

2019

Actividades de carácter no económico

Desarrollo y optimización de producto

Nº Expediente: IMAMCC/2019/1

Programa: Fondos GVA

Breve descripción.

Estructuras de material rodante y desarrollo de productos

Tabla de Contenidos

1.	Descripción y objetivo del entregable	3
2.	Datos básicos del proyecto	4
3.	Objetivos	5
4.	Resultados esperados	6
5.	Principales resultados obtenidos	7
5.1.	Análisis del estado del arte	7
5.1.1.	Extensometría.	7
5.1.2.	Análisis de elementos finitos.	8
5.2.	Análisis de la incertidumbre en la medida.	11
5.2.1.	Tipos de conexión de circuito de un cuarto de Puente de Wheatstone.	11
5.2.2.	Análisis de la incertidumbre en galgas de un cuarto de Puente de Wheatstone.	13
5.3.	Correlación de resultados	21
5.4.	Recomendaciones para la realización de los ensayos.....	24
5.4.1.	Temperatura del ensayo.	24
5.4.2.	Valores límite de deformación.....	24
5.4.3.	Compatibilidad electromagnética.	25
5.4.4.	Tipo de galga.	25
5.4.5.	Pegado de galgas	26
5.5.	Experiencias piloto	26
6.	Casos de estudio de interés	28
6.1.	Caso de Estudio 1: Estudio de correlación estructura.....	28
6.1.1.	Planteamiento del problema	28
6.1.1.	Realización del modelo de cálculo	29
6.1.2.	Realización del ensayo.....	31
6.1.3.	Análisis de resultados.	33
6.2.	Caso de Estudio 2: Estudio de correlación chapa conformada.....	34
6.2.1.	Planteamiento del problema	34
6.2.2.	Realización del modelo de cálculo	34
6.2.3.	Realización del ensayo.....	37
6.2.4.	Análisis de resultados	39
6.3.	Resumen de resultados	41
7.	Otras actividades desarrolladas en la línea de investigación.....	42
8.	Referencias bibliográficas	43

1. Descripción y objetivo del entregable

Dentro de la línea estratégica de actuación que lleva a cabo AIDIMME en el campo del desarrollo de productos y sistemas (diseño, cálculo, análisis, simulación, nuevas funcionalidades) se plantea la investigación y el desarrollo de un prototipo de plataforma de pruebas para el análisis, ensayo y validación de estructuras de material rodante.

El objeto del proyecto MATROD es, por tanto, poner en marcha una infraestructura de I+D flexible para dar apoyo a la realización de proyectos de diseño, simulación y análisis de estructuras de material rodante en los ámbitos del transporte ferroviario y por carretera.

El proyecto consta de una parte de estudio y desarrollo de herramientas y otra parte de experimentación para analizar la correlación de resultados de los especímenes estudiados con el objeto de mejorar y perfeccionar las herramientas y los procedimientos.

En este documento se incluye una recopilación de las principales tareas llevadas a cabo durante la ejecución del proyecto MATROD 2, con el objetivo de difundir sus resultados. Se recoge un resumen de los principales resultados obtenidos durante el año 2019.

2. Datos básicos del proyecto

PROYECTO: MATROD 2 (Construcción del prototipo de plataforma de pruebas; prueba y validación de procedimientos de análisis de material rodante; prueba y validación de herramientas de correlación.)

PROGRAMA EN EL QUE SE DESARROLLA:

Líneas de I+D independiente del Plan de Actividades de carácter no económico de AIDIMME 2019

LINEA ESTRATÉGICA:

DESARROLLO Y OPTIMIZACIÓN DE PRODUCTO. Desarrollo de productos y sistemas (diseño, cálculo, análisis, simulación, nuevas funcionalidades).

SUBLÍNEAS DE TRABAJO:

DOP1 Optimización funcional y topológica

DOP2 Modelado digital de productos y procesos

DOP3 Soluciones avanzadas de diseño para productos tradicionales

ACTIVIDADES DE I+D INDEPENDIENTES:

IVACE FONDOS FEDER	INTERSEAT
IVACE FONDOS FEDER	ERGO4.0
IVACE FONDOS FEDER	MEND-ME
IVACE FONDOS FEDER	WIREWOOD
IVACE FONDOS FEDER	CONTEFUR
FONDOS GVA 2019	MATROD 2

3. Objetivos

El objetivo final del proyecto es desarrollar una infraestructura dotada de una metodología y herramientas que permitan la consecución de proyectos de diseño, simulación y análisis de material rodante en los ámbitos del transporte ferroviario y por carretera. El desarrollo del proyecto persigue conseguir un entorno de trabajo que permita realizar una conexión entre las tareas comprendidas desde la fase de diseño hasta los ensayos de validación de manera directa y ágil. De esta forma se facilita la correlación de resultados permitiendo verificar y aumentando la confiabilidad de las herramientas y el conjunto del sistema.

Los objetivos específicos del proyecto en los dos años de duración se centran en el primer año en la obtención del modelo virtual de las estructuras piloto, la obtención del modelo virtual de las solicitaciones, la realización de los cálculos FE, la obtención del software específico de análisis de correlación y los procedimientos de análisis y pruebas. En el segundo año se continuó el trabajo de 2018, siendo los objetivos marcados para 2019 los que se detallan a continuación:

- Puesta en marcha de prototipo de plataforma de pruebas
- Realización de pruebas con versión final de software específico de análisis de correlación de datos.

4. Resultados esperados

El desarrollo del proyecto permite a AIDIMME disponer de una Infraestructura de I+D, específica para la obtención de conocimientos que permitan el estudio y mejora del comportamiento de material rodante en los ámbitos del transporte por carretera y ferroviario.

Dicha infraestructura se apoya en procedimientos específicos soportados por herramientas de simulación para la generación de modelos virtuales que permitan predecir el comportamiento de las citadas estructuras, herramientas de pruebas que permitan realizar pruebas reales sobre las mismas y herramientas de correlación de datos que permitan validar los procedimientos desarrollados.

Esto supondrá poner a disposición de las empresas que trabajan en el sector de fabricación de material rodante para el transporte, conocimientos específicos para la mejora de sus productos, derivando en la reducción de los costes y plazos para su puesta en servicio y maximizando la probabilidad de éxito del necesario ensayo real.

5. Principales resultados obtenidos

5.1. Análisis del estado del arte

Para entender los principios y la tecnología actual en la experimentación y en el análisis de elementos finitos involucrados en el proyecto, se recopila en esta sección un breve estudio del estado del arte de la extensometría y del análisis mediante el método de elementos finitos.

5.1.1. Extensometría.

La extensometría permite la medición experimental de la deformación de un material bajo estudio mediante la medición de los cambios que ocurren en una resistencia eléctrica de un sensor pegado a dicho material bajo estudio. Este método fue mejorado por Wheatstone quien lo popularizó con el circuito conocido como Puente de Wheatstone alimentado con una tensión de corriente continua (por ejemplo, la tensión eléctrica U_b , del orden de diez voltios) que está formado por un circuito de cuatro resistencias eléctricas (por ejemplo, las resistencias eléctricas R_1 , R_2 , R_3 y R_4) donde una de ellas (por ejemplo, la resistencia eléctrica R_1) varía el valor de su resistencia eléctrica (por una cantidad ΔR) en función del estado de la tensión mecánica (que puede ser de tracción o de compresión) del material bajo estudio.

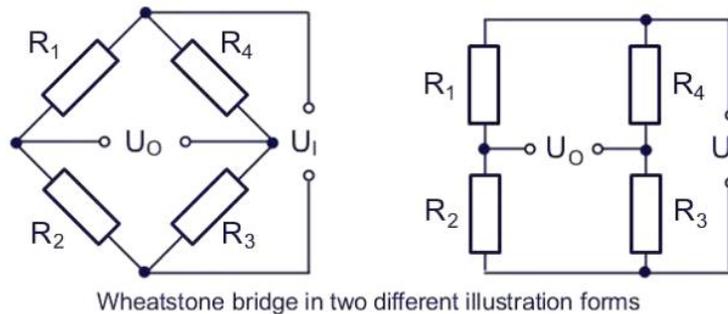


Figura 1. Puente de Wheatstone. (Fuente: <https://www.hbm.com>)

Ante la ausencia de tensión mecánica, la resistencia variable asume su valor nominal que es el mismo valor que el de las otras tres resistencias del Puente de Wheatstone y, como resultado, el puente queda equilibrado y la tensión eléctrica diferencial V_0 es nula. Pero, al aparecer una tensión mecánica en la superficie del material bajo estudio, se produce una variación ΔR en la resistencia eléctrica R_1 , por lo que el puente queda desequilibrado y aparece una tensión eléctrica diferencial que es proporcional a la tensión mecánica. Esta tensión eléctrica diferencial es muy pequeña (del orden de milésimas de voltio) por lo que debe ser amplificada por un circuito electrónico de alimentación y medición llamado amplificador diferencial de instrumentación.

Siguiendo el mismo principio se han desarrollado los dos tipos de elementos de extensometría que se describen a continuación:

Galga extensométrica

La galga extensométrica es un sensor que analiza el estado de tensión uniaxial a lo largo de una dirección en el plano considerado. Consiste en una resistencia eléctrica con la forma de una rejilla metálica que debe unirse rígidamente al material bajo

estudio con un pegamento para formar una unión óptima entre la galga y el material bajo estudio.

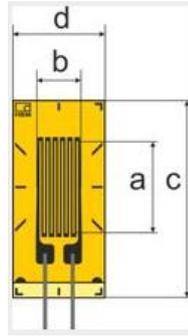


Figura 2. Galga extensiométrica. (Fuente: <https://www.hbm.com>)

Roseta

La roseta es un sensor que analiza los estados de tensión biaxiales. Existen rosetas de dos rejillas de medición dispuestas en ángulos de 0° grados y 90° grados, utilizadas cuando las direcciones principales son conocidas. Cuando las direcciones principales son desconocidas, se puede emplear una roseta de tres rejillas de medición que pueden ser del tipo rectangular o del tipo delta. En la roseta de tipo rectangular las rejillas están dispuestas con los ángulos de 0° grados, 45° grados y 90° grados. En la roseta de tipo delta, en cambio, las rejillas están dispuestas con los ángulos de 0° grados, 60° grados y 120° grados. Esto solo supone un cambio en las ecuaciones en el tratamiento de las medidas para adecuarlas al ángulo correspondiente a cada una de ellas.

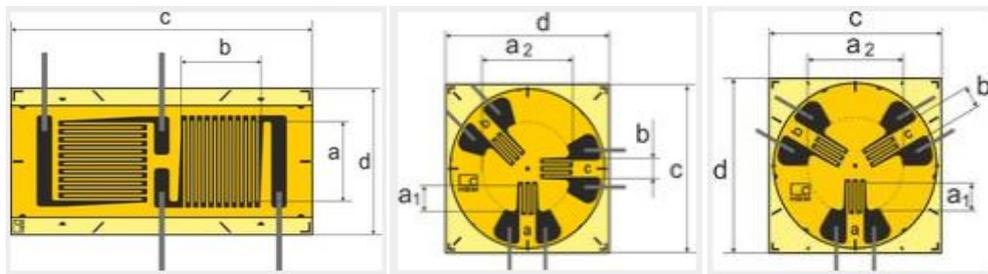


Figura 3. Roseta de dos y de tres rejillas tipo rectangular y tipo delta. (Fuente: <https://www.hbm.com>)

5.1.2. Análisis de elementos finitos.

El cálculo mediante elementos finitos es un método numérico que surge inicialmente para analizar el esfuerzo en una superficie plana en las estructuras de aeronaves. Para su resolución, se discretiza el dominio continuo en un número finito de partes o elementos. Mediante la discretización se transforman las ecuaciones diferenciales en grupos de ecuaciones diferenciales ordinarias cuya resolución necesita de la utilización de ordenadores y programas que permitan preparar el problema, resolverlo y visualizarlo.

Para entender la interpolación se puede partir del concepto en una dimensión. Se plantea una función monomial $y(x)=c_0+c_1x$ con c_0 y c_1 coeficientes reales y definida en el intervalo $[a,b]$. En concreto, se pueden definir los dos puntos de los extremos del

intervalo I como x_0, x_1 siendo sus valores para la ecuación $\alpha_0=y(x_0)$ y $\alpha_1=y(x_1)$ respectivamente y quedando el sistema como:

$$\begin{bmatrix} 1 & x_0 \\ 1 & x_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{bmatrix}$$

Tras resolver el determinante del sistema de matrices se obtiene x_1-x_0 , o lo que es lo mismo, la longitud del intervalo I y es un valor positivo, con lo cual existe una única solución del sistema lineal. Los valores x_0 y x_1 serían los nodos y sabríamos que se puede especificar una función $P_1(I)$ con el valor en los nodos α_0 y α_1 . Se podrían definir la función $\lambda_j(x_i)$ que tomaría los siguientes valores:

$$\lambda_j(x_i) = \begin{cases} 1, & \text{si } i = j \\ 0, & \text{si } i \neq j \end{cases}, \quad i, j = 0, 1$$

De esta forma, el valor de la función λ_j es 1 para el valor de su nodo x_j y 0 para el resto y así se puede definir la función $P_1(x)$ como una combinación de las funciones con los coeficientes α de la siguiente forma:

$$y(x) = \alpha_0 \lambda_0(x) + \alpha_1 \lambda_1(x)$$

Resolviendo la función a partir de este planteamiento se obtendría la forma explícita la solución

$$\lambda_0(x) = \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0}, \quad \lambda_1(x) = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}$$

, que resolvería el sistema de matrices planteado inicialmente pero siguiendo el concepto de la función λ planteado para resolver el sistema lineal.

Extender este concepto a un conjunto por tramos de funciones polinomiales lineales en un espacio continuo sería el primer paso donde se aumenta el número de nodos para adaptarse a la función real. Posteriormente se puede evolucionar a las dos y tres dimensiones siguiendo el mismo principio pero complicando considerablemente la cantidad de datos y operaciones a realizar. La utilización de computadores con gran capacidad de almacenaje y cálculo permite obtener una a solución suficientemente aproximada de los problemas que de otro modo serían inabordables.

El caso de problema de elasticidad es el más recurrente en el campo de la ingeniería de estructuras. Mediante este cálculo se llega a la obtención de tensiones y deformaciones que en el caso tridimensional no presenta mayor problemática que en caso bidimensional. Se trata de la resolución de las ecuaciones de segundo orden donde la energía viene dada por la derivada primera de la deformación.

