

Master interuniversitario en integridad estructural y durabilidad de materiales, componentes y estructuras

TRABAJO FIN DE MASTER

Título:

Diseño, construcción y estudio del comportamiento a fatiga de un pórtico de acero

Tutor industrial: D. Manuel López Aenlle

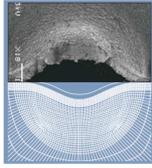
Departamento: Construcción e ingeniería de fabricación

Tutor académico: D^a Cristina Rodríguez González

Departamento: Construcción e ingeniería de fabricación

Universidad de Oviedo

Julio de 2013



*Master interuniversitario en integridad estructural y
durabilidad de materiales, componentes y estructuras*

TRABAJO FIN DE MASTER

Título:

**Diseño, construcción y estudio del comportamiento a
fatiga de un pórtico de acero**

Tutor industrial:

Manuel López Aenlle

Firma

Tutor académico:

Cristina Rodríguez González

Firma

Alumno:

Sergio Blasón González

Firma

Universidad de Oviedo

Julio de 2013

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Objetivos	1
2	CONCEPTOS BÁSICOS.....	2
2.1.	Introducción a la dinámica de estructuras.....	2
2.1.1.	Sistemas de un grado de libertad.....	2
2.1.2.	Sistema de N-grados de libertad.....	5
2.1.3.	Métodos de resolución en sistemas de N-grados de libertad.....	5
2.2.	Resonancia	6
2.3.	Análisis modal de estructuras.....	8
2.4.	Fatiga.....	11
3	NORMATIVA VALORADA	12
3.1.	EUROCÓDIGO	12
3.1.1.	Nociones generales.....	12
3.1.2.	Consideraciones particulares.....	15
3.2.	Procedimiento FITNET.....	15
4	FASE INICIAL: DESARROLLO CONCEPTUAL Y PUESTA EN MARCHA..	16
4.1.	Diseño de la estructura	17
4.2.	Caracterización del material.....	19
4.3.	Fabricación del pórtico.....	20
4.4.	Fijación de la estructura al soporte.....	21
5	INSTRUMENTACIÓN EMPLEADA.....	25
5.1.	Registro y procesado de aceleraciones.....	25
5.2.	Mecanismo de sollicitación de carga dinámica.....	27
5.3.	Célula de carga.....	28
5.4.	Galgas extensométricas	28

5.5.	Láser	29
6	DESARROLLO DE EXPERIMENTACIÓN	30
6.1.	Análisis modal inicial.....	30
6.2.	Modelo numérico	31
6.3.	Ciclos de carga dinámica sobre la estructura	33
6.4.	Análisis de presencia de daño	34
6.5.	Estimación de tensiones	35
7	CÁLCULOS	36
7.1.	Ley de momentos sobre el pórtico	36
7.2.	Desplazamiento en el punto medio del dintel	37
7.3.	Inercia del perfil	38
7.4.	Tensiones a partir de la medición de la célula de carga.....	38
7.5.	Desplazamiento real sobre la estructura.....	39
7.6.	Estimación de vida a fatiga	40
7.7.	Tensiones a partir de la medición con galgas extensométricas.....	40
7.8.	Tensiones resultantes del modelo en Abaqus.....	41
7.9.	Desplazamiento en modelo numérico	43
7.10.	Tensiones Hot-Spot	43
7.11.	Vida a fatiga bajo tensión hot-spot.....	45
8	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	46
8.1.	Comparativa: comportamiento dinámico, real VS numérico.....	46
8.2.	Efectos de la resonancia	47
8.3.	Tensiones obtenidas	48
8.4.	Vida a fatiga	48
8.5.	Localización de la presencia de daño	48
9	CONCLUSIONES.....	49

LISTA DE FIGURAS

Fig 2-1 Esquema sistema de un grado de libertad	2
Fig 2-2 SDOF incluyendo fuerzas de inercia.....	3
Fig 2-3 Representación de respuesta amortiguada de un sistema SDOF en vibración libre.....	5
Fig 2-4 Ejemplo de identificación mediante la técnica FDD.....	10
Fig 2-5 Ejemplo de ajuste en EFDD	11
Fig 3-1 Curvas S-N. Eurocódigo.....	14
Fig 3-2 Amplitud de tensiones asociadas a situaciones sin uniones soldadas	14
Fig 3-3 Categorías de detalle. Eurocódigo.....	15
Fig 4-1 Bancada	17
Fig 4-2 Apoyo derecho del pórtico	18
Fig 4-3 Disposición global pórtico-bancada	18
Fig 4-4 Pórtico	19
Fig 4-5 Determinación de E (capturas de ARAMIS).....	20
Fig 4-6 Fijación apoyo-bancada.....	21
Fig 4-7 Fijación pórtico-apoyo	21
Fig 4-8 Pórtico fijado	22
Fig 4-9 Excitador (vista frontal).....	22
Fig 4-10 Excitador (lateral).....	22
Fig 4-11 Excitador, sujeción	23
Fig 4-12 Excitador, extensores.....	23
Fig 4-13 Colocación de varilla.....	23
Fig 4-14 Sistema estructura-varilla-excitador.....	24
Fig 5-1 Situación de acelerómetros.....	26
Fig 5-2 Esquema de la conexión	26

Fig 5-3 Conexión pórtico-excitador.....	27
Fig 5-4 Colocación de la célula de carga durante la medición de fuerza.....	28
Fig 5-5 Galgas extensométricas en el dintel	29
Fig 5-6 Medida de desplazamiento con láser.....	29
Fig 6-1 Resultado EFDD ATReMIS.....	30
Fig 6-2 Evolución de las frecuencias propias de cada modo según el número de ciclos de carga.....	35
Fig 7-1 esquema pórtico sometido a carga puntual P	36
Fig 7-2 Diagrama de momentos asociado.....	36
Fig 7-3 Asimilación a viga biarticulada.....	37
Fig 7-4 Medida de la célula de carga (eje de abscisas, fuerza medida [N]; eje ordenadas, tiempo [s])	39
Fig 7-5 Tensiones medida por la galga en el punto medio del dintel	40
Fig 7-6 Tensiones medida por la galga en el punto a 25mm del centro del dintel	41
Fig 7-7 Tensiones bajo desplazamiento puntual de 1.72mm	42
Fig 7-8 Tensiones bajo desplazamiento puntual de 1.72mm (sin pletina).....	42
Fig 7-9 Desplazamientos verticales obtenidos bajo carga puntual de 93,69N.....	43
Fig 7-10 Tensiones Hot-Spot, procedimiento FITNET	44
Fig 7-11 Categorías de detalle a fatiga (FAT)	45
Fig 8-1 Comparativa frecuencias naturales estructura real VS modelos numéricos. Diferencias.....	46

1 INTRODUCCIÓN

El contenido de este documento nace con el fin de servir como trabajo fin del Máster en Integridad y Durabilidad de Materiales, Componentes y Estructuras.

Se trata, por tanto, del último paso preciso para la obtención del citado título. De tal forma que el propósito para el desarrollo de este trabajo es poner en práctica las aptitudes adquiridas durante la impartición de máster.

El presente proyecto surge dentro del Área de Mecánica de los Medios Continuos, donde el alumno autor del trabajo se encontraba desarrollando tareas investigadoras relacionadas con el análisis modal. El trabajo ha sido tutorado por el doctor D. Manuel López Aenlle; la supervisión bajo la figura de tutora académica asociada al máster, corrió a cargo de la doctora D^a Cristina Rodríguez González.

Así pues, se busca poner en práctica varios de los aspectos analizados durante el curso, del mismo modo que emplear herramientas y procedimientos estudiados en el mismo. También, aprovechando los desempeños laborales a los que el autor se dedicaba al comienzo de esta ocupación, se explotarán recursos relacionados con la dinámica de estructuras.

1.1. Objetivos

Los propósitos fijados al inicio del proyecto son los que se citan en el siguiente listado:

- Diseño de estructura metálica.
- Caracterización dinámica de la estructura mediante análisis modal operacional.
- Creación de modelo/s numérico/s.
- Sometimiento a carga cíclica a la estructura.
- Cálculo de tensiones sobre las secciones críticas de la estructura.
- Predicción de la vida a fatiga de la estructura.
- Desarrollo de análisis para la de la detección de fisuras.
- Comparativa entre los resultados experimentales y los propios del modelo numérico.

2 CONCEPTOS BÁSICOS

En los siguientes apartados se van a tratar aspectos teóricos relativos al comportamiento dinámico, a la técnica de análisis modal e incidencia del fenómeno de resonancia sobre sistemas estructurales. También se documentará el fundamento de la metodología empleada para estimación de tensiones efectuada durante los ensayos.

Dado que no es el objetivo de este proyecto profundizar en la base analítica de los conceptos mentados en el párrafo anterior, se abordarán únicamente de manera introductoria con objeto de dar una idea esquemática de cada uno de los aspectos presentados, teniendo presente la amplia bibliografía existente documentando cada temática.

2.1. Introducción a la dinámica de estructuras

2.1.1. Sistemas de un grado de libertad

Con las hipótesis adecuadas, ciertas estructuras pueden modelizarse como sistemas de un grado de libertad (SDOF).

Sea una estructura idealizada como un oscilador de masa m , rigidez k , y cociente de amortiguamiento c , sometida a una carga externa $p(t)$, entonces con un único desplazamiento $u(t)$, la posición de la masa del sistema queda totalmente definida, por lo tanto, el sistema se considera como un SDOF.

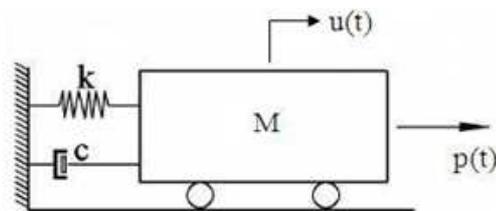


Fig 2-1 Esquema sistema de un grado de libertad

Para obtener la ecuación de equilibrio de movimiento del sistema, se construye el diagrama del mismo como sólido libre, incluyendo las fuerzas de inercia:

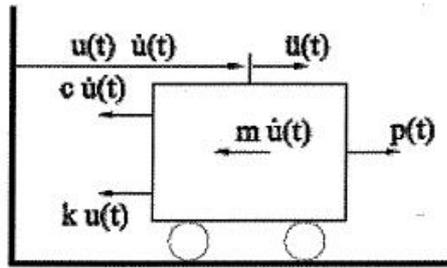


Fig 2-2 SDOF incluyendo fuerzas de inercia

Si se aplica el Principio de D' Alambert, suponiendo masa constante y coeficiente de amortiguamiento y rigidez lineal, se llega a la ecuación de equilibrio del sistema siguiente:

$$(2.1) \quad F_{\text{inercia}} + F_{\text{muelle}} + F_{\text{amortiguados}} = p(t)$$

La fuerza de rigidez y la fuerza de amortiguamiento que actúan sobre la estructura son función del movimiento relativo entre la masa y el suelo, mientras que la fuerza de inercia es proporcional a la aceleración absoluta.

La fuerza del muelle $k \cdot u(t)$, la fuerza de inercia viene dada por la segunda ley de Newton, $m \ddot{u}(t)$ y la fuerza de amortiguamiento es en este caso $c \dot{u}(t)$ donde c es el coeficiente de amortiguamiento del amortiguador.

Así, la ecuación (2.1) se puede escribir como:

$$(2.2) \quad m \ddot{u}(t) + c \dot{u}(t) + k \cdot u(t) = p(t)$$

que es la ecuación general de movimiento para sistemas de un grado de libertad.

En el caso de vibración libre no amortiguada, la ecuación (2.2) se transforma en:

$$(2.3) \quad m \ddot{u}(t) + k \cdot u(t) = 0$$

donde, si se supone una solución del tipo: $u(t) = U e^{i\omega t}$ se debe cumplir:

$$(2.4) \quad (k - \omega^2 m) = 0$$

cuya única solución se corresponde con un único modo de frecuencia natural ω_0 dada por:

$$(2.5) \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

La solución sería:

$$(2.6) \quad u(t) = U e^{i \sqrt{\frac{k}{m}} t}$$

En el caso del estudio de la vibración con amortiguamiento viscoso, la ecuación (2.2) se transforma en:

$$(2.7) \quad m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + k \cdot u(t) = 0$$

En este caso se ha de utilizar una solución más general del tipo $u(t) = U e^{s t}$ donde s es en este caso un número complejo. La condición a cumplir es que:

$$(2.8) \quad (ms^2 + cs + k) = 0$$

Cuyas soluciones vienen dadas por:

$$(2.9) \quad S_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \frac{\sqrt{c^2 - 4km}}{2m}$$

donde definiendo la frecuencia natural como $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ y el índice de amortiguamiento tal que $\zeta = \frac{c}{c_0} = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ la ecuación (2.9) quedaría como:

$$(2.10) \quad S_{1,2} = -\omega_0 \zeta \pm i \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$$

cuya solución modal se puede expresar como:

$$(2.11) \quad u(t) = -U e^{-\zeta t \omega_0} e^{i(\omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2})t}$$

donde se tiene un modo de vibración y una frecuencia natural compleja de dos términos:

- ✓ Una parte oscilatoria o imaginaria caracterizada por la frecuencia natural amortiguada:

$$(2.12) \quad \omega_D = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$$

- ✓ Una parte real o decreciente caracterizada por la relación de amortiguamiento $\zeta \omega_0$

El significado físico de estos dos términos es, Figura 2.3:

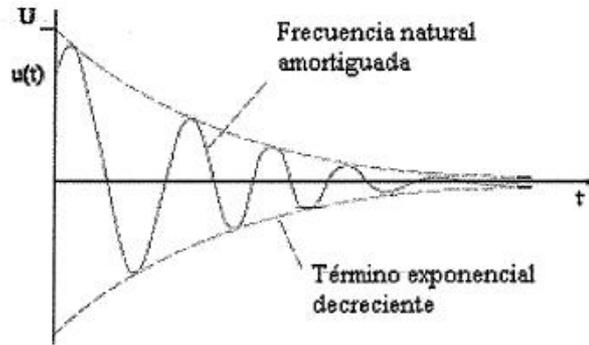


Fig 2-3 Representación de respuesta amortiguada de un sistema SDOF en vibración libre

2.1.2. Sistema de N-grados de libertad

Las estructuras son sistemas continuos y como tales poseen un número infinito de grados de libertad. La solución exacta requiere usar métodos analíticos complejos (ecuaciones diferenciales en derivadas parciales), que son aplicables solamente a estructuras relativamente simples. Como consecuencia, es preferible una alternativa que limite el número de grados de libertad del sistema y que, simultáneamente, conduzca a una solución aproximada del problema.

Aunque en algunos casos los sistemas dinámicos pueden modelizarse con un solo grado de libertad, en general, será necesario que esta se realice a través de múltiples grados de libertad. Los grados de libertad de un sistema pueden ser los desplazamientos de ciertos puntos discretos de la estructura (por ejemplo los nudos) o pueden ser coordenadas generalizadas.

