



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de  
Caminos, Canales y Puertos

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



# MONITORIZACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE UN COMPONENTE MEDIANTE GEMELOS DIGITALES

Trabajo realizado por:

**Daniel Pareja Pérez**

Dirigido:

**Roberto Lacalle Calderón**

Titulación:

Máster Universitario en Integridad y  
Durabilidad de Materiales, Componentes y  
Estructuras

Santander, octubre de 2020

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**



# **Monitorización de la Integridad Estructural de un Componente mediante Gemelos Digitales**

Autor: Daniel Pareja Pérez

Director: Roberto Lacalle Calderón

Convocatorio: octubre de 2020

**Palabras clave:** gemelo digital, monitorización, modelo estructural, tensión, deformación, galga extensiométrica, problema inverso, integridad estructural, fatiga.

**Resumen:** los Gemelos Digitales es una tecnología que consiste en la representación virtual de componentes o procesos reales para analizar su comportamiento y mejorar su eficacia. El objetivo de un Gemelo Digital es replicar los fenómenos físicos que se dan en su “gemelo real” mediante el uso de sensores. Por ello, el Gemelo Digital da una ventaja muy importante frente a sistemas convencionales por aportar información de la respuesta a tiempo real.

La aparición de tecnologías como el “Big Data” o “La Nube” han facilitado la viabilidad empresarial e industrial de los Gemelos Digitales convirtiéndose en un campo de innovación para multitud de empresas y una herramienta estratégica para la prevención de fallos, optimización de procesos y planificación de la producción entre otros aspectos.

La aplicación de Gemelos Digitales para la monitorización de la Integridad Estructural de componentes fundamentalmente pretende evitar fallos catastróficos, mejorar el conocimiento del comportamiento de las estructuras y aumentar la durabilidad de los componentes.

# Monitoring Structural Integrity of Component using Digital Twin

Author: Daniel Pareja Pérez

Director: Roberto Lacalle Calderón

Call: october de 2020

**Keywords:** digital twin, monitoring, structural model, stress, deformation, strain gauge, inverse problem, structural integrity, fatigue.

**Abstract:** Digital Twins is a technology consists of the virtual representation of real components or processes to analyze their behavior and improve their efficiency. The aim of Digital Twin is to replicate the physical phenomena which occur in its "real twin" through the use of sensors. For this reason, the Digital Twin gives a very important advantage over conventional systems by providing information on the response in real time.

The beginning of technologies such as "Big Data" or "The Cloud" have facilitated the business and industrial viability of the Digital Twins, becoming a field of innovation for many companies and strategic tool for the prevention of failures, process optimization and production planning among other aspects.

The application of Digital Twins for the monitoring of the Structural Integrity of components fundamentally aims to avoid catastrophic failures, improve the knowledge of the behavior of the structures and increase the durability of the components.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS .....	7
ÍNDICE DE TABLAS .....	9
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	10
1.1 INTRODUCCIÓN.....	10
1.2 OBJETIVOS.....	11
CAPÍTULO 2. DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL COMPONENTE.....	12
2.1 GEOMETRÍA Y MATERIALES .....	12
2.2 ESTADO TENSIONAL .....	14
2.2.1 <i>Calculo teórico</i> .....	14
2.2.2 <i>Malla</i> .....	15
2.2.3 <i>Condiciones de contorno</i> .....	16
2.2.4 <i>Resultados</i> .....	16
2.3 CÁLCULO DE FATIGA .....	18
2.4 FABRICACIÓN DEL COMPONENTE .....	24
CAPÍTULO 3. CREACIÓN DEL GEMELO DIGITAL .....	29
3.1 INTRODUCCIÓN.....	29
3.2 GALGA EXTENSIOMÉTRICA .....	31
3.3 UBICACIÓN DE LOS SENSORES.....	31
3.4 INSTALACIÓN DE LOS SENSORES .....	32
CAPÍTULO 4. FUNCIONAMIENTO DEL GEMELO DIGITAL.....	37
4.1 ENSAYOS DE VERIFICACIÓN .....	39
4.2 VERIFICACIÓN DEL GEMELO DIGITAL SIMULADO .....	39
4.2.1 <i>Ensayo 1</i> .....	39
4.2.2 <i>Ensayo 2</i> .....	41
4.2.3 <i>Ensayo 3</i> .....	42
4.2.4 <i>Ensayo 4</i> .....	43
4.3 VERIFICACIÓN DEL GEMELO DIGITAL REAL .....	44
4.3.1 <i>Ensayo 1</i> .....	44
4.3.2 <i>Ensayo 2</i> .....	45
4.3.3 <i>Ensayo 3</i> .....	47
4.3.4 <i>Ensayo 4</i> .....	48
4.4 COMENTARIO DE LOS RESULTADOS.....	50
4.4.1 <i>Consideraciones respecto a los sensores</i> .....	50
4.4.2 <i>Análisis de errores</i> .....	51
CAPÍTULO 5. TRABAJOS FUTUROS.....	52
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES .....	53

---

CAPÍTULO 7. REFERENCIAS .....	55
ANEXO A. PLANO DE LA ESTRUCTURA .....	56
ANEXO B. PLANO DE UBICACIÓN DE LAS GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS.....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Ejemplo de morfología de una grúa pórtico. ....	12
Figura 2-2. Modelo 3D de la estructura del trabajo. ....	13
Figura 2-3. Esquema de cálculo de tensión en la estructura para 100kg en el centro de la viga de carga (50 kg por simetría). ....	14
Figura 2-4. Mallado del componente en ANSYS. ....	15
Figura 2-5. Condiciones de contorno en ANSYS para carga de 100kg en el centro. ....	16
Figura 2-6. Resultado de tensiones (en MPa) en ANSYS para una carga centrada de 100kg. ....	17
Figura 2-7. Resultado de deformaciones (en mm) en ANSYS para una carga centrada de 100kg. ....	17
Figura 2-8. Resultado de deformaciones en dirección Y (en mm/mm) en ANSYS para una carga centrada de 100kg. ....	18
Figura 2-9. Soldadura analizada a fatiga y detalle de la malla en ANSYS. ....	19
Figura 2-10. Localización de las SCLs A, B y C de la soldadura. ....	19
Figura 2-11. Croquis de las zonas de carga para análisis de fatiga. ....	20
Figura 2-12. Tensiones totales en la SCL A para la carga 1. ....	20
Figura 2-13. Tensiones totales en la SCL B para la carga 1. ....	21
Figura 2-14. Tensiones totales en la SCL C para la carga 1. ....	21
Figura 2-15. Curva S-N de acero al carbono según ASME III. ....	23
Figura 2-16. Perfiles comerciales comprados y piezas cortadas a las medidas requeridas. ....	24
Figura 2-17. Equipo de soldadura MIG utilizado para el proceso de soldeo de la estructura. ....	25
Figura 2-18. Fotografías tomadas durante el proceso de soldeo de la estructura. ....	26
Figura 2-19. Fotografías de algunas de las soldaduras de la estructura. ....	27
Figura 2-20. Fotografía de la estructura soldada. ....	28
Figura 3-1. Ejemplo de reconstrucción de campos a partir de snapshots. ....	30
Figura 3-2. Morfología típica de una galga extensiométrica. ....	31
Figura 3-3. Elementos utilizados para la instalación de sensores. ....	32
Figura 3-4. Lijado de superficie de ubicación de la galga. ....	32
Figura 3-5. Posicionamiento de la galga previo al pegado. ....	33
Figura 3-6. Colocación del adhesivo en la galga. ....	34
Figura 3-7. Aprisionamiento con el dedo durante el secado del adhesivo. ....	34

Figura 3-8. Galga extensiométrica instalada en la estructura. ....	35
Figura 3-9. Diagrama de cableado de galgas en tarjeta del adquisidor de datos. ....	36
Figura 3-10. Sistema adquisidor de datos de los sensores. ....	36
Figura 4-1. Montaje de verificación de medida de galgas extensiométricas. ....	37
Figura 4-2. Verificación de medida de galgas extensiométricas frente a resultados de ANSYS. ....	38
Figura 4-3. Diferencia de medida entre dos galgas próximas. ....	38
Figura 4-4. Resultado de tensiones de ANSYS en ensayo 1. ....	40
Figura 4-5. Resultado de tensiones de Gemelo Digital en ensayo 1. ....	40
Figura 4-6. Resultado de tensiones de ANSYS en ensayo 2. ....	41
Figura 4-7. Resultado de tensiones de Gemelo Digital en ensayo 2. ....	41
Figura 4-8. Resultado de tensiones de ANSYS en ensayo 3. ....	42
Figura 4-9. Resultado de tensiones de Gemelo Digital en ensayo 3. ....	42
Figura 4-10. Resultado de tensiones de ANSYS en ensayo 4. ....	43
Figura 4-11. Resultado de tensiones de Gemelo Digital en ensayo 4. ....	43
Figura 4-12. Gráfica de datos recogidos de los sensores durante el ensayo 1. ....	44
Figura 4-13. Resultado del Gemelo Digital para el ensayo 1 midiendo con los sensores. ....	45
Figura 4-14. Gráfica de datos recogidos de los sensores durante el ensayo 2. ....	46
Figura 4-15. Resultado del Gemelo Digital para el ensayo 2 midiendo con los sensores. ....	46
Figura 4-16. Gráfica de datos recogidos de los sensores durante el ensayo 3. ....	47
Figura 4-17. Resultado del Gemelo Digital para el ensayo 3 midiendo con los sensores. ....	48
Figura 4-18. Gráfica de datos recogidos de los sensores durante el ensayo 4. ....	49
Figura 4-19. Resultado del Gemelo Digital para el ensayo 4 midiendo con los sensores. ....	49



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Cargas para el análisis de fatiga de la soldadura.....	19
Tabla 2-2. Valores de tensión de membrana, flexión y membrana más flexión de las SCLs para fatiga de soldadura.....	22
Tabla 4-1. Ensayos para verificación del Gemelo Digital.....	39
Tabla 4-2. Valores de entrada del ensayo 1 procedentes de ANSYS.....	39
Tabla 4-3. Valores de entrada del ensayo 2 procedentes de ANSYS.....	41
Tabla 4-4. Valores de entrada del ensayo 3 procedentes de ANSYS.....	42
Tabla 4-5. Valores de entrada del ensayo 4 procedentes de ANSYS.....	43
Tabla 4-6. Comparación valores de entrada del ensayo 1.....	44
Tabla 4-7. Comparación valores de entrada del ensayo 2.....	45
Tabla 4-8. Comparación valores de entrada del ensayo 3.....	47
Tabla 4-8. Comparación valores de entrada del ensayo 4.....	48

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1 Introducción

Un Gemelo Digital es una réplica virtual de un producto o sistema creado por la incorporación de sensores que aportan datos a tiempo real. De esta forma, se consigue representar virtualmente los fenómenos dados en dicho producto o sistema.

En 2002 en la Universidad de Michigan un ingeniero informático mencionó en una conversación con el director de la NASA, la posibilidad de crear representaciones digitales de sistemas físicos para monitorizarlos en tiempo real. Desde entonces, el interés de la industria aeronáutica por los Gemelos Digitales no ha parado de crecer hasta el punto de formar parte fundamental de conferencias, como el “53º Congreso de Estructuras, Dinámica Estructural y Materiales” donde participaron entidades como ASME, la NASA y la Fuerza Aérea de Estados Unidos entre otros.

En dicho Congreso se publica la referencia [1] mencionando las principales ventajas de la aplicación de Gemelos Digitales frente a sistemas convencionales. Más allá de la representación a tiempo real de fenómenos físicos, en esta publicación se habla sobre la posibilidad de sistemas inteligentes capaces de mitigar el daño o la degradación aplicando sistemas de “autocuración” o recomendando cambios de actividad para disminuir las cargas y aumentar la vida útil del componente.

Los Gemelos Digitales reconstruyen en todo el componente el campo de la variable medida por sensores ubicados en uno o varios puntos representativos. En la publicación [2] se realiza la reconstrucción del campo de deformaciones en una viga a partir de la medida en un punto o varios puntos. Y en la publicación [3] se reconstruyen las deformaciones para diferentes cargas dinámicas usando acelerómetros e inspirados en las cargas que sufren palas de aerogeneradores.

Para realizar la reconstrucción de deformaciones en toda la pieza y el nivel de tensiones que las producen, es preciso la aplicación de problemas inversos. En la publicación [4] se plantea un sistema de resolución de problemas inversos para reconstrucción de deformaciones en un componente.

Una vez completada la reconstrucción de los campos de tensión-deformación, el Gemelo Digital puede proporcionar una predicción realista de la vida útil del sistema. La monitorización a tiempo real permite cuantificar de forma histórica las cargas a las cuales se somete el componente. De manera que, la forma tradicional de estimar los niveles de carga y número de ciclos que sufrirá la estructura para evaluar procesos de fatiga y, en consecuencia, los años de vida útil del componente, se convierte en una hipótesis de diseño que puede ser reevaluada en continuo por el Gemelo Digital.

La información aportada por el Gemelo Digital permite monitorizar la vida remanente de los componentes y mejora la planificación de inspecciones. En la publicación [5] se realiza la monitorización del crecimiento de grietas mediante un Gemelo Digital.

## 1.2 Objetivos

Este Trabajo Fin de Máster tiene por objetivo realizar la monitorización estructural de un componente mediante el uso de un Gemelo Digital. La monitorización es verificada mediante herramientas de cálculo alternativas para comprobar la fiabilidad de la misma.

La estructura monitorizada tiene una geometría sencilla que permite el cálculo teórico del estado tensional y, a su vez, permite diferentes configuraciones de estados de carga. Las herramientas de creación y verificación del Gemelo Digital abarcan la aplicación de la Teoría de la Elasticidad y la Simulación Numérica.

Por tanto, la ejecución del trabajo consiste en el diseño, fabricación y monitorización de una maqueta o estructura de pequeñas dimensiones que simula una grúa pórtico. Durante el proceso de diseño se asegura la integridad estructural del componente y, posteriormente se instalan sobre ella galgas extensiométricas para realizar una monitorización de los estados de carga del componente.

En definitiva, el trabajo pretende fabricar un componente de dimensiones reducidas cuya integridad estructural ha sido garantizada en fase de diseño y monitorizar los estados de tensión-deformación mediante un Gemelo Digital para, así comprobar el correcto funcionamiento de los Gemelos Digitales y visualizar el potencial uso de esta tecnología.

## CAPÍTULO 2. DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL COMPONENTE

### 2.1 Geometría y materiales

La grúa pórtico es un tipo de grúa que se caracteriza por estar sostenida por dos o más patas sobre la que apoya una viga. Esta viga contiene un montacargas que puede desplazarse a lo largo de la misma y elevar la carga. Además, las patas se encuentran sobre unos rieles en el suelo sobre los que puede desplazarse. Su uso es muy habitual en la industria, especialmente en zonas portuarias.



Figura 2-1. Ejemplo de morfología de una grúa pórtico.

La estructura diseñada en el presente trabajo simula la morfología de este tipo de grúa, aunque las dimensiones son muy reducidas y permite su manejo en una mesa de laboratorio. Las dimensiones y detalles de la estructura se muestran en el “Anexo A. Plano de la estructura”.

La Figura 2-2 muestra el modelo 3D de la estructura diseñada, fabricada y monitorizada para el presente trabajo. La geometría no pretende optimizar la capacidad de carga de la estructura, sino resultar practica para lograr los objetivos del trabajo. Además, se ha incorporado al diseño una pieza móvil que simula el montacargas móvil típico en estas grúas y donde se ubica la carga. Esta pieza móvil se encuentra fuera del alcance del diseño y monitorización de la estructura, ya que su objetivo es permitir la movilidad de la carga para comprobar la capacidad de monitorización a tiempo real del Gemelo Digital.

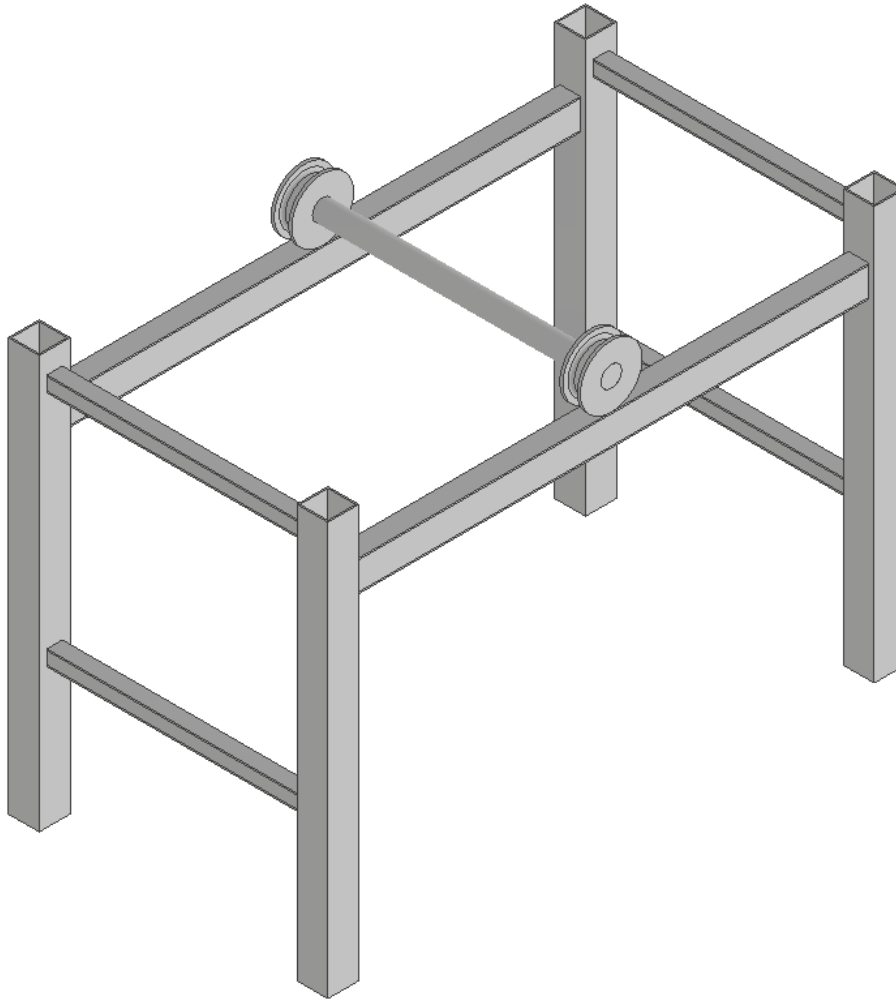


Figura 2-2. Modelo 3D de la estructura del trabajo.

La estructura está formada por perfiles de acero al carbono laminados en frío, cuyo espesor es 1,5 mm en todas las secciones de la misma. Las cuatro patas que forman la estructura son perfiles cuadrados de 30x30 mm, las vigas que soportan la carga son perfiles rectangulares de 30x20 mm, y por último, las cuatro vigas que unen las patas y son paralelas a la barra que soporta la carga son perfiles cuadrados de 15x15 mm (ver lista de partes del plano en el Anexo A. Plano de la estructura).

La estructura ocupa un volumen de 400 mm de alto, 560 mm de largo y 310 mm de ancho de forma que pueda colocarse sobre una mesa de laboratorio.

La especificación del material que forma la estructura es desconocida, ya que se trata de perfiles comprados en tiendas comerciales comunes en las cuales no se indican. Por tanto, para caracterizar el material sería necesario, como mínimo, la realización de ensayos a tracción, pero no se han realizado por considerarse innecesario para la realización del trabajo. Para las pruebas previstas en el trabajo únicamente se precisa conocer las propiedades elásticas del material (módulo de Young y coeficiente de Poisson) y, éstas son idénticas para todos los grados de acero estructural.

## 2.2 Estado tensional

En el siguiente apartado se realiza un cálculo del estado tensional mediante elementos finitos con la herramienta ANSYS y se comprueba dicho resultado mediante una aproximación teórica por Teoría de la Elasticidad.

### 2.2.1 Calculo teórico

Dada la simetría de la estructura, se puede realizar una aproximación del cálculo con la mitad de la estructura sometida a la mitad de la carga. Se ha decidido realizar los cálculos para una carga de 100 kg. Y las dimensiones de la estructura mostradas en la Figura 2-3 son para la fibra neutra de los perfiles.

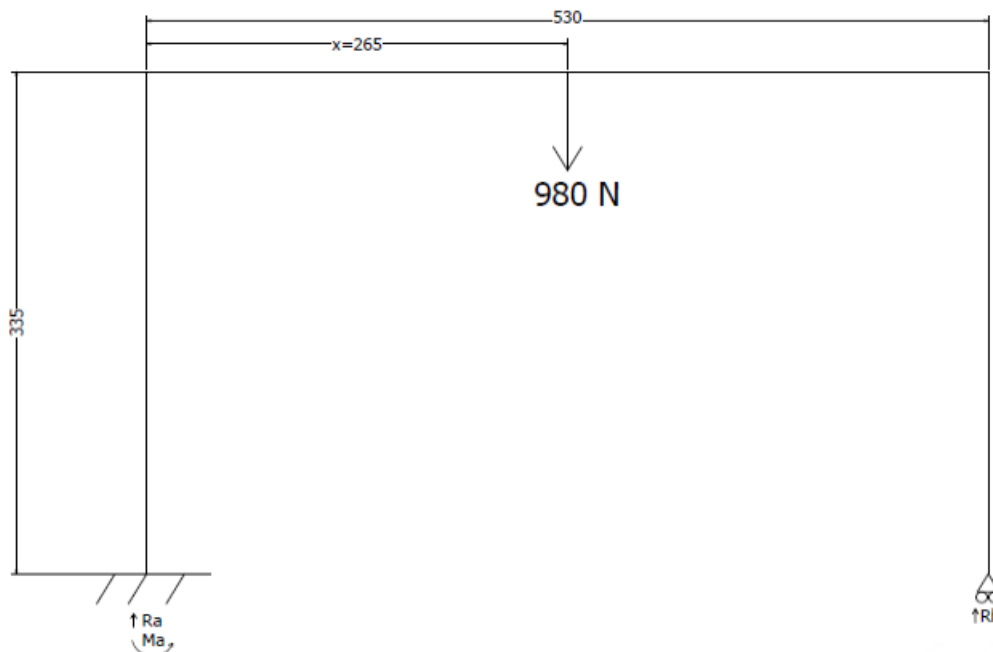
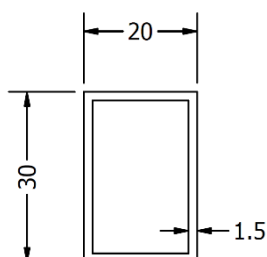


Figura 2-3. Esquema de cálculo de tensión en la estructura para 100kg en el centro de la viga de carga (50 kg por simetría).