Los desplazamientos de un sólido pueden examinarse en cada nodo para cada coordenada agrupándose todos ellos en el vector de desplazamiento δ^e . Por otra parte, la interpolación de las deformaciones se realiza a partir de los desplazamientos nodales mediante los sumatorios u , v y w que se muestran en la siguiente imagen quedando en forma matricial como $u=N \cdot \delta^e$.

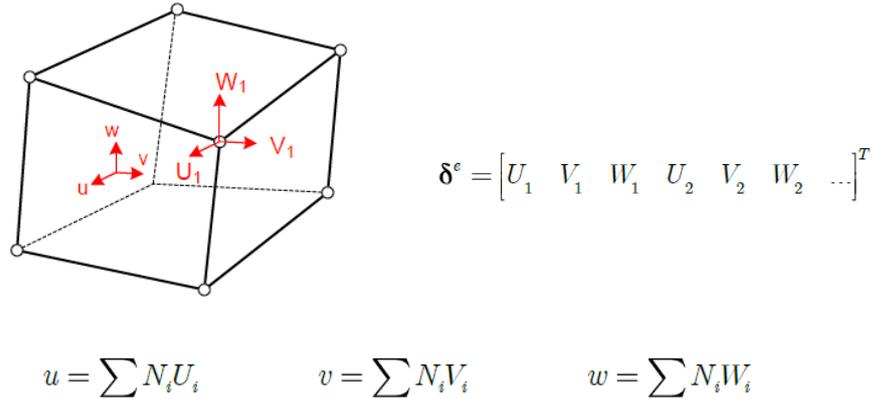


Figura 4. Desplazamientos sobre un elemento tridimensional. Fuente: Celigüeta Lizarza, J.T., (2000). Método de los elementos finitos para análisis estructural.

Para las deformaciones, en cambio, se tienen seis términos agrupados en el vector que corresponden a las tres deformaciones direccionales (ϵ_x , ϵ_y y ϵ_z) y tres deformaciones transversales (γ_x , γ_y y γ_z). Estos valores equivalen a la derivación de los desplazamientos si se consideran pequeñas deformaciones.

Las tensiones se obtienen de manera directa a partir de las deformaciones y la matriz de elasticidad del material D , que depende del módulo elástico E y el coeficiente de Poisson ν , según la ecuación $\sigma = D(\epsilon - \epsilon_0) + \sigma_0$ donde σ_0 es la tensión inicial.

$$D = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} \lambda &= \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \\ \mu &= \frac{E}{2(1+\nu)} \end{aligned}$$

Figura 5. Matriz de elasticidad. Fuente: Celigüeta Lizarza, J.T., (2000). Método de los elementos finitos para análisis estructural.

Tras obtener las funciones que relacionan los desplazamientos, las deformaciones y la tensión en el elemento calculado se pueden plantear las ecuaciones de equilibrio. La finalidad de estas ecuaciones es asegurar que el trabajo virtual δW de las fuerzas que actúan sobre el elemento debe ser igual a la energía acumulada δU en el material debido a su elasticidad.

$$\delta W^e = \int_{\vartheta} \delta \epsilon^T \sigma d\vartheta = \delta U^e$$

A partir de esta ecuación se relacionan las fuerzas que se introducen en el sistema que pueden deberse a las cargas, las restricciones o a la interacción de elementos adyacentes con la deformación que sufre el propio elemento.

5.2. Análisis de la incertidumbre en la medida.

El estudio de la incertidumbre en la medida es fundamental para tener consciencia de la calidad de las medidas que se van a registrar en los ensayos. De esta forma se pueden tener en cuenta los errores en la correlación que puedan deberse a las características de los elementos de medida y conocer su naturaleza para intentar minimizarlos o corregirlos si fuese posible.

En este apartado se estudian los tipos de conexión de circuito de un cuarto de Puente de Wheatstone y las incertidumbres en las medidas que este tipo de conexión tiene.

5.2.1. Tipos de conexión de circuito de un cuarto de Puente de Wheatstone.

Cabe recalcar que, por razones prácticas, suele emplearse la configuración de un cuarto de Puente de Wheatstone (compuesto por cuatro resistencias eléctricas R_1 , R_2 , R_3 y R_4) donde la galga extensométrica R_1 está pegada al material bajo estudio (y por lo tanto está montada fuera del equipo con el circuito de alimentación y amplificación) y las otras tres resistencias que completan el Puente de Wheatstone (R_2 , R_3 y R_4) están físicamente montadas dentro del equipo con el circuito de alimentación y amplificación. Las resistencias eléctricas R_1 y R_2 forman un divisor de tensión, y las resistencias eléctricas R_3 y R_4 forman otro divisor de tensión en paralelo con el primero. Si, por ejemplo, todas las resistencias eléctricas tuviesen el mismo valor de 120 ohmios, el puente estaría equilibrado ya que aparecería la mitad de la tensión de excitación en ambos divisores de tensión (la diferencia de tensión sería nula), si despreciásemos las resistencias eléctricas de los cables de conexión.

Pero, debido a que necesariamente se deben emplear hilos conductores de conexión entre la galga extensométrica externa y el circuito de alimentación y amplificación, que la longitud de los hilos conductores no es nada despreciable, y que las resistencias eléctricas de dichos hilos conductores se suman a la resistencia de la galga extensométrica externa causando su aparente aumento, existen distintos tipos de conexión que pueden emplearse.

Los distintos tipos se diferencian respecto al número de hilos que tiene la conexión y de si es pasivo o activo. Así pues, existen conexiones de dos hilos con circuito pasivo, tres hilos con opción a circuito pasivo y activo, y finalmente, de cuatro hilos con circuito pasivo. Cada configuración tiene unas características que se detallan a continuación:

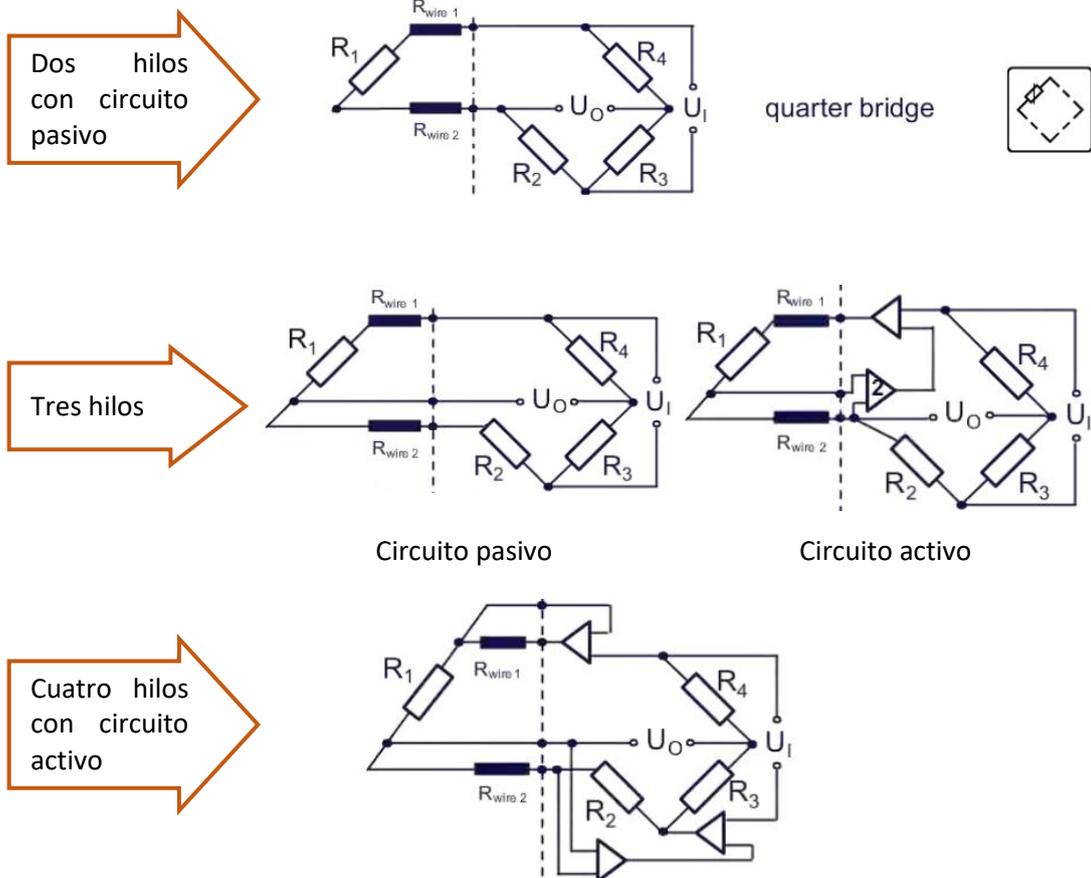


Figura 6. Circuito de un cuarto de Puente de Wheatstone con conexión a dos hilos y sin compensación de la resistencia de los hilos. (Fuente: <https://www.hbm.com>)

Conexión a dos hilos con circuito pasivo de un cuarto de Puente de Wheatstone

Los hilos conductores empleados para conectar la galga extensométrica externa R_1 con el resto del puente de Wheatstone poseen resistencias eléctricas (llamémoslas " R_{wire1} " y " R_{wire2} ") que se suman a la resistencia de la galga extensométrica externa R_1 , causando su aparente aumento pese a la ausencia de tensiones mecánicas en el material que está bajo estudio. Debido a esto no es posible que el Puente de Wheatstone esté equilibrado y, por este motivo, se desaconseja emplear esta configuración.

Conexión a tres hilos con circuito pasivo de un cuarto de Puente de Wheatstone

Si el extremo superior de la galga extensométrica externa R_1 tiene un hilo conductor " R_{wire1} " conectado al polo positivo de la fuente de alimentación U_I , y el extremo inferior de la galga extensométrica externa R_1 tiene dos hilos conductores conectados a él, donde uno de los hilos conductores es un hilo conductor auxiliar que se conecta al punto de medición de la tensión eléctrica diferencial U_O que nos interesa medir, y donde el otro hilo conductor " R_{wire2} " se conecta a la resistencia interna R_2 que completa el Puente de Wheatstone, entonces la tensión eléctrica diferencial U_O estará equilibrada (por el divisor de tensión cuyo brazo superior está formado por la suma de la galga extensométrica externa R_1 más el hilo " R_{wire1} ", y cuyo brazo inferior está formado por la suma de la galga extensométrica interna R_2 más el hilo " R_{wire2} "). Cabe recalcar que no hay caída de tensión entre los extremos del hilo conductor auxiliar

porque uno de sus extremos está conectado a la entrada de alta impedancia del amplificador diferencial de instrumentación y por lo tanto la intensidad de la corriente eléctrica que fluye por el hilo auxiliar es inapreciable (de ahí que sea irrelevante el valor de su resistencia eléctrica). Con este esquema se consigue una tensión eléctrica nula ante la ausencia de tensiones mecánicas en el material que está bajo estudio ya que se puede eliminar el efecto de la resistencia de los hilos conductores siempre y cuando estos sean simétricos, de lo contrario este esquema no funcionará. No obstante, la sensibilidad del sensor difiere con respecto a lo ideal, por lo que es necesario realizar una calibración.

Conexión a tres hilos con circuito activo de un cuarto de Puente de Wheatstone

Al igual que el anterior caso de la conexión a tres hilos con circuito pasivo de un cuarto de Puente de Wheatstone para la compensación de las resistencias de los hilos conductores, este esquema de circuito activo consigue una tensión eléctrica nula ante la ausencia de tensiones mecánicas en el material que está bajo estudio ya que elimina el efecto de la resistencia de los hilos conductores siempre y cuando estos sean simétricos (de lo contrario este esquema tampoco no funcionaría). Pero, a diferencia del anterior esquema pasivo, en este esquema activo la sensibilidad del sensor no difiere con respecto a lo ideal por lo que no es necesario realizar una calibración. Esto se hace en virtud de que este esquema emplea componentes activos (amplificadores operacionales) para aumentar la tensión de alimentación dirigida a la galga extensométrica externa R_1 de tal suerte que se compense la caída de tensión debida a las resistencias de los hilos conductores de conexión " R_{wire1} " y " R_{wire2} " y el circuito externo se comporte como si no existiesen los hilos conductores de conexión " R_{wire1} " y " R_{wire2} ", por lo que se preserva la sensibilidad.

Conexión a cuatro hilos con circuito activo de un cuarto de Puente de Wheatstone

Al igual que el anterior caso de la conexión a tres hilos con circuito activo, se consigue una tensión eléctrica nula ante la ausencia de tensiones mecánicas en el material que está bajo estudio ya que se puede eliminar el efecto de la resistencia de los hilos conductores, incluso cuando los hilos conductores no sean simétricos. Como en el anterior esquema, la sensibilidad del sensor no varía por lo que no es necesario realizar una calibración. Esto se hace en virtud de que este esquema emplea componentes activos (amplificadores operacionales) para alterar la tensión de alimentación de la galga extensométrica de tal suerte que se mantenga la sensibilidad.

5.2.2. Análisis de la incertidumbre en galgas de un cuarto de Puente de Wheastone.

En todos los tipos de conexión señalados anteriormente se emplea una galga de extensometría que se encuentra en el exterior del equipo de adquisición de datos y que representa un cuarto de puente de Wheatstone. Los otros tres cuartos de puente de Wheatstone están en el circuito electrónico del equipo de adquisición de datos. Los varios tipos de conexión señalados anteriormente ofrecen al ensayista la posibilidad de escoger si se usa o no se usa la compensación de los hilos de conexión, y si esta es pasiva o activa (en diversos grados de complejidad). Esto es cierto también para el caso de las rosetas de dos o tres rejillas que miden las tensiones biaxiales en la superficie del material bajo estudio (cuando se conoce de antemano las direcciones

principales se emplea la roseta de dos rejillas y, en caso contrario, se emplea la de tres).

Por lo tanto disponemos de estos tipos de conexión para controlar la incertidumbre de la contribución de la resistencia eléctrica de los cables de conexión entre la galga de extensometría y el equipo de adquisición de datos. Pero hay otras fuentes de incertidumbre que debemos contemplar.

Incertidumbre del lote de galgas

Cada conjunto de galgas tiene unos valores de calibración asignados por el fabricante que definen las incertidumbres asociadas a la resistencia y a la sensibilidad de la misma.

En primer lugar tenemos la tolerancia del valor nominal R de la resistencia eléctrica de la rejilla de la galga de extensometría, que recogeremos de la hoja de calibración que acompaña al lote de fabricación de la galga (y que el proveedor debe entregarnos junto con las galgas) e introduciremos este dato en el campo correspondiente de la aplicación informática de adquisición de datos.

