DIC las imágenes de un ensayo, la probeta debe presentar una distribución de intensidad en la escala de grises, llamada “speckle”, como se puede ver en la figura 4.18.

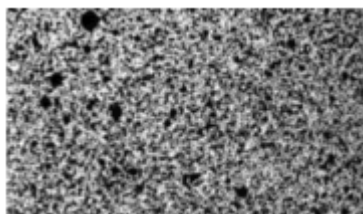


Figura 4.18: Imagen de speckle para procesar mediante DIC. [16]

Es una aplicación basada en la comparación de dos imágenes adquiridas en diferentes estados, una antes de la deformación y la otra después. Estas dos imágenes se conocen como imagen de referencia y deformada (ver figura 4.19).

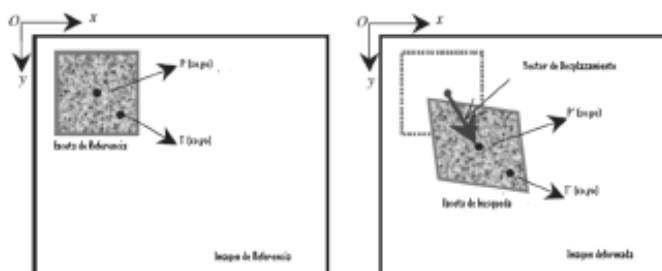


Figura 4.19: Imagen de referencia e imagen deformada. [16]

Después de la adquisición por una cámara CCD, estas imágenes se digitalizan y se almacenan en el disco duro de una computadora para su análisis. Se seleccionan dos subconjuntos respectivamente de las imágenes de referencia y deformada para la correlación. El algoritmo de correlación, que detecta los desplazamientos locales u y v comparando los dos subconjuntos de imágenes, es el siguiente.

El punto interesado en la imagen de referencia se caracteriza por un subconjunto rectangular centrado en un punto p , un área de píxeles ($n \times m$). El subconjunto correspondiente, también un área de píxel ($n \times m$), en la imagen deformada se estima en una determinada ubicación con un rango especificado.

Se realiza una rutina de búsqueda fina, píxel por píxel, dentro del rango especificado en la imagen deformada. La ubicación más cercana p en la imagen deformada (ver figura 4.20) se selecciona según la búsqueda del patrón mejor ajustado, que tiene el valor mínimo del coeficiente cruzado mutuo $r(i,j)$.

El punto p es la ubicación más cercana a nivel de píxel a la solución verdadera (u, v) y 2...9 son ubicaciones de los 8 píxeles vecinos.

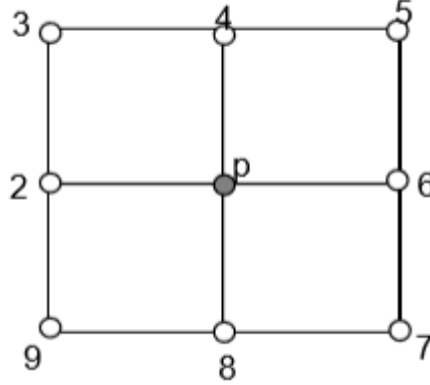


Figura 4.20: Solución del nivel de píxel p y sus vecinos. [15]

Este coeficiente $r(i,j)$ viene definido por la ecuación (4.2):

$$r(i,j) = 1 - \frac{SA(i,j)B(i',j')}{(SA(i,j)^2 SB(i',j')^2)^{1/2}} \quad (4.2)$$

Donde $A(i,j)$ es el nivel de gris en la ubicación de (i,j) en la imagen de referencia A , $B(i',j')$ representa el nivel de gris en la ubicación de (i',j') en la imagen deformada B . La relación entre (i,j) y (i',j') podría describirse de la siguiente manera como se puede ver en las expresiones (4.3).

$$i' = i + u \quad j' = j + v \quad (4.3)$$

Donde u y v representan el desplazamiento del píxel de (i,j) en las direcciones horizontal y vertical, respectivamente. El siguiente paso es decidir los valores exactos de u y v . La ubicación más cercana seleccionada y sus ocho ubicaciones vecinas de píxeles constituirán una superficie de ajuste que se puede representar mediante una función cuadrática bidimensional $f(x,y)$, como la que se puede ver en la expresión (4.4).

$$f(x,y) = a_1 x^2 + a_2 y^2 + a_3 xy + a_4 x + a_5 y + a_6 \quad (4.4)$$

Se supone que los desplazamientos u y v podrían definirse en función de la ubicación del valor mínimo de la superficie de montaje. Por lo tanto, encontrar los valores de u y v requiere resolver un conjunto de nueve ecuaciones lineales como indica la expresión (4.5).

$$B x a = r \quad (4.5)$$

Donde B es una matriz de 9x6, que consiste en la evaluación de cada término en la función $f(x, y)$, a es un vector de 6x1, que representa los coeficientes desconocidos $a_1 \dots a_6$, r es un vector de 9x1 que consiste en la evaluación de r (i,j) en las ubicaciones.

Dado que el número de incógnitas es menor que el número de ecuaciones, se espera que encuentre la solución de mínimos cuadrados para este conjunto de ecuaciones lineales. Este conjunto de ecuaciones se resuelve mediante el uso de una técnica numérica SVD, descomposición de valores singulares, para descomponer la matriz B. Las evaluaciones de u y v se pueden obtener mediante la resolución de las ecuaciones lineales (4.6):

$$\frac{\partial f}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial f}{\partial y} = 0 \quad (4.6)$$

Los campos de desplazamiento de u y v pueden determinarse simplemente sustituyendo el vector r en el proceso de iteración anterior. [15]

Esta técnica ha sido una de estas técnicas novedosas en la medida de deformaciones que ha permitido medirlas en la superficie de los elementos ensayados, sin necesidad de contacto, en tres dimensiones y totalmente independiente del material ensayado.

Por esto, uno de los objetivos de este trabajo es poner de manifiesto la potencialidad de la técnica DIC en la medición experimental.

4.4.1 Historia de la Correlación Digital de Imágenes (DIC)

Los primeros trabajos en los que se aplicó la técnica de correlación digital de imágenes fueron a principios de 1950 por Gilbert Hobrough (1919-2002), quien construyó y diseñó un equipo para correlacionar imágenes de alta resolución, por lo que fue uno de los pioneros en esta técnica.

Pero a pesar de esto, fueron los investigadores de robótica e inteligencia artificial los primeros que desarrollaron algoritmos basados en la visión y métodos de visión en estéreo, a la vez que aplicaciones de fotogrametría aérea.

Los primeros usos de esta técnica estaban lejos de la ingeniería pero cuando se presentaron las dificultades en el posprocesado de las imágenes, a estas dificultades les hicieron frente los ingenieros e investigadores, dado su interés por esta técnica para su uso en investigación.

Actualmente la versatilidad y la simplicidad de las técnicas de correlación digital de imágenes, han permitido ampliar su uso en todo tipo de problemas en la mecánica experimental, sobre todo para estudiar el comportamiento mecánico de todo tipo de elementos. [17]

4.4.2 Ventajas de la Correlación Digital de Imágenes (DIC)

Esta técnica ha demostrado tener muchas ventajas entre las que destacan:

- Versatilidad y simplicidad.
- La capacidad de obtener con elevada precisión y exactitud desplazamientos.
- Ha permitido obtener gran cantidad de parámetros experimentales de las propiedades mecánicas de todo tipo de piezas mecánicas de geometría irregular.
- Permite analizar geometrías complejas y conocer cuáles son los puntos críticos y su influencia en la integridad de las estructuras.
- Su carácter práctico, lo que hace que se prevea un aumento de su utilización en un rango muy amplio de campos, pero especialmente en aplicaciones biomecánicas y en la caracterización mecánica de materiales. Esto es debido a que se trata de elementos delicados y de gran irregularidad geométrica, lo que dificulta mucho obtener sus propiedades mecánicas, si no es mediante esta técnica. [17]

4.4.3 Herramientas utilizadas para DIC

En este caso las imágenes han sido procesadas mediante NCORR [18], una librería gratuita de Matlab para correlación digital de imágenes en 2D.

Para la toma de las imágenes se ha utilizado una cámara de alta velocidad modelo Point Grey Grasshopper 3, junto con su software Point Grey Fly Cap [19] y una lente FUJINON de 16 milímetros.

Esta cámara [20] se puede ver en las figuras 4.21 y 4.22, cuyas especificaciones técnicas se encuentran detalladamente en el anexo.



Figura 4.21: Cámara Point Grey Grasshopper 3. [20]

- **Datos técnicos principales de la cámara**

- Resolución de 2448 x 2048 con Frame Rate de 15 FPS
- Sony ICX625 CCD
- Método Global Shutter
- Color Mono
- Lente C-mount



Figura 4.22: Cámara Point Grey Grasshopper 3.

5. PROCEDIMIENTO Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS

5.1 Prólogo y puesta a punto

En principio, el antiguo alumno Diego García Torres [2], que trabajó con este banco de ensayos y realizó el diseño y fabricación de las barras y las placas de unión, dejó planteadas teóricamente tres prácticas de tres disposiciones distintas de la estructura con sus correspondientes cálculos. Como toma de contacto con las técnicas y la estructura se pensó que lo mejor era montar la primera disposición y aplicar ambas técnicas para ver el comportamiento de la estructura y los resultados que se obtenían.

El primer paso es montar cada una de las disposiciones de la estructura, en las cuales se utilizan barras cuadradas de aluminio de diferentes medidas, como elementos de unión tornillos y tuercas de métrica 8 y diversos tipos de placas de unión de acero, ya que todo este material se encuentra disponible en el laboratorio de Teoría de Estructuras y Medios Continuos.

Una vez finalizada la fase de montaje de cada disposición, se procede a instalar los equipos de medida, los relojes comparadores, las galgas extensométricas y la cámara en los sitios donde se quiera estudiar su medida.

Tras haber montado todo, lo siguiente es someter a carga la estructura en los nudos necesarios según la disposición de las cargas. A continuación se procede a la medida de los dos tipos de resultados, medidas de desplazamientos en los nudos mediante los relojes comparadores y medidas de deformaciones en las barras mediante la técnica de correlación digital de imágenes y mediante equipos portátiles de galgas extensométricas.

Una vez realizado esto, se realiza un estudio de los resultados obtenidos con las diferentes técnicas, comparándolos con los resultados teóricos obtenidos numéricamente y mediante software informáticos para sacar conclusiones.

Así que, para empezar a utilizar ambas técnicas se ha procedido a montar la primera disposición aplicando de forma rudimentaria 50 kg de carga en el nudo central (aplicando 50 kg de peso muerto) como se indicaba en la primera práctica propuesta por Diego García Torres. [2]

5.2 Primera disposición con 50 kg

La primera disposición corresponde a una celosía muy utilizada en la actualidad, la cual se conoce como celosía Howe, la cual se puede ver a continuación en la figura 5.1 y 5.2. Esta celosía es una celosía articulada y se ha fabricado con perfiles cuadrados huecos de aluminio de dimensiones 30x30x3 mm. Se ha aplicado una carga vertical de 0,5 kN en el nudo G, la cual corresponde aproximadamente a una carga de 50 kg.

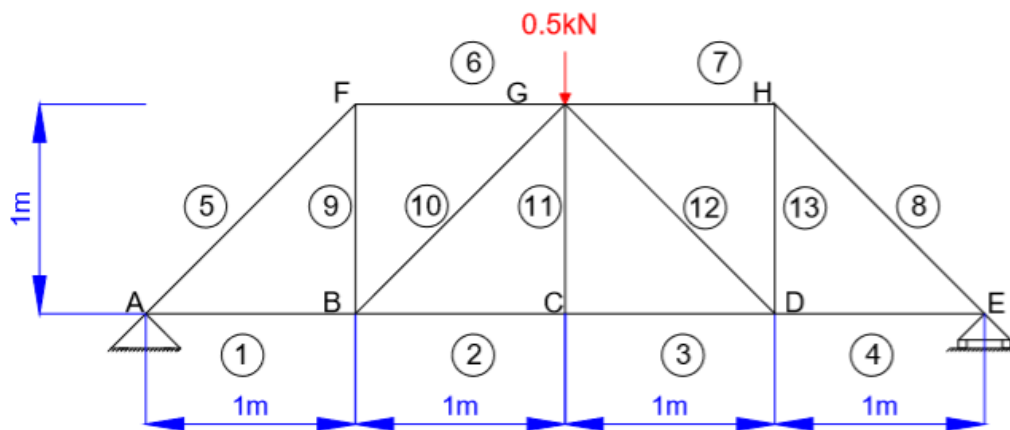


Figura 5.1: Estructura Howe.

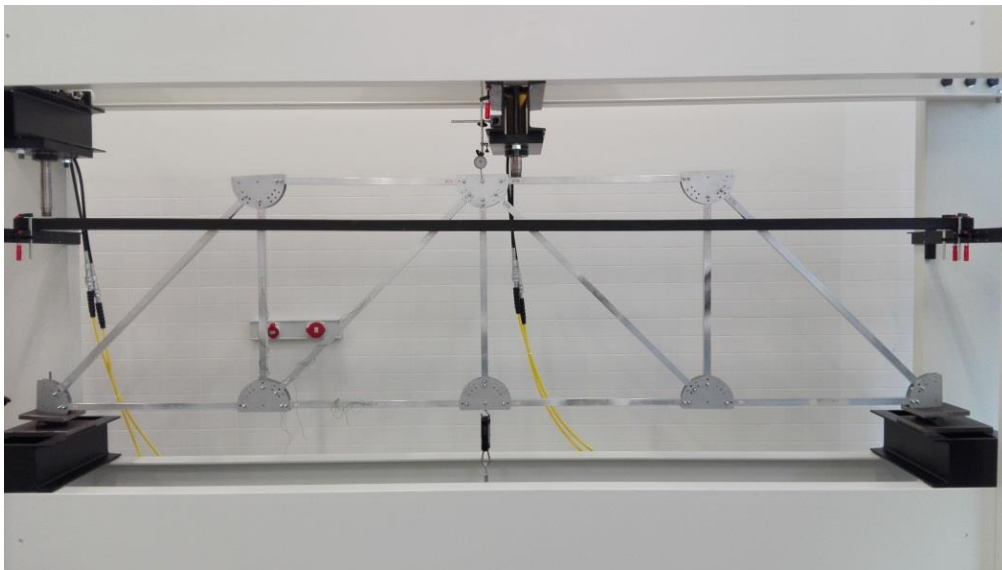


Figura 5.2: Estructura Howe.

Para esta estructura, al tratarse de una estructura articulada, donde los nudos permiten el giro, las barras solo estarán sometidas a un esfuerzo axial, al cual le corresponderán unas deformaciones longitudinales.

Al tratarse de barras sometidas únicamente a carga axial, por medio de la **Ley de Hooke** (ver ecuación 5.1), se obtiene la relación entre el esfuerzo axial aplicado en una barra, P , y la deformación producida en ella, ϵ . (Ver ecuación 5.2).

$$\sigma = E \times \epsilon \quad (5.1)$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{P}{A \times E} \quad (5.2)$$

En estas ecuaciones, donde E es el módulo de elasticidad o de Young del material, σ es la tensión producida en la barra debido al esfuerzo axial P y A es el área de la sección transversal de la barra, se puede ver que si el área y las propiedades mecánicas de la barra se mantienen constantes, la deformación es directamente proporcional a la carga del axial.

También hay que decir que en estos ensayos se medirán directamente las deformaciones con la técnica DIC y galgas extensométricas y se transformarán por medio de estas ecuaciones a axiles, para su comprobación con el cálculo teórico.

Respecto a los desplazamientos, mediante la definición de deformación (ver ecuación 5.3), igualando su expresión con la ecuación 5.2 y resolviendo para los desplazamientos, δ , se obtiene su expresión (ver ecuación 5.4). L es la longitud de la barra, la cual se mantendrá constante también.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (5.3)$$

$$\delta = \frac{P \times L}{A \times E} \quad (5.4)$$

Por lo tanto, en caso de aplicar cargas mayores, ya que el desplazamiento y las deformaciones son directamente proporcionales a la carga, para hallar el desplazamiento o las deformaciones con cargas mayores de forma teórica, bastará con multiplicar los resultados teóricos por el mismo coeficiente que se multiplique la carga aplicada.

Una vez realizado el proceso de carga y lectura de las medidas, se interpretarán los resultados.

5.2.1 Desplazamientos con 50 kg

- Cálculo teórico

Para comenzar con el cálculo teórico debemos determinar el grado de hiperestaticidad de la estructura y las reacciones en los apoyos.

-Nº de barras (b): 13

-Nº de nudos (n): 8

-Nº de reacciones (r): 3

$$G.H = b + r - 2n = 0 \Rightarrow \text{Estructura Isostática}$$

A continuación, se obtendrán las reacciones en los apoyos:

$$\sum F_x = 0; \Rightarrow R_{Ax} = 0;$$

$$\sum F_y = 0; \Rightarrow R_{Ey} + R_{Ay} = 0,5 \Rightarrow R_{Ay} = 0,25\text{kN}$$

$$\sum M_A = 0; \Rightarrow 0,5 \times 2 - 4 \times R_{Ey} = 0 \Rightarrow R_{Ey} = 0,25\text{kN}$$

Una vez hecho esto se calcularán los esfuerzos axiles en cada barra a partir del método de los nudos, ya que se trata de una estructura isostática, cuyos resultados se muestran a continuación en la tabla 5.1:

Barra	Longitud (m)	N(kN)
1	1	0,25
2	1	0,5
3	1	0,5
4	1	0,25
5	1,414	-0,3535
6	1	-0,25
7	1	-0,25
8	1,414	-0,3535
9	1	0,25
10	1,414	-0,3535
11	1	0
12	1,414	-0,3535
13	1	0,25

Tabla 5.1: Esfuerzos axiles de cada barra en kN. Caso 0.

Ahora para calcular el desplazamiento vertical del nudo G, se realizará mediante el **Principio de los Trabajos Virtuales**.

- **Principio de los Trabajos Virtuales (PTV).**

La condición necesaria y suficiente para que un cuerpo elástico esté en equilibrio es que la suma de los trabajos que realizan todas las fuerzas sobre él para cualquier conjunto de desplazamientos y deformaciones virtuales compatibles con sus condiciones de contorno sea nula.

Es decir, si se imponen unos desplazamientos y unas deformaciones virtuales, se generan 2 trabajos, un trabajo realizado por las fuerzas externas; W_e , y un trabajo realizado por las fuerzas internas, W_i .

Lo que indica el Principio de los Trabajos Virtuales es que la suma de estos dos trabajos es igual a cero, cuya expresión es la ecuación 5.5.

$$W_e + W_i = 0 \quad (5.5)$$

Llamando δ_i^* a los desplazamientos virtuales en los puntos de aplicación de las cargas y ε^* al campo de deformaciones virtual. La definición del trabajo realizado por las fuerzas externas proporciona la expresión 5.6.

$$W_e = \sum_1^n P_i x \delta_i^* \quad (5.6)$$

Mientras que la expresión del trabajo realizado por las fuerzas internas se puede ver en la ecuación 5.7.

$$W_i = - \int_V \varepsilon^* x \sigma x dV \quad (5.7)$$

Es decir, el Principio de los Trabajos Virtuales sustituyendo las expresiones 5.6 y 5.7 en la expresión 5.5 y aplicándola a estructuras de barras articuladas proporciona la expresión 5.8.

$$\sum P_i^{EV} x \delta_i^{*ER} - \sum N_i^{EV} x \Delta L_i^{*ER} = 0 \quad (5.8)$$

A partir de ahora se diferenciará entre estado virtual, EV, y estado real, ER. A partir de la expresión 5.9, del incremento de longitud en una barra, y la expresión 5.8 se obtiene finalmente la expresión del Principio de los Trabajos Virtuales (ver ecuación 5.10).

$$\Delta L = L x \varepsilon = L x \frac{\sigma}{E} = \frac{L x N}{A x E} \quad (5.9)$$

$$\sum P_i^{EV} x \delta_i^{*ER} - \sum N_i^{EV} x \frac{L_i x N_i^{*ER}}{A_i x E_i} = 0 \quad (5.10)$$

Para calcular el desplazamiento del nudo G, el estado real será el caso 0 y se supone un estado virtual llamado caso I, en el cual se supone una fuerza vertical de valor unitario sobre el nudo G. Una vez tenido esto en cuenta y despejando de la expresión 5.10 se obtiene la expresión que se utilizará para obtener el desplazamiento del nudo G (ver expresión 5.11).

$$\delta_{Gy} = \sum \frac{N_i^0 \times N_i^I \times L_i}{A \times E} \quad (5.11)$$

Como los axiles del caso 0 ya se tienen de resolver el estado real de la estructura, ahora se vuelven a calcular todos los axiles de todas las barras por el método de los nudos de nuevo para el caso I (ver tabla 5.2):

Barra	Longitud (m)	N(kN)
1	1	0,5
2	1	1
3	1	1
4	1	0,5
5	1,414	-0,7071
6	1	-0,5
7	1	-0,5
8	1,414	-0,7071
9	1	0,5
10	1,414	-0,7071
11	1	0
12	1,414	-0,7071
13	1	0,5

Tabla 5.2: Esfuerzos axiles de cada barra en kN. Caso 1.

Finalmente sabiendo que el módulo de Young del Aluminio es $E_{Al}=6,95 \times 10^7$ kN/m² y el área de la sección de las barras es $A= 3,24 \times 10^{-4}$ m², el desplazamiento vertical del nudo G se calcularía según la ecuación 5.11 como se muestra a continuación en la tabla 5.3.

Barra	E(kN/mm2)	Área de la sección (mm2)	Longitud (mm)	N0(kN)	N1(kN)	$\Sigma (N0 \cdot N1 \cdot L) / (A \cdot E)$
1	69,5	324	1000,0	0,25	0,50	0,01
2	69,5	324	1000,0	0,50	1,00	0,02
3	69,5	324	1000,0	0,50	1,00	0,02
4	69,5	324	1000,0	0,25	0,50	0,01
5	69,5	324	1414,2	-0,35	-0,71	0,02
6	69,5	324	1000,0	-0,25	-0,50	0,01
7	69,5	324	1000,0	-0,25	-0,50	0,01
8	69,5	324	1414,2	-0,35	-0,71	0,02
9	69,5	324	1000,0	0,25	0,50	0,01
10	69,5	324	1414,2	-0,35	-0,71	0,02
11	69,5	324	1000,0	0,00	0,00	0,00
12	69,5	324	1414,2	-0,35	-0,71	0,02
13	69,5	324	1000,0	0,25	0,50	0,01
					Suma(mm)=	0,16

Tabla 5.3: Cálculo del desplazamiento vertical en G.

El desplazamiento vertical del nudo G es de:

$$\delta_{G_y} = 0,16mm$$

- Cálculo mediante Robot Structural Analysis

Al tratarse del primer modelo que se ha realizado con Robot Structural Analysis, se explicará detenidamente como se ha de elaborar el modelo y la simulación hasta obtener los resultados. El resto de modelos se hacen de forma similar, por lo que en el resto de modelos se indicarán directamente los resultados.

Para comenzar se abre el programa y hay que elegir el tipo de proyecto que se desea, en este caso se trata de estructuras planas como se puede ver en la figura 5.3.

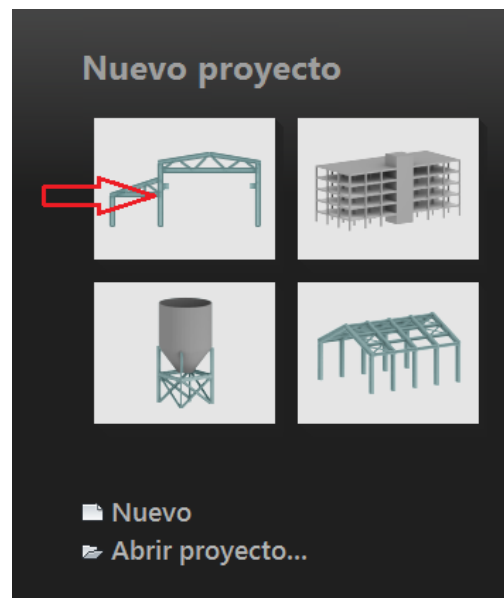


Figura 5.3: Elección del tipo de proyecto.

Una vez elegido el tipo de proyecto, en este caso se procederá a la creación del modelo de la estructura. Para comenzar se elegirá la opción **Nudos** (⤴) y como se puede ver en la figura 5.4 se pueden ir introduciendo las coordenadas de cada uno de los nudos hasta tenerlos todos como se puede ver en la figura 5.5.

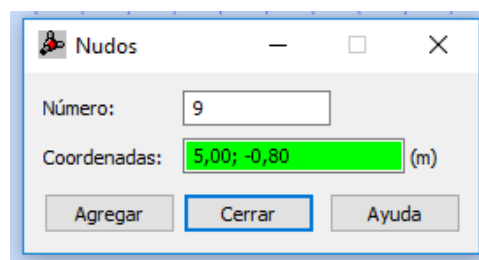


Figura 5.4: Cuadro de diálogo de la opción Nudos.

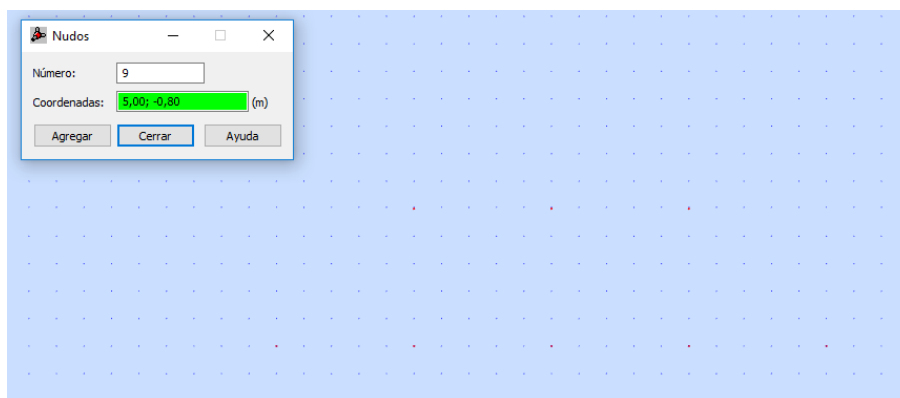


Figura 5.5: Disposición de nudos en la interfaz de Robot Structural Analysis.

Una vez que se tienen los nudos hay que ir colocando las barras de la estructura con la opción **Barra** (↗). Como se puede ver en la figura 5.6 en el cuadro de diálogo se pueden ir introduciendo las coordenadas iniciales y finales de cada barra hasta completar la estructura como se puede ver en la figura 5.7:

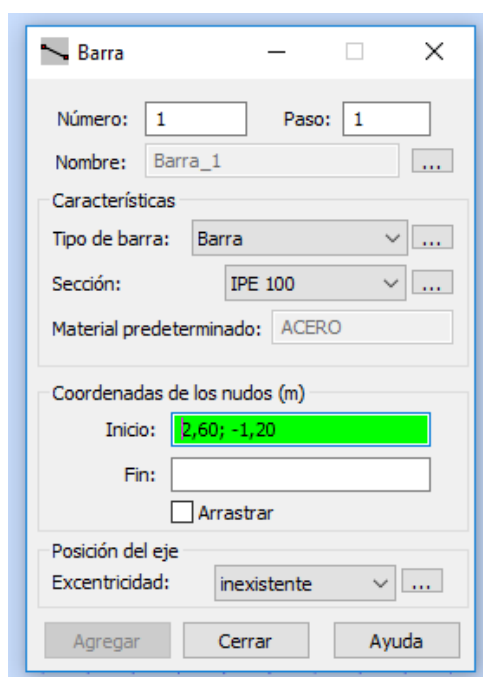


Figura 5.6: Cuadro de diálogo de la opción Barra.