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0; \\ \sum F_y &= 0; & R_a + R_b &= 490; & R_a &= R_b = 245 \text{ N} \\ \sum M &= 0; & M_a - 490 \cdot 265 &= 0 & M_a &= 129850 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

El momento de inercia de la viga es:



$$I = \frac{30^3 \cdot 20}{12} - \frac{27^3 \cdot 17}{12} = 17115.75 \text{ mm}^4$$

Por tanto, la tensión máxima en función de la distancia “x” donde se ubica la carga es:

$$\sigma = \frac{245x}{17115.75} \cdot 15$$

$$\sigma = \frac{245 \cdot 265}{17115.75} \cdot 15 = 56.9 \text{ MPa}$$

En resumen, la tensión teórica aproximadamente es de 56.9 MPa para una carga de 100 kg en el centro de la estructura.

### 2.2.2 Malla

En la Figura 2-4 se muestra el mallado del componente formado por 33222 nodos y 3636 elementos hexaédricos. El análisis de sensibilidad de la malla ha sido sustituido por el cálculo teórico del apartado 2.2.1.

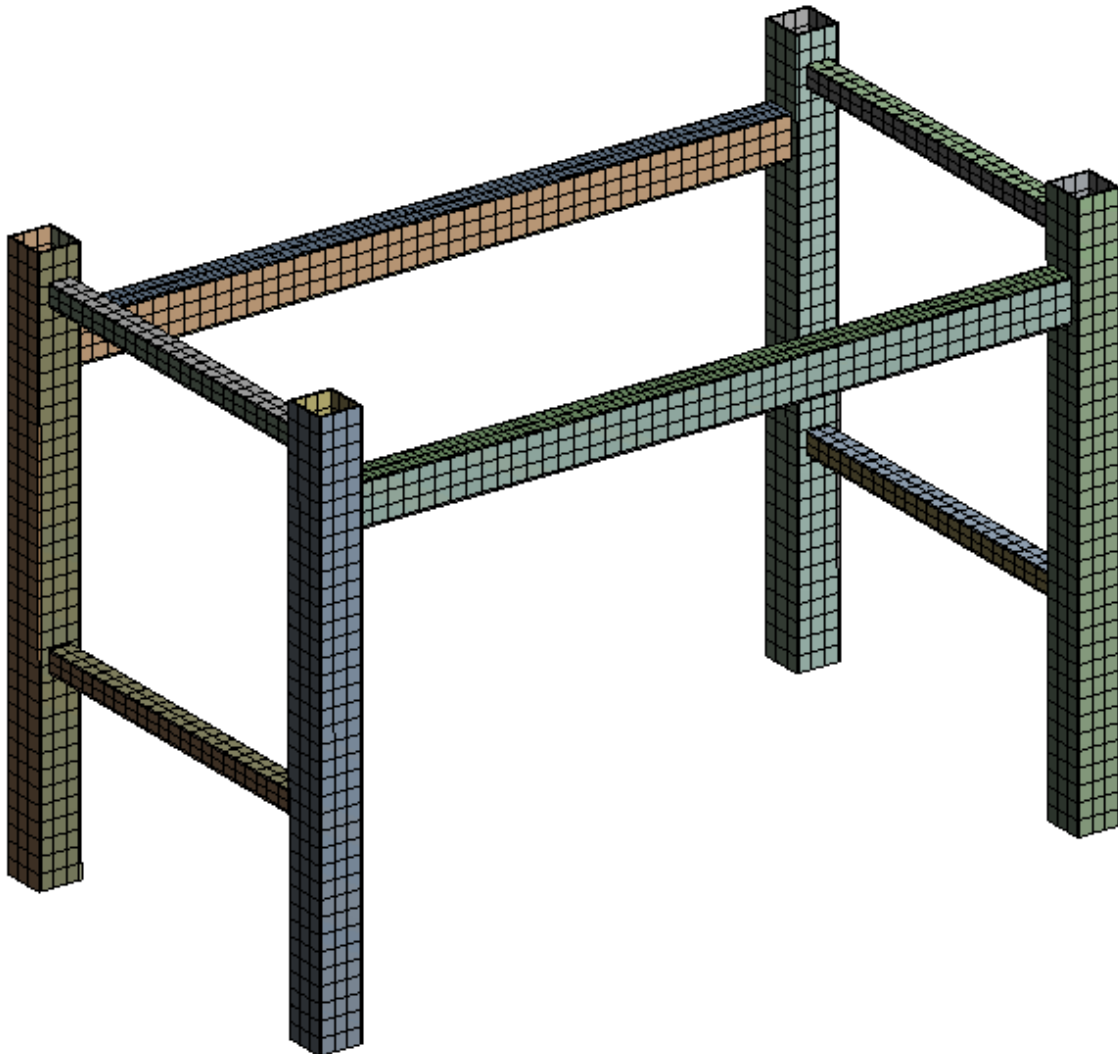


Figura 2-4. Mallado del componente en ANSYS.

### 2.2.3 Condiciones de contorno

La Figura 2-5 muestra las condiciones de contorno del modelo estructural implementado en ANSYS para simular la carga de 100 kg en el centro de la estructura.

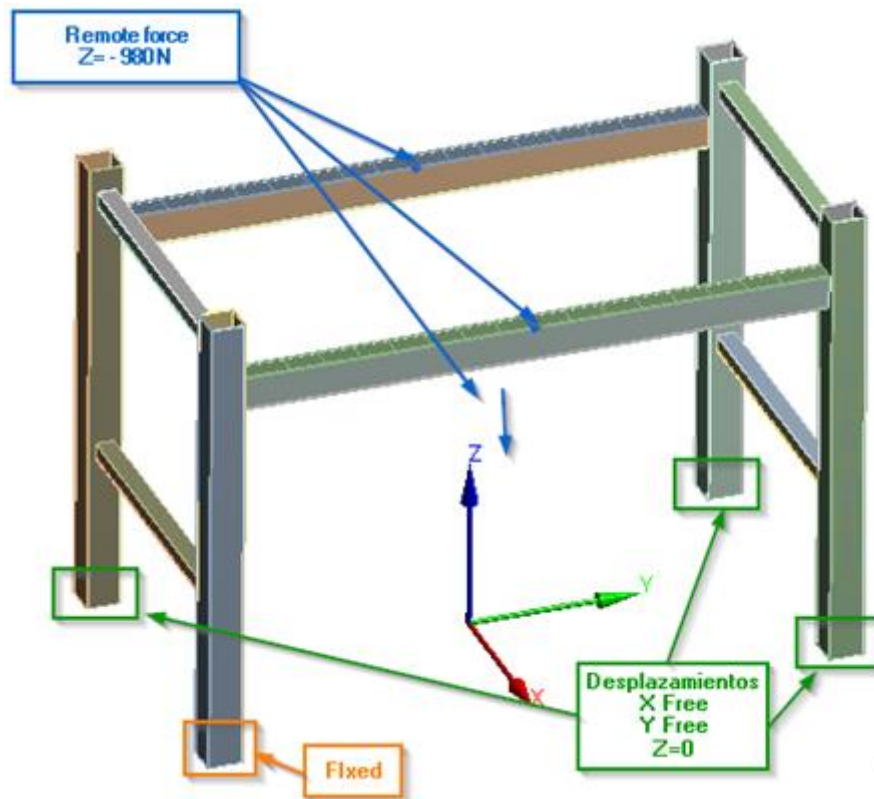


Figura 2-5. Condiciones de contorno en ANSYS para carga de 100kg en el centro.

### 2.2.4 Resultados

En la Figura 2-6 se muestra los resultados de las tensiones en MPa alcanzadas en la estructura para una carga de 100kg centrada. El valor que alcanza en la zona central de la estructura puede ser comparado con el cálculo teórico realizado en el apartado 2.2.1 de este documento.

En la Figura 2-7 se muestra las deformaciones en mm de todo el componente. La galga extensiométrica mide en mm/mm para una sola dirección. Con el fin de mostrar un orden de magnitud de la medida para este nivel de carga, se muestra la Figura 2-8 de los resultados en la dirección Y. De esta forma, se aporta las medidas que serían realizadas en dicha dirección para dos posiciones de galga diferentes.



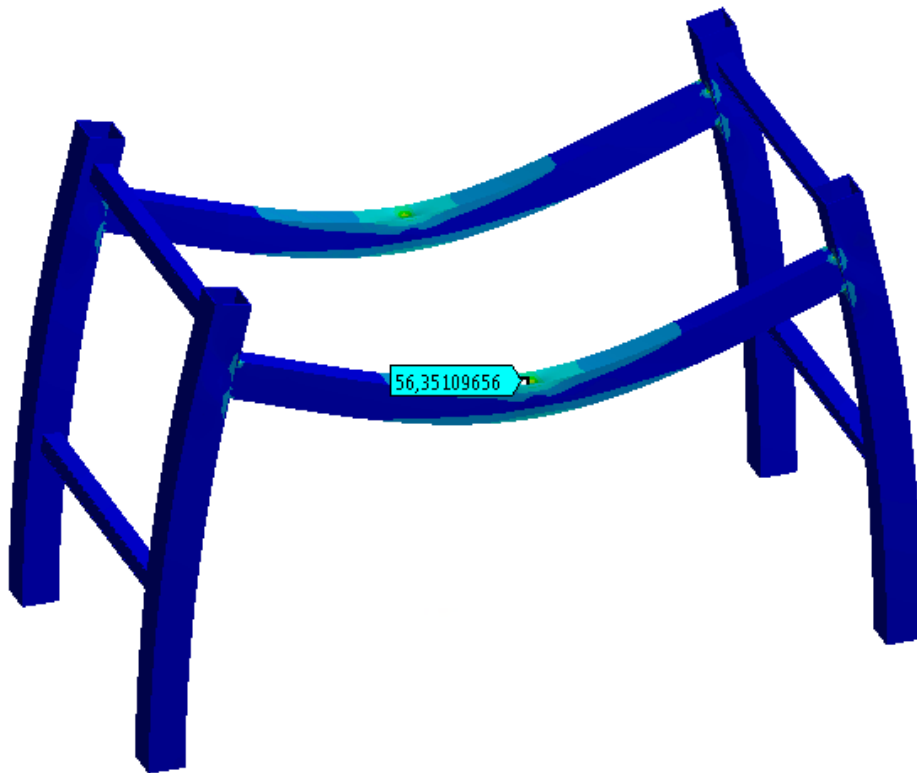


Figura 2-6. Resultado de tensiones (en MPa) en ANSYS para una carga centrada de 100kg.

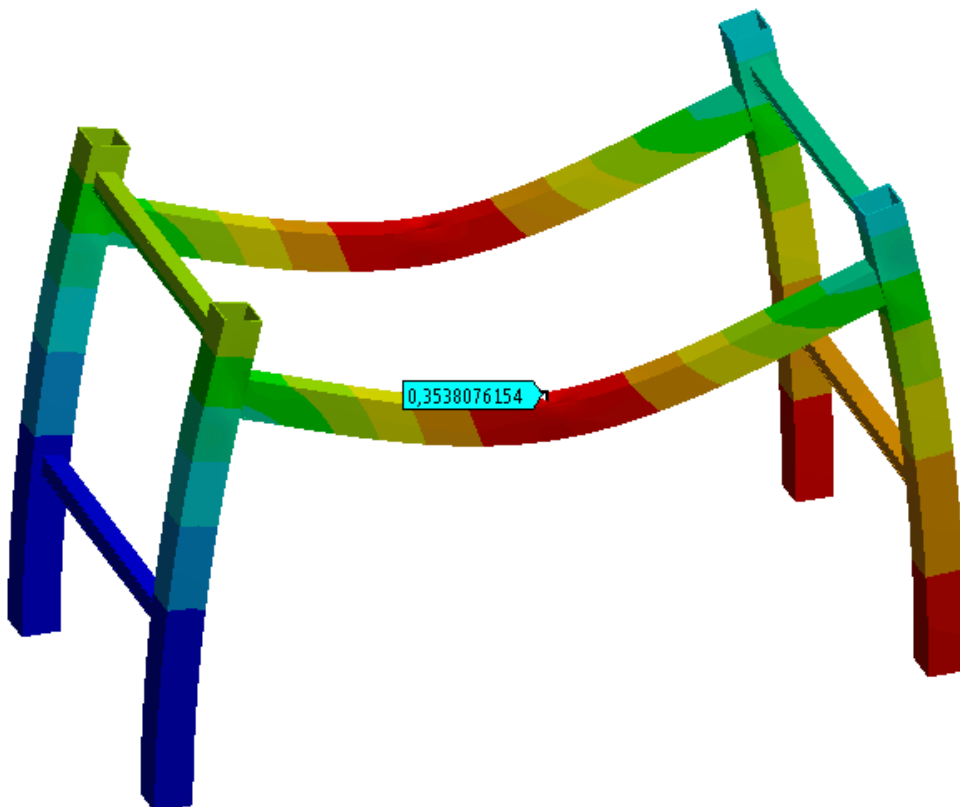


Figura 2-7. Resultado de deformaciones (en mm) en ANSYS para una carga centrada de 100kg.

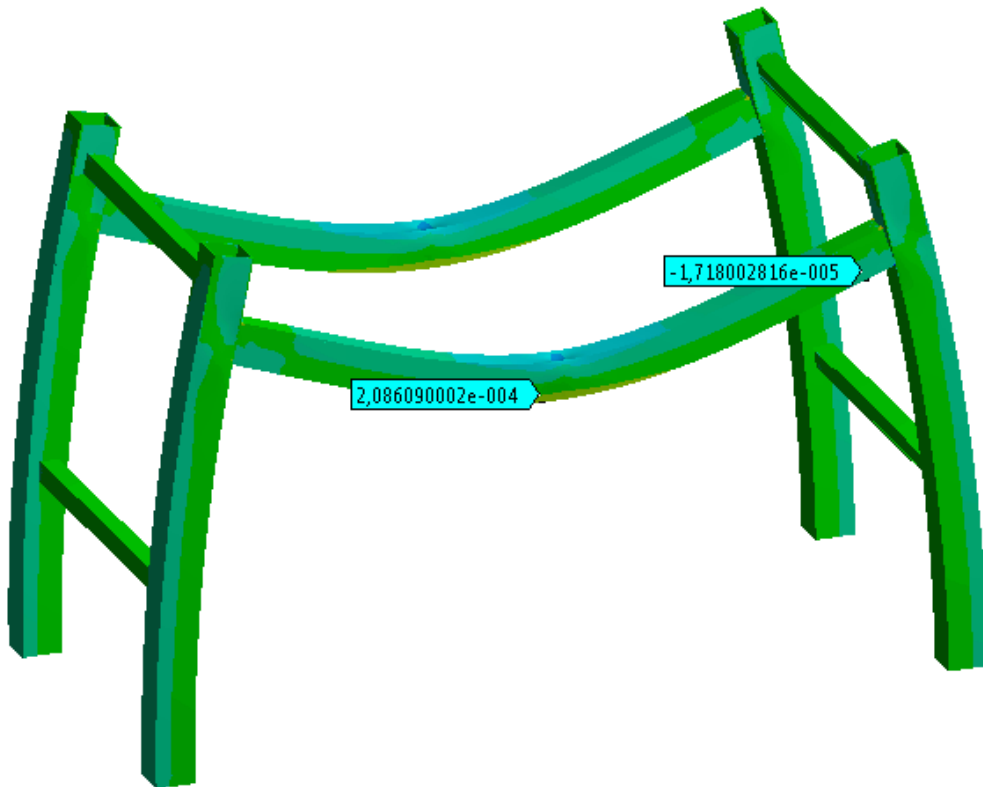


Figura 2-8. Resultado de deformaciones en dirección Y (en mm/mm) en ANSYS para una carga centrada de 100kg.

### 2.3 Cálculo de fatiga

La estructura está formada con perfiles de acero unidos entre sí mediante soldadura. Por ello, las zonas soldadas pueden ser la zona limitante de la integridad estructural del componente, aunque su nivel de tensión sea menor. En consecuencia, este apartado realiza un análisis de fatiga para las uniones soldadas.

En primer lugar, se definen diferentes Líneas de Clasificación de Tensiones (SCL) en la zona de las soldaduras más comprometidas. Después, se obtienen de ANSYS el perfil de tensiones alcanzado a lo largo de la misma para diferentes estados de carga. Y, por último, se analizan el número de ciclos admisible a partir de la curva S-N del material.

Dada la simetría de la estructura analizada, se analiza una soldadura siendo válido dicho estudio para el resto de las soldaduras simétricas. La soldadura más comprometida es la unión entre la viga sobre la que reposa en montacargas y la pata. Además, la zona más limitante corresponde con la parte superior, ya que es la zona con cargas a tracción. Por ello, se colocan tres SCLs en dicha soldadura en la zona superior de la misma.

La Figura 2-9 muestra el detalle de la malla de ANSYS para la zona de la soldadura analizada y la Figura 2-10 muestra la ubicación de las SCLs.

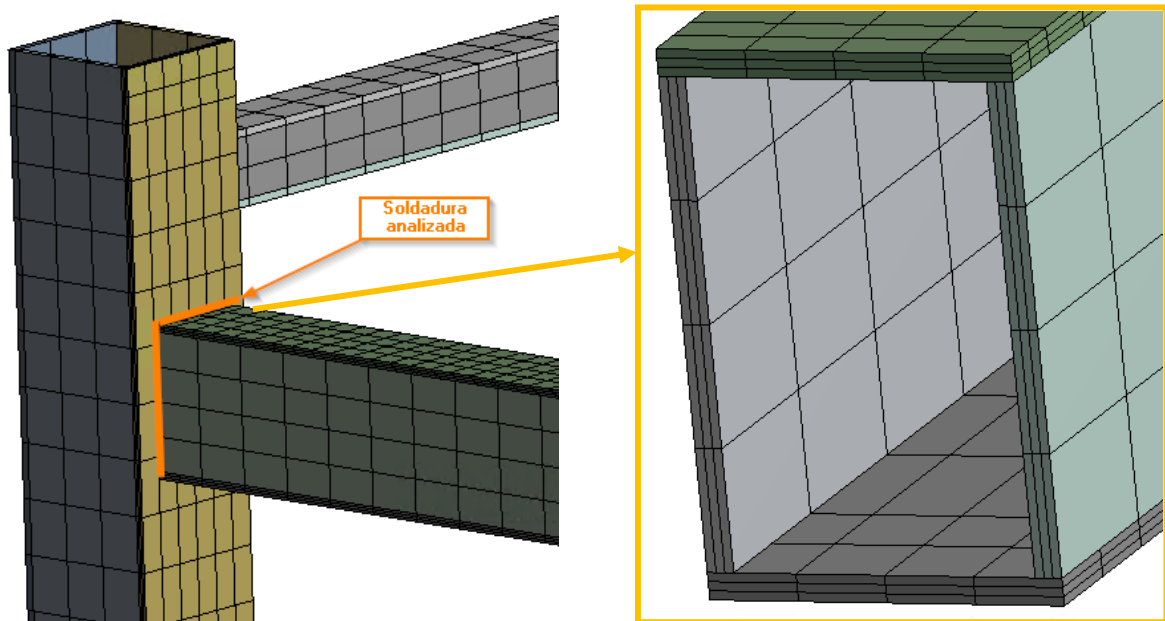


Figura 2-9. Soldadura analizada a fatiga y detalle de la malla en ANSYS.

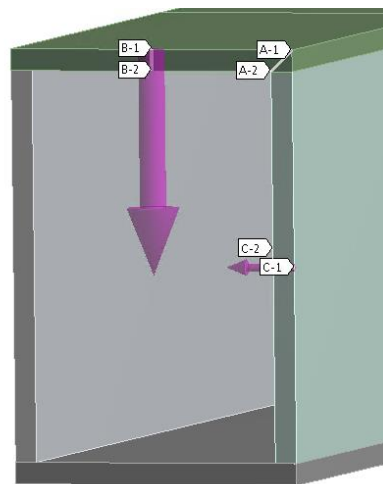


Figura 2-10. Localización de las SCLs A, B y C de la soldadura.

Las tensiones totales de cada una de las SCLs exportadas de ANSYS para una carga de 100kg en el centro de la estructura (carga 1) son mostradas en la Figura 2-12, Figura 2-13 y Figura 2-14. A partir de dichas gráficas se obtienen los valores de tensión de tracción y flexión para el análisis de fatiga y, de forma análoga, se realiza para el resto de cargas propuestas en la Tabla 2-1. En la Tabla 2-2 se muestra el rango de tensiones de cada una de las cargas en las distintas SCLs propuestas con las cuales se realiza posteriormente el análisis de fatiga.

