



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Determinación del grado de daño de una estructura mediante el análisis de la variación de frecuencias

Alejo Martín Balet

ADVERTIMENT La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del repositori institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) i el repositori cooperatiu TDX (<http://www.tdx.cat/>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual **únicament per a usos privats** emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei UPCommons o TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a UPCommons (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del repositorio institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) y el repositorio cooperativo TDR (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=es>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual **únicamente para usos privados enmarcados** en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio UPCommons. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a UPCommons (*framing*). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the institutional repository UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) and the cooperative repository TDX (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=en>) has been authorized by the titular of the intellectual property rights **only for private uses** placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor availability from a site foreign to the UPCommons service. Introducing its content in a window or frame foreign to the UPCommons service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA SÍSMICA Y
DINÁMICA ESTRUCTURAL

DETERMINACIÓN DEL GRADO DE DAÑO DE UNA ESTRUCTURA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE FRECUENCIAS.

Tesis doctoral presentada para optar al título de Doctor por la Universidad
Politécnica de Catalunya

Alejo Martín Balet

Directores

Dr. Oriol Caselles
Dr. Yeudy F. Vargas Alzate

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Barcelona, mayo 2023

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento muy especial a mis dos directores de Tesis, Oriol y Yeudy, por sus consejos, sabiduría, guía y paciencia en un trabajo tan intenso. Muchas gracias por la profesionalidad demostrada a lo largo de estos años y por el gran interés en realizar con calidad el trabajo de investigación. Muchas gracias por todas las reuniones que hemos tenido y aportar todo su conocimiento y generosidad.

A todos los miembros del Departamento que han aportado un valor importante a este trabajo por sus consejos, facilidades y recomendaciones, en este largo recorrido, en especial a Jaume Clapés, Ramón Gonzalez- Drigo y Lluís Pujades. Muchas gracias por su ayuda y haber invertido su tiempo en este trabajo.

A toda mi familia por el apoyo incondicional durante estos años, en especial a Patricia, Ágata, Aitana y a mis padres.

Este trabajo de doctorado ha sido parcialmente financiado por la Agencia Española de Investigación (AEI) del Ministerio de Ciencia e Innovación (MICIN) a través del proyecto de referencia: PID2020-117374RB-I00/AEI/10.13039/501100011033.

RESUMEN

Esta tesis propone determinar el daño de una estructura mediante el Análisis de Componentes Principales (PCA) de la variación de las frecuencias modales en varias configuraciones dañadas y sin dañar. Los estimadores que se utilizan son la varianza acumulada y los estimadores T^2 y Q . Las estructuras no dañadas únicamente necesitan una componente principal (CP) para explicar la evolución de las frecuencias, mientras que las estructuras más dañadas necesitan más componentes principales. Además, el estudio propone relacionar el número mínimo de componentes principales con el índice de daño en las diferentes configuraciones de la estructura con el objetivo de conocer el daño estructural únicamente sabiendo el número de componente principales. Este método es muy útil puesto que no es necesario saber la configuración sin daño para detectar el daño.

El presente trabajo propone un índice de daño basado en el decremento del coeficiente de flexibilidad asociada al giro (C_f); este cambio de las características de la estructura genera una respuesta con un decremento de frecuencia (DF). Los resultados se han sintetizado en la gráfica índice de daño vs el decremento de frecuencia que permitirá establecer de manera explícita la relación entre el índice de daño, los decrementos de frecuencias y las componentes principales. Para realizar el estudio desde una perspectiva probabilista, se ha desarrollado un programa de ordenador para generar suficientes datos aleatorios por el método de Monte Carlo. De esta manera no sólo se calcula el índice de daño de manera probabilista, sino también las curvas de excedencia y los índices de daño medio. Este programa se ha calibrado con unos tests experimentales para poder generar a posteriori una simulación automática para 5000 daños diferentes (realizaciones) mediante el Método de Monte Carlo y así poder efectuar el estudio probabilístico del índice de daño. Para aplicar esta metodología se ha realizado, experimentalmente, ensayos dinámicos en el laboratorio sobre una estructura metálica a escala reducida formada por 6 columnas y 35 barras. Este ensayo consiste en monitorizar las aceleraciones horizontales de 6 nodos con el objetivo de estimar las frecuencias modales de la estructura y poder validar/calibrar el modelo numérico. Cada test consistió en una serie de excitaciones mediante impactos en la base a una temperatura constante. La temperatura se midió con una cámara termográfica y se varió en cada test para poder obtener las frecuencias modales bajo diferentes temperaturas. Para cada test experimental se calcularon las componentes principales para explicar la variación de frecuencia modal con la temperatura.

SUMMARY

This thesis proposes to determine a damaged structure using the Principal Component Analysis (PCA) of modal frequency variation of some damaged and undamaged configurations.

The estimators used are the accumulated variance and the T^2 and Q estimators. The undamaged configurations only need one principal component to explain the frequency variation, while the high damaged structures need more principal component. More over this work propose to find the relationship between the principal component and the damage index of different configurations, in order to establish de damage structure degree only knowing the minimum number of principal components (CP). This method is very useful because it is not necessary to know the undamaged configuration to detect the damage.

This study proposes a damage index (ID) based on the flexibility coefficient variation related with the rotation. These structural changes generate a frequency decrease (DF) as a response. The results have been synthesized in the damage index vs. frequency decrease graph, which establish the DI-DF-CP relationship. To carry out the study from a probabilistic point of view, an automatic computer program has been developed to generated random data by the Monte Carlo method. In this way, not only the damage index is calculated in a probabilistic way but also the fragility curves and the average damage index. This program has been calibrated with some experimental tests in order to generate a posteriori an automatic simulation for 5000 different damages by means of the Monte Carlo Method and thus be able to carry out the probabilistic study of the damage index.

To apply this methodology, non-destructive dynamic tests have been carried out in the laboratory, on a small-scale metallic structure made up of 6 columns and 35 bars. This test consists of monitoring the horizontal accelerations of six nodes with the aim of estimating the main frequencies of vibration of the structure and to be able to validate/calibrate the numerical model.

Each test consisted on a series of excitations by impacts on the base at a constant temperature. The temperature was measured with a thermal camera in each test in order to obtain the modal frequencies under different temperatures.

The minimum number of principal components to explain the modal frequency variation with temperature was calculated in each experimental test.

ÍNDICE

| | |
|---|-------------|
| RESUMEN | I |
| SUMMARY | III |
| ÍNDICE | V |
| LISTA DE FIGURAS | VIII |
| LISTA DE TABLAS | XII |
| 1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 ANTECEDENTES | 1 |
| 1.2 TRABAJOS PREVIOS | 8 |
| 1.3 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS | 12 |
| 1.4 METODOLOGÍA | 16 |
| 1.5 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA | 19 |
| 2 ESTADO DEL ARTE | 22 |
| 2.1 ESPECTRO | 22 |
| 2.2 ANÁLISIS FFT, ESPACIO TEMPORAL, ESPACIO FRECUENCIAL | 23 |
| 2.3 ANÁLISIS MODAL | 26 |
| 2.4 MAC FACTOR..... | 28 |
| 2.5 ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES. | 28 |
| 2.5.1 Estimadores T^2 y Q | 30 |
| 2.5.2 Interpretación geométrica | 30 |
| 2.6 ÍNDICE DE DAÑO..... | 31 |
| 2.7 COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN R^2 | 32 |
| 2.8 NORMA DEL RESIDUO NR | 33 |
| 2.9 CURVAS DE EXCEDENCIA O FRAGILIDAD..... | 33 |
| 2.10 ÍNDICE DE DAÑO MEDIO | 36 |
| 3 PROCEDIMIENTOS | 38 |
| 3.1 EXPERIMENTOS DE LA VARIACIÓN DE FRECUENCIA SEGÚN LA TEMPERATURA. . | 38 |
| 3.1.1 La estructura y metodología del experimento. | 38 |
| 3.1.2 Los acelerómetros..... | 41 |
| 3.1.3 Daños | 42 |
| 3.1.4 Análisis de variaciones de temperatura. | 44 |
| 3.1.5 Análisis de la variación frecuencial según la temperatura. | 45 |
| 3.1.5.1 El autoespectro | 45 |
| 3.1.5.2 El Pick-Picking y el patrón de frecuencias..... | 46 |
| 3.2 PROCEDIMIENTOS DEL ANÁLISIS MODAL | 47 |
| 3.2.1 Análisis modal numérico | 48 |
| 3.2.1.1 Descripción del modelo estructural..... | 48 |
| 3.2.1.2 Condiciones de contorno del modelo..... | 49 |
| 3.2.2 Ajuste del modelo numérico sin daño, test 1..... | 52 |
| 3.2.2.1 Métodos con variaciones incrementales de las condiciones de contorno | 52 |
| 3.2.2.1.1 Variaciones incrementales según el coeficiente de flexibilidad Cf_2 y Cf_3 | 52 |
| 3.2.2.1.2 Método de variaciones incrementales no homogéneas | 53 |
| 3.2.2.1.3 Método de variaciones incrementales por caras..... | 55 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 3.2.2.2 | Método probabilista con variación de los intervalos de muestreo adaptados..... | 57 |
| 3.2.2.3 | Método probabilista automático..... | 59 |
| 3.2.2.3.1 | Programa probabilista automático con 15 realizaciones..... | 60 |
| 3.2.2.3.2 | Programa probabilista automático con 5000 realizaciones: Monte Carlo | 63 |
| 3.2.3 | Ajuste del modelo numérico para los tests 2, 3, 4 y 5..... | 66 |
| 3.2.4 | Evaluación experimental de la forma modal y cálculo del MAC Factor . | 67 |
| 3.3 | PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES..... | 68 |
| 3.4 | PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL ÍNDICE DE DAÑO | 68 |
| 3.4.1 | Método de las variaciones incrementales de las condiciones de contorno | 69 |
| 3.4.2 | Método probabilista automático | 72 |
| 4 | RESULTADOS DE LA VARIACIÓN FRECUENCIAL SEGÚN LA TEMPERATURA..... | 73 |
| 4.1 | RESULTADOS DEL TEST 1: ESTRUCTURA SIN DAÑO..... | 73 |
| 4.2 | RESULTADOS DEL TEST 2: ESTRUCTURA CON DAÑO MEDIO EN 2 NODOS..... | 74 |
| 4.3 | RESULTADOS DEL TEST 3: ESTRUCTURA CON DAÑO ALTO EN 2 NODOS..... | 76 |
| 4.4 | RESULTADOS DEL TEST 4: ESTRUCTURA CON DAÑO ALTO EN 3 NODOS..... | 77 |
| 4.5 | RESULTADOS DEL TEST 5: ESTRUCTURA CON DAÑO ALTO EN 4 NODOS..... | 79 |
| 5 | RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL | 81 |
| 5.1 | RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL NUMÉRICO | 81 |
| 5.1.1 | Resultados del modelo para el test 1 | 81 |
| 5.1.1.1 | Variaciones incrementales del coeficiente de flexibilidad Cf2, Cf3. | 81 |
| 5.1.1.2 | Método de variaciones incrementales no homogéneas | 86 |
| 5.1.1.3 | Método de variaciones incrementales por caras..... | 88 |
| 5.1.1.4 | Método probabilista con variación de los intervalos de muestreo adaptados..... | 90 |
| 5.1.1.4.1 | Variación en Cf2 y Cf3 | 90 |
| 5.1.1.4.2 | Variación en Cf3 | 94 |
| 5.1.1.5 | Resultados del método probabilista automático..... | 97 |
| 5.1.1.5.1 | Programa probabilista automático con 15 realizaciones..... | 97 |
| 5.1.1.5.2 | Programa probabilista automático con 5000 realizaciones..... | 99 |
| 5.1.2 | Resultados de los modelos para el test 2, test 3, test 4 y test 5..... | 107 |
| 5.1.3 | Modos de vibración | 113 |
| 5.2 | RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL..... | 116 |
| 5.3 | RESULTADOS DEL MAC FACTOR | 121 |
| 5.3.1 | Resumen de resultados | 123 |
| 6 | RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES.... | 124 |
| 6.1 | RESULTADOS DE LA VARIANZA ACUMULADA..... | 124 |
| 6.2 | RESULTADOS DE LOS VALORES DE Q | 126 |
| 6.3 | RESULTADOS DE LOS VALORES DE T ² | 128 |
| 7 | RESULTADOS DEL ÍNDICE DE DAÑO..... | 131 |
| 7.1 | MÉTODO DE VARIACIÓN INCREMENTAL DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO. | 131 |
| 7.2 | MÉTODO PROBABILISTA AUTOMÁTICO..... | 133 |
| 7.2.1 | Programa probabilista automático con 15 realizaciones | 133 |
| 7.2.2 | Programa probabilista automático con 5000 realizaciones | 138 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7.2.2.1 | Evolución del índice de daño en función del número de realizaciones | 139 |
| 7.2.2.2 | Gráfica: índice de daño vs decremento frecuencia..... | 140 |
| 7.2.2.3 | Curvas de excedencia | 141 |
| 7.2.2.4 | Índice de daño medio. | 143 |
| 7.2.2.5 | Relación entre el índice de daño (ID), el decremento de frecuencia (DF) y las componentes principales (CP)..... | 144 |
| 8 | CONCLUSIONES..... | 146 |
| 8.1 | ÍNDICE DE DAÑO..... | 146 |
| 8.2 | ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA) | 148 |
| 8.3 | MODELO NUMÉRICO..... | 149 |
| 8.4 | MODELO EXPERIMENTAL | 151 |
| 8.5 | VARIACIÓN DE LA FRECUENCIA CON LA TEMPERATURA..... | 151 |
| 8.6 | ANÁLISIS MODAL | 152 |
| 8.7 | FUTURAS INVESTIGACIONES | 152 |
| 9 | BIBLIOGRAFÍA..... | 155 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1-1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL MÉTODO CIENTÍFICO DE INSPECCIÓN Y DIAGNOSTICO DE ESTRUCTURAS HISTORICAS RECOGIDAS EN LAS RECOMENDACIONES DE ICOMOS (ROCA, 2014)..... | 4 |
| FIGURA 1-2 (A) EDIFICIO DE ETSAB. (B) EDIFICIO DE ETSEIB. (C) EDIFICIOS C2 (DERECHA) Y D2 (IZQUIERDA) DEL CAMPUS NORD. (D) CATEDRAL DE MALLORCA.. | 8 |
| FIGURA 1-3 (A) ESTRUCTURA DEL LABORATORIO. EN ROJO SE INDICA EL NODO EN DONDE SE HA INTRODUCIDO EL DAÑO. (B) ACCELEROMETROS EN LOS NODOS. | 10 |
| FIGURA 1-4 VARIANZA ACUMULADA VS NÚMERO DE COMPONENTES PRINCIPALES A) TEST DE CONFIGURACIÓN SIN DAÑO CON EXCITACIÓN MENOR B) TEST DE CONFIGURACIÓN SIN DAÑO CON EXCITACIÓN FUERTE C) TEST DE CONFIGURACIÓN DAÑO ALTO EN UNA CONEXIÓN, BAJO UNA EXCITACIÓN MENOR D) TEST DE CONFIGURACIÓN DAÑO ALTO EN UNA CONEXIÓN, BAJO UNA FUERTE EXCITACIÓN. E) TEST DE CONFIGURACIÓN DAÑO ALTO EN DOS CONEXIONES, BAJO UNA EXCITACIÓN MENOR F) TEST DE CONFIGURACIÓN DAÑO ALTO EN DOS CONEXIONES, BAJO UNA EXCITACIÓN FUERTE. G) TEST DE CONFIGURACIÓN DAÑO MEDIO GENERALIZADO EN UNA PLANTA, BAJO UNA EXCITACIÓN MENOR. H) TEST DE CONFIGURACIÓN DAÑO MEDIO GENERALIZADO EN UNA PLANTA, BAJO UNA EXCITACIÓN FUERTE (CASELLES ET AL., 2018). | 11 |
| FIGURA 1-5 (A) SOPORTE DE LA ESTRUCTURA METÁLICA ATORNILLADO A LA BASE, EN EL ESTUDIO PREVIO (B) SOPORTE DE LA ESTRUCTURA METÁLICA SOLDADO A LA BASE EN LA TESIS. | 12 |
| FIGURA 1-6 PROCESO DEL ESTUDIO DE ÍNDICE DE DAÑO (ID). DEFINICIÓN, CALIBRACIÓN Y SIMULACIÓN DEL ÍNDICE DE DAÑO. DCF= DECREMENTO DE COEFICIENTE DE FLEXIBILIDAD, DF= DECREMENTO DE FRECUENCIA, CP= COMPONENTES PRINCIPALES. | 19 |
| FIGURA 2-1 GRÁFICO DE AMPLITUD- TIEMPO O DOMINIO DEL TIEMPO (SÚNICO, 2005) ... | 22 |
| FIGURA 2-2 GRÁFICO DE AMPLITUD- FRECUENCIA O DOMINIO DE FRECUENCIA (SÚNICO, 2005) | 23 |
| FIGURA 2-3 DIAGRAMA DEL BLOQUE DE FOURIER. (SÚNICO, 2005)..... | 23 |
| FIGURA 2-4 TRANSFORMADA DE FOURIER DESDE EL ESPACIO TIEMPO HASTA EL ESPACIO FRECUENCIA (POSPISIL, 2014)..... | 24 |
| FIGURA 2-5 INTERPRETACIÓN GEOMÉTRICA DE LOS ESTIMADORES Q (NORMA AL CUADRADO DE DIFERENCIA ENTRE EL VECTOR DE LOS DATOS Y SU PROYECCIÓN EN EL PLANO (Δ)) Y T ² (NORMA AL CUADRADO DE LAS PROYECCIONES EN EL PLANO (Δ), PONDERADO POR EL INVERSO DE LOS VALORES PROPIOS)..... | 31 |
| FIGURA 2-6 (A) CONJUNTO DE REALIZACIONES (AZUL) Y RECTA DE REGRESIÓN (ROJO) Y PUNTOS 1 Y 2. (B) CURVA DE FRAGILIDAD O DE EXCEDENCIA (AZUL) Y PUNTOS 1 Y 2. | 35 |
| FIGURA 2-7 (A) RECTA DE REGRESIÓN (AZUL) Y RECTA DE Y=25 (VERDE). (B) CURVA DE EXCEDENCIA PARA R ² =1 EN ROJO (FUNCIÓN ESCALONADA). EN AZUL LA CURVA DE EXCEDENCIA PARA R ² <1. | 36 |
| FIGURA 3-1 A) ESTRUCTURA METÁLICA INDICANDO EL NÚMERO DE LOS NODOS EN VERDE. B) PESO AÑADIDO EN EL CENTRO DE LAS BARRAS Y BOLA DE 2 KG PARA EL IMPACTO EN LA BASE..... | 39 |
| FIGURA 3-2 PERSPECTIVA DE LA GEOMETRÍA DE LA ESTRUCTURA. SE INDICA EL SENTIDO DE LOS EJES X, Y Z, EL NÚMERO DE LAS CARAS TRANSVERSALES Y LONGITUDINALES. | 40 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 3-3 ESQUEMA DE LA ESTRUCTURA METÁLICA INDICANDO EL IMPACTO Y LA POSICIÓN RELATIVA DE LOS ACELERÓMETROS..... | 41 |
| FIGURA 3-4 A) ESTRUCTURA METÁLICA DEL MODELO EXPERIMENTAL INDICANDO EL ACELERÓMETRO LONGITUDINAL (AZUL) Y TRANSVERSAL (ROJO). B) ALZADOS DE LA ESTRUCTURA INDICANDO LA NUMERACIÓN DE LOS NODOS (VERDE) Y LA NUMERACIÓN DE LOS ACELERÓMETROS LONGITUDINALES (AZUL) Y TRANSVERSALES (ROJO). | 42 |
| FIGURA 3-5 TEST 2. DAÑO MEDIO EN DOS CONEXIONES: NODO 3 Y 8 EN LAS BARRAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES. | 42 |
| FIGURA 3-6 TEST 3. DAÑO ALTO EN DOS CONEXIONES, NODO 3 Y NODO 8. EN LAS BARRAS TRANSVERSALES Y EN LAS BARRAS LONGITUDINALES..... | 43 |
| FIGURA 3-7 TEST 4. DAÑO ALTO EN TRES CONEXIONES, NODOS 3, 8 Y 2. EN LAS BARRAS TRANSVERSALES Y EN LAS BARRAS LONGITUDINALES..... | 43 |
| FIGURA 3-8 TEST 5. DAÑO ALTO EN 4 CONEXIONES, NODOS 3, 8, 2 Y 7. EN LAS BARRAS TRANSVERSALES Y EN LAS BARRAS LONGITUDINALES..... | 44 |
| FIGURA 3-9 A) FOTO CON LA CÁMARA TERMOGRÁFICA. EN BLANCO SE INDICA EL NODO DONDE SE HA TOMADO LA TEMPERATURA DE LA ESTRUCTURA. B) ESTUFA Y RADIADOR PARA CONTROLAR LA TEMPERATURA..... | 45 |
| FIGURA 3-10. FASE DEL ESPECTRO CRUZADO DE LOS CANALES 1 Y 2. COHERENCIA ENTRE LOS CANALES 1 Y 2. AUTO ESPECTRO DEL CANAL 1. AUTO ESPECTRO DEL CANAL 2. LOS DATOS SON DEL TEST DEL DÍA 24-07-2019 PARA UNA ESTRUCTURA NO DAÑADA. | 46 |
| FIGURA 3-11 CUADRANTES DE LAS FASES DEL MOVIMIENTO. | 46 |
| FIGURA 3-12 COMPARACIÓN DE FRECUENCIAS DE LOS ESPECTROS DE LOS CANALES 1 Y 2 PARA EL TEST CON FECHA 24-07-2019 EN UNA ESTRUCTURA SIN DAÑO (TEST1). | 47 |
| FIGURA 3-13 MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE LA ESTRUCTURA EN ETABS. EN EL CENTRO DE LA BARRAS SE MUESTRAN LOS EJES LOCALES (X: ROJO, Y: VERDE, Z: AZUL) Y LOS EJES GLOBALES DE LA ESTRUCTURA EN EL PUNDO INFERIOR DE LA ESTRUCTURA..... | 48 |
| FIGURA 3-14 A) CONDICIONES DE CONTORNO EN LOS SOPORTES DE LAS COLUMNAS CON EMPOTRAMIENTO SEGÚN EL PROGRAMA NUMÉRICO DEL ETABS . B) CONDICIONES DE CONTORNO EN LA BASE DE LAS COLUMNAS DEL MODELO EXPERIMENTAL. LA BASE DE LAS COLUMNAS ESTAN SOLDADAS EN LA BASE..... | 49 |
| FIGURA 3-15 ESQUEMA DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO EN LOS NODOS EXTREMOS DE LAS BARRAS DEL PROGRAMA NUMÉRICO ETABS: EN AZUL EL COEFICIENTE DE FLEXIBILIDAD SEGÚN EL EJE 3 Y EN VERDE EL COEFICIENTE DE FLEXIBILIDAD SEGUN EL EJE 2. | 51 |
| FIGURA 3-16 CONDICIONES DE CONTORNO EN LOS NODOS: COEFICIENTE DE FLEXIBILIDAD Cf2 SEGÚN EL EJE 2 (EN VERDE), COEFICIENTE DE FLEXIBILIDAD Cf3 SEGÚN EL EJE 3 (EN AZUL) Y COEFICIENTE DE FLEXIBILIDAD Cf1 SEGÚN EL EJE 1 (EN ROJO). | 51 |
| FIGURA 3-17 (A) TEST 6. ESTRUCTURA QUE ASIGNA A 15 BARRAS (EN ROJO) LOS COEFICIENTES DE FLEXIBILIDAD DE Cf2=0.3 KN·M/RAD Y Cf3= 0.1 KN·M/RAD. (B) TEST 7. ESTRUCTURA QUE ASIGNA A 20 BARRAS (EN ROJO) LOS COEFICIENTES DE FLEXIBILIDAD DE Cf2=0.3 KN·M/RAD Y Cf3= 0.1 KN·M/RAD..... | 71 |
| FIGURA 5-1 CURVA DE LA MEDIA DE LOS ERRORES DE LAS FRECUENCIA (%) VS Cf3 (KN·M/RAD) EN EL MÉTODO DE VARIACIONES INCREMENTALES EN Cf3..... | 83 |
| FIGURA 5-2 MEDIA DE LOS ERRORES DE LAS FRECUENCIAS (%) VS Cf2 (KN·M/RAD) EN EL MÉTODO DE VARIACIONES INCREMENTALES EN Cf2..... | 84 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 5-3 EVOLUCIÓN DE LAS SEIS PRIMERAS FRECUENCIAS (HZ) CON VARIACIONES INCREMENTALES DE Cf2 (KN·M/RAD)..... | 85 |
| FIGURA 5-4 EVOLUCIÓN DE LAS SEIS PRIMERAS FRECUENCIAS (HZ) CON VARIACIONES INCREMENTALES EN Cf3. | 86 |
| FIGURA 5-5 EVOLUCIÓN DE LA MEDIA DE LOS ERRORES DE LAS FRECUENCIAS (%) SEGÚN LAS REALIZACIONES CON EL MÉTODO DE VARIACIONES INCREMENTALES NO HOMOGENEAS..... | 87 |
| FIGURA 5-6 MEDIA DE LOS ERRORES DE LAS FRECUENCIAS (%) VS REALIZACIONES VARIANDO LOS COEFICIENTES DE FLEXIBILIDAD Cf2 Y Cf3, EN EL MÉTODO PROBABILISTA CON VARIACIÓN DE LOS INTERVALOS DE MUESTREO ADAPTADOS..... | 93 |
| FIGURA 5-7 MEDIA DE LOS ERRORES DE LAS FRECUENCIAS (%) VS REALIZACIONES VARIANDO EL COEFICIENTE DE FLEXIBILIDAD Cf3 EN EL MÉTODO PROBABILISTA CON VARIACIÓN DE LOS INTERVALOS DE MUESTREO ADAPTADOS..... | 96 |
| FIGURA 5-8 GRÁFICA DE LA MEDIA DE LOS ERRORES DE LAS FRECUENCIAS (MÍNIMA) VS LOS TESTS CON REALIZACIONES 2, 11, 50, 500, 1000, 5000..... | 102 |
| FIGURA 5-9 GRÁFICA DEL ERROR DE FRECUENCIA DEL MODO 1 MÍNIMO VS LOS TESTS CON REALIZACIONES 2, 11, 50, 100, 500, 1000, 5000. | 103 |
| FIGURA 5-10 GRÁFICA DEL ERROR DE FRECUENCIA DEL MODO 2 MÍNIMO VS LOS TESTS CON REALICIONES: 2, 11, 50, 100, 500, 1000, 5000..... | 103 |
| FIGURA 5-11 GRÁFICA DEL ERROR DE FRECUENCIA DEL MODO 3 MÍNIMO VS LOS TESTS CON REALIZACIONES 2, 11, 50, 100, 500, 1000, 5000..... | 104 |
| FIGURA 5-12 GRÁFICA DEL ERROR DE FRECUENCIA DEL MODO 4 MÍNIMO VS LOS TESTS CON REALIZACIONES 2, 11, 50, 100, 500, 1000, 5000..... | 104 |
| FIGURA 5-13 GRÁFICA DEL ERROR DE FRECUENCIA DEL MODO 5 MÍNIMO VS LOS TESTS CON REALIZACIONES 2, 11, 50, 100, 500, 1000, 5000..... | 105 |
| FIGURA 5-14 GRÁFICA DEL ERROR DE FRECUENCIA DEL MODO 6 MÍNIMO VS LOS TESTS CON REALIZACIONES 2, 11, 50, 100, 500, 1000, 5000..... | 105 |
| FIGURA 5-15 FORMA MODAL 1, TRANSVERSAL. 2.483 Hz | 113 |
| FIGURA 5-16 FORMA MODAL 2, LONGITUDINAL 2.792 Hz..... | 114 |
| FIGURA 5-17 FORMA MODAL 3, TORSIÓN 3.012 Hz | 114 |
| FIGURA 5-18 FORMA MODAL 4, FLEXIÓN TRANSVERSAL DE SEGUNDO ORDEN. 8.643 Hz | 115 |
| FIGURA 5-19 FORMA MODAL 5, TORSIÓN DE SEGUNDO ORDEN. 9.231 Hz..... | 115 |
| FIGURA 5-20 FORMA MODAL 6, LONGITUDINAL DE SEGUNDO ORDEN. 9.880Hz | 116 |
| FIGURA 6-1 VARIANZA EXPLICADA ACUMULADA (%) VS COMPONENTES PRINCIPALES (UD) PARA LOS 5 TESTS. | 124 |
| FIGURA 6-2 VARIANZA EXPLICADA ACUMULADA (%) VS COMPONENTES PRINCIPALES (UD) SEGÚN EL RANGO DE TEMPERATURAS..... | 126 |
| FIGURA 6-3 (A) VALORES DE Q VS COMPONENTES PRINCIPALES PARA LOS CINCO TESTS. (B) VALORES DE Q VS COMPONETES PRINCIPALES DEL TEST 1 Y 2..... | 127 |
| FIGURA 6-4 (A) VALORES DE T ² VS COMPONENTES PRINCIPALES PARA LOS CINCO TESTS. (B) VALORES DE T ² VS COMPONENTES PRINCIPALES DE TEST 1 Y 2..... | 128 |
| FIGURA 7-1 GRÁFICO DEL ÍNDICE DE DAÑO (%) VS DECREMENTO DE FRECUENCIA (%), DE FASE 1 Y 2. PARA LOS 6 MODOS Y LA MEDIA..... | 133 |
| FIGURA 7-2 ÍNDICE DE DAÑO VS TEST 1-5, PARA LOS TESTS CON EL PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO DE 15 REALIZACIONES. (TEST 1, TEST 2, TEST 3, TEST 4, TEST 5)..... | 134 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 7-3 ÍNDICE DE DAÑO (TEST 1) VS DECREMENTO DE FRECUENCIAS (%). PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO DE 15 REALIZACIONES. | 135 |
| FIGURA 7-4 ÍNDICE DE DAÑO (TEST 2) VS DECREMENTO DE FRECUENCIA (%). PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO DE 15 REALIZACIONES. | 136 |
| FIGURA 7-5 ÍNDICE DE DAÑO (TEST 3) VS DECREMENTO DE FRECUENCIA (%). PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO DE 15 REALIZACIONES. | 136 |
| FIGURA 7-6 ÍNDICE DE DAÑO (TEST 4) VS DECREMENTO DE FRECUENCIA (%). PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO DE 15 REALIZACIONES. | 137 |
| FIGURA 7-7 ÍNDICE DE DAÑO (TEST 5) VS DECREMENTO DE FRECUENCIA (%). PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO DE 15 REALIZACIONES. | 137 |
| FIGURA 7-8 GRÁFICA DEL ÍNDICE DE DAÑO MÁXIMO PARA LOS TESTS CON REALIZACIONES 2, 11, 50, 100, 500, 1000, 5000. CON PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO..... | 139 |
| FIGURA 7-9 GRÁFICA DEL ÍNDICE DE DAÑO VS DECREMENTO DE FRECUENCIA (%) PARA CADA MODO Y LA MEDIA. AJUSTE CON UNA REGRESIÓN LINEAL EN EL ESPACIO LOG-LOG (ROJO). EN AZUL SE REPRESENTA LAS 5000 REALIZACIONES. NR ES LA NORMA DEL RESIDUO Y R ² ES EL COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN. PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO CON 5000 REALIZACIONES. | 140 |
| FIGURA 7-10 GRÁFICA DEL ÍNDICE DE DAÑO VS DECREMENTO DE FRECUENCIA (%) EN EL ESPACIO LOG-LOG. PARA CADA FRECUENCIA MODAL Y LA MEDIA. AJUSTE CON UNA REGRESIÓN LINEAL EN EL ESPACIO LOG-LOG, EN ROJO. EN AZUL SE REPRESENTA LAS 5000 REALIZACIONES. NR ES LA NORMA DEL RESIDUO Y R ² ES EL COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN. PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO CON 5000 REALIZACIONES. | 141 |
| FIGURA 7-11 CURVA DE EXCEDENCIA O FRAGILIDAD PARA LOS 6 MODOS Y LA MEDIA. PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO CON 5000 REALIZACIONES. | 142 |
| FIGURA 7-12 CURVAS DE EXCEDENCIA DEL MODO 1 Y CURVA DEL ÍNDICE DE DAÑO MEDIO EN VERDE. | 142 |
| FIGURA 7-13 ÍNDICE DE DAÑO VS DECREMENTO DE FRECUENCIA (%) PARA LA MEDIA EN EL MÉTODO PROBABILISTA AUTOMÁTICO CON 5000 REALIZACIONES. SE INDICAN (MAGENTA, CIAN, VERDE Y AZUL) LOS PUNTOS DEL 1 AL 15 DE LA TABLA 7-8. EN AZUL LOS DE PUNTOS DE LAS REALIZACIONES Y EN ROJO EL AJUSTE LOGARITMICO LOG-LOG. | 145 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 1-1: VARIACIÓN DE TEMPERATURA DE LA ESTRUCTURA MEDIDAS CON LA CÁMARA TERMOGRÁFICA EN LOS ENSAYOS DE LOS ESTUDIOS PREVIOS..... | 10 |
| TABLA 3-1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LA ESTRUCTURA (FOTI Y CANAS, 1999) | 39 |
| TABLA 3-2 RANGO DE TEMPERATURAS EN LOS 5 TESTS..... | 44 |
| TABLA 3-3 POSICIÓN DE LAS BARRAS DE LA ESTRUCTURA (LÍNEAS DE MATRIZ DE CONDICIONES DE CONTORNO)..... | 50 |
| TABLA 3-4 RESUMEN DE LOS VALORES INCREMENTALES DE Cf2 Y Cf3 DE LAS DOS ETAPAS..... | 53 |
| TABLA 3-5 VALORES DE LAS REALIZACIONES EN Cf2 Y Cf3 DE LOS DOS ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE LAS FRECUENCIAS..... | 53 |
| TABLA 3-6 COEFICIENTES DE FLEXIBILIDAD DE LAS REALIZACIONES EN EL MÉTODO DE VARIACIONES INCREMENTALES NO HOMOGÉNEO..... | 55 |
| TABLA 3-7 COEFICIENTES DE FLEXIBILIDAD Cf2 Y Cf3 EN EL MÉTODO DE VARIACIONES INCREMENTALES POR CARAS. | 57 |
| TABLA 3-8 INTERVALOS Y REALIZACIONES DE LAS ETAPAS EN EL MÉTODO PROBABILÍSTICO CON VARIACIONES DE LOS INTERVALOS DE MUESTREO ADAPTADOS (VARIABLES Cf2 Y Cf3)..... | 58 |
| TABLA 3-9 CONDICIONES DE CONTORNO DE LA REALIZACIÓN 1 DEL MÉTODO PROBABILISTA CON VARIACIONES DE LOS INTERVALOS DE MUESTREO ADAPTADOS (VARIABLES Cf2 Y Cf3). SE INDICAN LOS COEFICIENTES DE FLEXIBILIDAD Cf2 Y Cf3, EN LOS NODOS EXTREMOS, NODO 1 Y NODO 2, EN LAS 35 BARRAS..... | 58 |
| TABLA 3-10 Cf3 Y Cf2 DE LAS REALIZACIONES EN EL MÉTODO PROBABILISTA CON VARIACIÓN DE LOS INTERVALOS DE MUESTREO ADAPTADOS (VARIABLE Cf3)..... | 59 |
| TABLA 3-11 EJEMPLO DE NÚMERO TOTAL DE BARRAS DAÑADAS DE LA ESTRUCTURA EN CADA REALIZACIÓN DEL PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO CON 15 REALIZACIONES..... | 61 |
| TABLA 3-12 EJEMPLO DE LA POSICIÓN DE LAS BARRAS DAÑADAS EN LA ESTRUCTURA EN EL PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO CON 15 REALIZACIONES. LAS COLUMNAS REPRESENTAN LAS REALIZACIONES Y LAS FILAS REPRESENTAN LA POSICIÓN DE LA BARRA DAÑADA | 61 |
| TABLA 3-13 INTERVALOS Y NÚMERO DE REALIZACIONES DE LOS 5 TESTS CON EL PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO CON 15 REALIZACIONES | 62 |
| TABLA 3-14 EJEMPLO DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO DE LA PRIMERA REALIZACIÓN CON EL PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO CON 15 REALIZACIONES. SE INDICA EL NÚMERO DE LA REALIZACIÓN, EL NÚMERO DE BARRA Y LA ASIGNACIÓN DEL COEFICIENTE DE FLEXIBILIDAD EN CADA NODO DE LA BARRA. NODO 1 Y NODO 2 INDICAN LOS DOS NODOS EXTREMOS DE LA BARRA. | 62 |
| TABLA 3-15 NÚMERO DE REALIZACIONES Y TIEMPO TOTAL DE LOS TESTS CON EL PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO..... | 64 |
| TABLA 3-16 EJEMPLO DE RESULTADOS DE LAS 25 PRIMERAS REALIZACIONES DEL PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO CON 5000 REALIZACIONES. LAS COLUMNAS INDICAN: DCf(TOTAL) ES EL DECREMENTO DEL COEFICIENTE DE FLEXIBILIDAD EN LA ESTRUCTURA (EN KN·M/RAD), FRECUENCIAS (Hz) Y DECREMENTOS DE FRECUENCIA (%) DEL MODO 1 AL 6 Y LA MEDIA..... | 65 |