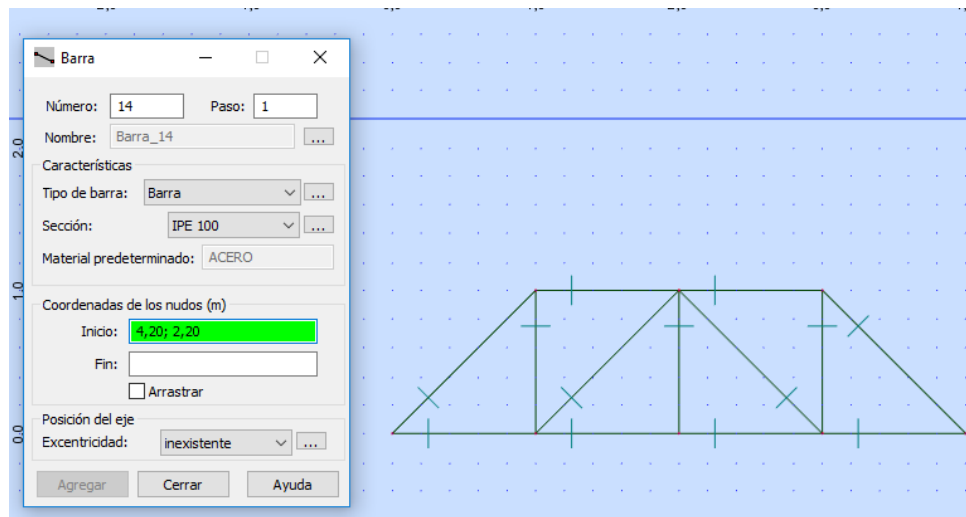


Figura 5.7: Esquema de estructura completa con barras.

Ahora, antes de continuar hay que decir que este programa cuando se asigna la sección a las barras solo permite agregar el material que se desee, pero los propiedades del material ya las tiene por defecto el programa y si no son las deseadas como en este caso, en la opción **Herramientas -> Preferencias para el proyecto -> Materiales**, como se puede ver en la figura 5.8 permite modificar las propiedades del material que se vaya a utilizar.

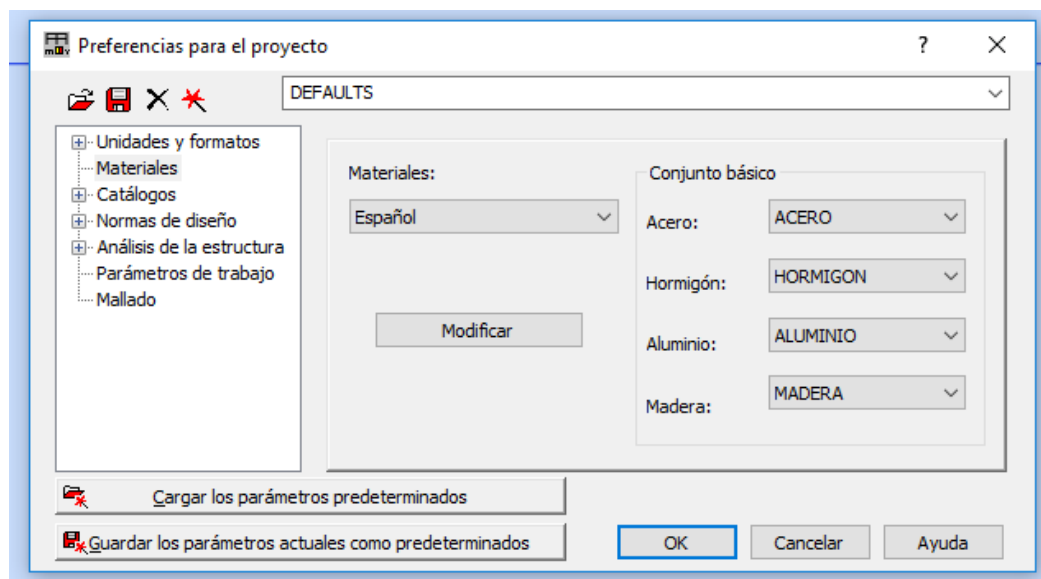


Figura 5.8: Cuadro de diálogo de preferencias para el proyecto.

En este caso, en la opción **Modificar** como se puede ver en la figura 5.9 aparecen las propiedades del Aluminio por defecto del programa. Estas propiedades se modificarán hasta tener las propiedades deseadas como se puede ver en la figura 5.10.

Figura 5.9: Propiedades del aluminio por defecto.

Figura 5.10: Propiedades del aluminio deseadas.

Una vez que se tenga el material que se vaya a utilizar en el proyecto con las propiedades del material deseadas, se procederá a crear la sección de las barras con la opción **Sección** (I). Esta opción proporciona el cuadro de diálogo de **Nueva Sección**, el cual se puede ver en la figura 5.11. En esta opción se puede crear cualquier sección deseada y asignarle el material de la barra.

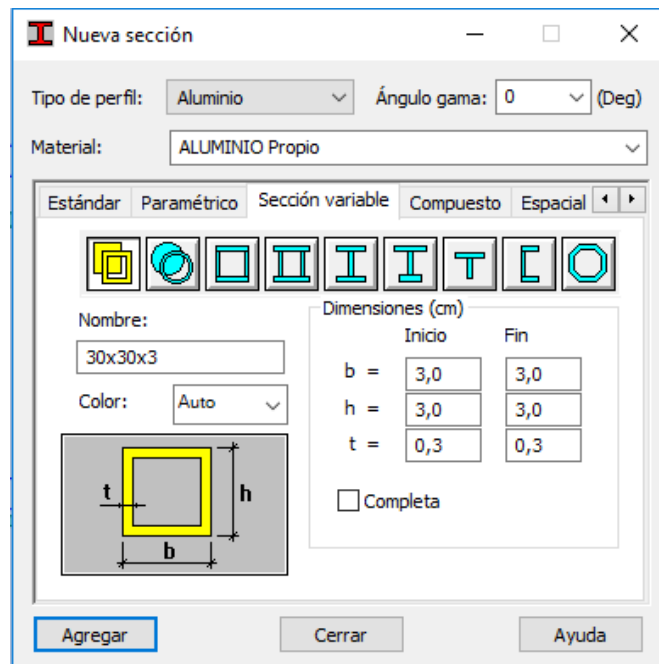


Figura 5.11: Cuadro de diálogo de la opción Sección.

Una vez que se tenga la Sección acabada, clicando en **Agregar** y en todas las barras de la estructura se puede ver cómo van cambiando todas las barras hasta tenerlas todas cambiadas, como se puede ver en la figura 5.12.

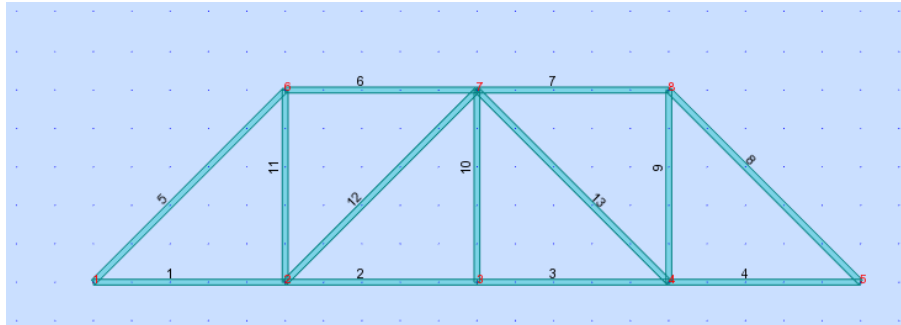


Figura 5.12: Esquema de la estructura con la secciones de todas las barras asignadas.

Una vez hecho esto, se procederá a poner los apoyos de la estructura con la opción **Apoyo** (📌). En este caso se ha colocado una Rótula en el apoyo Izquierdo como se puede ver en la figura 5.13.

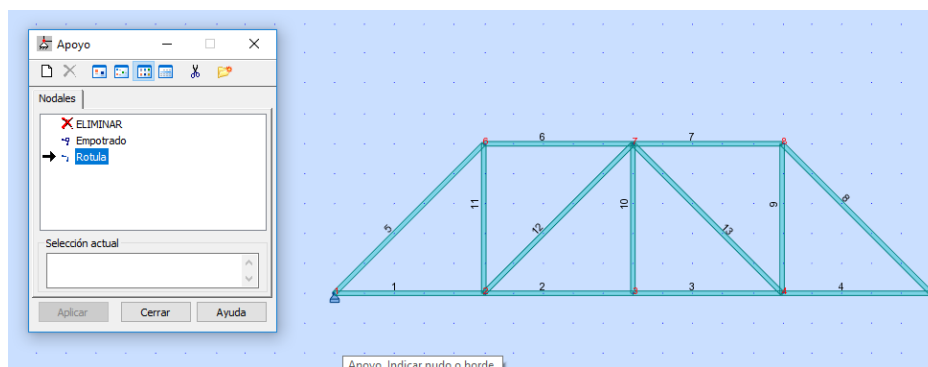


Figura 5.13: Colocación del apoyo Izquierdo.

Mientras que en el apoyo Derecho como se desea un tipo de apoyo que no existe por defecto en el programa, clicando en la opción **Definición de nuevo apoyo**, como se puede ver en la figura 5.14, permite crear un apoyo nuevo con las direcciones bloqueadas que se deseen. Una vez creado el apoyo se aplica al apoyo Derecho como se puede ver en la figura 5.15.

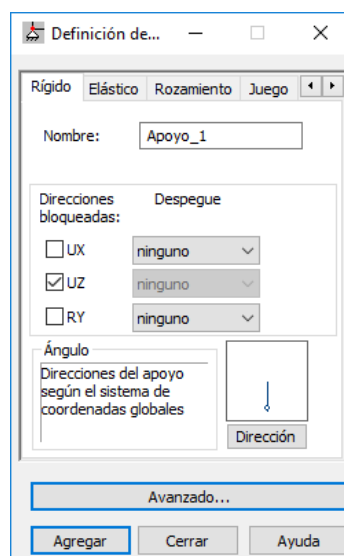


Figura 5.14: Creación del apoyo Nuevo.

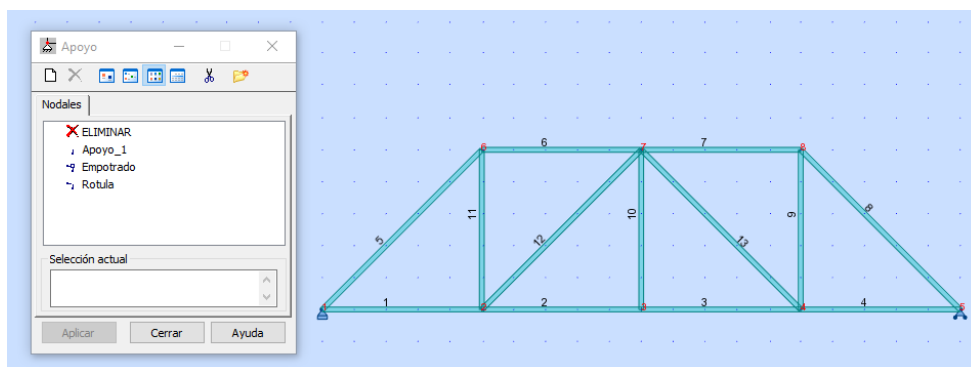


Figura 5.15: Esquema de la estructura con los apoyos.

Una vez terminada la estructura se colocarán las articulaciones en las uniones de las barras, clicando en la opción **Estructura -> Relajación**. Una vez desplegado el menú de Relajación, se elegirá la opción deseada de unión y se clicará en todas las barras hasta tener la estructura con todas las uniones colocadas como se puede ver en la figura 5.16.

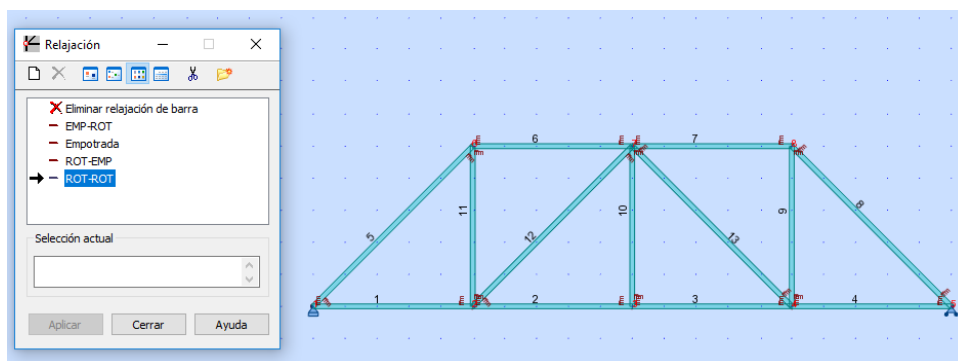


Figura 5.16: Esquema de la estructura con las uniones.

Una vez realizado esto, crearemos los casos de carga, clicando en la opción **Casos de carga** (📄). Como se puede ver en la figura 5.17, se despliega un menú en el que se pueden agregar tantos casos de carga como se desee. Hay que tener en cuenta que el caso de carga número 1 considera el peso propio de la estructura, por lo que en este proyecto se utilizarán los demás casos de carga, pero el 1 nunca.

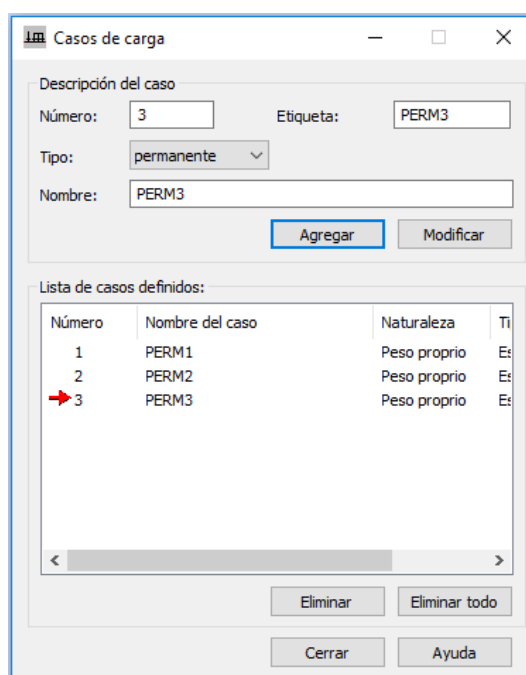


Figura 5.17: Cuadro de diálogo de Casos de carga.

De todas formas, en caso de querer asegurarse de que no se incluye el peso propio en los casos diferentes al 1 se puede realizar la simulación antes de colocar las cargas clicando en **Calcular** (🧮) -> **Resultados** -> **Resultados**. Y como se puede ver en la figura 5.18 en el caso 1 aparecen esfuerzos muy pequeños en la estructura pertenecientes al peso propio, mientras que en el caso 2 (ver figura 5.19), no aparece

ningún esfuerzo, por lo que queda comprobado que no se incluye el peso propio en el caso 2.

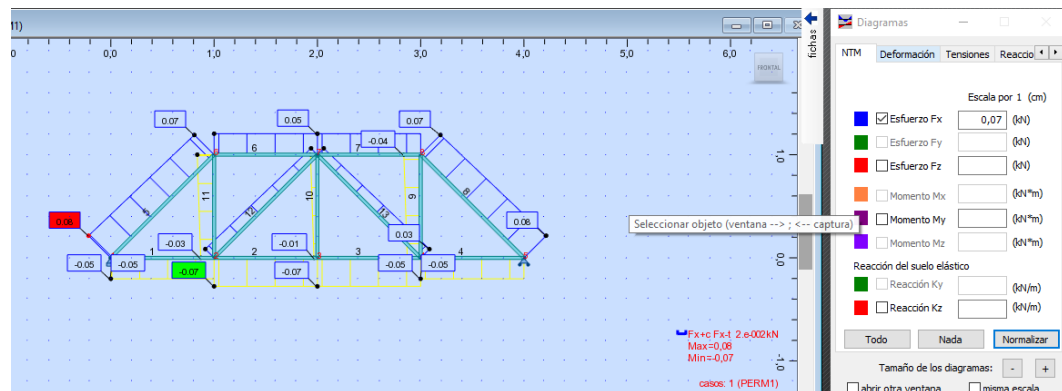


Figura 5.18: Caso de carga 1 con peso propio.

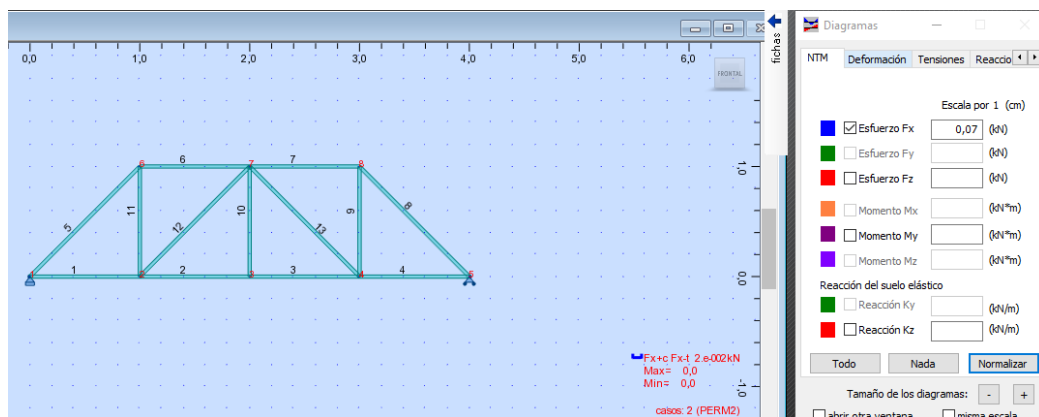


Figura 5.19: Caso de carga 2 sin peso propio.

Finalmente, después de este inciso para la comprobación, solo falta añadir las cargas clicando en la opción **Cargas** (📦). Como se puede ver en la figura 5.20, se abre un cuadro de diálogo en el cual se puede elegir cualquier tipo de carga.

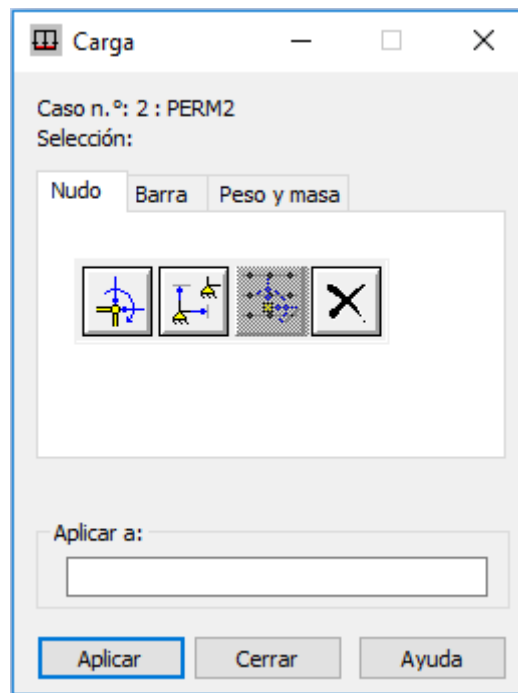


Figura 5.20: Cuadro de diálogo de Cargas

En este caso, como los resultados de desplazamientos obtenidos que se esperan son demasiado pequeños para el programa, para conseguir más exactitud y evitar redondeos del programa, se hará la carga 100 veces mayor y así obtener un resultado 100 veces mayor. Después solo habrá que dividir por 100 los resultados y así obtener el resultado de nuestra simulación de forma exacta. Una vez explicado esto, en la figura 5.21 se puede ver cómo queda finalmente la estructura con la carga nodal en el nudo deseado.

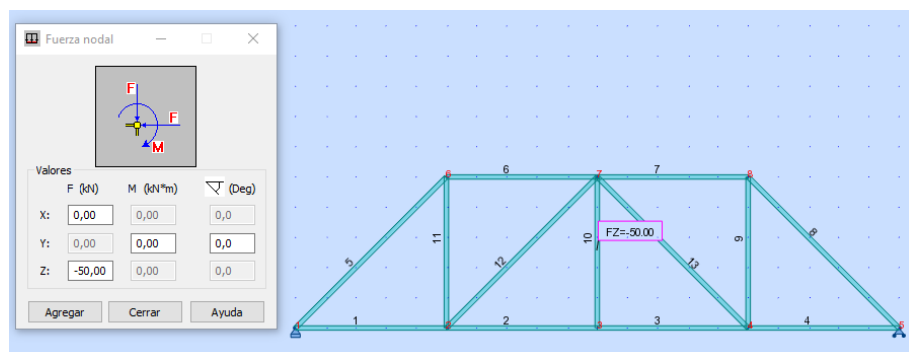


Figura 5.21: Esquema de la estructura con la carga.

Una vez terminado el modelo, clicando de nuevo en la opción **Calcular** (🧮) -> **Resultados** -> **Resultados**, se obtiene el cuadro de diálogo de la figura 5.22, en el cual se puede elegir qué resultados se desean visualizar.

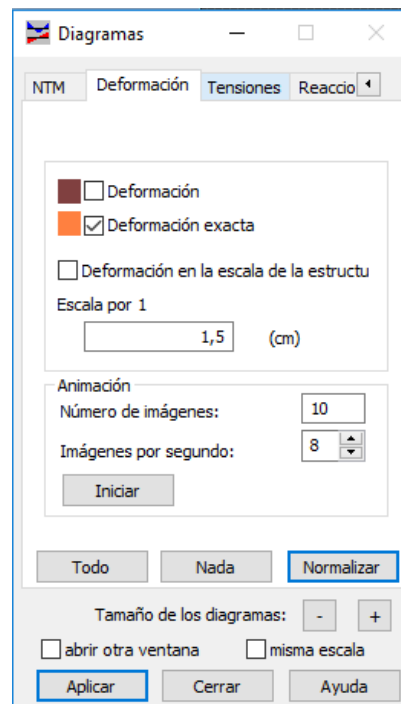


Figura 5.22: Cuadro de diálogo de resultados.

En el cálculo teórico mediante el software Robot Structural Analysis, el desplazamiento vertical en el nudo G es de **0,16 mm**, como se puede ver a continuación en las figuras 5.23 y 5.24.

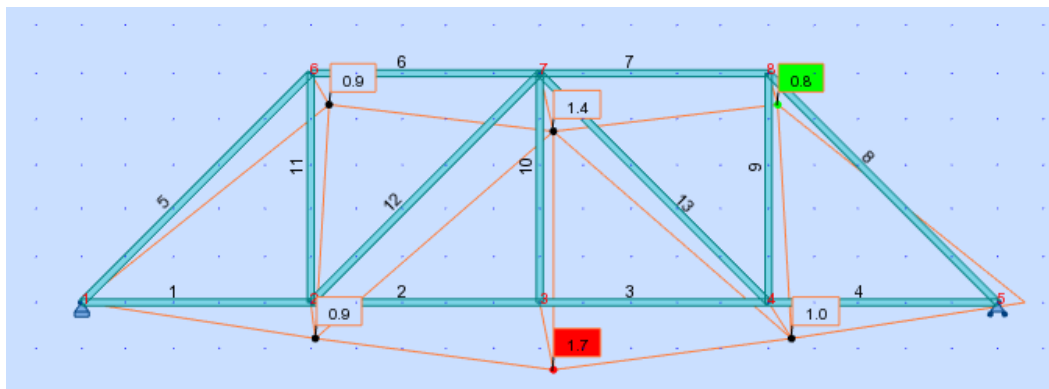


Figura 5.23: Cálculo de desplazamiento con 50 kg en $\text{cm} \cdot 10^2$.

Desplazamientos - Caso: 2 (PERM2)			
Nudo/Caso	UX (cm)	UZ (cm)	RY (Rad)
1/ 2	0,0	0,0	0,0
2/ 2	0,1	-0,9	0,0
3/ 2	0,3	-1,6	0,0
4/ 2	0,6	-0,9	0,0
5/ 2	0,7	0,0	0,0
6/ 2	0,4	-0,8	0,0
7/ 2	0,3	-1,4	0,0
8/ 2	0,2	-0,8	0,0

Figura 5.24: Cálculo de desplazamiento con 50 kg en $\text{cm} \cdot 10^2$.

- Medida experimental

Experimentalmente, como se puede ver en las figura 5.25 el desplazamiento obtenido es de **0,22 mm**, por lo que el resultado es del mismo orden que el teórico pero tiene un significativo error debido a que la medida es del mismo orden que la precisión del reloj, o incluso a la pequeña inclinación del palpador, ya que es difícil colocarlo asegurando su verticalidad completa. A continuación en la tabla 5.4 se puede ver la comparativa de los tres métodos.