Tabla 2-1. Cargas para el análisis de fatiga de la soldadura.

Carga	Descripción
Carga 1	Carga de 100 kg en la zona central de la viga.
Carga 2	Carga de 100 kg en el extremo opuesto de la viga de la soldadura analizada.

Tabla 2-1. Cargas para el análisis de fatiga de la soldadura.

Carga	Descripción
Carga 3	Carga de 50 kg en el extremo de la viga de la soldadura analizada.
Carga 4	Carga de 50 kg en la zona central de la viga.
Carga 5	Carga de 50 kg en el extremo opuesto de la viga de la soldadura analizada.
Carga 6	Carga de 25 kg en el extremo de la viga de la soldadura analizada.
Carga 7	Carga de 25 kg en la zona central de la viga.
Carga 8	Carga de 25 kg en el extremo opuesto de la viga de la soldadura analizada.
Carga 9	Carga de 25 kg en el extremo de la viga de la soldadura analizada.

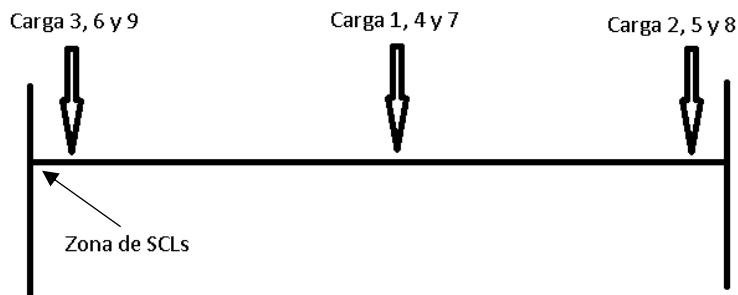


Figura 2-11. Croquis de las zonas de carga para análisis de fatiga.

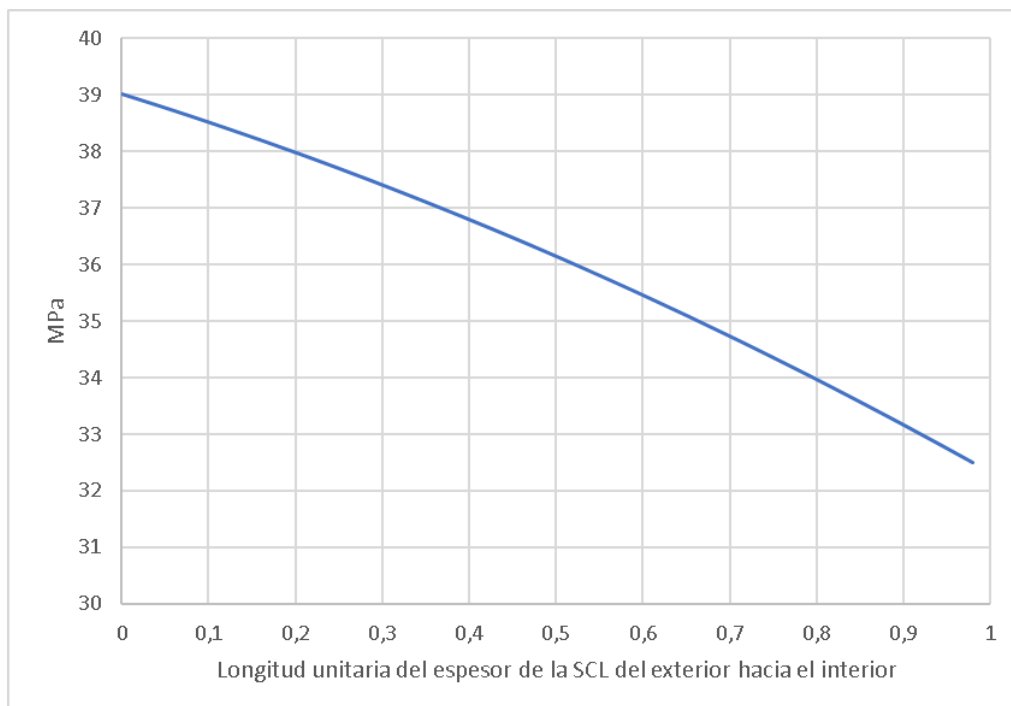


Figura 2-12. Tensiones totales en la SCL A para la carga 1.

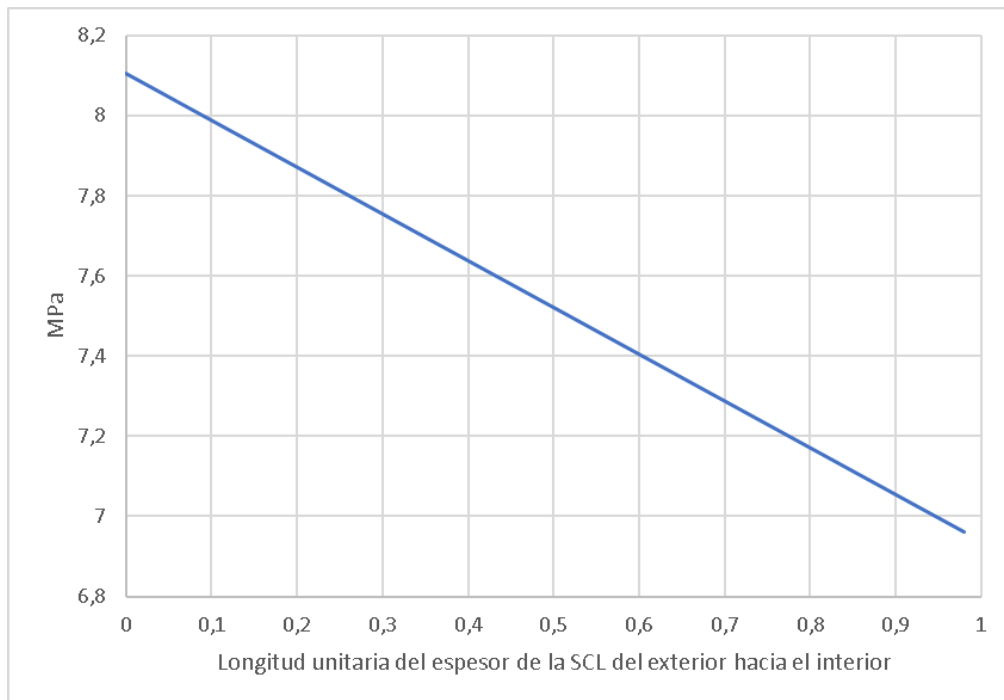


Figura 2-13. Tensiones totales en la SCL B para la carga 1.

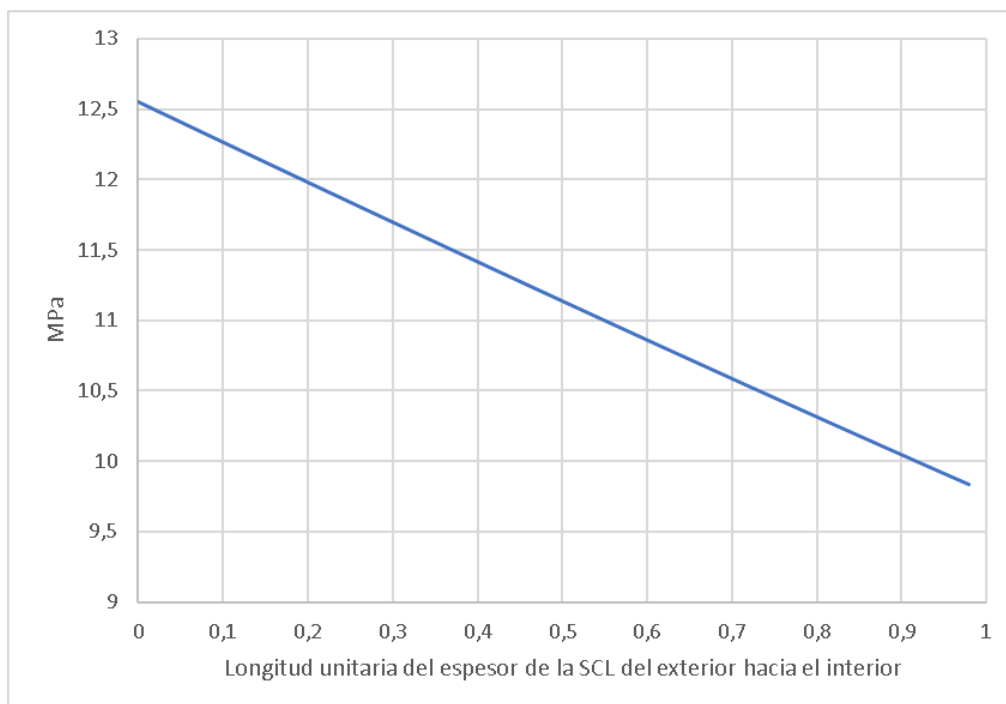


Figura 2-14. Tensiones totales en la SCL C para la carga 1.

Tabla 2-2. Valores de tensión de membrana, flexión y membrana más flexión de las SCLs para fatiga de soldadura.

Carga	SCL	Tracción [MPa]	Flexión [MPa]	M+B [MPa]
Carga 1	A	35,75	3,25	39,00
	B	7,53	0,57	8,11
	C	11,19	1,36	12,55
Carga 2	A	8,44	0,77	9,21
	B	1,83	0,13	1,96
	C	2,55	0,29	2,84
Carga 3	A	7,00	0,68	7,68
	B	0,80	0,11	0,91
	C	5,81	1,31	7,12
Carga 4	A	17,88	1,63	19,50
	B	3,77	0,29	4,06
	C	5,60	0,68	6,28
Carga 5	A	4,22	0,39	4,61
	B	0,92	0,07	0,98
	C	1,28	0,15	1,42
Carga 6	A	3,50	0,34	3,84
	B	0,40	0,06	0,46
	C	2,91	0,66	3,56
Carga 7	A	8,94	0,81	9,75
	B	1,88	0,14	2,03
	C	2,80	0,34	3,14
Carga 8	A	2,11	0,19	2,30
	B	0,46	0,03	0,49
	C	0,64	0,07	0,71
Carga 9	A	1,75	0,17	1,92
	B	0,20	0,03	0,23
	C	1,45	0,33	1,78

Se aplica un incremento de 1.6 por factor de concentración de tensiones en la zona de soldadura, cuyo valor procede de un análisis del gradiente de tensiones en la zona afectada térmicamente en los resultados de la simulación de elementos finitos. Después, el rango de tensiones resultante se divide entre 2 para poder acudir a la curva S-N del material hallando el número de ciclos admisible para cada carga.

El número de ciclos obtenido contempla toda la vida del componente, ya que la curva S-N parte de elementos no fisurados. La metodología de cálculo está basada en el “método A” de la publicación [6] basada en el procedimiento del código ASME.

Se considera que el ciclo de tensiones es un carga y descarga completa, y por simplificación del cálculo no se consideran cargas dinámicas.

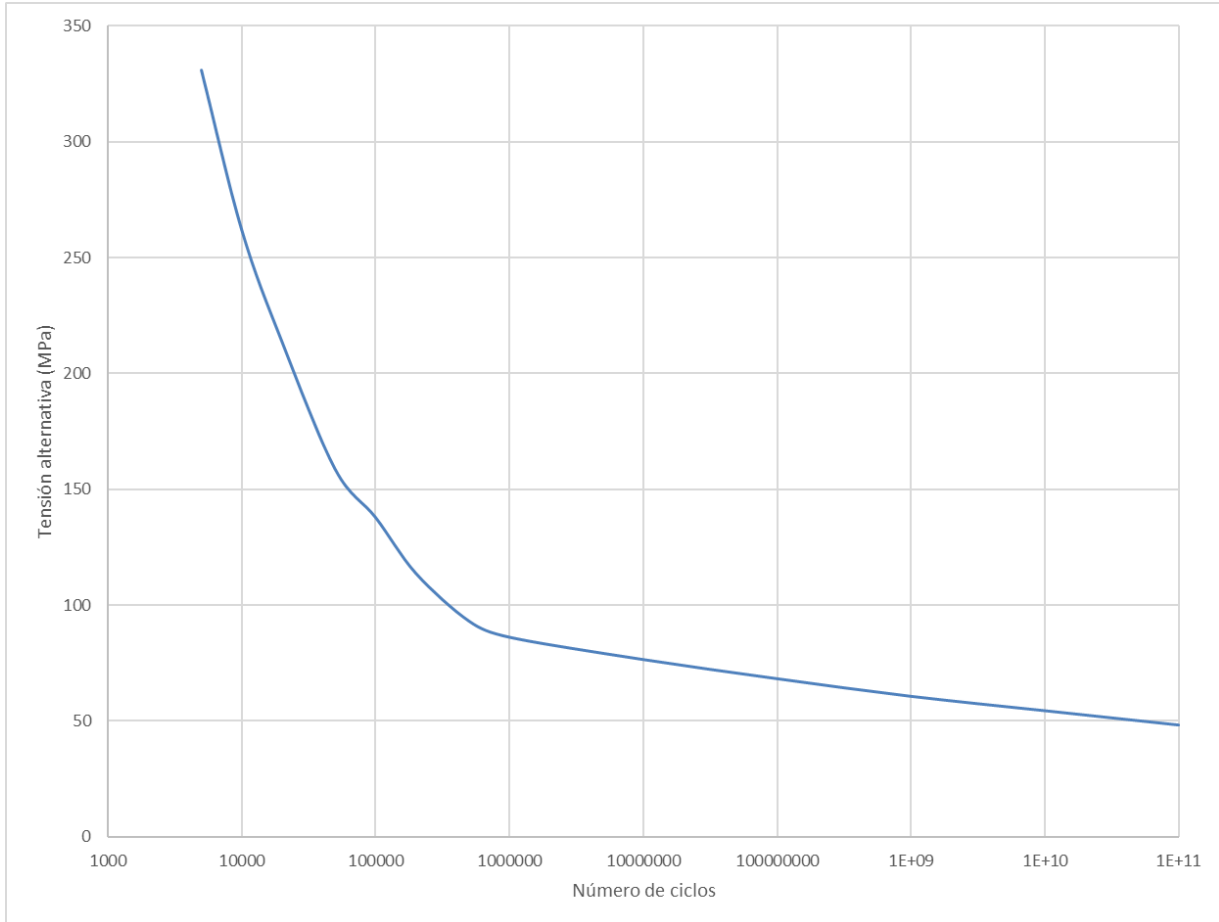


Figura 2-15. Curva S-N de acero al carbono según ASME III

A la vista de la curva S-N mostrada en la Figura 2-15, la tensión más alta de la Tabla 2-2 (carga 1 en la SCL A) tiene una tensión alternativa igual a 31.2 MPa ( $1.6 \times 39 / 2$ ), por lo tanto con un número de ciclos admisible infinito, ya que se encuentra por debajo del límite de durabilidad. En conclusión, la estructura admite un número de ciclos infinito para las cargas propuestas en la Tabla 2-1.

El resto de soldaduras de la estructura se encuentran sometidas a tensiones menores, por lo tanto, el número de ciclos admisible es infinito también.

En definitiva, el diseño de la estructura admite un número infinito de ciclos de carga y descarga, ya que las tensiones en las soldaduras se encuentran por debajo de la durabilidad del material.



## 2.4 Fabricación del componente

La fabricación del componente se ha realizado en base al “Anexo A. Plano de la estructura”. Para ello, se han comprado perfiles comerciales de acero de un metro de longitud, los cuales han sido cortados a las medidas requeridas por el diseño.



Figura 2-16. Perfiles comerciales comprados y piezas cortadas a las medidas requeridas.

Posteriormente, se ha utilizado un equipo de tipo MIG con gas protector de Argón para el proceso de soldadura de las piezas.





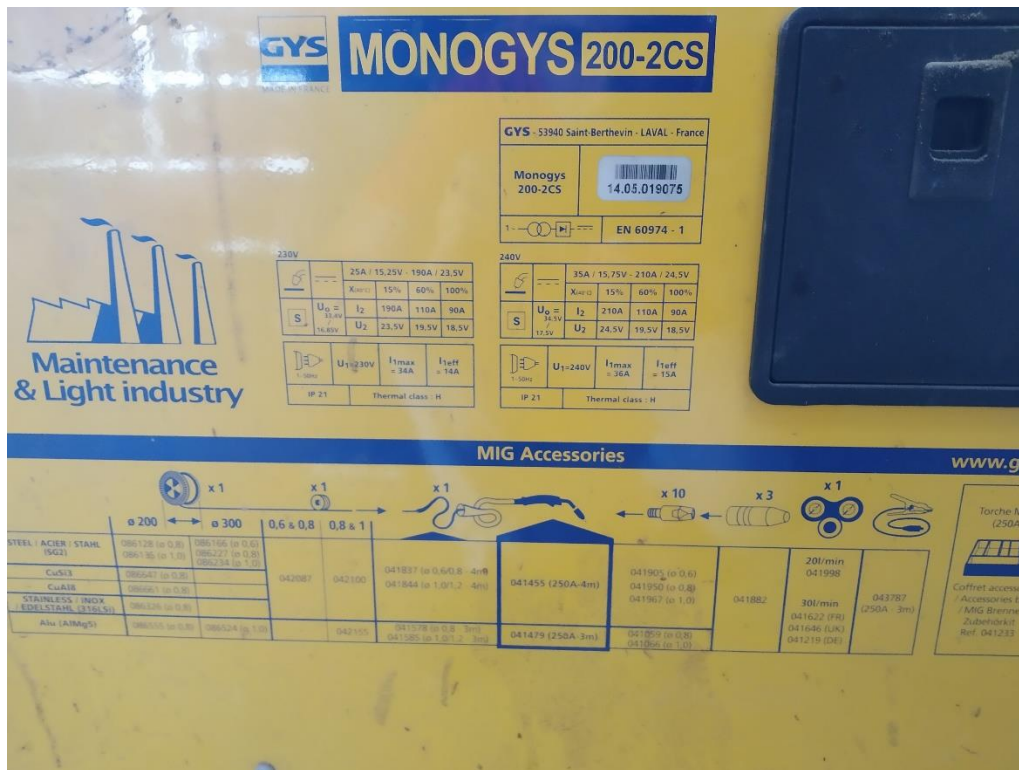


Figura 2-17. Equipo de soldadura MIG utilizado para el proceso de soldeo de la estructura.

La colocación de las piezas se ha realizado mediante soportes imantados para asegurar una correcta ubicación durante el proceso de soldeo. Dicho proceso de soldeo no ha incorporado ningún precalentamiento y, tampoco ha sido realizado ningún tipo de tratamiento térmico posterior.

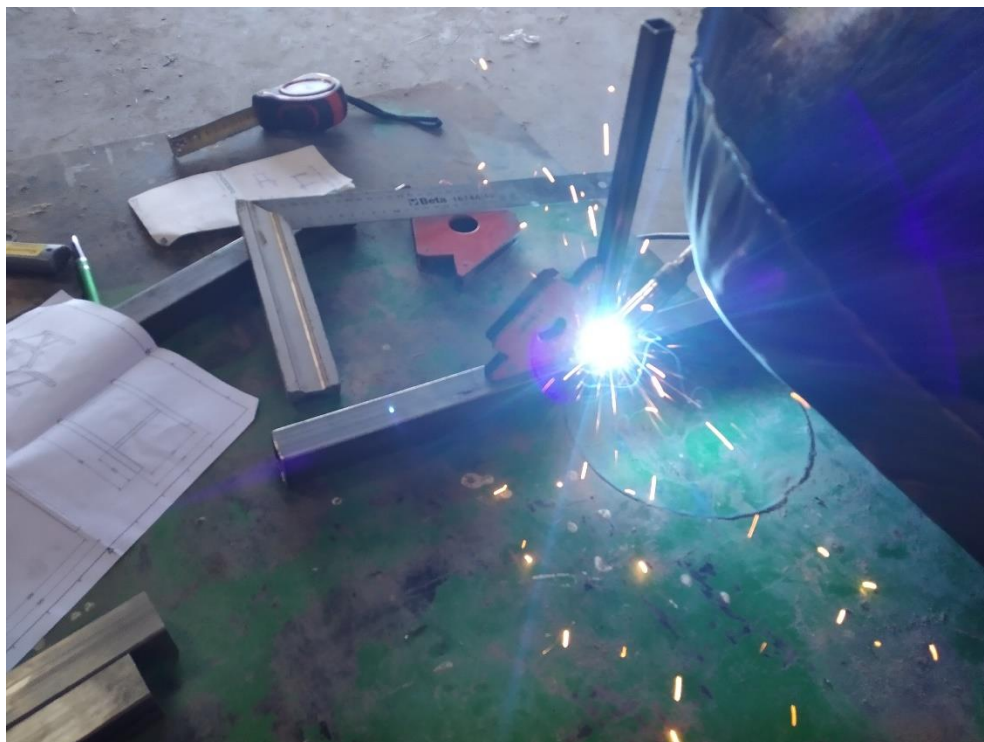


Figura 2-18. Fotografías tomadas durante el proceso de soldeo de la estructura.



A continuación, se muestra el detalle de alguna de las soldaduras y la estructura final una vez terminado la unión de las piezas.

Todas las soldaduras son en ángulo y las dimensiones de los cordones garantizan el comportamiento rígido de las uniones, tal y como ha sido considerado en los cálculos.



Figura 2-19. Fotografías de algunas de las soldaduras de la estructura.

Tras la realización de las soldaduras se ha decidido no pintar la estructura y dejar las soldaduras al natural para que sea fácilmente apreciable las zonas afectadas térmicamente y los posibles defectos que puedan tener las soldaduras, como posibles irregularidades de forma o pequeños poros.