En segundo lugar tenemos la tolerancia del valor nominal del factor k de sensibilidad de la galga. El factor k de sensibilidad de la galga indica la relación lineal entre la microdeformación (una magnitud mecánica) y la resistencia de la rejilla (una magnitud eléctrica). Como la resistencia de la rejilla está conectada al puente de Wheatstone, se genera una tensión eléctrica que es lo que finalmente mide el equipo de adquisición de datos. Dicho valor se recoge igualmente de la hoja de calibración que acompaña al lote de fabricación de la galga y se debe introducir este dato en el campo correspondiente de la aplicación informática de adquisición de datos.

En tercer lugar tenemos la tolerancia de la sensibilidad transversal de la galga. Este valor se debe a que cuando se produce una microdeformación en el sentido perpendicular al eje principal de la galga, se observa una microdeformación en el eje principal de la galga que tiene el signo contrario a la primera (una tracción produce un compresión, y viceversa). Además la microdeformación observada es proporcional al coeficiente de Poisson para el material bajo estudio (cabe señalar que la galga está ideada para ser empleada con un determinado material). Si el material bajo estudio es el acero, su coeficiente de Poisson (ν) puede ser 0,3. Debido a la gran variedad de tipos de acero, existe una gran variedad del valor del coeficiente de Poisson. Por este motivo, es difícil calcular el coeficiente de Poisson. Al igual que en los otros dos casos, este valor se recoge en la hoja de calibración que acompaña al lote y se debe introducir este dato en el campo correspondiente de la aplicación informática de adquisición de datos.

Widerstand Resistance Résistance	120 Ω ±0.35 %	1	Stückzahl Contents Quantité	5
k-Faktor Gage factor Facteur k	a: 1.99 ±1.0 % b: 2.01 ±1.0 % c: 1.99 ±1.0 %	2	Temperaturkoeffizient des k-Faktors Temperature coefficient of gage factor Coefficient de température du facteur k	93 ±10 [10 ⁻⁶ / K] (-10°C ... +45°C)
Querempfindlichkeit Transverse sensitivity Sensibilité transverse	a: 0.5 % b: 0.2 % c: 0.5 %	3	Folienlos Foil lot Lot de la feuille	A417/30
Temperaturkompensation: Ferritischer Stahl mit Temperature compensation: steel with Compensation de température: acier avec	α = 10.8 [10 ⁻⁶ / K]		Herstellungslot Production batch Lot de fabrication	812074561
			Max. effekt. Brückenspeisepannung max. rms bridge excitation voltage tension d'alim. de pont maxi eff.	3.0 V

Figura 7. Ejemplo de valores de calibración de un lote de rosetas de extensometría de un cuarto de Puente de Wheatstone utilizadas durante el proyecto.

A partir de los valores del ejemplo de la figura 15, sabemos que el valor nominal R de la resistencia eléctrica de la rejilla de las galgas de la roseta es de 120 ohmios y su tolerancia de fabricación es de 0,35%, es posible que dicho valor nominal asuma un valor mínimo de $(120 - 0,42)$ ohmios y un valor máximo de $(120 + 0,42)$ ohmios, en distintas galgas del mismo lote.

Con respecto al valor nominal del factor k de sensibilidad de la galga a es de 1,99 y su tolerancia de fabricación es del 1%, es posible que dicho valor nominal asuma un valor mínimo de $(1,99 - 0,00199)$ y un valor máximo de $(1,99 + 0,00199)$, para la galga a de las distintas rosetas del mismo lote.

Por último, la tolerancia de la sensibilidad transversal en la galga a sería de 0,5% y se aplicaría a la compresión transversal (ϵ_q).

Para entenderlo mejor se puede proponer el ejemplo de una medida $\epsilon_a=1000 \mu\text{m}/\text{m}$ en la galga a de una roseta perteneciente al lote de la figura 15. Los valores de incertidumbre debidos a los factores estudiados son el resultado de las siguientes expresiones:

$$u_w = \frac{0.35}{100} \cdot \frac{1000\mu\text{m}}{m} = 3.5 \mu\text{m}/\text{m}$$

$$u_{ka} = \frac{1}{100} \cdot \frac{1000\mu\text{m}}{m} = 10 \mu\text{m}/\text{m}$$

$$u_{qa} = \frac{0.5}{100} \cdot \epsilon_q = \frac{0.5}{100} \frac{300\mu\text{m}}{m} = 1.5 \mu\text{m}/\text{m} \text{ , (donde } \epsilon_q = -\nu \cdot \epsilon_a \text{)}$$

Así pues, la tolerancia de la resistencia eléctrica de la galga “a” introduciría una incertidumbre u_w de 3,5 $\mu\text{m}/\text{m}$, la tolerancia del factor k de sensibilidad u_{ka} 10 $\mu\text{m}/\text{m}$ y la sensibilidad transversal de la galga una incertidumbre u_{qa} , que en este ejemplo es de 1,5 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Incertidumbre inducida por el ensayista

En cuanto al error introducido durante la preparación del ensayo se pueden observar los producidos por la alineación y por el pegado de los sensores extensiométricos. El error de alineación del eje de la galga con el eje principal de la tensión se debe a la gran variabilidad del error humano al intentar posicionar la galga alineada con la orientación correcta. En general, dada la dificultad de medir este error con precisión, se puede asumir un valor típico de $\varphi=5^\circ$.

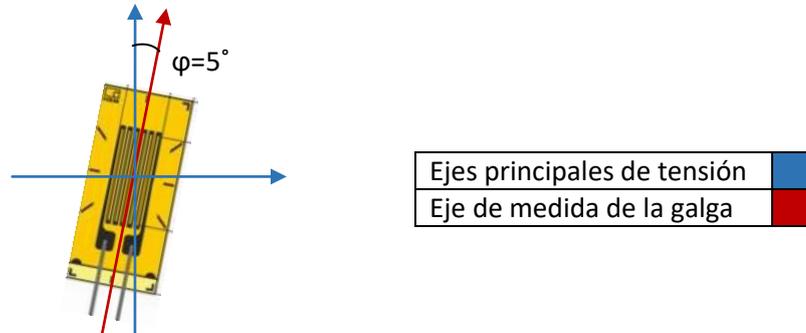


Figura 8. Desalineación de la galga con respecto a los ejes principales de tensión.

Conocidos los valores máximos de tensión y deformación que corresponden a los ejes principales se puede transformar la tensión y la deformación en el eje de medida de la galga. Si se compara el valor registrado por la galga con el valor máximo que se pretende medir se puede computar la desviación de la medida y la incertidumbre típica.

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{max}} = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos 2\varphi) = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos 10^\circ) = 0.9924$$

$$Desviación = 2 \cdot \frac{\varepsilon_{max} - \varepsilon}{\varepsilon_{max}} \cdot 100 = 2 \cdot \frac{\varepsilon_{max} - 0.9924\varepsilon_{max}}{\varepsilon_{max}} \cdot 100 = 0.0152\%$$

Por tanto, suponiendo como antes una medida de deformación de 1000 $\mu m/m$, la incertidumbre debida a este factor tendría el siguiente valor:

$$u_\varphi = \frac{0.0152}{100} \cdot \frac{1000\mu m}{m} = 0.152 \mu m/m$$

Por otro lado, el error introducido por la influencia de los espesores de la rejilla y de la capa de adhesivo aparece como consecuencia de que la rejilla de medición no está en el mismo nivel que la superficie cuya tensión mecánica se quiere leer sino que se encuentra elevada por los espesores de la propia rejilla y de la capa de adhesivo.

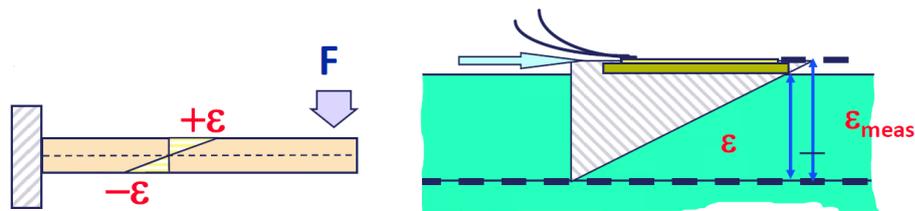


Figura 9. Error debido a los espesores de la galga (Fuente: <https://www.hbm.com>)

Debido a la dificultad de realizar mediciones precisas de los espesores asociados a la galga y al adhesivo el fabricante proporciona unos valores típicos y se puede calcular mediante la ecuación siguiente:

$a = 0.046$ mm (espesor de adhesivo y film)

$h = 2$ mm (espesor de la galga)

$$\frac{\varepsilon_{meas}}{\varepsilon} = \frac{0.5 \cdot h + a}{0.5 \cdot h} = 1.046 \rightarrow \text{Desviación} = 4.6\%$$

Como se puede comprobar a continuación, considerando la medida de deformación de $1000 \mu\text{m}/\text{m}$, este efecto introduce una incertidumbre u_D de $46 \mu\text{m}/\text{m}$.

$$u_D = \frac{4.6}{100} \cdot \frac{1000 \mu\text{m}}{\text{m}} = 46 \mu\text{m}/\text{m}$$

Otras incertidumbres

Además de las incertidumbres citadas anteriormente, existen otras fuentes de error que deben ser conocidas por el ensayista. Entre estas tenemos: la fluencia relativa de la rejilla, la histéresis mecánica, desplazamiento dinámico del cero, fallo de la constancia del factor de galga, la elección equivocada del circuito de conexión, el efecto del cambio de la temperatura causado por el cable de conexión, la compensación con un polinomio característico del efecto del cambio de la temperatura en la rejilla, el efecto del cambio de la temperatura en el factor de galga, y el desplazamiento de la medición debido a la temperatura.

- Fluencia relativa

La fluencia relativa de la rejilla se observa como un pequeño cambio de la resistencia a lo largo del tiempo bajo condiciones de carga constante. Suele observarse como una función exponencial que se estabiliza a lo largo del tiempo (por ejemplo, tras un lapso de treinta minutos). Cuando la carga aumenta en la forma de un escalón y se mantiene constante, también podemos referirnos a una fluencia debida a la carga, y se observará un pequeño aumento de la medida hasta que se alcance la estabilización. Y, si luego la carga se reduce en la forma de un escalón y se mantiene constante, podemos referirnos a una fluencia debida a la descarga, y se observará una pequeña disminución de la medida hasta que se alcance la estabilización.

Este fenómeno es mayor en las rejillas cortas, y depende de la sección de las pistas de circuito impreso de la rejilla, del número de pistas que componen la rejilla, del material del sustrato sobre el cual descansa la rejilla, de la humedad y de la temperatura. En las células de carga suele haber cierto factor de compensación aportado por el elemento elástico sobre el cual se ha colocado la rejilla. En las mediciones de deformación realizadas en una viga en voladizo trabajando a flexión, el elemento elástico carece de factores de compensación y la deformación depende únicamente de la flexión del elemento elástico.

- Histéresis mecánica

En la aplicación de ciclos de carga y descarga pueden presentarse diferencias entre los valores registrados para una misma carga dependiendo de si se trata de la fase de aumento de la carga o de disminución. Este fenómeno es inherente a las propiedades del material de la rejilla, del tipo de pegamento empleado y de su aplicación.

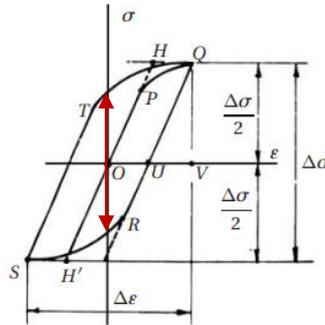


Figura 10. Histéresis mecánica de los materiales (Fuente: Nuñez,C., Roca, A., Jorba, J. Comportamiento mecánico de los materiales)

La histéresis presente en el punto de inversión del sentido de la carga es el valor absoluto de la diferencia entre las mediciones observadas al pasar por cero tanto en el sentido descendente como en el ascendente, y descartándose la lectura inicial del cero (que no tiene utilidad ya que no se produce en una inversión del signo de la carga). También debe tenerse en cuenta que la histéresis disminuye a partir de un determinado número de ciclos de carga y descarga.

- Desplazamiento dinámico del cero

El desplazamiento dinámico del cero es la observación de un aumento de la resistencia de la rejilla ante la ausencia de carga (sin carga). Este fenómeno es progresivo con el tiempo y depende del número de ciclos de carga y de la amplitud de los ciclos. Se trata de un fenómeno acumulativo debido a la fatiga del material de la rejilla y de las conexiones, empezando por micro fracturas y acabando en un circuito abierto. Si el desplazamiento dinámico del cero supera el valor de 100 $\mu\text{m}/\text{m}$, se aconseja cambiar de rejilla debido a la fatiga del material.

- Fallo de la constancia del factor de galga

El factor de galga debe mantenerse constante durante la vida útil de la galga. Pero, debido a la fatiga del material (dependiendo del número de ciclos de carga y de la amplitud de los ciclos), se puede observar una variación del factor de galga que oscila entre distintos valores formando un diagrama de fallo. Una variación del 1% aconseja descartar la galga debido a la fatiga.

- Elección equivocada del circuito de conexión

La elección equivocada del circuito de conexión tiene un efecto sobre el factor de galga. Tomemos, por ejemplo, un factor de galga de 1,99 y dos hilos de conexión con 0,5 ohmios de resistencia cada uno. La contribución total de los dos hilos de conexión será de 1 ohmio y se sumará a los 120 ohmios de la galga como muestran las ecuaciones siguientes:

$$R_{total} = R_{galga} + R_{cable} = 120 + 1 = 121\Omega$$

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad \frac{\Delta R}{R_{total}} = k_{total} \cdot \varepsilon$$

$$k_{total} = \frac{k \cdot R}{R_{total}} = \frac{1,99 \cdot 120}{121} = \boxed{1,97}$$

Debido a la ausencia de mecanismos de compensación en el circuito de conexión de dos hilos, la contribución de las resistencias de los hilos de conexión causa la aparición de un nuevo factor de galga incorrecto de 1,97 (el ensayista no será consciente de este problema, creyendo incorrectamente que la contribución total de los dos hilos de conexión no afecta a la medición). Además, como la hoja de datos de la galga indica un factor de galga de 1,99, el ensayista introducirá este dato en la aplicación informática de adquisición de datos para calcular la microdeformación. Todo cálculo se hará con el factor de galga de 1,99, produciendo resultados incorrectos. Esto debe servir de advertencia para no elegir un circuito de conexión de dos hilos desprovisto de medios de compensación de la resistencia de los hilos de conexión.