En sistemas de N-grados de libertad, las ecuaciones diferenciales de equilibrio se pueden expresar de forma matricial. Así, para un caso general se tiene:

$$(2.13) \quad [M]\{\ddot{u}(t)\} + [C_z]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{p(t)\}$$

Donde $[M]$, $[C_z]$ y $[K]$ son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez, $\{u(t)\}$ es el vector de desplazamiento y $\{p(t)\}$ el vector de fuerzas exteriores.

2.1.3. Métodos de resolución en sistemas de N-grados de libertad

Para el cálculo de la respuesta de sistemas de N grados de libertad podemos distinguir los siguientes entre los métodos de solución:

o Solución directa en el dominio del tiempo:

Con este método se resuelve el sistema de N ecuaciones diferenciales de forma directa. El método de solución depende del tipo de carga, resultando muy sencillo en el caso de vibración libre o de carga armónica y siendo mucho más complicado en el caso de carga general. El método se puede utilizar tanto para sistemas lineales como no-lineales.

En el caso de un sistema de N-grados de libertad sin amortiguamiento y bajo vibración libre, la ecuación (2.13) se simplifica como:

$$(2.14) [M]\{\ddot{u}(t)\} + \{u(t)\} = \{p(t)\}$$

donde el vector $\{p(t)\}$ será nulo para el caso de vibración libre y las soluciones no triviales son aquellas que satisfacen el problema de valores propios:

$$(2.15) \text{Det} | [K] - \omega^2[M] | = 0$$

cuya solución serán N autovalores ω^2 correspondientes con las frecuencias naturales del sistema. Sustituyendo cada uno de estos autovalores en la ecuación (2.15) se obtienen una serie de autovectores para $\{U\}$, $\{\psi_i\}$ que corresponden al modo de vibración de la frecuencia natural ω_i .

o Métodos basados en el principio de superposición:

Entre los pueden citarse: análisis en el dominio del tiempo; análisis en el dominio de la frecuencia; método de superposición modal (dominio del tiempo).

2.2. **Resonancia**

Cuando sobre una estructura actúa una carga cíclica con una frecuencia próxima a la natural de la estructura se produce una amplificación importante de los desplazamientos con respecto al caso estático. La magnitud de esta amplificación depende del valor del amortiguamiento, de tal forma que, cuanto menos sea este último, mayor será el grado de amplificación.

La amplificación dinámica, D, se define como la relación entre la amplitud del movimiento bajo una excitación dinámica y la amplitud ante una sollicitación estática; de manera que:

$$(2.16) \quad D = \frac{|U_{din}|}{|U_{est}|} = \frac{\frac{P_0}{k}}{\frac{1}{\sqrt{(k-m\omega^2)^2 + (c\cdot m)^2}}} =$$

donde:

- U ≡ amplitud de movimiento
- P₀ ≡ amplitud de la fuerza
- k ≡ r rigidez
- c ≡ amortiguamiento
- ω ≡ f frecuencia de excitación

Tal amplificación afecta, como resulta evidente, al aumento del valor de las tensiones presentes en los componentes de la estructura.

Es por ello que en las estructuras que previsiblemente vayan a estar sometidas a cargas repetitivas hay que cuidar con especial atención que éstas no actúen con una frecuencia cercana a alguna de las frecuencias naturales del sistema, puesto que las consecuencias pueden ser muy graves.

Si bien puede consultarse la base teórica relativa a la materia en multitud de bibliografía especializada, va a exponerse la expresión empleada para valorar el efecto de la resonancia sobre el pórtico que ocupa el interés del trabajo:

$$(2.17) \quad H(\omega) \cdot F(\omega) = U(\omega)$$

donde:

- F(ω) ≡ excitación del sistema
- U(ω) ≡ respuesta del sistema
- H(ω) ≡ Función de respuesta en frecuencia (FRF) que relaciona la excitación con la respuesta.

Se demuestra que la FRF adquiere la forma:

$$(2.18) \quad H(\omega) = \sum_i \frac{\Phi_i \cdot \Phi_i^T}{\omega_i^2 - \omega^2 + i \cdot 2 \cdot \zeta_i \cdot \omega \cdot \omega_i}$$

donde:

- i, se refiere al modo de vibración i-ésimo
- ω ≡ frecuencia de excitación del sistema
- ω_i ≡ frecuencia propia del modo i-ésimo
- Φ_i ≡ vector asociado al modo i-ésimo
- ζ ≡ índice de amortiguamiento

De donde se deduce que la respuesta del sistema viene dada por el sumatorio de la influencia de cada modo de vibración natural de la estructura.

Tomando ω = ω_i, y particularizando para el segundo modo de vibración (se verá más adelante como es el de objeto de estudio del proyecto) se llega a la expresión:

$$(2.19) \frac{\Phi_2 \cdot \Phi_2^T}{2 \cdot \zeta_2 \cdot \omega_2^2} \cdot F(\omega_2) = U(\omega_2)$$

Esto indica que, conocido los parámetros modales referidos al segundo modo de vibración (forma, frecuencia e índice amortiguamiento), puede estimarse el valor del desplazamiento estático equivalente a la carga dinámica aplicada a la misma frecuencia.

2.3. *Análisis modal de estructuras*

El análisis modal es una herramienta ampliamente utilizada en análisis de vibraciones, dinámica de estructuras, adaptación de modelos finitos, optimizaciones de diseño, control de vibraciones o aplicaciones de monitorización de estructuras mecánicas o civiles.

El análisis modal operacional (OMA) tiene gran importancia en la ingeniería civil y sistemas mecánicos. Esta técnica utiliza únicamente las respuestas (salidas) de la estructura en condiciones de operación (excitación natural o ambiental) para determinar los parámetros modales de la misma: frecuencias naturales, modos de vibración e índices de amortiguamiento.

Una de las características que hacen del OMA una herramienta muy adecuada en aplicaciones de ingeniería es que puede ser utilizado para la detección y monitorización de daño en estructuras. Este último ha sido uno de los propósitos por los que se ha empleado en el presente trabajo.

Los distintos métodos de identificación modal se pueden dividir en dos grupos: análisis en el dominio de la frecuencia y análisis en el dominio del tiempo. La técnica empleada en este trabajo ha estado basada en el dominio de la frecuencia.

Las técnicas de análisis utilizadas en el dominio de la frecuencia, se basan en la relación que existe entre las funciones de densidad espectral (PSD) de la entrada y la salida para un proceso estocástico:

$$(2.20) G_{yy}(j\omega) = H(j\omega) \cdot G_{xx}(j\omega) \cdot H(j\omega)^T$$

donde G_{xx} y G_{yy} son las matrices de densidad espectral de la entrada y la salida, respectivamente y $H(j\omega)$ es la matriz de la respuesta en frecuencia (FRF).

Los métodos en el dominio de la frecuencia (FD) se basan en la técnica conocida como "Peak Peaking" (PP). El Peak Peaking se fundamenta en que las frecuencias naturales

se pueden obtener directamente de los picos de la PSD y los modos a partir de la columna de la matriz de PSD, correspondiente a la frecuencia natural amortiguada. Los resultados obtenidos a través del PP son razonables si los modos están separados y bien definidos.

Las principales ventajas de estas técnicas frente a las del dominio del tiempo son la utilización de menos cálculo para obtener los modos, así como mayor rapidez y simplicidad de uso. En contraposición, para estructuras complejas el Peak Peaking presenta los siguientes inconvenientes:

- La precisión en los resultados está limitada por la resolución en frecuencia.
- Se pueden obtener los modos simulados en vez de los reales.
- La estimación del amortiguamiento puede ser errónea o imposible de realizar.
- Difícil de aplicar cuando la estructura en estudios presenta modos de vibración próximos.

Para evitar inconvenientes se desarrollaron nuevas metodologías basadas en el Peak Peaking.

Una de estas técnicas se conoce como la “Descomposición en el Dominio de la Frecuencia” (FDD), propuesta por Brincker et al. En el año 2000. Esta técnica se basa en la descomposición en valores singulares (SVD) de la matriz PSD de la salida, estimada a frecuencias discretas $\omega = \omega_i$, es decir:

La función de valores singulares se puede utilizar como función de identificación modal. Las frecuencias naturales se localizan a través de los picos de la gráfica de valores singulares y, mediante los vectores singulares correspondientes, se obtienen los modos de vibración. Como la SVD es capaz de separar la respuesta de la estructura del ruido presente en la señal, los modos se pueden localizar a partir de la gráfica de valores singulares, de modo que, tanto los modos próximos como los repetidos pueden ser fácilmente detectados.

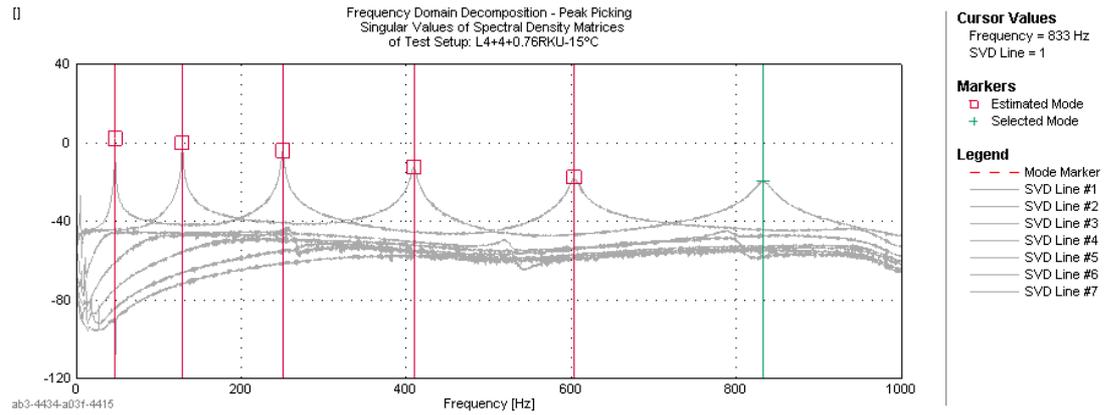


Fig 2-4 Ejemplo de identificación mediante la técnica FDD

El conjunto de datos se pasa al dominio del tiempo, mediante la antitransformada de Fourier (IFFT), teniendo así una aproximación de la función de correlación del sistema de un grado de libertad (SDOF) correspondiente. Con la función decreciente del SDOF se estima la frecuencia natural y el índice amortiguamiento se calcula a través de la técnica del decremento logarítmico.

Sin embargo, La técnica de FDD sólo permite estimar las frecuencias y los modos de vibración. A partir del método FDD se desarrolló un nuevo método de identificación, EFDD (Enhanced Frequency Domain Decomposition), que permite obtener tanto los modos de vibración y las frecuencias naturales como los índices de amortiguamiento. El amortiguamiento se estima a partir de los puntos cercanos a los puntos de la gráfica de valores singulares, cuyos vectores singulares tengan un MAC (Modal Assurance Criterion) suficientemente alto. El conjunto de datos se pasa al dominio del tiempo, mediante la antitransformada de Fourier (IFFT), teniendo así una aproximación de la función de correlación del sistema de un grado de libertad (SDOF). Con la función decreciente del SDOF se estima la frecuencia natural y el índice de amortiguamiento se calcula a través de la técnica del decremento logarítmico.

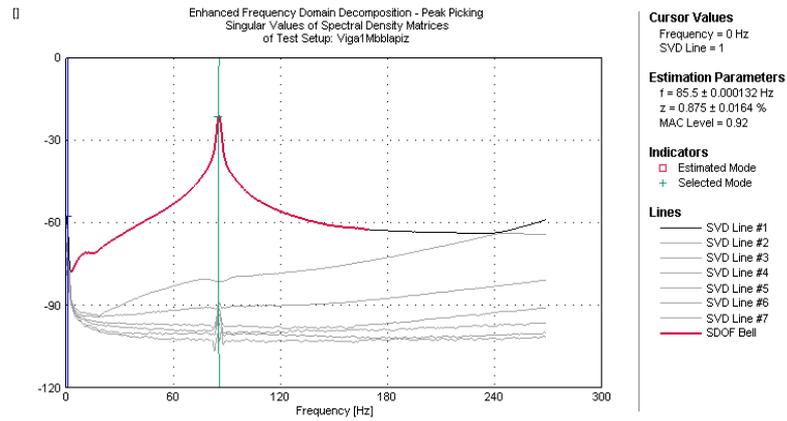


Fig 2-5 Ejemplo de ajuste en EFDD

2.4. Fatiga

La fatiga constituye una forma de fallo que comprende la iniciación y propagación de fisuras como consecuencia de tensiones de amplitud variable repetidas en el tiempo actuando sobre componentes estructurales. Suele referirse como un “proceso subcrítico” puesto que se da de manera previa a la rotura.

Este modo de fallo es uno de los que más relevancia presenta a la hora de abordar el diseño de componentes estructurales, pues puede provocar la fractura de ellos estando sometidos a tensiones muy por debajo de su resistencia mecánica. Dado que las consecuencias del fallo estructural pueden resultar muy graves, es de vital importancia prever el fenómeno de fatiga durante la etapa de diseño de componentes estructurales.

3 NORMATIVA VALORADA

3.1. EUROCÓDIGO

3.1.1. Nociones generales

El Eurocódigo 3 referido al diseño de estructuras de acero contiene un apartado, designado como 1-9, relativo a la fatiga. De forma que define una serie de métodos de evaluación de la resistencia a fatiga de diferentes elementos.

Los métodos indicados en esta norma fueron derivados de ensayos hechos a escala sobre probetas, incluyendo los efectos de imperfecciones geométricas y estructurales producidas durante la fabricación y conformado de los materiales (por ejemplo: efectos de tensiones residuales debidas a soldaduras).

Las resistencias a fatiga facilitadas están referidas a estructuras operando bajo condiciones atmosféricas normales y sin tener en cuenta los efectos derivados de la corrosión.

Los métodos de evaluación que propone son:

- Método de tolerancia al daño. Debe proporcionar una aceptable fiabilidad de que la estructura desarrollará satisfactoriamente su cometido durante la vida útil para la que fue diseñada; siempre que se practiquen las tareas de inspección y mantenimiento para la detección y corrección de daño por fatiga planteadas durante la vida de la estructura. Puede ser aplicado en aquellos casos donde un daño por fatiga dando lugar a una redistribución de tensiones sobre los componentes estructurales es admisible.
- Método de vida segura. Debe proporcionar un nivel aceptable de fiabilidad de que la estructura desarrollará de forma satisfactoria su cometido, durante el tiempo de vida útil previsto, sin necesidad de inspecciones periódicas durante su servicio del daño por fatiga. Debería ser aplicado en aquellos casos donde la formación local de grietas en un componente podría provocar el fallo del elemento o estructura.

Las resistencias a fatiga se determinan considerando el detalle estructural oportuno en cada caso, con sus efectos de entalla asociados. En los detalles geométricos presentados en la norma también se facilitan los lugares probables de inicio de grieta.