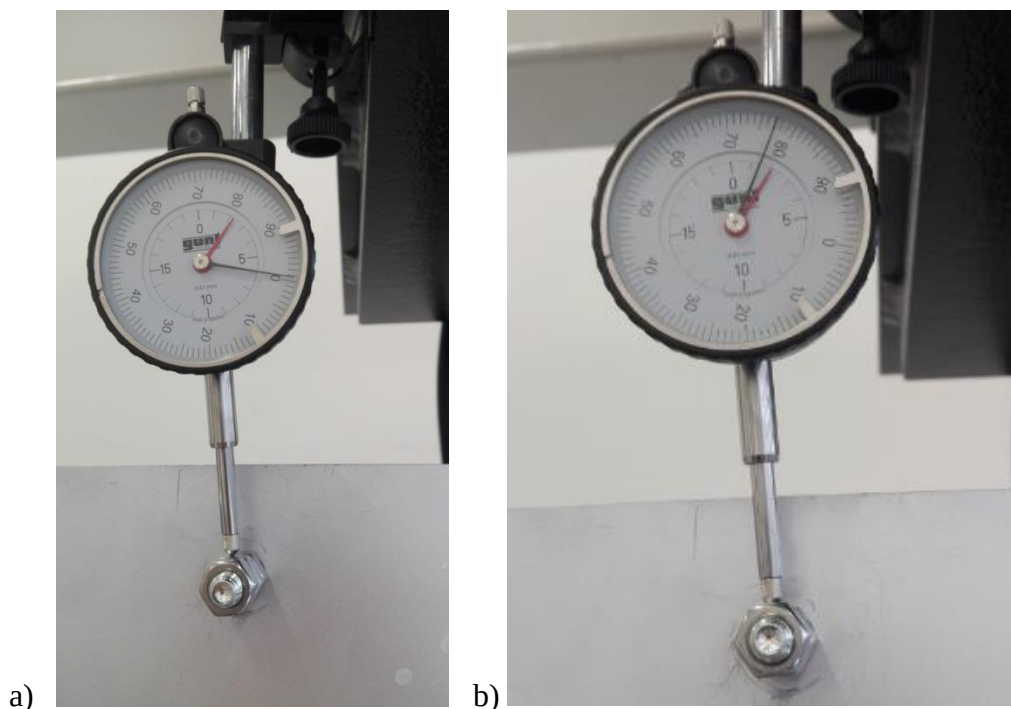


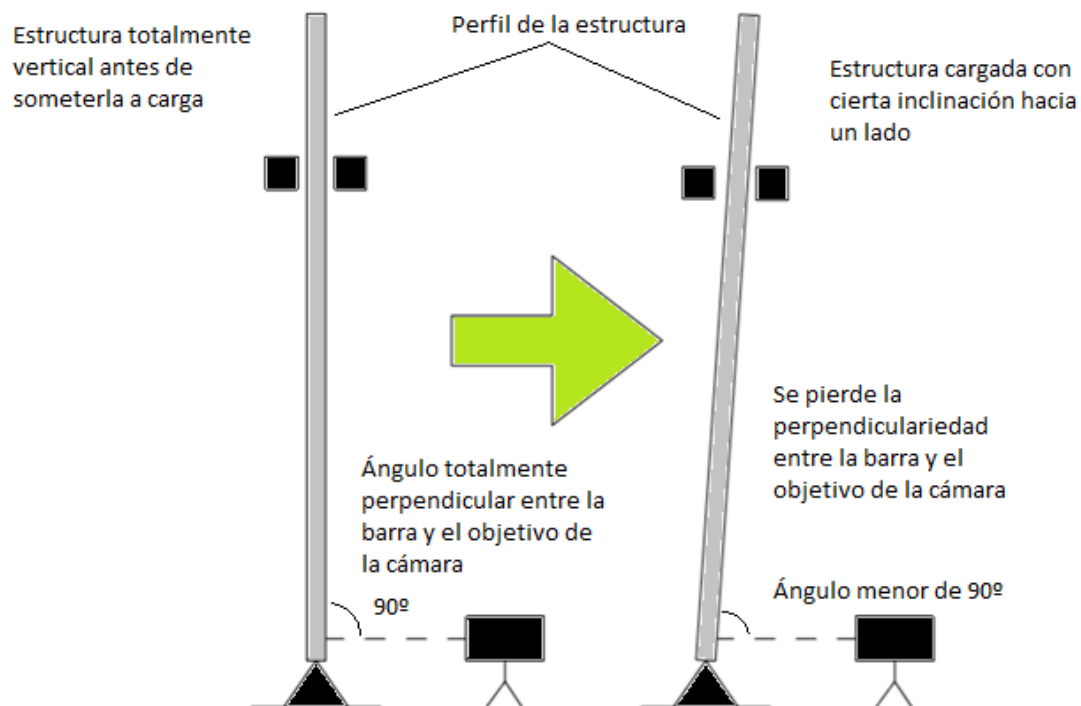
Figura 5.25: a) Medida de desplazamiento sin carga. b) Medida de desplazamiento con 50 kg.

Método	Cálculo numérico	Robot	Experimental
Desplazamiento	0,16mm	0,16mm	0,22mm

Tabla 5.4: Tabla comparativa de los tres métodos de cálculo del desplazamiento del nudo G.

5.2.2 Deformaciones con DIC con 50 kg

Mediante la técnica DIC se han realizado dos imágenes a una barra en la cual se ha pintado un patrón de puntos llamado “speckle”, la primera imagen para el caso de la estructura en reposo y la segunda para la estructura cargada. Como se puede ver en la figura 5.26, la estructura sufre un reajuste al cargarla y se vuelca el plano en el que está contenida la estructura, por lo que ha sido imposible obtener resultados coherentes mediante esta técnica para deformaciones tan pequeñas de las barras. Esto ha llevado a aumentar la carga y tomar la primera imagen con la estructura precargada para así intentar evitar este reajuste.



Figuras 5.26: Esquema del vuelco de la estructura.

5.2.3 Deformaciones con galgas con 50 kg

- Cálculo teórico

El resultado teórico de las deformaciones de las barras se puede ver a continuación en las tablas 5.5 y 5.6:

Barra	Longitud (m)	N(kN)	E(kN/m ²)	Área de la sección (m ²)	$\epsilon=N/(A \cdot E)$ (με)
1	1	0,25	69500000	0,000324	11,10
2	1	0,5	69500000	0,000324	22,20
3	1	0,5	69500000	0,000324	22,20
4	1	0,25	69500000	0,000324	11,10
5	1,414	-0,35	69500000	0,000324	-15,54
6	1	-0,25	69500000	0,000324	-11,10
7	1	-0,25	69500000	0,000324	-11,10
8	1,414	-0,35	69500000	0,000324	-15,54
9	1	0,25	69500000	0,000324	11,10
10	1,414	-0,35	69500000	0,000324	-15,54
11	1	0	69500000	0,000324	0,00
12	1,414	-0,35	69500000	0,000324	-15,54
13	1	0,25	69500000	0,000324	11,10

Tabla 5.5: Deformaciones teóricas en todas las barras con 50 kg.

Barra	2	9	10
Deformación	22,20 με	11,10 με	-15,54 με

Tabla 5.6: Deformaciones teóricas en las barras 2, 9 y 10 con 50 kg.

- Cálculo mediante Robot Structural Analysis

A continuación se pueden ver los resultados de los axiles y las deformaciones mediante Robot Structural Analysis en la figura 5.27 y las tablas 5.7 y 5.8.

Hay que tener en cuenta que este software, al tener gran aplicación en ingeniería civil, donde se consideran las compresiones positivas, tiene el criterio de signos al revés, es decir, considera las compresiones positivas y las tracciones negativas.

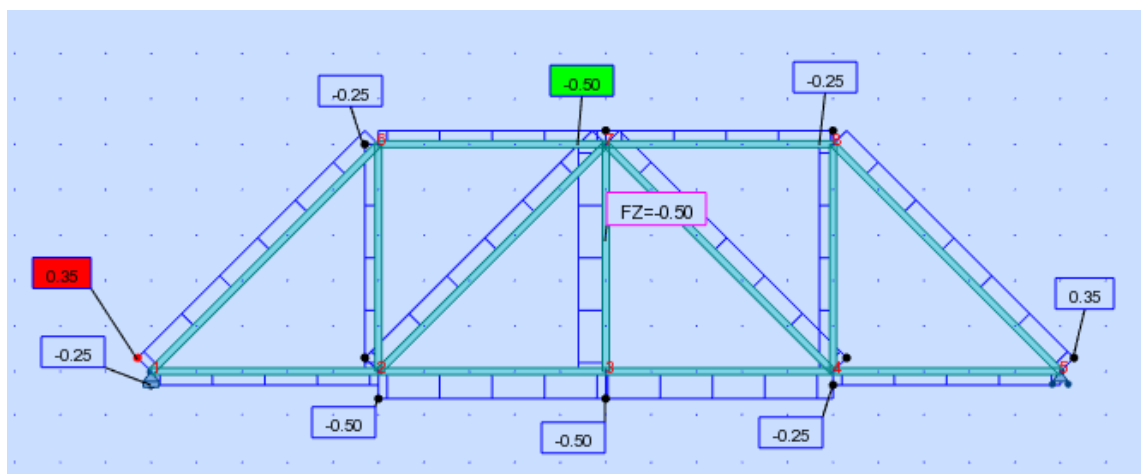


Figura 5.27: Axiles en todas las barras con 50 kg.

Barra	Longitud (m)	N(kN)	E(kN/m2)	Área de la sección (m2)	$\epsilon=N/(A \cdot E)$ ($\mu\epsilon$)
1	1	0,25	69500000	0,000324	11,10
2	1	0,5	69500000	0,000324	22,20
3	1	0,5	69500000	0,000324	22,20
4	1	0,25	69500000	0,000324	11,10
5	1,414	-0,35	69500000	0,000324	-15,54
6	1	-0,25	69500000	0,000324	-11,10
7	1	-0,25	69500000	0,000324	-11,10
8	1,414	-0,35	69500000	0,000324	-15,54
9	1	0,25	69500000	0,000324	11,10
10	1,414	-0,35	69500000	0,000324	-15,54
11	1	0	69500000	0,000324	0,00
12	1,414	-0,35	69500000	0,000324	-15,54
13	1	0,25	69500000	0,000324	11,10

Tabla 5.7: Deformaciones en Robot de todas las barras con 50 kg.

Barra	2	9	10
Deformación	22,20 $\mu\epsilon$	11,10 $\mu\epsilon$	-15,54 $\mu\epsilon$

Tabla 5.8: Deformaciones en Robot de las barras 2, 9 y 10 con 50 kg.

- Medida experimental

Las deformaciones obtenidas en las barras 2, 9 y 10 mediante el uso de las galgas extensométricas como se puede ver en la figura 5.28 y en la tabla 5.9 han sido:

Barra	2	9	10
Deformación	21 $\mu\epsilon$	13 $\mu\epsilon$	-15 $\mu\epsilon$

Tabla 5.9: Medida de deformaciones en las barras 2, 9 y 10 con 50 kg.

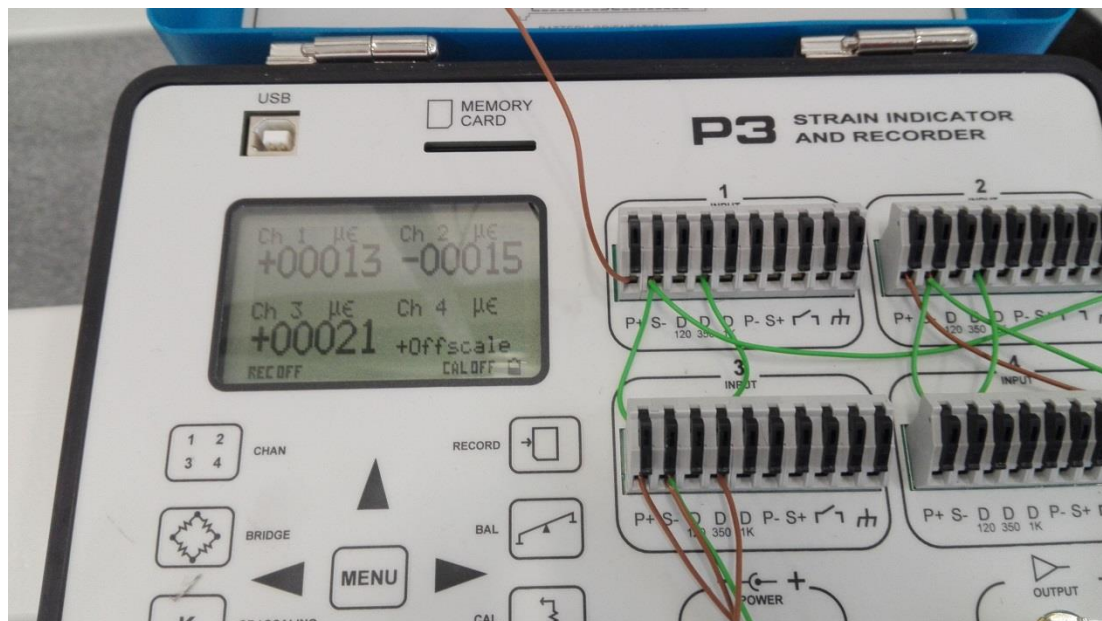


Figura 5.28: Medida de deformaciones en las barras 2, 9 y 10 con 50 kg.

Como se puede ver en la comparativa de las tres tablas de los resultados de las deformaciones (5.6, 5.8 y 5.9) con los tres métodos, los resultados con los tres métodos son muy similares.

5.2.4 Contrastación de resultados y conclusiones

El resultado ha sido que los desplazamientos han sido tan pequeños que el orden de los resultados teóricos y experimentales era igual al orden de error de las medidas tomadas por los relojes comparadores, por lo que los resultados son del mismo orden experimentalmente que de forma teórica pero difieren un poco. Esto nos lleva a aumentar la carga y así los desplazamientos, para comprobar si mejora la precisión.

En la técnica de DIC no se han podido obtener las deformaciones debido a que la estructura sufre un reajuste de las uniones y un vuelco. Puede ser debido a que existe holgura entre los agujeros de las placas de unión y los tornillos debido a las tolerancias de fabricación. Esto hace cambiar a verticalidad de la estructura, problema que para 2D hace imposible la medida como se podía ver en la figura 5.26.

Al cambiar la verticalidad de la estructura al someterla a tensión, hace que la estructura sufra un vuelco mayor que los propios desplazamientos contenidos en el propio plano de la barra. Lo que ha llevado a ingeniar un dispositivo o sistema por el cual se pueda someter la estructura a una carga mayor y así obtener resultados más precisos, además de evitar estos problemas de reajuste de las uniones y la verticalidad usando una precarga.

Respecto a la precisión de las deformaciones con las galgas extensométricas existe gran similitud entre las medidas con los tres métodos, por lo que esta medida se puede considerar válida.

5.2.5 Primera disposición con 150 kg

Como ya se ha indicado en el apartado anterior se ha decidido aumentar la carga en esta misma disposición para ver si los resultados experimentales se acercan más a los teóricos.

Antes de someter la estructura a mayor carga, hay que comprobar que los esfuerzos en las barras y las placas de unión no superan los esfuerzos de diseño utilizados para su dimensionado en el TFG de Diego García Torres [2], para así evitar dañar la estructura.

A continuación se procede a realizar dicha comprobación mediante el software Robot Structural Analysis. Los resultados obtenidos mediante el software se pueden ver a continuación:

En la figura 5.29 podemos ver el diagrama de momentos de la estructura en $\text{kN}\cdot\text{m}$ y como era de esperar no existe ningún momento en la estructura debido a que se trata de una estructura articulada y las articulaciones permiten el giro.

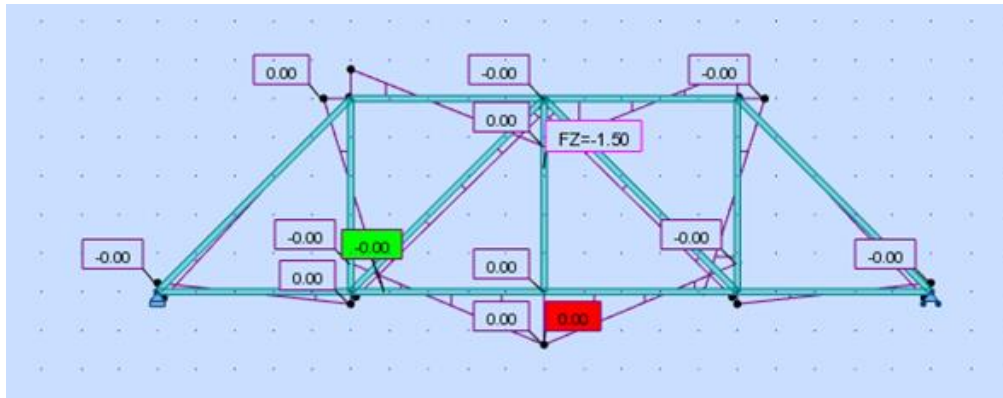


Figura 5.29: Diagrama de Momentos con 150 kg.

En la figuras 5.30 y 5.31 se pueden ver los diagramas de axiles y cortantes de la estructura en kN.

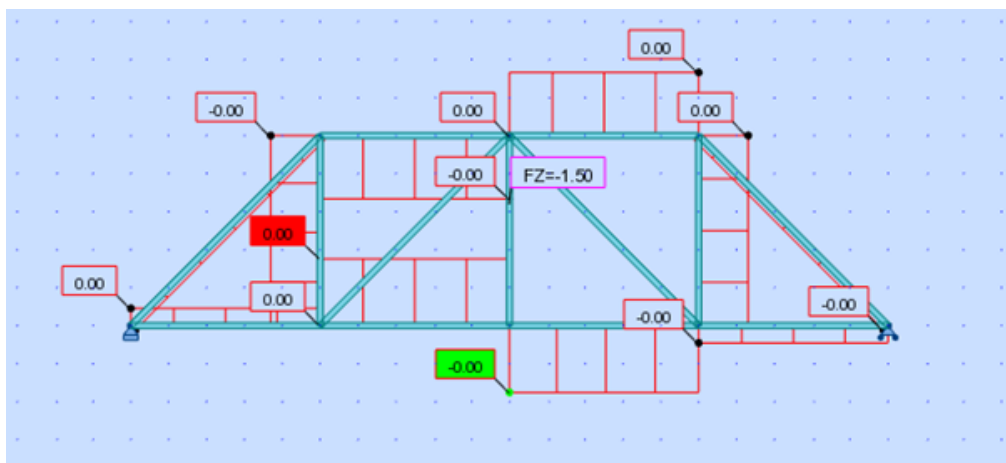


Figura 5.30: Diagrama de Cortantes con 150 kg.

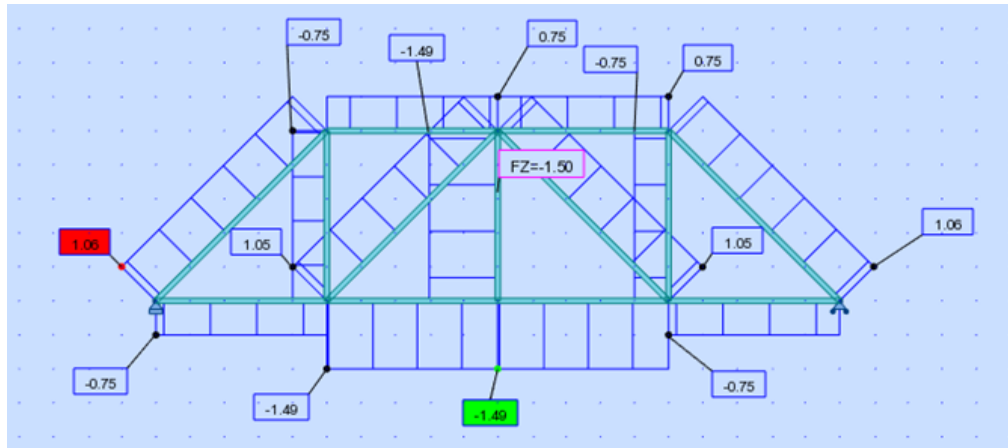


Figura 5.31: Diagrama de Axiles con 150 kg.

Los esfuerzos de cálculo utilizados para su dimensionado de la estructura en el TFG de Diego García Torres [2] se pueden ver a continuación en la Tabla 5.10. En combinación estos son mayores que todas las combinaciones de esfuerzos de la estructura, por lo que se puede someter la estructura a esta carga sin peligro de dañarla.

N_{Ed}	M_{Ed}
0,765 kN	0,375 kN.m

Tabla 5.10: Esfuerzos de cálculo del dimensionamiento de la estructura. [2]

5.2.6 Desplazamientos con 150 kg

- Cálculo teórico

El cálculo del desplazamiento de forma numérica en el nudo G debido a que los desplazamientos y las deformaciones son proporcionales a la carga, basta con multiplicar los resultados obtenidos en la estructura anterior con 50 kg por tres, es decir multiplicar los resultados por el mismo coeficiente que la carga. Con esto el desplazamiento en el nudo G nos da un resultado de **0,49mm**.

- Cálculo mediante Robot Structural Analysis

En el cálculo teórico mediante el software Robot Structural Analysis, el desplazamiento vertical en el nudo G es de **0,49 mm**, como se puede ver a continuación en las figuras 5.32 y 5.33.

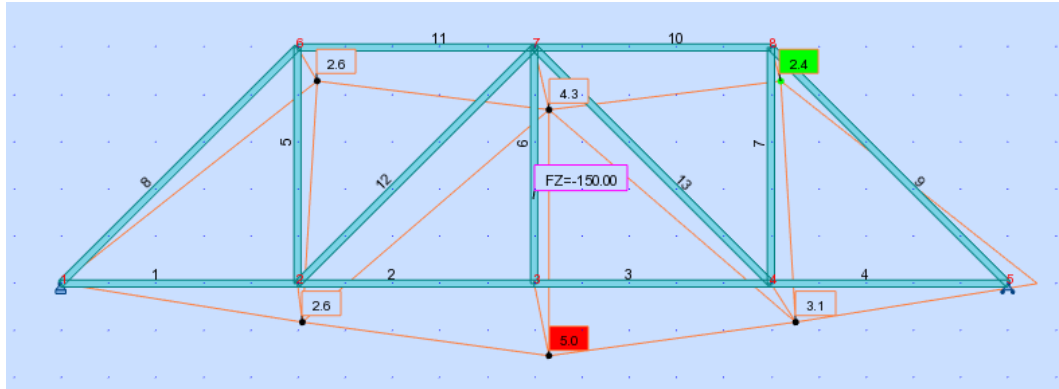


Figura 5.32: Cálculo de desplazamiento con 150 kg en $\text{cm} \cdot 10^2$.

Nudo/Caso	UX (cm)	UZ (cm)	RY (Rad)
1/ 1	0,0	0,0	0,0
1/ 2	0,0	0,0	0,0
1/ 3	0,0	0,0	0,0
1/ 4	0,0	0,0	0,0
1/ 5	0,0	0,0	0,0
1/ 6	0,0	0,0	0,0
2/ 1	0,0	-0,0	0,000
2/ 2	0,0	-0,0	0,000
2/ 3	0,0	-0,0	0,000
2/ 4	0,3	-2,6	0,011
2/ 5	0,0	-0,0	0,000
2/ 6	0,1	-0,9	0,004
3/ 1	0,0	-0,0	0,0
3/ 2	0,0	-0,0	0,0
3/ 3	0,0	-0,0	0,0
3/ 4	1,0	-4,9	0,0
3/ 5	0,0	-0,0	0,0
3/ 6	0,3	-1,6	0,0
4/ 1	0,0	-0,0	0,0
4/ 2	0,0	-0,0	0,0

Figura 5.33: Cálculo de desplazamiento con 150 kg en $\text{cm} \cdot 10^2$.

- Medida experimental

Experimentalmente, como se puede ver en la figura 5.34 el desplazamiento obtenido es de **0,62 mm**, por lo que el resultado sigue siendo del mismo orden que el teórico pero sigue teniendo un significativo error. Esto es debido a que la medida es del mismo orden que la precisión del reloj.

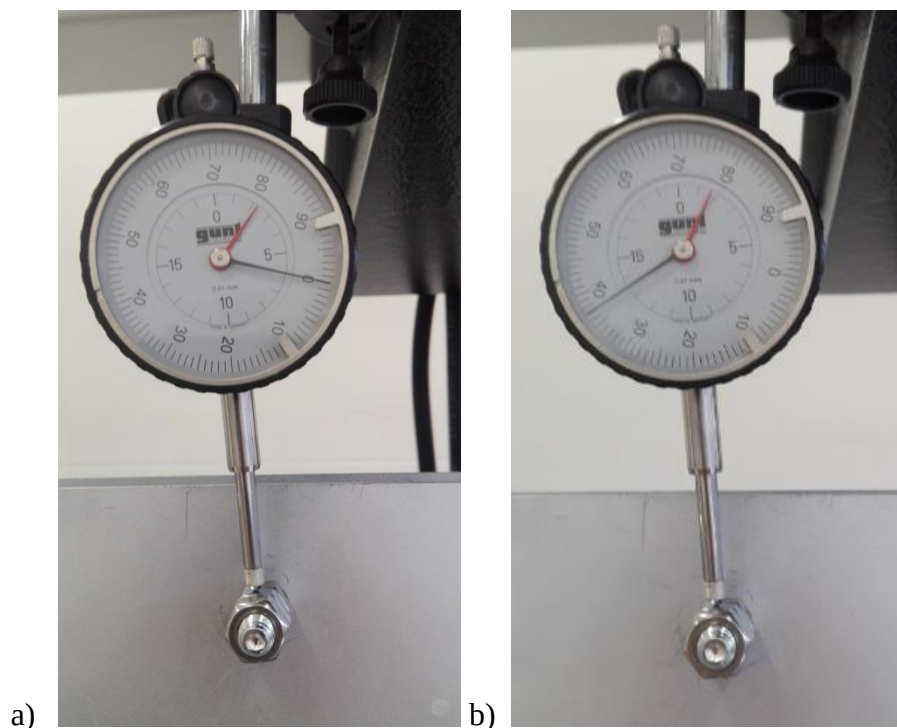


Figura 5.34: a) Medida de desplazamiento sin carga. b) Medida de desplazamiento con 150 kg.

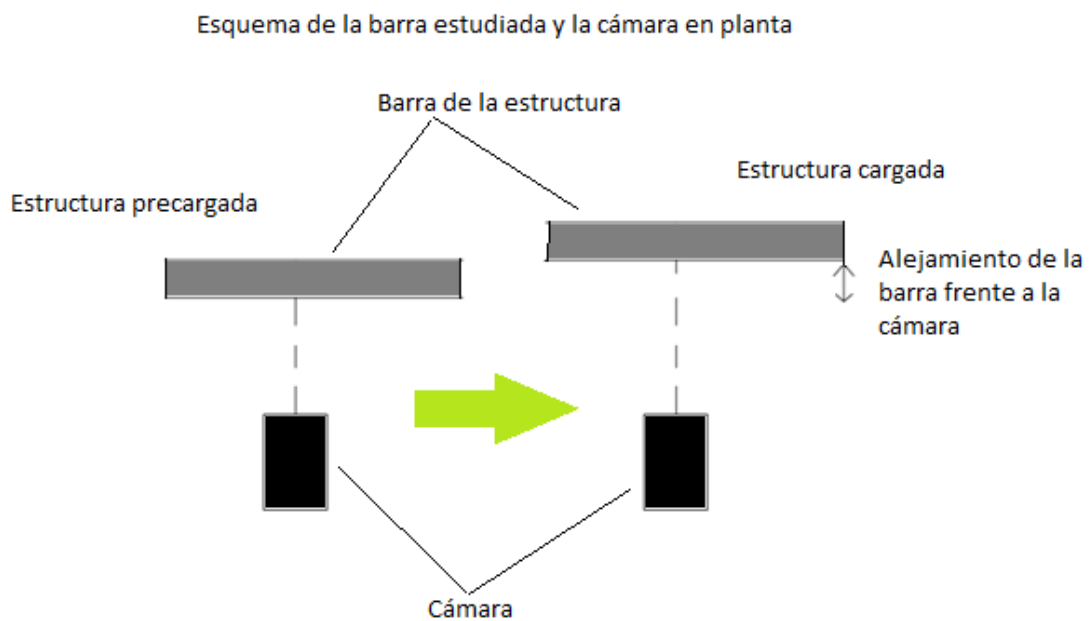
A continuación en la tabla 5.11 se puede ver la comparación de los tres métodos de cálculo del desplazamiento.

Método	Cálculo numérico	Robot Structural	Experimental
Desplazamiento	0,49mm	0,49mm	0,62mm

Tabla 5.11: Tabla comparativa de los tres métodos de cálculo del desplazamiento del nudo G.

5.2.7 Deformaciones con DIC con 150 kg

Mediante la técnica DIC se han vuelto a realizar dos imágenes a una barra en la cual se ha pintado un “speckle”, la primera imagen para el caso de la estructura precargada con 50 kg para evitar el desplazamiento por el reajuste de las uniones anteriormente explicado y la segunda para la estructura cargada con 150 kg. Las deformaciones proporcionan resultados erróneos ya que la estructura sigue sufriendo un reajuste al cargarla y se sigue desplazando el plano de la estructura como pasaba en el caso anterior, por lo que se aprecia el alejamiento de la barra frente a la cámara como se puede ver en la figura 5.35. Por esto ha sido imposible obtener resultados coherentes mediante esta técnica. Esto ha llevado a desechar esta técnica para estructuras de estas dimensiones, por lo que no se volverá a utilizar en las disposiciones siguientes.