- Efecto del cambio de la temperatura causado por el cable de conexión

El efecto de la temperatura está parcialmente causado por los cables de conexión y se ilustra para una subida de diez grados centígrados (o Kelvin). En este ejemplo se produce una medición de 163 $\mu\text{m}/\text{m}$ debido a la temperatura para una resistencia de 120 ohmios y un factor de galga de 1,99.

$$\Delta T = 10K$$

$$R_{cable} = 0,5\Omega$$

$$\alpha = 0,0039 K^{-1}$$

$$\Delta R_{cable} = R_{cable} \cdot \alpha \cdot \Delta T = 1 \cdot 0,0039 \cdot 10 = 0,039\Omega$$

$$\varepsilon = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)}{k} = \frac{\left(\frac{0,039}{120}\right)}{1,99} = 163 \mu\text{m}/\text{m}$$

- Compensación del efecto de la temperatura con un polinomio característico

La compensación del efecto de la temperatura en la resistencia de la rejilla con un polinomio característico puede realizarse si se conoce la temperatura y se toma el polinomio que viene en hoja de calibración que acompaña al lote de fabricación de la galga. Introduciremos este dato en el campo correspondiente de un canal calculado de la aplicación informática de adquisición de datos.

El estudio de la variación del valor de la microdeformación en función de la temperatura para el recorrido de -10 °C a 120 °C posibilita el ajuste de un polinomio de tercer grado que describa esta variación para posibilitar su posterior corrección. Esto requiere la medición de la temperatura de la rejilla durante el ensayo.

Cabe recalcar que la galga debe pegarse al material para el cual ha sido diseñada y para el que dispone de medios de compensación de dilatación térmica. Es decir, si la galga está diseñada para acero con un coeficiente de dilatación térmica de $\alpha = 10,8E-$

8/°K, solamente podremos pegar la galga a un material que sea de acero con dicho coeficiente de dilatación térmica. De lo contrario, la compensación de dilatación térmica no surtirá efecto y habrá un error en la medición.

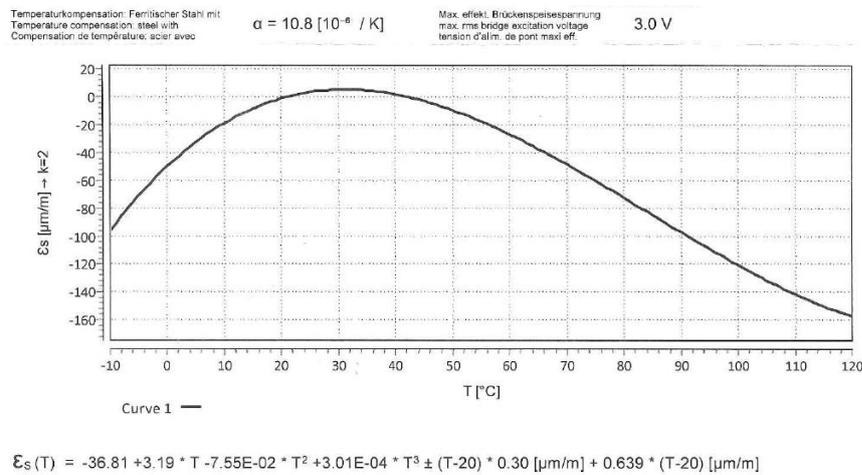


Figura 11. Gráfica de compensación de la temperatura de un lote de rosetas de extensometría utilizadas durante el proyecto.

- Efecto de la temperatura en el factor de galga

El coeficiente térmico del factor de galga es un dato que viene en la hoja de calibración que acompaña al lote de fabricación de la galga. Se debe introducir este dato en el campo correspondiente de la aplicación informática de adquisición de datos para compensar el efecto de la temperatura en el factor de galga. Esto requiere la medición de la temperatura de la rejilla durante el ensayo.

Widerstand Resistance Résistance	120 Ω ±0.35 %	Stückzahl Contents Quantité	5
k-Faktor Gage factor Facteur k	a: 1.99 ±1.0 % b: 2.01 ±1.0 % c: 1.99 ±1.0 %	Temperaturkoeffizient des k-Faktors Temperature coefficient of gage factor Coefficient de température du facteur k	93 ±10 [10 ⁻⁶ / K] (-10°C ... +45°C)
Querempfindlichkeit Transverse sensitivity Sensibilité transverse	a: 0.5 % b: 0.2 % c: 0.5 %	Folienlos Foil lot Lot de la feuille	A417/30
		Herstellungslot Production batch Lot de fabrication	812074561

Figura 128. Efecto de la temperatura en el factor de galga de un lote de rosetas de extensometría utilizadas durante el proyecto.

- Desplazamiento de la medición debido a la temperatura

El desplazamiento de la medición debido a la temperatura se debe al alivio de tensiones mecánicas internas del material de la rejilla o del pegamento. Estas tensiones resultan de cambios estructurales de la rejilla, y de la oxidación y corrosión del material de la rejilla. Este desplazamiento se manifiesta como una variación de la lectura pese a no haber ninguna variación de los esfuerzos, y depende de la temperatura y del paso del tiempo. Lamentablemente no se puede corregir este efecto debido a que su causa no está caracterizada.

5.3. Correlacion de resultados

Habitualmente las empresas de producción de material rodante se enfrentan a fases de diseño, análisis y validación con plazos y tiempos muy ajustados. Por otra parte la comunicación entre la parte teórica y empírica supone una barrera que impide agilizar las tareas. Ambos resultados se unen en la fase de correlación de resultados y es donde se necesita flexibilizar la actualización de las variaciones que se acometan y así como poder actualizar los resultados desde ambos sentidos.

El enfoque actual utiliza muchos más recursos en la realización de ensayos y quedan bien diferenciadas las tareas de simulación de las tareas de ensayos.

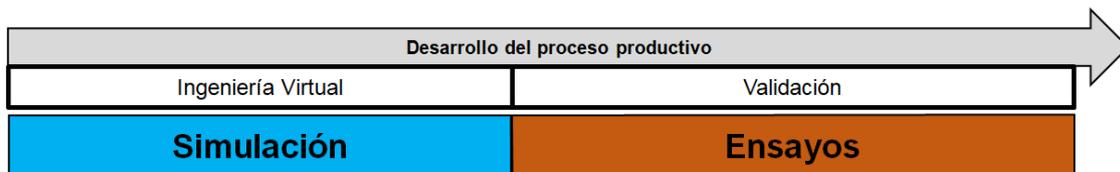


Figura 13. Esquema del proceso productivo tradicional.

Con el desarrollo del proyecto se busca mejorar la colaboración entre ambas fases pudiendo avanzar parte de la validación desde el ámbito de simulación virtual para reducir los costes que conlleva la realización de un mayor número de ensayos.

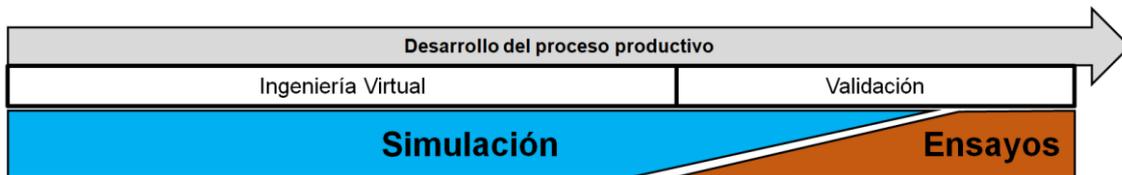


Figura 14. Esquema del proceso productivo propuesto.

Los principales casos a mejorar que se detectan en el proceso productivo son:

- **Recálculos que implican remallados.** En numerosas ocasiones se producen cambios del diseño inicial que suponen modificaciones del modelo de cálculo. La definición de los puntos de medida se tiene que realizar de nuevo porque está asociada a los nodos del cálculo inicial.
- **Nuevos ensayos.** De igual forma la fase de ensayos puede exigir la realización de casos de carga o la toma de medidas en puntos que no se habían tenido en cuenta en la fase de cálculo por elementos finitos. En este caso se presenta la dificultad de extraer y gestionar los datos de los nuevos casos de carga así como posicionar y asignar los valores de las nuevas medidas para su correlación.
- **Posición de la galga.** La situación de la galga tanto en el ensayo como en la toma de resultados del análisis fem es crucial para que los resultados tengan una buena correlación. Esta problemática se ve agravada en los puntos con un gradiente de área elevado, es decir, si los valores registrados varían de forma muy repentina en poco espacio es más probable que la medida de la galga no se corresponda con la medida del análisis debido a algún pequeño desplazamiento.

Un aspecto clave es definir el procedimiento estándar para trabajar de una misma manera y poder comparar y analizar los distintos resultados. Una vez detectados los motivos es fundamental poder realizar modificaciones en cualquiera de los dos sistemas y poder actualizar fácilmente los resultados.

Por tanto, los principales desafíos que tiene la correlación de resultados entre el análisis de elementos finitos y los resultados de los ensayos son los siguientes:

- Asociación de las galgas al modelo de simulación.
- Comparación de los resultados con la misma localización y orientación.
- Gestionar un número elevado de puntos de medición.
- Permitir de forma rápida modificar/añadir/borrar los puntos de medición.
- Comparar resultados y obtener valores de correlación en los puntos de medida.

Para ello el proceso virtual necesita implementar las fases que se muestran en el siguiente esquema:

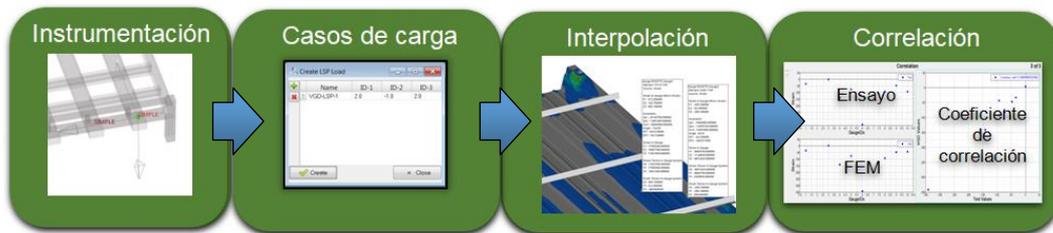


Figura 15. Esquema de fases del proceso.

Primero se debe definir la instrumentación de las galgas de sensorización asignando su posición y su orientación. Después se debe definir el caso de carga del que se obtendrán los resultados. La interpolación asigna a los sensores definidos en la instrumentación la ponderación de los resultados en los elementos de su ubicación. Finalmente la correlación permite introducir los valores del ensayo y compararlos para obtener el coeficiente de correlación y analizar las posibles desviaciones y sus causas.

Con respecto a las diferencias con los resultados, en el caso del cálculo por elementos finitos los resultados se muestran en los ejes de coordenadas globales mientras que en el ensayo dependen de los ejes locales del elemento de medida. Por tanto, la comparación de los resultados medidos exige su transformación a los ejes de los elementos de medida. Por otro lado, la carga es determinista con lo cual su aplicación implica que será conocida y exacta pudiendo no ser la misma que la aplicada en el ensayo.

En las distintas experiencias se han determinado los principales características de comparación una vez se obtienen los resultados virtuales y de ensayos. El modelo debe predecir correctamente la tensión o la deformación y tiene que existir una correlación entre ambas en la secuencia de tiempo de carga.

En la mayoría de ocasiones se puede evidenciar la correlación en la evolución temporal pero la evolución de la carga aplicada en el ensayo debe ser la misma para el modelo virtual. Esto implica que el modelo virtual introduzca la carga transitoria más aproximada a la real pudiendo retroalimentar la simulación con estos valores.

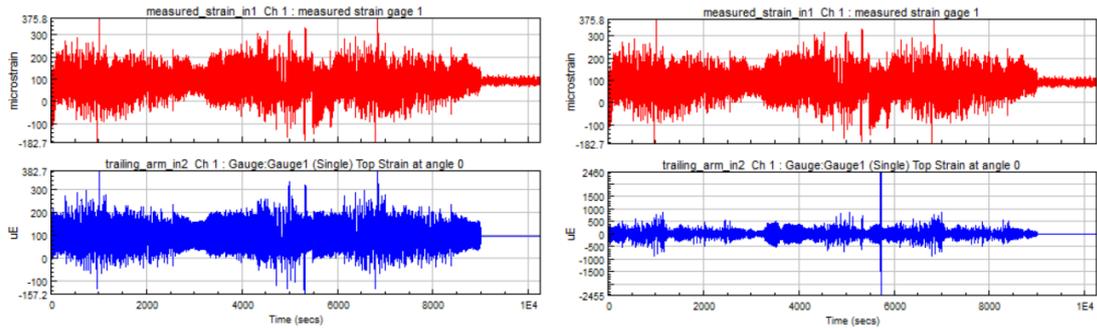


Figura 16. Gráficas de correlación temporal.

Con respecto a la dirección de la carga se puede evidenciar si la correlación es la adecuada o debe cambiarse el signo aplicando una carga alternante. Representando la deformación teórica frente a la deformación del ensayo se puede conseguir representar la diagonal de correlación. Esta diagonal revela la correlación directa si se aproxima a la diagonal unitaria o relación inversa si aparece en la dirección transversal.

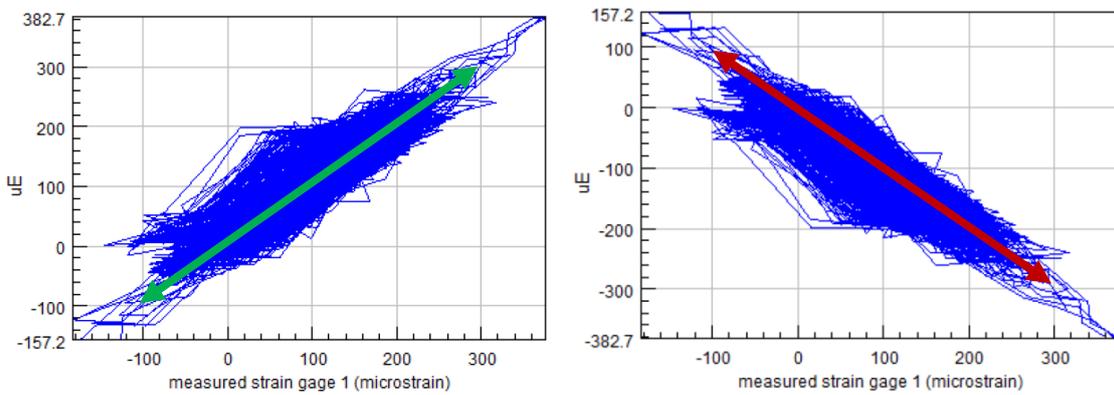


Figura 17. Gráficas de correlación directa o inversa.