Figura 2-20. Fotografía de la estructura soldada

## CAPÍTULO 3. CREACIÓN DEL GEMELO DIGITAL

### 3.1 Introducción

El Gemelo Digital se fundamenta en la reconstrucción de un campo en todo el componente mediante la medida de unos sensores ubicados de forma estratégica. En el presente trabajo los sensores instalados son galgas extensiométricas que miden deformaciones.

La configuración del Gemelo Digital está basada en la resolución de multitud de estados posibles de carga llamados "Snapshots". En este trabajo un snapshot posee la matriz de deformaciones para un estado de carga concreto. Y éstos deben definir el espacio completo de las soluciones del problema paramétrico.

Posteriormente, se definen puntos y direcciones idóneos de monitorización donde colocar las galgas extensiométricas, cuyas medidas permitan la reconstrucción del campo de deformación. Y a partir del campo de deformación reconstruido se calcula el campo de tensión.

Una galga extensiométrica únicamente mide la deformación normal en una dirección contenida en el plano donde se ubica. No es posible la medida directa de tensiones cortantes y solo mide en la dirección paralela a la deformación de la galga.

La Figura 3-1 pretende explicar de forma simplificada y visual la manera en que el Gemelo Digital es capaz de reconstruir los campos de deformaciones a partir las medidas de los sensores.

Como se decía anteriormente, los snapshots representan el espacio completo de soluciones del problema. Por tanto, mediante la ubicación idónea de los sensores podemos reconstruir el campo completo. En la Figura 3-1 se proponen una serie de snapshots y posteriormente la medida mediante dos sensores para reconstruir el campo. A la vista del ejemplo, se puede entender la importancia de la ubicación de los sensores para evitar reconstrucciones erróneas del problema.

La Figura 3-1 representa un ejemplo simplificado para introducir el problema y clarificar el funcionamiento. En la reconstrucción real los algoritmos son capaces de reconstruir campos de deformaciones que no se encuentran dentro de los snapshots, por ejemplo, un Gemelo Digital con 20 o 30 snapshots es capaz de reconstruir cientos de campos de deformación, siempre y cuando, los snapshots alberguen todo el espacio de soluciones.

Puede decirse que los snapshots aportan una experiencia de posibles soluciones al Gemelo Digital para que sea capaz de reconstruir ese campo mediante los datos procedentes de los sensores, e incluso, sea capaz de reconstruir campos proporcionales o combinados a partir de dichos snapshots.

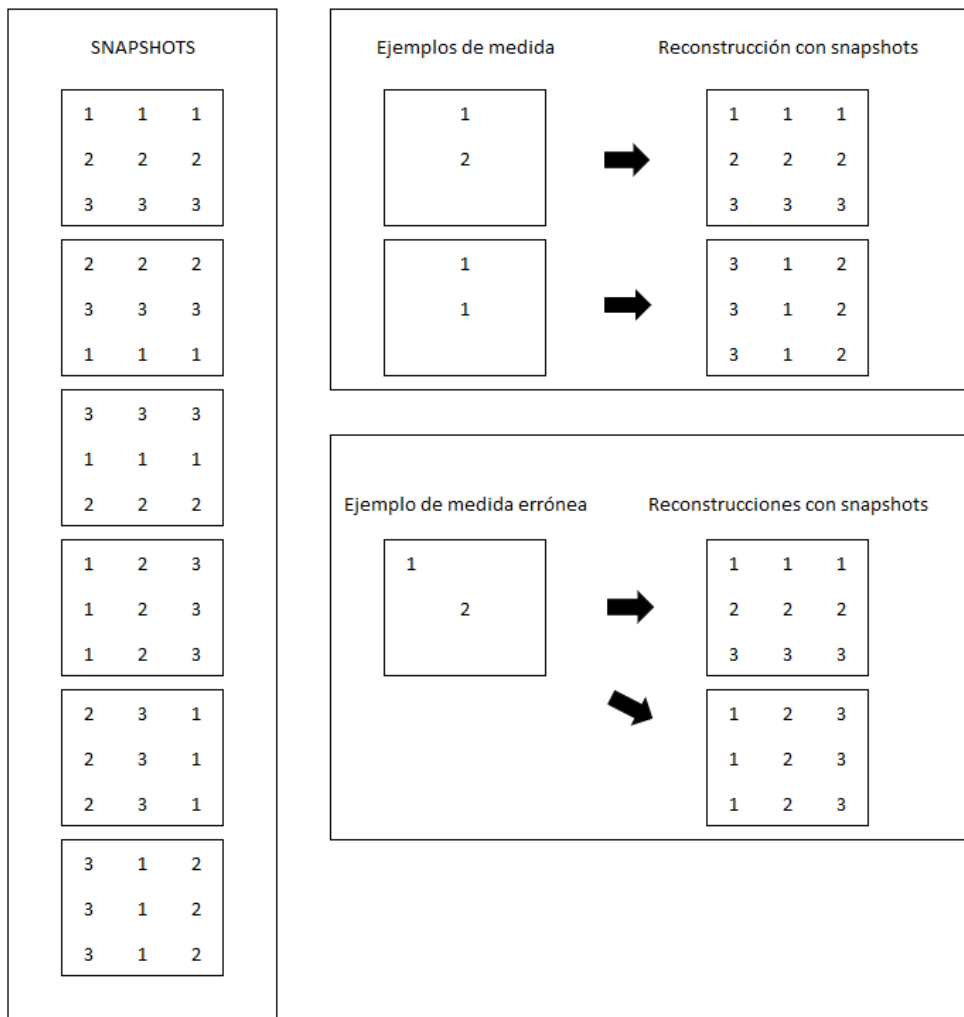


Figura 3-1. Ejemplo de reconstrucción de campos a partir de snapshots.

Por tanto, la cantidad de sensores a colocar y su ubicación es un problema en sí mismo. Las ubicaciones de los sensores deben ser lo suficientemente representativas para conseguir el campo de deformaciones que se da en el modelo real ante las cargas a las que se ve sometido.

Con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del Gemelo Digital, se pueden resolver en ANSYS posibles estados de carga que no sean ningún snapshot. Posteriormente, tomar las deformaciones de los nodos donde se ubican los sensores para comprobar las diferencias entre la reconstrucción del Gemelo Digital y la solución de ANSYS.

Una vez comprobado el funcionamiento del Gemelo Digital, se realizará un pequeño montaje con diferentes galgas para verificar las medidas de las galgas extensiométricas. Y, por último, se realizan comprobaciones en la reconstrucción del Gemelo Digital frente a la resolución en ANSYS.



### 3.2 Galga extensiométrica

Una galga extensiométrica es un sensor que mide deformación en el centro geométrico de la misma. Se constituye por una pequeña resistencia eléctrica que modifica su valor al verse sometida a ciertos esfuerzos (presión, par, posición, vibraciones, temperatura, etc.).

La galga se forma por una lámina flexible y aislante que contiene la resistencia eléctrica mediante un alambre muy fino en su interior y es pegada a la superficie de medida mediante adhesivo.

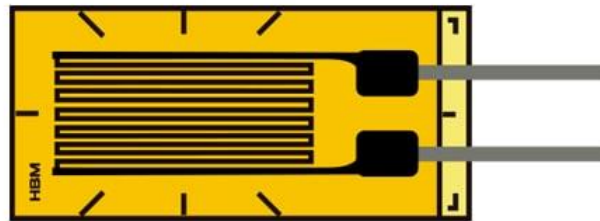


Figura 3-2. Morfología típica de una galga extensiométrica.

La temperatura es un fenómeno fundamental en la medida. Por ello, es imprescindible resetear el valor cero de la medida cuando se conoce o considera la inexistencia de deformaciones. Típicamente la señal tiene bastante ruido y, para una medida adecuada este ruido debe encontrarse muy por debajo del rango de medida del sensor. Y, por último, se debe tener en cuenta el factor de galga, que depende del proceso de fabricación, siendo usado para la conversión de la medida eléctrica al valor de deformación que le corresponde. El factor de galga de los sensores utilizados en este trabajo es 2,03 y la resistencia de 350  $\Omega$ .

### 3.3 Ubicación de los sensores

El número y posición de los sensores es una parte esencial del correcto funcionamiento del Gemelo Digital. También debe tenerse en cuenta que no todas las ubicaciones tienen viabilidad técnica para realizarse medidas, por ejemplo, no es posible medir deformaciones cortantes o deformaciones en el espesor. Y, por último, aparecen limitaciones por la morfología de la galga que hacen imposible la medida de zonas poco accesibles, como los bordes, o zonas irregulares, como las soldaduras.

En definitiva, se deben elegir zonas accesibles cuya medida sea representativa para la reconstrucción del campo de deformaciones del Gemelo Digital atendiendo a las limitaciones intrínsecas al sensor utilizado.

Dado que la tarjeta de adquisición de datos tiene capacidad para 8 galgas extensiométricas se ha decidido instalar dicha cantidad en zonas estratégicas o representativas del modelo. Dichas ubicaciones se muestran con detalle en el "Anexo B. Plano de ubicación de las galgas extensiométricas"

### 3.4 Instalación de los sensores

La instalación de galgas extensiométricas es un proceso sencillo que requiere limpieza, paciencia y cuidado para que las medidas sean adecuadas. La parte más importante del proceso es la preparación de una superficie lisa y limpia.

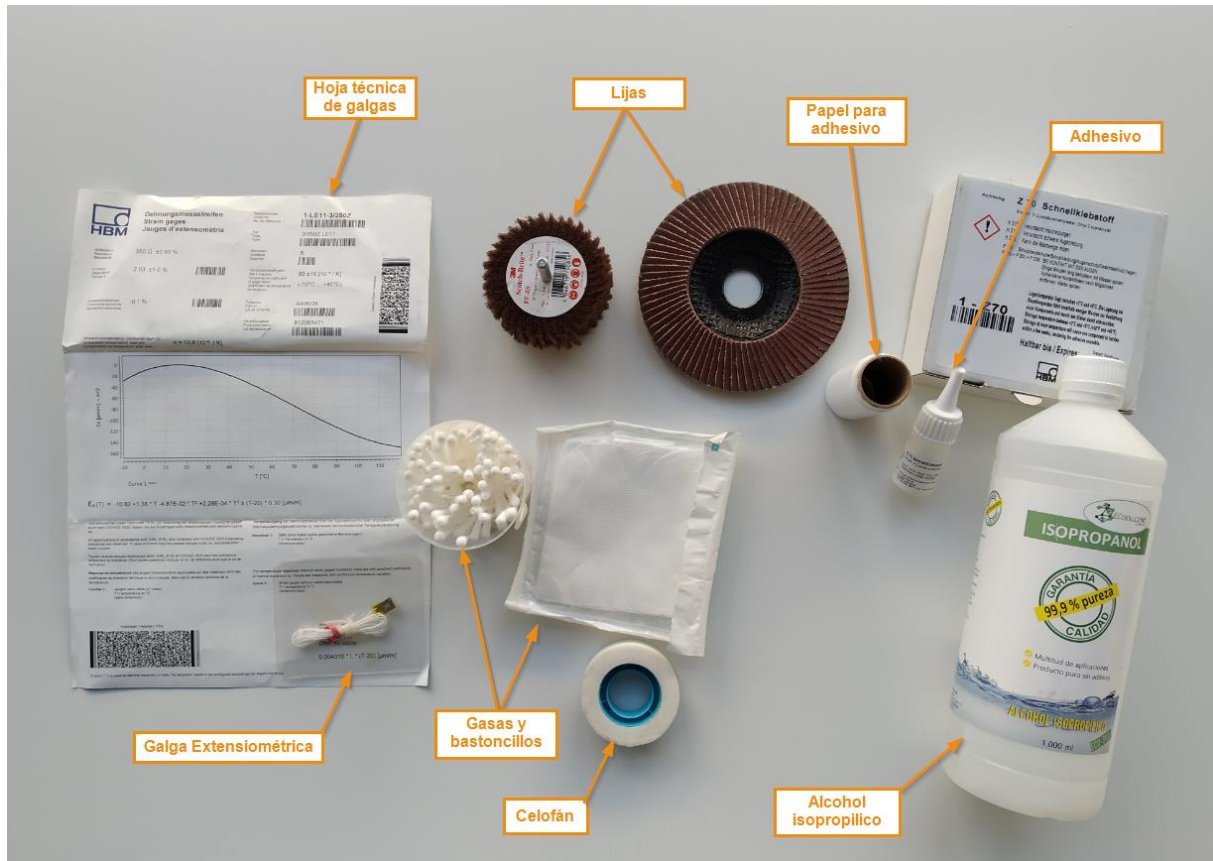


Figura 3-3. Elementos utilizados para la instalación de sensores.

El proceso de instalación consta de los siguientes pasos:

1. Lijado de la superficie. Mediante el uso de lijas de diferente graduación se debe alisar la superficie donde se ubicará la galga. Ideal aspecto espejo del metal.



Figura 3-4. Lijado de superficie de ubicación de la galga.



2. Limpieza de superficie. Se recomienda el uso de acetona o alcohol isopropílico para la limpieza de la superficie mediante gasas o bastoncillos de algodón para retirar los residuos del proceso de lijado.
3. Preparación de la galga. En la cara de la galga que son visibles los cables soldados del sensor, se pega un trozo de celofán doblado por uno de sus extremos. Posteriormente, se corta el celofán siguiendo los bordes de la mitad de la galga con un bisturí o similar. Este celofán permite posicionar la galga en la posición deseada, pero con la libertad suficiente para modificar la posición y acceder a la cara de pegado.



Figura 3-5. Posicionamiento de la galga previo al pegado.

4. Pegado de la galga. Por la cara que queda libre se deposita un poco de adhesivo y mediante el uso de papel de adhesivo se realiza cierto nivel de presión durante un minuto sobre la galga. Este papel de adhesivo evita que los dedos con los que realizamos la presión queden adheridos por el efecto del pegamento. La cantidad de pegamento es muy pequeña, ya que al presionar se extiende por toda la superficie de la galga.

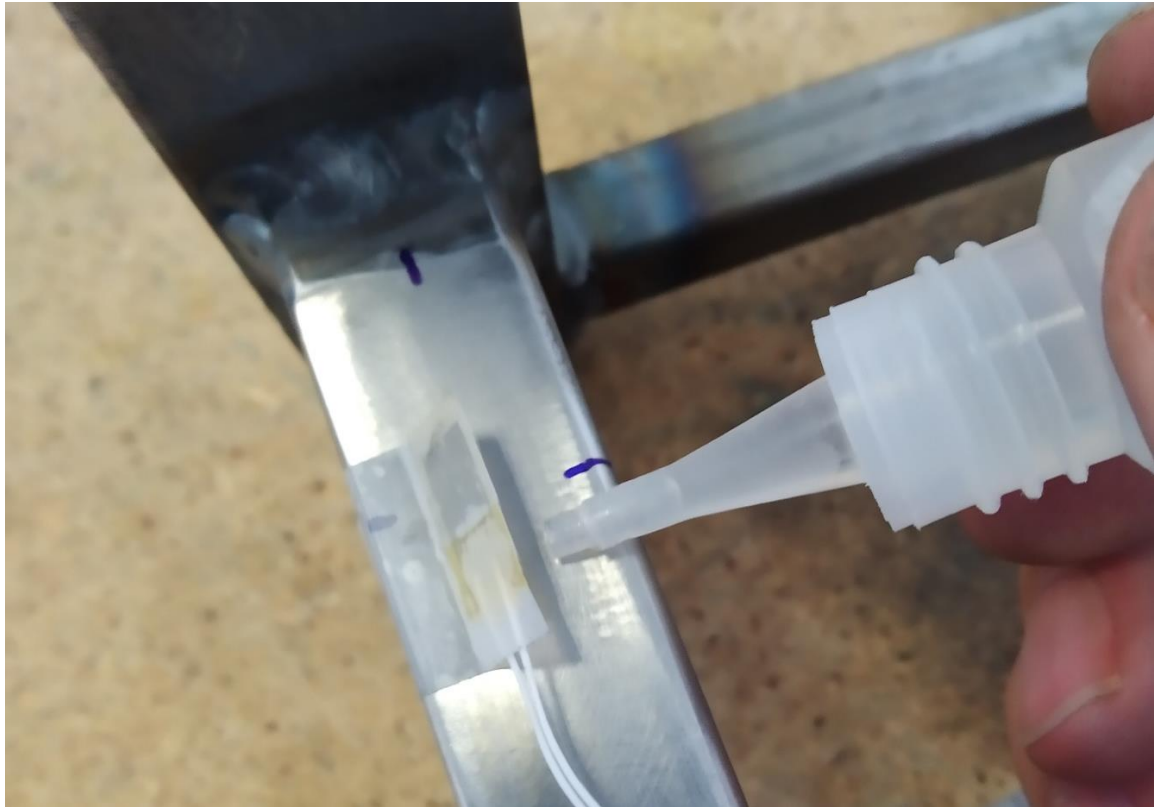


Figura 3-6. Colocación del adhesivo en la galga.



Figura 3-7. Aprisionamiento con el dedo durante el secado del adhesivo.

5. Retirado del celofán. Por la parte del celofán doblado que ha quedado libre, se retira dicho celofán con cuidado. En este momento podemos comprobar que la galga ha quedado correctamente pegada si no se mueve durante el proceso de retirada del celofán.
6. Sujeción del cable. Para evitar esfuerzos sobre la galga por tirones del cable es recomendable el pegado del cable a la estructura en zonas cercanas.

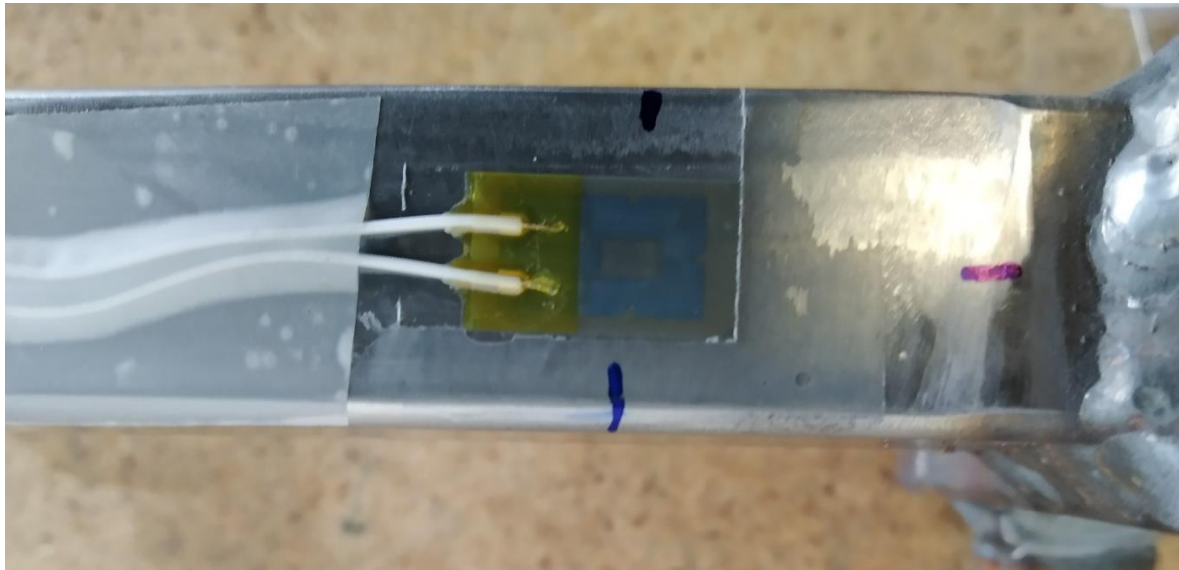


Figura 3-8. Galga extensiométrica instalada en la estructura.

Una vez instaladas las galgas extensiométricas sobre las superficies de la estructura es necesario realizar el correcto cableado de las mismas en el adquisidor de datos.

En este trabajo se ha utilizado “National Instruments” como adquisidor de datos. Esta tecnología consta de un módulo donde colocar diferentes tipos de tarjetas que por medio de cable ethernet se comunica con un ordenador. Y, una aplicación nos permite la configuración de los canales de datos.

Para la adquisición de datos de galgas se ha utilizado la tarjeta “NI 9236” dedicada a galgas extensiométricas de 350  $\Omega$  en configuración de cuarto de puente (National Instruments tiene disponibles otras tarjetas para resistencias de 120  $\Omega$  y/o otras configuraciones de medio puente o puente completo).

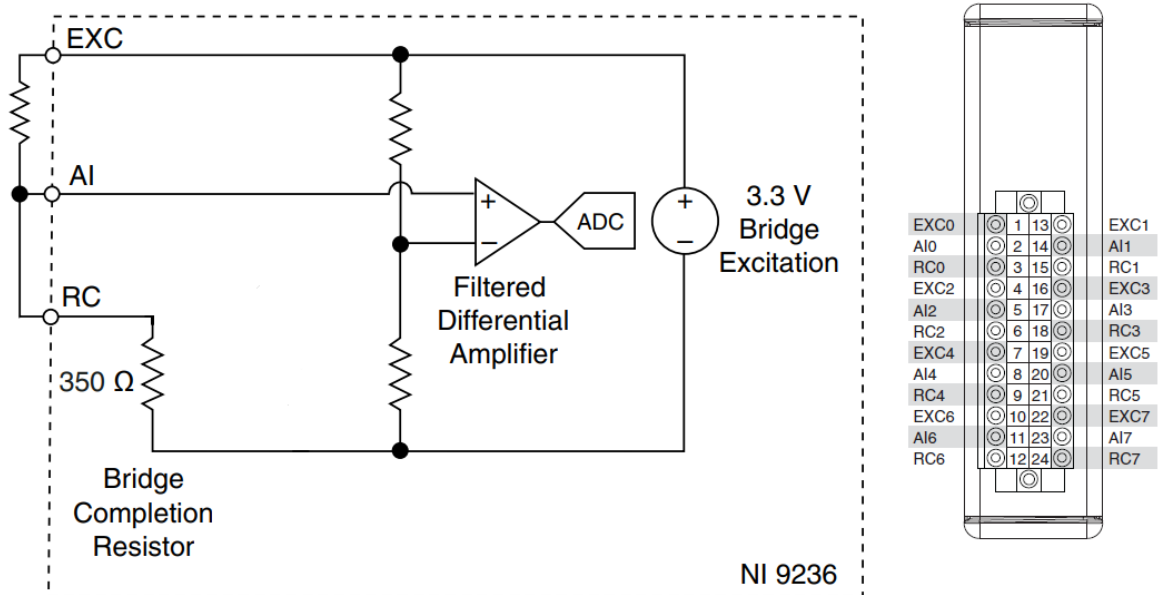


Figura 3-9. Diagrama de cableado de galgas en tarjeta del adquirente de datos.