Figuras 5.35: Alejamiento de la barra respecto a la cámara al cargarla.

5.2.8 Deformaciones con galgas con 150 kg

- Cálculo teórico

El resultado teórico de las deformaciones de las barras se puede ver a continuación en las tablas 5.12 y 5.13:

Barra	Longitud (m)	N(kN)	E(kN/m ²)	Área de la sección (m ²)	$\epsilon = N / (A \cdot E)$ ($\mu\epsilon$)
1	1	0,75	69500000	0,000324	33,31
2	1	1,5	69500000	0,000324	66,61
3	1	1,5	69500000	0,000324	66,61
4	1	0,75	69500000	0,000324	33,31
5	1,414	-1,05	69500000	0,000324	-46,63
6	1	-0,75	69500000	0,000324	-33,31
7	1	-0,75	69500000	0,000324	-33,31
8	1,414	-1,05	69500000	0,000324	-46,63
9	1	0,75	69500000	0,000324	33,31
10	1,414	-1,05	69500000	0,000324	-46,63
11	1	0	69500000	0,000324	0,00
12	1,414	-1,05	69500000	0,000324	-46,63
13	1	0,75	69500000	0,000324	33,31

Tabla 5.12: Deformaciones teóricas en todas las barras con 150 kg.

Barra	2	9	10
Deformación	66,61 $\mu\epsilon$	33,31 $\mu\epsilon$	-46,63 $\mu\epsilon$

Tabla 5.13: Deformaciones teóricas en las barras 2, 9 y 10 con 150 kg.

- Cálculo mediante Robot Structural Analysis

A continuación se pueden ver los resultados de los axiles y las deformaciones mediante Robot Structural Analysis en la figura 5.36 y las tablas 5.14 y 5.15.

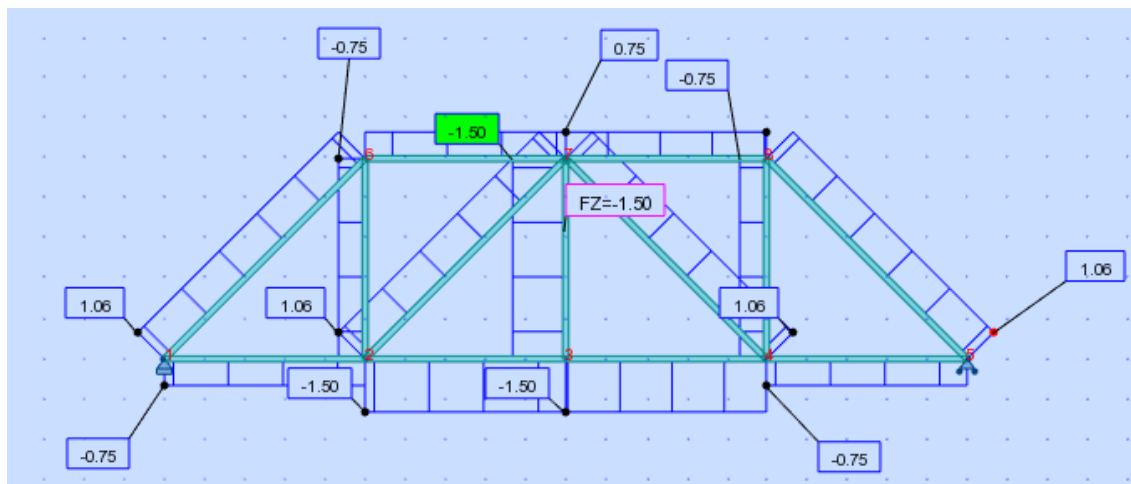


Figura 5.36: Axiles en todas las barras con 150 kg.

Barra	Longitud (m)	N(kN)	E(kN/m ²)	Área de la sección (m ²)	$\epsilon=N/(A \cdot E)$ ($\mu\epsilon$)
1	1	0,75	69500000	0,000324	33,31
2	1	1,5	69500000	0,000324	66,61
3	1	1,5	69500000	0,000324	66,61
4	1	0,75	69500000	0,000324	33,31
5	1,414	-1,05	69500000	0,000324	-46,63
6	1	-0,75	69500000	0,000324	-33,31
7	1	-0,75	69500000	0,000324	-33,31
8	1,414	-1,05	69500000	0,000324	-46,63
9	1	0,75	69500000	0,000324	33,31
10	1,414	-1,05	69500000	0,000324	-46,63
11	1	0	69500000	0,000324	0,00
12	1,414	-1,05	69500000	0,000324	-46,63
13	1	0,75	69500000	0,000324	33,31

Tabla 5.14: Deformaciones en Robot de todas las barras con 150 kg.

Barra	2	9	10
Deformación	66,61 $\mu\epsilon$	33,31 $\mu\epsilon$	-46,63 $\mu\epsilon$

Tabla 5.15: Deformaciones en Robot de las barras 2, 9 y 10 con 150 kg.

- Medida experimental

Las deformaciones obtenidas en las barras 2, 9 y 10 mediante el uso de las galgas extensométricas como se puede ver en la figura 5.37 y en la tabla 5.16 han sido:

Barra	2	9	10
Deformación	103 $\mu\epsilon$	26 $\mu\epsilon$	-42 $\mu\epsilon$

Tabla 5.16: Medida de deformaciones en las barras 2, 9 y 10 con 150 kg.

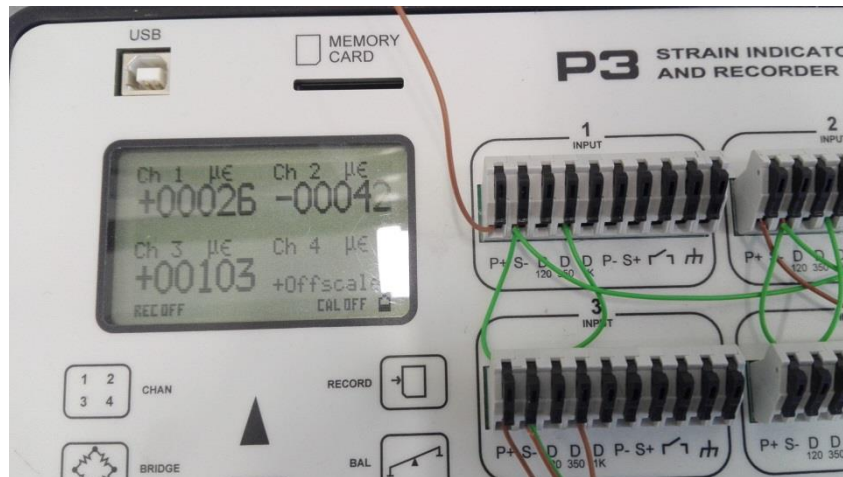


Figura 5.37: Medida de deformaciones en las barras 2, 9 y 10 con 150 kg.

Como se puede ver en la comparativa de las tres tablas de los resultados de las deformaciones con los tres métodos (5.13, 5.15 y 5.16), vuelve a ocurrir como con los desplazamientos, el resultado es del mismo orden y del mismo signo tanto en el cálculo teórico como en el cálculo experimental, pero difieren un poco debido a que los resultados son del mismo orden que la precisión de las galgas extensométricas.

5.2.9 Contraste de resultados y conclusiones

El resultado ha sido que los desplazamientos eran tan pequeños que el orden de los resultados teóricos y experimentales, aun aumentando la carga, es igual al orden del error de las medidas tomadas por los relojes comparadores. Por lo que los resultados son del mismo orden y de mismo signo experimentalmente que de forma teórica, pero difieren un poco, aunque también hay que tener en cuenta que se trata de resultados muy pequeños. Además haber aumentado la carga ha hecho que los desplazamientos reales y teóricos se hayan alejado.

En la técnica de DIC se sigue teniendo el mismo problema que anteriormente a pesar de haber precargado la estructura para intentar solventar el problema del reajuste de las uniones y la verticalidad de la estructura. Al tratarse de una estructura tan grande en comparación con las medidas, es inevitable que aparezca un mínimo reajuste o vuelco de la estructura (ver figuras 5.26 y 5.35) que por pequeño que sea sigue siendo mayor que las medidas, lo que ha llevado a desechar la técnica DIC para este tipo de ensayos.

Respecto a las deformaciones, en las barras 9 y 10 seguimos teniendo medidas muy similares a los cálculos teóricos mientras que en la barra 2 ha aparecido una deformación algo excesiva, la cual se desconoce la causa, ya que como ya se ha explicado anteriormente en las desventajas de las galgas, a veces pueden dar medidas erróneas influenciadas por el ruido o vibraciones, incluso por cambios de temperatura o por fallo del material a pesar de estar bien equilibradas, por lo que esa medida se puede desechar ya que el resto son muy similares.

5.3 Segunda disposición

La segunda disposición elegida se trata de una estructura reticulada llamada Viga Vierendeel, donde las uniones son reticuladas y no articuladas como en la anterior, por lo cual en este caso al no permitir el giro en las articulaciones, las barras también estarán sometidas a un momento flector.

La estructura está compuesta por tres módulos formados por barras de aluminio huecas cuadradas de 30x30x3 mm y placas de unión de acero.

Esta celosía es una estructura muy común en la actualidad también, de la cual se puede ver el esquema a continuación en la figura 5.38. En este caso la carga aplicada será de 80 kg, es decir, 0,78kN en el nudo B, ya que con esta carga es suficiente para obtener desplazamientos y deformaciones significativos sin someter a las uniones a esfuerzos excesivos, de acuerdo con el diseño de Diego García Torres. [2]

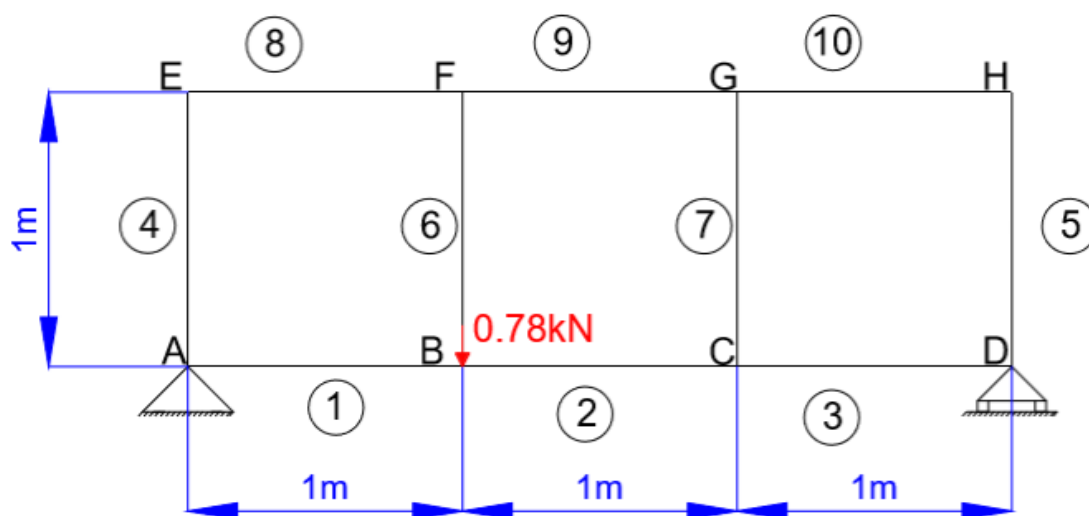


Figura 5.38: Esquema de la Viga Vierendeel con 80 kg de carga.

A continuación en la figura 5.39 se puede ver la estructura cargada montada en el laboratorio de Teoría de Estructuras y Medios Continuos.



Figura 5.39: Viga Vierendeel con 80 kg de carga.

Como en el caso anterior antes empezar con los ensayos, es necesario realizar la simulación de la estructura para comprobar que los esfuerzos vuelvan a ser menores que los esfuerzos de cálculo utilizados para dimensionar la estructura y así evitar dañar la estructura. Para ello, se ha realizado la simulación con el software informático Robot Structural Analysis, de la cual a continuación se presentan los resultados obtenidos:

En la figura 5.40 se puede ver su diagrama de momentos flectores, que como ya se esperaba, al tratarse de una estructura reticulada, aparecen momentos flectores en todas sus barras en kN*m:

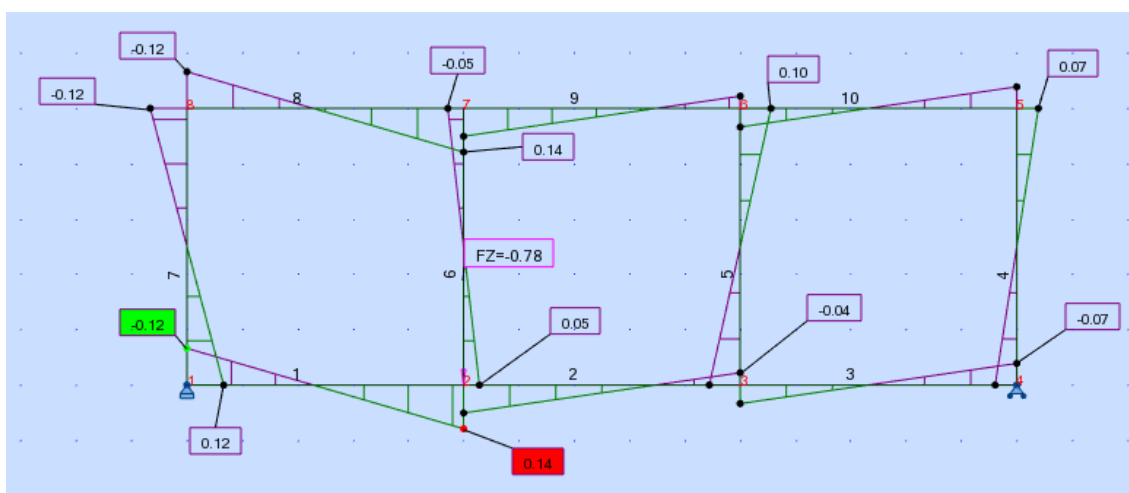


Figura 5.40: Diagrama de Momentos Flectores con 80 kg.

En las figuras 5.41 y 5.42 se pueden ver sus diagramas de axiles y de cortantes en kN:

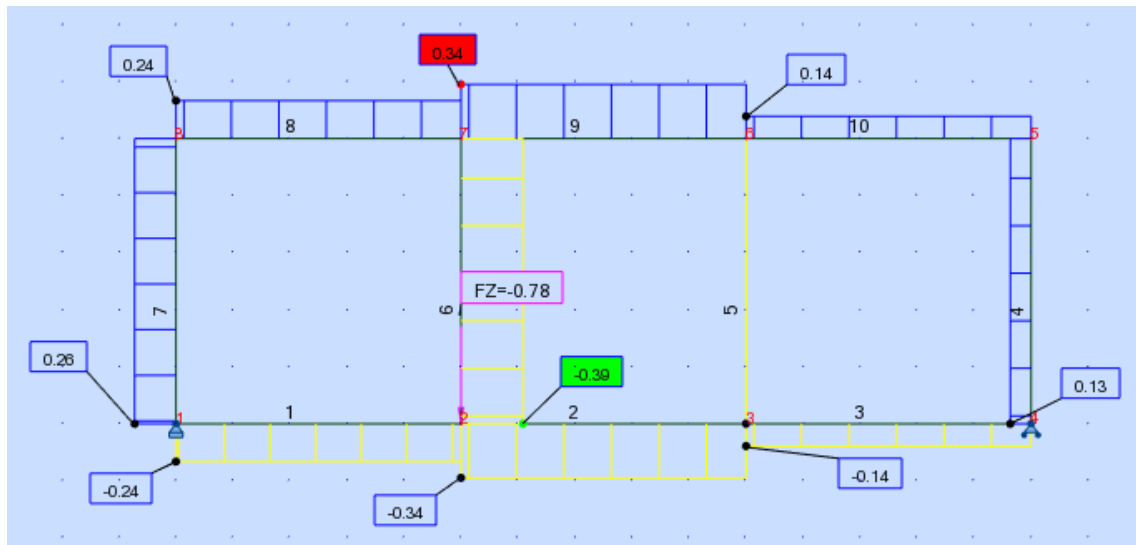


Figura 5.41: Diagrama de Axiles con 80 kg.

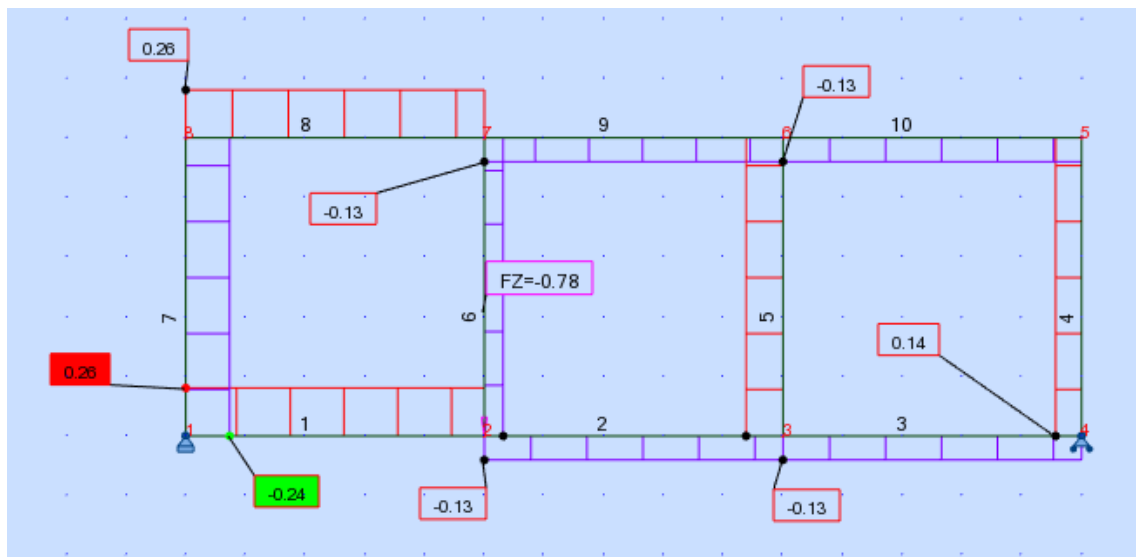


Figura 5.42: Diagrama de Cortantes con 80 kg.

Los esfuerzos de cálculo utilizados para el dimensionado de la estructura en el TFG de Diego García Torres [2], los cuales se presentaron anteriormente en la Tabla 5.10, en combinación, son mayores que todas las combinaciones de esfuerzos de la estructura, por lo que se puede someter la estructura a esta carga sin peligro de dañarla.

5.3.1 Desplazamientos

En este caso, el estudio se ha centrado en el nudo F, en el cual su desplazamiento será igual al desplazamiento del nudo B.

En este caso al tratarse de una estructura reticulada, la única forma de resolverla de forma numérica es mediante cálculo matricial, pero al tener 8 nudos conlleva operar con matrices de 24 filas por 24 columnas, ya que cada nudo dispone de tres grados de libertad.

El método matricial constituye un caso particular del método de los elementos finitos, que es actualmente la herramienta más poderosa y más extendida de la ingeniería.

Y por suerte, el software Robot Structural Analysis, utilizado en este trabajo, está basado en este tipo de cálculo, con lo cual para el cálculo teórico se utilizará este software como principal herramienta de apoyo y así evitar cálculos muy tediosos.

- Cálculo teórico mediante Robot Structural Analysis

El cálculo teórico y mediante el software informático Robot Structural Analysis, proporciona **un desplazamiento vertical de 1,3 cm**, en los nudos 2 y 7, los cuales se puede ver a continuación en las figuras 5.43 y 5.44.

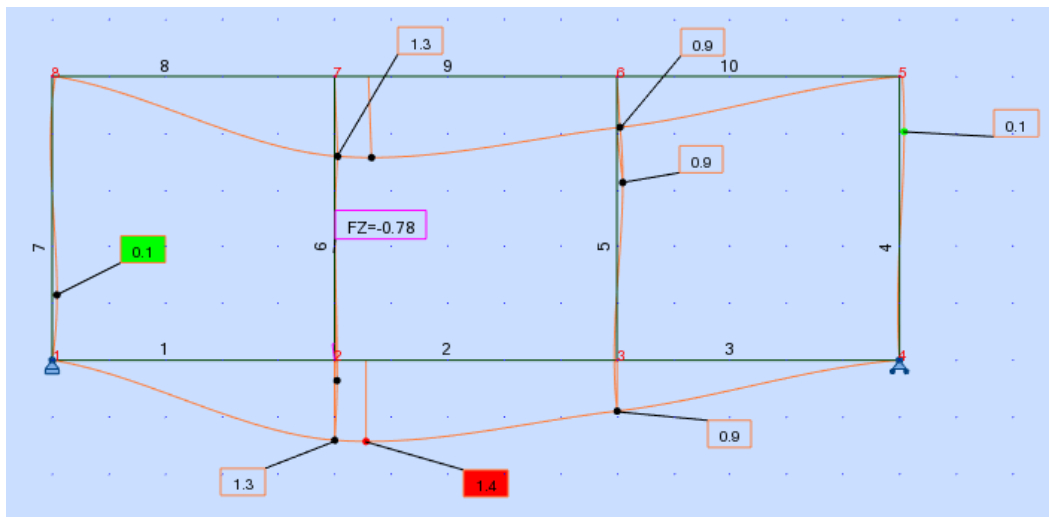


Figura 5.43: Desplazamientos con 80 kg en cm.

Nudo/Caso	UX (cm)	UZ (cm)	RY (Rad)
1/ 1	0,0	0,0	0,000
1/ 2	0,0	0,0	0,008
2/ 1	0,0	-0,1	0,000
2/ 2	0,0	-1,3	0,004
3/ 1	0,0	-0,1	-0,000
3/ 2	0,0	-0,9	-0,006
4/ 1	0,0	0,0	-0,000
4/ 2	0,0	0,0	-0,004
5/ 1	-0,0	-0,0	-0,000
5/ 2	0,0	-0,0	-0,004
6/ 1	0,0	-0,1	-0,000
6/ 2	0,0	-0,9	-0,006
7/ 1	0,0	-0,1	0,000
7/ 2	0,1	-1,3	0,004
8/ 1	0,0	-0,0	0,000
8/ 2	0,1	-0,0	0,008

Figura 5.44: Desplazamientos con 80 kg en cm.

- Medida experimental

Mientras que de la medida experimental como se puede ver en la figura 5.45 se obtiene **un desplazamiento de 1,3 cm también.**

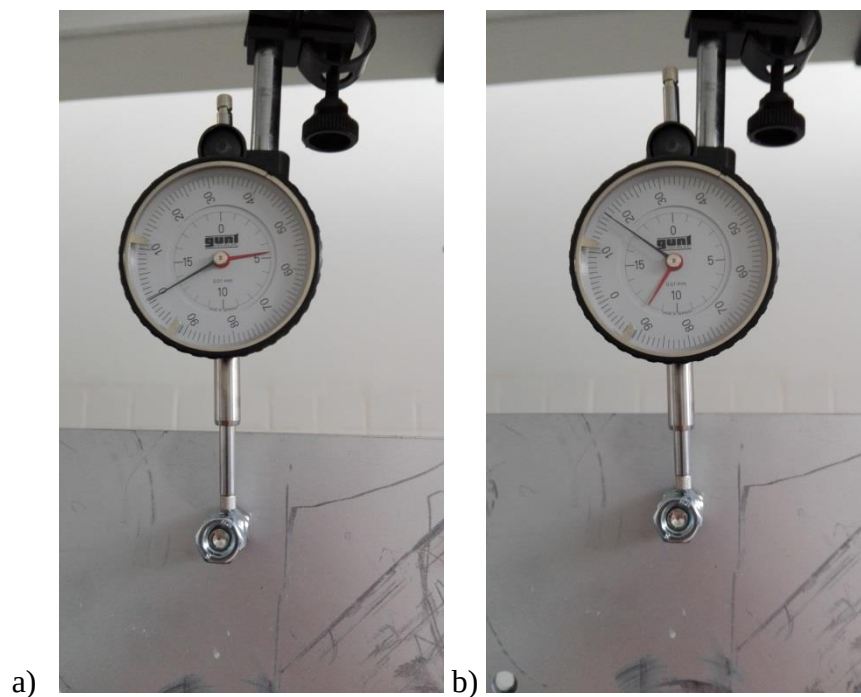


Figura 5.45: a) Medida de desplazamiento sin carga. b) Medida de desplazamiento con 80 kg.

A continuación en la tabla 5.17 se puede ver la comparación de los tres métodos de cálculo del desplazamiento.

Método	Cálculo numérico	Robot Structural	Experimental
Desplazamiento	13mm	13mm	13mm

Tabla 5.17: Tabla comparativa de los tres métodos de cálculo del desplazamiento del nudo 2.

5.3.2 Deformaciones con galgas

En esta estructura se han colocado 4 galgas extensométricas como se puede ver en las figuras 5.46 y 5.47, dos en la barra 1 enfrentadas y otras dos en la barra 6 enfrentadas también. Las galgas de la barra 1 se encuentran una en la fibra superior y otra en la fibra inferior y las dos a la misma distancia del nudo B (20cm), con el objetivo de comprobar la deformación en cada una ya que el momento provoca tracción en una fibra y compresión en la otra y comprobar si el resultado coincide con el resultado teórico.

Las galgas de la barra 6 se encuentran a la misma altura y justo en el centro de la barra, donde el momento flector se hace nulo, con el objetivo de obtener la misma deformación en ambas, ya que en ese punto la deformación es causa íntegramente del axil, el cual es constante en toda la barra.

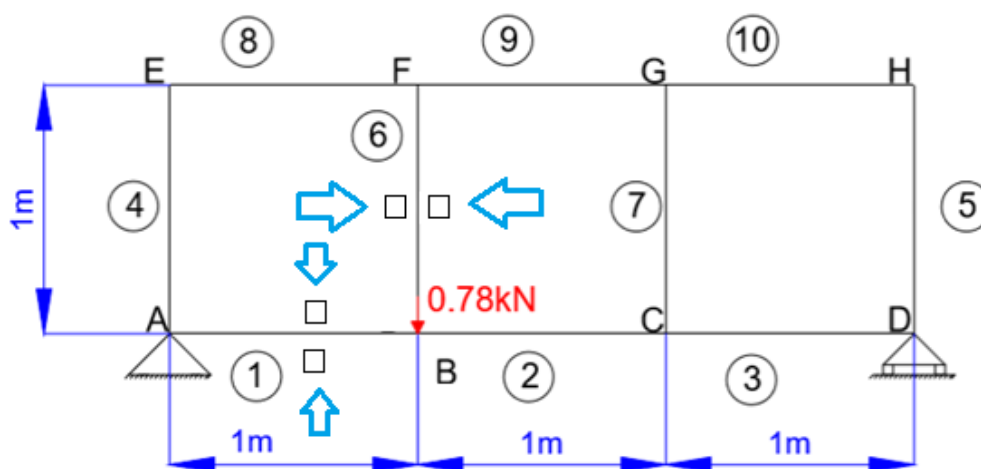


Figura 5.46: Ubicación de las galgas instaladas en la estructura.



Figura 5.47: Ubicación de las galgas instaladas en la estructura.

Antes de comenzar con los cálculos, ya que en esta estructura aparecen Momentos flectores en las barras, se necesita relacionar estos momentos con la deformación producida por estos en las barras y la ley que relaciona estos dos conceptos se conoce como **Ley de Navier para flexión pura**.