| | |
|--|----|
| TABLA 3-17 TESTS EXPERIMENTALES UTILIZADOS PARA LOS AJUSTES NUMÉRICOS DE LAS CONFIGURACIONES DAÑADAS..... | 66 |
| TABLA 3-18 CONDICIONES DE CONTORNO EN LAS CONFIGURACIONES SIN DAÑO Y MÍNIMAS | 69 |
| TABLA 3-19 ÍNDICE DE DAÑO DE LOS TESTS 1-5, FASE 1, EN EL MÉTODO DE VARIACIONES INCREMENTALES DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO. | 70 |
| TABLA 3-20 ÍNDICE DE DAÑO DE TEST 6, 7, 8, 9, FASE 2, EN EL MÉTODO DE VARIACIONES INCREMENTALES DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO | 71 |
| TABLA 4-1 TEMPERATURA AMBIENTE, TEMPERATURA DE LA ESTRUCTURA Y FECHA DEL TEST 1 (CONFIGURACIÓN SIN DAÑO). | 73 |
| TABLA 4-2 FRECUENCIAS (HZ) DE LOS MODOS DE VIBRACIÓN EN EL TEST 1, CONFIGURACIÓN SIN DAÑO. LAS FILAS INDICAN EL NÚMERO DE ENSAYO CON DIFERENTES TEMPERATURAS. EN LA ÚLTIMA FILA SE INDICA LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LAS FRECUENCIAS MODALES..... | 74 |
| TABLA 4-3 TEMPERATURA AMBIENTE, TEMPERATURA DE LA ESTRUCTURA Y FECHA DEL TEST 2. | 75 |
| TABLA 4-4 FRECUENCIAS (HZ) DE LOS MODOS DE VIBRACIÓN EN EL TEST 2. LAS FILAS INDICAN EL NÚMERO DE ENSAYO CON DIFERENTES TEMPERATURAS. EN LA ÚLTIMA FILA SE INDICA LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LAS FRECUENCIAS MODALES. | 75 |
| TABLA 4-5 TEMPERATURA AMBIENTE, TEMPERATURA DE LA ESTRUCTURA Y FECHA DEL TEST 3. | 76 |
| TABLA 4-6 FRECUENCIAS (HZ) DE LOS MODOS DE VIBRACIÓN EN EL TEST 3. LAS FILAS INDICAN EL NÚMERO DE ENSAYO CON DIFERENTES TEMPERATURAS. EN LA ÚLTIMA FILA SE INDICA LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LAS FRECUENCIAS MODALES. | 77 |
| TABLA 4-7 TEMPERATURA AMBIENTE, TEMPERATURA DE LA ESTRUCTURA Y FECHA DEL TEST 4. | 77 |
| TABLA 4-8 FRECUENCIAS (HZ) DE LOS MODOS DE VIBRACIÓN EN EL TEST 4. LAS FILAS INDICAN EL NÚMERO DE ENSAYO CON DIFERENTES TEMPERATURAS. EN LA ÚLTIMA FILA SE INDICA LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LAS FRECUENCIAS MODALES. | 78 |
| TABLA 4-9 TEMPERATURA AMBIENTE, TEMPERATURA DE LA ESTRUCTURA Y FECHA DEL TEST 5. | 79 |
| TABLA 4-10 FRECUENCIAS (HZ) DE LOS MODOS DE VIBRACIÓN EN EL TEST 5. LAS FILAS INDICAN EL NÚMERO DE ENSAYO CON DIFERENTES TEMPERATURAS. EN LA ÚLTIMA FILA SE INDICA LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LAS FRECUENCIAS MODALES. | 80 |
| TABLA 5-1 SEIS PRIMERAS FRECUENCIAS Y LA MEDIA (Y SUS ERRORES EN %) DE LAS 5 REALIZACIONES PARA EL MÉTODO DE VARIACIONES INCREMENTALES EN Cf3..... | 82 |
| TABLA 5-2 SEIS PRIMERAS FRECUENCIAS Y LA MEDIA (Y SUS ERRORES EN %) DE LAS DIEZ REALIZACIONES PARA EL MÉTODO DE VARIACIONES INCREMENTALES EN Cf2..... | 83 |
| TABLA 5-3 SEIS PRIMERAS FRECUENCIAS Y LA MEDIA (HZ) DE LAS SIETE REALIZACIONES CON VARIACIONES INCREMENTALES DE Cf2. | 84 |
| TABLA 5-4 SEIS PRIMERAS FRECUENCIAS DE LAS NUEVE REALIZACIONES CON VARIACIONES INCREMENTALES EN Cf3..... | 86 |
| TABLA 5-5 RESULTADOS DEL MÉTODO DE VARIACIONES INCREMENTALES NO HOMOGÉNEAS. FRECUENCIAS (HZ) Y LOS ERRORES DE FRECUENCIAS (%) DE LOS 6 PRIMEROS MODOS Y LA MEDIA. | 87 |

| | |
|--|-----|
| TABLA 5-6 RESULTADOS DEL MÉTODO DE LA VARIACIÓN INCREMENTALES POR CARAS. FRECUENCIAS (HZ) Y ERRORES DE FRECUENCIA (%) DE LOS SEIS PRIMEROS MODOS Y LA MEDIA, EN FUNCIÓN DE LA REALIZACIÓN. | 88 |
| TABLA 5-7 RESULTADOS DEL MÉTODO PROBABILISTA CON VARIACIONES DE LOS INTERVALOS DE MUESTREO ADAPTADOS DE VARIABLE Cf3 Y Cf2: MEDIA DE LOS ERRORES DE LAS FRECUENCIAS (%), ETAPAS, REALIZACIÓN E INTERVALOS. | 92 |
| TABLA 5-8 RESULTADOS DE LAS REALIZACIONES 1, 21, 22 Y 25 SEGÚN EL MÉTODO PROBABILISTA CON VARIACIÓN DE LOS INTERVALOS DE MUESTREO ADAPTADOS EN Cf2 Y Cf3. SE MUESTRAN LAS FRECUENCIAS (HZ), Y LOS ERRORES DE FRECUENCIAS (%), DE LOS 6 PRIMEROS MODOS Y LA MEDIA. | 93 |
| TABLA 5-9 EJEMPLO DE CONDICIONES DE CONTORNO EN LA REALIZACIÓN 21 DEL MÉTODO PROBABILISTA CON VARIACIÓN DE LOS INTERVALOS DE MUESTREO ADAPTADOS (VARIABLE Cf3 Y Cf2). COEFICIENTES DE FLEXIBILIDAD EN LOS NODOS EXTREMOS DE LAS 35 BARRAS, Cf2 Y Cf3. NODO 1 Y NODO 2 INDICAN LOS DOS NODOS EXTREMOS DE LAS BARRAS. | 94 |
| TABLA 5-10 RESULTADOS DEL MÉTODO PROBABILISTA CON VARIACIÓN DE LOS INTERVALOS DE MUESTREO ADAPTADOS DE VARIABLE Cf3: MEDIA DE LOS ERRORES DE LAS FRECUENCIAS (%), ETAPAS, REALIZACIÓN E INTERVALOS. | 95 |
| TABLA 5-11 CONDICIONES DE CONTORNO DE LA REALIZACIÓN 6 DEL MÉTODO PROBABILISTA CON VARIACIÓN DE INTERVALOS DE MUESTREO ADAPTADOS (VARIABLE Cf3). COEFICIENTES DE FLEXIBILIDAD EN LOS NODOS EXTREMOS DE LAS 35 BARRAS Cf2 Y Cf3. NODO 1 Y NODO 2 INDICAN LOS DOS EXTREMOS DE LAS BARRAS. | 96 |
| TABLA 5-12 FRECUENCIAS (HZ) Y ERROR DE FRECUENCIA (%), DE LOS 6 PRIMEROS MODOS Y LA MEDIA, DE LA REALIZACIÓN 12 DEL MÉTODO PROBABILISTA CON VARIACIÓN DE INTERVALOS DE MUESTREO ADAPTADOS (VARIABLE Cf3). | 97 |
| TABLA 5-13 RESULTADOS DEL MÉTODO PROBABILISTA AUTOMÁTICO CON 15 REALIZACIONES, PARA EL TEST 2. SE INDICAN EL DECREMENTO DE LOS COEFICIENTES DE FLEXIBILIDAD (DCf) EN KN·M/RAD, FRECUENCIAS (HZ) Y ERROR DE LA FRECUENCIA (%) PARA LAS SEIS PRIMERAS FRECUENCIAS. | 98 |
| TABLA 5-14 RESULTADOS DEL MÉTODO PROBABILISTA AUTOMÁTICO CON 15 REALIZACIONES. ERRORES MÍNIMOS DE LAS FRECUENCIAS (1, 2, 3, 4, 5, 6 Y LA MEDIA) Y MÁXIMO DECREMENTO DEL COEFICIENTE DE FLEXIBILIDAD. PARA LOS 5 TESTS. .. | 98 |
| TABLA 5-15 DISMINUCIÓN LOS ERRORES MÍNIMOS DE FRECUENCIAS DEL TEST 5 RESPECTO EL ERROR DE LA CONFIGURACIÓN SIN DAÑO. | 99 |
| TABLA 5-16 INTERVALOS DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO DE LOS DOS PROCESOS CON EL PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO CON 5000 REALIZACIONES. | 100 |
| TABLA 5-17 ERROR DE FRECUENCIA MÍNIMA (%) PARA LOS 6 PRIMEROS MODOS Y LA MEDIA DE LOS 8 TEST CON EL PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO CON 5000 REALIZACIONES (PRIMER INTERVALO DE MUESTREO). | 101 |
| TABLA 5-18 RESULTADO DE LA REALIZACIÓN 1698, SOLUCIÓN ÓPTIMA CON EL PROGRAMA PROBABILISTA CON 5000 REALIZACIONES EN EL PRIMER INTERVALO DE MUESTREO. FRECUENCIA (HZ) Y ERROR DE FRECUENCIA (%) PARA LOS 6 PRIMEROS MODOS Y MEDIA. | 101 |
| TABLA 5-19 CONDICIONES DE CONTORNO DE LA REALIZACIÓN 1698 (SOLUCIÓN ÓPTIMA) CON EL PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO CON 5000 REALIZACIONES EN EL PRIMER INTERVALO DE MUESTRO. COEFICIENTES DE FLEXIBILIDAD EN LOS NODOS | |