Se establece que, para la evaluación de componentes a fatiga, el cálculo de tensiones se efectuará sobre el sitio “potencial” de iniciación de grieta. Los efectos derivados de los detalles constructivos que originan concentración de tensiones se han de contemplar acorde con las tipologías presentadas en las tablas 8.1 a 8.10 de la norma.

La resistencia a fatiga en el caso de amplitudes de tensiones nominales se representa a través de curvas $\log \Delta\sigma_R$ - $\log N$, $\log \Delta\tau_R$ - $\log N$ y S-N, correspondientes con cada tipo de categoría de detalle.

Cada categoría de designa por un número que representa, en unidades de MPa, el valor de referencia $\Delta\sigma_C$ y $\Delta\tau_C$ para la resistencia a fatiga de 2 millones de ciclos. Para un amplitud constante de tensiones nominales, la resistencia a fatiga puede obtenerse de la siguiente expresión:

$$(3.1) \quad \Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m 2 \times 10^6 \quad \text{with } m = 3 \text{ for } N \leq 5 \times 10^6$$

El límite de fatiga a amplitud constante viene dado por:

$$(3.2) \quad \Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} \Delta\sigma_C = 0,737\Delta\sigma_C$$

La resistencia a fatiga, en función del valor de la variación de tensiones constante, se basa en las curvas que se ilustran a continuación:

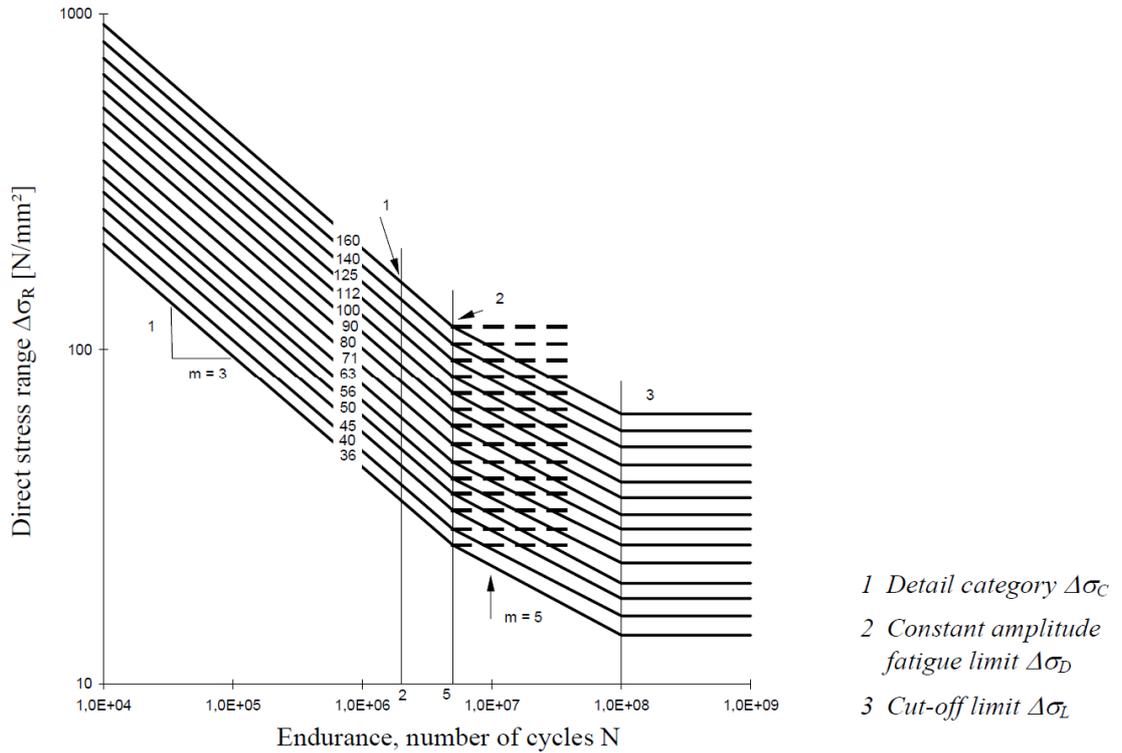


Fig 3-1 Curvas S-N. Eurocódigo

Los valores de $\Delta\sigma_C$ correspondientes al valor $N_C = 2e6$ ciclos fueron calculados para un nivel de confianza del 75% con una probabilidad de supervivencia del 95%.

En el caso de elementos estructurales sin soldaduras, la tensión media de influencia en la resistencia a fatiga debe tenerse en cuenta reduciendo la amplitud efectiva de tensiones cuando parte del ciclo de carga contiene sollicitaciones de compresión; siendo en tales casos necesario la determinación de $\Delta\sigma_{E-2}$:

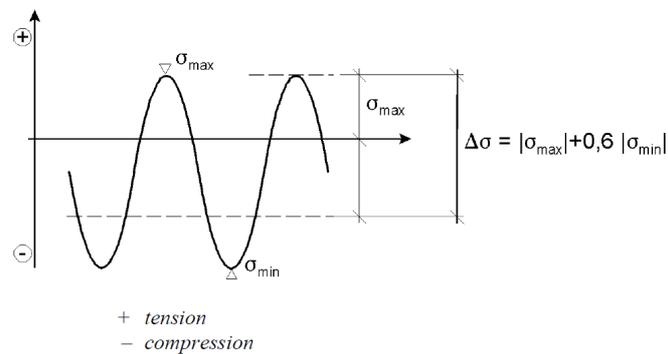


Fig 3-2 Amplitud de tensiones asociadas a situaciones sin uniones soldadas

3.1.2. Consideraciones particulares

La categoría de detalle que se corresponde con la estructura ensayada en este proyecto viene dada por la clase 80 según se deduce de la Tabla 8.4 de la normativa estudiada:

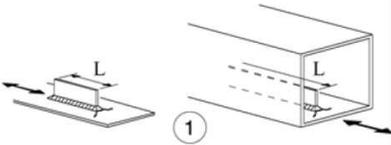
Detail category	Constructional detail		Description	Requirements
80	$L \leq 50\text{mm}$		<u>Longitudinal attachments:</u> 1) The detail category varies according to the length of the attachment L.	The thickness of the attachment must be less than its height. If not see Table 8.5, details 5 or 6.
71	$50 < L \leq 80\text{mm}$			
63	$80 < L \leq 100\text{mm}$			
56	$L > 100\text{mm}$			

Fig 3-3 Categorías de detalle. Eurocódigo

3.2. *Procedimiento FITNET*

Constituye un procedimiento de evaluación de integridad estructural.

La sección 7 de la guía FITNET hace referencia a la fatiga. Este módulo proporciona una serie de rutas de evaluación para analizar el daño a fatiga debido a cargas cíclicas o fluctuantes. Para abordar este tipo de sollicitación se discierne entre elementos fisurados y no fisurados.

La situación que aquí compete es la de componentes no fisurados. Se definen, como en el Eurocódigo, categorías en función de los detalles estructurales derivados de uniones soldadas.

En el caso de un componente no fisurado, con presencia de soldaduras, se procede a través de un análisis de la vida total del componente (de forma distinta a sí el componente presentase defectos, en cuyo caso el análisis oportuna valoraría la propagación de los mismos).

El procedimiento establece distintas rutas que marcan los pasos a seguir. En el caso de componentes no fisurados se exhiben tres posibles caminos: RUTA-1, relativa a tensiones nominales; RUTA-2, que hace referencia a tensiones de pico (hot spot stress); y RUTA-3, una aproximación local tensión-deformación.

En este trabajo se pondrá en práctica el procedimiento FITNET ejecutando los cálculos asociados a la RUTA-2.

4 FASE INICIAL: DESARROLLO CONCEPTUAL Y PUESTA EN MARCHA

Se cree oportuno, antes de exponer las características de los ensayos, mencionar ciertas consideraciones tenidas en cuenta en la toma de ciertas decisiones.

Dado que bajo la acción de una carga concentrada sobre el dintel de un pórtico la mayor tensión resultante sobre las fibras de dicho perfil se logra haciendo que actúe sobre el punto medio del mismo, fue en ese lugar donde se ejerció la fuerza puntual a través de la varilla conectada al excitador. De este modo, en caso de que aparecieran signos de daño en el pórtico, sería cabría esperar que surgiera en localizaciones cercanas a donde se experimentaran los mayores esfuerzos.

Dada la disposición de la pletina en medio del dintel, cabría esperar el inicio de la grieta sobre uno de los laterales de aquella, favorecido por el efecto concentrador de tensiones propiciado por la ejecución de los cordones de soldadura; de esta forma, tendrá singular relevancia calcular las tensiones sobre tales posiciones (tensiones iguales en ambos lados dada la simetría estructural y la situación de la carga). Además, si se tiene en cuenta que la colocación de la pletina hace aumentar la inercia del eje débil del perfil en las secciones afectadas por su posición, esto aumenta la probabilidad de que el comienzo de la fisura pudiera tener lugar en uno de los laterales del material agregado.

El excitador electro-dinámico inercial de vibraciones empleado tiene la capacidad de trabajar en un amplio rango de frecuencias. Además, la intensidad de su carga puede ser regulada. También ofrece la posibilidad de trabajar con distintos de señales de carga (aleatoria, periódica, etc.). En este caso, se perseguía “hacer trabajar” a la estructura en resonancia, esto es, haciendo que la carga actuando sobre ella tuviera una velocidad circunferencial igual a una de sus frecuencias naturales, en concreto, aquella que definiera el modo de vibración donde la amplitud de movimiento de los puntos situados en la sección media del dintel fuera el de mayor recorrido.

El hecho de excitar una estructura en estado de resonancia, propicia la amplificación de los efectos respecto al caso estático; de tal forma que una carga dinámica relativamente baja, actuando bajo una frecuencia natural del sistema sobre el que incide, puede dar lugar a los mismos efectos que una carga estática sensiblemente mayor.

Uno de los objetivos planteados al inicio de este trabajo fue identificar la evolución del daño si este llegar a producirse. Dicha damnificación daría lugar a una pérdida de rigidez del sistema estructural, la cual quedaría reflejada en un descenso paulatino de las frecuencias propias de cada modo de vibración. A fin de “capturar” el inicio de la fisura y sus consiguientes efectos se realizarían análisis modales periódicos procurando dejar constancia del progreso de daño.

Para desarrollar las tareas inherentes a las distintas metas planteadas se idea un esquema de trabajo que comprendió las etapas que se exponen en los siguientes puntos:

4.1. Diseño de la estructura

Para llevar a término este cometido se empleó el software de diseño por ordenador de *SolidWorks*, herramienta que funciona como un modelador de sólidos paramétricos.

Si bien fueron varias las formas que se estudiaron para constituir la estructura base del trabajo, finalmente se optó por una tipo pórtico simple (con dintel recto).

Una vez elegida la “silueta” del esqueleto se definió dónde se ubicaría. En este caso se quiso aprovechar una de las bancadas situadas en el laboratorio del Departamento de Construcción de la EPI de Gijón (ver figura 1).



Fig 4-1 Bancada

Conforme a las longitudes entre apoyos de la bancada, así como a la disposición de los orificios en ella (los cuales usaríamos como base de sujeción del sistema sobre el que descansaría el pórtico), se ejecutó el diseño del marco estructural.

Se realizó un diseño CAD de cada uno de las partes que constituiría el armazón, dando lugar a la siguiente lista de componentes: apoyo izquierdo; apoyo derecho; pilares; dintel; pletinas “de apoyo”.

Asimismo se llevó a cabo un ensamblaje de todos ellos donde quedó reflejado la situación exacta del pórtico sobre la bancada, que más tarde fue verificada una vez se tuvieron disponibles los componentes reales de la estructura.

Se ilustran, en las siguientes figuras, uno de los apoyos (figura 2) la disposición global (figura 3), así como la estructura porticada (figura 4):

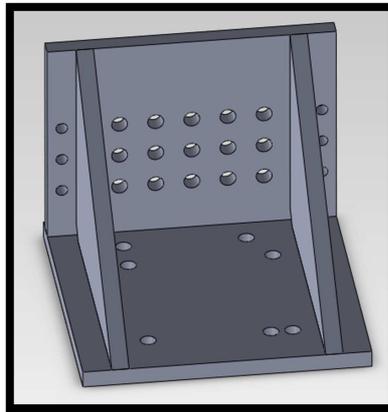


Fig 4-2 Apoyo derecho del pórtico

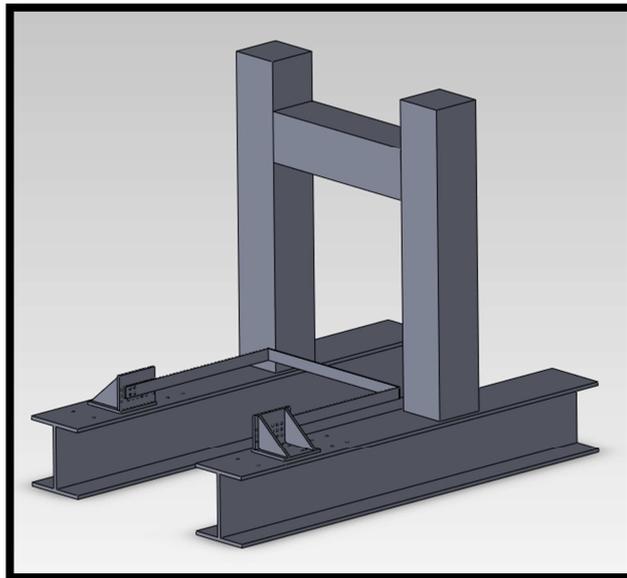


Fig 4-3 Disposición global pórtico-bancada

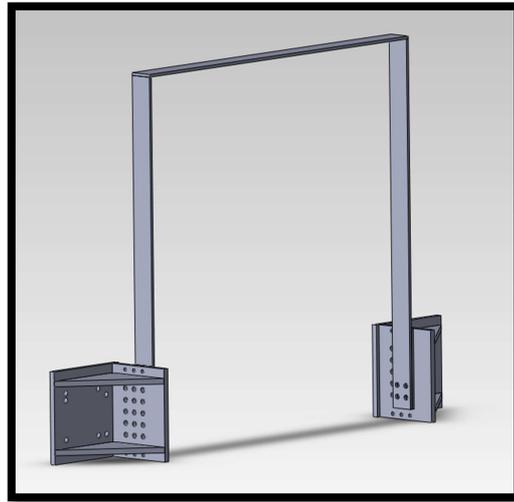


Fig 4-4 Pórtico

Es oportuno señalar en este punto un par de aspectos relativos al diseño de los apoyos: las distancias entre agujeros de la chapa en contacto con la bancada se definieron en función de los presentes en esta última; la matriz de agujeros de la chapa unida ortogonalmente a la anterior fue ejecutada para facilitar posibles cambios en la posición del pórtico.

Otro detalle a comentar es la decisión de disponer de una pletina intermedia entre la estructura y las bases a las que esta se atornillaría: la razón fue prevenir la posibilidad de que surgiera la necesidad de practicar unos cordones de soldadura para asegurar la fijación del pórtico, evitando, de esta manera, actuar sobre las chapas del sistema de apoyos.