Otro problema recurrente en la correlación es el desfase de los resultados. Siempre que el desfase sea constante se puede corregir desplazando los valores pero debe analizarse la razón y corregirse en origen en la medida de lo posible. En este caso se pone de manifiesto una diferencia temporal entre la señal medida de la deformación con respecto a la señal de carga registrada ya que al compararlo con los valores de simulación se ve claramente que existe una relación entre las deformaciones registradas pero hay un desplazamiento entre ellas.

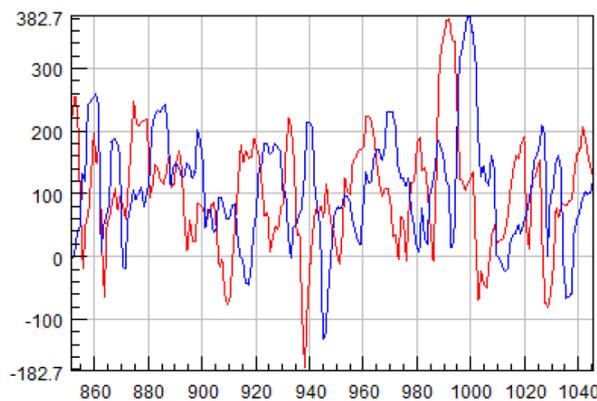


Figura 18. Gráfica de correlación con desfase temporal.

Adicionalmente pueden aparecer otras problemáticas asociadas al sistema de captura y transformación de la señal. Estas pueden deberse a deficiencias de los elementos de medida y las conexiones que pueden provocar la aparición de zonas en la evolución temporal donde la correlación se pierde cuando en el resto se aprecia una clara relación entre ellas.

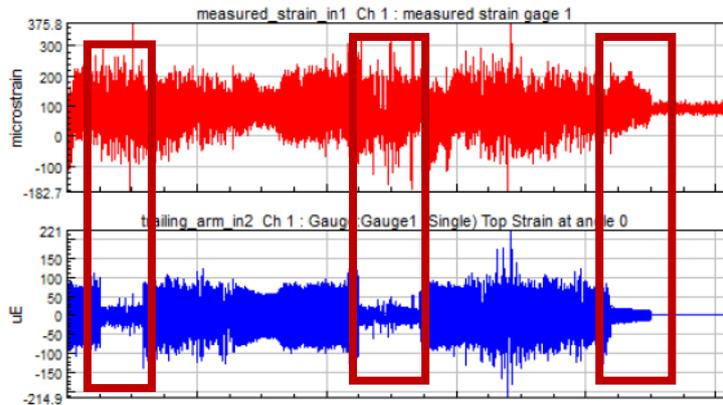


Figura 19. Fallos de correlación puntuales.

Por lo general y como es de esperar, los problemas de correlación no aparecen aislados y se complica su identificación. El uso del equipamiento adecuado y el seguimiento de la metodología para minimizar la incertidumbre ayuda a mitigar estos efectos pero a la hora de analizar los resultados es recomendable verificar los efectos descritos en este apartado.

5.4. Recomendaciones para la realización de los ensayos

En base a las experiencias realizadas se han reunido una serie de recomendaciones y buenas prácticas para la consecución exitosa de los ensayos. Se consideran los factores que influyen del entorno así como los involucrados en la instrumentación del ensayo.

5.4.1. Temperatura del ensayo.

Las galgas extensométricas están disponibles en el mercado con el mismo coeficiente de dilatación térmica de los materiales más comunes, tales como el acero ferrítico, el aluminio, el acero austenítico, el titanio, el acero de fundición gris, el molibdeno, el sílice y el plástico. Cuando no es posible encontrar una galga extensométrica con el coeficiente de dilatación térmica más adecuado, siempre se puede añadir una sonda de temperatura en el punto de ensayo para registrar los cambios de temperatura y aplicar un cálculo de compensación del efecto de la temperatura.

5.4.2. Valores límite de deformación.

Para permanecer dentro del estado elástico del material bajo estudio con un amplio margen de seguridad y así poder cumplir rigurosamente la ley de Hooke (que dice que el esfuerzo requerido para lograr una determinada deformación es igual al producto de una constante por la deformación), la tensión mecánica no debe superar una deformación de un milímetro por cada metro de longitud (o una deformación del 0,1%). Esto se corresponde con un fondo de escala de 1.000 $\mu\text{m}/\text{m}$.

5.4.3. Compatibilidad electromagnética.

Los problemas derivados de la compatibilidad electromagnética habitualmente presentes en un ambiente industrial afectan a las mediciones de la tensión eléctrica diferencial que se obtienen del Puesto de Wheatstone, manifestándose como ruido eléctrico que se suma a la tensión eléctrica diferencial y crea grandes dificultades en el análisis de los resultados. En casos extremos el ruido eléctrico hace que la medición sea inservible.

La primera línea de defensa contra el ruido eléctrico es el uso de cables apantallados pero, a veces, esto no es suficiente. En estos casos se puede emplear una nueva técnica de excitación y medición del Puesto de Wheatstone donde la tensión de alimentación en corriente continua se sustituye con una tensión de alimentación en corriente alterna con una frecuencia portadora y que la tensión eléctrica diferencial que se obtiene del Puesto de Wheatstone es una señal de corriente alterna de amplitud modulada por la variación ΔR en la resistencia eléctrica R_1 . Para recuperar la tensión eléctrica diferencial en corriente continua que nos interesa medir, se debe revertir el proceso mediante la demodulación de la señal de corriente alterna de amplitud modulada recibida.

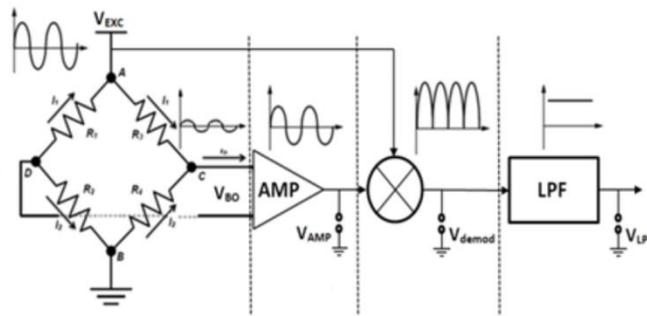


Figura 20. Uso de una frecuencia portadora de excitación. (Fuente: Awais Khan, M. Development of a measuring unit for precise strain measurement with strain gauges).

La técnica de frecuencia portadora aplicada a la medición con galgas extensométricas ha demostrado ser mejor que la técnica convencional de alimentación con corriente continua ante la presencia de ruido eléctrico aditivo por un factor de 1:55, según una publicación de la Universidad de Bremen, Alemania.

(https://www.researchgate.net/publication/305262293_Development_of_a_Measuring_Unit_for_Precise_Strain_Measurement_with_Strain_Gauges)

5.4.4. Tipo de galga.

En la utilización de rosetas de 2 rejillas hay que tener en cuenta que las rejillas deben estar perfectamente alineadas con las direcciones principales para medir directamente los estados de tensión biaxiales. En caso de desconocer las tensiones principales se recomienda utilizar rosetas para las cuales habrá que tener presente el ángulo que forman las galgas que la componen para posteriormente realizar correctamente la conversión de los valores medidos a deformaciones o tensiones principales así como otros resultados interesantes como tensión de Von Mises.

5.4.5. Pegado de galgas

Para estos efectos se debe preparar muy cuidadosamente la superficie del material bajo estudio (desengrasar, decapar la pintura y pulir la superficie para dejar rayas muy finas que permitan la correcta adhesión del pegamento) y se debe fijar la galga extensométrica con un pegamento adecuado para que cualquier dilatación o contracción del material bajo estudio sea fielmente reproducida por un cambio proporcional de la resistencia eléctrica de la rejilla metálica de la galga extensométrica. Además, como se ha visto en el apartado de incertidumbres, la galga extensométrica tiene un eje principal que debe orientarse en la dirección conocida de la fuerza de deformación (tracción o compresión) o de lo contrario se provocarán problemas en la correlación.

5.5. Experiencias piloto

Anteriormente se realizaron los desarrollos de la infraestructura y experiencias piloto de modelos virtuales de cálculo FE que han servido de punto de partida para realizar y obtener los resultados del presente proyecto.

Se desarrolló la metodología de los ensayos con sensorización y se preparó el modelo virtual de simulación. En el ensayo llevado a cabo se estudió el comportamiento de un elemento estructural soldado con superficies planas y convexas que se atornilló a una parte fija. En primer lugar se realizó un análisis mediante elementos finitos y se determinaron dos puntos de interés para sensorizar el elemento. En paralelo se ejecutó el ensayo y se elaboró el modelo virtual de galgas para evaluar los parámetros de interés en ambos modelos.

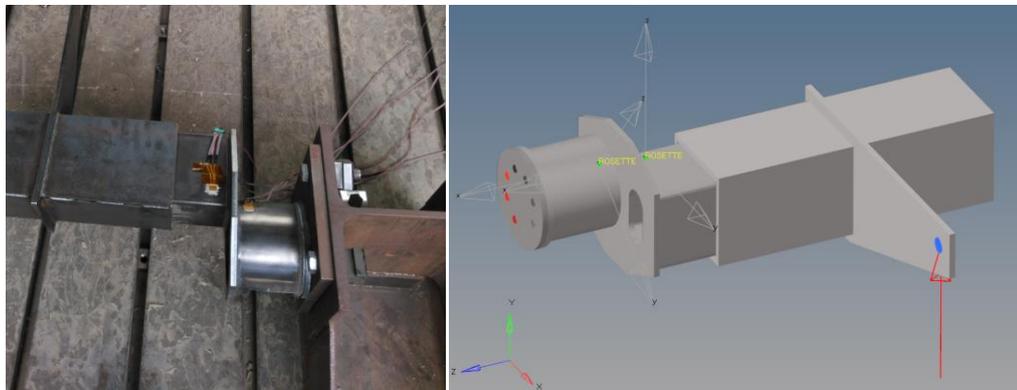


Figura 21. Ensayo y simulación del elemento estructural de estudio.

Los datos obtenidos se analizaron y se realizó el tratamiento de los mismos para implementar la herramienta de correlación. De tal forma se completó la realización de la experiencia tanto por el procedimiento tradicional de ensayo como a través de la simulación.

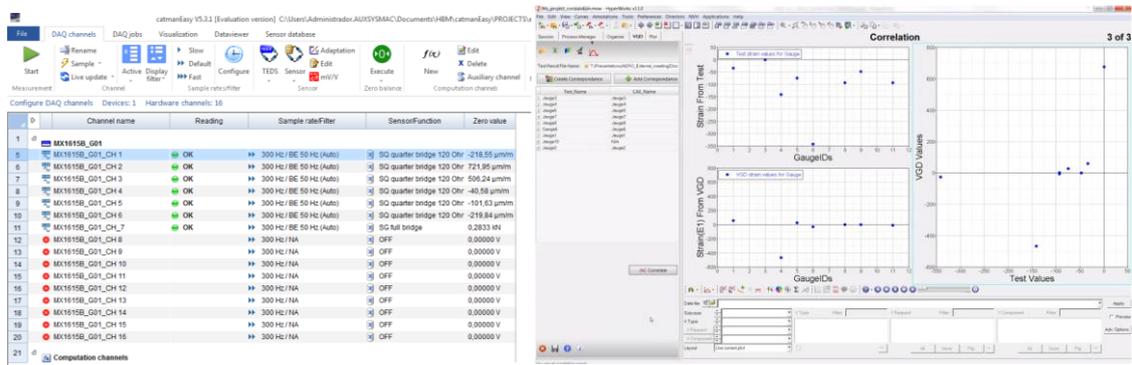


Figura 22. Tratamiento de los resultados y correlación.

6. Casos de estudio de interés

En este apartado se detalla la ejecución, dentro del marco del proyecto, de dos casos de estudio para elementos de grandes dimensiones con características resistentes y propiedades de interés. El primero de ellos es una estructura soldada con una morfología y procesamiento típico de material rodante. El segundo caso estudia el comportamiento de una chapa conformada por laminación frente a una carga en régimen transitorio. La documentación de los casos y los resultados se muestran en los siguientes subapartados.

6.1. Caso de Estudio 1: Estudio de correlacion estructura

6.1.1. Planteamiento del problema

La estructura que se plantea en el estudio es un conjunto de barras de acero comercial junto con chapas plegadas soldadas entre sí. El tipo de material y la forma de procesarlo y manufacturarlo corresponde a la práctica general de las estructuras portantes de de material rodante con un bajo nivel de diseño.

El caso de carga que se va a estudiar consiste en apoyar la estructura y aplicar una carga de 5 Tm en la parte central de forma repartida simulando la carga portante. Para la aplicación de la carga se va a utilizar unas vigas IPN80 con el propósito de mantener la carga en toda la longitud y a su vez se realizará una precarga con masas calibradas de 400 Kg cada una siendo la precarga total de 1200 kg.

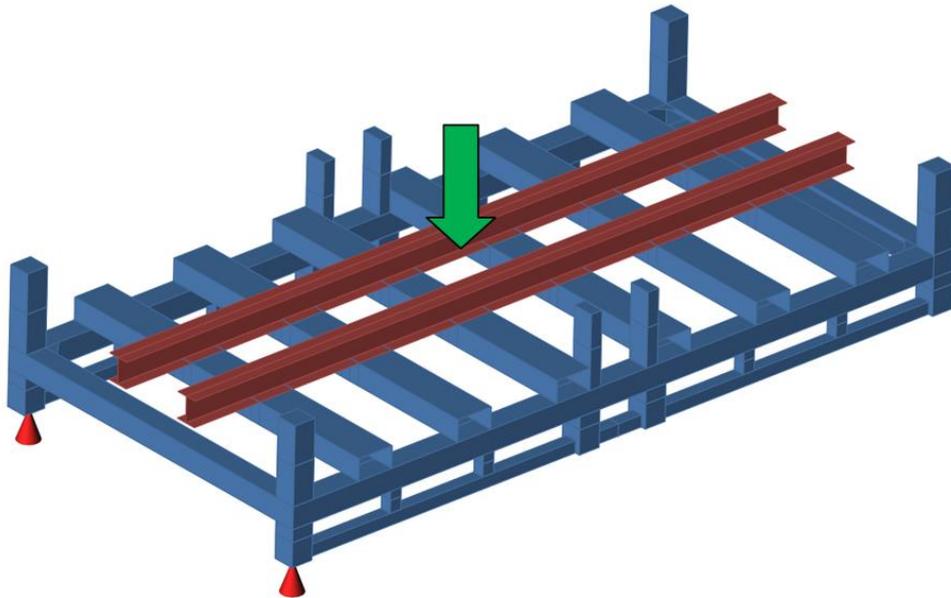


Figura 23. Detalle planteamiento del problema.