| | |
|---|-----|
| EXTREMOS DE LAS 35 BARRAS, Cf2 Y Cf3. NODO 1 Y NODO 2 INDICAN LOS DOS EXTREMOS DE LAS BARRAS. | 101 |
| TABLA 5-20 RESULTADO DE LA REALIZACIÓN 1337, SOLUCIÓN ÓPTIMA DEL PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO CON 5000 REALIZACIONES EN EL SEGUNDO INTERVALO DE MUESTREO. | 106 |
| TABLA 5-21 CONDICIONES DE CONTORNO DE LA REALIZACIÓN 1337, CON EL PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO CON 5000 REALIZACIONES EN EL SEGUNDO INTERVALO DE MUESTREO. SE INDICAN EL NÚMERO DE LA BARRA, LOS COEFICIENTES DE FLEXIBILIDAD Cf2 Y Cf3 EN CADA BARRA Y EN LOS NODOS EXTREMOS DE LA BARRA (NODO 1 Y NODO 2). | 106 |
| TABLA 5-22 ERROR DE LA FRECUENCIA MÍNIMA PARA LOS 6 PRIMEROS MODOS Y LA MEDIA (%) CON EL PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO CON 5000 REALIZACIONES EN EL SEGUNDO INTERVALO DE MUESTREO. | 107 |
| TABLA 5-23 RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA EL TEST 2. DECREMENTO DE FRECUENCIAS PARA LOS 6 MODOS Y LA MEDIA. | 108 |
| TABLA 5-24 RESULTADOS NUMÉRICOS PARA EL TEST 2. DECREMENTO DE FRECUENCIAS PARA LOS 6 MODOS Y LA MEDIA. | 108 |
| TABLA 5-25 ERROR DE LA FRECUENCIA (EXPERIMENTAL – NUMÉRICO) DEL TEST 2, PARA LOS 6 PRIMEROS MODOS Y LA MEDIA. | 108 |
| TABLA 5-26 RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA EL TEST 3. DECREMENTO DE FRECUENCIAS PARA LOS 6 MODOS Y LA MEDIA. | 109 |
| TABLA 5-27 RESULTADOS NUMÉRICOS PARA EL TEST 3. DECREMENTO DE FRECUENCIAS PARA LOS 6 MODOS Y LA MEDIA. EN DOS CASOS: COEFICIENTE DE FLEXIBILIDAD MÍNIMO NUMÉRICO (Cf2=0.5 KN·M/RAD Y Cf3= 0.3 KN·M/RAD) Y EL COEFICIENTE DE FLEXIBILIDAD NULO | 109 |
| TABLA 5-28 ERROR DE LA FRECUENCIA (EXPERIMENTAL – NUMÉRICO) DEL TEST 3, PARA LOS 6 PRIMEROS MODOS Y LA MEDIA. | 110 |
| TABLA 5-29 RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA EL TEST 4. DECREMENTO DE FRECUENCIAS PARA LOS 6 MODOS Y LA MEDIA. | 110 |
| TABLA 5-30 RESULTADOS NUMÉRICOS PARA EL TEST 4. DECREMENTO DE FRECUENCIAS PARA LOS 6 MODOS Y LA MEDIA. EN DOS CASOS: COEFICIENTE DE FLEXIBILIDAD MÍNIMO NUMÉRICO (Cf2=0.5 KN·M/RAD Y Cf3= 0.3 KN·M/RAD) Y EL COEFICIENTE DE FLEXIBILIDAD NULO | 111 |
| TABLA 5-31 ERROR DE LA FRECUENCIA (EXPERIMENTAL – NUMÉRICO) DEL TEST 4, PARA LOS 6 PRIMEROS MODOS Y LA MEDIA. | 111 |
| TABLA 5-32 RESULTADOS EXPERIMENTALES PARA EL TEST 5. DECREMENTO DE FRECUENCIAS PARA LOS 6 MODOS Y LA MEDIA. | 112 |
| TABLA 5-33 RESULTADOS NUMÉRICOS PARA EL TEST 5. DECREMENTO DE FRECUENCIAS PARA LOS 6 MODOS Y LA MEDIA. EN DOS CASOS: COEFICIENTE DE FLEXIBILIDAD MÍNIMO NUMÉRICO (Cf2=0.5 KN·M/RAD Y Cf3= 0.3 KN·M/RAD) Y EL COEFICIENTE DE FLEXIBILIDAD NULO | 112 |
| TABLA 5-34 ERROR DE LA FRECUENCIA (EXPERIMENTAL – NUMÉRICO) DEL TEST 5, PARA LOS 6 PRIMEROS MODOS Y LA MEDIA. | 112 |
| TABLA 5-35 AMPLITUD, COHERENCIA Y FASE DE LA FRECUENCIA DEL MODO 1 PARA LA CONFIGURACIÓN SIN DAÑO (TEST1), 24/07/2019, 16:59..... | 117 |
| TABLA 5-36 VECTOR AMPLITUD EXPERIMENTAL PARA EL MODO 1..... | 117 |
| TABLA 5-37 AMPLITUD, COHERENCIA Y FASE DE LA FRECUENCIA DEL MODO 2 PARA LA CONFIGURACIÓN SIN DAÑO (TEST 1), 24/07/2019, 16:59 | 118 |

| | |
|--|-----|
| TABLA 5-38 VECTOR AMPLITUD EXPERIMENTAL PARA EL MODO 2..... | 118 |
| TABLA 5-39 AMPLITUD, COHERENCIA Y FASE DE LA FRECUENCIA DEL MODO 3 PARA LA CONFIGURACIÓN SIN DAÑO (TEST1), 24/07/2019, 15:59..... | 118 |
| TABLA 5-40 VECTOR AMPLITUD EXPERIMENTAL PARA EL MODO 3..... | 119 |
| TABLA 5-41 AMPLITUD, COHERENCIA Y FASE DE LA FRECUENCIA DEL MODO 4 PARA LA CONFIGURACIÓN SIN DAÑO (TEST1), 24/07/2019, 16:59..... | 119 |
| TABLA 5-42 VECTOR AMPLITUD EXPERIMENTAL PARA EL MODO 4..... | 119 |
| TABLA 5-43 AMPLITUD, COHERENCIA Y FASE DE FRECUENCIA DEL MODO 5 PARA LA CONFIGURACIÓN SIN DAÑO (TEST1), 24/07/2019, 16:59..... | 120 |
| TABLA 5-44 VECTOR AMPLITUD EXPERIMENTAL PARA EL MODO 5..... | 120 |
| TABLA 5-45 AMPLITUD, COHERENCIA Y FASE DE LA FRECUENCIA DEL MODO 6 PARA LA CONFIGURACIÓN SIN DAÑO (TEST1), 24/07/2019, 16:59..... | 120 |
| TABLA 5-46 VECTOR AMPLITUD EXPERIMENTAL PARA EL MODO 6..... | 120 |
| TABLA 5-47 VECTOR AMPLITUD EXPERIMENTAL Y VECTOR DESPLAZAMIENTO NUMÉRICO EN EL MODO 1 PARA EL CÁLCULO DEL MAC FACTOR..... | 121 |
| TABLA 5-48 VECTOR AMPLITUD EXPERIMENTAL Y VECTOR DESPLAZAMIENTO NUMÉRICO EN EL MODO 2 PARA EL CÁLCULO DEL MAC FACTOR..... | 121 |
| TABLA 5-49 VECTOR AMPLITUD EXPERIMENTAL Y VECTOR DESPLAZAMIENTO NUMÉRICO EN EL MODO 3 PARA EL CÁLCULO DEL MAC FACTOR..... | 122 |
| TABLA 5-50 VECTOR AMPLITUD EXPERIMENTAL Y VECTOR DESPLAZAMIENTO NUMÉRICO EN EL MODO 4 PARA EL CÁLCULO DEL MAC FACTOR..... | 122 |
| TABLA 5-51 VECTOR AMPLITUD EXPERIMENTAL Y VECTOR DESPLAZAMIENTO NUMÉRICO EN EL MODO 5 PARA EL CÁLCULO DEL MAC FACTOR..... | 122 |
| TABLA 5-52 VECTOR AMPLITUD EXPERIMENTAL Y VECTOR DESPLAZAMIENTO NUMÉRICO EN EL MODO 6 PARA EL CÁLCULO DEL MAC FACTOR..... | 123 |
| TABLA 5-53 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DEL MAC FACTOR POR MODOS..... | 123 |
| TABLA 6-7 VARIANZA ACUMULADA (%) VS COMPONENTES PRINCIPALES (Ud) LOS 5 TESTS. EN AMARILLO SE MARCAN LOS PUNTOS DE INFLEXIÓN..... | 125 |
| TABLA 6-8 VALORES DE Q VS COMPONENTES PRINCIPALES DE TODOS LOS TESTS. EN AMARILLO SE MARCAN LOS PUNTOS DE INFLEXIÓN. | 128 |
| TABLA 6-9 VALORES DE T ² VS COMPONENTES PRINCIPALES DE TODOS LOS TESTS. EN AMARILLO SE MARCAN LOS PUNTOS DE INFLEXIÓN. | 129 |
| TABLA 6-10: RESUMEN DE NÚMERO DE COMPONENTES PRINCIPALES EN CADA TEST... | 130 |
| TABLA 7-1 RESULTADOS DE LOS TESTS NUMÉRICOS DE LA FASE 1. FRECUENCIAS (Hz) Y DECREMENTOS DE FRECUENCIAS (%). PARA LOS 6 MODOS Y LA MEDIA. | 131 |
| TABLA 7-2 RESULTADOS DE LOS TESTS NUMÉRICOS DE LA FASE 2. FRECUENCIAS (Hz) Y DECREMENTOS DE FRECUENCIAS (%). PARA LOS 6 MODOS Y LA MEDIA. | 132 |
| TABLA 7-3 INTERVALOS DE Cf E ÍNDICE DE DAÑO MÁXIMO PARA LOS TESTS CON EL PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO DE 15 REALIZACIONES. (TEST 1, TEST 2, TEST 3, TEST 4, TEST 5)..... | 133 |
| TABLA 7-4 ECUACIONES DE LOS AJUSTES LINEALES EN EL TEST 5, PARA LOS SEIS MODOS Y LA MEDIA. PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO CON 15 REALIZACIONES..... | 138 |
| TABLA 7-5 ÍNDICE DE DAÑO MÁXIMO PARA LOS TESTS CON REALIZACIONES 2, 11, 50, 100, 500, 1000, 5000. CON PROGRAMA PROBABILISTA AUTOMÁTICO..... | 139 |
| TABLA 7-6 DEFINICIÓN DE LOS ESTADOS DE DAÑO (VARGAS ALZATE, 2020)..... | 141 |

| | |
|---|-----|
| TABLA 7-7 ÍNDICE DE DAÑO MEDIO, ESTADOS DE DAÑO Y LÍMITES, PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA Y PROBABILIDAD ACUMULADA..... | 143 |
| TABLA 7-8 RESUMEN DE PUNTOS DEL MÉTODO DE CONDICIONES DE CONTORNO INCREMENTAL (1-9) Y CON ÍNDICE DE DAÑO MEDIO (9-15). DECREMENTO DE FRECUENCIA (%) PARA LA MEDIA, ÍNDICE DE DAÑO Y COMPONENTES PRINCIPALES. | 145 |

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La creciente demanda de infraestructuras civiles, el envejecimiento de los materiales y los daños estructurales de los activos existentes, sumado con el fortalecimiento de las leyes de seguridad y responsabilidad, han llevado al aumento de técnicas experimentales y numéricas para el control y la gestión de las infraestructuras de muchos tipos de materiales y tipologías.

La monitorización dinámica de edificios es una técnica experimental que se utiliza para analizar los daños de un edificio. En el caso que se produzca un terremoto, se necesitan técnicas de evaluación del estado de los edificios que han resistido, para conocer el tipo de intervención que se tiene que realizar. La monitorización, también puede ser útil para conocer, in situ, el estado estructural de un edificio el día después del terremoto con el objetivo garantizar la seguridad del personal de rescate. Para abordar estos problemas estructurales, en esta tesis se estudia la variación de los parámetros dinámicos (frecuencias, periodos). Esta técnica estructural es muy eficaz, por ejemplo, Vidal et al. (2014) monitoriza las vibraciones ambientales de un conjunto de 34 edificios, antes y después del terremoto de Lorca (11 de mayo del 2011). En concreto se determinan el periodo fundamental y el damping (ξ), y también se examina la variación de los parámetros dinámicos. El resultado fue que el periodo aumentó a medida que el grado de daño del edificio EMS crecía. Sin embargo, el damping no varió significativamente con el grado de daño del terremoto y el producto $\xi \cdot T$ se mantuvo aproximadamente constante. En la presente tesis, los datos de la respuesta de la monitorización dinámica, se han estudiado con el análisis de componentes principales (PCA). El PCA es un método estadístico que permite la reducción la dimensión de las variables sin perder información. Además, el PCA ordena las variables por importancia y elimina las correlaciones lineales entre los datos. Las variables resultantes (CP) es el número mínimo de variables manteniendo toda la información de las variables originales y eliminando los factores externos y superfluos (Smith, 2002). Esta técnica está muy utilizada actualmente en el campo de la resistencia de materiales a nivel estructural para la detección de daños. Por ejemplo, Pan et al. (2023) utiliza la técnica PCA para la determinación de características paramétricas en el hormigón celular. Este material es muy versátil y se puede utilizar en diferentes aplicaciones en la construcción a nivel estructural. La producción de la espuma ligera requiere un estudio exhaustivo del diseño de la mezcla para conseguir las

resistencias adecuadas. El estudio tiene como objetivo construir con los resultados del PCA un modelo para predecir la resistencia a compresión del hormigón celular y así mejorar el diseño del material. Además, el PCA se utiliza para el estudio de los daños en materiales de construcción muy diversos como por ejemplo en una viga de fibras continuas, reforzadas con resinas hechas por impresión 3D. Wu et al. (2023) utiliza el PCA para reducir las variables multidimensionales a tres componentes principales y analizar el daño por flexión de viga en T.

Otro ejemplo en el estudio de los daños es el trabajo de Tibaduiza et al. (2013) donde demostró que mediante la técnica del PCA sobre los datos monitorizados de una placa de aluminio, se pudieron clasificar las configuraciones dañadas y no dañadas.

Además, el PCA es muy útil para detectar daños en las armaduras de acero y las muestras se pueden clasificar en configuraciones dañadas y no dañadas (Golinval, 2017).

En la presente tesis, se realiza una simulación del daño en un modelo experimental de una estructura metálica a escala, en la cual se monitoriza la respuesta dinámica. De manera similar Gharehbaghi et al. (2022) utilizó un modelo experimental de una estructura metálica a escala de planta rectangular con un pórtico en los dos sentidos formado por columnas y 3 plantas de aluminio. En la primera configuración se estudió un daño lineal generado por la reducción de sección de las columnas. En la segunda configuración se implementó un daño no lineal simulado por el impacto de una columna central (con un parachoques) entre la segunda y tercera planta. Este mecanismo imitó la apertura de una fisura y creó comportamientos no lineales. La respuesta dinámica de la estructura se monitorizó con unos acelerómetros piezoeléctricos de un solo eje en cada planta. Los datos obtenidos fueron tratados con el PCA para detectar daños. Además, en este caso se utilizaron los estimadores Kernel- Based PCA y LDA (linear discriminant análisis) para reducir las variables y encontrar el nuevo espacio de variables. Este método mostró una eficacia superior al 98.2% para clasificar tanto las configuraciones de los daños lineales como no lineales.

En esta tesis, se utiliza también una técnica de simulación numérica y una simulación de Monte Carlo para el estudio del daño. Además, gracias a la potencia computacional actual se pueden ejecutar una gran cantidad de realizaciones que experimentalmente sería imposible ejecutar por coste y duración. De manera similar, Sakiyama (2023) desarrolla una simulación de Monte Carlo para un modelo de elementos finitos en un puente de hormigón pretensado de 60 años. En el tablero del puente, se realiza una monitorización dinámica in situ y las respuestas dinámicas obtenidas fueron procesadas con el PCA. Este

estudio permitió cuantificar la extensión del daño debido a la reducción de la rigidez local. Además, este método hizo posible efectuar recálculos estructurales del puente y trabajos de reparación en las áreas dañadas.

Además de las estrategias de PCA que utilizan la frecuencia modal de la respuesta para la detección de daños, Zhou et al. (2018) utilizó el análisis de componentes principales sobre las funciones de transmisibilidad que tienen una gran interrelación con el deterioro estructural. A través de las mediciones de las distancias se construyeron los indicadores de daño para los estados sin daño y dañados. Este proceso se aplicó en un modelo de una estructura metálica de 4 pisos.

A parte de los materiales de construcción actuales analizados, en Europa hay una gran cantidad de construcciones históricas con diferentes grados de valores culturales. El patrimonio cultural está formado por edificios históricos, monumentos importantes, monumentos menores y construcciones vernaculares. Este patrimonio se tiene que preservar como legado de las naciones y como documento histórico del pasado. No obstante, debido a su complejidad arquitectónica, es necesario recurrir a herramientas numéricas avanzadas para analizar las diferentes características y singularidades de este tipo de estructuras.

Con el objetivo de respetar la construcción original en las obras de edificación, ICOMOS (International Council on Monuments and Sites) sugiere aplicar una intervención mínima sobre los edificios y monumentos (Icomos-Charter, 2003). Si es posible, es preferible utilizar métodos no destructivos (ND) como por ejemplo la evaluación de daños in situ y los procedimientos de monitorización aplicados en cueva pintada (Caselles et al., 2021). El proceso experimental de la investigación es un paso necesario para obtener un diagnóstico fiable de cualquier edificio histórico de mampostería, tierra o de piedra. Por esta razón, es recomendable recopilar la mayor cantidad de información posible relacionada con el comportamiento estructural del edificio.

Se recomienda seguir el método científico basado en 4 etapas principales para identificar el estado estructural de las construcciones históricas (Figura 1-1): Historia, Inspección, Monitorización y Modelización (Roca, 2014).



Figura 1-1 Diagrama de flujo del método científico de inspección y diagnóstico de estructuras históricas recogidas en las recomendaciones de ICOMOS (Roca, 2014)

Siguiendo el método científico, el proceso de evaluación de construcciones históricas tiene como principal objetivo mantener las características significativas de las construcciones para conservar la autenticidad de los edificios.

Esta tesis está focalizada en la tercera y cuarta etapa del método científico; monitorización y modelización de una estructura metálica aplicando una técnica no destructiva para estudiar el comportamiento dinámico bajo los efectos de las variaciones térmicas.

Entre las diferentes técnicas ND usadas para el reconocimiento de los edificios históricos de piedra, tierra y mampostería, los tests dinámicos (análisis modal) se consideran una herramienta muy efectiva y fiable para medir los parámetros experimentales relacionados con el comportamiento global dinámico de los edificios monitorizados.

En este campo, Caselles et al. (2015) y Elyamani et al. (2017) investigaron la monitorización dinámica de la Catedral de Santa María de Mallorca del siglo XIV (Mallorca, España). En este trabajo se estudiaron los principales parámetros dinámicos de este edificio gótico de piedra sin reforzar. El estudio monitorizó los datos de temperatura, la humedad relativa, el efecto del viento y el teleseísmo.

En otras investigaciones, el análisis dinámico (Ivorra et al., 2001) se aplicó al estudio de fuerzas verticales y horizontales causadas por el repique de las campanas de una torre. Además, Beconcini et al. (2001) comparó el comportamiento dinámico del campanario de San Miniato (Pisa) con las predicciones de los modelos discretos. Ramos et al. (2010) aplicó el sistema de monitorización dinámica y el análisis modal en la Torre del Reloj de Mogadouro y la Iglesia del Monasterio de los Jerónimos en Lisboa para la identificación de daños en estructuras de piedra.

El análisis modal consiste en estudiar las propiedades dinámicas de las estructuras en términos de modos y periodos fundamentales de vibración. El análisis experimental modal es el campo que mide y analiza la respuesta dinámica real de estructuras ante

acciones externas para determinar dichas propiedades. Las propiedades dinámicas resultantes del análisis modal experimental son las frecuencias, el damping y las formas modales que están relacionadas con las características físicas y mecánicas de la estructura analizada (masa, rigidez y energía de disipación). Por ejemplo, Llorens et al. (2001) usa la respuesta de un test dinámico con el objetivo de identificación de propiedades dinámicas de las estructuras. En concreto, el trabajo estudió la detección y caracterización del daño en 24 columnas de piedra, localizadas en el Claustro del siglo XI de la Catedral de Girona en España. En otro ejemplo, Chaudhari et al. (2017) se centró en realizar un análisis de vibraciones monitorizando los cambios de los parámetros de la respuesta en una viga con una fisura inclinada. La existencia de una fisura inclinada condujo a una pérdida de rigidez local causando que la respuesta de las características dinámicas de vibración mostrara una disminución de la frecuencia fundamental del sistema. En otro ejemplo, Mironovs et al. (2022) utilizó el análisis modal operacional para la detección de daños. En esta técnica, un operador realizó mediciones de vibraciones estructurales sin interrumpir el funcionamiento normal de la estructura. El objetivo del estudio fue desarrollar un algoritmo de aprendizaje automático que sea capaz de identificar estados dañados de una estructura basados en la evaluación de los parámetros modales. El estudio se aplicó en una viga en voladizo de un compuesto polimérico.