Las uniones entre el dintel y los pilares serían soldadas; mientras que la fijación pórtico-apoyos se resolvería a través de 4 uniones atornilladas en cada lado.

El espesor elegido para las pletinas que conformarían el pórtico fue de 6mm.

4.2. Caracterización del material

La estructura fue ejecutada en acero S 275 JR+M.

A la hora de introducir los datos en el programa de cálculo por elementos finitos es imprescindible definir ciertas características del material, en el problema: la densidad y las características elásticas del mismo (el módulo elástico, E, y el coeficiente de Poisson, ν).

Para hallar la masa por unidad de volumen del acero empleado se aprovechó el cálculo automático de volumen que permite la herramienta de *SolidWorks* una vez conformada la estructura, y se pesó el pórtico, dando lugar a una densidad de 7967.14 Kg/m^3 .

Si bien se suele tomar como valor representativo de módulo de elasticidad, E , de estructuras de acero $2,1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, en este caso, se quiso estimar su valor real a través del software de ARAMIS disponible en el laboratorio de construcción de la EPI de Gijón.

ARAMIS es una aplicación informática que constituye un sistema de análisis óptico capaz de realizar mediciones dinámicas de materiales y estructuras complejas; permitiendo una rápida caracterización de materiales. De esta forma se llevó a cabo un ensayo de tracción de una probeta, del mismo acero que el pórtico, con la máquina de ensayos universales MTS 810.

Del mentado ensayo (no normalizado) se extrajo un valor de $E = 227 \text{ GPa}$; y del módulo de Poisson $\nu = 0.27258$.

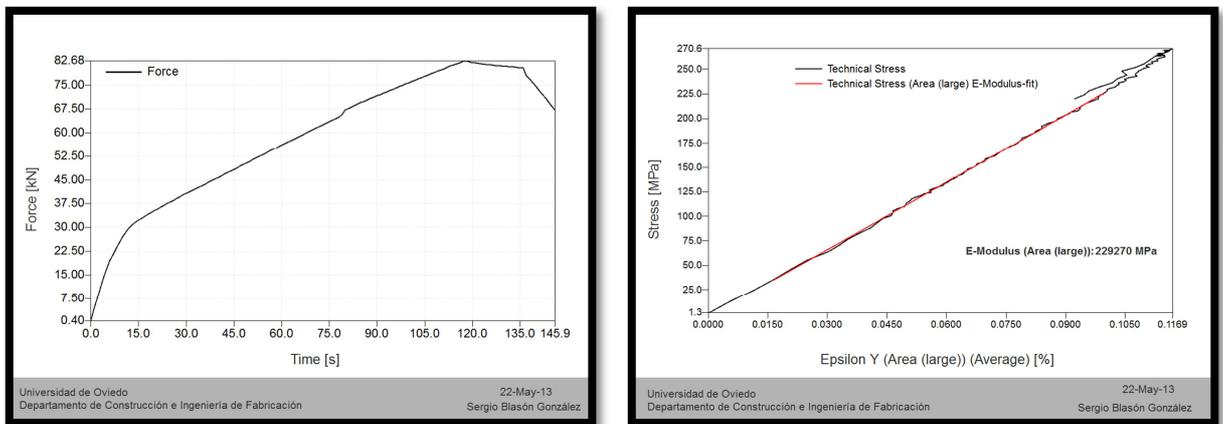


Fig 4-5 Determinación de E (capturas de ARAMIS)

4.3. Fabricación del pórtico

Quedando completamente fijados cada detalle estructural se generaron los planos del despiece y se facilitaron al maestro del taller del laboratorio.

Los agujeros pasantes de las chapas que conformaron las bases de la estructura se practicaron a través de una fresadora de control numérico en el taller localizado en el módulo 6 de la EPI (Laboratorio de Diseño Mecánico).

Las uniones soldadas (descritas en el apartado anterior) fueron efectuadas mediante soldadura por electrodo.

Con objeto de estudiar una de las categorías de detalle clasificadas en tema de fatiga del Eurocódigo se unió una pletina por medio de una soldadura en el punto medio del dintel (posición donde actuaría posteriormente la carga localizada de forma cíclica). De esta manera,

durante el proceso de adhesión, fruto de las contracciones diferenciales propias de las soldaduras, se originarían tensiones residuales infiriendo presumiblemente un efecto concentrador de tensiones.

4.4. Fijación de la estructura al soporte

Como resulta evidente, de forma previa al inicio de los ensayos se llevó a término la colocación oportuna de la estructura sobre la bancada, así como de los dispositivos de medición (acelerómetros y célula de carga), junto con el aparato actuador que proporcionaría la carga (el excitador dinámico).

La sujeción de los apoyos del pórtico sobre la bancada se efectuó por medio de cuatro uniones atornilladas en cada uno de los dos soportes.



Fig 4-6 Fijación apoyo-bancada

En el caso de la fijación del pórtico a dichas bases, se resolvió de la misma forma:



Fig 4-7 Fijación pórtico-apoyo

Cabe reseñar acerca de este último inciso, que, para asegurar que se mantuvieran las condiciones de apoyo durante el desarrollo de la experimentación, todas las uniones se afianzaron con un par de apriete de 70 [N·m]; un aspecto éste de especial importancia puesto que las condiciones de apoyo tienen sensible relevancia en el comportamiento dinámico de las estructuras.

Se tuvo cuidado en que el plano del pórtico quedara paralelo al suelo.



Fig 4-8 Pórtico fijado

Se procuró hacer lo propio con la posición del excitador con objeto de que la varilla actuara perpendicular a la chapa que constituía el dintel.



Fig 4-9 Excitador (vista frontal)

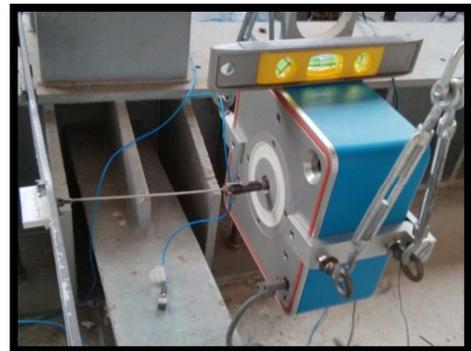


Fig 4-10 Excitador (lateral)

La sujeción del excitador se llevó a cabo por medio de extensómetros para facilitar la nivelación del mismo, los cuales se acoplaron a los eslabones de sendas cadenas c de la bancada.



Fig 4-11 Excitador, sujeción



Fig 4-12 Excitador, extensores

Una vez dispuestos todos los elementos se colocó la varilla encargada de ejercer la carga puntual sobre el pórtico.

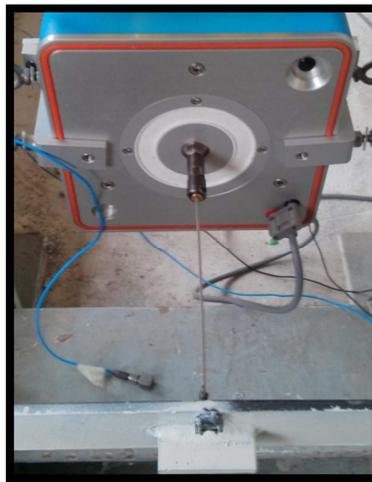


Fig 4-13 Colocación de varilla

El resultado final del pórtico conformado y asentado sobre la bancada es el que refleja la fotografía de la figura 5:

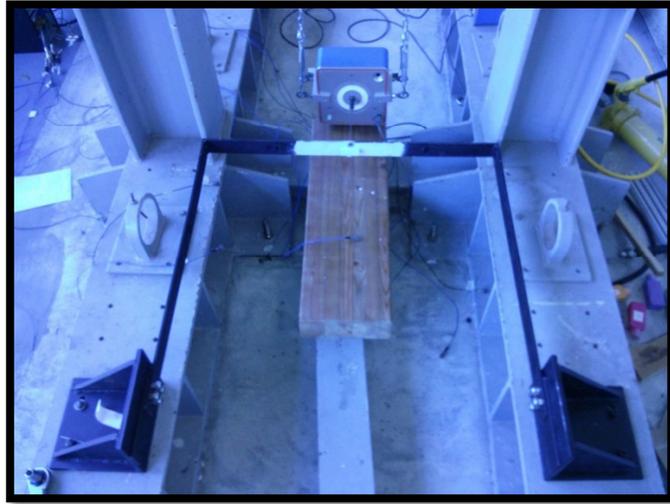


Fig 4-14 Sistema estructura-varilla-excitador

5 INSTRUMENTACIÓN EMPLEADA

5.1. Registro y procesado de aceleraciones

La medición de las aceleraciones durante los ensayos modales permiten su posterior procesamiento con el fin de obtener las características dinámicas (modos de vibración, frecuencias naturales e índices de amortiguamiento) del sistema estructural al que se hallen adheridos.

Un aspecto de vital importancia es la selección de la ubicación de los acelerómetros. En este caso el interés de estudio residía en el comportamiento de la estructura en el plano del pórtico, de tal forma que la dirección de detección de los mismos estaría contenida en él. Dado que no era objeto del estudio definir de forma precisa un gran número de formas de vibración se trabajó con número reducido de sensores de aceleración, con 7.

La disposición de los mismos serían:

- ✓ 2 acelerómetros en cada pilar: uno en aproximadamente el punto medio de la barra y el otro en el extremo superior. Estos permitirían observar desplazamientos laterales del pórtico, así como curvaturas (el hecho en los pilares).
- ✓ 3 acelerómetros en el dintel: dividiendo el dintel en 4 tamos iguales. Estos darían la posibilidad de reproducir fidedignamente hasta dos cambios de convexidad en la deformada de dicha barra.

La siguiente captura refleja de forma esquemática la posición de los mismos:

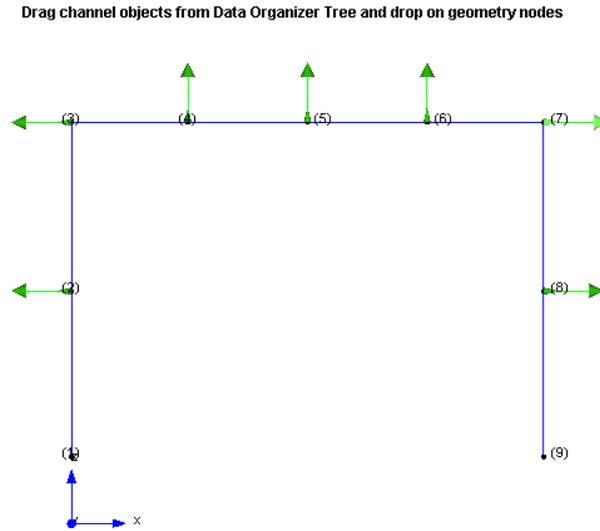


Fig 5-1 Situación de acelerómetros

Para el registro de los datos se ha utilizado una tarjeta PCI 4472 de 8 canales con muestreo simultáneo.

El esquema de la conexión se muestra en la Figura 5.2:

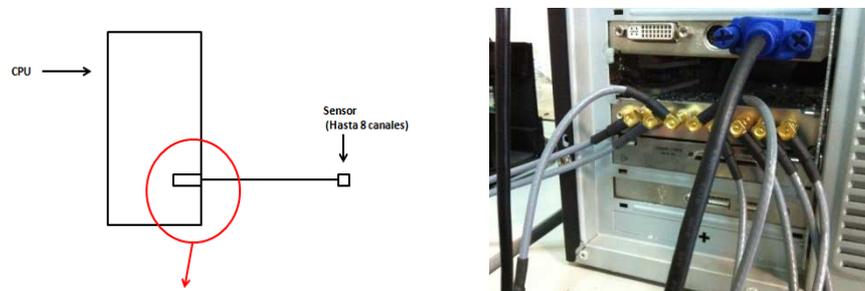


Fig 5-2 Esquema de la conexión

Los acelerómetros empleados fueron transductores piezoeléctricos de la marca Brüel&Kjaer y modelo 4508B de sensibilidad 100 mV/g. Las sensibilidades de los acelerómetros utilizados se muestran en esta tabla:

Referencia	mV/g
1	96,9
2	99,8
3	98,4
4	98,6
5	98

6	101,2
7	97,02

Tabla 5-1 Sensibilidades acelerómetros

El registro de los datos se efectuó por medio de una aplicación desarrollado con el software *LabView* de la casa *National Instruments*, que proporciona una plataforma de programación gráfica.

El análisis de los datos adquiridos de los acelerómetros se desarrolló a través de las herramientas de *ARTEMIS Testor* y *ARTEMIS Extractor*; la primera de ellas permite el diseño de la geometría y la asociación de cada canal de medida a un punto de la misma; la segunda, permite el procesamiento de las mediciones sobre la geometría generada en el paso previo.

5.2. Mecanismo de sollicitación de carga dinámica

Para proporcionar una carga oscilatoria sobre el pórtico se dispuso un excitador electro-magnético dinámico de estructuras, concretamente el modelo 300 Portable Shaker-Amplifier de la firma APS.

Este artilugio es capaz de desarrollar un movimiento sobre su eje (ver figura 5.3) provocado por la circulación de corriente sobre una bobina de cobre localizada en su interior. La transmisión del movimiento como carga puntual oscilatoria sobre la estructura se logra a través de una varilla de acero fijada mecánicamente al excitador por uno de sus extremos y al punto medio del dintel del pórtico por el otro. La unión varilla-dintel se efectúa a través de una unión roscada entre un espárrago unido a la varilla y una tuerca soldada en el emplazamiento deseado sobre la estructura (se fija de esta forma para asegurar que la carga siempre actúe sobre el mismo punto del perfil). En la figura dispuesta a continuación se ilustra la distribución explicada:

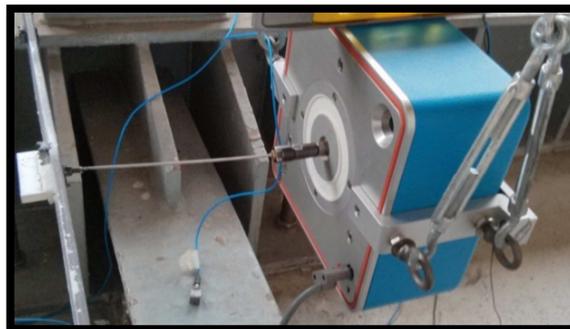


Fig 5-3 Conexión pórtico-excitador

La señal periódica senoidal que gobernó el funcionamiento del mismo se infirió bajo un voltaje de 1.95V.

5.3. Célula de carga

Se recurrió a la medición de la fuerza aplicada sobre el pórtico a través de otro transductor piezoeléctrico. En este caso, la señal eléctrica generada por el mismo sería proporcional a la sollicitación de fuerza experimentada por la célula.

La localización de la misma fue en uno de los extremos de la varilla, uniéndose rígidamente esta última a la célula, y a su vez el transductor de fuerza al punto medio del dintel del pórtico, por medio de sendos espárragos roscados.