- **Ley de Navier para flexión pura.**

Según la ley de Navier para flexión pura, en una sección sometida a flexión, la tensión normal que se ejerce sobre las distintas fibras es proporcional a la distancia a la fibra neutra como se puede ver en la figura 5.48. En flexión simple, la fibra neutra pasa por el centro de gravedad de la sección. Sabiendo las tensiones normales causadas por un momento flector, interesa conocer donde se da y cuánto vale la tensión normal máxima. La ecuación que rige esta ley es la ecuación 5.12.

$$\sigma_{x \text{ máx}} = \frac{M_z}{I_z} \times y_{\text{máx}} \quad (5.12)$$

Donde:

$y_{\text{máx}}$: Punto de la sección más alejado de la fibra neutra.

M_z : Momento flector aplicado en la sección en el eje z.

I_z : Inercia del perfil en el eje de aplicación del momento.

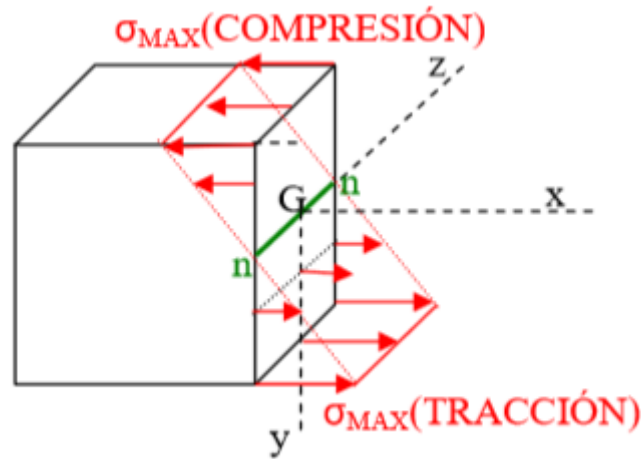


Figura 5.48: Ley de Navier para flexión pura.

Como se puede ver en la figura 5.48 un momento positivo en el eje z producirá compresión en la parte superior de la sección y tracción en la parte inferior.

Según la hipótesis de Bernoulli-Navier, en flexión pura cada sección transversal de la viga gira alrededor de un eje, contenido en la sección, denominado Eje Neutro, permaneciendo las secciones planas y normales a las fibras deformadas como se puede ver en la figura 5.49.

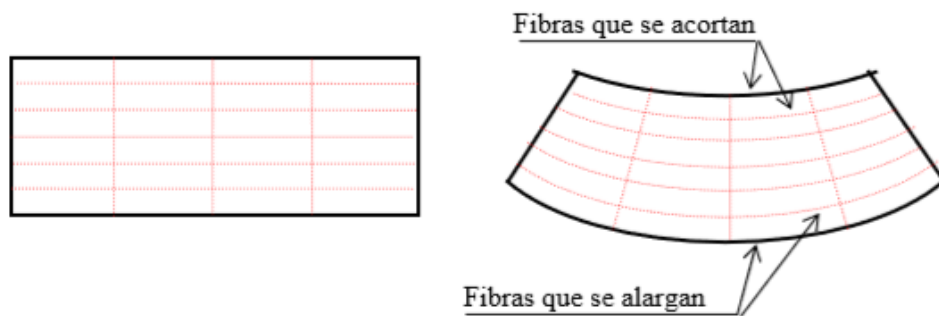


Figura 5.49: Hipótesis de Bernoulli-Navier.

A partir de la Ley de Hooke (ver ecuación 5.1) y la Ley de Navier (ecuación 5.12), se obtiene la expresión de la deformación producida por un momento flector en una barra (ver ecuación 5.13), la cual se utilizará en esta estructura para calcular la deformación teórica producida en cada barra.

$$\epsilon = \frac{M x y_{\text{máx}}}{I x E} \quad (5.13)$$

En cada barra la deformación producida será la suma de la deformación producida por el momento flector y la deformación producida por el esfuerzo axial.

- Cálculo teórico mediante Robot Structural Analysis

Mientras que el cálculo numérico para la barra 6 se calcularía simplemente en función del axil de esa barra, ya que el momento flector en ese punto es nulo, el valor de las deformaciones de la barra 1 es más complejo como se indica a continuación, ya que hay que tener en cuenta el axil de la barra y el momento flector en el punto de la barra situado a 20 cm del nudo.

Para empezar, se obtendrán los esfuerzos axiles de todas las barras y los momentos flectores mediante Robot Structural Analysis, los cuales se encuentran a continuación en la tabla 5.18.

Barra/Nudo/Caso	FX (kN)	FZ (kN)	MY (kNm)
1/ 1/ 2	-0,24	0,26	-0,12
1/ 2/ 2	-0,24	0,26	0,14
2/ 2/ 2	-0,34	-0,13	0,09
2/ 3/ 2	-0,34	-0,13	-0,04
3/ 3/ 2	-0,14	-0,13	0,06
3/ 4/ 2	-0,14	-0,13	-0,07
4/ 4/ 2	0,13	0,14	-0,07
4/ 5/ 2	0,13	0,14	0,07
5/ 3/ 2	-0,00	0,20	-0,10
5/ 6/ 2	-0,00	0,20	0,10
6/ 2/ 2	-0,39	-0,10	0,05
6/ 7/ 2	-0,39	-0,10	-0,05
7/ 1/ 2	0,26	-0,24	0,12
7/ 8/ 2	0,26	-0,24	-0,12
8/ 8/ 2	0,24	0,26	-0,12
8/ 7/ 2	0,24	0,26	0,14
9/ 7/ 2	0,34	-0,13	0,09
9/ 6/ 2	0,34	-0,13	-0,04
10/ 6/ 2	0,14	-0,13	0,06
10/ 5/ 2	0,14	-0,13	-0,07

Tabla 5.18: Tabla de esfuerzos en la estructura con 80 kg.

Una vez que se conocen los esfuerzos, a continuación ya se pueden calcular las deformaciones para cada barra mediante la expresión 5.13 obtenida de la Ley de Navier para los momentos flectores y la expresión 5.2 para los axiles (ver tabla 5.19):

- Punto Central Barra 6

-Esfuerzo axil: 0,39 kN
 -Momento flector: 0 kNm
 -Área: $3,24 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
 -Módulo Elástico: $6,95 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$

$$\epsilon_{AXIL} = \frac{N}{A \times E} = \frac{0,39 \text{ kN}}{3,24 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 6,95 \times 10^7 \text{ kN/m}^2} \times 10^6 = \mathbf{17,31 \mu\epsilon}$$

- Punto a 20 cm del nudo B en Barra 1

-Esfuerzo axil:	0,24 kN
-Momento flector:	0,088 kNm
-Área:	$3,24 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
-Módulo Elástico:	$6,95 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$
-Inercia:	$2,321 \times 10^{-8} \text{ m}^4$
-Distancia máxima hasta la fibra(c):	0,015m

$$\epsilon_{AXIL} = \frac{N}{A \times E} = \frac{0,24 \text{ kN}}{3,24 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 6,95 \times 10^7 \text{ kN/m}^2} \times 10^6 = \mathbf{10,62 \mu\epsilon}$$

$$\epsilon_{FLEXIÓN} = \frac{M \times c}{I \times E} = \frac{0,088 \text{ kNm} \times 0,015 \text{ m}}{2,321 \times 10^{-8} \text{ m}^4 \times 6,95 \times 10^7 \text{ kN/m}^2} \times 10^6 = \mathbf{815,95 \mu\epsilon}$$

Barra	1		6	
Galga	Superior	Inferior	Derecha	Izquierda
Deformación	-805,33 $\mu\epsilon$	826,57 $\mu\epsilon$	17,31 $\mu\epsilon$	17,31 $\mu\epsilon$

Tabla 5.19: Cálculo teórico de deformaciones en las barras 1 y 6 con 80 kg.

- Medida experimental

Las deformaciones obtenidas en las barras 1 y 6 mediante el uso de las galgas extensométricas como se puede ver en la figura 5.50 y en la tabla 5.20 han sido:

Barra	1		6	
Galga	Superior	Inferior	Derecha	Izquierda
Deformación	-468 $\mu\epsilon$	493 $\mu\epsilon$	15 $\mu\epsilon$	23 $\mu\epsilon$

Tabla 5.20: Medida de deformaciones en las barras 1 y 6 con 80 kg.

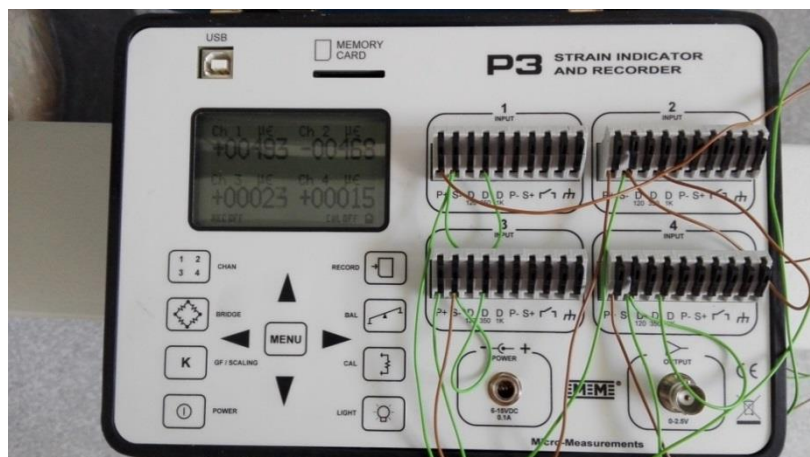


Figura 5.50: Medida de deformaciones en las barras 1 y 6 con 80 kg.

5.3.3 Contrastación de resultados y conclusiones

Como se puede ver al tratarse de desplazamientos mayores en esta estructura la medida es mucho más precisa y es similar tanto numéricamente como experimentalmente. Por lo tanto la medida de desplazamientos mayores ha sido exitosa.

Sin embargo, las deformaciones como se puede ver, salen del mismo orden tanto numéricamente como experimentalmente y muy próximas a las teóricas, excepto cuando se trata de barras en las que entran en juego momentos flectores.

En las barras sometidas a momentos flectores las deformaciones que dependen del momento flector, experimentalmente las galgas registran deformaciones del orden de la mitad de las teóricas. Esto puede deberse a que las propias uniones tienen holguras, lo que hace que las uniones no se comporten como uniones rígidas, sino como algo intermedio entre uniones reticuladas y articuladas.

Las deformaciones en las barras en las que solo dependen del axil siguen dando resultados similares.

Al tratarse de medidas tan pequeñas, es muy difícil que salgan exactamente debido al margen de error de los dispositivos de medida o incluso a la colocación de las galgas, las cuales es muy difícil colocarlas a una distancia exacta. Esto se puede ver claramente en la barra 6, en la cual a pesar de estar sometida a flexotracción, las galgas se encuentran en la fibra neutra, donde el momento flector no debería influir, por lo que deberían obtenerse deformaciones similares a las teóricas y sin embargo una sale un poco mayor mientras que la otra un poco menor. Esto es debido a que en el caso de desplazarse una distancia mínima del centro de la barra al colocar la galga, aparece un momento flector muy pequeño, pero que influye traccionando una fibra y comprimiendo la otra, lo cual da lugar a que una proporcione una deformación un poco mayor a la teórica y la otra un poco inferior.

5.4 Tercera disposición

Esta tercera estructura no se trata de una estructura comercial ni compleja, sino de una estructura reticulada, sencilla y pequeña, en la cual además de medir desplazamientos y deformaciones, el principal interés es añadir un tirante en lugar de una barra y comparar los resultados con él y sin él, para demostrar la gran diferencia que se produce simplemente añadiendo un elemento como este sin necesidad de que se trate de otra barra.

Antes de continuar, para esta estructura hay que diferenciar entre estructuras traslacionales e intraslacionales. En el caso de las intraslacionales, el incremento de las solicitaciones debido a las deformaciones de la estructura (efectos de segundo orden) resultan despreciables y es posible aplicar las ecuaciones de equilibrio a la geometría de la estructura no deformada. Mientras que en el caso de las estructuras traslacionales los desplazamientos tienen una influencia sustancial en los esfuerzos, por lo que no se pueden despreciar los efectos de segundo orden.

En el caso de esta estructura al añadir el tirante, esta pasa a convertirse de una estructura traslacional a una intraslacional.

La estructura está compuesta como las anteriores por barras de aluminio cuadradas de 30x30x3 mm, todas ellas de 1 metro de longitud, a excepción de la barra 6 que mide raíz de 2 metros y placas de unión diseñadas y dimensionadas en el TFG de Diego García Torres [2]. Como elementos de unión se seguirá utilizando tornillos y tuercas de métrica 8.

La carga aplicada en esta estructura será de 50 kg, aproximadamente 0,5 kN, en su nudo en voladizo y el tirante se trata de un cable de acero trenzado de 3 mm de diámetro, en el cual se colocará un tensor en uno de sus extremos similar a los utilizados en el sistema de carga, el cual se puede ver en la figura 5.51.



Figura 5.51: Tirante de acero y tensor de su extremo.

A continuación se puede ver el esquema de dicha estructura con y sin tirante en las figuras 5.52 y 5.53.

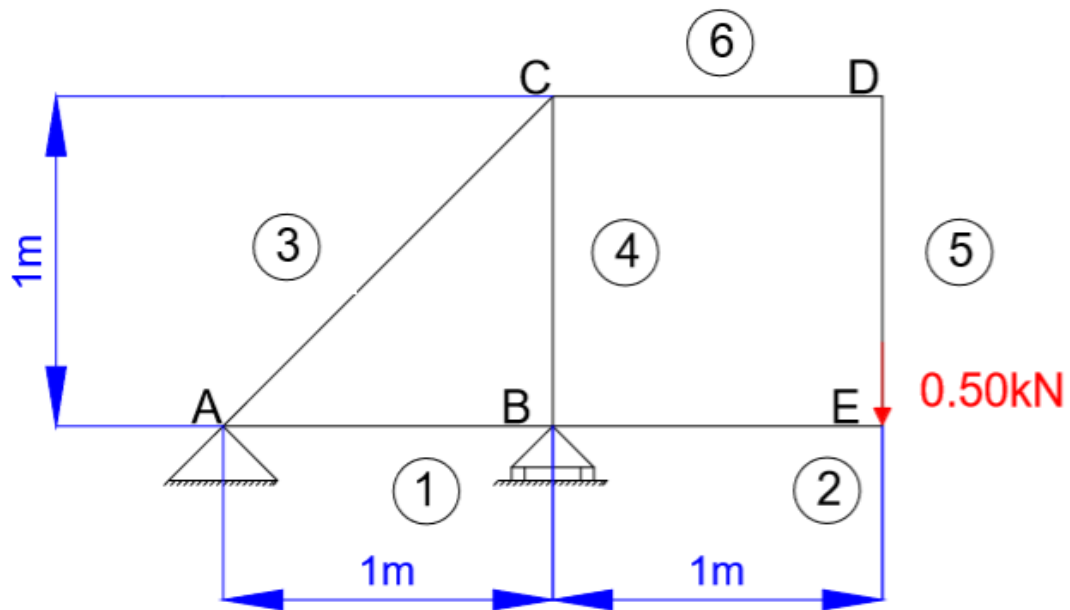


Figura 5.52: Esquema de la estructura sin tirante con 50 kg de carga aplicada en su nudo en voladizo.

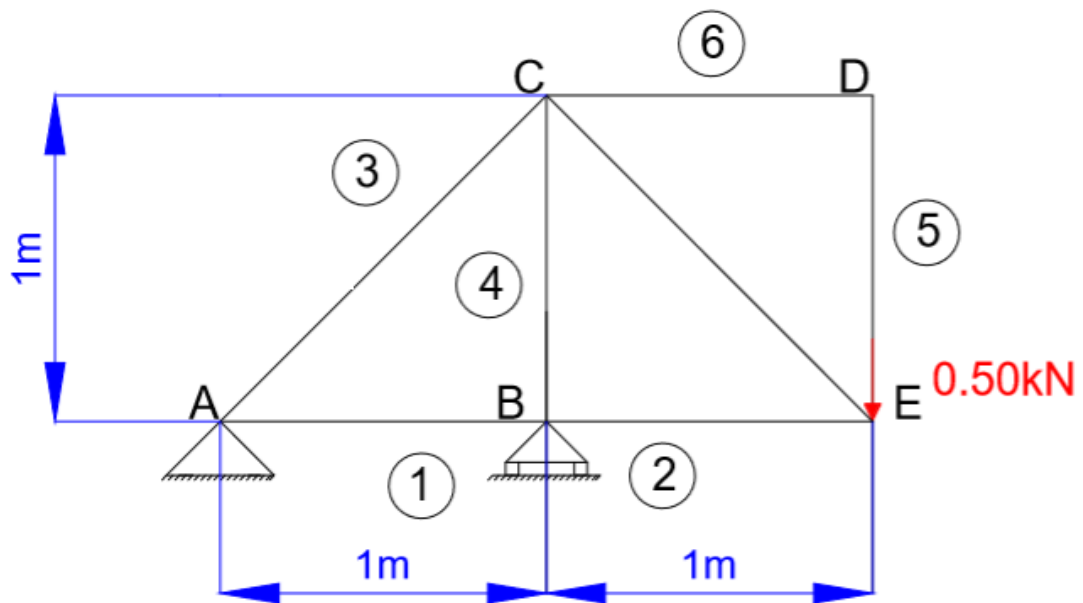
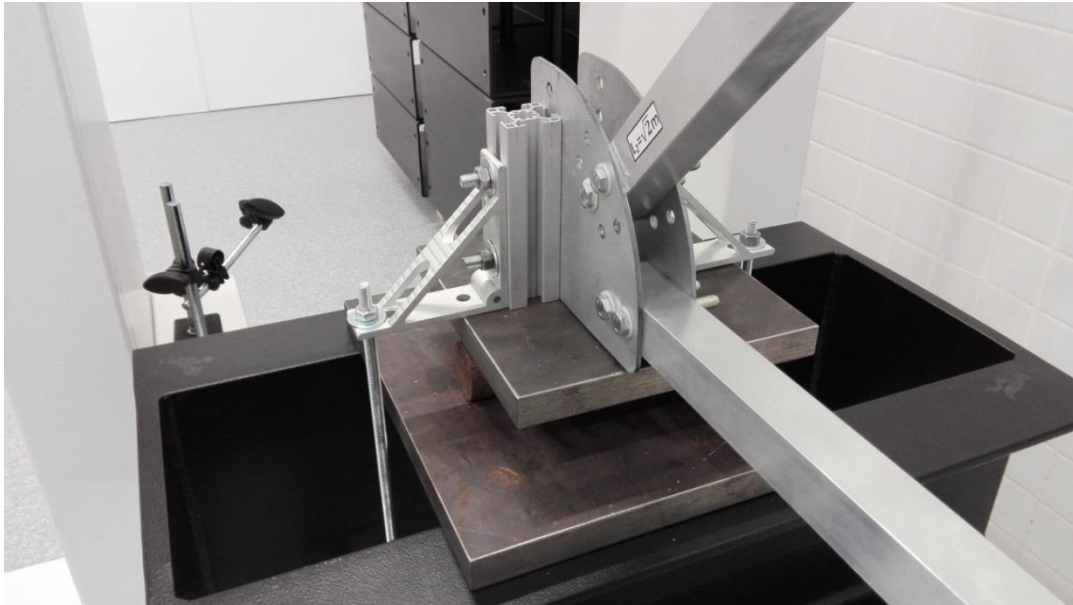


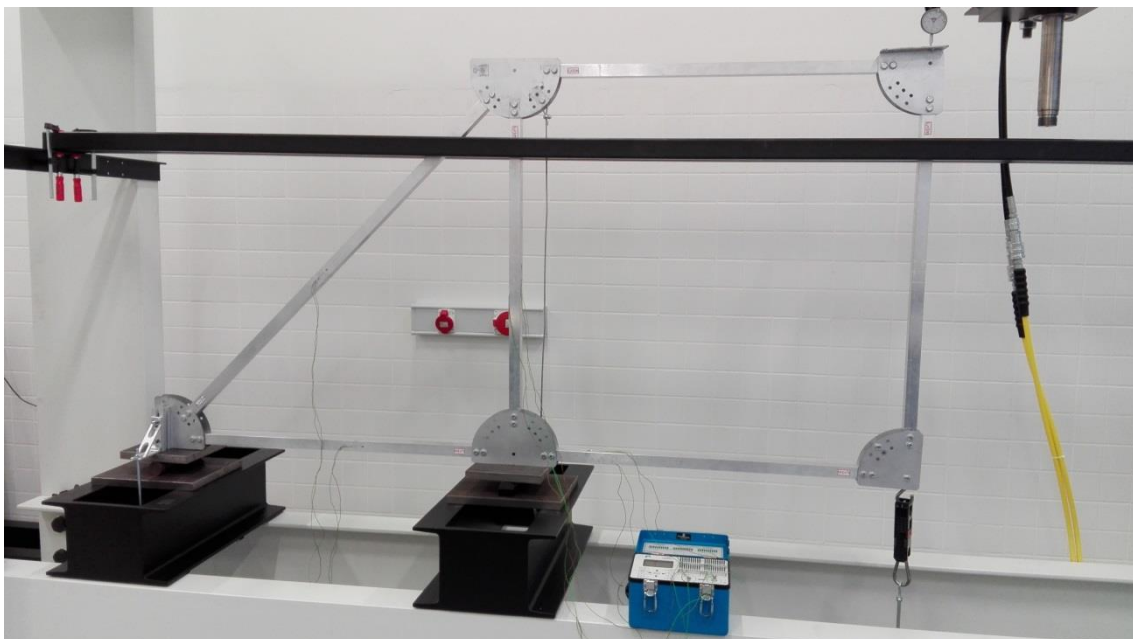
Figura 5.53: Esquema de la estructura con tirante con 50 kg de carga aplicada en su nudo en voladizo.

En este caso a la hora de someter la estructura a su aplicación de carga se encuentra el problema de que en el apoyo de la izquierda, la fuerza producida es vertical y hacia arriba, por lo que si no se impide el desplazamiento vertical de este nudo, la estructura volcará. Este problema se ha solucionado acoplando a las placas de unión de este nudo dos perfiles Bosch y dos escuadras, las cuales van atornilladas a dos topos de acero anclados a la parte inferior del banco como se puede ver en la figura 5.54.

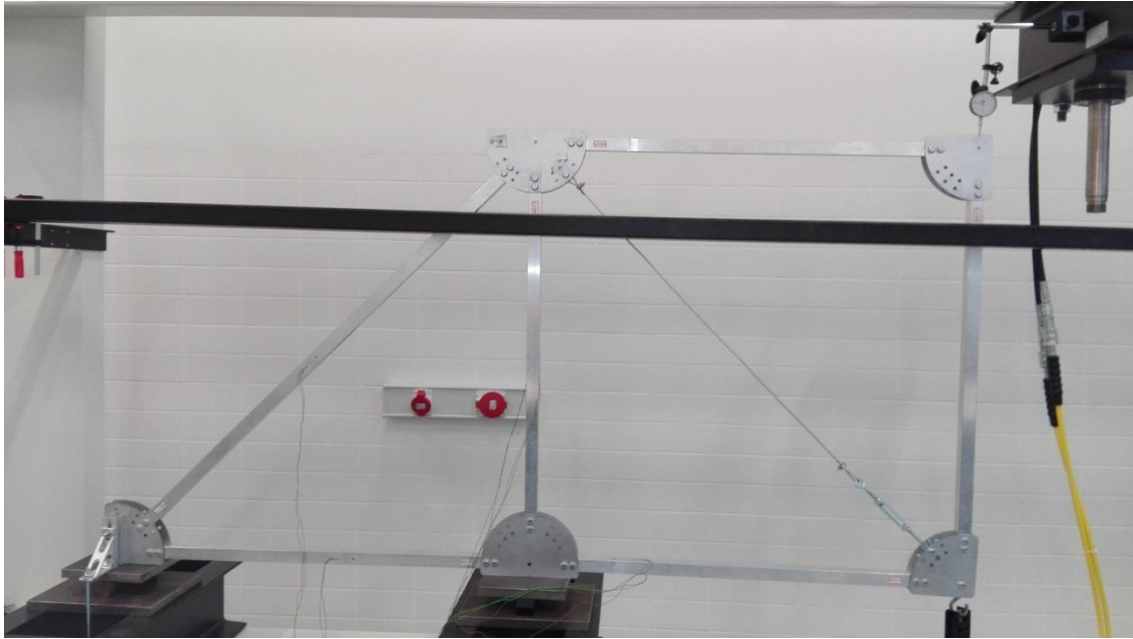


Figuras 5.54: Sistema de anclaje vertical del apoyo izquierdo.

Una vez solucionado este problema, el proceso de montaje ha finalizado y la estructura completa se puede ver a continuación en las figuras 5.55 y 5.56 lista para aplicarle la carga, con y sin tirante.



Figuras 5.55: Estructura sin tirante.



Figuras 5.56: Estructura con tirante.

Antes de someter la estructura a carga, hay que volver a comprobar que los esfuerzos en las barras y las placas de unión no superan los esfuerzos de diseño utilizados para su dimensionado (ver tabla 5.10) en el TFG de Diego García Torres [2], para así evitar dañar la estructura.

A continuación se procede a realizar dicha comprobación mediante el software Robot Structural Analysis. Los resultados obtenidos mediante el software se pueden ver a continuación:

En las figura 5.57 y 5.58 podemos ver el diagrama de momentos flectores de la estructura en $\text{kN}\cdot\text{m}$ con y sin tirante.

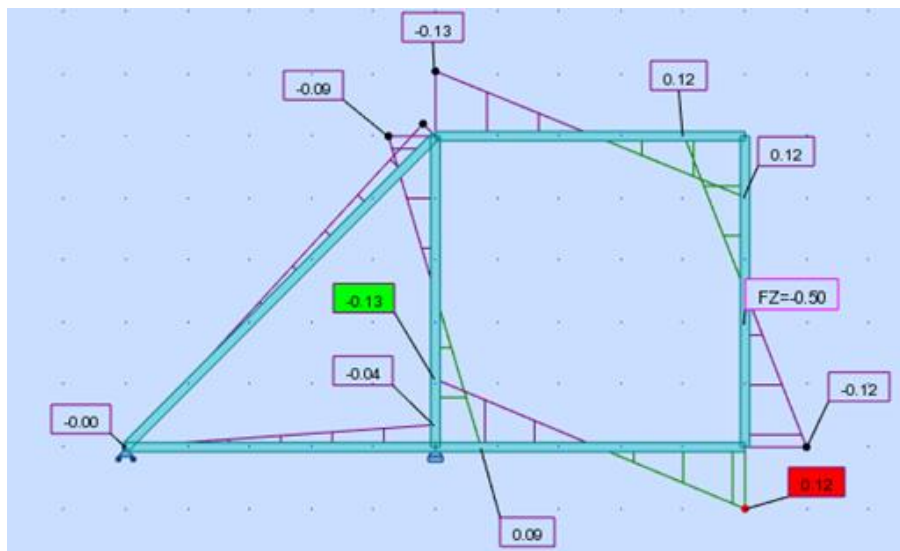


Figura 5.57: Diagrama de Momentos con 50 kg sin tirante.