En la Figura 3-9 la parte encuadrada con línea discontinua del diagrama se corresponde con la electrónica interior de la tarjeta y la galga viene representada por una resistencia fuera de este cuadro. Por tanto, de los dos cables de la galga extensiométrica uno de ellos va a la excitación designada por “EXC” y el otro cable va conectado tanto al terminal “AI” como a “RC”.



Figura 3-10. Sistema adquirente de datos de los sensores.



## CAPÍTULO 4. FUNCIONAMIENTO DEL GEMELO DIGITAL

Previo a mostrar el funcionamiento del Gemelo Digital se realiza un pequeño montaje sobre una barra cuadrada de acero de 40x40x1.5 mm de sección y 500 mm de longitud con dos galgas extensiométricas diferentes en zonas muy cercanas en dicha barra.

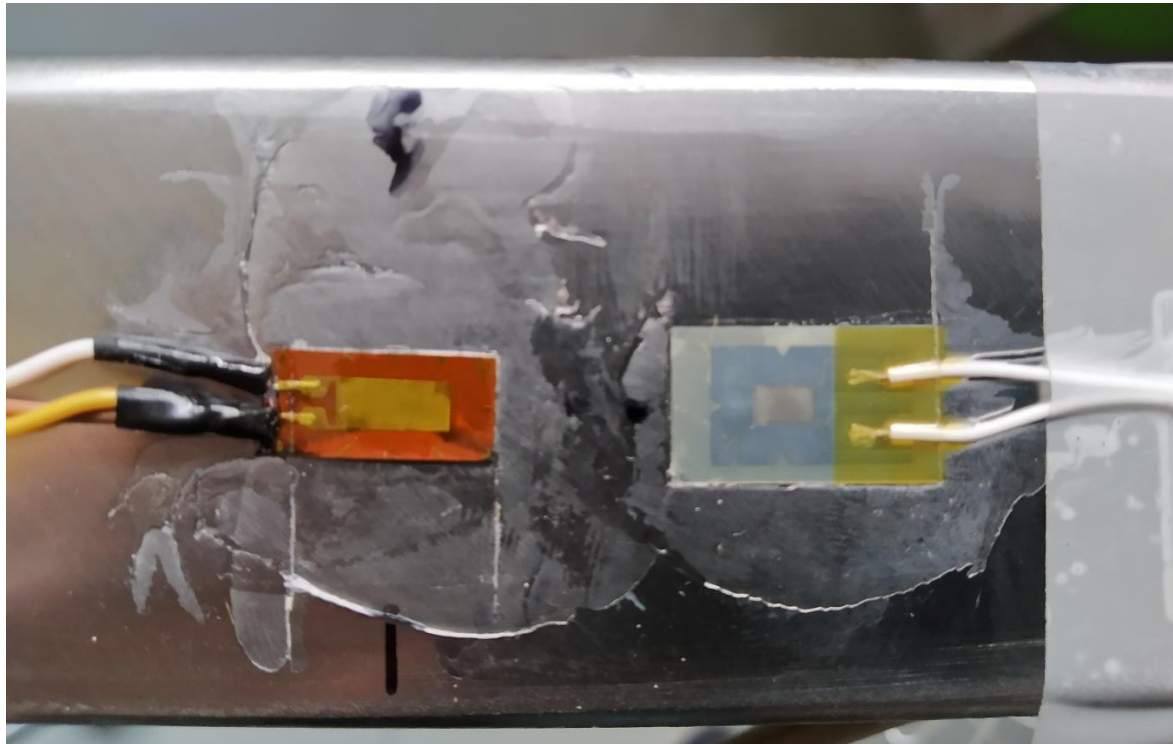


Figura 4-1. Montaje de verificación de medida de galgas extensiométricas.

El objetivo es comprobar que ambas galgas tienen diferencias de medida prácticamente despreciables y que un análisis estructural en ANSYS reproduce los resultados de deformación medidos. Además, el pegado de estas galgas sirve de introducción y primeras prácticas del proceso de instalación de los sensores.

Las condiciones de contorno dados en este sistema son: el empotramiento de la barra por uno de sus extremos, la colocación de las galgas a 170 mm del extremo empotrado y una carga distribuida de 4.5 kg en 115 mm desde el extremo libre de la barra. Bajo dichas condiciones las medidas de las galgas son unos  $20\mu\epsilon$ , es decir,  $2 \cdot 10^{-5}$  m/m. Dicho resultado se refleja en la Figura 4-2 extraído de los resultados de la simulación en ANSYS.

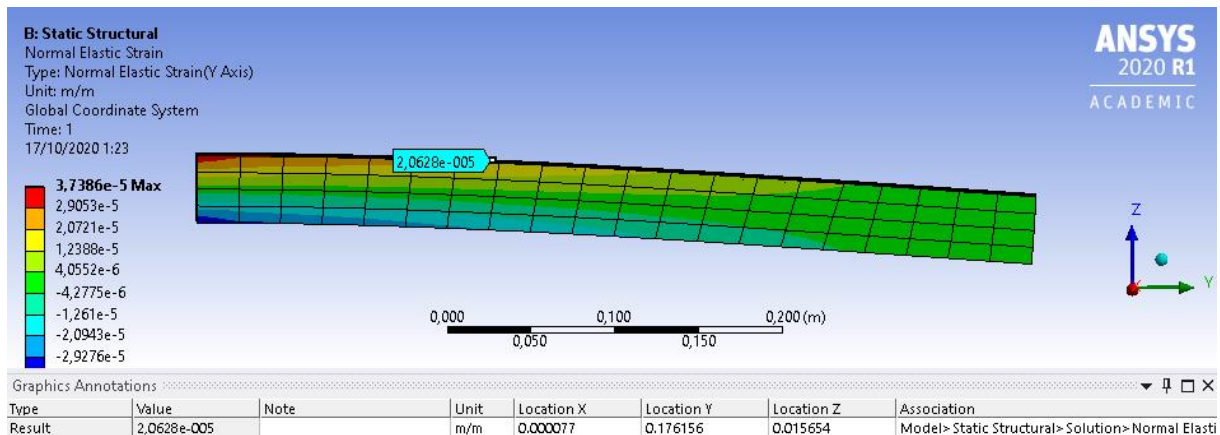


Figura 4-2. Verificación de medida de galgas extensiométricas frente a resultados de ANSYS.

Y en el mismo montaje se realiza la grabación de un sistema aleatorio de cargas dinámicas mediante el uso de una fuerza desconocida producida por un humano sobre el extremo libre de la barra. Con ello, se pretende verificar los tiempos de respuesta de las galgas ante esfuerzos dinámicos y las posibles diferencias de medida entre ambas galgas. A la vista de la Figura 4-3 se puede comprobar que las respuestas de ambas galgas tienen diferencias despreciables. Además, estas diferencias son coherentes con la disposición de las mismas, ya que una está levemente más cerca que la otra del extremo empotrado de la barra de pruebas, por lo que es esperable que mida deformaciones algo mayores.

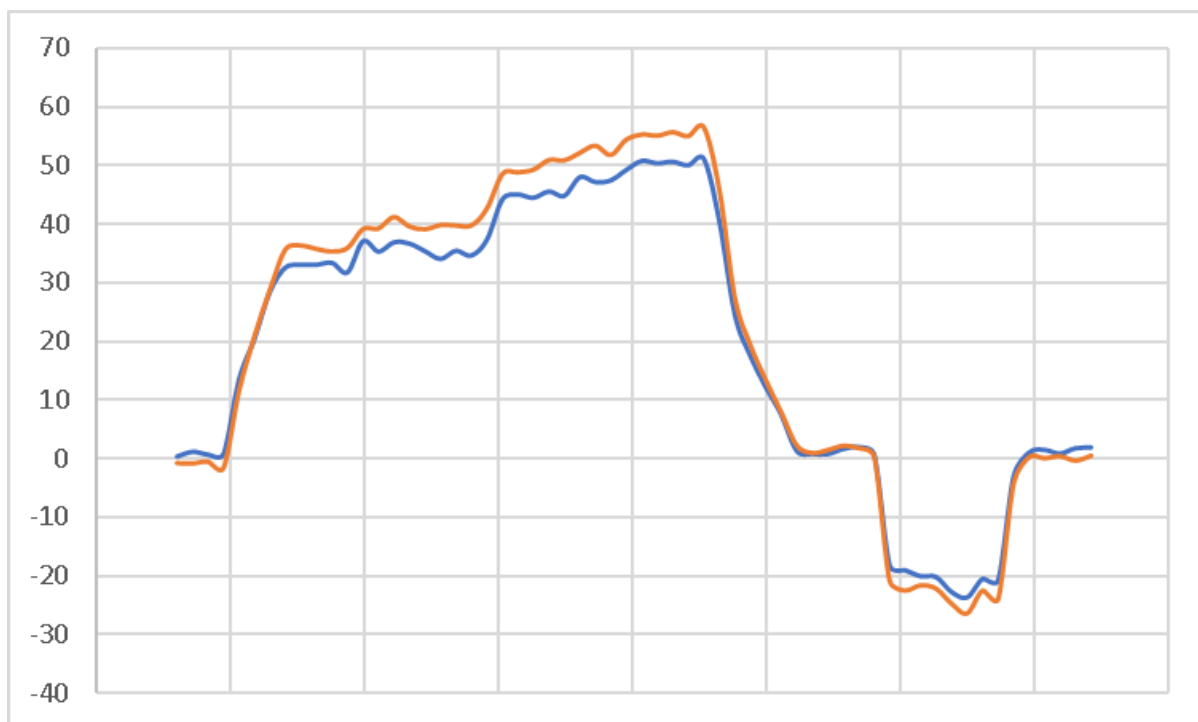


Figura 4-3. Diferencia de medida entre dos galgas próximas.

## 4.1 Ensayos de verificación

A continuación, se realizarán dos procesos de verificación diferentes del funcionamiento del Gemelo Digital: el simulado y el real. Los ensayos ejecutados son mostrados en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Ensayos para verificación del Gemelo Digital.

Carga	Descripción
Ensayo 1	Carga de 10 kg en la zona central de la viga.
Ensayo 2	Carga de 10 kg en el extremo de la viga de coordenadas Y positivas.
Ensayo 3	Carga de 10 kg en el extremo de la viga de coordenadas Y negativas.
Ensayo 4	Carga de 20 kg en la zona central de la viga.

Los datos de entrada del Gemelo Digital son los valores de medida de las galgas extensiométricas. Estos valores son utilizados por el Gemelo Digital para reconstruir el campo de deformaciones y calcular el campo de tensiones.

Por tanto, en la verificación simulada los datos de las galgas proceden de la resolución del problema en ANSYS, mientras que la verificación real los datos de las galgas vienen dados de los sensores realmente instalados en la estructura.

## 4.2 Verificación del Gemelo Digital simulado

En esta verificación del funcionamiento se pretende mostrar los resultados del cálculo de tensiones en el Gemelo Digital partiendo de resultados de deformaciones obtenidos en ANSYS. De esta forma, se elimina el posible error de medida de los sensores disminuyendo las incertidumbres del sistema.

### 4.2.1 Ensayo 1

Tabla 4-2. Valores de entrada del ensayo 1 procedentes de ANSYS.

Sensor	N28358	N18680	N32660	N27878	N30140	N45914
Valor	2,04E-05	2,03E-05	-1,47E-06	-1,49E-06	-1,46E-06	-1,43E-06

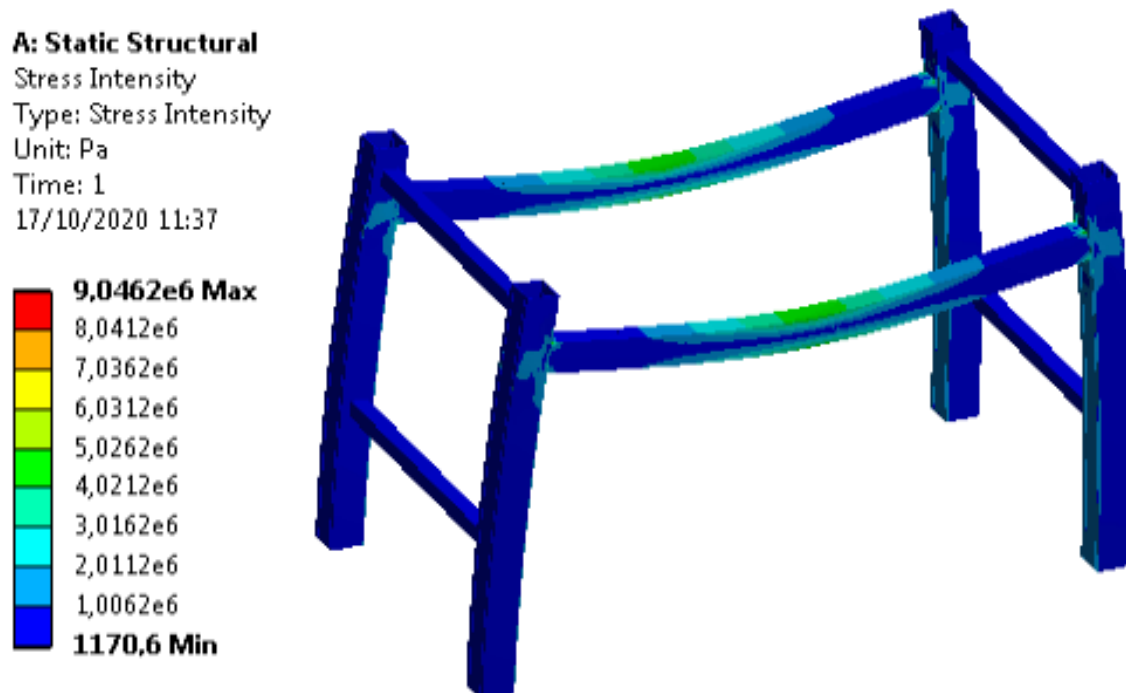


Figura 4-4. Resultado de tensiones de ANSYS en ensayo 1.

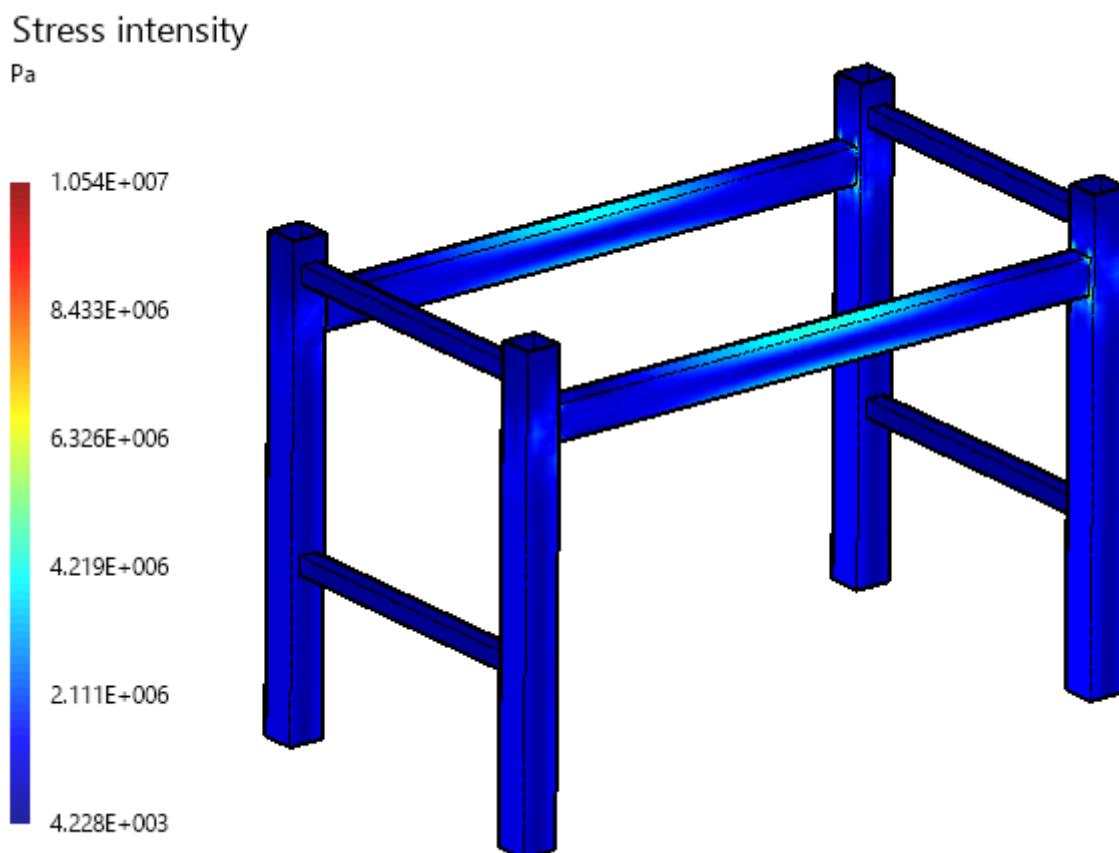


Figura 4-5. Resultado de tensiones de Gemelo Digital en ensayo 1.



### 4.2.2 Ensayo 2

Tabla 4-3. Valores de entrada del ensayo 2 procedentes de ANSYS.

Sensor	N28358	N18680	N32660	N27878	N30140	N45914
Valor	4,41E-06	4,42E-06	4,57E-06	4,58E-06	-7,45E-07	-7,39E-07

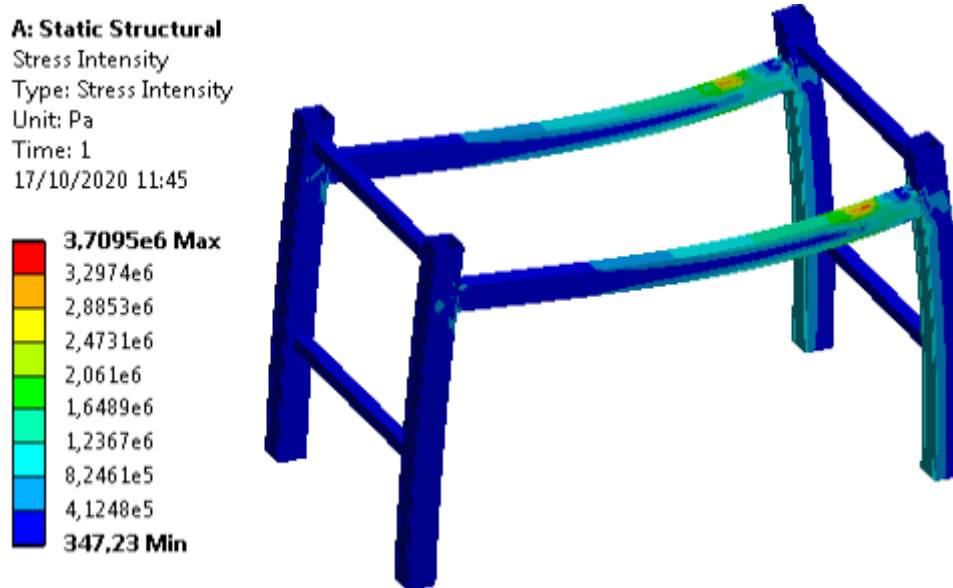


Figura 4-6. Resultado de tensiones de ANSYS en ensayo 2.

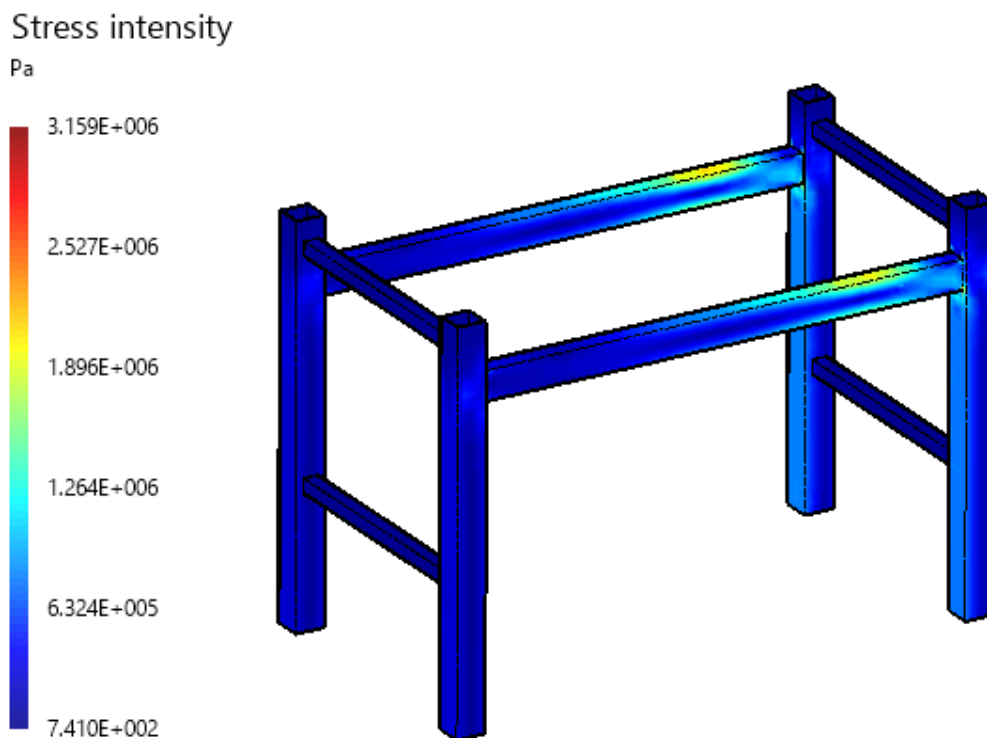


Figura 4-7. Resultado de tensiones de Gemelo Digital en ensayo 2.