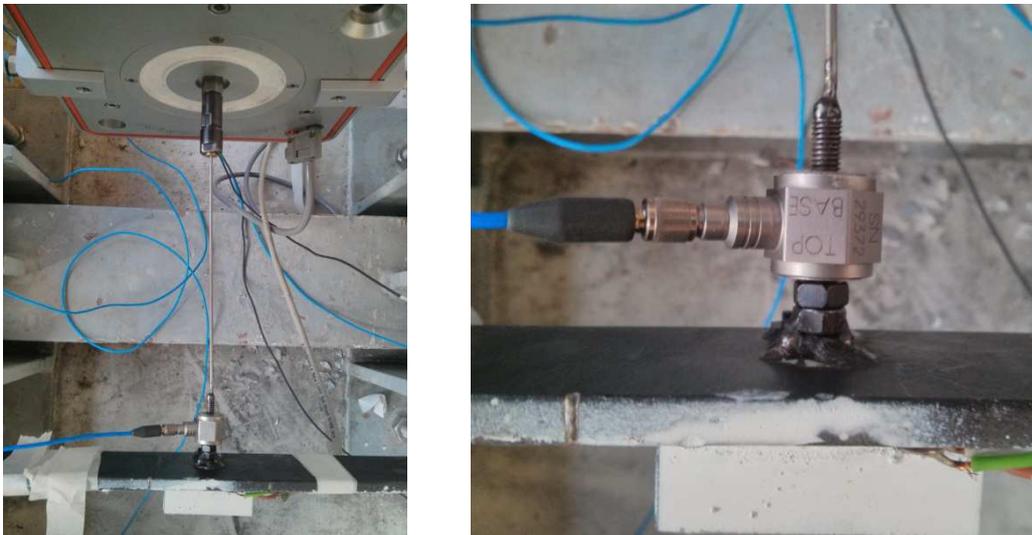


Fig 5-4 Colocación de la célula de carga durante la medición de fuerza

5.4. Galgas extensométricas

Con objeto de disponer de otra forma de medida de tensiones dispusieron galgas extensométricas de 350Ω con conexión en cuarto de puente.

Se adhirieron dos galgas sobre el dintel, en la cara puesta al punto de aplicación de la carga:



Fig 5-5 Galgas extensométricas en el dintel

Las tensiones resultantes se desprenden directamente de la expresión de la ley de Hooke, de forma que vienen dadas por el producto del módulo de Young del material por las deformaciones deducidas del registro de la galga, $\sigma = E \cdot \epsilon$.

5.5. Láser

Con objeto de verificar que el desplazamiento al que se veía sometido el punto medio del dintel fruto de la carga armónica ejercida sobre el mismo, se dispuso un láser para medir la amplitud del movimiento.

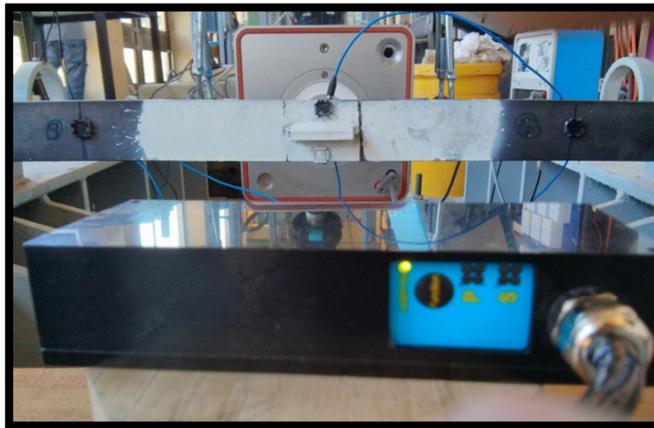


Fig 5-6 Medida de desplazamiento con láser

De esta forma se podría corroborar, o no, que el desplazamiento estático equivalente infligido por la carga dinámica se asemejaba al medido con el láser

6 DESARROLLO DE EXPERIMENTACIÓN

Una vez definidos y puesto a punto todos los equipos precisos, se pusieron en práctica de forma estructurada los cometidos necesarios para alcanzar los objetivos planteados.

6.1. *Análisis modal inicial*

Con el objeto de identificar el comportamiento dinámico inicial (esto es, sin sollicitación de carga cíclica previa) de la estructura se realizó un análisis modal que sirvió de base para permitir la comparativa respecto a los sucesivos análisis. La técnica de análisis a la que se recurrió para el procesado de los datos fue la EFDD (Enhanced Frequency Domain Decomposition), que utiliza la descomposición en valores singulares de la densidad espectral estimada de la medida de la respuesta de la estructura.

Asimismo, dicho análisis se empleó como referencia para cotejar los modelos numéricos que se diseñaron con posterioridad usando la herramienta de cálculo por medio de elementos finitos de *Abaqus*.

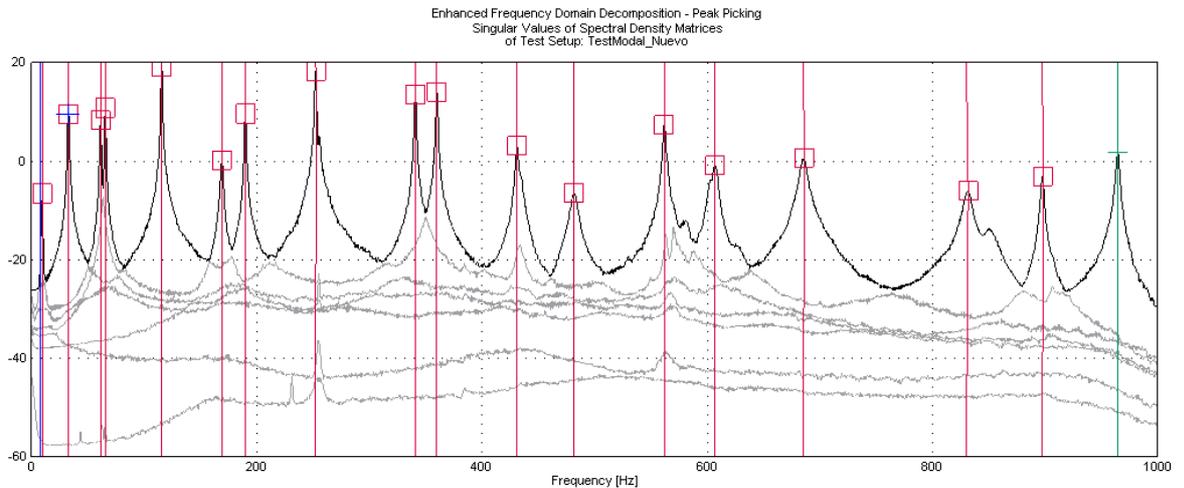


Fig 6-1 Resultado EFDD ATRemIS

La representación de las formas de cómo se mueve la estructura se ve limitada a la factible en función de los grados de libertad medidos. De esta manera, solo los modos más bajos de la estructura (aquellos con formas más simple y, por tanto, con menor número de cambio de curvaturas en su estructura deformada) quedan satisfactoriamente definidos en lo que a su deformada se refiere (la frecuencia de vibración propia de los modos altos, sin embargo, no se ve limitada por este factor).

Se plasman en la siguiente tabla las capturas de las animaciones de los 6 primeros modos que resultan del procesado con el ARTeMIS junto con el valor de la frecuencia natural (en Hz) asociada a los mismos:

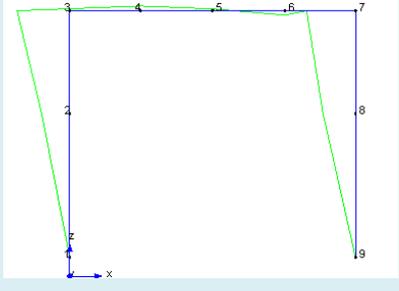
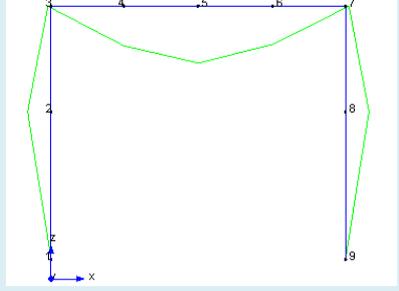
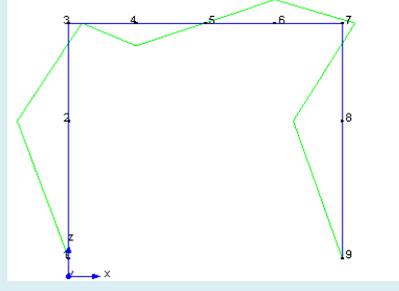
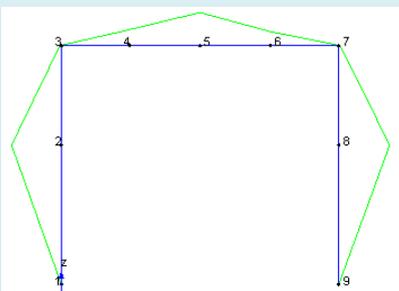
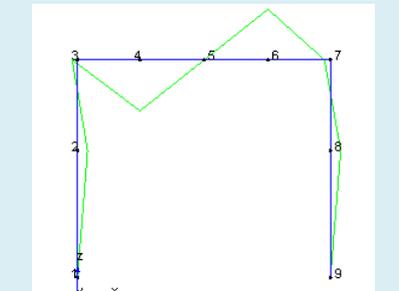
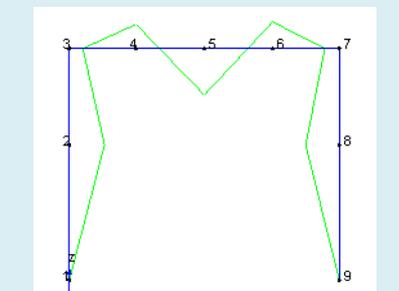
		
Modo 1 - 9.586Hz	Modo 2 - 32.66Hz	Modo 3 - 61.19Hz
		
Modo 4 - 65.79Hz	Modo 5 - 115.7Hz	Modo 6 - 168.7Hz

Tabla 6-1 Modos detectados con ARTeMIS

Se aprecia como es en el segundo modo de vibración donde las partículas de dintel sufren la mayor amplitud de desplazamientos; es por ello que la frecuencia asociada a dicha forma de vibración, $\omega_2=32.7$ Hz, es la que se tomaría a la hora de definir la carga senoidal, ya que, como se indicó en apartados previos, la pretensión era hacer que el pórtico entrase en resonancia, amplificando de esta forma la magnitud de los efectos de la carga.

6.2. Modelo numérico

Con los datos experimentales cosechados se procedió al desarrollo de varios modelos numéricos, a fin de realizar una comparativa entre ambas situaciones.

Se realizaron empleando la herramienta de *Abaqus*. La validación de los mismos se haría conforme al criterio de similitud entre las frecuencias de vibración de los modos.

Se elaboraron 3 modelos distintos:

- Modelo con estructura alámbrica 'Wire' (espacio 2D)
- Modelo tipo 'Shell' (espacio 3D)
- Modelo tipo 'Solid' (espacio 3D)



Tabla 6-2 Modelos numéricos

Todos ellos se definieron con las mismas longitudes de las barras que las de la estructura real del pórtico; además, en aquellas tipologías modeladas en tres dimensiones, se atribuyó el mismo espesor de las chapas (6mm).

Las condiciones de contorno se definieron como empotramiento en todos los casos. Los puntos donde se localizaron los empotramientos fueron los correspondientes a la base que, en la estructura ensayada, definía la línea de tornillos más cercana al dintel (eligiéndose ésta al entender que bajo ella el movimiento de todos los puntos de los pilares se encontraban impedidos tanto en desplazamiento como en giro).

Una vez comparados los resultados de los datos experimentales con los obtenidos de los modelos numéricos (ver apartado 8 relativo al análisis de resultados) se corroboró la conveniencia de tomar las condiciones de contorno como empotramientos, de ahí que se descartase la opción de disponer otro tipo de apoyos (en forma de muelles torsionales, por ejemplo).

Para obtener las variables dinámicas (modos de vibración y frecuencias propias), de cada una de las estructuras modeladas, se creó un paso de cálculo ('step') en forma de un procedimiento de tipo 'perturbación lineal'.

Para llevar a término el análisis modal de los modelos numéricos no se precisa la introducción de ningún tipo de carga, pues las frecuencias y modos de vibración son características intrínsecas de cada sistema.

El mallado utilizado en cada caso se resolvió con las particularidades que se resumen en la siguiente tabla:

	Modelo 'Wire'	Modelo 'Shell'	Modelo 'Solid'
Approximate global size	0.005	0.005	0.005
Library element	Standard	Standard	Standard
Geometric Order	Linear	Quadratic	Quadratic
Family	Beam (type: Shear-flexible)	Shell	3D Stress

Tabla 6-3 Características del mallado

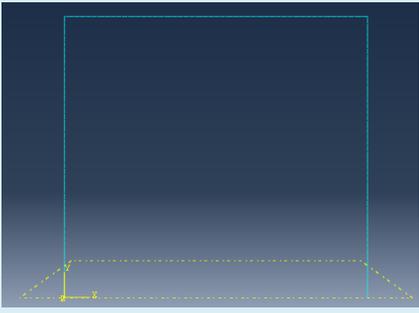
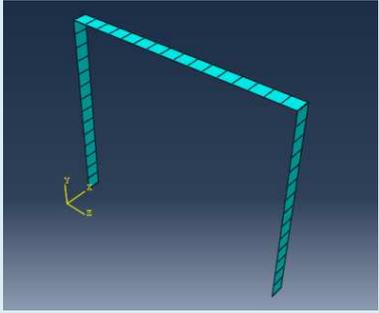
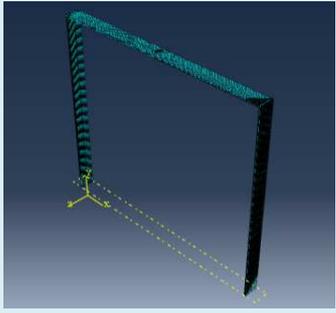
		
Aspecto del mallado en modelo 'Wire'	Aspecto del mallado en modelo 'Shell'	Aspecto del mallado en modelo 'Solid'

Tabla 6-4 Apariencia del mallado en cada modelo

6.3. Ciclos de carga dinámica sobre la estructura

El paso siguiente fue aplicar una carga cíclica concentrada sobre el punto medio del dintel.

Dado que el interés recaía en hacer entrar al pórtico en resonancia, la señal que rigió la acción de la carga fue una senoide siguiendo la forma $A \cdot \sin(\omega \cdot t)$; donde la velocidad angular, ' ω ', se dedujo de la frecuencia de oscilación estimada para el segundo modo de vibración ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$); y donde la amplitud ' A ' vendría dada por el valor del voltaje que se introducido en

el código del programa de *LabView* que transmitía la señal para el funcionamiento del excitador.