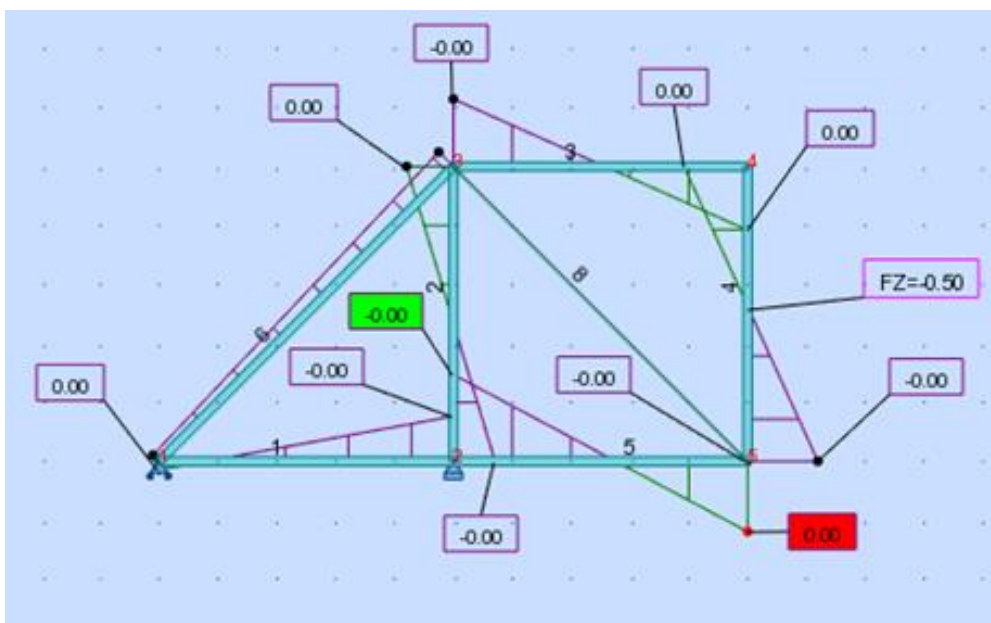


Figura 5.58: Diagrama de Momentos con 50 kg con tirante.

En la figuras 5.59 y 5.60 se pueden ver los diagramas de axiles de la estructura en kN, así como los diagramas de cortantes en las figuras 5.61 y 5.62, con y sin tirante.

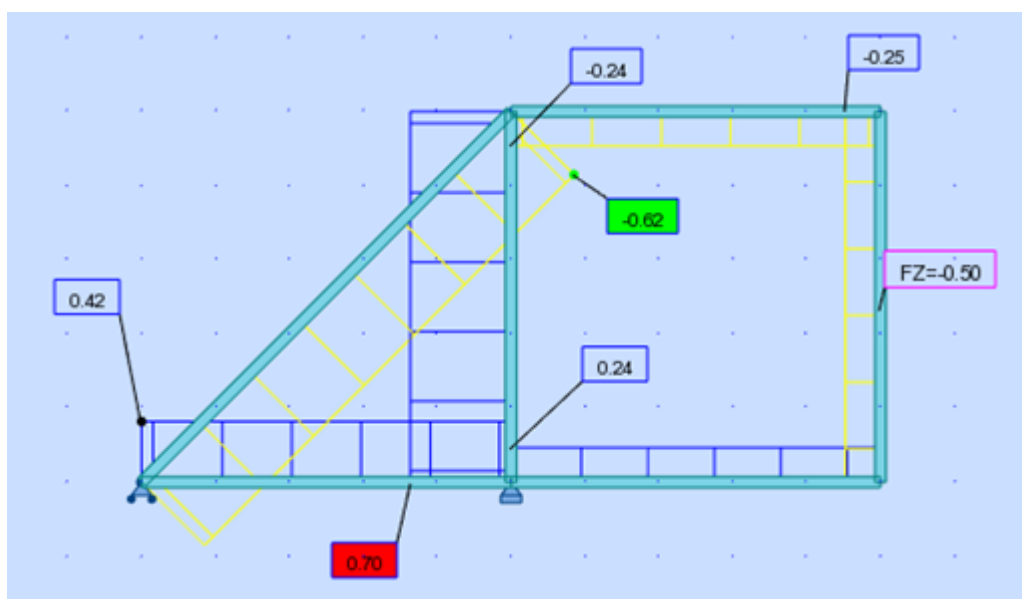


Figura 5.59: Diagrama de Axiles sin tirante con 50 kg.

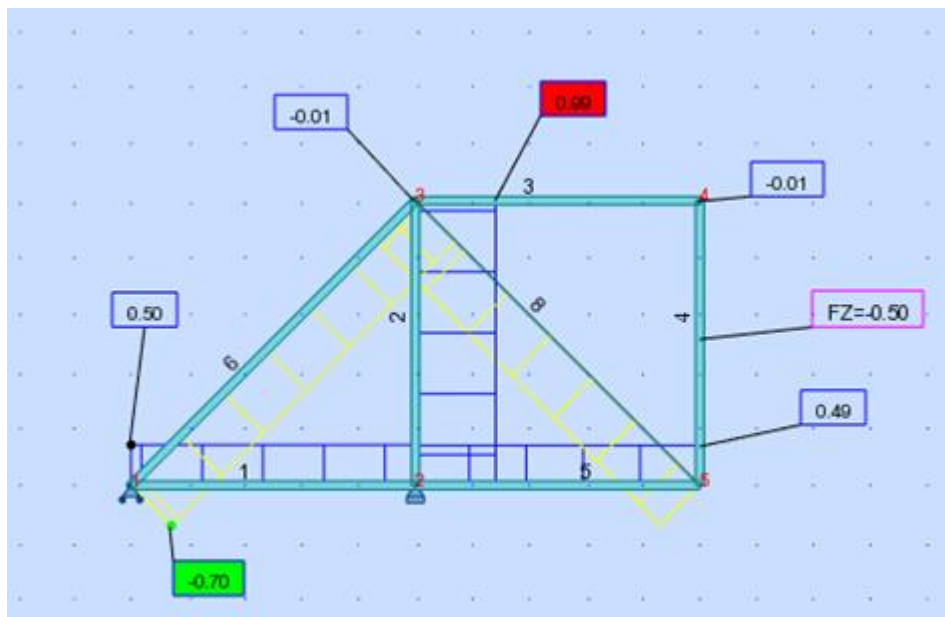


Figura 5.60: Diagrama de Axiles con tirante con 50 kg.

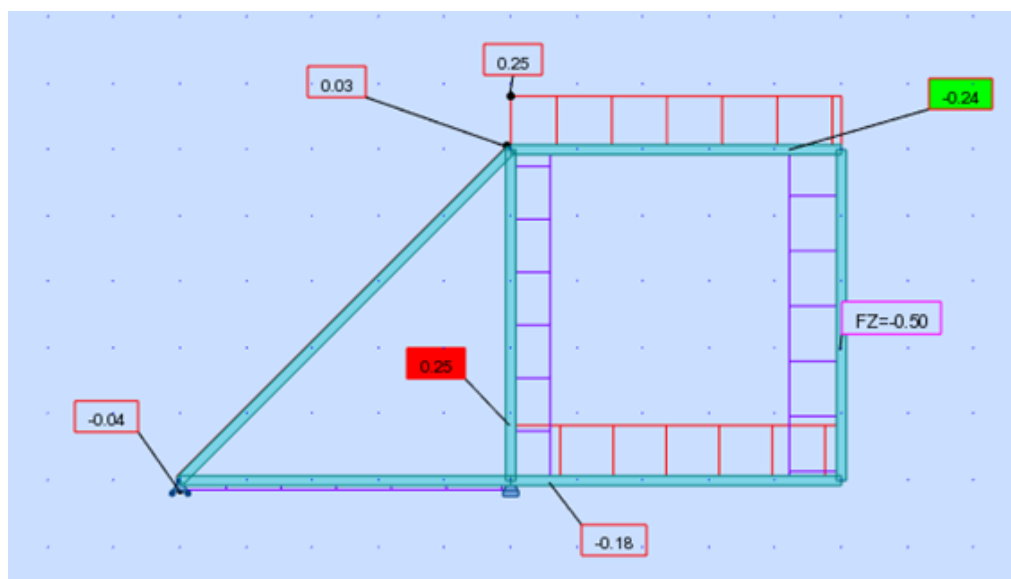


Figura 5.61: Diagrama de Cortantes sin tirante con 50 kg.

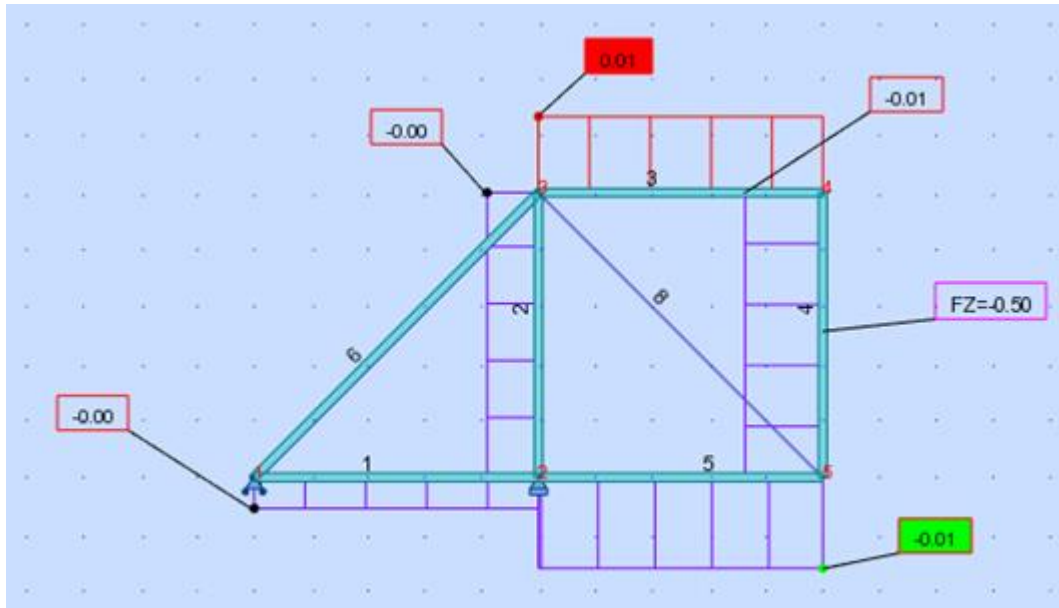


Figura 5.62: Diagrama de Cortantes con tirante con 50 kg.

Los esfuerzos de cálculo utilizados para su dimensionado de la estructura en el TFG de Diego García Torres [2] se pueden ver en la Tabla 5.10 y en ningún nudo de las estructuras se da una combinación de ambos esfuerzos mayores, por lo que se puede someter la estructura a esta carga sin peligro de dañarla.

5.4.1 Desplazamientos

Para ambos casos, es decir, con y sin tirante el estudio se ha centrado en el nudo E.

❖ Sin tirante

- Cálculo teórico mediante Robot Structural Analysis

Mediante el software informático Robot Structural Analysis, el cálculo teórico del desplazamiento del nudo E proporciona **un desplazamiento vertical de 1,4 cm**, el cual se puede ver a continuación en las figuras 5.63 y 5.64.

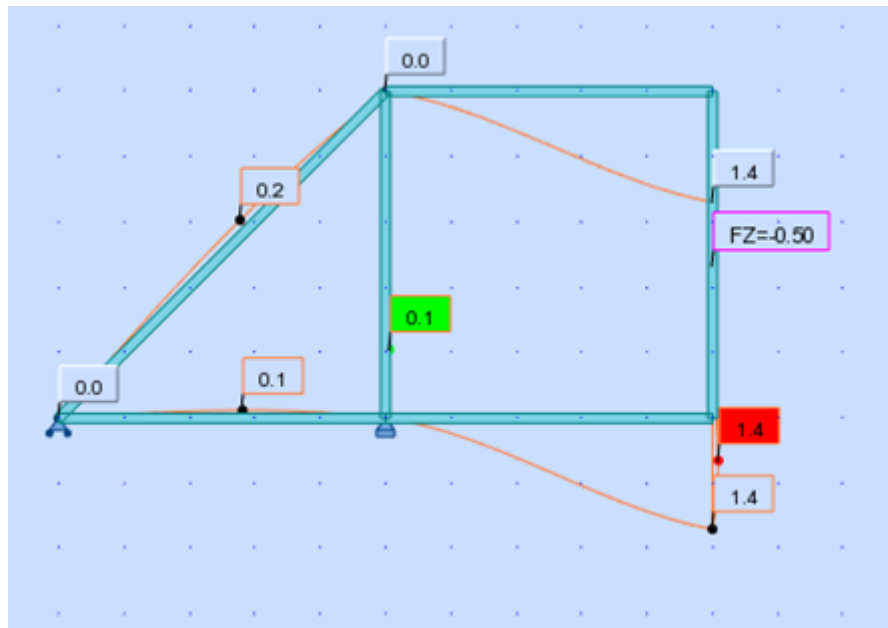


Figura 5.63: Desplazamientos sin tirante en cm con 50 kg.

Nudo/Caso	UX (cm)	UZ (cm)	RY (Rad)
1/ 1	0,0	0,0	0,000
1/ 2	0,0	0,0	-0,003
2/ 1	0,0	0,0	0,000
2/ 2	0,0	0,0	0,005
3/ 1	0,0	-0,0	0,000
3/ 2	0,0	-0,0	0,006
4/ 1	0,0	-0,0	0,000
4/ 2	0,0	-1,4	0,007
5/ 1	-0,0	-0,0	0,000
5/ 2	-0,0	-1,4	0,007

Figura 5.64: Desplazamientos sin tirante en cm con 50 kg.

- Medida experimental

Mientras que de la medida experimental como se puede ver en la figura 5.65 se obtiene **un desplazamiento de 1,3 cm, aproximadamente igual.**



a)



b)

Figuras 5.65: a) Medida de desplazamiento sin carga. b) Medida de desplazamiento 50 kg.

A continuación en la tabla 5.21 se puede ver la comparación de los tres métodos de cálculo del desplazamiento.

Método	Cálculo numérico	Robot Structural	Experimental
Desplazamiento	14 mm	14 mm	13 mm

Tabla 5.21: Tabla comparativa de los tres métodos de cálculo del desplazamiento del nudo E sin tirante.

❖ Con tirante

- Cálculo teórico mediante Robot Structural Analysis

Mediante el cálculo teórico con el software informático Robot Structural Analysis, proporciona **un desplazamiento vertical de 0,2 cm**, el cual se puede ver a continuación en las figuras 5.66 y 5.67.

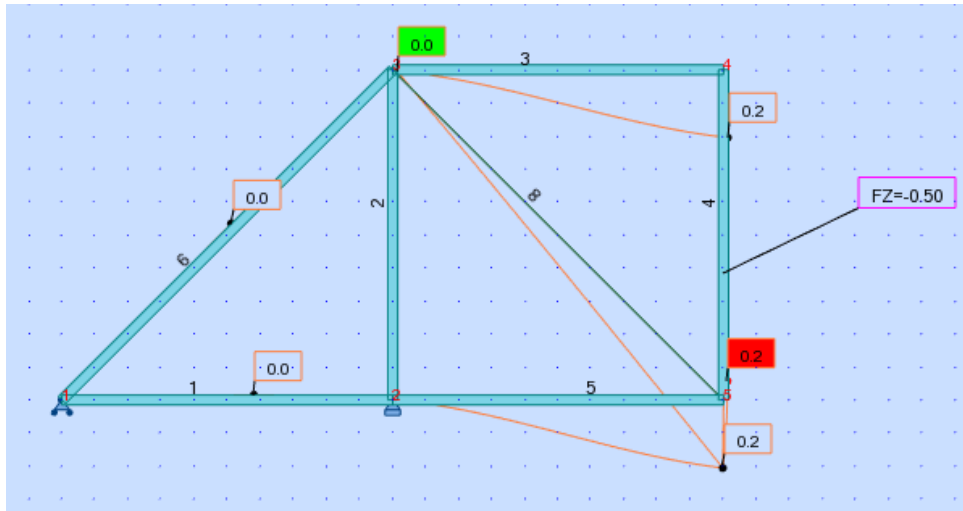


Figura 5.66: Desplazamientos con tirante en cm con 50 kg.

Nudo/Caso	UX (cm)	UZ (cm)	RY (Rad)
1/ 1	0,0	0,0	0,000
1/ 2	0,0	0,0	-0,000
2/ 1	0,0	0,0	0,000
2/ 2	0,0	0,0	0,001
3/ 1	0,0	-0,0	0,000
3/ 2	0,0	-0,0	0,001
4/ 1	0,0	-0,0	0,000
4/ 2	0,0	-0,2	0,001
5/ 1	-0,0	-0,0	0,000
5/ 2	-0,0	-0,2	0,001

Figura 5.67: Desplazamientos con tirante en cm con 50 kg.

- Medida experimental

Mientras que de la medida experimental como se puede ver en la figura 5.68 se obtiene **un desplazamiento de 0,35 cm.**

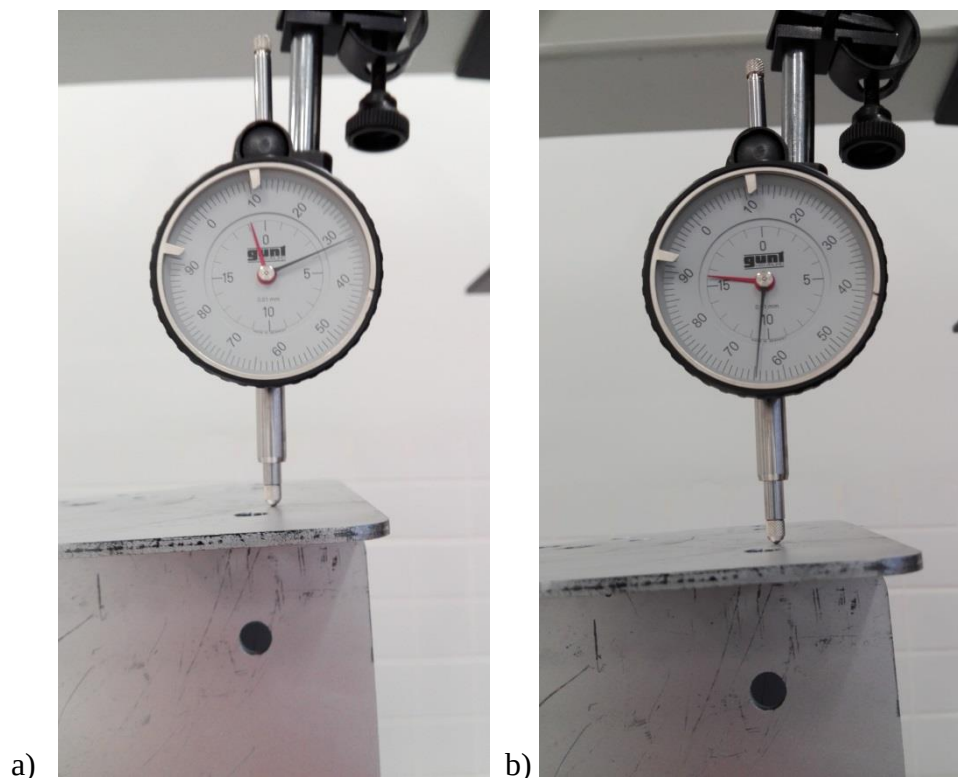


Figura 5.68: a) Medida de desplazamiento sin carga. b) Medida de desplazamiento 50 kg.

A continuación en la tabla 5.22 se puede ver la comparación de los tres métodos de cálculo del desplazamiento.

Método	Cálculo numérico	Robot Structural	Experimental
Desplazamiento	2 mm	2 mm	3,5 mm

Tabla 5.22: Tabla comparativa de los tres métodos de cálculo del desplazamiento del nudo E con tirante.

5.4.2 Deformaciones con galgas

En esta estructura se han colocado 4 galgas extensométricas como se puede ver en las figuras 5.69 y 5.70, dos en la barra 2 enfrentadas y otras dos en la barra 4 enfrentadas también.

Las galgas de la barra 2 se encuentran una en la fibra superior y otra en la fibra inferior y las dos a la misma distancia del nudo B (20cm). Esto se ha dispuesto así con el objetivo de comprobar la deformación en cada una, ya que el momento provoca tracción en una fibra y compresión en la otra y comprobar si el resultado coincide con el resultado teórico.

Las galgas de la barra 4 se encuentran a la misma altura y justo en el centro de la barra, donde el momento flector se hace nulo, con el objetivo de obtener la misma deformación en ambas, ya que en ese punto la deformación es causa íntegramente del axil, el cual es constante en toda la barra.

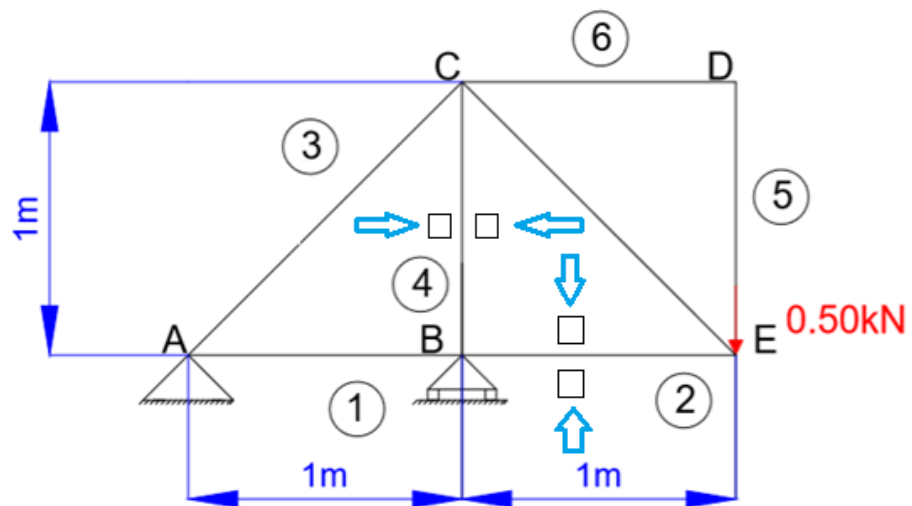


Figura 5.69: Ubicación de las galgas instaladas en la estructura.

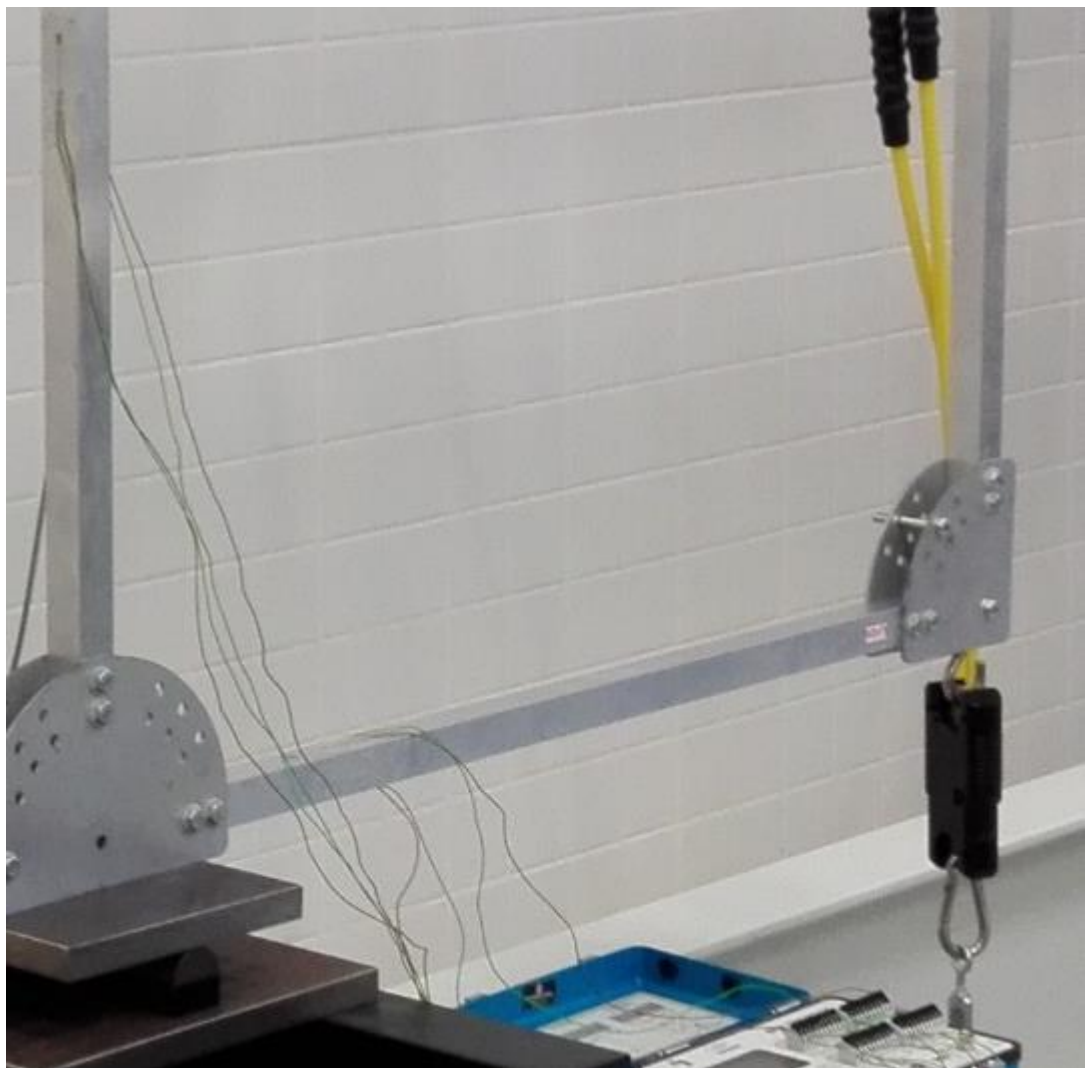


Figura 5.70: Ubicación de las galgas instaladas en la estructura.

❖ Sin tirante

- Cálculo teórico mediante Robot Structural Analysis

Mientras que el cálculo de las deformaciones teóricas de la barra 4 se calculan simplemente en función del axil de esta barra, ya que el momento flector en ese punto es nulo, el valor de las deformaciones de la barra 2 vuelve a ser más complejo como se indica a continuación ya que hay que tener en cuenta el axil de esta barra y el momento flector en este punto de la barra situado a 20 cm del nudo B.

Para empezar se obtendrán los esfuerzos axiles de todas las barras y los momentos flectores mediante Robot Structural Analysis, los cuales se encuentran a continuación en la figuras 5.71 y 5.72.