### 4.2.3 Ensayo 3

Tabla 4-4. Valores de entrada del ensayo 3 procedentes de ANSYS.

Sensor	N28358	N18680	N32660	N27878	N30140	N45914
Valor	4,42E-06	4,42E-06	-7,52E-07	-7,59E-07	4,56E-06	4,57E-06

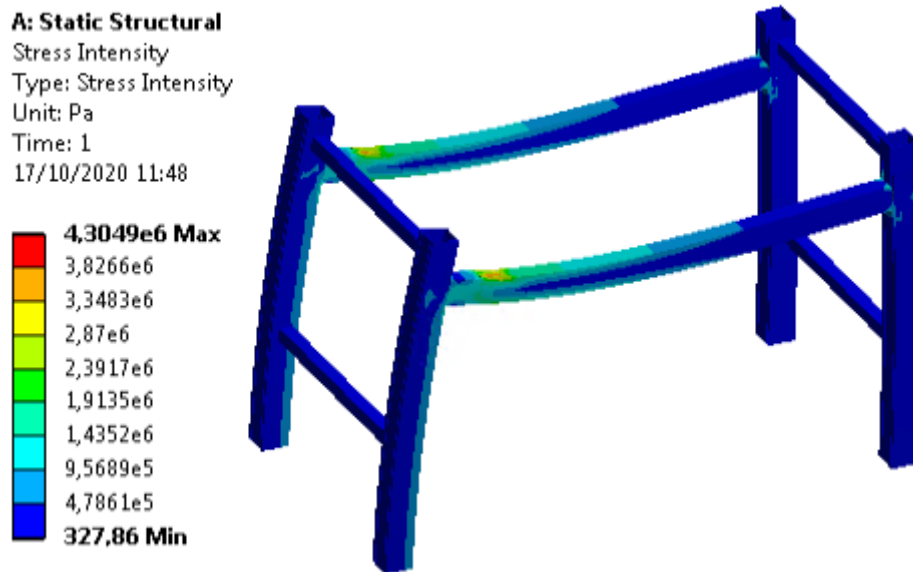


Figura 4-8. Resultado de tensiones de ANSYS en ensayo 3.

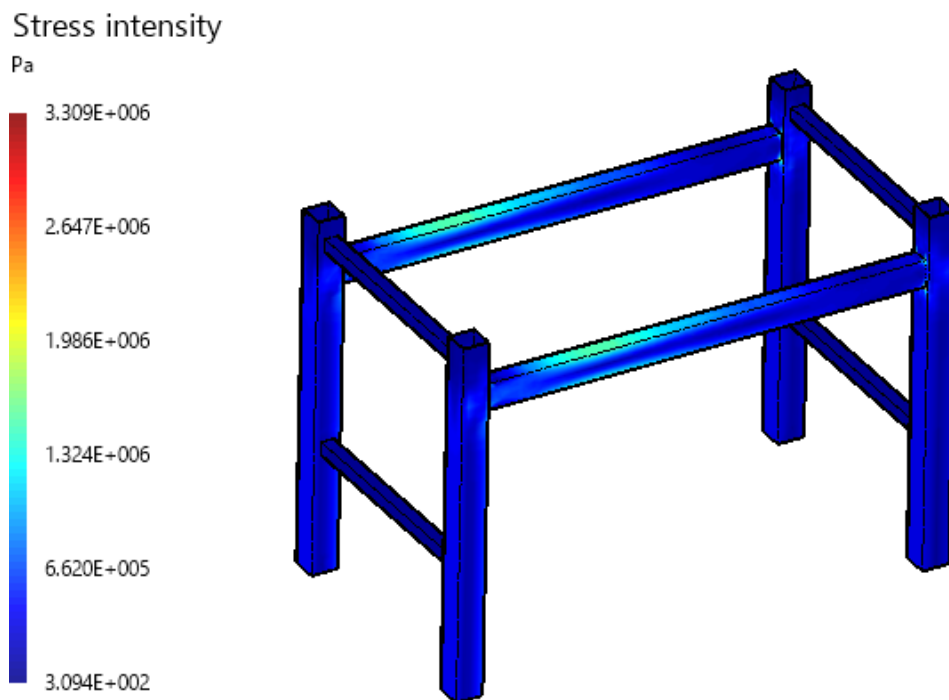


Figura 4-9. Resultado de tensiones de Gemelo Digital en ensayo 3.

### 4.2.4 Ensayo 4

Tabla 4-5. Valores de entrada del ensayo 4 procedentes de ANSYS.

Sensor	N28358	N18680	N32660	N27878	N30140	N45914
Valor	4,08E-05	4,06E-05	-2,94E-06	-2,99E-06	-2,91E-06	-2,87E-06

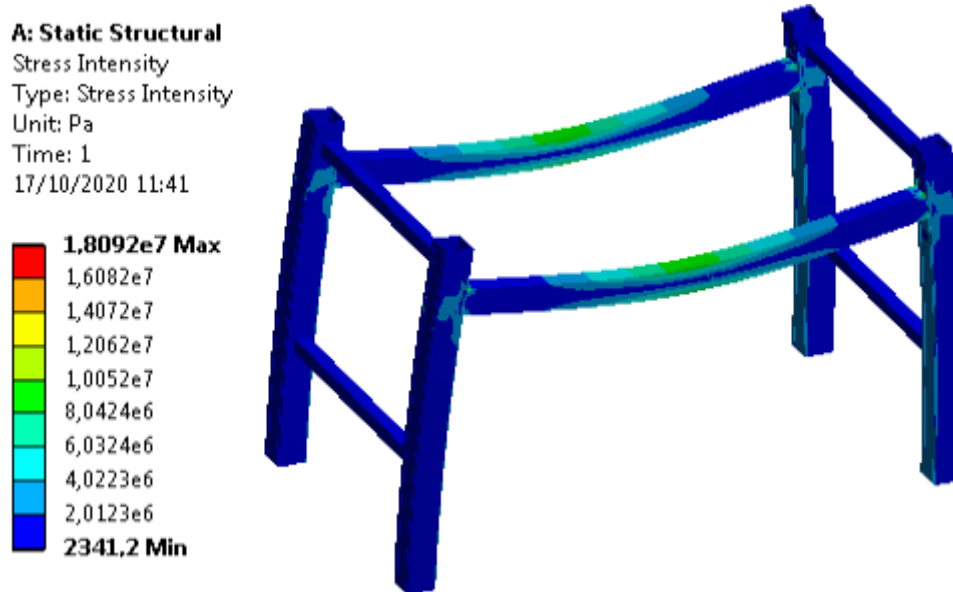


Figura 4-10. Resultado de tensiones de ANSYS en ensayo 4.

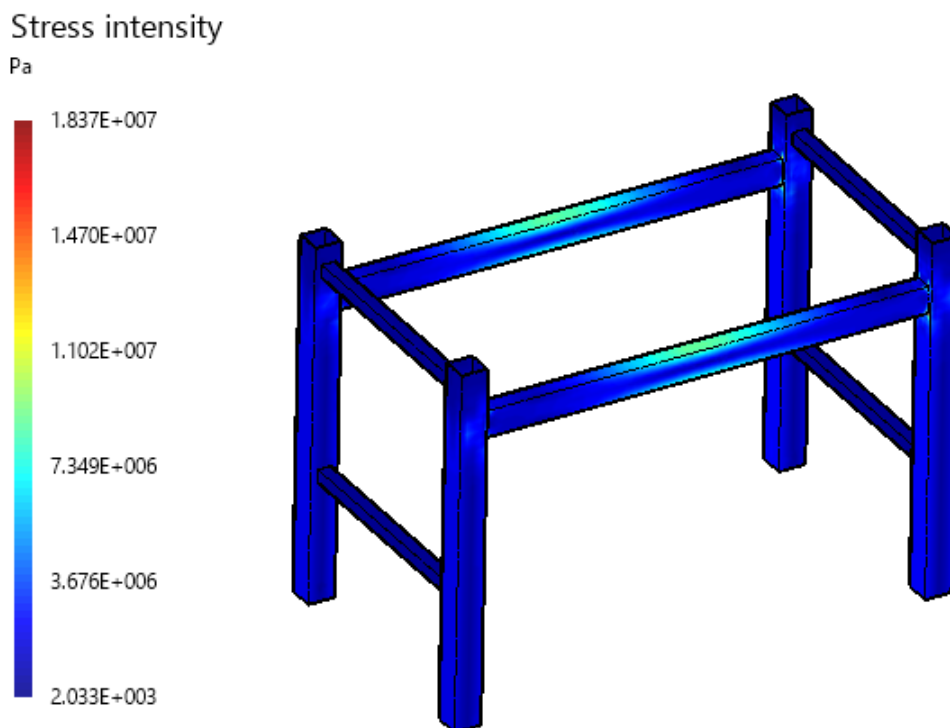


Figura 4-11. Resultado de tensiones de Gemelo Digital en ensayo 4.

### 4.3 Verificación del Gemelo Digital real

En este apartado se realiza los ensayos reales de la estructura y se guardan las medidas de las galgas extensiométricas para su posterior incorporación como datos de entrada en el Gemelo Digital.

#### 4.3.1 Ensayo 1

Tabla 4-6. Comparación valores de entrada del ensayo 1.

Sensor	N28358	N18680	N32660	N27878	N30140	N45914
Valor ANSYS	2,04E-05	2,03E-05	-1,47E-06	-1,49E-06	-1,46E-06	-1,43E-06
Valor medido	-	1,27E-05	-1,45E-06	7,06E-07	1,52E-06	-6,43E-07

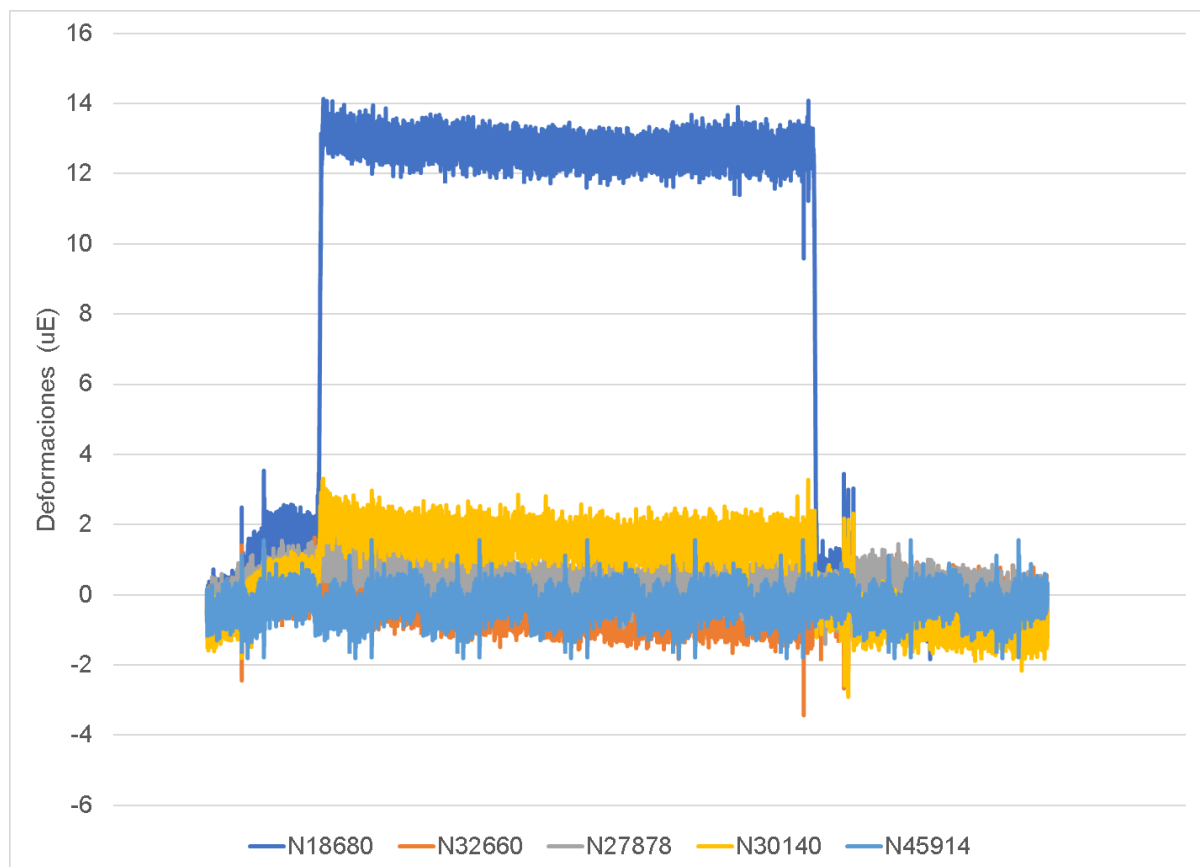


Figura 4-12. Gráfica de datos recogidos de los sensores durante el ensayo 1.

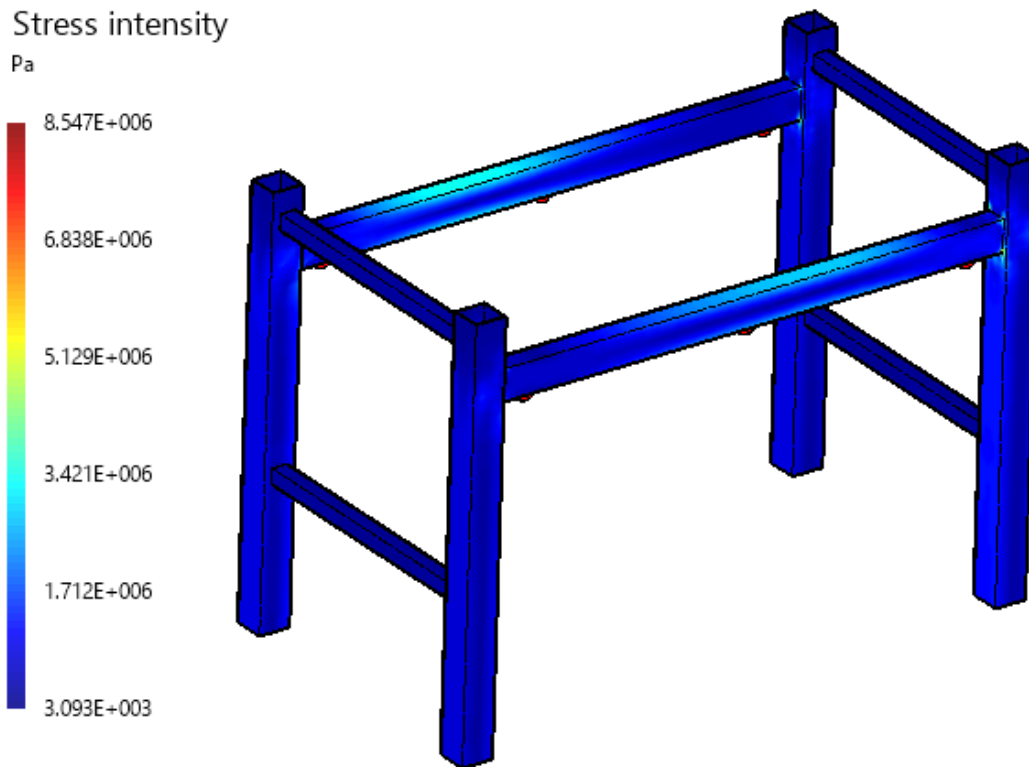


Figura 4-13. Resultado del Gemelo Digital para el ensayo 1 midiendo con los sensores.

### 4.3.2 Ensayo 2

Tabla 4-7. Comparación valores de entrada del ensayo 2.

Sensor	N28358	N18680	N32660	N27878	N30140	N45914
Valor ANSYS	4,41E-06	4,42E-06	4,57E-06	4,58E-06	-7,45E-07	-7,39E-07
Valor medido	-	1,30E-06	4,20E-06	-2,96E-06	2,40E-07	6,46E-07

En este ensayo al reproducir el campo de tensiones mostrado en la Figura 4-15 aparece un mayor nivel de tensiones en una viga que en su simétrica. En la realización de los ensayos se colocan pesos en la estructura procurando centrarlos lo máximo posible. A pesar de ello, puede existir un desequilibrio en la colocación de pesos, puesto que se hace de forma manual.

Además, puede apreciarse cierta pendiente en la Figura 4-14 cuando se supone que el sistema esta estático. Por lo tanto, la carga se encontraba en un estado de cierta inestabilidad, posiblemente por el desequilibrio en el proceso de colocación sobre la estructura.

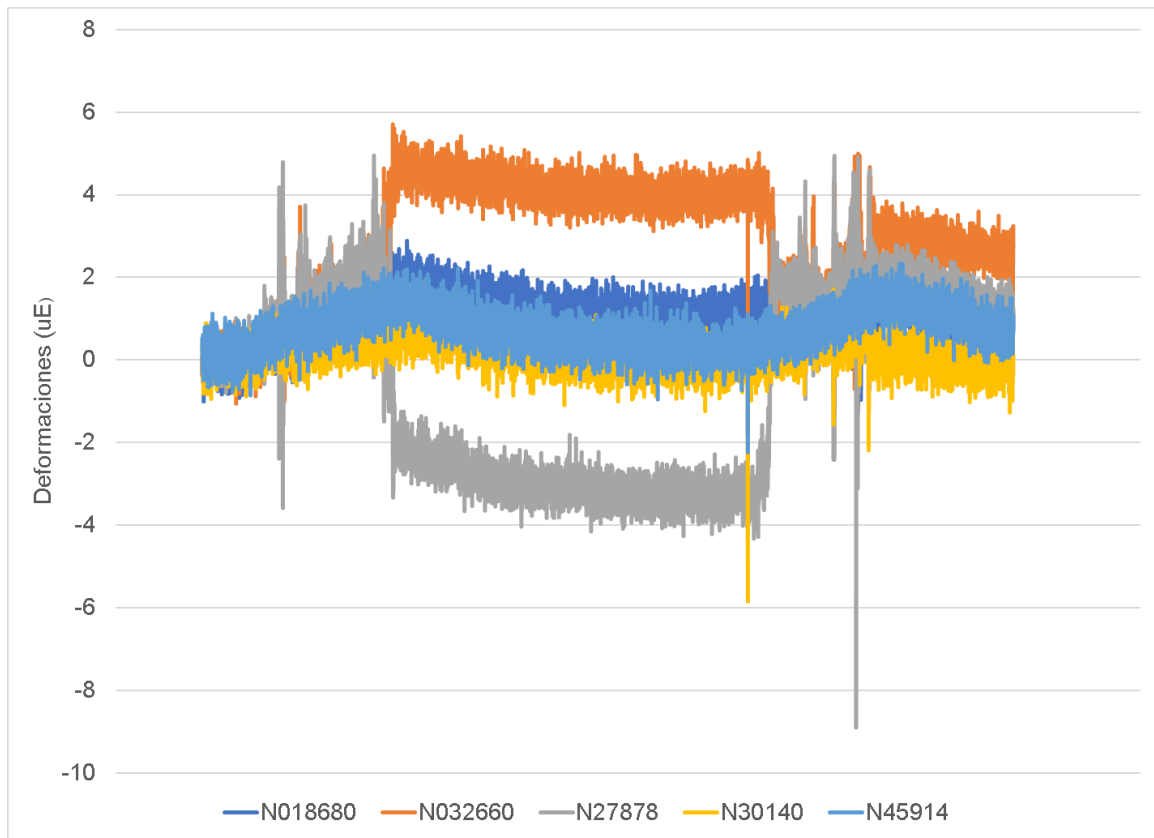


Figura 4-14. Gráfica de datos recogidos de los sensores durante el ensayo 2.