6.1.1. Realización del modelo de cálculo

El modelo de cálculo se elabora en base a la geometría mediante elementos tipo 2D Tria3 y Quad4 y se utiliza un tamaño de malla de 10 mm. Se aplican las restricciones y la carga en todos los nodos pertenecientes a las caras que corresponden y se asignan las propiedades del material que se muestra a continuación:

Name	Value
Solver Keyword	MAT1
Name	ACERO
ID	1
Color	
Include File	[Master Model]
Defined Entity	<input checked="" type="checkbox"/>
Card Image	MAT1
User Comments	Hide In Menu/Export
E	210000.0
G	
NU	0.3
RHO	7.85e-009

Figura 24. Detalle características del material (E en MPa y densidad en ton/mm3).

Una vez realizado el mallado el número resultante de nodos es de 978270 correspondientes a 345573 elementos.

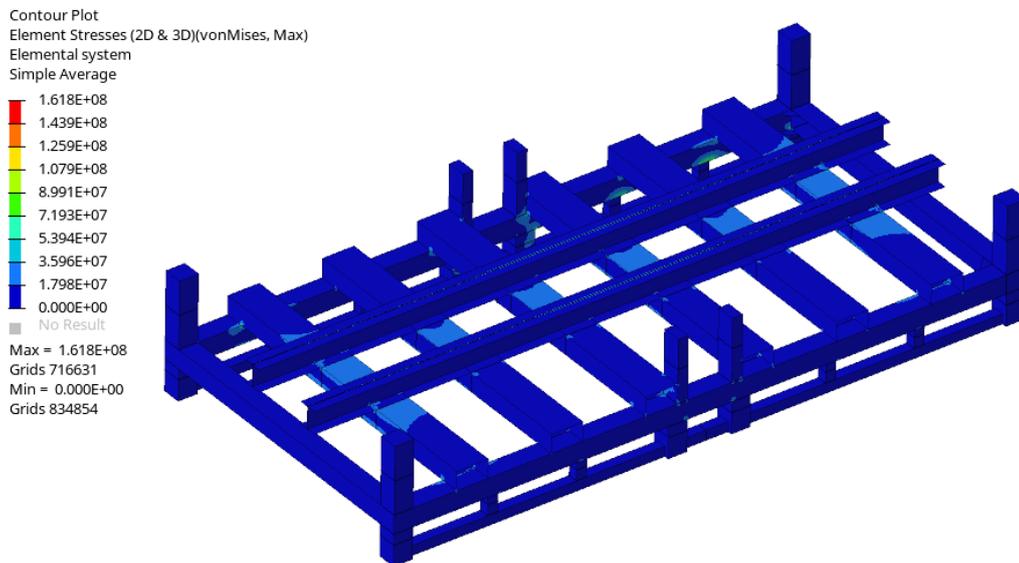


Figura 25. Detalle resultado tensiones de Von Mises del análisis FEM en N/mm².

Estableciendo un valor mínimo de 20MPa en la visualización de resultados se pueden identificar las zonas con valores más altos de tensiones donde es interesante posicionar las galgas.

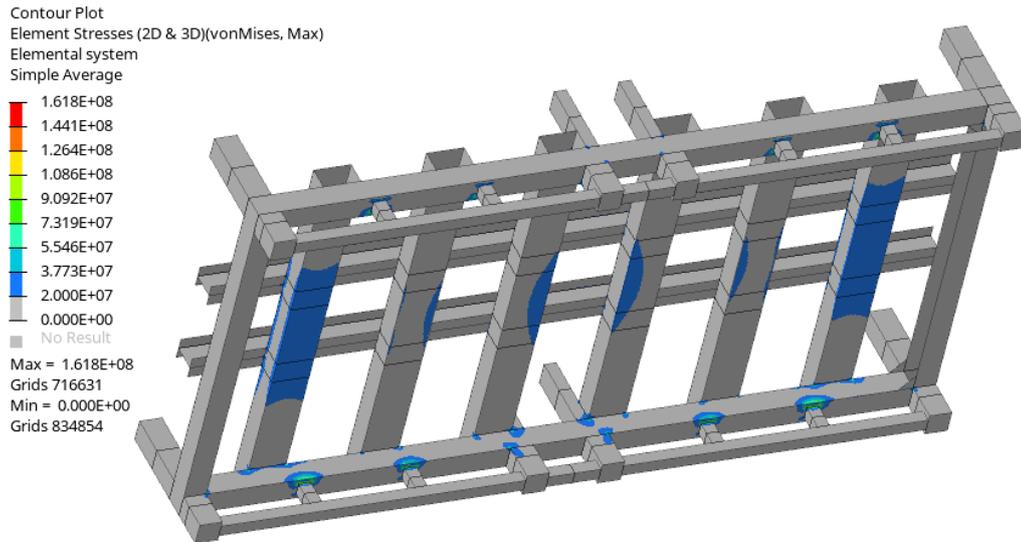


Figura 26. Detalle zonas de tensiones de Von Mises elevadas.

Se seleccionan dos puntos cercanos a las patas de refuerzo y se decide posicionar galgas en dos de ellos y rosetas en los otros para comparar las lecturas y resultados ya que al haber simetría deben ser valores similares. Se selecciona el punto medio del refuerzo a 20 mm de esquina.

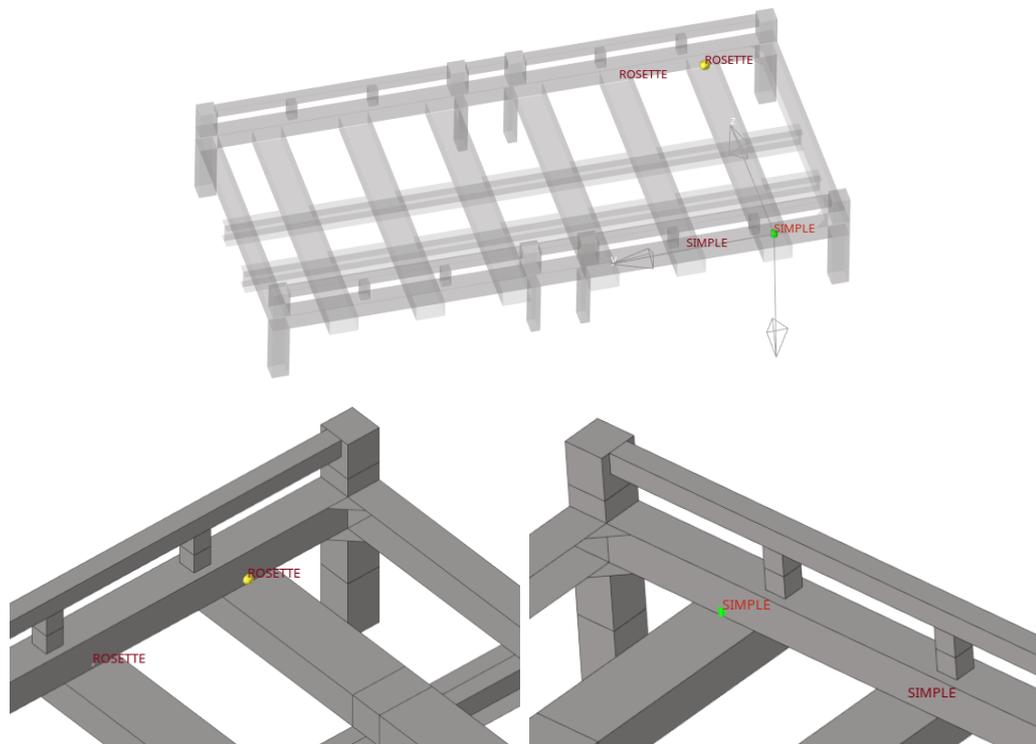


Figura 27. Detalle posicionado de galgas virtuales.

A continuación se muestran los resultados asociados a las galgas y los valores con la orientación correspondiente a los sistemas de coordenadas locales de las mismas.

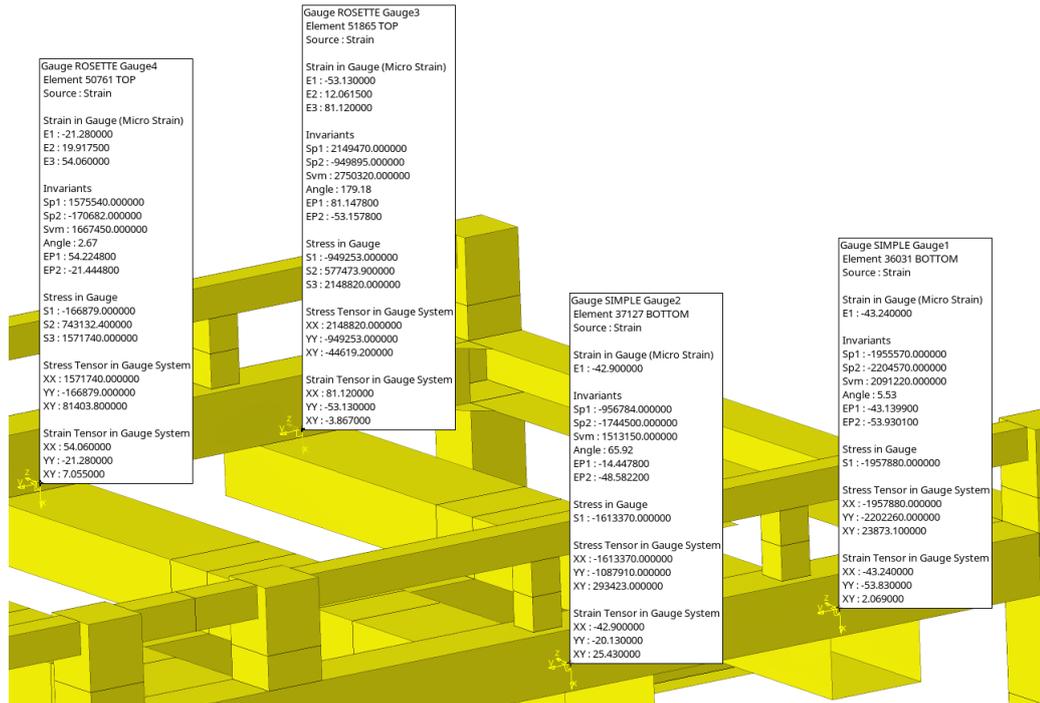


Figura 28. Detalle resultados asociados a las galgas.

6.1.2. Realización del ensayo

El ensayo precisa de la preparación de la plataforma de pruebas y además de los útiles de reparto de carga específicos para esta estructura, el material que se emplea es el siguiente:

- Maquina universal MT100KN
- Amplificador de dieciséis canales HBM Quantum-X MX1615B para galgas y rosetas de extensometría, y para sensor de fuerza U10M de 250KN
- Amplificador universal de ocho canales HBM Quantum-X MX840B para transductor de desplazamiento inductivo

Las condiciones del ensayo son:

- Temperatura: 20°C
- Velocidad de ensayo: 0,01 mm/s.



Figura 29. Detalle de preparación de la plataforma y ejecución del ensayo.

Los resultados de la carga aplicada con respecto al desplazamiento obtenidos por la célula de carga son:

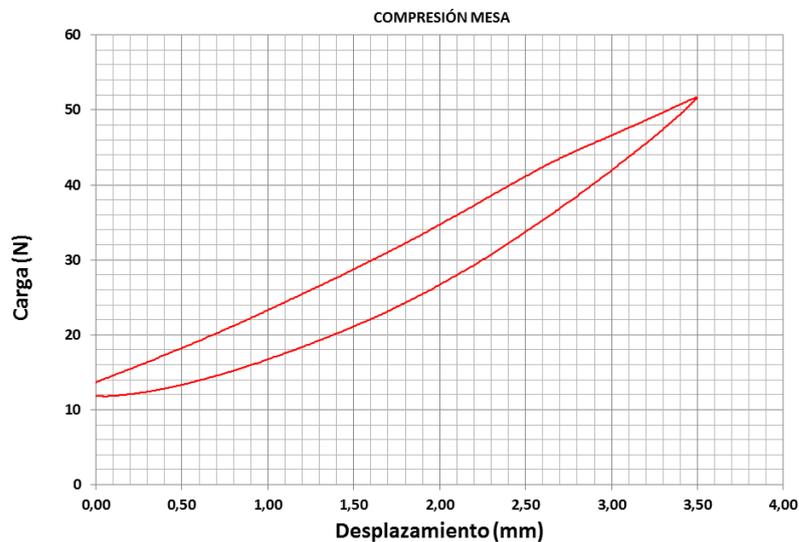


Figura 30. Gráfica carga/desplazamiento registrada por la célula de carga.

Tras la inspección visual no se detectan deformaciones significativas y el elemento mantiene las características estructurales iniciales. La carga máxima alcanzada es de 51,73 kN.

El resultado de la medida de las galgas en el valor pico de aplicación de fuerza se obtiene en un archivo que se traslada a la herramienta de simulación para analizar la correlación de los mismos.

Nombre de la galga	Medida XX	Medida YY	Medida XY
Galga 1	36,5	-	-
Galga 2	29,2	-	-
Roseta 3	47,1	10,3	73,4
Roseta 4	18,5	17,8	43,7

Tabla 1. Deformación máxima obtenida en el ensayo (μmm).

6.1.3. Análisis de resultados.

Los resultados experimentales obtenidos se trasladan al software para analizar la correlación que existe con los valores teóricos obtenidos de la simulación.

En primer lugar es necesario definir la correspondencia de los resultados de las galgas pero para ello basta con mantener la numeración predeterminada para la ejecución del ensayo. A continuación se selecciona el archivo de resultados extraído de las medidas máximas tomadas en el ensayo.

Con todo ello, se representa en gráficas separadas los valores de las dos entradas (simulación y ensayo) y se genera un gráfico de correlación con las parejas de valores.