Como una de las finalidades consistía en trazar varias líneas (una por cada modo de vibración detectado) que permitiera ilustrar el descenso en las frecuencias de los modos del pórtico a medida que este iba sufriendo el daño, periódicamente se fue interrumpiendo el proceso de fatiga con el propósito de practicar una cadena de análisis modales cuyos resultados permitiera dibujar la evolución del comportamiento.

Es por ello que se entró entonces en una sucesión de ensayos modales precedidos de un tiempo arbitrario de fatiga en el pórtico.

6.4. Análisis de presencia de daño

Periódicamente se fueron desarrollando análisis modales a fin de observar variaciones en forma de descensos en las frecuencias asociadas a los modos de vibración, que denotarían pérdida de rigidez de la estructura provocada por la aparición y propagación de alguna fisura en algún punto de la misma.

Sin embargo, los resultados de las frecuencias de los modos no experimentaron descenso alguno a lo largo de la experimentación. De esta forma, superados los 30 millones de ciclos de carga se detuvo la sollicitación armónica sobre la estructura.

Se adjunta el siguiente gráfico donde el eje de abscisas indica el número de ciclos de carga y el de ordenadas el valor de las frecuencias en Hz.

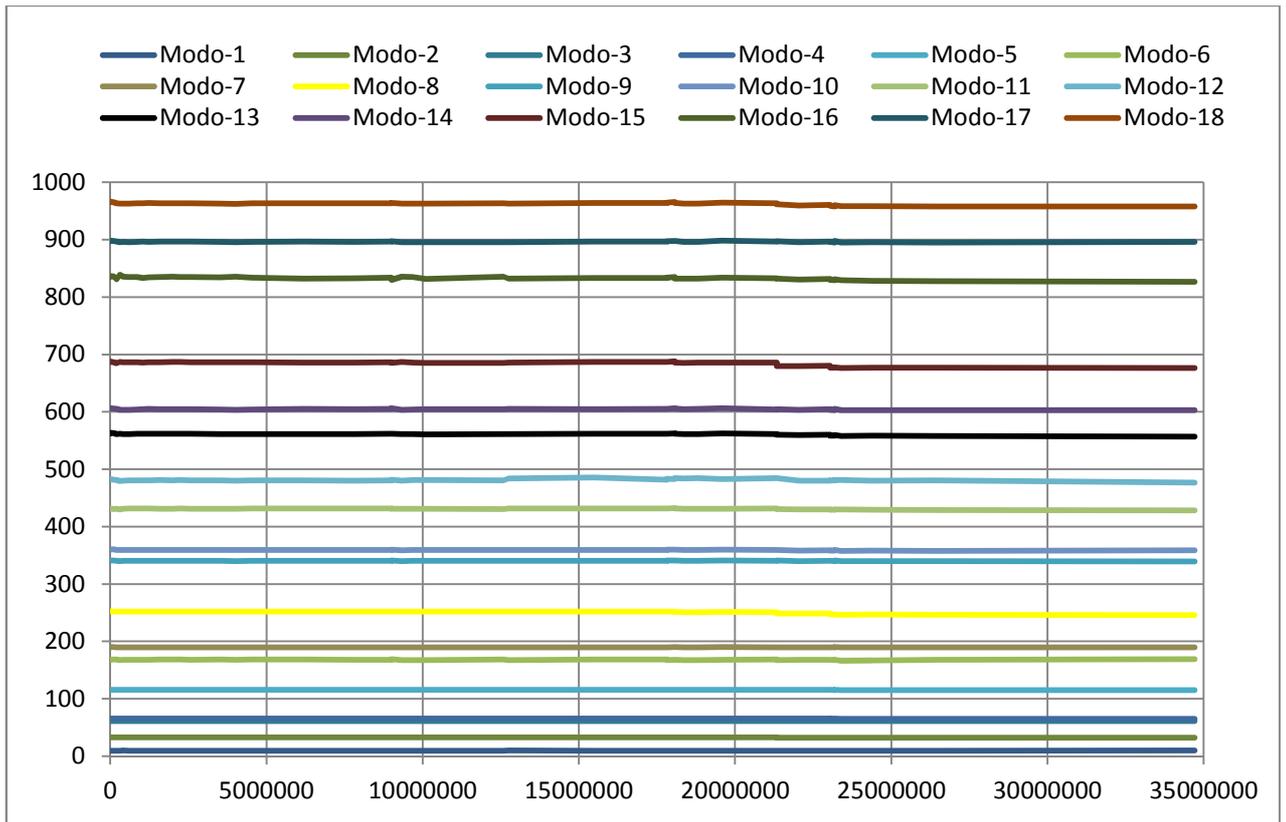


Fig 6-2 Evolución de las frecuencias propias de cada modo según el número de ciclos de carga

6.5. Estimación de tensiones

Para completar esta finalidad se recurrió a distintos métodos: fuerza medida a partir de la célula de carga; ésta se comparó con los desplazamientos medidos; también se valoraron las deformaciones registrada por galgas extensométricas. Posteriormente se compararon los resultados obtenidos según cada forma, analizando las posibles causas de las diferencias entre ellas.

7 CÁLCULOS

Debido al gran número de variables intervinientes en los cálculos, así como su tamaño (se ha trabajado con matrices y vectores de distintas dimensiones), y la agilidad que permite a la hora de hacer modificaciones, se conformó una plantilla programada en lenguaje *MatLab*. Ésta se empleó para el cálculo y manejo de variables que se describen en los apartados siguientes.

7.1. Ley de momentos sobre el pórtico

De forma previa al comentario de las particularidades referidas a cada tipología empleada para la estimación de las tensiones, se considera oportuno hacer constar ciertas apreciaciones al respecto de la ley de momentos asociada a pórticos simples biempotrados sometidos a una carga concentrada sobre un punto medio del dintel.

Las expresiones generales que permiten definir el valor de los momentos actuando sobre puntos extremos de las barras (y momento máximo, en mitad del dintel) en este tipo de pórticos pueden ser extraídas del *Prontuario de Ensidesa: Manual para cálculo de estructuras metálicas, Tomo I*.

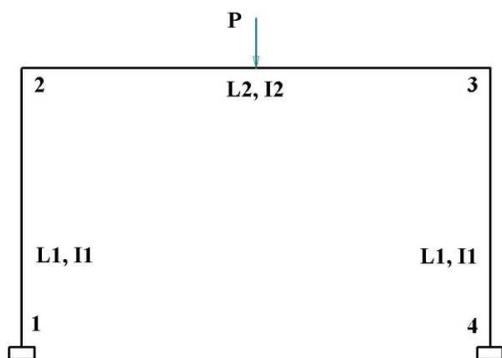


Fig 7-1 esquema pórtico sometido a carga puntual P

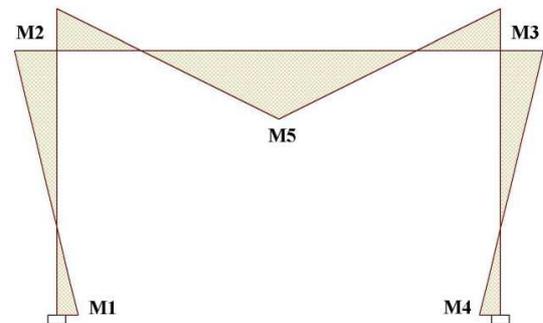


Fig 7-2 Diagrama de momentos asociado

Teniendo en cuenta la hipótesis de Navier en situaciones de flexión pura se llega a la expresión que permite determinar la tensión debida a los esfuerzos de flexión sobre el elemento:

$$(7.1) \quad \sigma = \frac{M_{eje}}{I_{eje}} \cdot d; \quad \text{donde } d \equiv \text{distancia a la fibra neutra}$$

De esta forma, en el punto medio del dintel, a pesar de que el momento sea el máximo actuando sobre la estructura, como la inercia de las secciones donde se encuentra presente la pletina es sensiblemente superior a la del resto del perfil, las tensiones resultantes, por contra, serán inferiores a las que pueden darse en el resto de secciones con menor inercia.

Es por ello que las fibras contenidas en los bordes inferior y superior de las secciones que delimitan la raíz de los cordones laterales de la pletina serán las que sufran mayores tensiones (a pesar de que el momento en tales secciones sea inferior a M_5 - ver figura 7.2- sigue siendo mayor al de $M_2=M_3$, puesto que $M_5/M_2=k+1$; siendo $k = \frac{I_{\text{dintel}} \cdot L_{\text{pilar}}}{I_{\text{pilar}} \cdot L_{\text{dintel}}}$, que, en este caso resulta un valor de k igual a 0.8671), a la par que sufrirán los efectos de la concentración de tensiones que se comentó anteriormente.

7.2. Desplazamiento en el punto medio del dintel

Se quiso valorar el desplazamiento que correspondería al punto medio del dintel de un pórtico simple bajo la actuación de una fuerza puntual sobre el medio del dintel. La expresión analítica que permite definir el valor de la flecha se calculó asimilando el dintel a una viga articulada en sus dos extremos. En los extremos se situarían unos muelles torsionales cuya rigidez daría lugar a sendos momentos; que se tomarán de las expresiones del *Prontuario de Ensidesa*. El esquema de carga quedaría de la forma siguiente:

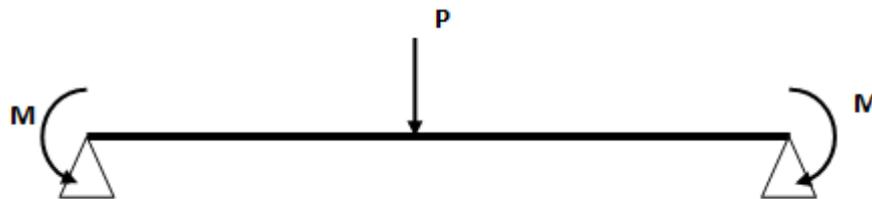


Fig 7-3 Asimilación a viga biarticulada

El valor absoluto del momento M sería el mismo en ambos extremos, y correspondería a los que se producirían en los extremos del dintel según se plasmó en el apartado 7.2.

La expresión que define la flecha tomaría la forma:

$$(7.2) \quad f = \frac{P \cdot L^3}{E \cdot I} \cdot \frac{1}{96} \cdot \frac{(2 \cdot k + 1)}{(k + 2)}$$

donde k viene dada por la relación:

$$(7.3) \quad k = \frac{I_{dintel}}{I_{pilar}} \cdot \frac{L_{pilar}}{L_{dintel}}$$

7.3. Inercia del perfil

Como se ha introducido en el apartado precedente, la inercia a lo largo del dintel no se mantiene constante, en la zona donde se sitúa la pletina se ve incrementada. Los siguientes esquemas muestran la posición del eje neutro en uno y otro caso, así como el valor de la inercia resultante en cada uno:

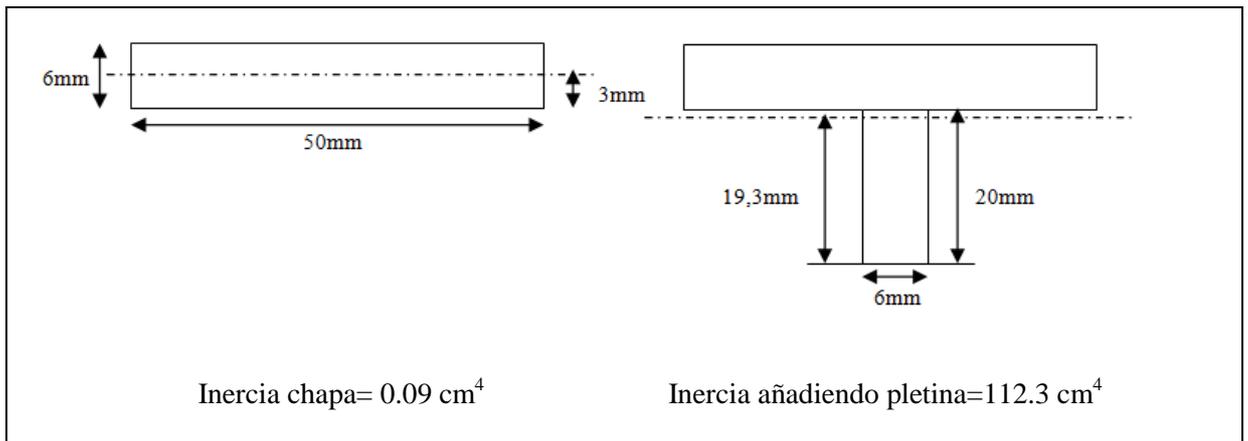


Tabla 7-1 Inercias de las secciones objeto de estudio

7.4. Tensiones a partir de la medición de la célula de carga

Se extrajo una medición durante una de las fases de carga con el resultado que refleja la gráfica siguiente:

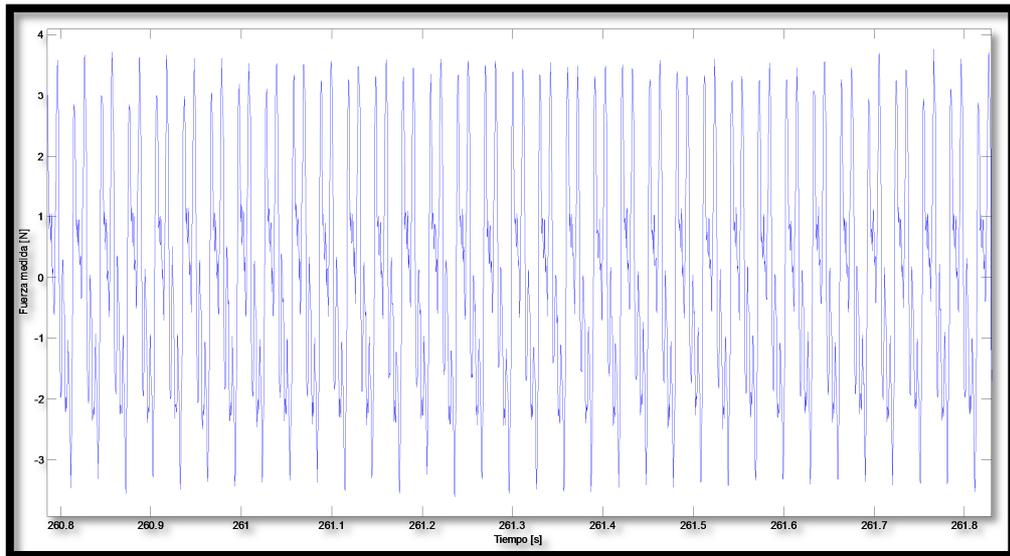


Fig 7-4 Medida de la célula de carga (eje de abscisas, fuerza medida [N]; eje ordenadas, tiempo [s])

Se observa como la carga varía con una amplitud de $\pm 3,2$ N.

Teniendo en cuenta la amplificación de los desplazamientos por efecto de la resonancia, bajo la oscilación de carga medida y teniendo en cuenta un índice de amortiguamiento ξ del 1,09% (tomado de un análisis modal del pórtico), se determina un desplazamiento estático equivalente de 1,67mm.

Esta variación de la fuerza suponen una amplitud máxima de tensiones sobre la sección que contiene la raíz de los cordones laterales de la pletina de 73,4 MPa.