En la construcción histórica, el análisis modal se utiliza para:

- Evaluación de las características dinámicas de los edificios: frecuencias naturales, modos y características del terreno.
- Interacción de la estructura, valores del damping, respuestas para las cargas del viento o del tráfico.
- Validación del comportamiento de los modelos, normalmente F.E.M. en el caso elástico, para verificaciones de estructuras (estática, viento, sismo, ...)
- Solución de problemas estructurales que dan respuesta a vibraciones: estudio del movimiento de las campanas en los campanarios, excesiva vibración, nivel de vibración excesivo en elementos estructurales debido al tráfico.
- Sistemas de control en estructuras (monitorización)
- Comprobación de la eficacia de las reparaciones.

El ensayo de vibración en edificios históricos tiene dos objetivos importantes. El primero es estudiar el comportamiento de la estructura, especialmente cuando está cerca de los

umbrales de rotura. El segundo objetivo es el análisis y localización de los puntos débiles de la estructura.

También se ha utilizado el PCA en la construcción histórica para buscar similitudes entre morteros de ladrillos de iglesias contemporáneas, como por ejemplo Haghia Sophia en Istanbul, Turquía (Moropoulou and Polikreti, 2009).

El PCA es un método que tiene suficiente sensibilidad para analizar el efecto del cambio ambiental sobre las propiedades dinámicas. La técnica de Análisis de Componentes Principales (PCA) no requiere medir parámetros ambientales porque se consideran variables incluidas en los datos (Yan et al., 2005). La idea principal del método es eliminar la contribución debida a las condiciones ambientales eliminando las correlaciones entre los datos. Es decir, el resultado representa el conjunto mínimo de variables conservando la mayor parte de la información presente en el conjunto inicial de datos. Otro ejemplo de la implementación del PCA es el estudio de Grande (2013), donde la variación de la temperatura de la piedra parece influir en el comportamiento dinámico de la catedral de Mallorca.

Caselles et al. (2018) utilizó PCA para estudiar el grado de daño de varios edificios e indicó que el análisis de componentes principales necesita una variación del rango de temperatura exterior entre 8 y 16°C dependiendo del edificio, para asegurar la estabilidad de los resultados.

Mujica et al. (2011) investigó el uso de dos estimadores basados en el análisis de componentes principales (PCA): T^2 y Q- statistic. Estos valores fueron útiles para detectar y distinguir los daños en dos tipos de estructuras: una chapa de acero y un álabe de turbina de un avión. Nguyen et al. (2014) estudió varios estimadores de daños basados en PCA y los comparó entre ellos: KPCA (Kernel Principal Component Analysis approach), NI (Novelty) y T^2 . Estas técnicas se aplicaron en el Puente Champangshiel en Luxemburgo. Zhang et al. (2021) propuso otros estimadores también basados en las componentes principales: LEV (Length of the Eigenvector) y DAEV (Directional Angle of the Eigenvector Variation) con el objetivo de detectar daños. Golinval (2017) utilizó los estimadores, basados en el PCA, indicador del ángulo del subespacio y 'Proper Orthogonal Modes' (POM), con el objetivo de detectar daños. Estos son indicadores globales porque incluyen toda la información modal de la estructural y fueron aplicados a una estructura sometida a excitaciones armónicas. La técnica de componentes principales también se utiliza para casos no lineales como por ejemplo el estudio de Yan et al. (2005) que versa sobre la monitorización durante un año del puente Z24 situado en

Suiza, que pasa por encima de la autopista A1 entre Berna y Suiza; es un puente de hormigón armado postensado de 58 metros de largo.

Otra variable importante que sirve para determinar el estado de un edificio de manera numérica es midiendo el índice de daño (ID). Vargas Alzate (2013) estudió varios índices de este tipo y definió umbrales para relacionarlos con el estado de daño la estructura. En este trabajo se han usado los resultados asociados a los umbrales identificados a partir del índice de daño de Park y Ang (Park and Ang, 1985) para desarrollar curvas de excedencia o fragilidad (apartado 7.2.2.3). Además, Diaz et al. (2017) propone un índice de daño basado en un análisis de estática no lineal. Este índice de daño es una combinación lineal de dos funciones de energía; (1) la energía de deformación asociada con la variación de rigidez y la ductilidad de la estructura, y (2) la energía disipada asociada con la histéresis. Este índice de daño fue utilizado para representar el daño en edificios de acero de baja altura sometidos a acciones sísmicas en la ciudad de México.

Además, Cao et al. (2014) propone un índice de daño basado en el concepto de la deformación residual, para ello utiliza las cargas cíclicas aplicadas a estructuras de hormigón armado. En otro estudio del ID, Williams et al. (1995) realiza una revisión de los ID sísmicos en referencia en la toma de decisiones de una intervención estructural. Los ID se definieron localmente para un elemento individual o globalmente para una estructura completa y se basaban, fundamentalmente, en la estimación de daño a flexión bajo una carga sísmica.

Las curvas de fragilidad también se han desarrollado para diversas tipologías de estructuras y suelos para estudiar la vulnerabilidad. Por ejemplo, Pitilakis et al. (2022) calculó las curvas de fragilidad en edificios de hormigón armado existentes teniendo en cuenta la interacción suelo-estructura y los efectos de amplificación del sitio. El cálculo de las curvas estaba basado en el análisis dinámico no lineal para varias tipologías y geometrías estructurales de edificios, condiciones de relleno, disposiciones de códigos, materiales del perfil del suelo y características dinámicas. En este estudio se demostró que la amplificación del sitio durante los terremotos aumentó significativamente la fragilidad del sistema suelo-cimentación- estructura; esto quedó reflejado en su vulnerabilidad. El enfoque clásico (paramétrico) de las curvas de fragilidad se basa en asumir una forma lognormal. Sin embargo, Mai et al. (2017) efectúa un enfoque no paramétrico para establecer las curvas de fragilidad. Para ello utiliza una simulación numérica mediante el método Monte Carlo en una estructura metálicas de tres pisos.

1.2 Trabajos previos

En el estudio de Caselles et al. (2022) y el trabajo de investigación de Martín (2018) y Caselles et al. (2018), aplicamos la técnica de componentes principales a 5 edificios de Barcelona y a la estructura metálica reducida del laboratorio (Figura 1-2). La principal variable que se estudió en detalle fue la varianza acumulada del Análisis de Componentes Principales.

Los tests se realizaron en tres edificios de hormigón armado, considerados no dañados: el edificio de arquitectura de Barcelona de UPC (Figura 1-2(a)) y los edificios C2 y D2 del Campus Nord de la UPC (Figura 1-2(c)).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 1-2 (a) Edificio de ETSAB. (b) Edificio de ETSEIB. (c) Edificios C2 (derecha) y D2 (izquierda) del Campus Nord. (d) Catedral de Mallorca.

En lo que se refiere a los edificios dañados, se estudió el edificio de industriales de Barcelona (Figura 1-2(b)) que tiene un daño menor y la Catedral de Mallorca (Figura 1-2(d)) que tiene un daño mayor que el resto de edificios. Finalmente, se realizó el análisis dinámico de la estructura metálica del laboratorio (Figura 1-3 (a)) mediante la monitorización de 6 nodos con acelerómetros (Figura 1-3(b)). La estructura metálica a escala tiene 4 plantas rectangulares formando un y dos pórticos en los sentidos transversales y longitudinal respectivamente. Las columnas son barras de acero rectangulares (20x10mm) y las columnas son ángulos (20x10mm). Las uniones de las vigas y las columnas son atornilladas. La estructura metálica descansa en unas chapas atornilladas a una base fija (Figura 1-5(a)). El análisis se realizó en 4 configuraciones de la estructura con diferente grado de daño. La primera configuración fue el modelo sin daño y en las otras tres configuraciones se simularon daños en los nodos aflojando el par de apriete de los tornillos de las uniones. A continuación, se detallan las condiciones de los 4 tests:

- Test 1: Estructura sin daño. En este test todos los tornillos de la estructura se fijaron con un par de apriete 5.1 N·m
- Test 2: Daño alto en la conexión transversal (lado corto) del nodo señalado en rojo en la Figura 1-3 (a). El par de apriete se fijó en 0 N·m
- Test 3: Daño alto en las dos conexiones, en los sentidos longitudinal y transversal, del nodo señalado en rojo de la Figura 1-3(a). El par de apriete se fijó en 0 N·m
- Test 4: Daño medio generalizado en la primera planta. En este test, el par de apriete de los tornillos de todas las uniones de la primera planta se fijó en 2.5 N·m.



(a)



(b)

Figura 1-3 (a) Estructura del laboratorio. En rojo se indica el nodo en donde se ha introducido el daño.
(b) Accelerómetros en los nodos.

Para cada test, se varió la temperatura de la estructura y se midió con una cámara termográfica. Las temperaturas tomadas en la estructura de los 4 tests se muestran en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1: Variación de temperatura de la estructura medidas con la cámara termográfica en los ensayos de los estudios previos.

| | Temperaturas (°C) |
|--------|-------------------|
| TEST 1 | 13 a 34 |
| TEST 2 | 14.4 a 34.2 |
| TEST 3 | 12 a 28.3 |
| TEST 4 | 15.5 a 34.1 |

Los resultados del estudio fueron las gráficas de varianza acumulada vs componentes principales (Figura 1-4) que mostraron que las configuraciones sin daño solo necesitan una componente principal para explicar la variación de frecuencias. Sin embargo, en las configuraciones con daño se necesitaron más de una componente principal para explicar la variación de frecuencia. De manera similar, el edificio de industriales, que tiene un daño menor, necesitó dos componentes principales, mientras que la Catedral de Mallorca, que tiene un mayor daño, necesitó tres componentes principales.

Los resultados de las diferentes configuraciones (Figura 1-4) en la estructura metálica reducida del laboratorio fueron similares.

- El test 1, la configuración sin daño necesitó una componente principal.
- El test 2, daño alto en una conexión necesitó dos componentes principales.
- El test 3, daño alto en dos conexiones, necesitó tres componentes principales.
- El test 4, daño medio generalizado en una planta, necesitó tres componentes principales.

El estudio de las frecuencias en la estructura del laboratorio se realizó para dos intensidades de impactos, uno más fuerte que el otro. Los resultados variando la intensidad del impacto fueron similares, luego, las respuestas de la estructura son independientes de la intensidad del impacto. En la Figura 1-4, las gráficas (a), (c), (e), (g) corresponden a la excitación menor, mientras que las gráficas (b), (d), (f), (h) corresponden a la excitación mayor.

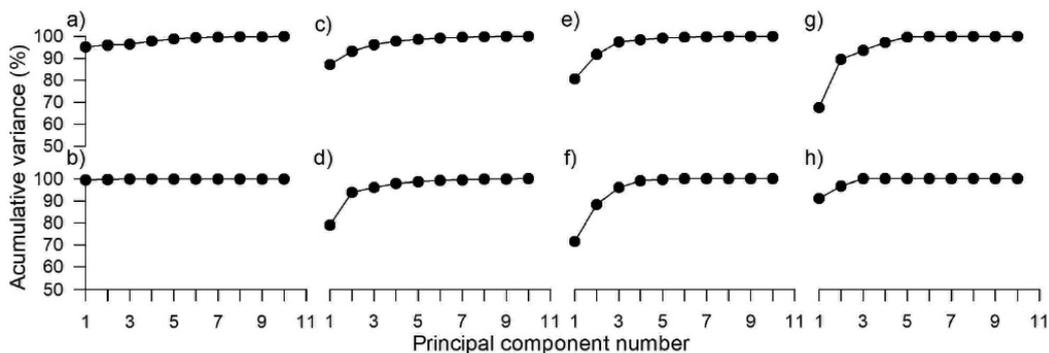
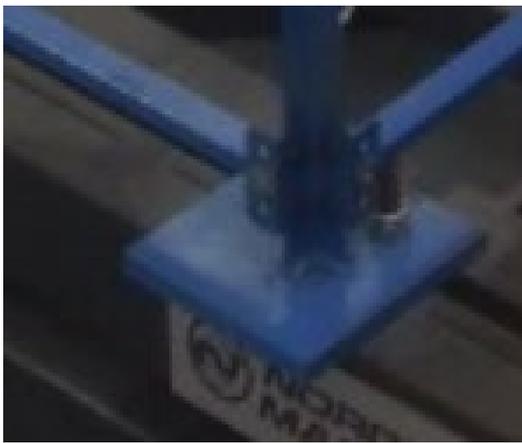


Figura 1-4 Varianza acumulada vs número de componentes principales a) Test de configuración sin daño con excitación menor b) Test de configuración sin daño con excitación fuerte c) Test de configuración daño alto en una conexión, bajo una excitación menor d) Test de configuración daño alto en una conexión, bajo una fuerte excitación. e) Test de configuración daño alto en dos conexiones, bajo una excitación menor f) Test de configuración daño alto en dos conexiones, bajo una excitación fuerte. g) Test de configuración daño medio generalizado en una planta, bajo una excitación menor. h) Test de configuración daño medio generalizado en una planta, bajo una excitación fuerte (Caselles et al., 2018).

En el estudio previo, las chapas de anclaje de las columnas tenían una conexión atornillada a la base, es decir, la conexión no era rígida. Realizar el modelo numérico fue complicado puesto que se tenían que contemplar todas las alternativas en las condiciones de contorno de los soportes: articulados, con un coeficiente de flexibilidad variable y rígido (Figura 1-5(a)). Con el objetivo de simplificar y eliminar variables para realizar el

modelo, en la presente tesis se ha modificado el soporte de la estructura soldando las columnas de la estructura a una base, luego, los soportes de la estructura se han considerado rígidos (Figura 1-5(b)). De esta manera se ha simplificado la modelización de los soportes de las columnas.

Además, el estudio previo ha permitido mostrar que los 4 edificios necesitan entre 10 y 15 días de monitorización, como tiempo mínimo requerido, y asegurar una buena estabilidad de los resultados. Además, el intervalo mínimo de temperatura tiene que ser entre 8°C y 16°C, para asegurar una buena variabilidad de las frecuencias y así una buena estabilidad de los resultados. Estas dos condiciones garantizan que sea una técnica de fácil y asequible aplicación.



(a)



(b)

Figura 1-5 (a) Soporte de la estructura metálica atornillado a la base, en el estudio previo (b) Soporte de la estructura metálica soldado a la base en la tesis.

1.3 Objetivos generales y específicos

El objetivo principal de la tesis es la detección de daños estructurales únicamente sabiendo el número mínimo de componentes principales. Esta idea es muy interesante puesto que implica que no es necesario saber, o buscar, los parámetros de la configuración no dañada de la estructura. Nótese que las características de la estructura no dañada en muchos casos no es posible obtenerlas debido a que no existen dichos registros en las construcciones históricas.

Para ello se ha buscado demostrar que, en una estructura dañada, se han necesitado más variables para explicar la variación frecuencial de la estructura con la temperatura que en una estructura no dañada.

En esta fase se han aplicado a la matriz de frecuencias modales unos estimadores estadísticos basados en el Análisis de Componentes Principales para evaluar los daños de la estructura: varianza acumulada, T^2 y Q . Además, los resultados de estos estimadores se han relacionado con el índice de daño en las diferentes configuraciones de la estructura. Sin perder de vista el objetivo principal, en el presente trabajo se ha elaborado, por un lado, un modelo experimental de una estructura metálica (con uniones atornilladas entre vigas y columnas) a escala en la cual se ha introducido una serie de daños en los nodos aflojando los tornillos de las uniones. Por otro lado, se ha diseñado un modelo numérico de la estructura metálica en el cual los coeficientes de flexibilidad (C_f) asociados al giro de la sección de las barras en los nodos se han podido modificar. La disminución de los coeficientes de flexibilidad de los nodos modeliza la disminución del par de apriete de los tornillos, por lo tanto, el daño. Además, la disminución de C_f , modifica la matriz de rigidez de la estructura y consecuentemente las frecuencias naturales del modelo numérico. La calibración del modelo numérico se realiza a partir de encontrar los C_f en los nodos que aproximen el decremento de frecuencia numérico respecto el decremento de frecuencia de la configuración experimental.

Una vez que se ha calibrado el modelo numérico, se ha utilizado para ejecutar simulaciones numéricas con estados de daños más grandes.

Para tener el máximo número de simulaciones, en este trabajo se ha desarrollado una técnica de simulación probabilista automática basada en el método de Monte Carlo.

Este proceso ha consistido en realizar un programa automático en donde las condiciones de contorno (C_f) de las realizaciones siguen una función de densidad de probabilidad uniforme. De esta manera se puede realizar la gráfica índice de daño vs decremento de frecuencia y realizar el estudio probabilístico del índice de daño.

El análisis de componentes principales se ha aplicado a los test experimentales utilizados en la calibración del modelo, consecuentemente, se ha podido establecer la relación entre el número mínimo de componentes, los decrementos de la frecuencia y el índice de daño. Además, el método de Monte Carlo también ha sido muy útil para buscar la mejor aproximación numérica de la configuración sin daño.

Para llevar a cabo los objetivos generales, se han desarrollado objetivos específicos que se detallan a continuación.

Para abordar el problema de la detección de daños, en este estudio se han desarrollado dos técnicas principales. La primera ha sido el estudio estadístico del análisis de componentes principales que ha permitido minimizar el número de variables para explicar la variación de frecuencias. La segunda técnica que se ha introducido ha sido el estudio del índice de daño de la estructura con el fin de relacionarlo con el número mínimo de componentes principales de las estructuras dañadas. Finalmente, se pretende buscar una correlación del índice de daño vs decremento de la frecuencia modal.

A continuación, se enumeran los objetivos específicos del modelo experimental y del modelo numérico.

Objetivos específicos del modelo experimental:

1. A nivel experimental se han realizado ensayos dinámicos a un modelo a escala reducida en el laboratorio. Los experimentos dinámicos del laboratorio han consistido en ensayos de respuesta al impulso del modelo a escala reducida.
2. El modelo experimental ha sido una estructura metálica (atornillada) de planta rectangular (144 cmx77cm) y altura de 170cm, compuesta de vigas de acero de sección 20x10mm y columnas con una sección angular de 20x2mm. La unión de las vigas y columnas es atornillada. La estructura se ha monitorizado con 12 acelerómetros situados en 6 nodos. Los acelerómetros permitieron tener una lectura de las aceleraciones de los nodos en el espacio temporal. La temperatura de la estructura se ha variado y se ha medido con una cámara termográfica con el objetivo de obtener la mayor variabilidad en el registro de las frecuencias.
3. Los parámetros estructurales del modelo a escala se han modificado para elaborar un estudio de los daños. Las modificaciones de las configuraciones de la estructura se han creado aflojando el par de apriete de los tornillos de las uniones entre las vigas y las columnas. De esta manera se han creado la configuración sin daño y con diferentes tipos de daños para poder clasificar la respuesta de la estructura.
4. La transformada de Fourier de los registros temporales (experimentales) de los acelerómetros ha permitido tener los resultados en el espacio frecuencial. A través del método del Pick-Picking se han seleccionado las frecuencias naturales. De esta manera, la respuesta de la estructura se ha sintetizado en las matrices de frecuencias modales (columnas) vs experimentos (filas) realizados. El análisis de componentes principales se ha aplicado a las matrices de frecuencias modales de las diferentes configuraciones.

5. Se definen los estimadores T^2 y Q basados en el análisis de componentes principales, que se aplican a las matrices (experimentales) de frecuencias modales de las diferentes configuraciones dañadas. T^2 es un estimador estadístico que cuantifica la norma de la proyección de la matriz de frecuencias en el espacio de las componentes principales. Mientras que Q cuantifica la norma de la matriz de proyección en el espacio ortogonal, es el residuo.
6. A través de los estimadores de la varianza acumulada, T^2 y Q se ha encontrado el número mínimo de componentes principales para explicar la variación de frecuencia.

Objetivos específicos a nivel numérico:

1. Un objetivo importante del presente trabajo es diseñar un modelo numérico de la estructura metálica que sea capaz de representar la configuración sin daño y las diferentes configuraciones dañadas.
2. El ajuste del modelo numérico de la configuración sin daño se ha realizado mediante minimización del error de la frecuencia del test numérico con el test experimental. Sin embargo, el ajuste del modelo para los tests dañados, se ha realizado buscando la condición de contorno (Coeficientes de flexibilidad Cf_2 y Cf_3) que aproxime mejor el decremento de frecuencia numérico y el decremento de frecuencia experimental. Tanto los decrementos de frecuencia experimentales como los numéricos se miden respecto las frecuencias de la configuración sin daño.
3. Para realizar el ajuste de la configuración sin daño se ha realizado con métodos de variaciones incrementales en las condiciones de contorno en primer lugar y posteriormente con un programa automático probabilista capaz de ejecutar un gran número de realizaciones. Este método ha permitido realizar el método Monte Carlo con garantías.
4. Antes de ejecutar el programa probabilístico automático con 5000 realizaciones, se realiza un preajuste con la ejecución del programa con 15 realizaciones. Este programa permite explorar las soluciones más rápido y en varios intervalos de las condiciones de contorno.
5. Antes de ejecutar el programa automático se realiza una primera aproximación del modelo con 9 puntos para explorar las soluciones con variaciones incrementales de condiciones de contorno.

6. El ajuste del modelo numérico sin daño ha consistido tanto en un ajuste de las frecuencias modales como en un ajuste de las formas modales experimentales y numéricas (Mac Factor).
7. A través del modelo numérico se ha definido un índice de daño basado en la pérdida de coeficiente de flexibilidad asociado a un giro en un nodo. La pérdida de coeficiente de flexibilidad en el modelo numérico modeliza el daño generado en el modelo experimental cuando se afloja el par de apriete en las uniones de las vigas y las columnas.
8. El método de Monte Carlo ha permitido realizar un estudio probabilista del índice de daño en función del decremento de frecuencia y así poder establecer una relación entre el índice de daño y las componentes principales. En este método, tanto la ubicación del daño (nodo) en la estructura, como el valor del coeficiente de flexibilidad asignado en el nodo, siguen una función de densidad de probabilidad uniforme.
9. Para el análisis modal y el índice de daño se ha diseñado un programa probabilista automático entre el ETABS y el Excel (funciones OAPI) que es capaz de realizar automáticamente una simulación de un gran número de realizaciones. Los resultados de cada realización del ETABS se registran en una hoja de Excel para su futura utilización. Este programa ha generado suficientes realizaciones aleatorias e independientes para poder aplicar de una manera eficaz el método Monte Carlo. Para poder realizar 5000 realizaciones, el programa se ha ejecutado con el servidor del departamento que pertenece al grupo de investigación GiES con procesador Intel Xeon CPU ES-2660 de 16 GB.

1.4 Metodología

Para alcanzar los objetivos descritos, la metodología se ha basado en primer lugar en realizar un tratamiento de los datos adecuados con el método de análisis de componentes principales (PCA). El resultado del PCA se ha estudiado con los estimadores varianza acumulada, T^2 y Q, con el objetivo de hallar el número mínimo de componentes principales para explicar la variación de frecuencias modales. Este método se ha aplicado en diferentes configuraciones de daño en la estructura para poder comparar sus resultados. El ensayo dinámico aplicado a la estructura del laboratorio ha sido un método fiable para obtener resultados experimentales concluyentes. Se han introducido daños incrementales

en los nodos para poder monitorizar el cambio de frecuencias en la respuesta de la estructura.

La metodología para la introducción del daño se ha basado en aflojar el par de apriete de los tornillos de las uniones entre las vigas y columnas. La respuesta se mide como decremento de frecuencia respecto la frecuencia inicial de la configuración sin daño. Este decremento de frecuencia de la estructura representa una disminución de las características dinámicas de la estructura.