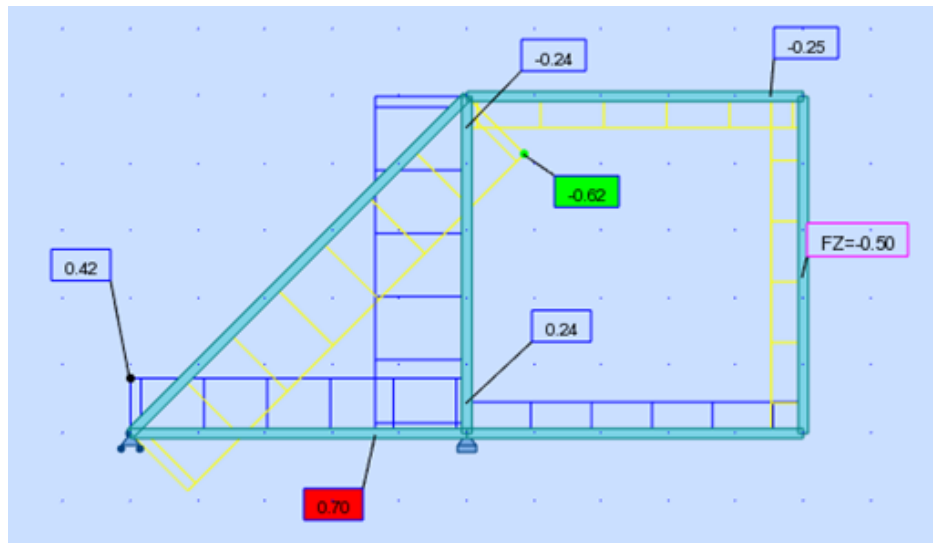


Figura 5.71: Diagrama de Axiles sin tirante con 50 kg.

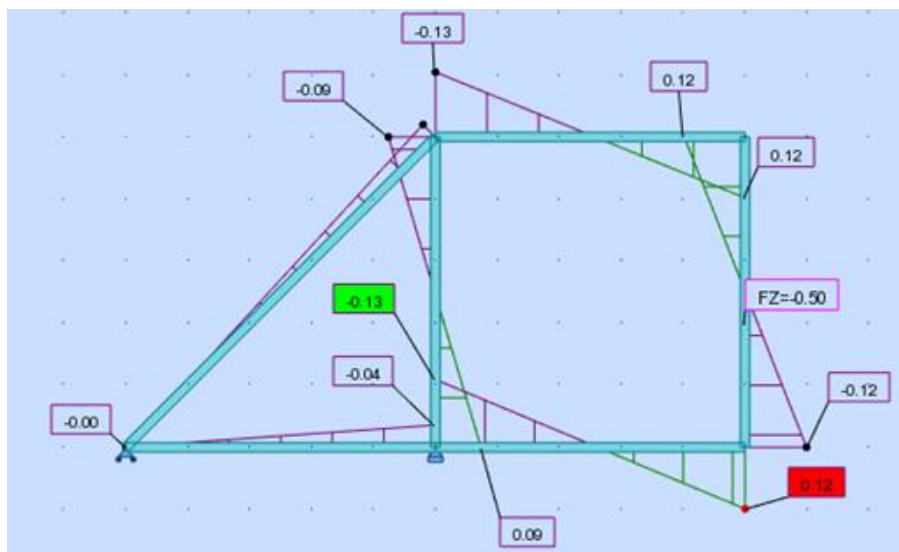


Figura 5.72: Diagrama de Momentos con 50 kg sin tirante.

Una vez que se conocen los esfuerzos, a continuación ya se pueden calcular las deformaciones para cada barra como en la disposición anterior, mediante la expresión 5.13 obtenida de la Ley de Navier para los momentos flectores y la expresión 5.2 para los axiles (ver tabla 5.23):

- Punto Central Barra 4

-Esfuerzo axil: -0,70 kN
 -Momento flector: 0 kNm
 -Área: $3,24 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
 -Módulo Elástico: $6,95 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$

$$\varepsilon_{AXIL} = \frac{N}{A \times E} = \frac{-0,70 \text{ kN}}{3,24 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 6,95 \times 10^7 \text{ kN/m}^2} \times 10^6 = -31,08 \mu\varepsilon$$

- Punto a 20 cm del nudo B en Barra 2

-Esfuerzo axil: -0,24 kN
 -Momento flector: -0,088 kNm
 -Área: $3,24 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
 -Módulo Elástico: $6,95 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$
 -Inercia: $2,321 \times 10^{-8} \text{ m}^4$
 -Distancia máxima hasta la fibra(c): 0,015m

$$\varepsilon_{AXIL} = \frac{N}{A \times E} = \frac{-0,24 \text{ kN}}{3,24 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 6,95 \times 10^7 \text{ kN/m}^2} \times 10^6 = -10,62 \mu\varepsilon$$

$$\varepsilon_{FLEXIÓN} = \frac{M \times c}{I \times E} = \frac{-0,088 \text{ kNm} \times 0,015 \text{ m}}{2,321 \times 10^{-8} \text{ m}^4 \times 6,95 \times 10^7 \text{ kN/m}^2} \times 10^6 = -815,95 \mu\varepsilon$$

Barra	2		4	
Galga	Superior	Inferior	Derecha	Izquierda
Deformación	805,33 $\mu\varepsilon$	-826,57 $\mu\varepsilon$	-31,08 $\mu\varepsilon$	-31,08 $\mu\varepsilon$

Tabla 5.23: Cálculo teórico de deformaciones en las barras 2 y 4 con 50 kg.

- Medida experimental

Las deformaciones obtenidas en las barras 2 y 4 mediante el uso de las galgas extensométricas como se puede ver en la figura 5.73 y en la tabla 5.24 han sido:

Barra	2		4	
Galga	Superior	Inferior	Derecha	Izquierda
Deformación	416 $\mu\varepsilon$	- 438 $\mu\varepsilon$	-46 $\mu\varepsilon$	-18 $\mu\varepsilon$

Tabla 5.24: Medida de deformaciones en las barras 2 y 4 con 50 kg.

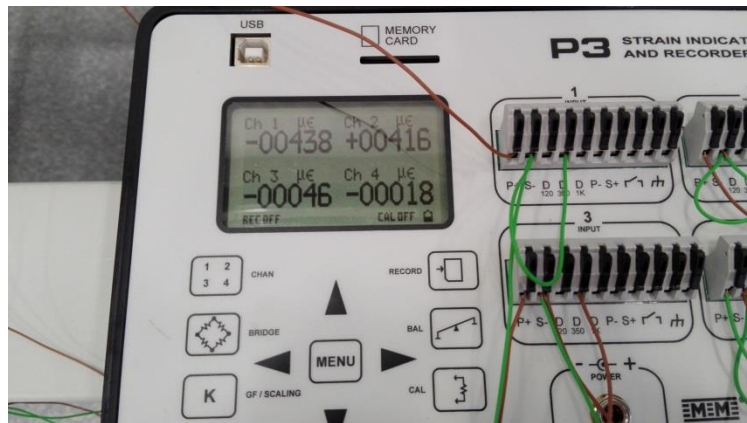


Figura 5.73: Medida de deformaciones en las barras 2 y 5 con 50 kg.

❖ Con tirante

- Cálculo teórico mediante Robot Structural Analysis

Para empezar se obtendrán los esfuerzos axiales de todas las barras y los momentos flectores mediante Robot Structural Analysis, los cuales se encuentran a continuación en la figuras 5.74 y 5.75.

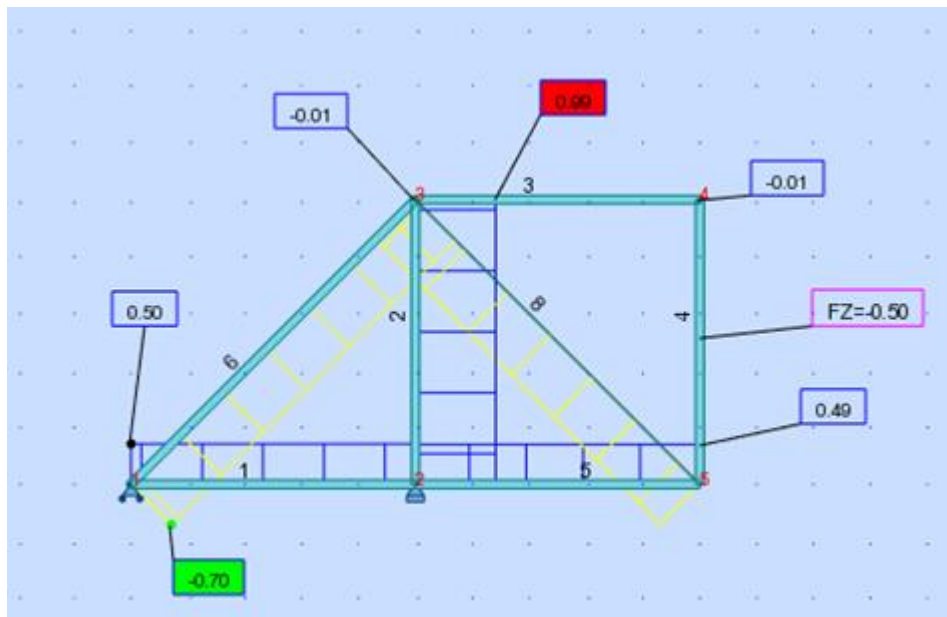


Figura 5.74: Diagrama de Axiales con tirante con 50 kg.

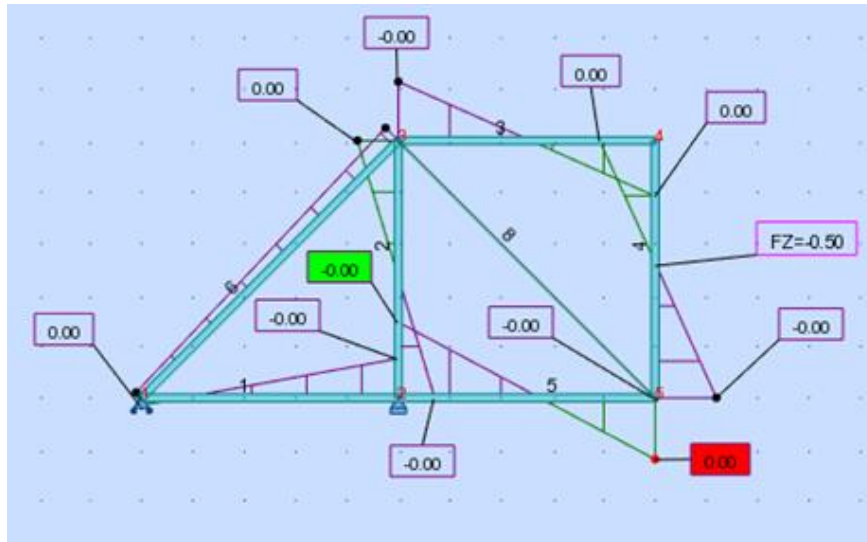


Figura 5.75: Diagrama de Momentos con 50 kg con tirante.

Una vez que se conocen los esfuerzos, a continuación ya se pueden calcular las deformaciones para cada barra como en la disposición anterior, mediante la expresión 5.13 obtenida de la Ley de Navier para los momentos flectores y la expresión 5.2 para los axiles (ver tabla 5.25):

- Punto Central Barra 4

-Esfuerzo axil: -0,99 kN
 -Momento flector: 0 kNm
 -Área: $3,24 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
 -Módulo Elástico: $6,95 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$

$$\varepsilon_{AXIL} = \frac{N}{A \times E} = \frac{-0,99 \text{ kN}}{3,24 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 6,95 \times 10^7 \text{ kN/m}^2} \times 10^6 = -43,96 \mu\varepsilon$$

- Punto a 20 cm del nudo B en Barra 2

-Esfuerzo axil: -0,49 kN
 -Momento flector: 0 kNm
 -Área: $3,24 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
 -Módulo Elástico: $6,95 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$

$$\varepsilon_{AXIL} = \frac{N}{A \times E} = \frac{-0,49 \text{ kN}}{3,24 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 6,95 \times 10^7 \text{ kN/m}^2} \times 10^6 = -21,76 \mu\varepsilon$$

Barra	2		4	
Galga	Superior	Inferior	Derecha	Izquierda
Deformación	-21,76 $\mu\varepsilon$	-21,76 $\mu\varepsilon$	-43,96 $\mu\varepsilon$	-43,96 $\mu\varepsilon$

Tabla 5.25: Cálculo teórico de deformaciones en las barras 2 y 4 con 50 kg.

- Medida experimental

Las deformaciones obtenidas en las barras 2 y 4 mediante el uso de las galgas extensométricas como se puede ver en la figura 5.76 y en la tabla 5.26 han sido:

Barra	2		4	
Galga	Superior	Inferior	Derecha	Izquierda
Deformación	93 $\mu\epsilon$	- 131 $\mu\epsilon$	-45 $\mu\epsilon$	-44 $\mu\epsilon$

Tabla 5.26: Medida de deformaciones en las barras 2 y 5 con 50 kg.

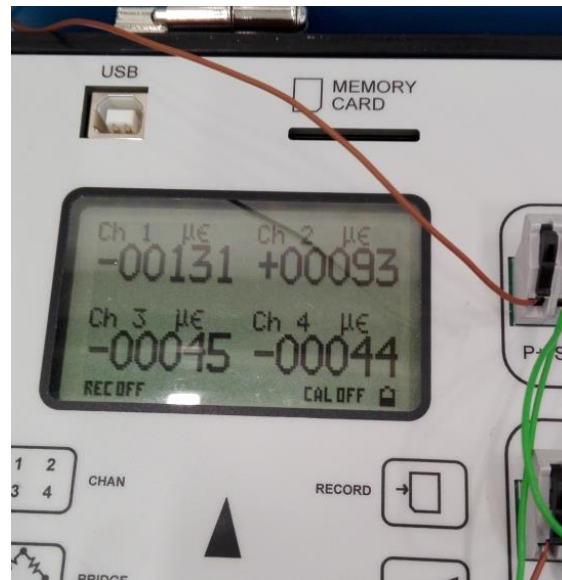


Figura 5.76: Medida de deformaciones en las barras 2 y 5 con 50 kg.

5.4.3 Contrastación de resultados y conclusiones

Como se puede ver al tratarse de desplazamientos mayores en esta estructura al igual que en la anterior la medida es mucho más precisa y es similar tanto numéricamente como experimentalmente. Por lo tanto la medida de desplazamientos ha sido exitosa de nuevo.

Además, se ha podido ver la eficacia de añadir un tirante, con el cual los desplazamientos se han reducido casi a la décima parte que sin tirante, aunque los resultados con tirante no son exactamente los esperados experimentalmente debido a que al tratarse de un cable trenzado, sus propiedades reales difieran un poco de las supuestas y es difícil caracterizarlo. Además, el extremo del tirante al tensarlo se deforma un poco por lo que esto puede hacer que el tirante no esté perfectamente tenso al inicio de la carga. Esto también puede influir en la exactitud de los resultados.

Sin embargo, las deformaciones como se puede ver, vuelven a ser del mismo orden tanto numéricamente como experimentalmente y muy próximas a las teóricas, excepto cuando se trata de barras en las que aparecen momentos flectores.

En las barras sometidas a momentos flectores las deformaciones que dependen del momento flector, experimentalmente las galgas siguen registrando deformaciones del orden de la mitad de las teóricas. Esto puede deberse a que las propias uniones tienen holguras debido a la tolerancia de fabricación, lo que hace que las uniones no se comporten como uniones rígidas sino como algo intermedio entre uniones reticuladas y articuladas y no transmitan todo el momento flector que deberían transmitir teóricamente.

Las deformaciones en las barras en las que solo dependen del axil siguen dando resultados similares.

Al tratarse de medidas tan pequeñas es muy difícil que salgan exactamente debido al margen de error de los dispositivos de medida o incluso a la colocación de las galgas, las cuales es muy difícil colocarlas a una distancia exacta, lo cual se puede ver claramente en la barra 4 donde deberían obtenerse deformaciones similares a las teóricas y sin embargo, una sale un poco mayor mientras que la otra un poco menor en el caso de sin tirante. Esto puede ser debido a que en el caso de desplazarse una distancia mínima del centro de la barra aparece un momento flector muy pequeño pero que influye traccionando una fibra y comprimiendo la otra, lo cual da lugar a que una proporcione una deformación un poco mayor a la teórica y la otra un poco inferior.

En el caso de con tirante, al triangular la estructura los momentos flectores se hacen nulos y en la barra 4 se obtienen deformaciones exactas entre las teóricas y las experimentales mientras que en la barra 2 las deformaciones debidas al axil vuelven a parecer exactas pero el momento flector difiere y es complicado entender cuál es la causa, aunque todo indica a que las uniones no se comportan como deberían ya que al ser una estructura manufacturada en la escuela tiene holguras que influyen mucho en este análisis.

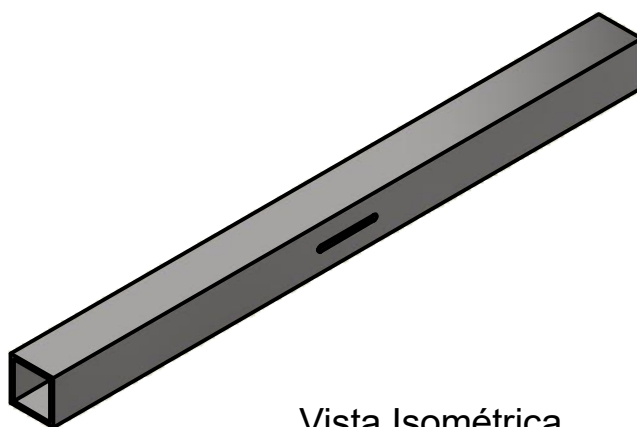
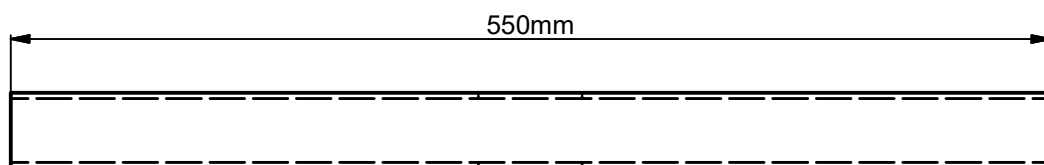
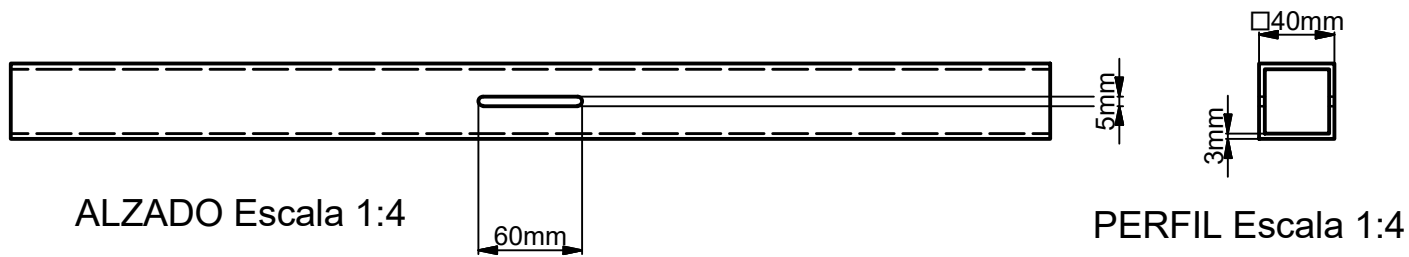
6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este Trabajo de Fin de Grado se ha llevado a cabo la contrastación numérica y experimental del comportamiento de una estructura modular de barras sometida a cargas exteriores: Las conclusiones de este Trabajo son las siguientes:

- Se han estudiado tres configuraciones diferentes cada una y en cada una se ha estudiado un tipo de estructura. La primera se trataba de una estructura isostática y triangular, la segunda una estructura reticulada y muy traslacional y finalmente la última se trataba de una estructura sencilla reticulada, donde se han comparado dos estructuras similares con la diferencia de incorporar un tirante en una de ellas.
- Se ha ingeniado un sistema de aplicación de carga adecuado para las estructuras estudiadas, que posibilita la aplicación de cualquier carga vertical en un rango de 0 a 300 kg, de forma que se obtengan resultados apreciables sin dañar la estructura.
- Se han obtenido resultados experimentales de desplazamientos de gran precisión y exactitud respecto a los resultados teóricos, partiendo de desplazamientos muy pequeños hasta desplazamientos más grandes, hasta encontrar el orden a partir del cual los resultados experimentales y teóricos se hacen similares.
- Se ha demostrado que la técnica DIC de Correlación Digital de Imágenes, a pesar de ser una técnica con un gran rango de aplicaciones, no es una técnica apropiada para este tipo de estructuras.
- Se ha ingeniado un sistema de anclaje vertical en los apoyos para disposiciones en las que se produzcan reacciones verticales que produzcan el vuelco de la estructura.
- Se ha comprobado que los cálculos realizados con el software Robot Structural Analysis coinciden exactamente con los cálculos teóricos.
- Se ha comprobado la importancia y la gran diferencia de la triangulación en este tipo de estructuras, donde la triangulación proporciona una rigidez incomparable y reduce los momentos flectores hasta hacerlos nulos.
- Se ha comparado la misma estructura con la diferencia de usar un tirante o no utilizarlo y se ha demostrado que con un tirante su rigidez aumenta mucho hasta disminuir el desplazamiento de un nudo hasta la décima parte que sin tirante.
- Se ha estudiado el comportamiento de la estructura, en el que se ha comprobado que las deformaciones de las barras debidas a esfuerzo axial sorprendentemente son muy similares a las teóricas y la estructura se comporta realmente bien para estructuras articuladas, mientras que debido a holguras en sus uniones, las deformaciones debidas a un momento flector dejan que desear, por lo que su comportamiento para estructuras reticuladas es peor.
- Finalmente, se han usado estas estructuras para prácticas docentes de laboratorio con los alumnos, los cuales han podido obtener una perspectiva visual de este estudio y así poder comprender mejor la teoría estudiada en clase.

PLANOS

Todos los planos de los elementos utilizados como barras y placas de unión se encuentran recogidos en el Trabajo de Fin de Grado de Diego García Torres [2], por lo que en este Trabajo solo se incorporarán planos de elementos nuevos que se han añadido a los que ya había antes. Estos planos deben imprimirse en A4.



	FECHA	NOMBRE	FIRMAS	 ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR LINARES UNIVERSIDAD DE JAÉN
DIBUJADO	21/04/2017			
COMPROBADO		Soporte		
C. CALIDAD				
ESCALA 1:4	DESIGNACIÓN Soporte			Nº DE PLANO 1 / 1
				SUSTITUYE A
				SUSTITUIDO POR

ANEXO: Datos técnicos de equipos utilizados.

SE 100

Bastidor para ensayos de esfuerzo, 400kN



La ilustración muestra el bastidor SE 100 con diferentes accesorios

Descripción

- ensayos de esfuerzo en estructuras de acero e ingeniería civil
- especial para construcciones grandes a escala 1:1
- gran variedad de opciones de uso gracias a la multitud de accesorios de que dispone

Las exigencias técnicas que se aplican hoy en día a las construcciones actuales requieren de un conocimiento profundo acerca de la resistencia y la deformación de los componentes. Los ensayos de carga permiten simular diferentes estados de carga y registrar y evaluar la influencia sobre el esfuerzo. De esta manera, se puede demostrar la capacidad de carga de la construcción a nivel experimental. El bastidor para ensayos de carga SE 100 se ha diseñado específicamente para realizar ensayos en los ámbitos de las estructuras de acero y la ingeniería civil. Está concebido especialmente para elementos constructivos grandes a escala 1:1.

El bastidor se entrega desmontado en grupos prefabricados y se monta in situ. Esto permite transportar las diferentes piezas a través del ancho habitual de puerta habitual. El bastidor se sostiene sobre cuatro pies ajustables con aislamiento de vibraciones. Su amplia área de trabajo está ejecutada como bastidor

doble, de forma que también se pueden analizar componentes de gran longitud. El diseño del bastidor permite montar los ensayos de forma rápida y simple. En combinación con los accesorios y el dispositivo de carga, las posibilidades de uso son infinitas. El dispositivo de carga de accionamiento hidráulico, disponible en el accesorio SE100.12, incluye un cilindro hidráulico de doble efecto y una bomba de accionamiento que se monta sobre una mesa.

El dispositivo de carga dispone de unos rodillos que permiten colocarlo en cualquier parte de la travesa superior del bastidor. Dependiendo del montaje experimental, también se pueden emplear dos dispositivos de carga (SE 100.02) de manera que se pueden generar fuerzas mayores. La flexión se indica a través de relojes de comparación, disponibles en el accesorio SE100.03.

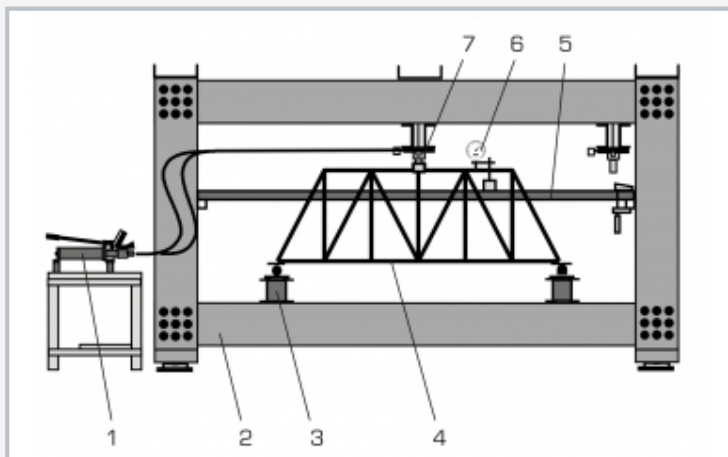
En los ensayos se pueden aplicar cargas sobre componentes de gran tamaño, como vigas de hormigón armado, vigas o bastidores de acero, y analizarlos a nivel experimental. El accesorio SE 100.04 sirve para realizar ensayos sobre celosías. Las fuerzas sobre determinadas barras características de la celosía se registran por medio de galgas extensométricas.