Tomando la expresión que define el desplazamiento estático equivalente a una carga dinámica aplicada a una frecuencia determinada que se expresó en el apartado 2.2, se llega a un desplazamiento equivalente de ± 1.65 mm (teniendo en cuenta un ζ del 1.15% relativo al segundo modo de vibración) .

7.5. Desplazamiento real sobre la estructura

El resultado anterior se compara con el obtenido a través del láser situado sobre un punto en el centro del dintel.

Se mide un desplazamiento cíclico de ± 1.72 mm. Este desplazamiento estaría provocando una tensión sobre las fibras más traccionadas en la sección de la raíz de cordón de 75,3 MPa.

7.6. Estimación de vida a fatiga

A partir de la amplitud de tensiones sobre las raíces de los cordones laterales de la pletina, de valor 75,3MPa, la vida a fatiga que, según las curvas S-N, se prevé con un 95% de probabilidad, es, para la categoría de detalle 80 asociado al detalle estructural presente en la estructura, de al menos 2,39 millones de ciclos.

El límite de endurancia a amplitud constante (correspondiente a 5 millones de ciclos de carga) para la clase FAT-80 es de 58.9 MPa.

7.7. Tensiones a partir de la medición con galgas extensométricas

De cada una de las galgas colocadas se obtienen sendos gráficos:

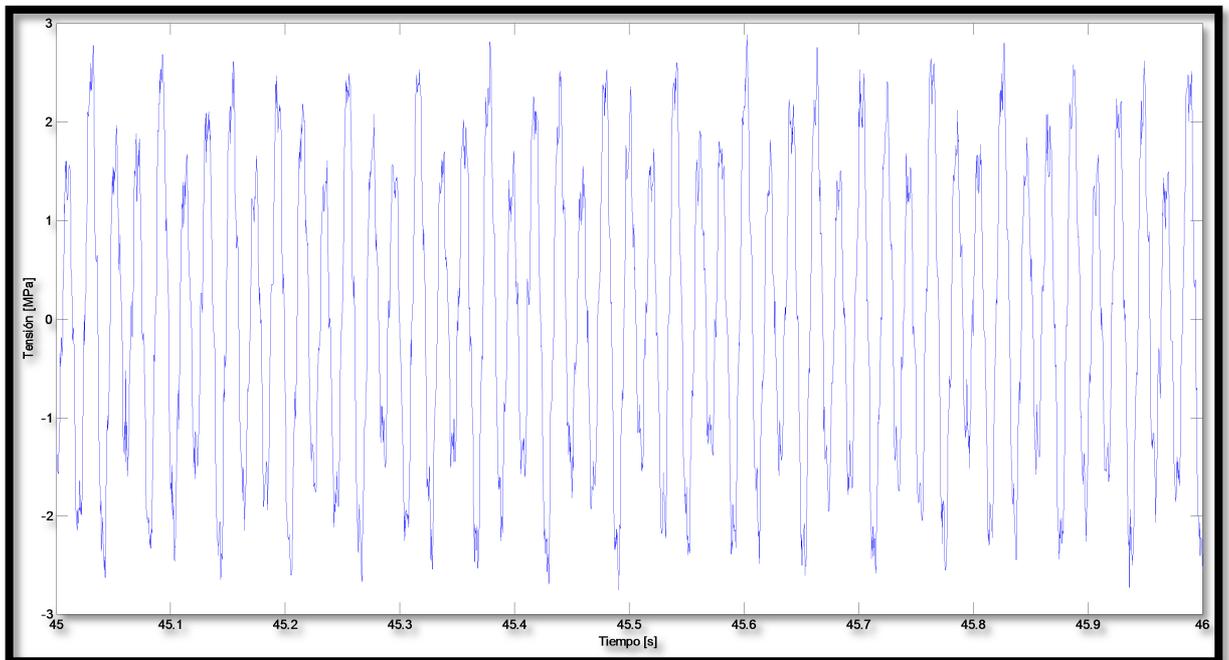


Fig 7-5 Tensiones medida por la galga en el punto medio del dintel

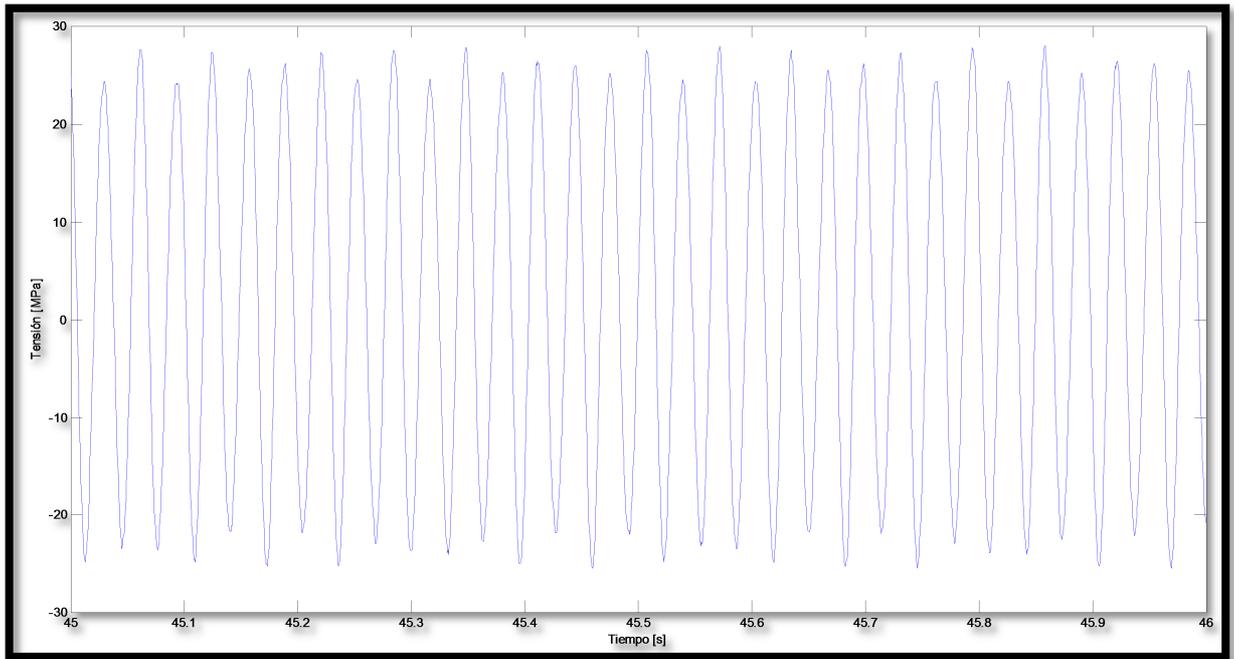


Fig 7-6 Tensiones medida por la galga en el punto a 25mm del centro del dintel

Los resultados obtenidos son coherentes con las apreciaciones hechas en secciones anteriores: en el centro del dintel las tensiones resultantes son relativamente pequeñas en comparación con las producidas en secciones con menor inercia en el eje sobre el que se produce la flexión.

Realizando los cálculos pertinentes en función de la ley de momentos se estarían produciendo, sobre la sección que contiene la raíz de los cordones de soldaduras laterales de la pletina, amplitudes máximas de tensiones de 59,8 MPa.

7.8. Tensiones resultantes del modelo en Abaqus

Se introdujo el valor del desplazamiento máximo medido a través del láser sobre la estructura 3D-Solid modelada en *Abaqus*.

Los resultados obtenidos se resumen en la siguientes capturas:

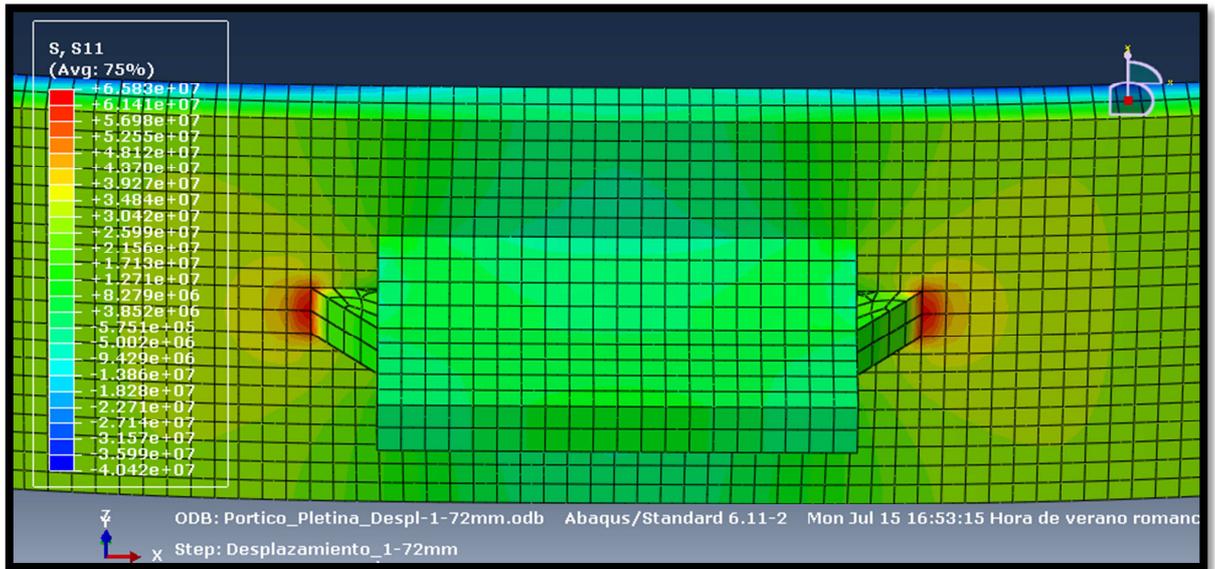


Fig 7-7 Tensiones bajo desplazamiento puntual de 1.72mm

Se observa como las raíces de los cordones de soldadura sufren el efecto concentrador de tensiones.

A modo de comparación se practicó el mismo análisis en el pórtico sin la presencia de la pletina adherida al mismo. Los resultados se muestran en las siguientes figuras:

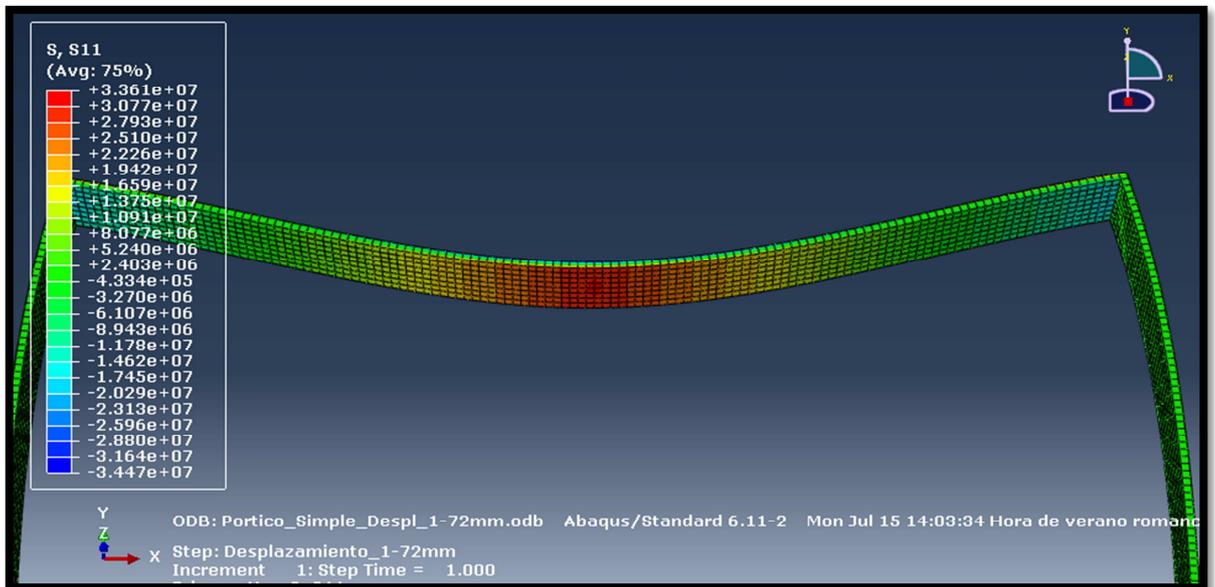


Fig 7-8 Tensiones bajo desplazamiento puntual de 1.72mm (sin pletina)

El efecto que provoca la pletina es el descenso del valor de las tensiones en el eje longitudinal del perfil allí donde se localiza, algo coherente con el aumento de inercia asociada a la misma, tal como se explicó en secciones precedentes.

La tensión estructural en la línea de la raíz del cordón de soldadura es de 31 MPa; de este modo, la variación de tensiones que cabría esperar en esa localización sería de unos 62 MPa.

7.9. Desplazamiento en modelo numérico

Dada la carga estática equivalente que provocaría el desplazamiento medido en el punto medio del perfil, calculada en el apartado 7.6 tomando un valor de 93.69N, se introdujo en el modelo 3D-Solid-Sweep hecho en *Abaqus* para valorar los desplazamientos resultantes en el punto medio del dintel.

El objetivo de realizar este ejercicio era evaluar la concordancia con la expresión analítica deducida de la asimilación del dintel a una viga biarticulada.

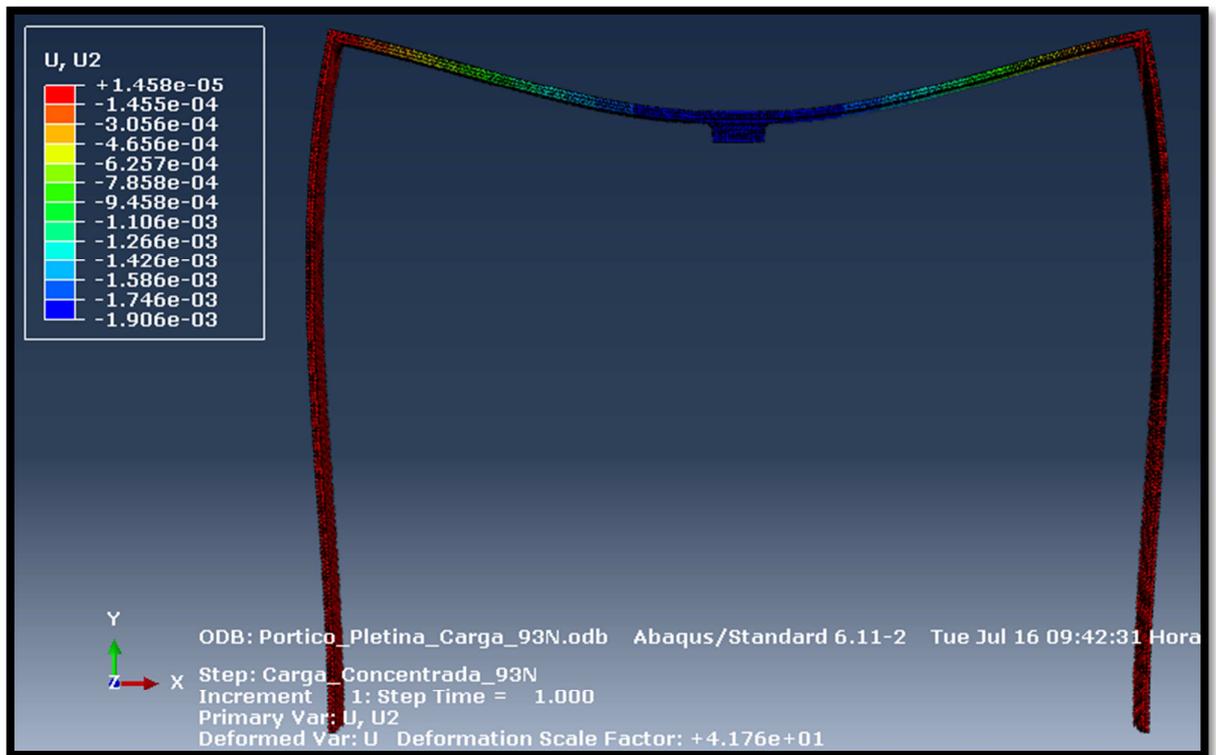


Fig 7-9 Desplazamientos verticales obtenidos bajo carga puntual de 93,69N

Se llega a un desplazamiento máximo en el centro del dintel de 1,9 mm.