Otro método interesante de la tesis ha sido la obtención de las matrices frecuenciales de los tests experimentales para poder realizar el método de componentes principales. La obtención de datos ha sido, en primer lugar, mediante la monitorización de 6 nodos con unos acelerómetros que han generado los datos iniciales en el espacio temporal. El tratamiento de los datos de los acelerómetros se ha realizado con un software propio (Caselles et al., 2022) con el objetivo de obtener los espectros de frecuencia y poder trabajar en el espacio frecuencial. Los espectros de frecuencias permitieron obtener las frecuencias modales para cada ensayo de temperatura. La clasificación ordenada de las frecuencias modales según los ensayos ha permitido formar la matriz de frecuencias modales para cada configuración de daño. Esta matriz se ha normalizado y se le ha aplicado el análisis de componentes principales. A continuación, se han obtenido los estimadores de varianza, T^2 y Q para obtener el número mínimo de componentes principales para explicar la variación de frecuencias. La obtención del número mínimo de componentes principales ha sido a través de localizar el punto de inflexión en el gráfico de los estimadores versus componentes principales necesarias. Es decir, el punto a partir del cual la pendiente de la curva es prácticamente plana. Cuanto más alto es el número de componentes principales necesario, más daño se asocia a la estructura. Este método ha permitido asociar a los tests experimentales un número de componentes principales. Es decir, cada test experimental tiene asociado un decremento de frecuencia experimental y un número de componentes principales. Estos decrementos de frecuencia de los tests experimentales se han utilizado para calibrar el modelo numérico del índice de daño.

El modelo numérico de la estructura metálica a escala del laboratorio se ha definido mediante el programa de cálculo estructural ETABS. En cada nodo de la estructura se han parametrizado los coeficientes de flexibilidad asociadas al giro como condiciones de contorno. La variación de las condiciones de contorno genera una variación frecuencial numérica en la respuesta de la estructura.

La modelización numérica de la estructura sin daño consiste en encontrar los coeficientes de flexibilidad para minimizar el error de la frecuencia numérica con la frecuencia del test experimental. Este proceso se ha realizado en varias etapas. La primera etapa consiste en un método con variaciones incrementales en las condiciones de contorno para encontrar la mejor aproximación a los resultados experimentales. En la segunda etapa, para tener un mejor barrido de las condiciones de contorno, se realiza un método probabilista que consiste en asignar un valor a los coeficientes de flexibilidad según una función de densidad de probabilidad uniforme en un intervalo. Estos intervalos se adaptan estratégicamente con el objetivo de tener mejores resultados. Pero este método es muy lento y manual por lo que en la siguiente etapa se diseña un programa que asigna automáticamente condiciones de contorno según una función de densidad de probabilidad uniforme en un intervalo. El objetivo final es utilizar este programa con 5000 realizaciones, pero antes se utiliza el programa con 15 realizaciones variando los intervalos para obtener una primera aproximación; trabajar con 15 realizaciones es más manejable y permite realizar fácilmente un preajuste del modelo. El programa con 5000 realizaciones permitirá aplicar el método de Monte Carlo con garantías y realizar un estudio probabilista del índice de daño.

La modelización de las estructuras dañadas ha consistido en buscar unas condiciones de contorno del modelo numérico que aproximen los decrementos de frecuencias numéricas con los del modelo experimental. Los resultados de esta fase, también se han utilizado en el capítulo 7.1 del índice de daño para la calibración del modelo.

La metodología para estudio del índice de daño se inicia por la definición basada en el decremento de coeficientes de flexibilidad (DCf). A continuación, en los tests utilizados para el calibrado del modelo numérico, se calcula el índice de daño en función de los decrementos de frecuencia (DF). Estos tests numéricos tienen asociado un número de componentes principales (CP). Mediante el modelo numérico calibrado, se realiza una primera simulación numérica del índice de daño con variaciones incrementales de las condiciones de contorno (coeficientes de flexibilidad) con un grado de daño más grande. En la siguiente etapa se realiza una simulación numérica automática con un programa probabilístico en 15 realizaciones (estudio inicial). En la siguiente y última etapa, se efectúa una simulación numérica de 5000 realizaciones con el mismo programa automático, para poder aplicar el método Monte Carlo y establecer la relación entre el índice de daño, los decrementos de frecuencia y las componentes principales (Figura 1-6).

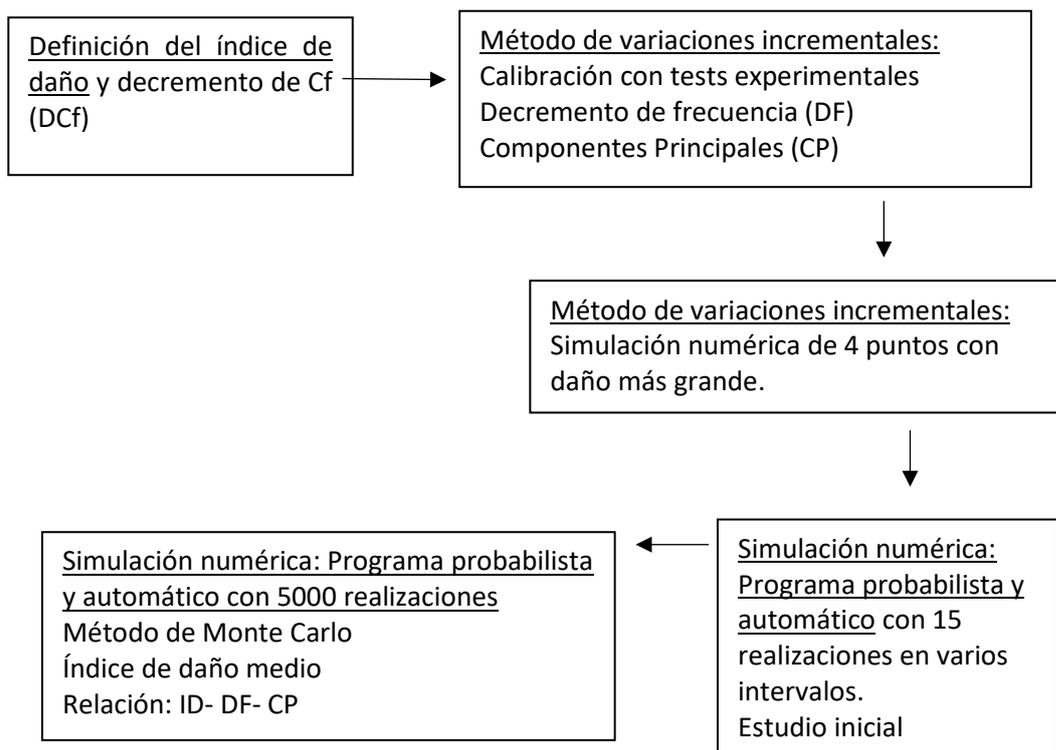


Figura 1-6 Proceso del estudio de índice de daño (ID). Definición, calibración y simulación del índice de daño. DCf= decremento de coeficiente de flexibilidad, DF= decremento de frecuencia, CP= componentes principales.

1.5 Estructura de la memoria

El primer capítulo es la introducción. En primer lugar, se detallan los antecedentes de los estudios relacionados con el presente trabajo. A continuación, se describen los trabajos previos más destacados para el estudio de este trabajo. En el tercer apartado se presentan los objetivos generales y específicos de la tesis. En el cuarto apartado se describe la metodología aplicada para alcanzar los objetivos. Finalmente se describe la estructura del presente trabajo.

En el segundo capítulo se definen los conceptos teóricos más importantes de la tesis: espectro de frecuencias, análisis FFT, análisis modal, MAC factor, Análisis de Componentes Principales, estimadores T^2 y Q , índice de daño, coeficiente de determinación (R^2), norma del residuo (NR), curvas de fragilidad (o excedencia) e índice de daño medio.

En el tercer capítulo se especifican los procedimientos más importantes del presente trabajo. El primer apartado detalla los experimentos de la variación de frecuencia según la temperatura. En primer lugar, se describe la estructura para realizar los ensayos y la colocación de los acelerómetros en los nodos de la estructura. A continuación, se definen los daños impuestos en la estructura y se precisa el procedimiento de la variación de temperatura. En segundo lugar, se realiza el tratamiento de los datos de los registros de los acelerómetros que, mediante la transformada de Fourier, permite obtener los datos en el espacio frecuencial en donde se realiza un análisis de las frecuencias con el método Pick-Picking.

El segundo apartado muestra el procedimiento para el ajuste del modelo sin daño y se presentan los métodos de variación incremental de los coeficientes de flexibilidad y el método probabilista automático con un programa de 15 y 5000 realizaciones. En este apartado también se detalla el proceso para el ajuste de los modelos con daños basados en las aproximaciones de los decrementos de frecuencias experimentales y numéricos. Finalmente, este apartado acaba con una evaluación experimental de la forma modal y los cálculos del Mac Factor de la configuración sin daño.

El tercer apartado expone el procedimiento para el análisis de componentes principales; se utilizan los estimadores de la varianza acumulada, T^2 y Q .

El cuarto apartado consiste en el procedimiento de cálculo del índice de daño a través de varias etapas. En la primera etapa se detalla el cálculo del índice de daño con variaciones incrementales de las condiciones de contorno. En la segunda etapa se muestra el cálculo del índice de daño con el programa probabilista automático con 15 y 5000 realizaciones. En el cuarto capítulo se muestran los resultados experimentales de la respuesta de la estructura por la variación frecuencial según la temperatura. En él, se describen los resultados del Pick-Picking de los espectros experimentales y se detalla la formación de las matrices de datos con las frecuencias modales.

En el quinto capítulo se presentan los resultados del análisis modal. En el primer apartado, se exponen los resultados de la modelización numérica de los diferentes tests, donde se detallan los resultados de los métodos de variación incremental de los coeficientes de flexibilidad, los resultados de los métodos probabilísticos con intervalos de muestreo adaptados y los resultados de los métodos probabilísticos automáticos con 15 y con 5000 realizaciones. En el segundo apartado se exponen los resultados de análisis modal experimental y finalmente se calculan los Mac Factor para determinar la bondad del ajuste

entre la forma modal experimental y la forma modal numérica de la configuración sin daño.

El sexto capítulo presenta los resultados del análisis de componentes principales. Se exponen los resultados del cálculo de los estimadores T^2 , Q y varianza acumulada.

En el séptimo capítulo se presentan los resultados del estudio del índice de daño. En el primer apartado se detallan los resultados según el método de las variaciones incrementales de las condiciones de contorno. En el siguiente apartado se muestran los resultados del método probabilístico automático; este apartado está formado por dos subapartados. El primer subapartado se ejecutan 15 realizaciones con el programa automático y en segundo subapartado se ejecutan 5000 realizaciones. En este último apartado se muestran las curvas de excedencia, se calculan los índices de daño medio y se detalla la relación entre las componentes principales y los índices de daño.

El capítulo octavo está dedicado a las conclusiones más importantes del estudio del índice de daño y del análisis de componentes principales. También se incluyen las conclusiones más relevantes del modelo numérico, modelo experimental, de la variación de la frecuencia con a temperatura y del análisis modal. Este capítulo se acaba indicando las futuras líneas de investigaciones propuestas.

2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presentan una serie de conceptos necesarios para el desarrollo de la investigación.

2.1 Espectro

Un objeto vibra cuando describe movimientos oscilatorios alrededor de la posición de equilibrio. El número de veces que completa el movimiento cíclico en segundos se conoce como la frecuencia (Hz). La frecuencia es la inversa del periodo. La Figura 2-1 muestra el gráfico de amplitud- tiempo conocido como dominio del tiempo.

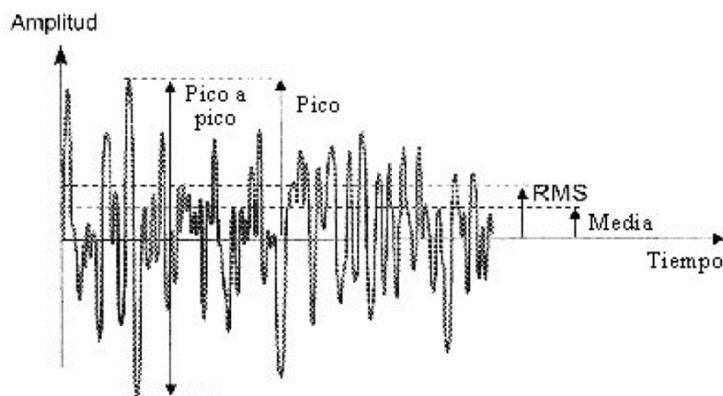


Figura 2-1 Gráfico de amplitud- tiempo o dominio del tiempo (Súnico, 2005)

La vibración puede estar formada por varias frecuencias. El procedimiento para obtener las señales de vibración en su componente individual de frecuencias es conocido como análisis frecuencial. El gráfico que muestra la amplitud de las vibraciones en función de las frecuencias se llama espectro. En la Figura 2-2 se muestra un espectro con 4 picos. En el dominio del tiempo no es posible ver las amplitudes y las frecuencias. Pero en el dominio de las frecuencias, el espectro de las aceleraciones muestra la energía concentrada alrededor de las frecuencias modales.

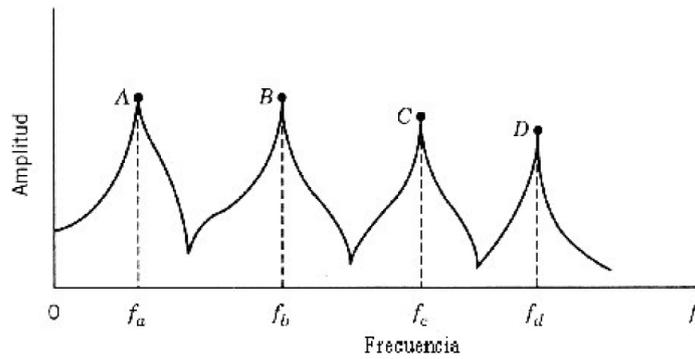


Figura 2-2 Gráfico de amplitud- frecuencia o dominio de frecuencia (Súnico, 2005)

Las características modales de la estructura están definidas por las frecuencias naturales o modales, coeficientes de atenuación y las formas modales. Las frecuencias naturales son frecuencias a las que la estructura tiende a vibrar al salir de su estado de equilibrio. Los coeficientes de atenuación son los cocientes entre la energía absorbida y la energía incidente en la estructura para cada frecuencia natural. Los modos de vibración son las formas características a las que vibra la estructura para cada frecuencia natural.

2.2 Análisis FFT, espacio temporal, espacio frecuencial

El algoritmo FFT se usa para realizar el análisis frecuencial. La Figura 2-3 es un diagrama de bloque para el análisis FFT. La transformada de Fourier se basa en el hecho de que cualquier función integrable de Lebesgue puede representarse mediante una serie de senos y cosenos (Súnico, 2005). El algoritmo FFT se aplica a señales digitalizadas por lo que siempre son integrables de Lebesgue. Lo importante es que la digitalización se realice correctamente por lo que antes de digitalizar las señales analógicas es muy importante pasarlas por un filtro antialiasing.

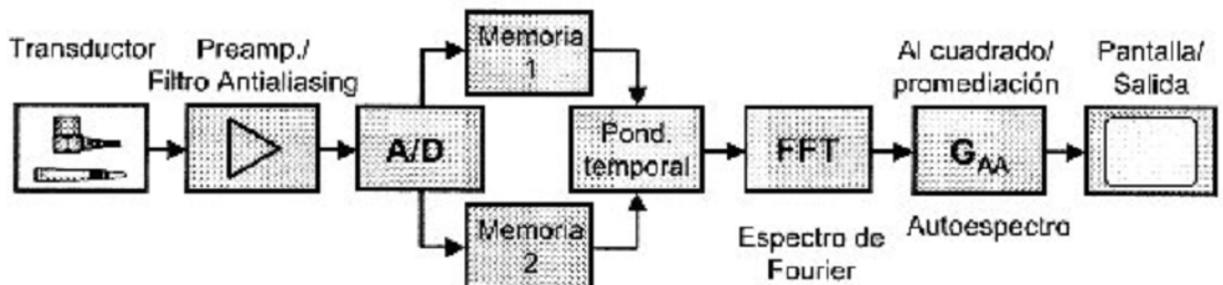


Figura 2-3 Diagrama del bloque de Fourier. (Súnico, 2005)

El análisis frecuencial permite obtener las amplitudes y fases individuales de una señal temporal a cada frecuencia. Un método analógico del análisis de frecuencias consiste en usar un filtro que únicamente deja pasar aquella parte de la vibración que está contenida en un estrecho rango de frecuencias. El ancho de banda del filtro utilizado se mueve continuamente a lo largo de todo el rango de interés para obtener niveles de vibración separados para cada banda de frecuencia. La transformada de Fourier es una operación matemática que transforma una señal digitalizada en el dominio de tiempo, a otra en el dominio de frecuencia y viceversa (Figura 2-4).

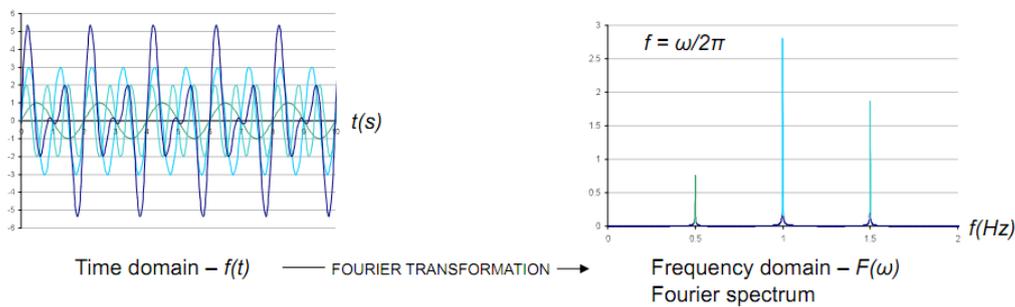


Figura 2-4 Transformada de Fourier desde el espacio tiempo hasta el espacio frecuencia (Pospisil, 2014)

La transformada de Fourier calcula los coeficientes espectrales a_n y b_n . Pero para una señal digital discreta, se utiliza la Discrete Fourier Transform (DFT). La versión discreta de la transformada se obtiene por las expresiones siguientes (Pospisil, 2014):

$$x_k = x(t_k) = a_0 \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}} \{a_i \cos [2it_k \pi/T] + b_i \sin [2it_k \pi/T]\} \quad (2-1)$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \quad (2-2)$$

$$a_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \{x_k \cos [2ik \pi/N]\} \quad (2-3)$$

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \{x_k \text{sen}[2ik \pi/N]\} \quad (2-4)$$

Donde N representa el número de muestras escogidas de una señal.

En este caso los coeficientes que se tienen que calcular son a_i y b_i . Si hay N muestras, el sistema de ecuaciones anterior se puede escribir en forma de matriz llamando X al vector de muestra, 'a' al vector de coeficientes a determinar, C a la matriz que contiene los armónicos (Pospisil, 2014).

$$X = Ca \text{ or } a = C^{-1}X \quad (2-5)$$

El método más usado para invertir la matriz C se llama Fast Fourier Transform (FFT).

Las amplitudes espectrales son:

$$X_n = \sqrt{(a_n^2 + b_n^2)} \quad (2-6)$$

Las fases angulares son:

$$V_n = \arctan\left(\frac{-b_n}{a_n}\right) \quad (2-7)$$

De hecho, por razones de estabilidad, FFT no se usa para evaluar un espectro. Se utiliza el auto espectro calculado como:

$$\overline{G_{aa}} = \overline{G_a^* G_a} \quad (2-8)$$

Donde G_a es la transformada de Fourier de una cara, 'a' es un canal y * es el complejo conjugado.

El Cross spectrum o espectro cruzado se calcula como:

$$\overline{G_{ab}} = \overline{G_a^* G_b} \quad (2-9)$$

Donde G_a es el conjugado de la transformada de Fourier del canal 'a' y G_b el de la transformada de Fourier del canal b. Entre otras cosas el espectro cruzado sirve para evaluar a cada frecuencia el desfase entre dos señales.

La coherencia mide la dependencia lineal entre dos señales. Se calcula como;

$$\gamma_{ab}^2 = \frac{G_{ab}^2}{G_{aa}G_{bb}} \quad (2-10)$$

La coherencia tiene valores entre cero y uno. Cuando la coherencia es igual a cero indica que no hay dependencia entre los inputs y los outputs, y es igual a la unidad cuando hay dependencia lineal entre ambos. La falta de coherencia existe por el comportamiento no lineal, no dependencia entre señales o presencia de una superposición de señales.

2.3 Análisis Modal

El análisis modal es un proceso que describe las propiedades dinámicas de las estructuras (en el régimen lineal) mediante los parámetros modales: frecuencias, atenuación y formas modales en el rango de la frecuencia interesada (Súnico, 2005). Todas las estructuras tienen frecuencias naturales y modos de vibración que dependen de las dimensiones, forma, masa y la rigidez de la estructura. En el diseño de estructuras es necesario identificar estas frecuencias y saber cómo una fuerza afecta a la respuesta de la estructura. El análisis modal es útil para describir, entender y modelizar el comportamiento de la estructura en el régimen lineal.

El análisis modal experimental estudia las estructuras mediante una monitorización del movimiento, cuando están sujetas a una excitación. Normalmente, el objetivo es validar y ajustar un modelo matemático del comportamiento dinámico de la estructura. El proceso consiste en la adquisición de los datos, el análisis y la determinación de parámetros dinámicos.

Los parámetros modales son muy importantes porque describen las propiedades inherentes de la estructura. El conocimiento de la atenuación modal es muy útil para predecir la fatiga de la estructura y reducir las amplitudes de la resonancia. En el test dinámico, se aplica una carga dinámica a la estructura. Esta carga tiene una energía con un cierto rango de frecuencias y la estructura responde a todas las frecuencias, pero las amplitudes espectrales serán mayores para aquellas frecuencias cercanas a la frecuencia de resonancia. La frecuencia de resonancia (f_r) es muy cercana a las frecuencias naturales (f_n) por lo que usualmente se confunden.

$$f_r = f_n \sqrt{1 - 2\xi^2} \text{ si } \xi < 0.5 \quad (2-11)$$

donde ξ es la atenuación.

La respuesta de la estructura será una superposición lineal de todos los modos de vibración excitados. Una propiedad importante de los modos vibración es que cualquier respuesta de la estructura se puede expresar como combinación lineal de una serie de modos de vibración.

Cada frecuencia de resonancia (pico en el dominio espectral) puede ser representada con un modelo físico de un grado de libertad. Este modelo consistirá en una masa puntual, soportado por un muelle sin masa conectado a un amortiguador. Aplicando la segunda ley de Newton al modelo físico, es posible hacer un modelo matemático que describe el comportamiento del sistema en el dominio temporal.