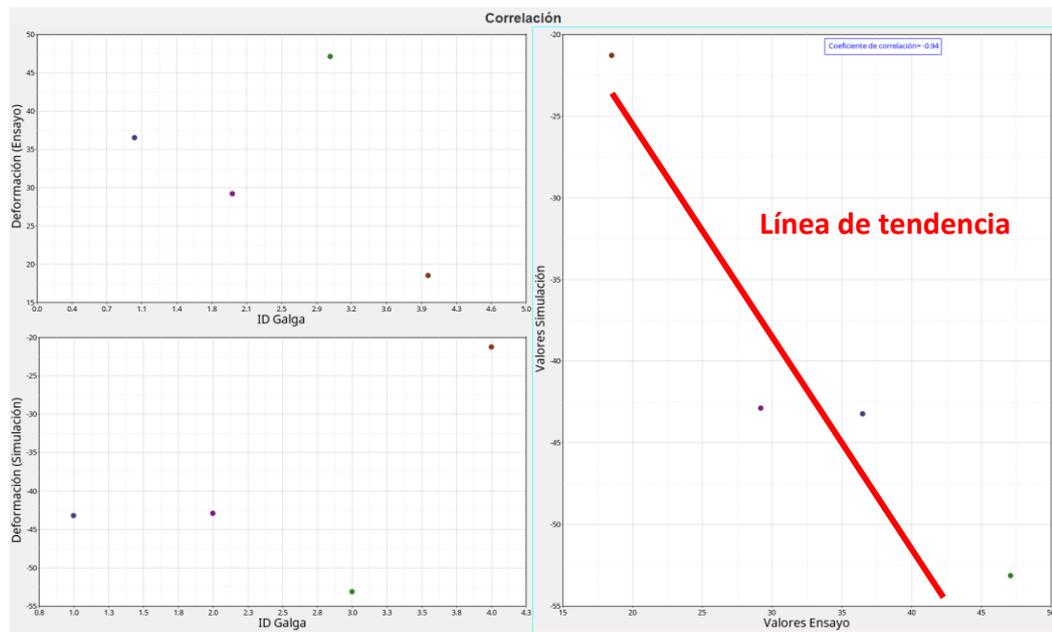


Figura 31. Gráfico de correlación.

Como puede apreciarse los resultados tienen una tendencia similar ya que los valores absolutos son de la misma magnitud pero el sentido es opuesto. Como muestra de ello el coeficiente de correlación es del -0.94 lo cual significa que las medidas registradas se han realizado con el sentido opuesto. Esto es fácilmente modificable en el software ya que basta con cambiar el sentido de las galgas virtuales.

Este caso de estudio se demuestra que en modelos de estructuras de geometrías planas donde el mallado y el posicionado de las galgas no tienen grandes dificultades y se disponen de elementos de referencia, los valores obtenidos tanto en el cálculo como en la simulación son muy similares.

6.2. Caso de Estudio 2: Estudio de correlacion chapa conformada

6.2.1. Planteamiento del problema

Este caso de estudio se plantea sobre superficies de chapa conformada de un límite elástico elevado. Para ello se utiliza una chapa conformada de grecas de 3200 mm y se posiciona sobre dos soportes separados 3000 mm. De forma similar al anterior caso, se aplicará una fuerza repartida proporcionalmente hasta el fallo de la estructura.

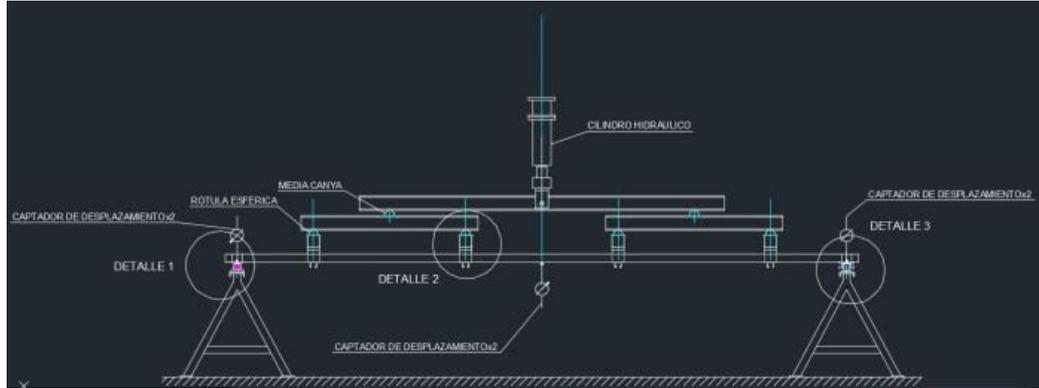


Figura 32. Detalle propuesta de ensayo.

El posicionado y la orientación de las galgas se define en base a los resultados previos que se obtienen para garantizar que la lectura de microdeformaciones sea válida y corresponda a la dirección que está sufriendo mayor deformación.

6.2.2. Realización del modelo de cálculo

Del mismo modo que se ha explicado anteriormente, el modelo de cálculo se elabora en base a la geometría aplicando las restricciones y las cargas en todos los nodos pertenecientes a las caras que corresponden y se asignan las propiedades del material.

Para este modelo en concreto se utilizan elementos tipo 2D Tria3 y Quad4 con un tamaño de malla de 10 mm. Se han realizado dos cálculos, un estático aplicando una carga de 25.000N y un transitorio desplazando el punto de aplicación de la carga hasta 0,45 mm. Estos valores corresponden a la parte previa a la rotura como se podrá ver en el siguiente apartado donde se detalla la realización del ensayo.

Se ejecuta el cálculo y se obtiene la distribución de tensiones de Von Mises que se muestra a continuación:

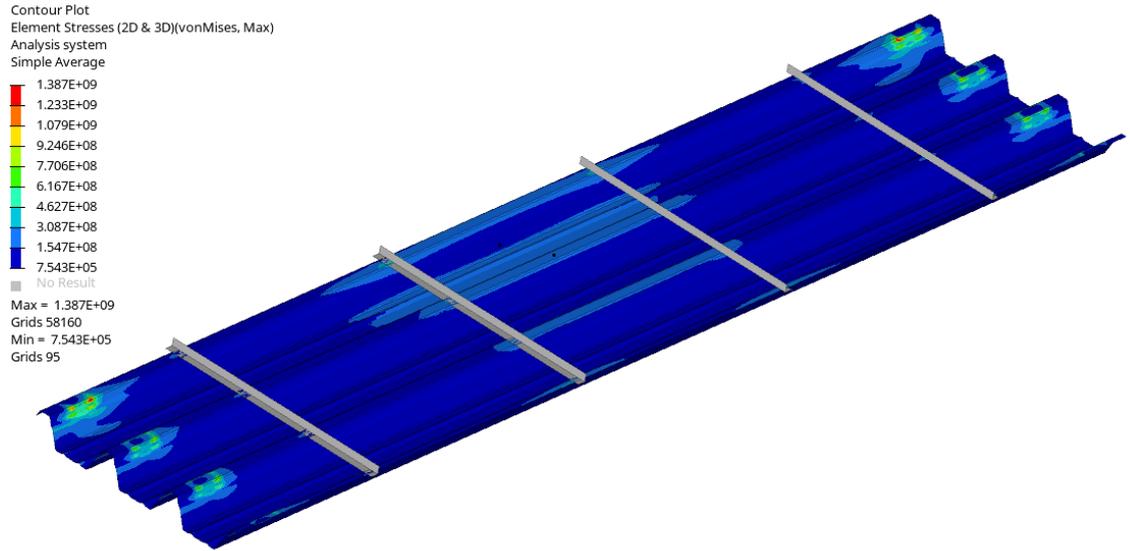


Figura 33. Detalle resultado tensiones de Von Mises del análisis FEM en N/mm^2 .

Representando el resultado a partir de 100Mpa para determinar las zonas con valores de tensiones más elevados y por tanto mayores deformaciones se observa la siguiente distribución:

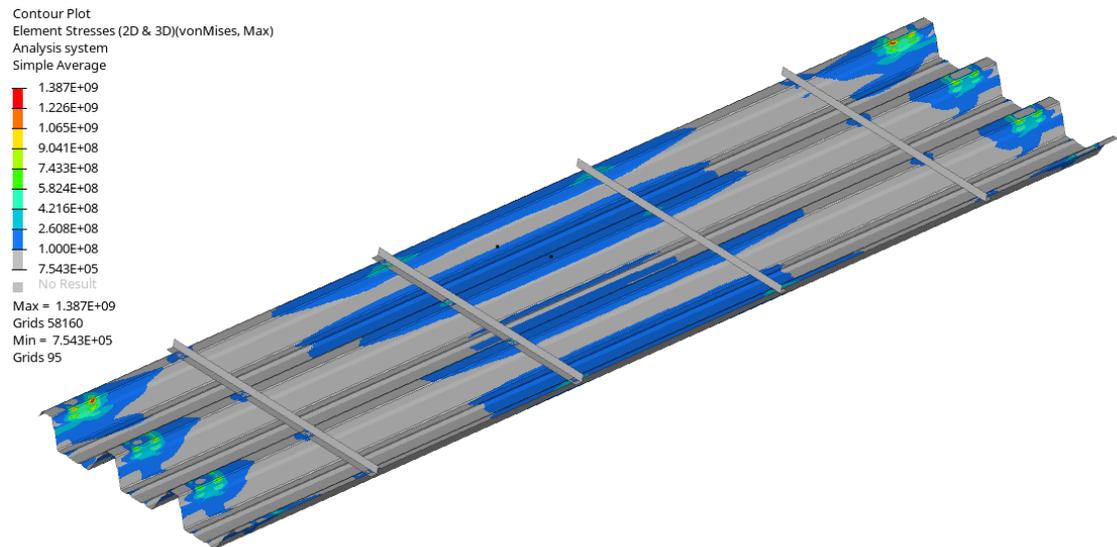


Figura 34. Detalle zonas de tensiones de Von Mises elevadas.

La posición de las galgas y las rosetas se plantea en los siguientes puntos:

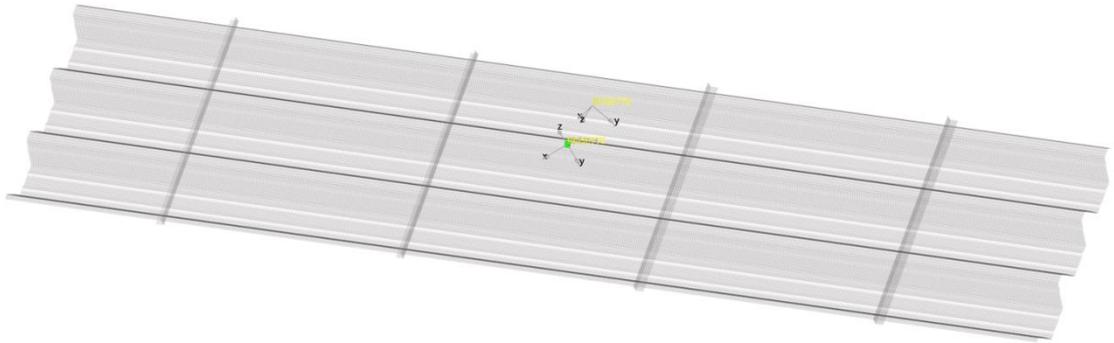


Figura 35. Detalle posicionado de galgas virtuales.

Realizando la interpolación y orientación de los resultados en la posición de las galgas se obtienen los valores de microdeformaciones del modelo virtual para la posterior comparación con los resultados del ensayo.

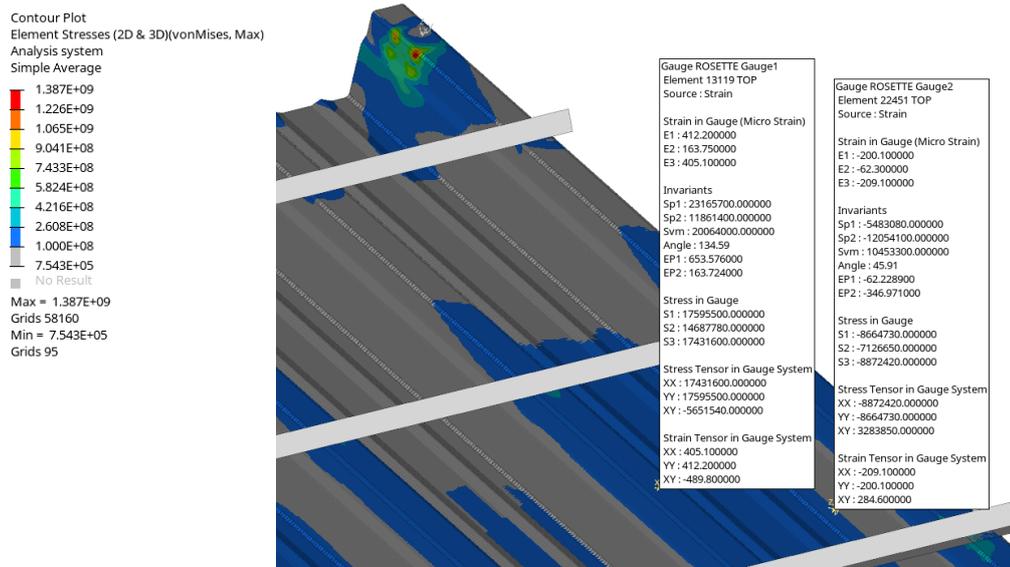


Figura 36. Detalle resultados asociados a las galgas.

6.2.3. Realización del ensayo

En la realización del ensayo se instalan los utilajes necesarios con el fin de repartir la carga proporcionalmente tal como se muestra en la fotografía y se instrumentaliza la muestra para medir la carga aplicada y las deformaciones tanto en galgas como en comparadores. El ensayo se desarrolla hasta el fallo de la muestra y se utiliza el equipamiento siguiente:

- Maquina universal MT100KN
- Amplificador de dieciséis canales HBM Quantum-X MX1615B para galgas y rosetas de extensometría, y para sensor de fuerza U10M de 250KN
- Amplificador universal de ocho canales HBM Quantum-X MX840B para transductor de desplazamiento inductivo

Las condiciones del ensayo son:

- Temperatura: 21°C
- Velocidad de ensayo: 0,5 kN/s.



Figura 37. Imágenes de la ejecución del ensayo.