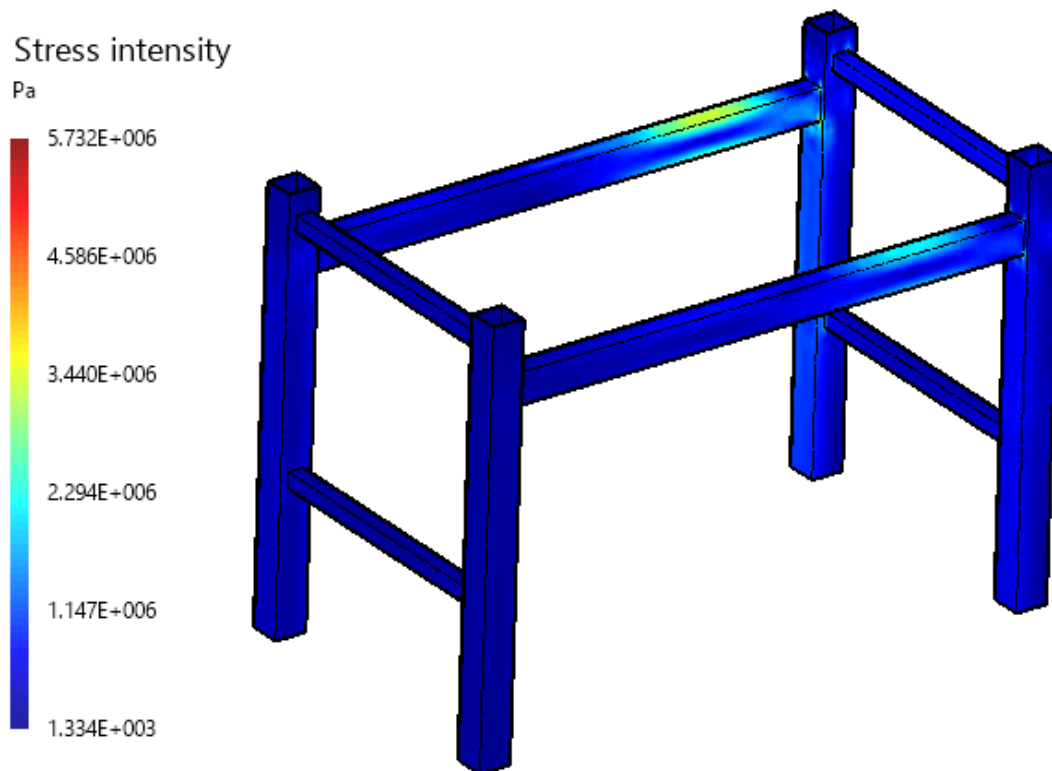


Figura 4-15. Resultado del Gemelo Digital para el ensayo 2 midiendo con los sensores.

### 4.3.3 Ensayo 3

Tabla 4-8. Comparación valores de entrada del ensayo 3.

Sensor	N28358	N18680	N32660	N27878	N30140	N45914
Valor ANSYS	4,42E-06	4,42E-06	-7,52E-07	-7,59E-07	4,56E-06	4,57E-06
Valor medido	-	4,75E-06	2,35E-07	4,26E-08	4,50E-06	3,51E-06

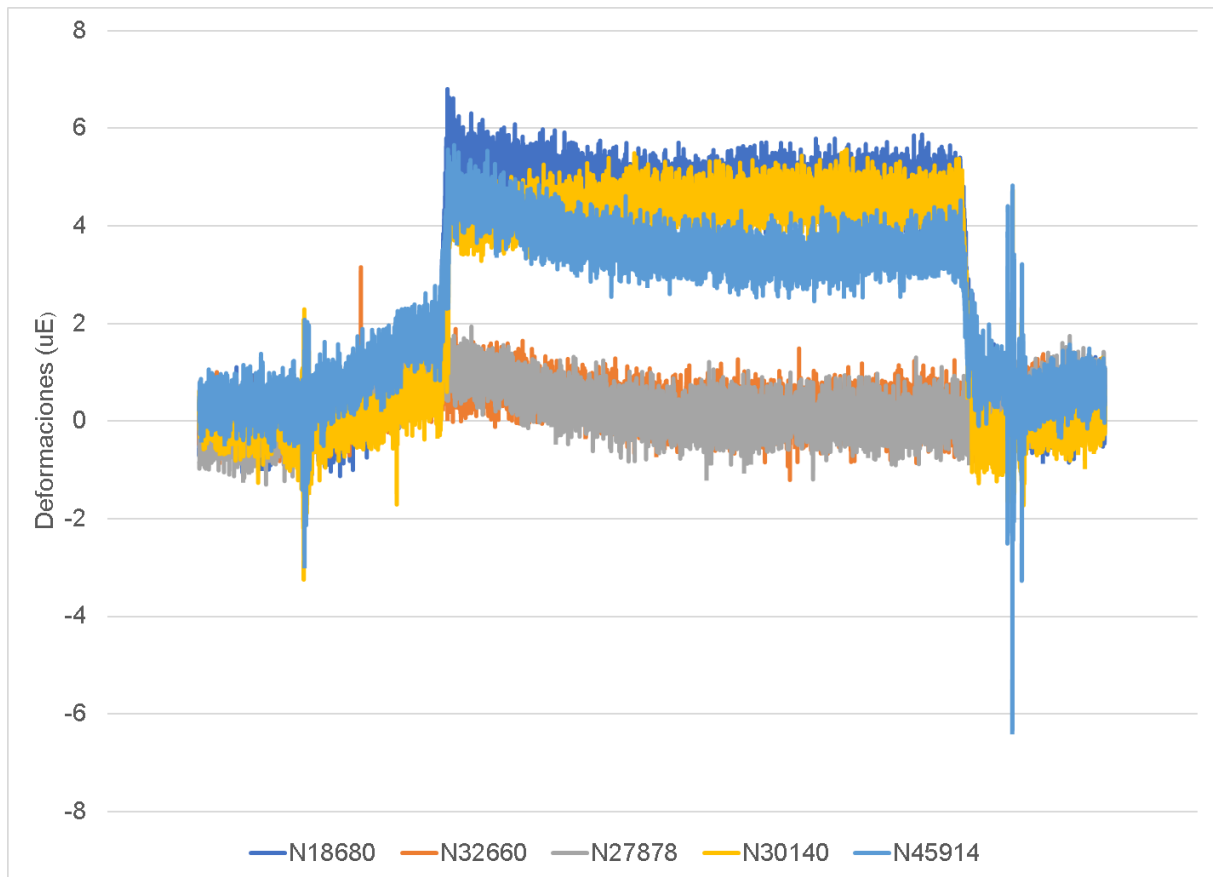


Figura 4-16. Gráfica de datos recogidos de los sensores durante el ensayo 3.

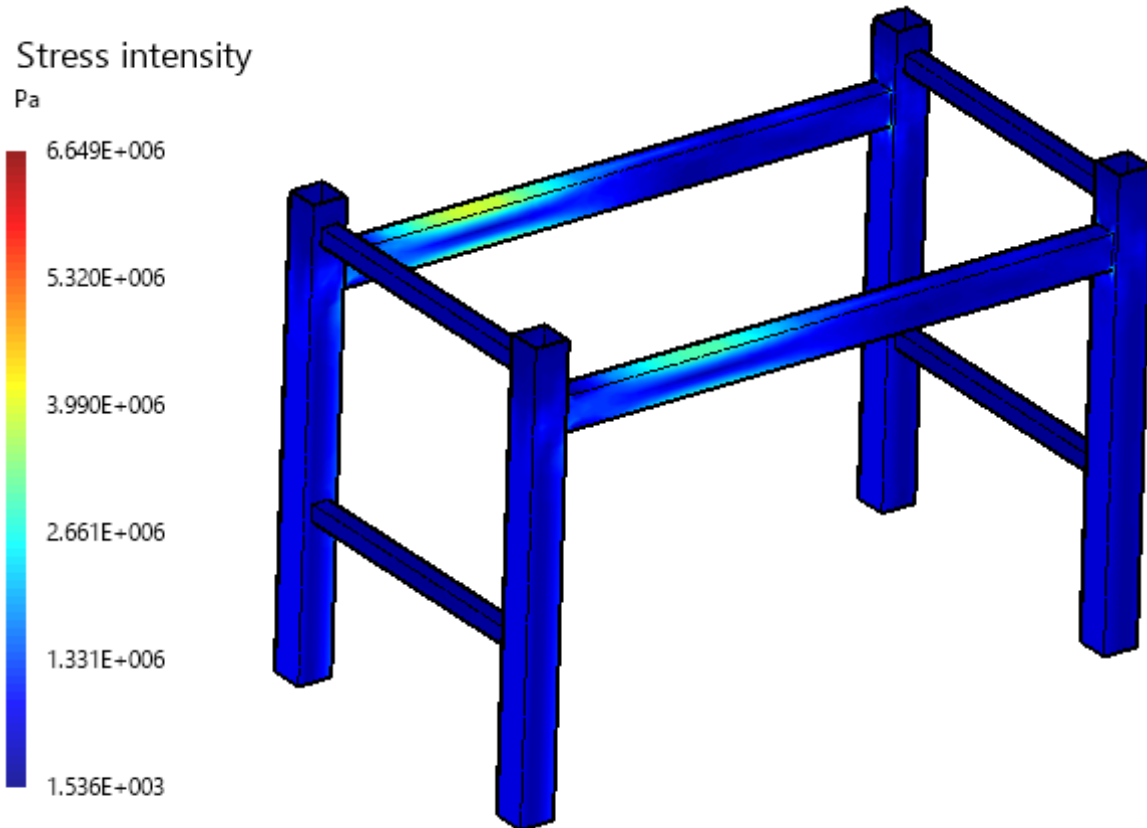


Figura 4-17. Resultado del Gemelo Digital para el ensayo 3 midiendo con los sensores.

#### 4.3.4 Ensayo 4

Tabla 4-9. Comparación valores de entrada del ensayo 4.

Sensor	N28358	N18680	N32660	N27878	N30140	N45914
Valor ANSYS	4,08E-05	4,06E-05	-2,94E-06	-2,99E-06	-2,91E-06	-2,87E-06
Valor medido	-	4,33E-05	-1,63E-05	-1,37E-05	3,33E-07	1,54E-06



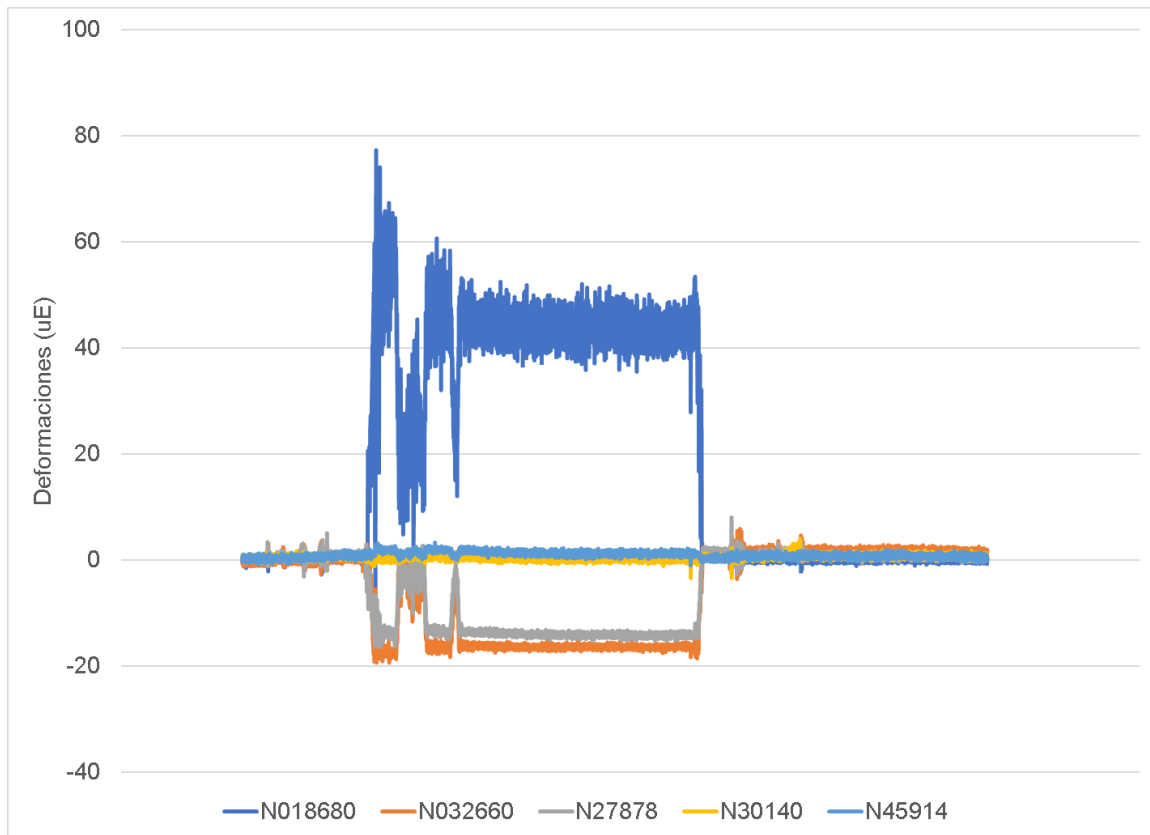


Figura 4-18. Gráfica de datos recogidos de los sensores durante el ensayo 4.

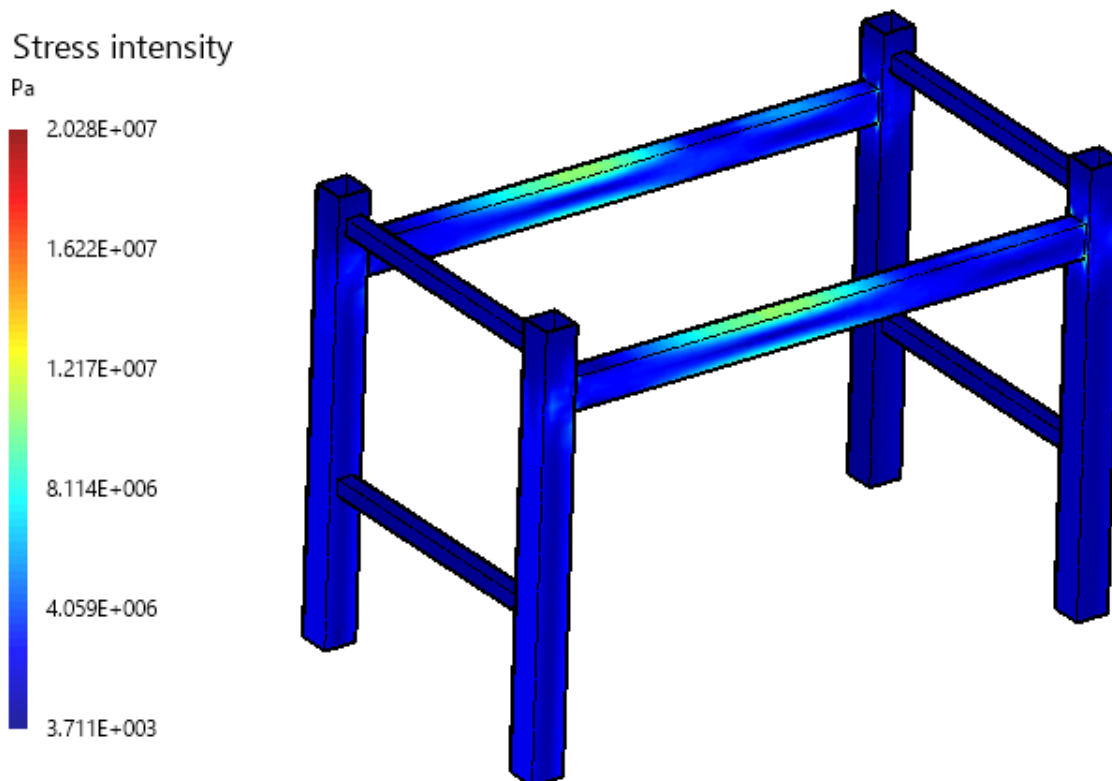


Figura 4-19. Resultado del Gemelo Digital para el ensayo 4 midiendo con los sensores.

## 4.4 Comentario de los resultados

A continuación, se comentan los resultados mostrados anteriormente durante la comprobación del funcionamiento del Gemelo Digital y las diferentes consideraciones llevadas a cabo durante dicho proceso.

### 4.4.1 Consideraciones respecto a los sensores

En primer lugar, se comprueba el funcionamiento del Gemelo Digital con valores de entrada procedentes de ANSYS para la reconstrucción de los campos de deformación y, el posterior cálculo de los campos de tensión. Este proceso además de verificar el funcionamiento, se utiliza para decidir la mejor ubicación de los sensores.

Tras la instalación de los sensores e introducir las lecturas de las galgas extensiométricas en el Gemelo Digital, en un primer análisis se comprueba que el comportamiento es errático. Tras analizar en mayor profundidad el origen de las posibles causas del fallo, se llega a la conclusión que la instalación de galgas en zonas donde existe un alto gradiente de deformación produce un alto grado de incertidumbre en el Gemelo Digital, que no tiene lugar durante la verificación con datos procedentes de ANSYS.

Este hecho se debe a que los datos de entrada procedentes de ANSYS tienen una localización exacta, ya que la malla de ANSYS y del Gemelo Digital son idénticas. Y, se toman los valores de entrada del nodo donde se debe colocar la galga. La instalación de la galga sobre la estructura puede tener cierto grado de error en el posicionamiento final, que no tiene lugar en el modelo simulado de ANSYS. Este pequeño desplazamiento en una zona con bajo gradiente de deformación no supone un problema para la reconstrucción del campo de deformaciones, ya que el error cometido en la medida es menor. Aunque, si puede suponer una diferencia muy importante entre la medida esperable y la medida realizada en zonas donde existe un alto gradiente de deformación, es decir, la deformación varía mucho en distancias muy pequeñas.

Para disminuir errores debidos al posicionamiento final de las galgas, es recomendable no instalar galgas en zonas con alto gradiente de deformación. Por esta razón, se ha decidido desestimar las medidas aportadas por las galgas que miden en dirección Z o vertical en el ancho de la viga. Esta posición o medida era estratégicamente aceptable en la verificación del Gemelo Digital con valores de deformación procedentes de ANSYS, ya que no existía esta incertidumbre de las ubicaciones del sensor.

Por otro lado, la galga “N28358” ha sido algo dañada durante el proceso de instalación y tiene un leve comportamiento errático. Por lo que se ha decido retirar de los análisis de resultados, pero si se considera de importancia relevante para el Gemelo Digital.

#### 4.4.2 Análisis de errores

El error cometido en el Gemelo Digital con los valores de entrada procedentes de ANSYS se debe a:

- Número de Snapshots. Cuanto más completo queda definido el campo de soluciones del problema, mayor es la exactitud en la reproducción del campo de deformaciones, es decir, un mayor número de snapshots supone una disminución del error.
- Número de sensores.
- Ubicación de los sensores. Es fundamental que las posiciones sean representativas de la solución del problema. Aunque existen limitaciones para realizar medidas en ciertas ubicaciones y direcciones, que deben tenerse en cuenta.

Adicional al error anterior, se debe añadir el producido durante la medida de los sensores y, cuyas principales causas son:

- El posicionamiento de los sensores. Las galgas extensiométricas deben medir en la posición y dirección configuradas en el Gemelo Digital. Aunque, resulta inevitable pequeñas discrepancias en la posición y posibles desalineamientos en la dirección, que incorporan error al sistema.
- Error de medida. El uso de sensores incorpora al sistema un error por incertidumbre en la medida, que dependerá de la calidad de fabricación de los sensores, el sistema de adquisición de datos y otras causas de error comunes durante una medida (rango del sensor, ruido de la señal, interferencias electromagnéticas, etc.).

Por último, durante la realización de ensayos reales se pueden cometer errores ajenos al funcionamiento del Gemelo Digital, por considerar algunos ejemplos:

- Colocación de la carga sobre la estructura. El desequilibrio de la carga, movimientos dinámicos de la misma o su incorrecto posicionamiento, provocan que las condiciones de contorno esperadas o configuradas en ANSYS sean diferentes a las reflejadas en el ensayo.
- Incertidumbre de las cargas. Han sido utilizadas cargas calibradas en los ensayos, por lo que este error se considera despreciable,
- Variaciones geométricas. Debido a las tolerancias de fabricación aparecen discrepancias entre el modelo real y su representación 3D.

## CAPÍTULO 5. TRABAJOS FUTUROS

El presente Trabajo Final de Máster se muestra el Gemelo Digital de una pequeña estructura, en la cual se replica el campo de tensiones al someterla a diferentes condiciones de contorno.

Este Gemelo Digital se puede utilizar para realizar trabajos de mayor profundidad, entre los que se destacan:

- Análisis de sensibilidad del error cometido dependiendo de parámetros de configuración en el Gemelo Digital: (1) número de Snapshots, (2) número de sensores y (3) ubicación de los sensores.
- Análisis cuantitativo del error cometido asociado a (1) posicionamiento de los sensores, (2) desalineamiento de los sensores y (3) errores de medida.
- Monitorización *online* del Gemelo Digital. Este trabajo abarca casos estáticos de carga, pero puede realizarse la monitorización de cargas dinámicas y mostrar los niveles de tensión alcanzados a tiempo real.
- Monitorización de fatiga. El guardado histórico de los niveles de tensión que sufre la estructura puede ser utilizado para un análisis de fatiga en continuo. Y así, monitorizar la vida remanente de un sistema mediante Gemelos Digitales.
- Comprobar el funcionamiento del Gemelo Digital ante cargas de tipo vibratorio o sísmico.
- Incorporación de otros sensores al Gemelo Digital, como acelerómetros, y el análisis de cargas combinadas de tipo estático y dinámico.

Por otra parte, se amplían enormemente las posibilidades de realizar trabajos futuros si se incorporan otros fenómenos físicos a los Gemelos Digitales. Resulta especialmente interesante por su gran aplicabilidad, la reconstrucción de campos de temperatura.

A fin de proponer un ejemplo en esta línea, la creación de Gemelos Digitales de sistemas de tubería que se encuentran sometidos a cargas de presión y temperatura pueden tener un alto interés en la industria.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

En el presente Trabajo Fin de Máster se realiza el diseño y fabricación de una estructura de pequeñas dimensiones que simula la morfología de una grúa pórtico. Se garantiza su Integridad Estructural en fase de diseño por métodos convencionales. Además, en dicha estructura se instalan varias galgas extensiométricas para la monitorización de la Integridad Estructural del Componente mediante un Gemelo Digital.