El espectro de respuesta frecuencial de un sistema mecánico tiene tantas frecuencias resonancias como grados de libertad del sistema. Las frecuencias modales se determinan observando la frecuencia de los picos del espectro de la respuesta del sistema. El amortiguamiento no es tan fácil de determinar, está relacionado con la anchura del pico de resonancia y suele medirse con un cierto grado de incertidumbre. El análisis modal tiene varios usos. Los más importantes se citan a continuación:

- Entender el comportamiento estructural bajo las acciones de fuerzas físicas.
- Medir las propiedades de la estructura para validar/ calibrar modelos analíticos. Cada vez más, los tests dinámicos se combinan con el análisis de elementos finitos con el objetivo de mejorar los modelos analíticos, a partir de los cuales los parámetros de las secciones, módulo de Young, pueden ser identificados....
- Para desarrollar un modelo que permita evaluar la respuesta definitiva del comportamiento de la estructura y por consiguiente pueda evaluar la respuesta para ciertas especificaciones del diseño.
- Control de la integridad de ciertas estructuras y sus comportamientos con el objetivo de detectar problemas y evitarlos. Es un campo que incrementa sus aplicaciones desde que las estructuras, como por ejemplo puentes, están sujetas a un incremento de cargas y se deterioran pasados los años.
- Comprobar las condiciones de las estructuras (aviones, naves espaciales, coches, raquetas de tenis...) y simulaciones del resto de prototipos.
- Predecir o simular la respuesta a excitaciones externas o como la estructura se comporta bajo diferentes condiciones de operación.

- Simular cambios en las características dinámicas, debido a parámetros físicos, o añadiendo una carga mayor o añadiendo una mayor rigidez en el sistema para obtener una propiedad deseada.
- Estimar las fuerzas que actúan en la estructura.

2.4 Mac Factor

El MAC Factor (Modal Assurance Criteron) se usa para cuantificar la bondad del ajuste de la forma modal de un modelo numérico respecto al experimental.

El MAC Factor se define como (Súnico, 2005):

$$MAC\{\psi_i^A, \psi_i^E\} = \frac{\{[\psi_i^A]^T[\psi_i^E]\}^2}{[\psi_i^A]^T[\psi_i^A][\psi_i^E]^T[\psi_i^E]} \quad (2-12)$$

donde ψ_i es la forma modal del modo i^{th} y las notaciones “A” y “E” representan los datos analíticos y experimentales respectivamente. En el caso de que las dos formas modales sean idénticas, el MAC Factor es igual a la unidad. Cualquier discrepancia de las formas modales generará un MAC Factor menor a 1. Generalmente está aceptado que para un valor superior a 0.9, el MAC Factor indica que las formas modales presentan un buen ajuste. Y los valores por debajo de 0.1 indican un ajuste muy deficiente. La función modal MAC Factor da una medida de la consistencia (grado de linealidad) entre los vectores modales estimados (Súnico, 2005).

2.5 Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (PCA) es un método de estadística multivariante también conocido como descomposición ortogonal. PCA se ha utilizado en estudios de dinámica estructural, análisis modal e identificación de parámetros o estimación de modelos de sistemas no lineales (Yan et al., 2005).

PCA es una técnica estadística que permite reducir las dimensiones de los datos (número de variables) sin perder información de los datos. Es decir, el PCA realiza una síntesis de la información. Las nuevas variables o componentes principales son una combinación lineal de las variables originales y son capaces de explicar los datos originales.

Sea X ($n \times k$ dimensión) la matriz de datos. La matriz de datos nuevos Z (componentes principales) se calcula como (Peña, 1994. Vol. 1 y 2):

$$Z = XA, \quad (2-13)$$

Donde A es una matriz cuadrada $k \times k$, donde las columnas de la matriz son los vectores propios de la matriz $X'X$ (matriz de covarianza).

La componente principal Z_i del valor propio λ_i es:

$$Z_i = Xa_i \quad (2-14)$$

Donde a_i es la columna i^{th} de la matriz A .

La covarianza y la varianza de la nueva variable se calculan como:

$$\text{Cov}(Z_i, Z_j) = a_j' X'X a_i = a_j' a_i = 0 \quad (2-15)$$

$$\text{Var}(Z_i) = \lambda_i \quad (2-16)$$

Normalmente, las componentes principales se ordenan desde la mayor varianza hasta la menor. Usando solo las primeras componentes principales, que explican la mayor parte del total de varianza, es suficiente para tener buenos resultados con un número menor de variables. En teoría, si todas las variables originales son linealmente dependientes entonces con solo una componente principal servirá para tener resultados exactos. La varianza explicada por la primera componente principal será del 100%. En la práctica, los datos tienen una incertidumbre que hace imposible la correlación perfecta. Si la variación de las variables es mayor que las incertidumbres de las medidas, la varianza introducida por el error de las medidas es muy baja y PCA resulta ser adecuado. Pero, en el caso opuesto, la varianza explicada por cada componente principal es en parte producida por la incertidumbre de la medición, entonces, la varianza explicada por las primeras componentes principales será más baja que la varianza prevista. De hecho, la varianza acumulada explicada por las componentes descartadas tiene que ajustar con la varianza prevista de los errores aleatorios. Por el contrario, si los errores son aleatorios entonces la cantidad de la varianza explicada por las componentes principales descartadas tiene que ser estadísticamente constante. Entonces, si se grafica la varianza acumulada con el número de componente principales, la curva presenta una inflexión desde el punto de la primera componente principal descartada, y la pendiente de la curva tiene que ser estadísticamente constante (Caselles et al., 2018).

2.5.1 Estimadores T^2 y Q

Dos estimadores basados en los componentes principales normalmente utilizados son T^2 y Q :

$$T_k^2 = \sum_{i=1}^r X_i P_k \lambda_k^{-1} P_k^t X_i^t \quad (2-17)$$

$$Q_k = \sum_{i=1}^r R_i R_i^t = \sum_{i=1}^r ((X_i - P_k P_k^t X_i^t)(X_i - P_k P_k^t X_i^t)^t) \quad (2-18)$$

Donde i es el número de componente principal usado, la matriz P ($k \times r$ dimensión) está formada por los r primeros vectores propios de la matriz $X'X$ (matriz de covarianza) en las columnas. La variable X es la matriz de los datos, λ_i son los valores propios de la matriz $X'X$. R es la matriz llamada matriz residual.

2.5.2 Interpretación geométrica

Las fórmulas 2-17 y 2-18 tiene una interpretación geométrica. El primer paso es definir el espacio creado por los r primeros vectores propios de la matriz $X'X$, en la Figura 2-5 este espacio es el plano Δ . El Segundo paso es calcular las proyecciones (XPP' , en rojo Figura 2-5) de la matriz X en el espacio (Δ) definido previamente. Estos pasos se repiten para $k=1, 2, \dots, r$, (una componente principal, dos componentes principales...).

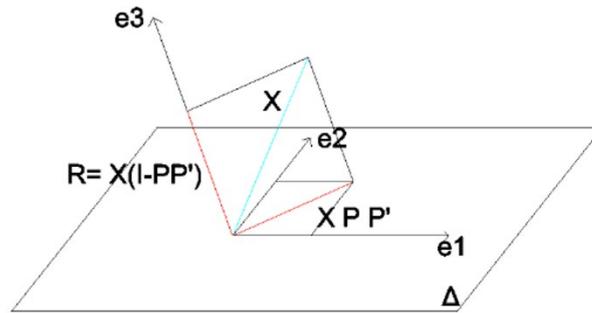


Figura 2-5 Interpretación geométrica de los estimadores Q (norma al cuadrado de diferencia entre el vector de los datos y su proyección en el plano (Δ)) y T^2 (norma al cuadrado de las proyecciones en el plano (Δ), ponderado por el inverso de los valores propios).

Finalmente, T^2 es la norma al cuadrado de las proyecciones en el plano (Δ), ponderado por el inverso de los valores propios.

Q es la norma al cuadrado del vector residual R . R es la diferencia entre el vector de los datos y su vector proyección en el espacio de los vectores de P (diferencia entre el vector X y el Vector XPP').

2.6 Índice de daño

El índice de daño (ID) en una estructura metálica compuesta por vigas y columnas está definido a partir del coeficiente de flexibilidad (Cf) asociado al giro de una sección en un nodo. Para ello, en primer lugar, se define el decremento del coeficiente de flexibilidad de una realización y el de referencia (en un nodo y toda la estructura).

1/ Decremento de Coeficiente de flexibilidad en una realización en un nodo (DCf):

DCf es el decremento del coeficiente de flexibilidad de una realización respecto el coeficiente de flexibilidad sin daño, en un nodo.

2/ Decremento de coeficiente de flexibilidad en toda la estructura, en una realización

(DCf(total)):

DCf(total) es la suma para todos los nodos, de todos los decrementos de coeficientes de flexibilidad DCf.

3/ Decremento del coeficiente de flexibilidad de referencia, en un nodo (DCf_{ref}):

DCf_{ref} es el decremento del coeficiente de flexibilidad sin daño respecto el coeficiente de flexibilidad mínimo, en un nodo.

4/ Decremento del coeficiente de flexibilidad de referencia en toda la estructura (DCf_{ref}(total)):

DCf_{ref}(total) es la suma para todos los nodos, de todos los decrementos de coeficientes de flexibilidad de referencia (DCf_{ref})

El índice de daño (ID) se define como:

$$ID = \frac{DCf(\text{total})}{DCf_{ref}(\text{total})} \quad (2-19)$$

En la presente tesis, juntamente con el índice de daño se medirá el decremento de frecuencia generado por un daño. De esta forma se podrá efectuar la gráfica índice de daño (ordenadas) vs decremento de frecuencia (abscisas).

2.7 Coeficiente de determinación R²

El coeficiente de determinación es la medida estadística de la bondad del ajuste o fiabilidad del modelo estimado de los datos. Se representa por R² e indica cuál es la proporción de la variación total en la variable dependiente (Y), que es explicada por el modelo estimado, es decir, mide la capacidad explicativa del modelo estimado. Se calcula como:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2-20)$$

Donde:

- (x₁, y₁), (x₂, y₂), ..., (x_n, y_n) un conjunto de valores observados de dimensión n. En la tesis x_i es el decremento de frecuencia e y_i índice de daño.
- y_i representa la variable dependiente de la realización (x_i, y_i).

- \hat{y}_i es la estimación en x_i según el modelo estadístico. ($\hat{y}_i=F(x_i)$). En la tesis el modelo estadístico es la regresión simple.
- \bar{y} es la media de los valores de $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$

Si el coeficiente de determinación es 1, el modelo explica el 100% del valor de la variable.

Si el valor es cero el modelo presenta una total indeterminación.

2.8 Norma del residuo NR

Otro estimador para determinar la calidad del ajuste del modelo de los datos (índice de daño y decremento de frecuencia en la tesis) es la norma de residuo NR.

La norma del residuo de un conjunto de valores observados se define como:

$$NR = \sqrt{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2-21)$$

Donde:

- $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ un conjunto de valores observados de dimensión n . En la tesis x_i es el decremento de frecuencia e y_i índice de daño.
- y_i representa la variable dependiente de la realización (x_i, y_i) . En la tesis es el índice de daño
- \hat{y}_i es la estimación en x_i según el modelo estadístico. ($\hat{y}_i=F(x_i)$). En la tesis el modelo estadístico es la regresión simple.
- Residuo = $y_i - \hat{y}_i$

2.9 Curvas de excedencia o fragilidad

En el contexto del presente trabajo, las curvas de fragilidad sirven para calcular la probabilidad de exceder un umbral de daño dado un cambio de la frecuencia fundamental de la estructura. Este umbral de daño se puede relacionar con distintos niveles de desempeño de la estructura estudiada.

La curva de excedencia para un decremento de frecuencia se calcula mediante la función acumulada de la distribución normal (ecuación en 2-22) donde μ representa la estimación de y_i según el ajuste (logarítmico) y σ es la desviación estándar de los residuos de la serie y_i (Canavos, 1987). Se asume que los valores residuales se distribuyen de forma normal alrededor del ajuste (regresión lineal o polinomio de tercer grado).

$$y=f(x|\mu,\sigma)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad 2-22$$

La rutina de MATLAB empleada para calcular la función cumulativa de probabilidad se denomina CDF.

El ajuste de las variables (x_i, y_i) es la regresión lineal porque es el modelo óptimo para patrones de variables con tendencia creciente. En el presente trabajo x_i es el decremento de frecuencia (DF) e y_i es el índice de daño (ID).

A continuación se detalla el método para representar la curva de fragilidad para el umbral 0.55 de los datos (DF_i, ID_i) . Primeramente se calcula la recta de regresión simple de los datos, en rojo en la Figura 2-6 (a). La recta de regresión sirve para estimar los ID que se utilizarán para la función de distribución normal acumulada F. Por ejemplo, el punto 1 y 2 a continuación:

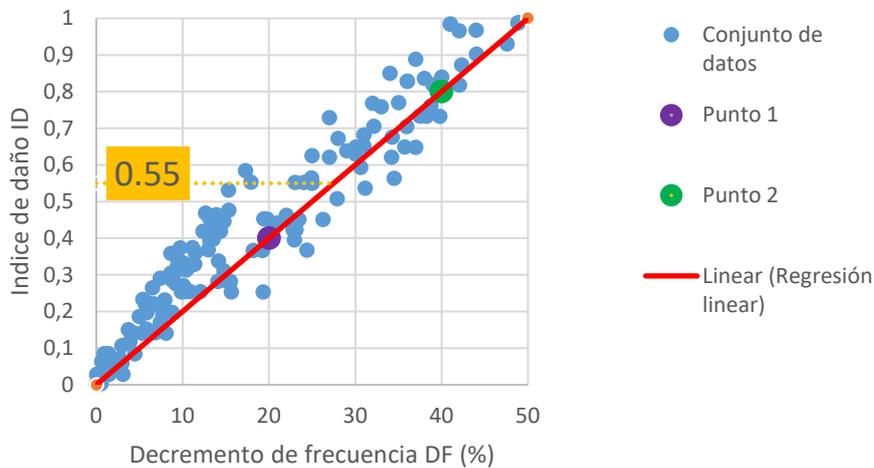
- Punto 1: Para un decremento de frecuencia $DF_1=20\%$, el índice de daño es $ID_1=0.40$ (Punto violeta)
- Punto 2: Para un decremento de frecuencia $DF_2=40\%$, el índice de daño es $ID_2=0.80$ (punto verde)

La curva de fragilidad que se representa es para un umbral de excedencia del 0.55 marcado en naranja en la gráfica.

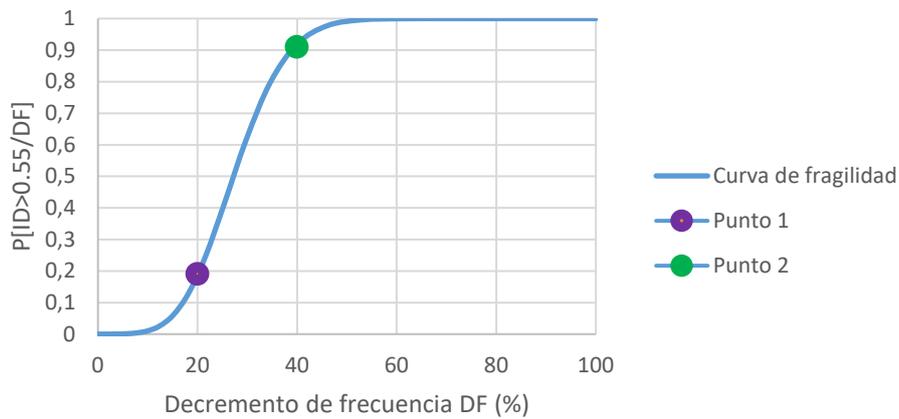
A continuación, se detalla el cálculo de los puntos 1 y 2 en la curva de fragilidad:

- Punto 1: Para $DF_1=20\%$, $p_1=0.19$ es el valor de la probabilidad de excedencia del 0.55 para DF_1 , es decir, $1-F(0.55)$ siendo F la función de distribución normal acumulada de media 0.4 (punto violeta en Figura 2-6(b)).
- Punto 2: para $DF_2=40\%$, $p_2=0.91$ es el valor de la probabilidad de excedencia del 0.55 para DF_2 , es decir, $1-F(0.55)$ siendo F la función de distribución normal acumulada de media 0.80 (punto verde en Figura 2-6(b)).

La curva de fragilidad para el umbral 0.55 está representada en la Figura 2-6 (b) con los dos puntos calculados (verde y violeta).



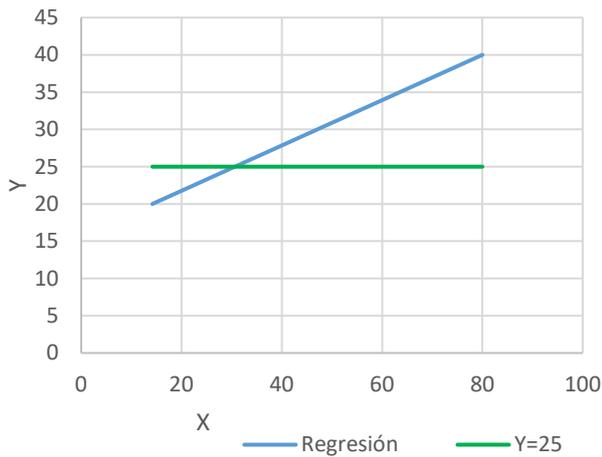
(a)



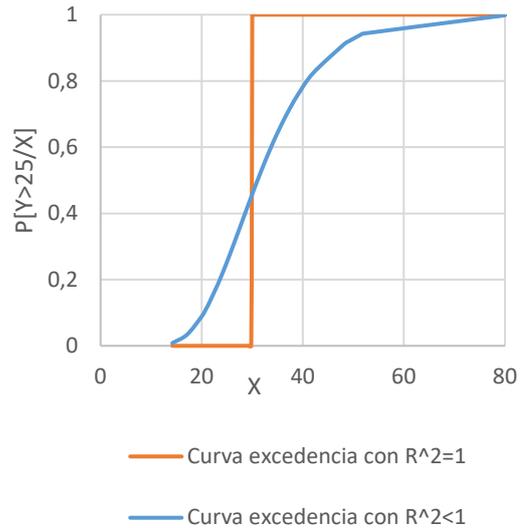
(b)

Figura 2-6 (a) Conjunto de realizaciones (azul) y recta de regresión (rojo) y puntos 1 y 2. (b) Curva de fragilidad o de excedencia (azul) y puntos 1 y 2.

En el caso de tener una muestra de datos con $R^2=1$ y con residuos igual a cero, la curva de fragilidad o excedencia es una función escalonada. Pero en la realidad, el valor de R^2 es inferior a 1 y los residuos siguen una distribución normal. En este caso la curva de fragilidad no es una función escalonada sino una curva con la forma de la curva azul en la Figura 2-7(b).



(a)



(b)

Figura 2-7 (a) Recta de regresión (azul) y recta de $Y=25$ (verde). (b) Curva de excedencia para $R^2=1$ en rojo (función escalonada). En azul la curva de excedencia para $R^2<1$.

A modo de ejemplo, se suponen dos tipos de datos (X_i, Y_i) con dos coeficientes de determinación: $R^2=1$ y $R^2<1$ pero con una misma recta de regresión (azul en la Figura 2-7 (a)). En el caso de $R^2=1$, los valores de la norma de residuos es cero puesto que en este caso los datos están en la recta. Pero en el caso de $R^2<1$, la norma de los residuos es diferente de cero y se supone que siguen una distribución normal.

En el caso de $R^2=1$, la probabilidad de excedencia $Y_0=25$, es 0 cuando $X<30$. Pero la probabilidad de excedencia es 1 cuando $X>30$. La curva de excedencia es la función escalonada en $X=30$, (en rojo en la Figura 2-7(b)).

En el caso de $R^2<1$, los residuos son diferentes de 0 luego la curva no es una función escalonada y está representada de color azul en la Figura 2-7(b).

2.10 Índice de daño medio

Este índice es un ponderado de los distintos estados de daño, puede verse como un grado de daño medio que representa el estado global de la estructura.

El índice de daño medio se define según la fórmula:

$$\text{Índice daño medio} = (\sum_{i=0}^n P(d_i) i) / n \quad (2-23)$$

En donde $P(d_i)$ es la probabilidad de que ocurra un estado de daño para un decremento de frecuencia dado. Este índice se calcula mediante las curvas de fragilidad o excedencia. El índice d_i indica el estado de daño, por ejemplo: Nulo ($i=0$), ligero ($i=1$), moderado ($i=2$), severo ($i=3$), completo ($i=4$) y colapso ($i=5$).

3 PROCEDIMIENTOS

Este capítulo detalla los procedimientos realizados en el presente trabajo. En el primer apartado (3.1), se describe las características, la monitorización de la estructura con los acelerómetros y la generación de los daños en la estructura. A continuación, se expone la metodología de los ensayos experimentales para el análisis de la variación de frecuencia. En el segundo apartado (3.2), se detalla el análisis modal, en donde se busca calibrar/validar el modelo numérico con el modelo experimental. En el tercer apartado (3.3), se describe el procedimiento del análisis de componentes principales. Finalmente, en el cuarto apartado (3.4), se expone el procedimiento para el análisis del índice de daño de la estructura.

3.1 Experimentos de la variación de frecuencia según la temperatura

En este apartado se describen los ensayos experimentales basados en la variación frecuencial debido a la variación de temperatura. En el primer subapartado se muestra la estructura y la metodología del experimento. En el segundo subapartado se precisa la posición de los acelerómetros en la estructura. En el cuarto subapartado se detallan los ensayos experimentales según la variación de la temperatura. Finalmente, en el quinto subapartado se expone el procedimiento sobre la variación frecuencial de los ensayos experimentales.

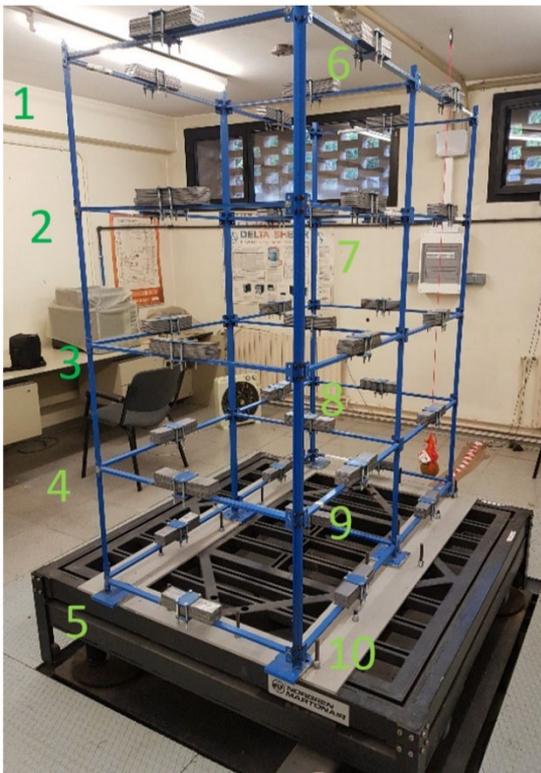
3.1.1 La estructura y metodología del experimento

En esta tesis se ha utilizado una estructura metálica de planta rectangular y marcos (uno transversal y dos longitudinales) compuestos por 6 columnas y 35 barras de acero (Figura 3-1 y Figura 3-2). Las columnas son perfiles en L de medidas 20mm x 20mm x 2mm y las vigas son rectangulares de 20 x 10mm. Los marcos longitudinales tienen una longitud total de 72 cm y el marco transversal de 77 cm. La altura entre vigas es de 40 cm habiendo 4 pisos en total. Cada viga tiene en el centro una masa de aproximadamente 4.5 kg. Esta masa está formada por 8 láminas de plomo de 200mm x 50mm x 4mm conectadas con una placa de 4 tornillos. Esta estructura fue diseñada para la investigación de la tesis doctoral de Foti (1999) que versaba sobre el estudio de su comportamiento dinámico con disipadores de energía instalados en la rigidización de las diagonales. La Figura 3-2 muestra la orientación de la estructura según los ejes X, Y, Z y la numeración de las caras, indicando el sentido longitudinal y transversal. También incluye un detalle del peso añadido en una barra. La Tabla 3-1 muestra las características mecánicas más importantes de la estructura.