Los resultados de la carga aplicada con respecto al desplazamiento que ha obtenido la célula de carga son:

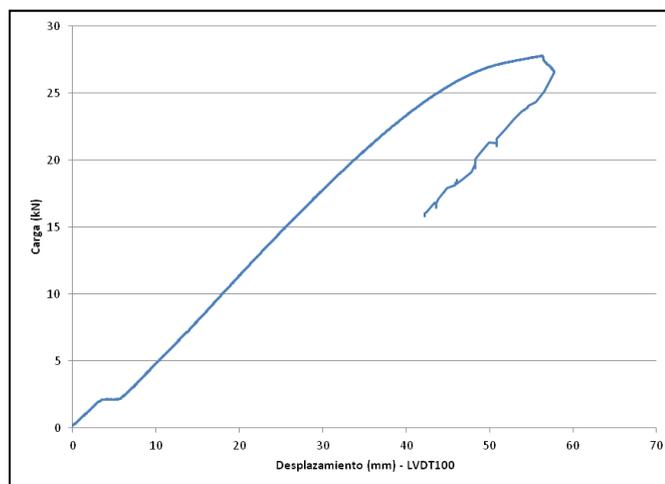


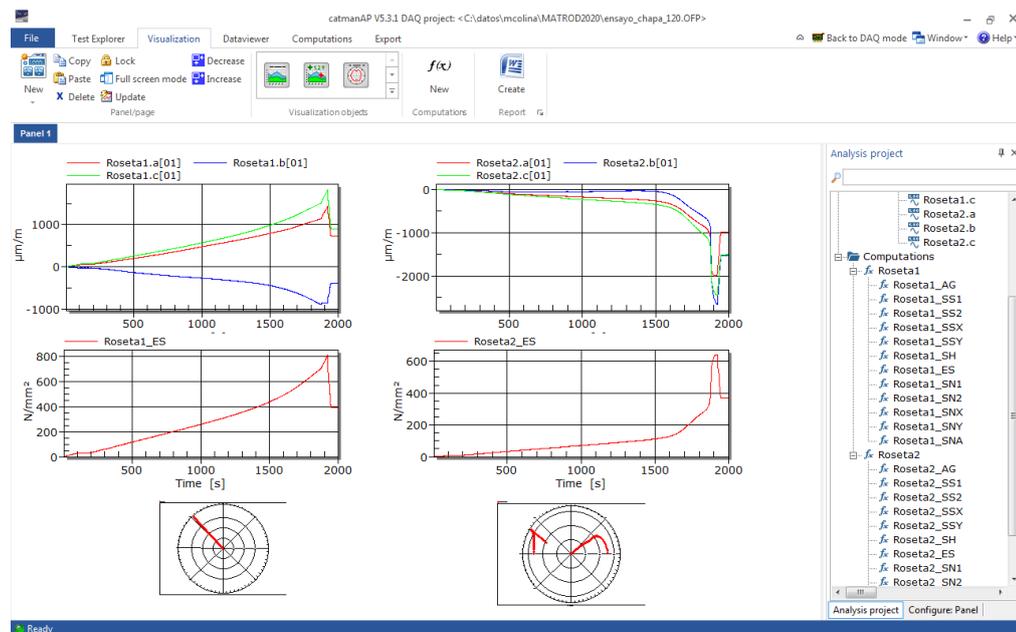
Figura 38. Detalle gráfico de carga/desplazamiento del sensor del actuador.

Examinando la gráfica se puede apreciar un escalón en torno a 2,5 KN que se corresponde a la compresión total de los elementos de amortiguación que ayudan a disminuir la vibración del actuador. Por otro lado, la última fase de carga sería descartable en la correlación, ya que habrá elementos que han sufrido rotura y puede llevar a error tanto en la simulación como en los datos medidos de deformación. Los valores máximos y la pendiente de deformación del tramo elástico son los que se muestran a continuación:

MUESTRA	CARGA MÁXIMA (N)	PENDIENTE (N/mm)
1	27.780	629

Tabla 2. Valores de carga máxima y pendiente de desplazamiento.

A partir del ensayo, las rosetas obtienen los datos de deformación en los puntos donde se determinó la ubicación de las mismas. Durante el ensayo, se recogen los valores de los tres canales de cada roseta de todo el proceso, tal como se aprecia en la siguiente imagen:



Extrayendo los datos obtenidos para la carga de 25kN que se aplicó en la simulación se tienen los siguientes resultados:

		Medida XX	Medida YY	Medida XY
MUESTRA 1 (Carga 25kN)	Roseta 1	769.4	-428.1	953.1
	Roseta 2	-253	-35.9	-333.5

Tabla 3. Deformación máxima registrada.

Con estos datos se puede realizar la comparativa de resultados, obteniendo el coeficiente de correlación y analizando la forma de las curvas registradas con las que resulten de modelo virtual.

6.2.4. Análisis de resultados

Como en el caso anterior, se trasladan los resultados experimentales al software para analizar la correlación que existe con los valores teóricos obtenidos de la simulación. Se asigna la correspondencia de los resultados de las galgas virtuales a las reales enlazando así las medidas máximas tomadas en el ensayo.

Se representan los valores del ensayo, de la simulación y su correlación en las gráficas siguientes:

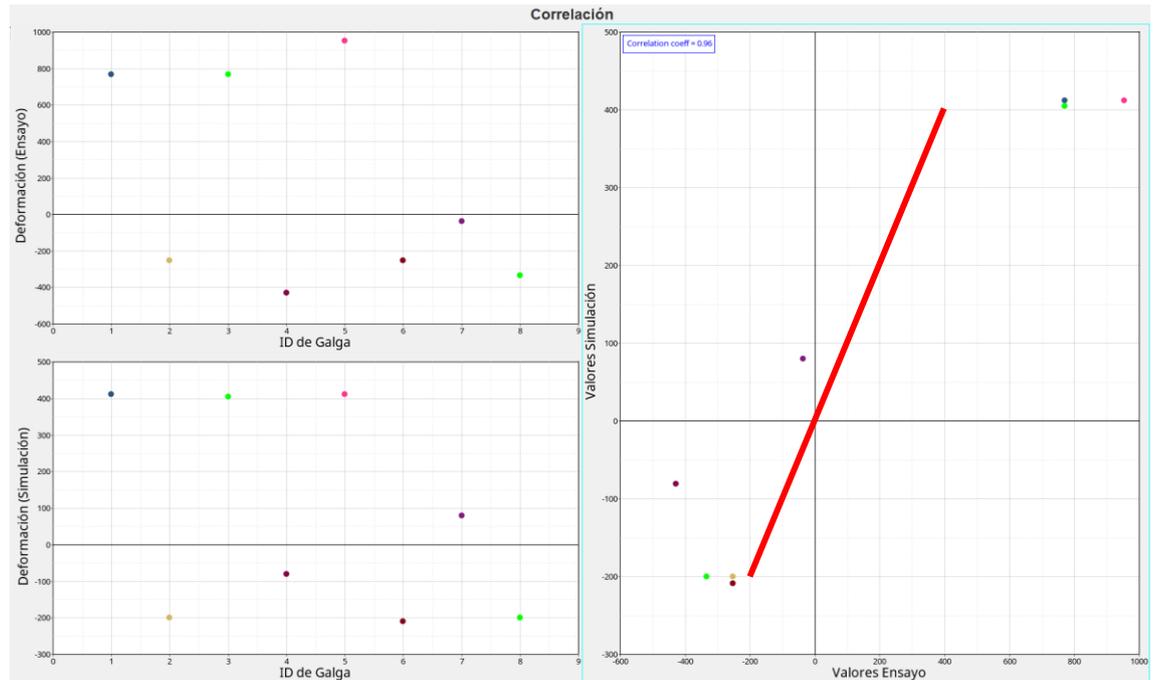


Figura 39. Gráfico correlación muestra 1.

Se puede observar que los valores medidos en el ensayo son más altos que los obtenidos en la simulación. Podría deberse a que la carga está a un nivel muy elevado y existen zonas donde la deformación está cercana a la rotura. Además, los valores recogidos por la galga 2b (roseta a 45 grados en el plano inclinado) tienen el signo cambiado, lo cual puede deberse a un intercambio en la polaridad de la medición de la galga o a la presencia de abolladura en esa zona. En general, se mantiene una proporcionalidad buena puesto que los distintos pares de valores tienen una concordancia razonable que se refleja en que el valor de correlación está en 0,96.

Con respecto a la comparación de los resultados en el cálculo transitorio, se realiza la representación de los valores de deformación medidos en las galgas con los valores de la simulación a lo largo del tiempo. De esta forma se comprueba que la evolución de los valores de deformación y su magnitud.

A continuación se representan los gráficos correspondientes a cada roseta donde aparecen los valores de la simulación como E1, E2 y E3 que corresponden a los valores medidos de las galgas a, b y c.

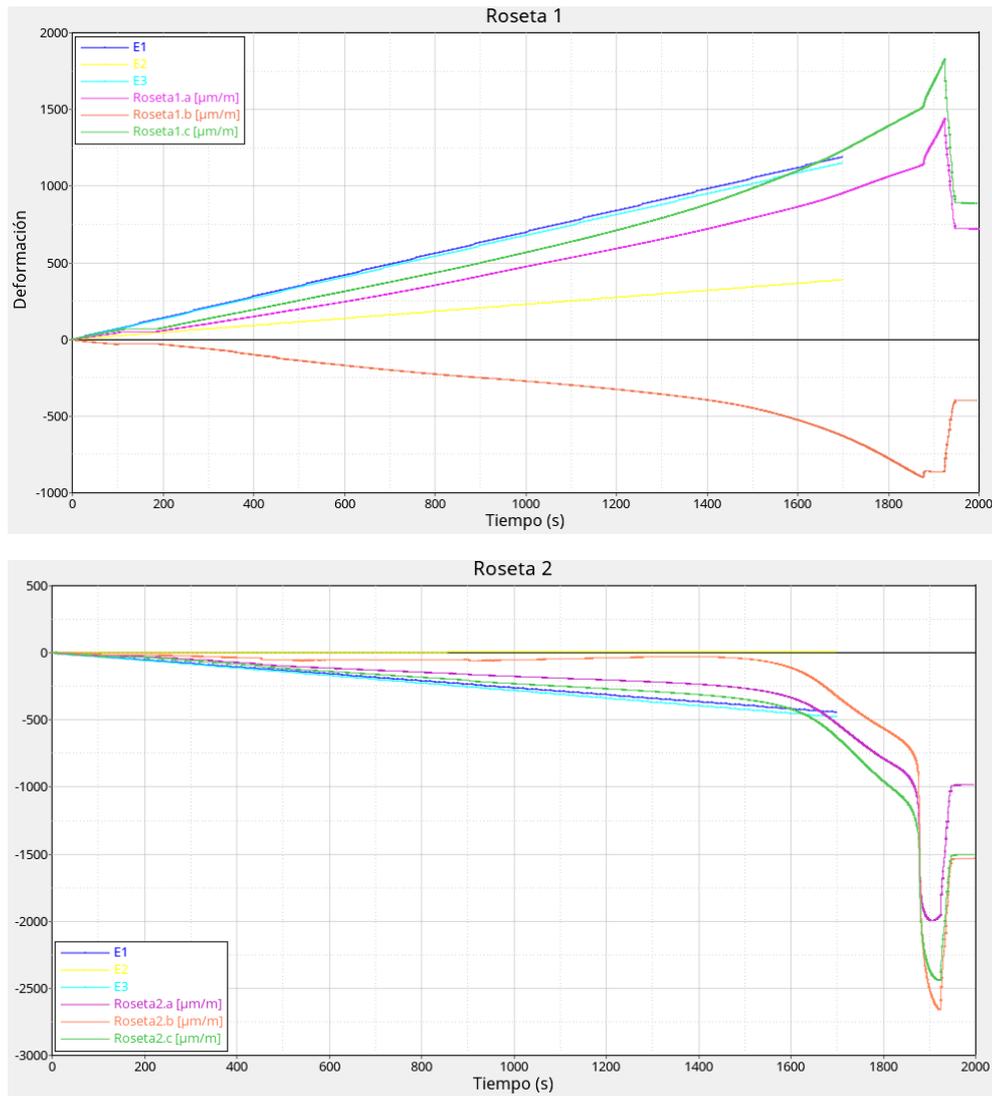


Figura 40. Deformación ensayo/simulación.

Examinando las curvas se puede comprobar que los resultados de las mediciones en las galgas son inferiores en la zona inicial del ensayo a los evaluados mediante el cálculo de elementos finitos. En cambio, en la zona final del ensayo la tendencia del cálculo es mantener la linealidad del comportamiento y por tanto la deformación registrada en el ensayo es superior. Este hecho confirma el resultado obtenido anteriormente para el cálculo estático con carga de 25kN.

La pendiente de las curvas es similar en las tres medidas de cada galga excepto con el par de los valores E2/Roseta2.b que tiene el signo opuesto. Este efecto ya se ha detectado en el análisis estático y parece corroborar que la polaridad de los terminales de esa galga esta cambiada.

En conclusión, se verifica la aptitud de la metodología de medida, de la realización del cálculo de simulación y del tratamiento de los resultados. La realización previa de los modelos de simulación y el diseño de los ensayos de validación mediante las herramientas propuestas garantiza los resultados en el ensayo real y facilita la comunicación entre ambos sistemas para favorecer la eliminación de incertidumbres.

6.3. Resumen de resultados

La realización de las pruebas, experiencias piloto y los casos estudiados descritos en este apartado durante la ejecución del proyecto han permitido realizar la puesta en marcha del prototipo de plataforma de pruebas.

Se han estudiado las características de los elementos y las metodologías que intervienen para analizar posteriormente las incertidumbres de la medida y del proceso de correlación, recopilando las recomendaciones para la ejecución de ensayos, simulaciones y su correlación.

Así mismo, los casos de estudio se han realizado con la versión final del software específico de análisis de correlación de datos permitiendo agilizar los cambios durante el transcurso de las experiencias y agilizando el análisis de los resultados y la correlación.

7. Otras actividades desarrolladas en la línea de investigación

Se han desarrollado otras actividades en la misma línea de investigación de desarrollo y optimización de producto:

- Se ha adquirido normativa y se han asistido a comités de estudio que han permitido conocer en profundidad el nivel de conocimiento así como potenciar la relación con las empresas para difundir la información técnica y las capacidades desarrolladas.
- Se han realizado tareas para fomentar la participación de las empresas del sector y del centro en proyectos europeos e internacionales a nivel de difusión de convocatorias a través de internet o mediante visitas a empresas.

8. Referencias bibliográficas

- Kumar Pradhan, K., Chakraverty, S. (2019). Computational structural mechanics. Academic Press.
- Fred Ramirez,W., (1997). Computational methods in process simulation. Butterworth-Heinemann
- Celigüeta Lizarza, J.T., (2000). Metodo de los elementos finitos para análisis estructural. San Sebastián: Unicopia C.B.
- Thompson, M.K., Thompson, J.M., (2017). ANSYS mechanical APDL for finite element analysis
- Larson, M.T., Bengzon,F. (2013). The finite element method:Theory, implementation and practice. Springer 10.1007/978-3-642-33287-6.
- Crisfield M. A., (1986) Finite elements and solution procedures for structural analysis. Swansea: Pineridge Press.
- Reissner E., (1945). The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates, ASME J. Applied Mechanics. Vol 12, pp. 69-76.
- Nuñez,C., Roca, A., Jorba, J. (2004). Comportamiento mecánico de los materiales. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Gustavo Silva, R., Molimard, J., Vautrin, A. (2007). Exact and efficient interpolation using finite elements shape functions. European journal of computational mechanics. 18:3-4, 307-331.
- Awais Khan, M.Tésis (2014). Tesis doctoral: Investigations on noise level in AC and DC bridge circuits for sensor measurement systems, Bremen: IMSAS, Universidad de Bremen.