El funcionamiento del Gemelo Digital queda verificado a lo largo del Capítulo 4. Fruto del análisis y experiencia del funcionamiento, se obtienen las siguientes conclusiones en el uso del Gemelo Digital:

- Las galgas extensiométricas deben instalarse en zonas cuya medida sea representativa de los fenómenos de deformación de la estructura y el gradiente de deformación sea moderado.
- La ubicación y cantidad de sensores es un problema en sí mismo siendo preciso un análisis de diferentes posibilidades. La solución adoptada determina un error en la reconstrucción del campo de deformaciones.
- El error cometido total depende de la capacidad de reconstrucción del Gemelo Digital y las medidas realizadas por los sensores. Por ello, se presentan por separado los resultados para valores ideales de entrada en el apartado 4.2 y valores de medida reales en el apartado 4.3.
- El diseño de la galga genera con el tiempo una alta variabilidad en el origen de medida, por ejemplo, cambios de temperatura modifican la resistencia de la galga y consecuentemente su medida. Por tanto, es necesario la puesta a cero de las galgas, cuando se tiene la certeza que no existen esfuerzos.

Dada la capacidad de replicar el campo de tensiones del Gemelo Digital a partir de sensores, se puede realizar una monitorización de la estructura que evite altos niveles de tensión y análisis realistas de la vida remanente de la estructura a procesos de fatiga.

En definitiva, el trabajo demuestra la posibilidad de realizar una monitorización continua de las tensiones alcanzadas en una estructura para garantizar su Integridad Estructural mediante Gemelos Digitales.

El enorme potencial, el gran campo por desarrollar y la gigantesca aplicabilidad de los Gemelos Digitales garantizan el interés de multitud de empresas e instituciones por esta herramienta. Fruto de este interés y proyectos de innovación adquirirá el potencial y desarrollo suficientes para que forma parte de nuestras vidas en un futuro próximo.

Por último, cabe reseñar que la elaboración del presente Trabajo Final de Máster ha servido para aplicar diferentes campos de conocimiento adquiridos durante la realización del propio máster.

En primer lugar, todos los conocimientos necesarios para la fase de diseño y fabricación del componente donde fue preciso conocimientos de “Materiales Estructurales” para selección de materiales, “Soldadura y Tecnologías de Unión” para aplicar el proceso de soldeo adecuado y “Procedimientos de Evaluación de la Integridad Estructural” para asegurar el diseño a fatiga del componente.

Y, en segundo lugar, “Simulación Numérica” para realizar todos los cálculos realizados en ANSYS, cuyos resultados han sido verificados utilizando conocimientos de “Teoría de la Elasticidad”, también aplicados en el funcionamiento del Gemelo Digital para construir el campo de tensiones a partir del campo de deformaciones.

## CAPÍTULO 7. REFERENCIAS

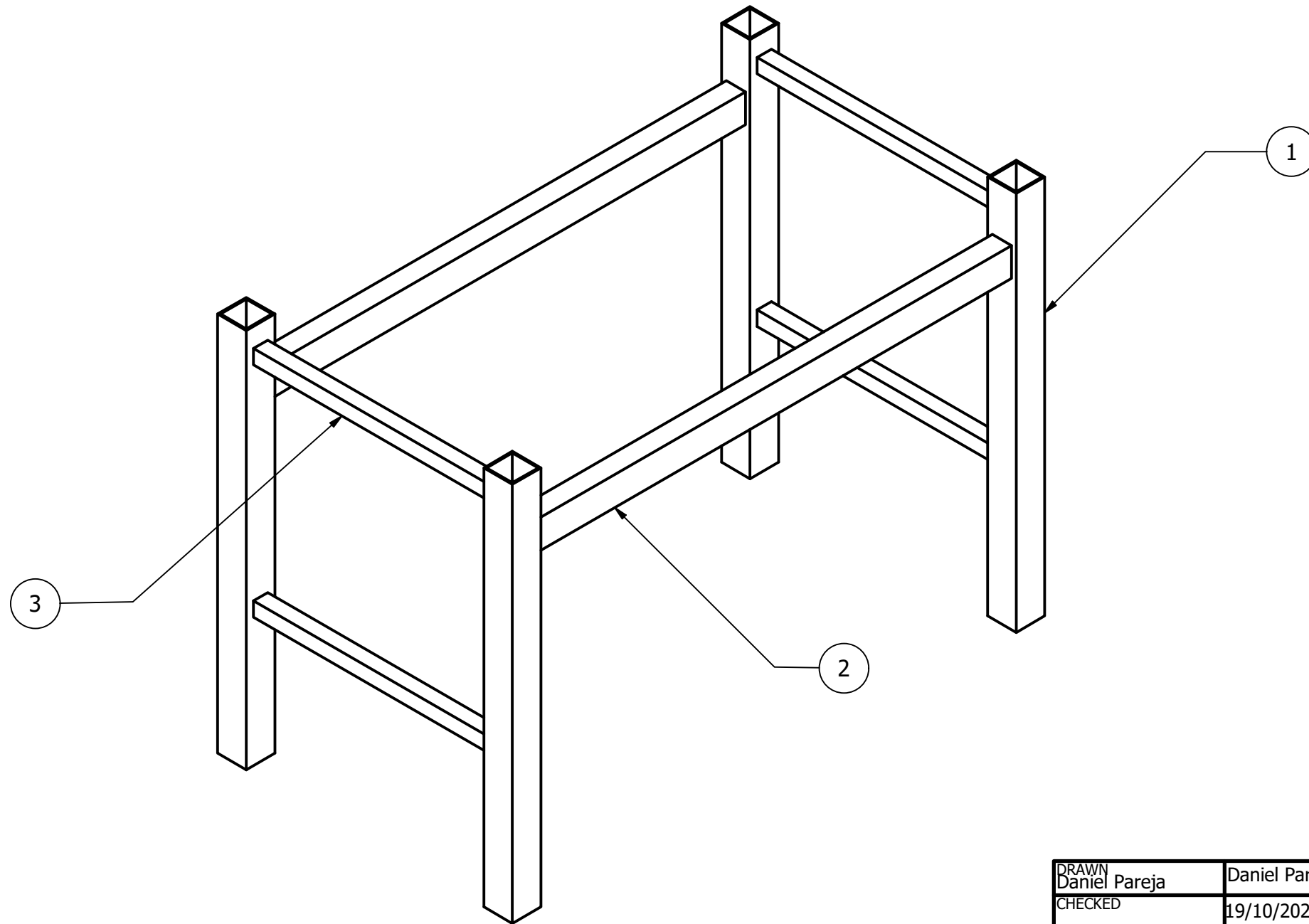
1. E. H. Glaessgen, D.S. Stargel. "The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles". Paper for the 53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin. 2012.
2. Francesco Saltari, Daniele Dessi, Franco Mastroddi. "Mechanical systems virtual sensing by proportional observer and multi-resolution análisis". 2019.
3. Peter Avitabile and Pawan Pingle. "Prediction of full field dynamic strain from limited sets of measured data". 2012.
4. Alexander Tessler, Jan L. Spangler. "A least-squares variational method for full-field reconstruction of elastic deformations in shear-deformable plates and shells". 2005.
5. Yumei Ye, Qiang Yang, Fan Yang, Yanyan Huo, Songhe Meng. "Digital twin for the structural health management of reusable spacecraft: A case study". 2020.
6. David A. Osage. "Fatigue Assessment for In-Service Components – A New Part for API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service". 6th Fatigue Design conference, Fatigue Design 2015.

---

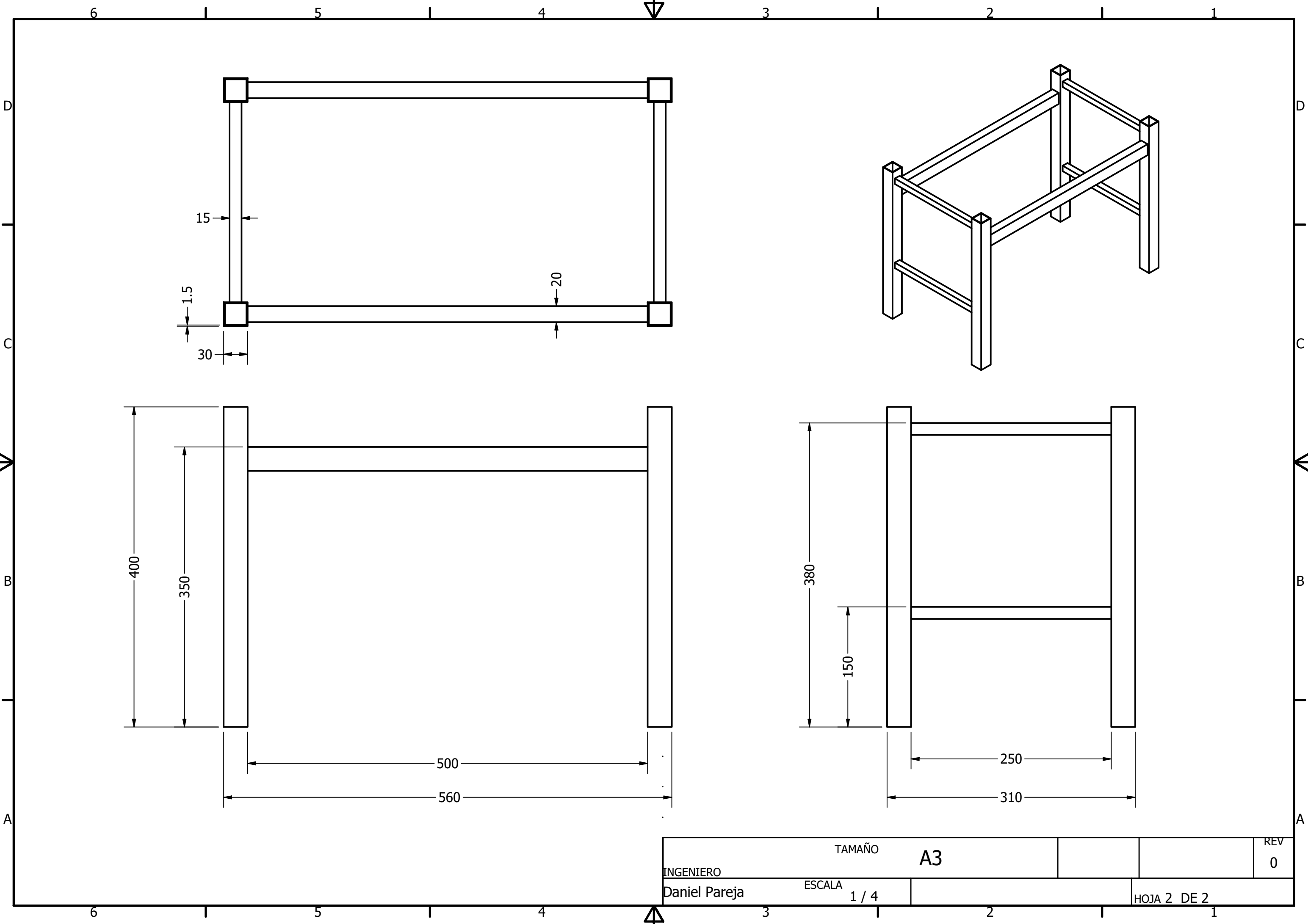
## ANEXO A. PLANO DE LA ESTRUCTURA



LISTA DE PARTES			
ITEM	CANTIDAD	PARTE	DESCRIPCIÓN
1	4	PERFIL VERTICAL	PERFIL CUADRADO DE ACERO FRÍO DE 30X30 MM Y 1.5 MM DE ESPESOR
2	2	PERFIL DE CARGA	PERFIL RECTANGULAR DE ACERO FRÍO DE 30X20 MM Y 1.5 MM DE ESPESOR
3	4	TRAVIESA	PERFIL CUADRADO DE ACERO FRÍO DE 15X15 MM Y 1.5 MM DE ESPESOR



DRAWN Daniel Pareja	Daniel Pareja	UNIVERSIDAD DE CANTABRIA		
CHECKED	19/10/2020	TITLE		
QA		DIMENSIONES Y PARTES DE ESTRUCTURA		
MFG	15/10/2020	SIZE	DWG NO	REV
APPROVED	19/10/2020	A3	ANEXO A	0
		SCALE	1:4	SHEET 1 OF 2



INGENIERO		TAMAÑO	A3	REV	0
Daniel Pareja		ESCALA	1 / 4	HOJA 2 DE 2	

---

## **ANEXO B. PLANO DE UBICACIÓN DE LAS GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS**

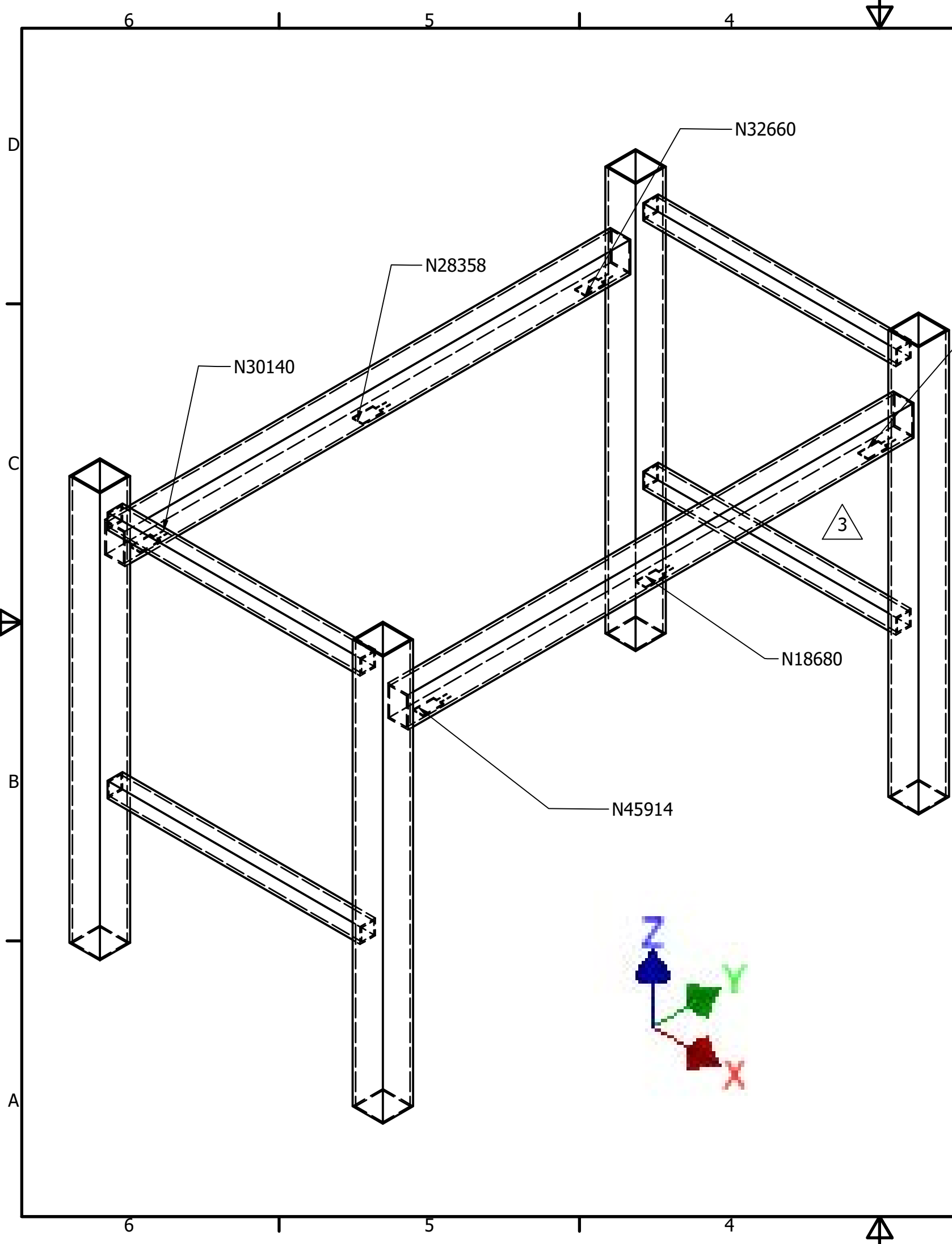
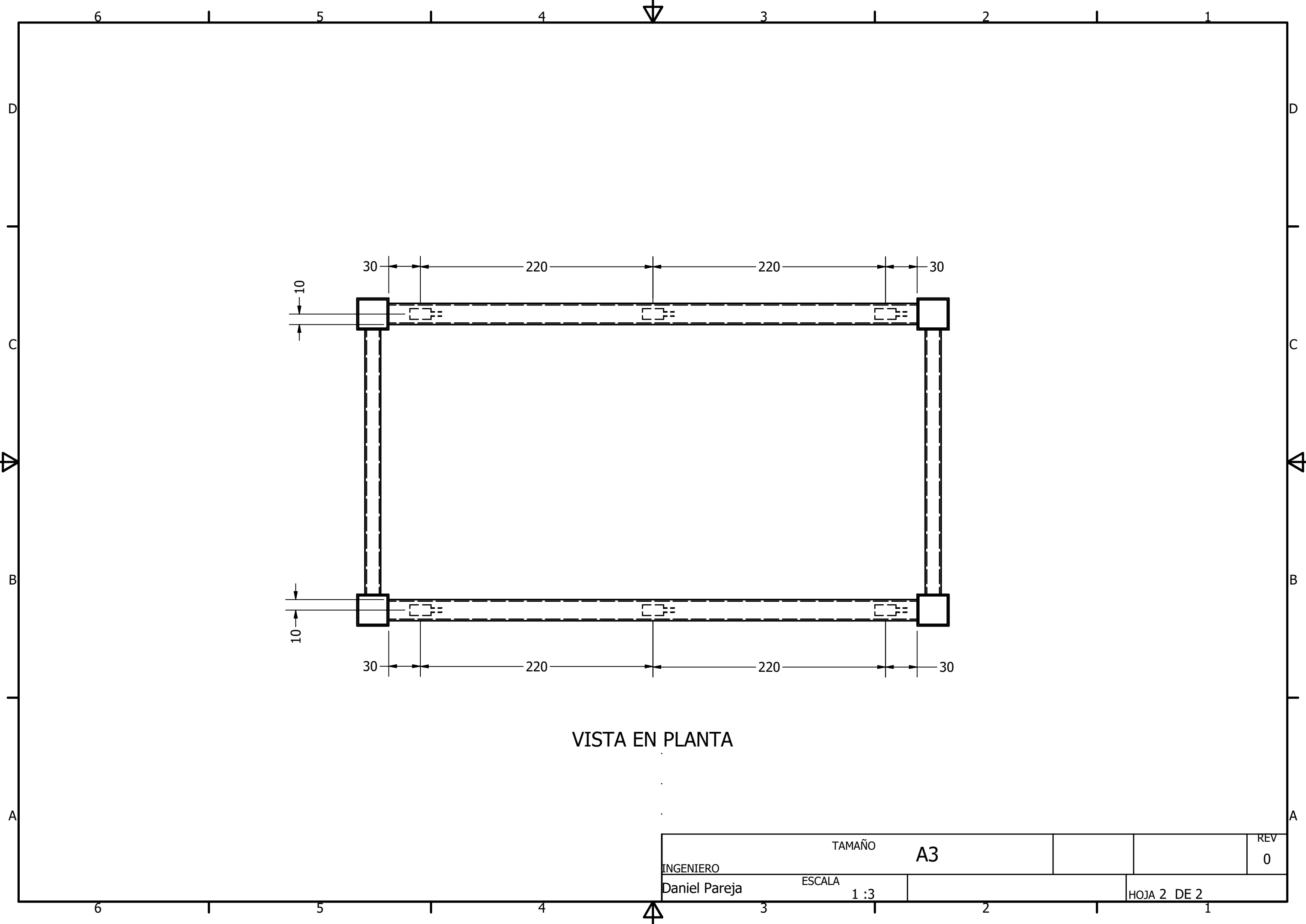


TABLE					
Sensor	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	Dirección	Canal
N28358	-140	0	320	YY	7
N18680	140	0	320	YY	1
N32660	-140	320	320	YY	4
N27878	140	320	320	YY	5
N30140	-140	-320	320	YY	0
N45914	140	-320	320	YY	3
N170079	-140	-90	335	ZZ	2
N55904	-140	90	335	ZZ	6

NOTAS:

1. EL ORIGEN DE COORDENADAS SE ENCUENTRA EN LA INTERSECCIÓN DE LOS DOS PLANOS DE SIMETRÍA DE LA ESTRUCTURA Y UN TERCERO A LA ELEVACIÓN DE APOYO CON EL SUELO DE LA ESTRUCTURA.
2. SE MUESTRA EL SISTEMA DE COORDENADAS UBICADO DE FORMA REPRESENTATIVA.
3. SALIDA DE CABLES AL ADQUISIDOR DE DATOS.
4. NO SE REPRESENTAN LAS GALGAS "N170079" Y "N55904" POR ESTAR FUERA DE LA CONFIGURACIÓN DEL GEMELO DIGITAL.

DIBUJADO	Daniel Pareja	UNIVERSIDAD DE CANTABRIA		
VERIFICADO		TÍTULO		
QA	19/10/2020	PLANO DE UBICACIÓN DE GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS		
MFG	15/10/2020	SIZE	NUMERACIÓN	REV
APROVADO	19/10/2020	A3	ANEXO B	0
		ESCALA	1:3	HOJA 1 DE 2



VISTA EN PLANTA

INGENIERO		TAMAÑO	A3		REV	0
Daniel Pareja		ESCALA	1 : 3		HOJA 2 DE 2	