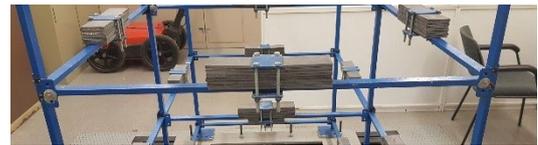
Tabla 3-1 Características principales de la estructura (Foti y Canas, 1999)

| Características estructurales de los elementos | | | |
|--|---------------------------------|----------------------------|----------------------|
| Elemento | Área sección (cm ²) | Inercia (cm ²) | Peso sección (Kg/cm) |
| Columna | 0.76 | 0.288 | 0.0059 |
| Viga | 2.00 | 0.167 | 0.0157 |

La excitación de la estructura se realizó con un impacto de una bola de 2 kg en la base, soporte negro de la estructura en la Figura 3-1. El impacto se realiza para cada experimento con un rango de temperaturas diferentes controladas con una calefacción central y con una máquina de aire acondicionado. La temperatura se varió entre 30.6°C para la temperatura máxima y 20.2°C para la temperatura mínima.



a)



b)

Figura 3-1 a) Estructura metálica indicando el número de los nodos en verde. b) Peso añadido en el centro de las barras y bola de 2 kg para el impacto en la base.

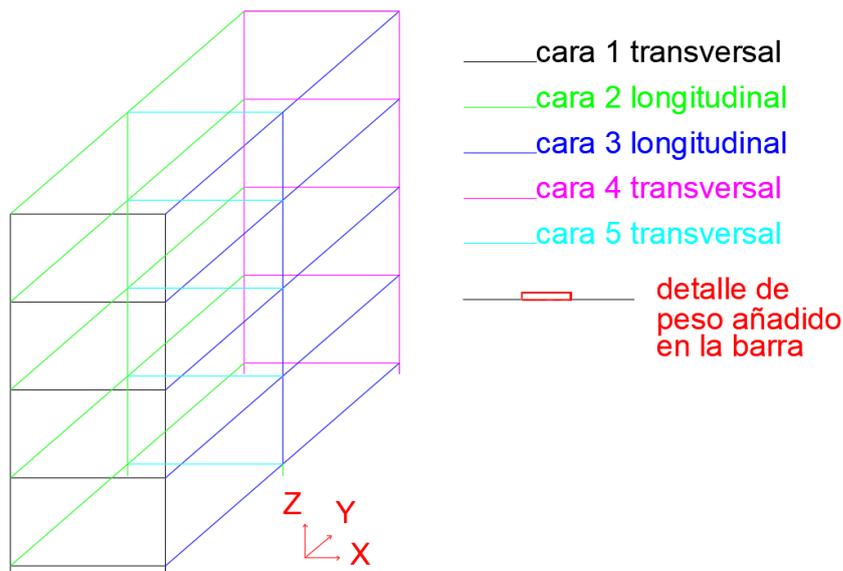


Figura 3-2 Perspectiva de la geometría de la estructura. Se indica el sentido de los ejes X, Y, Z, el número de las caras transversales y longitudinales.

La metodología del experimento consiste en generar diez impactos en la estructura a una temperatura fija. Al terminar el primer test, la temperatura se incrementa o se disminuye con el objetivo de realizar el mismo impacto a una temperatura diferente. El impacto se produce con una bola de 2 kg en la base de la estructura en la cara 4 (Figura 3-3) soltada desde el mismo punto en todos los tests. El movimiento de los nodos se monitoriza con acelerómetros en la cara 1 (Figura 3-3 y Figura 3-4). El impacto es constante para todos los tests. El procedimiento se realiza para 5 tipos de condiciones en la estructura. El primer test se realiza con la estructura sin daño y los otros cuatro tests con diferentes daños en los nodos de la cara 1. Cada uno de los tests se realiza con un rango de temperaturas diferentes. El procedimiento para la realización de los tests es con un impacto cada minuto durante 10 minutos. Es decir, en total se realizan 10 impactos. Con esta separación temporal de un minuto se garantiza que la estructura alcance un estado próximo al reposo entre impactos y así se consigue, que los impactos sean independientes entre sí y no haya interferencias en las medidas de los acelerómetros y evitar problemas de aliasing.

Durante el experimento, la temperatura se ha controlado con un termómetro a pie de estructura. Pero con el objetivo de medir la temperatura de la estructura se ha utilizado una cámara termográfica.

Las vigas están unidas a las columnas mediante unas uniones en los nodos con dos tornillos en los extremos de la barra y en posición vertical. Las columnas son una barra continua en forma de L desde la base hasta la parte más alta.

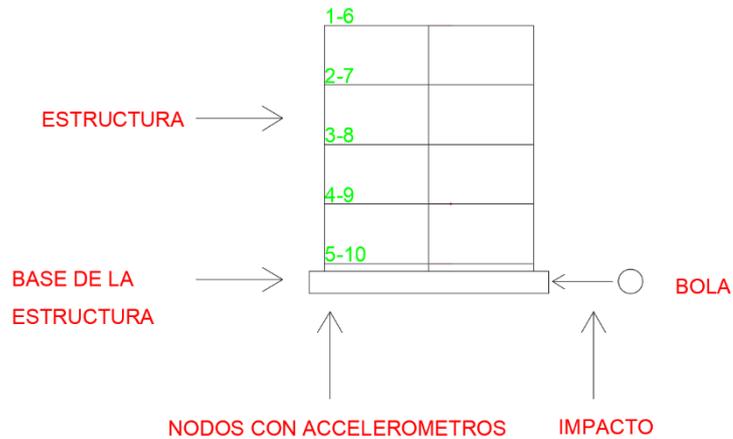


Figura 3-3 Esquema de la estructura metálica indicando el impacto y la posición relativa de los acelerómetros.

3.1.2 Los acelerómetros

Los acelerómetros se han situados en los nodos 1, 2, 3, 4, 5, 6 representados en verde en la Figura 3-4. La dirección de la flecha indica la dirección positiva del registro de la aceleración. En la dirección longitudinal, según el eje X, de color azul en la Figura 3-4, se colocan los acelerómetros 1, 4, 6, 8, 10 y 12. Mientras que, en la dirección transversal, según el eje Y, de color rojo en la Figura 3-4 se colocan los acelerómetros 2, 3, 5, 7, 9 y 11.



(a)

(b)

Figura 3-4 a) Estructura metálica del modelo experimental indicando el acelerómetro longitudinal (azul) y transversal (rojo). b) Alzados de la estructura indicando la numeración de los nodos (verde) y la numeración de los acelerómetros longitudinales (azul) y transversales (rojo).

3.1.3 Daños

La variación de temperatura se ha estudiado según 5 configuraciones: una configuración sin daño y cuatro configuraciones con daños. Se introduce un daño incremental desde el test 1 sin daño hasta el test 5 con daño alto en 4 nodos. A continuación, se detalla las configuraciones:

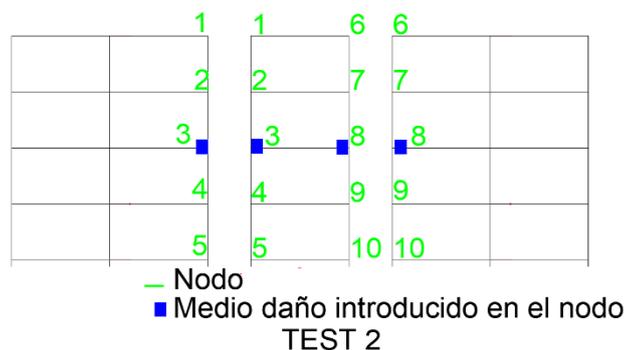


Figura 3-5 Test 2. Daño medio en dos conexiones: nodo 3 y 8 en las barras longitudinales y transversales.

Test 1: Estructura sin daño. En este test todos los tornillos de la estructura se fijan con un par de apriete 5.1 N·m.

Test 2: Daño medio en dos nodos. En este test la estructura tiene un daño medio en dos nodos de la estructura. El par de apriete se fija en 2.5 N·m en los nodos 3 y 8. El par de apriete se aplica en las dos barras concurrentes en sentido transversal y longitudinal de los nodos (Figura 3-5).

Test 3: Daño alto en dos nodos de la estructura. En este test, la estructura tiene un daño alto en dos nodos. El par de apriete se fija en 0 N·m en los nodos 3 y 8. El par de apriete se aplica en las dos barras concurrentes en sentido transversal y longitudinal de los nodos (Figura 3-6).

Test 4: Daño alto en tres nodos de la estructura. En este test la estructura tiene un daño alto en tres nodos. El par de apriete se fija en 0 N·m en los nodos 2, 3 y 8. El par de apriete se aplica en las dos barras concurrentes en sentido transversal y longitudinal de los nodos (Figura 3-7).

Test 5: Daño alto en cuatro nodos de la estructura. En este test la estructura tiene un daño alto en cuatro nodos. El par de apriete se fija en 0 N·m en los nodos 2, 3, 7 y 8. El par de apriete se aplica en las dos barras concurrentes en sentido transversal y longitudinal de los nodos (Figura 3-8).

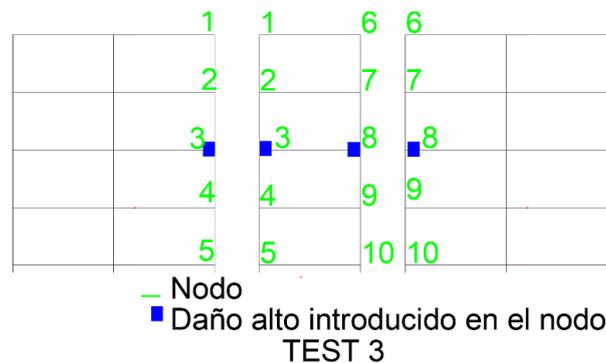


Figura 3-6 Test 3. Daño alto en dos conexiones, nodo 3 y nodo 8. En las barras transversales y en las barras longitudinales.

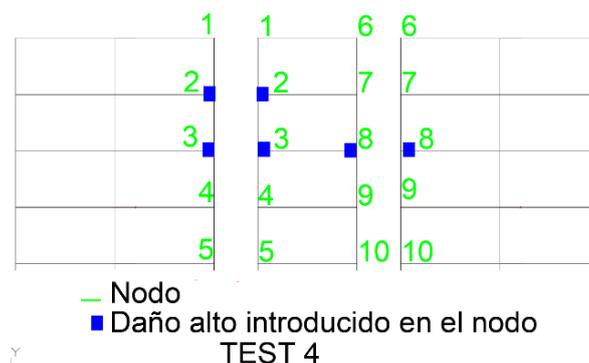


Figura 3-7 Test 4. Daño alto en tres conexiones, nodos 3, 8 y 2. En las barras transversales y en las barras longitudinales.

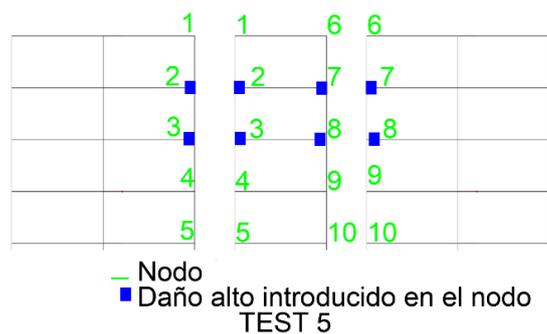


Figura 3-8 Test 5. Daño alto en 4 conexiones, nodos 3, 8, 2 y 7. En las barras transversales y en las barras longitudinales.

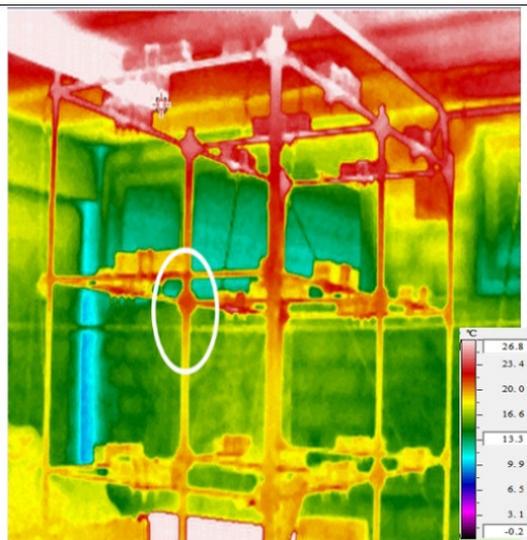
3.1.4 Análisis de variaciones de temperatura

Para cada test, la temperatura se varía y, mediante una cámara termográfica, se mide la temperatura de la estructura. La Tabla 3-2 muestra los diferentes rangos de temperatura de la estructura para cada test. Para obtener las temperaturas, las termografías se procesaron con el programa INFREC ANALYSER. En cada test, se aumenta la temperatura con la ayuda de estufas y se disminuye la temperatura con la ayuda del aire acondicionado.

Tabla 3-2 Rango de temperaturas en los 5 tests.

| Temperaturas (°C) | | Temperaturas (°C) | |
|-------------------|-------------|-------------------|-------------|
| TEST 1 | 20.5 a 30.6 | TEST 4 | 19.0 a 28.5 |
| TEST 2 | 19.4 a 29.5 | TEST 5 | 19.2 a 29.1 |
| TEST 3 | 19.9 a 29.9 | | |

La Figura 3-9 muestra la foto realizada con la cámara termográfica y también se muestran las estufas y radiadores para realizar el calentamiento. Se puede apreciar que la distribución de la temperatura no es uniforme a lo largo de la estructura. La temperatura en la parte inferior es más baja y en la parte superior la estructura tiene una temperatura mayor. El punto seleccionado para medir la temperatura fue el mismo en todos los tests y ensayos. Es un punto intermedio, tal como se indica en el círculo blanco en la fotografía de la cámara termográfica de la Figura 3-9a. La temperatura seleccionada en el ejemplo es 20.5°C.



a)



b)

Figura 3-9 a) Foto con la cámara termográfica. En blanco se indica el nodo donde se ha tomado la temperatura de la estructura. b) Estufa y radiador para controlar la temperatura.

3.1.5 Análisis de la variación frecuencial según la temperatura

En esta sección se presentan el autoespectro para analizar los datos y se detalla el Pick-Picking que se realiza en el autoespectro.

3.1.5.1 El autoespectro

Este apartado presenta la metodología de la variación de frecuencia con la temperatura para la obtención de resultados. Primeramente, el tratamiento de los datos de los acelerómetros se ha realizado con un software propio en MATLAB. El programa ha tomado como datos las aceleraciones en el espacio temporal. A continuación, se ha calculado la densidad de energía espectral promediando las 10 ventanas para cada canal en cada test. Los resultados del programa se presentan en la Figura 3-10 (autoespectro) para el experimento del Test 1, con fecha 24-07-2019 a las 16:59 y temperatura de 20.5°C. Los dos últimos gráficos muestran la densidad de energía espectral (ESD) de los canales 1 y 2. En estos dos gráficos se ha remarcado, en rojo, el pico del segundo modo (2.70Hz). El segundo gráfico muestra la coherencia entre los dos canales. Para el pico 2.70 Hz (modo 2) la coherencia es 0.9955 (en rojo), lo que indica una gran dependencia lineal entre ambos, es decir, el pico está generado por el mismo efecto. Finalmente, el primer gráfico en la Figura 3-10 indica la fase del cross-espectro para una determinada frecuencia. La fase entre el primer y segundo canal es de -3,07 rad (en rojo), luego, el

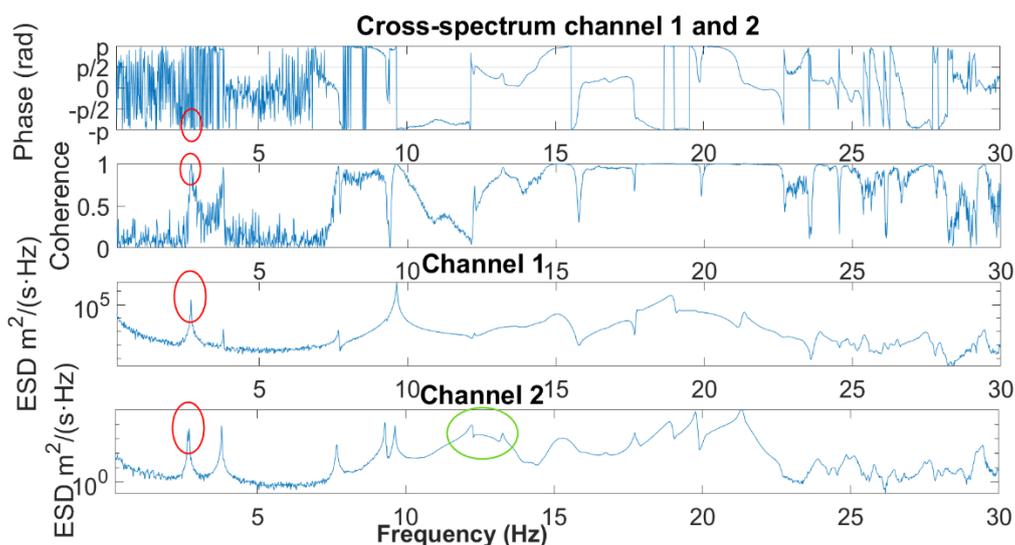


Figura 3-10. Fase del espectro cruzado de los canales 1 y 2. Coherencia entre los canales 1 y 2. Auto espectro del canal 1. Auto espectro del canal 2. Los datos son del test del día 24-07-2019 para una estructura no dañada.

desplazamiento del nodo está en una dirección entre el cuadrante (X)(-Y) y (-X)(Y) según la Figura 3-11. La forma de algunos picos del ESD y una bajada de la coherencia indican que el modelo tiene un comportamiento no lineal (en verde en la Figura 3-10). La forma de la curva es diferente al pico de la frecuencia 2.70 Hz que tiene una forma más aguda y simétrica.

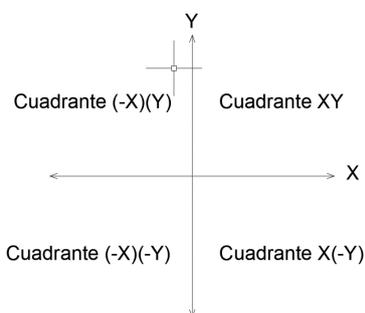


Figura 3-11 Cuadrantes de las fases del movimiento.

3.1.5.2 El Pick-Picking y el patrón de frecuencias

Los espectros de densidad de energía (ESD), en los diferentes canales, presentan patrones similares en la forma de picos. La Figura 3-12 representa el espectro de los canales 1 y 2. Cada pico representa una frecuencia de resonancia. Las líneas rojas verticales indican la coincidencia en frecuencia de los picos entre las dos gráficas. Se puede observar que los

dos ESD presentan las mismas frecuencias o patrón de frecuencias. Estas frecuencias se ordenan de mayor a menor para cada uno de los tests de temperaturas.

En el ejemplo de la Figura 3-12 se señala el patrón similar de los modos, desde el 1 hasta el 13, para los canales 1 y 2. También cabe señalar que el modo 1 y el 5 solo se ve en los canales transversales. Finalmente, desde el modo 13 hasta el final, las frecuencias son irregulares y no lineales por lo que es muy difícil encontrar un patrón.

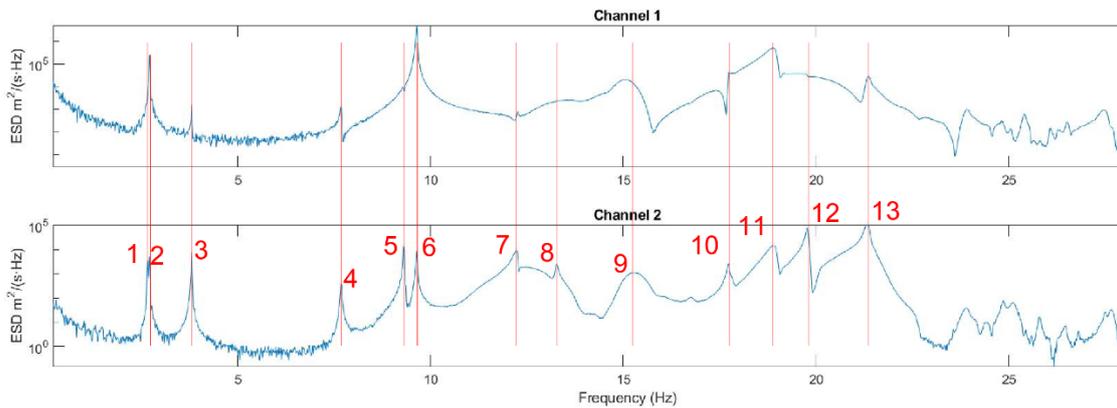


Figura 3-12 Comparación de frecuencias de los espectros de los canales 1 y 2 para el test con fecha 24-07-2019 en una estructura sin daño (test1).

3.2 Procedimientos del análisis modal

El análisis modal se utiliza para ajustar las variables del modelo numérico a los datos experimentales.

En primer lugar, en el subapartado 3.2.1, se describe el modelo numérico y las condiciones de contorno que se utilizan para calibrar/validar el modelo. En los dos subapartados posteriores (3.2.2 y 3.2.3) se detallan los procesos para ajustar el modelo numérico a los cinco test experimentales descritos en (3.1.3).

Una vez ajustado el modelo de la configuración sin daño, en el subapartado 3.2.4, se determina el MAC Factor entre los resultados experimentales y los resultados numéricos con el objetivo de verificar la correlación entre ambos. Para lograr estos objetivos, en este subapartado las frecuencias y amplitudes (desplazamientos en los nodos) del modelo numérico sin daño se han obtenido mediante el programa ETABS y las amplitudes (densidad de energía espectral, ESD) del modelo experimental sin daño se han calculado mediante un programa desarrollado en Matlab.

3.2.1 Análisis modal numérico

En este apartado se realiza una descripción del modelo numérico y se detallan las condiciones de contorno que se han utilizado para calibrar/validar el modelo.

3.2.1.1 Descripción del modelo estructural

El análisis modal numérico se ha realizado con el programa de estructuras ETABS. Esta herramienta es muy útil para modelar la estructura metálica objeto de estudio. La Figura 3-13 muestra un esquema de la estructura modelada en el programa. La base de la estructura se ha considerado empotrada tal y como se representa en las condiciones de contorno del modelo. Las barras están orientadas según los ejes locales tal y como se muestra en la Figura 3-13 (color rojo, verde, y azul). Los ejes globales de la estructura pueden verse en esta figura en el punto inferior derecho; el eje X es de color rojo, el eje Y es de color verde y el eje Z es de color azul.