7.10. Tensiones Hot-Spot

El procedimiento FITNET establece la formulación precisa para estimar el efecto concentrador de las tensiones en uniones soldadas:

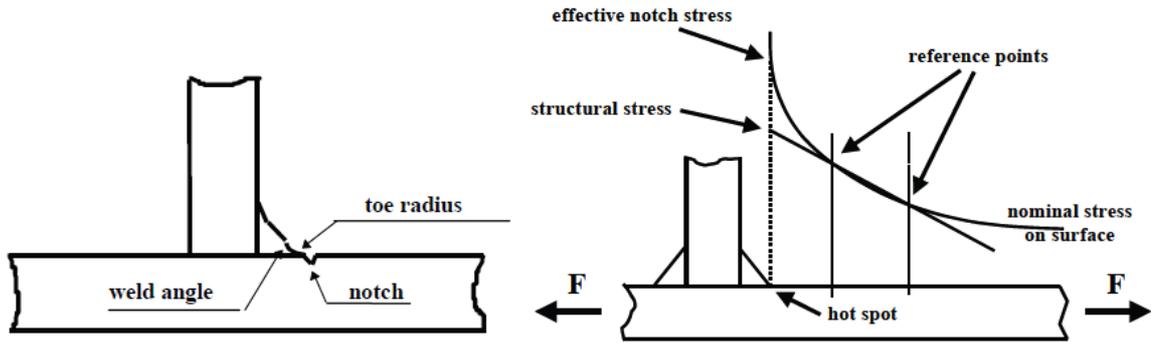


Fig 7-10 Tensiones Hot-Spot, procedimiento FITNET

Establece que en uniones soldadas donde el gradiente de tensiones no es demasiado alto, las tensiones pico o estructurales pueden ser definidas a partir de un modelo de elementos finitos y la extrapolación lineal a la raíz de la soldadura. Será necesario el valor de las tensiones en dos puntos de referencia localizado a 0,4 y 1,0 veces el espesor de la chapa (según identifican las líneas representadas en la figura anterior).

El factor de ‘mayoración’ que tiene en cuenta el efecto concentrador de tensiones viene dado por:

$$(7.4) \quad SCF_{HS} = \frac{1.67S_{0.4t} - 0.67S_{1.0t}}{S_{nom}}$$

Donde S_{nom} es la tensión nomina en la raíz de la soldadura tal como se desprende de la figura 7.9.

Tomando los resultados del modelo de elementos finitos se llega a un SCF_{HS} igual a 1,678 (para cuya determinación se ha tomado $S_{nom}=30\text{MPa}$; $S_{0,4t}=46,8\text{MPa}$; y $S_{1,0t}=39\text{MPa}$).

Con lo que, la tensión efectiva alcanzaría, en la raíz de los cordones, una oscilación de 104 MPa.

En la guía FITNET se definen las curvas S-N de resistencia a fatiga con respecto a la tensión ‘hot-spot’ estructural $\Delta\sigma_{HS}$ (definidas en la tabla 7.5 del procedimiento) tanto para el caso de aceros como para aluminios. Se clasifica como clase FAT-100.

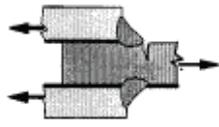
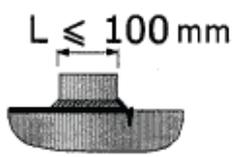
No.	Structural detail	Description	Requirements	FAT Steel	FAT Alu.
7		Lap joint with load carrying fillet welds	Fillet welds, as welded	90	36
8		Type "b" joint with short attachment	Fillet or full penetration weld, as welded	100	40

Fig 7-11 Categorías de detalle a fatiga (FAT)

7.11. Vida a fatiga bajo tensión hot-spot

Teniendo en cuenta la categoría FAT-100 y la amplitud de tensiones $\Delta\sigma_{HS}$ se estima una vida a fatiga, con un 95% de probabilidad, de, al menos, 1.78 millones de ciclos.

8 ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1. Comparativa: comportamiento dinámico, real VS numérico

Antes de desarrollar este apartado se hace necesario hacer un inciso, recordando, tal como se mencionó al detallar la colocación que se fijó de los acelerómetros, que, dada su orientación, no se obtuvieron modos con movimientos fuera del plano del pórtico de forma experimental; sin embargo, estos si se evaluaron en sendos modelos numéricos.

Esto implica que haya de tenerse especial cuidado a la hora de comparar modos entre el modelo experimental y los numéricos, pues no tienen porqué coincidir el orden del primero con respecto a los segundos (siendo necesario evaluar modo por modo entre el experimental y el numérico para verificar que dan lugar a la misma forma de movimiento).

La siguiente tabla reproduce una comparativa entre las frecuencias obtenidas tras los test modales sobre la estructura y las resultantes de los modelos numéricos:

Modo (en plano del pórtico)	Ensayo	MODELO 2D-Wire		MODELO 3D-Sólid-Sweep		MODELO 3D-Solid-Shell	
	Frecuencias EFDD [Hz]	Frecuencias [Hz]	Diferencia	Frecuencias [Hz]	Diferencia	Frecuencias [Hz]	Diferencia
1°	9,364	9,4657	-1,086%	9,552	-2,008%	9,4928	-1,375%
2°	32,8	32,751	0,149%	32,907	-0,326%	32,802	-0,006%
3°	61,69	61,991	-0,488%	62,425	-1,191%	61,868	-0,289%
4°	66,06	65,145	1,385%	65,955	0,159%	65,355	1,067%
5°	115,9	115,85	0,043%	116,63	-0,630%	116,2	-0,259%
6°	168,1	168,13	-0,018%	169,27	-0,696%	167,51	0,351%
7°	191,2	188,94	1,182%	191,14	0,031%	189,17	1,062%
8°	253,5	247,85	2,229%	250	1,381%	248,87	1,826%
9°	343	343,97	-0,283%	346,07	-0,895%	342,5	0,146%
10°	362	358,5	0,967%	362,61	-0,169%	358,23	1,041%
11°	431,4	431,27	0,030%	436,01	-1,069%	433,15	-0,406%
12°	563	565,29	-0,407%	568,86	-1,041%	562,44	0,099%
		PROMEDIO	0,689%		0,800%		0,661%

*Fig 8-1 Comparativa frecuencias naturales estructura real VS modelos numéricos.
Diferencias*

El estudio de los resultados reflejados permiten realizar las siguientes observaciones:

- El valor medio de las diferencias en términos porcentuales revela en los 3 modelos cifras inferiores al 1%.

- Las estrechas diferencias, entre las frecuencias obtenidas del ensayo experimental con las pertinentes de los modelos numéricos, permiten manifestar la validez de éstos últimos. De tal forma que se da por satisfactoria la solución de las condiciones de contorno en forma de empotramientos en la base de los pilares.
- Las máximas diferencias obtenidas son: modelo Wire, 2.229% en el 8º modo; modelo Solid-Sweep, 2.008%, en el 1º modo; modelo Solid-Shell, 1.826%, en el 8º modo.

Una vez realizado esta comparativa se fijó uno de los modelos como referente para examinar las tensiones resultantes en él (a partir de las estimaciones de carga reales), sirviendo de soporte para llevar una comparativa entre los esfuerzos producidos en él y los estimados (a través de distintas prácticas) sobre el pórtico ensayado.

8.2. Efectos de la resonancia

Para determinar las tensiones a las que se estaba viendo sometido el pórtico durante los ciclos de carga se tomaron, por un lado, los datos registrados por la célula de carga, estimando luego el desplazamiento estático equivalente asociado a ella; y por el otro, la medida del desplazamiento real que estaba teniendo lugar en el punto medio del dintel mediante láser.

La diferencia entre el cálculo de desplazamiento estimado para una carga en régimen de resonancia es un 2,9% menor al que realmente se está produciendo (en base a la medición del sensor láser). Esto sugiere que el efecto de la resonancia es una pequeña magnitud menor al esperado, sin embargo se entiende un resultado razonable y, por tanto, satisfactorio. En base a la expresión de la flecha obtenida en el apartado 7.3, y obviando la presencia de la pletina en el dintel, tal rango de desplazamientos vendrían producidos por una carga concentrada variando entre $\pm 93.69\text{N}$. Comparando este último valor con el de la fuerza medida con la célula de carga, se observan los efectos de la resonancia, pues mientras se está infligiendo una carga de $\pm 3.2\text{N}$, los desplazamientos producidos son los propios de la actuación de una carga de $\pm 93.69\text{N}$.

8.3. Tensiones obtenidas

En cuanto a las tensiones resultantes a partir de los desplazamientos (tanto el equivalente estático por efecto de la resonancia, como el medido con láser), se entienden que son valores razonables; a la par que parecen insuficientes para fomentar la aparición de una grieta y su posterior crecimiento.

Respecto a las obtenidas con las galgas extensométricas, con la dispuesta en el punto medio del dintel se obtienen valores casi nulos, algo que responde a lo esperado, pues su posición es muy próxima al eje neutro, con lo que las tensiones, en consecuencia, han de resultar igualmente pequeñas. El valor obtenido con la situada próxima a la raíz de uno de los cordones de soldadura laterales de la pletina da lugar a una cifra sensiblemente inferior a la definida a partir de los desplazamientos, en torno al 19%.

A partir del modelo numérico se obtienen tensiones acordes con las estimadas a partir de los desplazamientos medidos en la estructura.

8.4. Vida a fatiga

Una vez efectuados los cálculos de tensiones y comparados sus valores con las curvas S-N (consultar apartados 7.5 y 7.11) se comprueba que la estructura satisface la vida a fatiga prevista, con un 95% de probabilidad, en las mismas.

8.5. Localización de la presencia de daño

La fiabilidad de los resultados de los múltiples análisis modales efectuados a lo largo de la experimentación queda en entredicho. Si bien se ha deducido que la carga incidida sobre el pórtico era pequeña como para propiciar el inicio de grietas, se practicaron pequeñas entallas a los lados de la pletina con objeto de observar las consecuencias de los mismos a través de los resultados de análisis modal. Sin embargo, no se detectaron cambios sensibles ni en las frecuencias ni en las formas de los modos de vibración.

9 CONCLUSIONES

Una vez dadas por finalizadas todas las tareas relativas al trabajo final de máster se sintetizan las principales labores realizadas e ideas extraídas:

- Se ha estudiado un pórtico sometido a fatiga con carga armónica bajo condiciones de resonancia; previa determinación de las frecuencias naturales y modos de vibración propias de la estructura.
- Se han diseñado modelos numéricos, a partir del programa de cálculo por elementos finitos de *Abaqus*. Se definieron tres: modelo 2D-Wire, modelo 3D-Shell y modelo 3D-Sweep.
- En cada modelo se practicó un análisis de las frecuencias naturales obteniendo valores muy parecidos a los determinados experimentalmente mediante análisis modal operacional; en todos los casos el promedio de diferencia porcentual se situó por debajo del 1% teniendo en cuenta los 12 primeros modos de vibración en el plano de la estructura.
- A partir del análisis modal inicial sobre el pórtico, se dedujo el valor de la frecuencia natural asociada al segundo modo de vibración, el cual se corresponde con el de mayor amplitud de movimientos en el punto medio del dintel. Ésta fue la frecuencia con la que se excitó la estructura, sometiéndola a ciclos de carga senoidales, a través de un excitador dinámico.
- Se ha verificado la amplitud de los desplazamientos, y, por ende, de los esfuerzos, propiciada por el trabajo en régimen de resonancia. Para ello se utilizó una célula de carga que permitió medir fuerza en cada instante de los ciclos de sollicitación; así como un sensor de desplazamiento láser proporcionando la magnitud de los mismos en cada ciclo.
- Han sido estimadas las tensiones resultantes en el punto potencialmente probable de inicio de grieta conforme a dos métodos distintos: el primero de ellos, a partir de los desplazamientos registrados; el segundo, mediante la disposición de galgas extensométricas, midiendo las deformaciones ciertos puntos de interés en el dintel.

- La carga estática asociada al desplazamiento máximo medido se introdujo en uno de los modelos de *Abaqus*. Se calcularon las tensiones resultantes, obteniendo valores en consonancia con los determinados sobre la estructura real.
- La galga dispuesta por la parte “interior” del pórtico, en el medio del dintel, midió tensiones muy pequeñas (menores a 0.1MPa), algo que resulta coherente con la posición del eje neutro fomentada por la inclusión de la pletina. Sin embargo, no se quiere dar validez a las tensiones determinadas a través de la galga dispuesta junto a la raíz del codón de soldadura de uno de los laterales de la pletina unida al dintel, puesto que, una vez concluidos los ensayos, se han detectado deficiencias en su colocación.
- Se ha puesto en práctica las indicaciones reflejadas en el capítulo 3 del Eurocódigo, referido a fatiga; así mismo, se ha valorado la guía de procedimientos de evaluación estructural de FITNET, cuya sección 7 trata los fenómenos de fatiga.
- Se estimaron las tensiones pico (‘hot-spot’) teniendo en cuenta el efecto concentrador de tensiones provocadas por la presencia de cordones de soldadura.
- Se ha corroborado la predicción de vida a fatiga definida a través de las curvas S-N del Eurocódigo y del procedimiento FITNET, constatando la “supervivencia” de la estructura para un número de ciclos por encima del resultante de las curvas, en función de las tensiones estimadas en cada caso (teniendo y no en cuenta las tensiones ‘hot-spot’).
- La técnica de emplear el análisis modal para detectar daños en estructuras no ha sido válida en esta aplicación. A pesar de que se practicaron pequeñas entallas sobre el dintel no se detectaron cambios significativos ni en las frecuencias de vibración ni en las formas de los modos.