Contenido didáctico/ ensayos

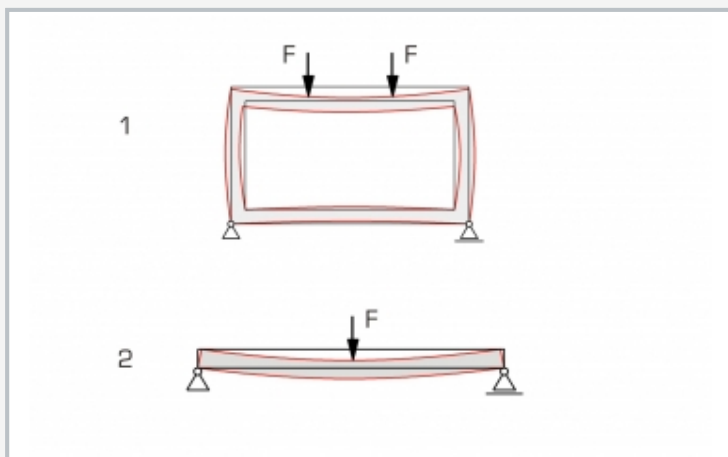
- en combinación con los accesorios
 - ensayos de flexión
 - ensayos de carga
 - ensayos de compresión

SE 100

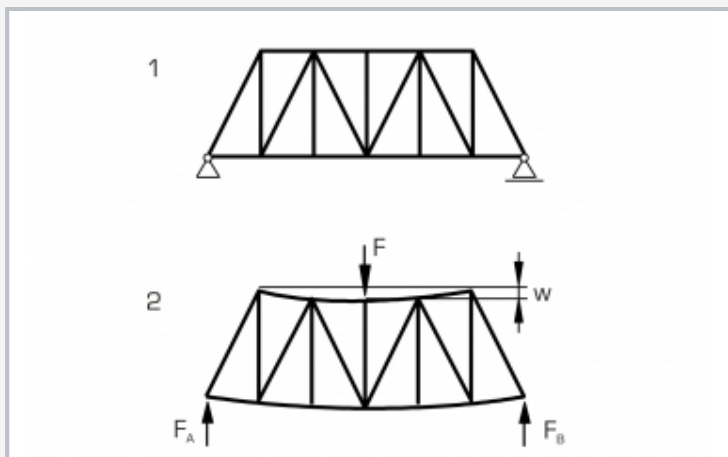
Bastidor para ensayos de esfuerzo, 400kN



1 bomba para el dispositivo de carga, 2 bastidor, 3 soporte SE 100.01, 4 celosía plana SE 100.04, 5 travesaño de medición, 6 reloj de comparación SE 100.03, 7 dispositivo de carga SE 100.02



Sugerencias para la realización de ensayos propios con componentes de diferente tamaño, por ejemplo, 1 aplicación de una carga sobre un bastidor, 2 aplicación de una carga sobre vigas



Ensayo de flexión sobre una celosía plana SE 100.04; 1 celosía sin carga, 2 celosía con carga, F fuerza de ensayo, F_A y F_B fuerzas de los apoyos, w flexión

Especificación

- [1] análisis de componentes a escala 1:1 relacionados con las estructuras de acero o la ingeniería civil
- [2] el bastidor se entrega desmontado en grupos constructivos, de forma que el equipo se puede transportar a través del ancho habitual de una puerta
- [3] amplia área de trabajo, a modo de bastidor doble, apta para el análisis de componentes de gran longitud
- [4] colocación sobre 4 pies ajustables con aislamiento de vibraciones
- [5] dispositivo de carga de accionamiento hidráulico para generar las fuerzas de compresión disponible a modo de accesorio
- [6] dispositivo de carga opcional con rodillos; el equipo SE 100.12 incluye 1 dispositivo de carga, el equipo SE 100.02 incluye 2 dispositivos de carga
- [7] los dispositivos de carga se pueden colocar en cualquier punto del bastidor
- [8] se pueden realizar ensayos con diferentes componentes, como vigas o bastidores
- [9] celosía plana con galgas extensométricas para la medición de fuerzas disponible a modo de accesorio en el equipo SE 100.04

Datos técnicos

Bastidor

- perfiles de acero: U 400, St52
- agujero del bastidor AnxAI: 4100x1700mm
- distancia útil en el bastidor doble: 635mm

Fuerzas de ensayo

- posición central: máx. 300kN
- no central: máx. 2x 200kN

LxAxAI: 5000x1350x2820mm

Peso: aprox. 2600kg

Volumen de suministro

- 1 bastidor de perfiles de acero

SE 100

Bastidor para ensayos de esfuerzo, 400kN

Accesorios opcionales

022.10001	SE 100.01	Accesorios estándar para ensayos de esfuerzo
022.10002	SE 100.02	Dispositivo de carga hidráulico, 2x200kN
022.10012	SE 100.12	Dispositivo de carga hidráulico, 1x200kN
022.10003	SE 100.03	Relojes de comparación
022.10004	SE 100.04	Celosía plana con galga extensométrica para medida de esfuerzos en barras

Tutoy Wh-C300 Mini 300 Kg 100 G Gancho Resistente Colgando Báscula Electrónica Digital Escala Peso Grúa



- Gran capacidad de peso: 300 kg.
- Puede pesar en 3 escalas de peso común: kg, lb y jin.
- Retroiluminación blanca con LCD: ideal para utilizar incluso en la oscuridad.
- Amplia gama de aplicaciones: adecuado para industria, agricultura, uso doméstico, maletas, paquetes, pesca y otros objetos pesados.
- Duradera: carcasa resistente de plástico de ingeniería ABS con alta resistencia, gancho de acero inoxidable y broche.

Información de producto

Detalles técnicos

Identificador de producto del fabricante	WH-C300
Peso del producto	440 g
Dimensiones del paquete	18,6 x 16 x 4,8 cm
Pilas:	2 AAA (Tipo de pila necesaria)
Referencia del fabricante	WH-C300
Número de productos	1
Incluye baterías	No
Necesita baterías	No
Tipo de batería	Alcalina

Descripción del producto

Características:

Receptor de carga de acero inoxidable
Auto cero reajuste/apagado
Contraluz del LED, conveniente ver en oscuridad.
Circuito integrado de calidad y celdas de carga duraderas
Portable, versátil, exacto, confiable, y muy fácil funcionar

Especificación:

Marca de fábrica: WeiHeng
Modelo: WH-C300
Material: ABS
Color: negro
Capacidad: 300 kg/0.1 kilogramo
Fuente de alimentación: 2 baterías del AAA de x (no incluidas)
Tamaño de la escala (L x W x T): aprox. 15 x 6,5 x 3.2 cm/5,9 "x 2,6" x 1.3 "(la longitud no incluye la percha)
Tamaño de la pantalla del LCD: 3,6 x 2.3 cm/1.4 "x 0.9" (aproximado)

El paquete incluye:

1 x C300 mini 300 kg 100 g gancho resistente colgante escala digital

Strain Indicator and Recorder

FEATURES

- Four input channels
- Direct reading LCD display
- On-board data storage
- 0 to 2.5 VDC analog output
- Quarter-, half-, and full-bridge circuits
- Built-in bridge completion
- 120-, 350-, and 1000-ohm dummy gages
- Automatic zero-balancing and calibration
- Intuitive, menu-driven operations
- USB data link
- Operation from keypad or PC
- Portable, lightweight, and rugged
- Battery, USB, or line-voltage power
- Optional 10-pin transducer connectors



DESCRIPTION

The Model P3 Strain Indicator and Recorder is a portable, battery-operated instrument capable of simultaneously accepting four inputs from quarter-, half-, and full-bridge strain-gage circuits, including strain-gage-based transducers. Water-resistant grommets in the hinged cover allow the lid to be closed with leadwires attached. Designed for use in a wide variety of physical test and measurement applications, the P3 functions as bridge amplifier, static strain indicator, and digital data logger.

The Model P3 Strain Indicator and Recorder, utilizing a large LCD display for readout of setup information and acquired data, incorporates many unique operating features that make it the most advanced instrument of its kind. An extensive, easy-to-use menu-driven user interface operates through a front-panel keypad to readily configure the P3 to meet your particular measurement requirements. Selections include active input and output channels, bridge configuration, measurement units, bridge balance, calibration method, and recording options, among others.

Standard sensor input connection is via eccentric-lever-release terminal blocks. Optional transducer connection is available via side-mounted bayonet locking circular connectors.

Data, recorded at a user-selectable rate of up to 1 reading per channel per second, is stored on a removable flash card and is transferred by USB to a host computer for subsequent storage, reduction and presentation with the supplied software.

The P3 can also be configured and operated directly from your PC with a separate software application included with each instrument. Additionally, a full set of ActiveX components is provided for creating custom applications in any language supporting ActiveX.

A highly stable measurement circuit, regulated bridge excitation supply, and precisely settable gage factor enable measurements of $\pm 0.1\%$ accuracy and 1 microstrain resolution. Bridge completion resistors of 120, 350 and 1000 ohms are built in for quarter-bridge operation. Also, input connections and switches are provided for remote shunt calibration of transducers and full-bridge circuits.

The P3 operates from two readily available D cells. Battery life depends upon mode of operation but ranges up to 600 hours of continuous use for a single channel. It can also be powered by connection to an external battery or power supply, a USB port on a PC or with an optional external line-voltage adapter, the Model P3-A105.

Strain Indicator and Recorder

HARDWARE SPECIFICATIONS

All specifications nominal or typical at +23°C unless noted.

Inputs

Eccentric-lever-release terminal blocks accept up to four independent bridge inputs. Accommodates 16-28 AWG (1.3 to 0.35 mm diameter) wire.

The Transducer Option includes four 10-pin bayonet locking circular connectors mounted on the side of the case and wired in parallel to the lever-release terminal blocks. The supplied mating connector has a 0.046 inch (1.17 mm) diameter solder well.

Bridge Configurations

Quarter-, half-, and full-bridge circuits. Internal bridge completion provided for 120Ω, 350Ω and 1000Ω quarter bridges, 60 to 2000Ω half or full bridge.

Display

Full dot-matrix structure with 128 dots x 64 dots FSTN positive, gray transfective LCD with backlight. Display update is twice a second.

Data Conversion

High-resolution sigma-delta converter. 60 Hz or 50 Hz noise rejection. User selectable.

Basic Range

±31,000 microstrain (±1 microstrain resolution) at Gage Factor = 2.000

Accuracy

±0.1% of reading ±3 counts. (Normal mode operation at Gage Factor = 2.000)

Gage Factor Settings

Range 0.500 to 9.900

Balance

Single key operation to initiate automatic software balance

Bridge Excitation

1.5 VDC nominal. Readings are fully ratiometric, and not degraded by variation in excitation voltage

Communication Interface

Universal Serial Bus with type B connector. Used for transferring stored data and firmware.

Data Storage

Media: Removable Secure Digital or Multimedia Card (2GB max).

Data Recording Rate: 1 reading per second maximum.

Calibration

Shunt calibration across each dummy resistor to simulate 5000 microstrain (±0.1%). Remote calibration supported via accessible switch contacts at input terminal block.

Analog Output

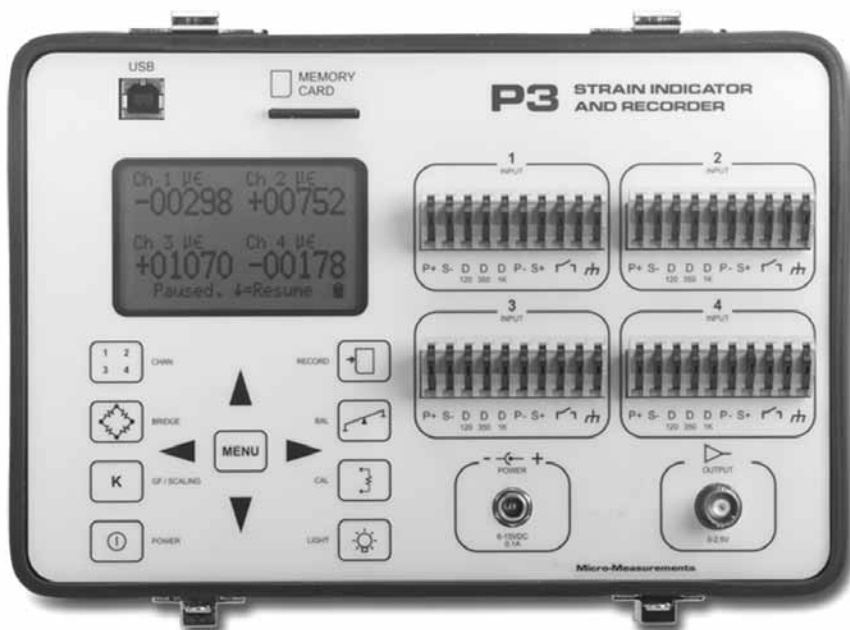
BNC connector. 0 to 2.5V maximum output. Device impedance of 2000Ω or greater. 480 samples/second DAC output update rate.

Power

Internal battery pack using two "D" cells. Battery life up to 600 hours (single channel, normal mode.) Can also be powered from USB or by external battery or other power source of 6 to 15 VDC. AC adapter optional (Model P3-A105).

Operational Environment

Temperature 0 to + 50°C. Humidity up to 90% RH, noncondensing



Strain Indicator and Recorder

FIRMWARE FEATURES**Display Update Rate**

2 readings per second

Recording Rates

Up to 64 data files

Automatic recording

1 reading every 1 to 3600 seconds

Individually selectable per channel

Manual recording

Automatic date/time stamping

Scaling

Automatic scaling for microstrain, based upon gage factor, with nonlinearity correction based upon bridge type

Automatic calculation of mV/V

Linear scaling for other engineering units

Units

$\mu\epsilon$	g	rpm	hp
mV/V	lbf	m	deg
psi	lb	s	rad
ksi	kg	A	oz
GPa	in	N	mV
MPa	mm	V	m/s ²
Pa	mil	Ohms	ton

Bridge Types

Quarter bridge

Half bridge, adjacent arms, equal and opposite strains

Half bridge opposite arms equal strains

Shear bridge, 2 active arms

Poisson half bridge

Full bridge 4 fully active arms

Shear bridge, 4 active arms

Full bridge, Poisson gages in opposite arms

Full bridge, Poisson gages in adjacent arms

Undefined full bridge

Undefined half bridge/quarter bridge

Bridge Balance

Automatic

Manual offset adjust

Disabled (Raw offset)

Backlight Control

Programmable on time while in run mode

5, 15 or 60 seconds

Manual off/on

If illuminated, backlight will remain illuminated while operating menus

Software Adjustable Contrast**Operating Modes**

Normal mode

Analog output (any one of four channels)

Data Link

USB interface

Windows-based P3 software provided for control and data storage

No device driver required (treated as an HID device)

Real-time Clock**System Calibration/Verification**

Requires Model 1550A Strain Indicator calibrator or other compatible calibrator

Calibration date stored in flash memory

Firmware UpgradeableView Showing
Optional Transducer
Input Connectors

Disclaimer

ALL PRODUCTS, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE.

Vishay Precision Group, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "VPG"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained herein or in any other disclosure relating to any product.

The product specifications do not expand or otherwise modify VPG's terms and conditions of purchase, including but not limited to, the warranty expressed therein.

VPG makes no warranty, representation or guarantee other than as set forth in the terms and conditions of purchase.

To the maximum extent permitted by applicable law, VPG disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Information provided in datasheets and/or specifications may vary from actual results in different applications and performance may vary over time. Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on VPG's knowledge of typical requirements that are often placed on VPG products. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. You should ensure you have the current version of the relevant information by contacting VPG prior to performing installation or use of the product, such as on our website at vpgsensors.com.

No license, express, implied, or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document, or by any conduct of VPG.

The products shown herein are not designed for use in life-saving or life-sustaining applications unless otherwise expressly indicated. Customers using or selling VPG products not expressly indicated for use in such applications do so entirely at their own risk and agree to fully indemnify VPG for any damages arising or resulting from such use or sale. Please contact authorized VPG personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.

Copyright Vishay Precision Group, Inc., 2014. All rights reserved.

FLIR GRASSHOPPER[®]3 USB3 VISION



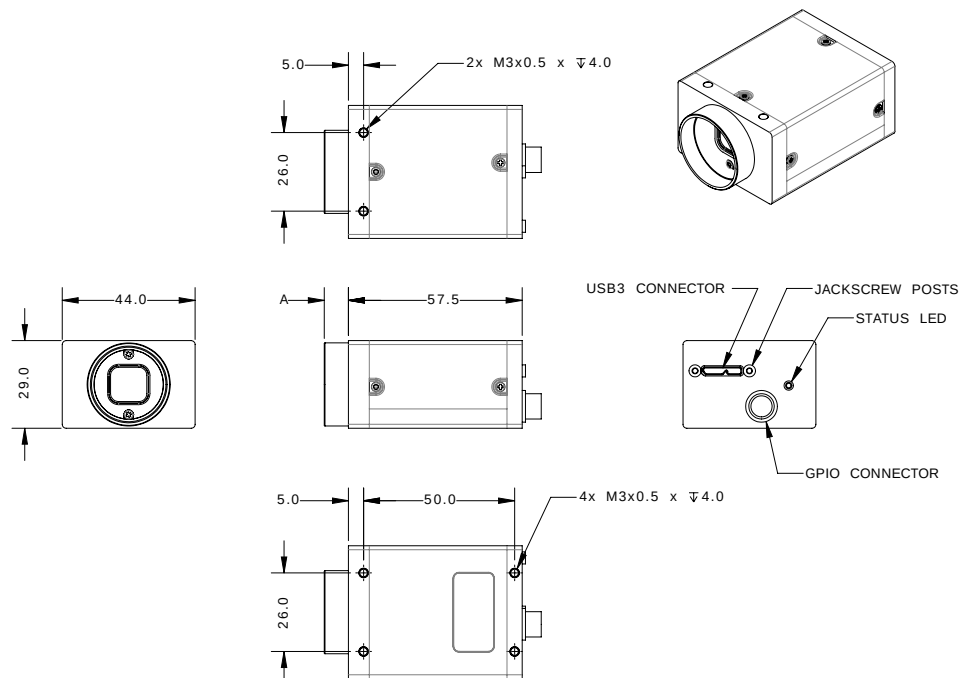
HIGH PERFORMANCE CCD + CMOS

The high performance Grasshopper3 camera line combines the benefits of CCD with the affordability and data throughput of USB 3.0. Its FPGA and frame buffer-based architecture provides optimal reliability, a rich set of features, and a full image processing pipeline including color interpolation, gamma, and lookup table functionality. The Grasshopper3 offers a powerful, easy-to-use, and cost-effective alternative to Camera Link and dual GigE LAG solutions.

KEY FEATURES

- USB 3.0 for bandwidth, ease of use, and cost effectiveness
- Variety of high-resolution large format CCD and CMOS sensors
- FPGA and frame buffer-based architecture for optimal reliability

USB[™]
VISION



Specifications

Model	Version	MP	Imaging Sensor
GS3-U3-14S5C-C GS3-U3-14S5M-C	Color Mono	1.4 MP	• Sony ICX285, 2/3", 6.45 µm • Global shutter • 30 FPS at 1384 x 1036
GS3-U3-15S5C-C GS3-U3-15S5M-C	Color Mono	1.4 MP	• Sony ICX825, 2/3", 6.45 µm • Global shutter • 45 FPS at 1384 x 1032
GS3-U3-23S6C-C GS3-U3-23S6M-C	Color Mono	2.3 MP	• Sony IMX174, 1/1.2", 5.86 µm • Global shutter • 163 FPS at 1920 x 1200
GS3-U3-28S4C-C GS3-U3-28S4M-C	Color Mono	2.8 MP	• Sony ICX687, 1/1.8", 3.69 µm • Global shutter • 26 FPS at 1928 x 1448
GS3-U3-28S5C-C GS3-U3-28S5M-C	Color Mono	2.8 MP	• Sony ICX674, 2/3", 4.54 µm • Global shutter • 26 FPS at 1920 x 1440
GS3-U3-32S4C-C GS3-U3-32S4M-C	Color Mono	3.2 MP	• Sony IMX252, 1/1.8", 3.45 µm • Global shutter • 121 FPS at 2048 x 1536
GS3-U3-41C6C-C GS3-U3-41C6M-C	Color Mono	4.1 MP	• CMOSISCMV4000-3E5, 1", 5.5 µm • Global shutter • 90 FPS at 2048 x 2048
GS3-U3-41C6NIR	Mono NIR	4.1 MP	• CMOSISCMV4000-3E12, 1", 5.5 µm • Global shutter • 90 FPS at 2048 x 2048
GS3-U3-41S4C-C GS3-U3-41S4M-C	Color Mono	4.1 MP	• Sony ICX808, 1/1.8", 3.1 µm • Global shutter • 18 FPS at 2016 x 2016
GS3-U3-50S5C-C GS3-U3-50S5M-C	Color Mono	5.0 MP	• Sony ICX625, 2/3", 3.45 µm • Global shutter • 15 FPS at 2448 x 2048
GS3-U3-51S5C-C GS3-U3-51S5M-C	Color Mono	5.0 MP	• Sony IMX250, 2/3", 3.45 µm • Global shutter • 75 FPS at 2448 x 2048
GS3-U3-60S6C-C GS3-U3-60S6M-C	Color Mono	6.0 MP	• Sony ICX694, 1", 4.54 µm • Global shutter • 13 FPS at 2736 x 2192
GS3-U3-60QS6C-C GS3-U3-60QS6M-C	Color Mono	6.0 MP	• Sony ICX694, 1", 4.54 µm • Global shutter • 25 FPS at 2736 x 2192
GS3-U3-89S6C-C GS3-U3-89S6M-C	Color Mono	8.9 MP	• Sony IMX255, 1", 3.45 µm • Global shutter • 43 FPS at 4096 x 2160
GS3-U3-91S6C-C GS3-U3-91S6M-C	Color Mono	9.1 MP	• Sony ICX814, 1", 3.69 µm • Global shutter • 9 FPS at 3376 x 2704
GS3-U3-120S6C-C GS3-U3-120S6M-C	Color Mono	12 MP	• Sony ICX834, 1", 3.1 µm • Global shutter • 7 FPS at 4240 x 2824
GS3-U3-123S6C-C GS3-U3-123S6M-C	Color Mono	12.3 MP	• Sony IMX253, 1.1", 3.45 µm • Global shutter • 30 FPS at 4096 x 3000

Imaging Performance (EMVA 1288)	See the Imaging Performance Specification, which includes quantum efficiency, saturation capacity (full well depth), read noise, dynamic range and signal to noise ratio.
A/D Converter	14-bit (10-bit GS3-U3-41C6, 10- and 12-bit GS3-U3-23S6, GS3-U3-32S4, GS3-U3-51S5, GS3-U3-89S6, GS3-U3-123S6)
Video Data Output	8, 12, 16 and 24-bit digital data
Image Data Formats	Mono8, Mono12, Mono16 (all models) RGB, YUV411, YUV422, YUV444, Raw8, Raw12, Raw16 (color models)
Partial Image Modes	Pixel binning and region of interest (ROI) modes
Image Processing	Gamma, lookup table, hue, saturation, and sharpness
Shutter	Global shutter; Automatic/manual/one- push/extended shutter modes Up to 32 seconds (GS3-U3-28S5, GS3-U3-41S4, GS3-U3-60S5, GS3-U3-60S6, GS3-U3-89S6, GS3-U3-91S6, GS3-U3-123S6); up to 30 seconds (GS3-U3-28S4); up to 4 seconds (GS3-U3-14S5, GS3-U3-15S5, GS3-U3-32S4, GS3-U3-41C6, GS3-U3-51S5, GS3-U3-120S6); up to 3.2 seconds (GS3-U3-23S6)
Gain	Automatic/manual/one- push modes -3.66 dB to 24 dB GS3-U3-14S5; -1.583 dB to 24 dB GS3-U3-15S5; 0 dB to 24 dB GS3-U3-23S6/GS3-U3-28S4/GS3-U3-28S5; 0 dB to 47.9 dB GS3-U3-32S4; 0 to 10.1 dB GS3-U3-41C6; -7.742 dB to 24 dB GS3-U3-41S4; -6.51 dB to 24 dB GS3-U3-50S5; 0 dB to 48 dB GS3-U3-51S5, GS3-U3-89S6, GS3-U3-123S6; -6.158 to 24 dB GS3-U3-60S6; -9 to 24 dB GS3-U3-91S6; -5.455 dB to 24 dB GS3-U3-120S6
Gamma	0.50 to 4.00, programmable lookup table
White Balance	Automatic/manual/one- push modes
High Dynamic Range	Cycle 4 gain and exposure presets
Color Processing	On-camera in YUV or RGB format, or on-PC in Raw format
Digital Interface	USB 3.0 interface with screw locks for camera control, data, and power
Transfer Rates	5 Gbit/s
GPIO	8-pin Hirose HR25 GPIO connector for power, trigger, strobe, PWM, and serial I/O, 1 opto-isolated input, 1 opto-isolated output, 2 bi-directional I/O pins
External Trigger Modes	Standard, bulb, low smear (CCDonly), overlapped, and multi shot trigger modes
Image Buffer	128 MB frame buffer
Memory Channels	2 user configuration sets for custom camera settings
Flash Memory	2 MB non-volatile memory
Dimensions	44 mm x 29 mm x 58 mm excluding lens holder, without optics (metal case)
Mass	90 grams (without optics or tripod mounting bracket)
Power Consumption	5 V via USB 3.0 or 8-24 V via GPIO (external power is recommended)
Camera Control	Via FlyCapture SDK or third party software
Camera Updates	In-field firmware updates
Lens Mount	C-mount
Temperature	Operating: 0° to 50°C; Storage: -30° to 60°C
Humidity	Operating: 20 to 80% (no condensation); Storage: 20 to 95% (no condensation)
Compliance	CE, FCC, RoHS
Operating System	Windows, Linux (32- or 64-bit)
Warranty	3 years

FLIR Integrated Imaging Solutions

CANADA

12051 Riverside Way
Richmond, BC, Canada
V6W 1K7
T: +1 866.765.0827 (toll free)
T: +1 604.242.9937
F: +1 604.242.9938
E: mv-sales@flir.com
www.flir.com/iis

USA

T: +1 866.765.0827 (toll free)
E: mv-na-sales@ptgrey.com

EUROPE

T: +49 7141 488817-0
F: +49 7141 488817-99
E: mv-eusales@flir.com

CHINA

T: +86 10 8215 9938
F: +86 10 8215 9936
E: mv-chinasales@flir.com

ASIA

E: mv-asiasales@ptgrey.com

For a full list of international distributors and offices visit www.flir.com/contact-us

©2017 FLIR® Integrated Imaging Solutions Inc. All rights reserved.

Names and marks appearing on the products herein are either registered trademarks or trademarks of FLIR® Systems, Inc. and/or its subsidiaries.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]Manual de instrucciones de montaje y experimentos del bastidor de ensayos universal de 400kN GUNT SE-100.
- [2]Trabajo de Fin de Grado de Diego García Torres.
- [3]Benvenuto, E. “An introduction to the History of Structural Mechanics”, Springer Verlag, 1991.
- [4]<http://zorainfo.rs/2692-2/> [Consulta 05/06/2018]
- [5]<http://www.skyscrapercenter.com/building/seagram-building/3529> [Consulta 07/06/2018]
- [6]https://es.wikipedia.org/wiki/Puente_de_Trajano [Consulta 08/08/2018]
- [7]<http://www.canalpatrimonio.com/lo-el-fuego-se-llevo-la-olvidada-labor-de-los-carpinteros/> [Consulta 08/09/2018]
- [8]http://www.prontubeam.com/articulos/articulos.php?Id_articulo=21 [Consulta 08/07/2018]
- [9]<https://www.amazon.es/Kingzer-escala-Digital-electr%C3%B3nico-Hanging/dp/B00FO4Y6DO> [Consulta 02/06/2018]
- [10]https://es.wikipedia.org/wiki/Reloj_comparador [Consulta 04/07/2018]
- [11]https://es.wikipedia.org/wiki/Galga_extensi%C3%B3n [Consulta 06/07/2018]
- [12]<https://www.hbm.com/es/0014/galgas-extensometricas/> [Consulta 06/06/2018]
- [13]https://www.researchgate.net/figure/Diagrama-del-Puente-de-Wheatstone-de-resistencias_fig4_268338930 [Consulta 10/08/2018]
- [14]<http://www.vishaypg.com/docs/11102/p3.pdf> [Consulta 10/07/2018]
- [15] Lu, H. Applications of digital speckle correlation to microscopic strain measurement and materials' property characterization.
- [16]<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/rt/printerFriendly/34591/45319> [Consulta 10/09/2018]
- [17]A. Rosenfeld. From image analysis to computer vision. An annotated bibliography, 1955-1979. Computer Vision and Image Understanding, 84:298-324,2001.
- [18]<http://www.ncorr.com/> [Consulta 02/06/2018]
- [19]<https://www.ptgrey.com/flycapture-sdk> [Consulta 19/06/2018]
- [20]<https://www.ptgrey.com/grasshopper3-50-mp-mono-usb3-vision-sony-icx625-camera> [Consulta 02/07/2018]