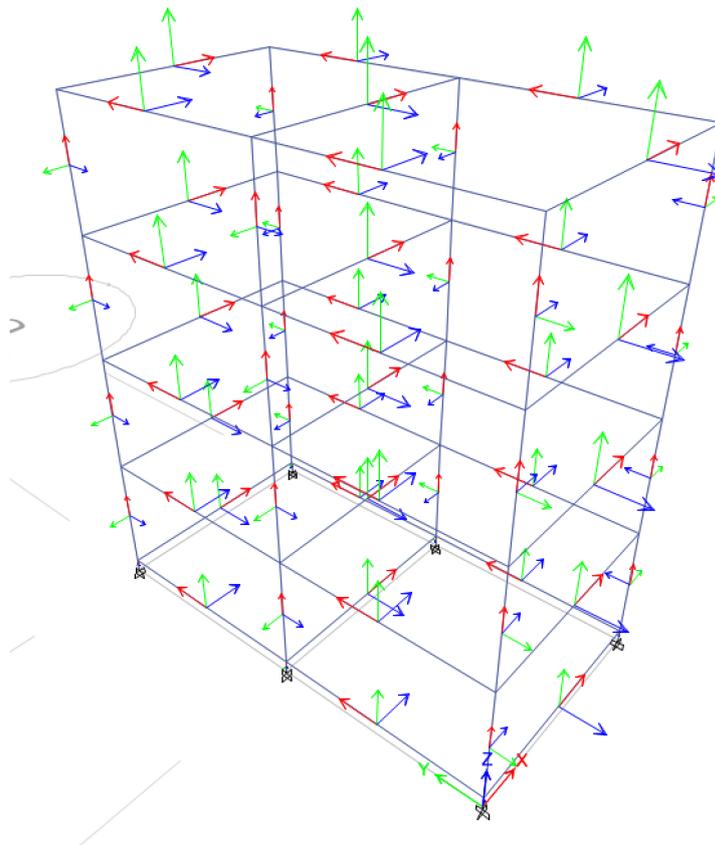
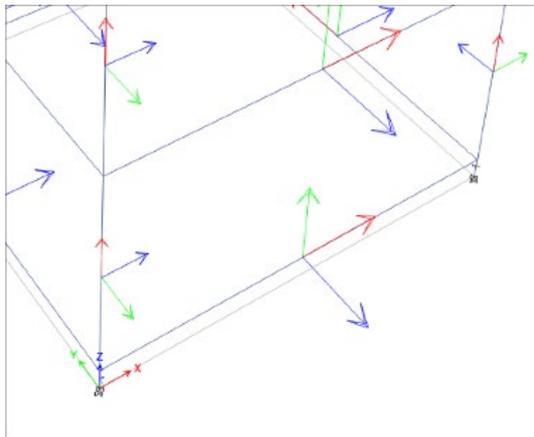


Figura 3-13 Modelización numérica de la estructura en ETABS. En el centro de la barras se muestran los ejes locales (X: rojo, Y: verde, Z: azul) y los ejes globales de la estructura en el punto inferior de la estructura.

3.2.1.2 Condiciones de contorno del modelo

El primer paso consiste en determinar cuáles son las características de la modelización de la estructura que influyen principalmente en su respuesta. A continuación, se detallan los parámetros del programa ETABS para aproximar el modelo numérico con el experimental.

a/ La condición de contorno en la base de las 6 columnas es un empotramiento. En la Figura 3-14(a) se presentan las condiciones de contorno de la base de la estructura en el programa ETABS. Las chapas base del anclaje de las columnas están soldadas a la base fija (Figura 3-14 (b)).



a)

b)

Figura 3-14 a) Condiciones de contorno en los soportes de las columnas con empotramiento según el programa numérico del ETABS . b) Condiciones de contorno en la base de las columnas del modelo experimental. La base de las columnas están soldadas en la base.

b/ En los nodos de los extremos de los elementos que representan las vigas se han variado los coeficientes de flexibilidad (C_{fn}) asociados al giro C_{f2} y C_{f3} , con el objetivo de ajustar las frecuencias numéricas y experimentales. La Figura 3-15 muestra en línea

discontinua la barra 38, la cual conecta los nodos 3 y 8. En la realidad, la unión de las vigas y las columnas se logra mediante dos tornillos en posición vertical que atraviesan al elemento vertical (la columna).

La variación de presión en el apriete de los tornillos en la unión entre la viga y la columna puede simularse en el modelo numérico modificando los coeficientes de flexibilidad asociados al giro en los nodos según la dirección vertical (Cf2) y la dirección perpendicular a la cara (Cf3).

La Figura 3-15 muestra las direcciones de los coeficientes de flexibilidad asociados a los giros. En azul la dirección Cf3, en verde la dirección Cf2 y en rojo la dirección Cf1 (torsión de la barra). Los dos tornillos de la unión en posición vertical bloquean la torsión de la barra y, por tanto, se asume que el cambio en Cf1 es despreciable.

Los coeficientes de flexibilidad de la estructura se ordenan en forma de matriz de dimensión 35×4 . Cada línea corresponde con una barra, con un total de 35 líneas producto de los 7 pórticos (4 longitudinales y 3 transversales) y las 5 plantas. Las 4 columnas de la matriz es el producto de los 2 coeficientes de flexibilidad (Cf2, Cf3) en los 2 nodos de la barra. Esta matriz se llama matriz de las condiciones de contorno del modelo. La Tabla 3-3 muestra la asignación del número de la barra (línea de la matriz) con la posición en la estructura (según las caras de la Figura 3-2).

Tabla 3-3 Posición de las barras de la estructura (líneas de matriz de condiciones de contorno)

| Cara de la estructura | línea de matriz o barra (en sentido descendente de la cara) |
|------------------------------|--|
| Cara 1 | 3, 10, 17, 24, 31 |
| Cara 2 (lado 4) | 6, 13, 20, 27, 34 |
| Cara 2 (lado 1) | 7, 14, 21, 28, 35 |
| Cara 3 (lado 4) | 4, 11, 18, 25, 32 |
| Cara 3 (lado 1) | 5, 12, 19, 26, 33 |
| Cara 4: | 1, 8, 15, 22, 29 |
| Cara 5 | 2, 9, 16, 23, 30 |

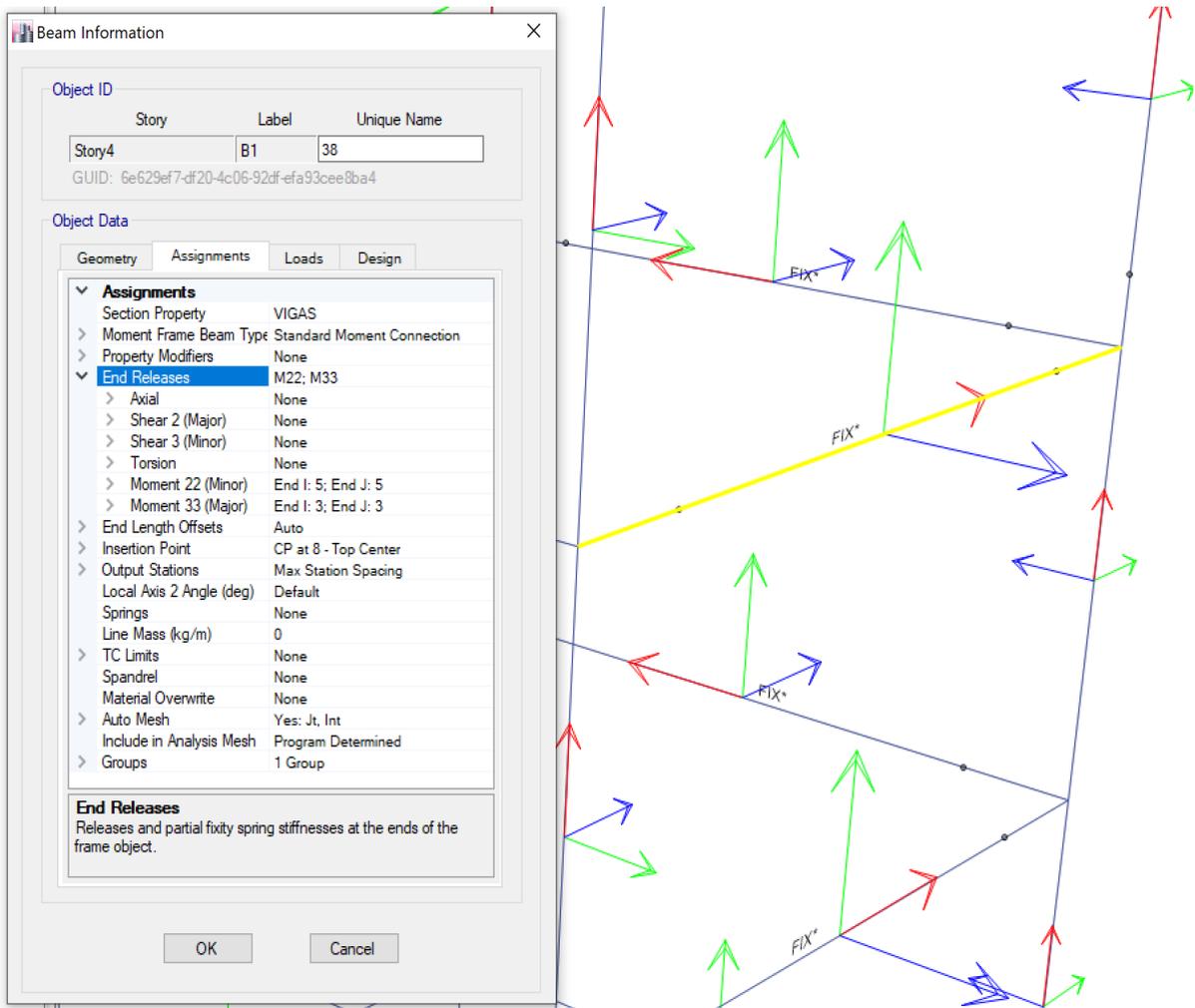


Figura 3-15 Esquema de las condiciones de contorno en los nodos extremos de las barras del programa numérico ETABS: en azul el coeficiente de flexibilidad según el eje 3 y en verde el coeficiente de flexibilidad según el eje 2.

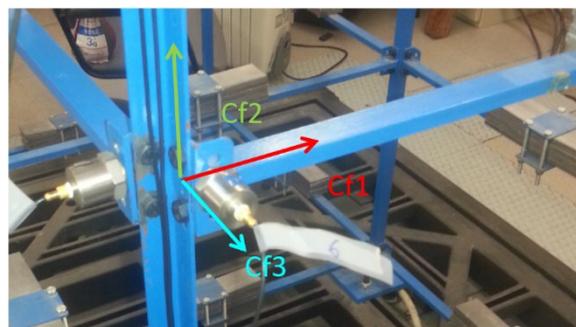


Figura 3-16 Condiciones de contorno en los nodos: coeficiente de flexibilidad Cf2 según el eje 2 (en verde), coeficiente de flexibilidad Cf3 según el eje 3 (en azul) y coeficiente de flexibilidad Cf1 según el eje 1 (en rojo).

3.2.2 Ajuste del modelo numérico sin daño, test 1

Este apartado detalla varios enfoques sobre la variación de las condiciones de contorno para encontrar la mejor aproximación del modelo numérico al test 1 experimental (sin daño).

El primer apartado 3.2.2.1 expone los métodos de variaciones incrementales en las condiciones de contorno para determinar la mejor solución. En este apartado se examinan los parámetros de la configuración inicial o sin daño.

Posteriormente, el apartado 3.2.2.2 presenta el primer método probabilístico que consiste en variar las condiciones de contorno según una función de densidad probabilidad uniforme en intervalos de muestreo adaptados para encontrar la mejor solución. Este método inicialmente se ha probado de forma ‘manual’, sin embargo, para obtener los resultados que se presentan en los siguientes apartados se diseñó un programa que genera automáticamente condiciones de contorno. De esta manera, en el apartado 3.2.2.3.1, con el programa automático se efectúan 15 realizaciones del proceso aleatorio mientras que en el apartado 3.2.2.3.2 se efectúan 5000 realizaciones con el programa.

La mejor aproximación de las realizaciones se encuentra minimizando el error entre la configuración experimental y la configuración numérica de la realización.

El error de la frecuencia se define según la fórmula:

$$\text{Error frec (i; j)} = \frac{\text{Frecuencia experimental(i)} - \text{Frecuencia numérica(i;j)}}{\text{Frecuencia experimental(i)}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (3-1)$$

Donde i es el número de modo (de 1 a 6 y la media) y j es el número de la realización.

3.2.2.1 Métodos con variaciones incrementales de las condiciones de contorno

En el primer apartado (3.2.2.1.1) se analiza la variación de las frecuencias debido a variaciones incrementales de los coeficientes Cf2 y Cf3, buscando obtener así una configuración inicial de las frecuencias para el modelo sin daño. En los apartados siguientes (3.2.2.1.2 y 3.2.2.1.3) se busca la mejor aproximación del modelo modificando las condiciones de contorno en los nodos de forma no homogénea y por caras.

3.2.2.1.1 Variaciones incrementales según el coeficiente de flexibilidad Cf2 y Cf3

En este apartado se ha estudiado la evolución de las frecuencias en dos etapas. En primer lugar se ha variado Cf3 incrementalmente mientras Cf2 se ha dejado fijo. En la segunda

etapa se ha variado incrementalmente Cf2 mientras Cf3 se ha dejado fijo. La Tabla 3-4 resume los valores de la variación de las condiciones de contorno de las dos etapas.

En cada realización se han calculado las frecuencias 1, 2, 3, 4, 5, 6 y su media con el programa ETABS; también se ha calculado el error de las frecuencias para cada modo definido en la fórmula 3-1.

Finalmente, en la sección de resultados 5.1.1.1 se ha trazado la curva de la media de los errores de las frecuencias numéricas vs los coeficientes de flexibilidad (Cf2 y Cf3) para encontrar el error mínimo. Las condiciones de contorno de la solución representan la configuración inicial o sin daño.

Tabla 3-4 Resumen de los valores incrementales de Cf2 y Cf3 de las dos etapas.

| Estudio | Intervalo de Cfn variable | Cfn constante |
|----------|---|-----------------|
| Etapa 1: | Variación incremental de Cf3 entre 1 KN·m/rad y 10 KN·m/rad | Cf2=20 KN·m/rad |
| Etapa 2: | Variación incremental de Cf2 entre 2 KN·m/rad y 35 KN·m/rad | Cf3=3 KN·m/rad |

Una vez determinada la configuración inicial, se estudia la estabilidad de las frecuencias haciendo variaciones incrementales por separado en Cf2 y Cf3 según los valores de la Tabla 3-5. En cada realización se calculan las 6 primeras frecuencias y la media de las frecuencias (ver resultados en la sección 5.1.1.1).

Tabla 3-5 Valores de las realizaciones en Cf2 y Cf3 de los dos estudios de estabilidad de las frecuencias.

| | Realizaciones de Cfn variable | Cfn constante |
|-------------------------|---|---------------|
| 1 ^{er} estudio | Cf3=0, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 20 KN·m/rad | Cf2= Rígido |
| 2 ^o estudio | Cf2=0, 1, 5, 10, 20, 30 KN·m/rad | Cf3= Rígido |

3.2.2.1.2 Método de variaciones incrementales no homogéneas

La variación de los coeficientes de flexibilidad en el apartado anterior ha sido homogénea en toda la estructura, es decir, la asignación ha sido igual en todos los nodos. Pero en los resultados presentados en el apartado 5.1.1.1 se ha encontrado que el modo 3 (forma modal de torsión) no se ha ajustado correctamente a su valor experimental.

El objetivo de este apartado es mejorar la estimación de las frecuencias a base de introducir modificaciones no homogéneas en las condiciones de contorno de la estructura (coeficientes de flexibilidad). Es decir, en las realizaciones se introducen modificaciones estratégicamente en algunas caras y barras para mejorar el error.

A continuación, se detallan las realizaciones que se han efectuado en la estructura y se resumen en la Tabla 3-6 (la numeración de las caras es según Figura 3-2).

Realización 1: Para todos los nodos de la estructura: $Cf_2=5 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf_3=3 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ (configuración sin daño).

Realización 2: En la cara 1 todos los nodos rígidos y para el resto de la estructura $Cf_2=5\text{KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf_3=3\text{KN}\cdot\text{m/rad}$.

Realización 3: En la cara 2 todos los nodos son rígidos y para el resto de la estructura $Cf_2=5\text{KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf_3=3\text{KN}\cdot\text{m/rad}$.

Realización 4: En los nodos de la cara 1 se ha asignado Cf_2 rígido y $Cf_3= 5\text{KN}\cdot\text{m/rad}$. Para el resto de la estructura: $Cf_2=5\text{KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf_3=3\text{KN}\cdot\text{m/rad}$.

Realización 5: En la cara 1: Cf_2 rígido y $Cf_3= 1\text{KN}\cdot\text{m/rad}$. Para el resto de la estructura: $Cf_2=5\text{KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf_3=3\text{KN}\cdot\text{m/rad}$.

Realización 6: En la cara 1: Cf_2 rígido y $Cf_3= 1\text{KN}\cdot\text{m/rad}$. Para la mitad de la cara 2 (contigua a la cara 1): coeficientes de flexibilidad rígidos. Para el resto de la estructura: $Cf_2=5\text{KN}\cdot\text{m/rad}$ y $M_3=3\text{KN}\cdot\text{m/rad}$.

Realización 7: En la cara 1: Cf_2 rígido y $Cf_3= 1\text{KN}\cdot\text{m/rad}$. Para la mitad de la cara 2 (contigua a la cara 1): coeficientes de flexibilidad rígidos. En la cara 1: 2 barras con los nodos rígidos (2-7, 3-8). Para el resto de la estructura: $Cf_2=5\text{KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf_3=3\text{KN}\cdot\text{m/rad}$.

Realización 8: En la cara 1: Cf_2 rígido y $Cf_3= 1\text{KN}\cdot\text{m/rad}$. Para la mitad de la cara 2 (contigua a la cara 1): coeficientes de flexibilidad rígidos. En la cara 1: 3 barras con los nodos rígidos (2-7, 3-8, 4-9). Para el resto de la estructura: $Cf_2=5\text{KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf_3=3\text{KN}\cdot\text{m/rad}$.

Realización 9: En la cara 1: Cf_2 rígido y $Cf_3= 1\text{KN}\cdot\text{m/rad}$. Para la mitad de la cara 2 (contigua a la cara 1): coeficientes de flexibilidad rígidos. En la cara 1: 4 barras con los

nodos rígidos (2-7, 3-8, 4-9, 1-6). Para el resto de la estructura: $Cf_2=5\text{KN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ y $Cf_3=3\text{KN}\cdot\text{m}/\text{rad}$.

Tabla 3-6 Coeficientes de flexibilidad de las realizaciones en el método de variaciones incrementales no homogéneo.

| Realización | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--|-----|---|--------|--------|--------|----|--------|--------|--------|--------|
| Cara 1 | Cf2 | 5 | Rígido | 5 | Rígido | 10 | Rígido | Rígido | Rígido | Rígido |
| | Cf3 | 3 | Rígido | 3 | 3 | 1 | 1 | 1* | 1** | 1*** |
| Cara 2 | Cf2 | 5 | 5 | Rígido | 5 | 5 | 5**** | 5 | 5 | 5 |
| | Cf3 | 3 | 3 | Rígido | 3 | 3 | 3**** | 3 | 3 | 3 |
| Cara 3 | Cf2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | Cf3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Cara 4 | Cf2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | Cf3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Cara 5 | Cf2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | Cf3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Cara 6 | Cf2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | Cf3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| * 2 barras con los nodos rígidos 2-7 y 3-8 | | | | | | | | | | |
| **3 barras con nodos rígidos 2-7, 3-8, 4-9 | | | | | | | | | | |
| ***4 barras con nodos rígidos 2-7, 3-8, 4-9, 1-6 | | | | | | | | | | |
| **** Mitad de la cara 2 Las barras contiguas a la cara 1 con nodos rígidos | | | | | | | | | | |
| Unidades de Cf2 y Cf3 KN·m/rad | | | | | | | | | | |

En todas las realizaciones se han calculado las 6 primeras frecuencias y la media. Tanto las condiciones de contorno y los resultados se han resumido en la Tabla 5-5 del apartado 5.1.1.2.

3.2.2.1.3 Método de variaciones incrementales por caras

En este apartado, se han realizado variaciones de los coeficientes de flexibilidad Cf_2 y Cf_3 para todos los nodos en distintas caras de la estructura para intentar mejorar la estimación de las frecuencias. A continuación, se detallan las realizaciones efectuadas y se resumen en la Tabla 3-7. La numeración de las caras es según la Figura 3-2.

Realización 1: Para todos los nodos de la estructura: $Cf_2=5\text{KN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ y $Cf_3=3\text{KN}\cdot\text{m}/\text{rad}$.

Realización 2: Para todos los nodos de la cara 5: $Cf_2=Cf_3=3\text{KN}\cdot\text{m}/\text{rad}$. Para el resto de la estructura: $Cf_2=5\text{KN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ y $Cf_3=3\text{KN}\cdot\text{m}/\text{rad}$.

Realización 3: Para todos los nodos de la cara 5: $Cf2=Cf3= 20 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$. Para el resto de la estructura: $Cf2=5 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf3= 3 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$.

Realización 4: Para todos los nodos de la cara 1 de la estructura: $Cf2=Cf3= 10 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$. Para el resto de la estructura: $Cf2=5 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf3= 3 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$.

Realización 5: Para todos los nodos de la cara 1 de la estructura: $Cf2=Cf3= 100 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$. Para el resto de la estructura: $Cf2=5 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf3= 3 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$.

Realización 6: Para todos los nodos de la cara 1 y 2 de la estructura: $Cf2=Cf3=100 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$. Para el resto de la estructura: $Cf2=5 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf3= 3 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$.

Realización 7: Para todos los nodos de la cara 1 y 3 de la estructura $Cf2=Cf3=100 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$. Para el resto de la estructura: $Cf2=5 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf3= 3 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$.

Realización 8: Para todos los nodos de la cara 1 de la estructura: $Cf2=Cf3=200 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$. Para el resto de la estructura: $Cf2=5 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf3= 3 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$.

Realización 9: Para todos los nodos de la cara 1 de la estructura $Cf2=Cf3= 1000 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$. Para el resto de la estructura: $Cf2=5 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf3= 3 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$.

Realización 10: Para todos los nodos de la cara 1 de la estructura: $Cf2=Cf3= 1000 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$. Para la mitad de la cara 3 (Barras que incluyen los nodos 1, 2, 3, 4, 5): $Cf2=Cf3= 1000 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$. Para el resto de la estructura: $Cf2=5 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf3= 3 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$.

Realización 11: Para todos los nodos de la cara 1 y 2 de la estructura: $Cf2=Cf3= 1000 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$. Para el resto de la estructura $Cf2=5 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf3= 3 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$.

Realización 12: Para todos los nodos de la cara 1, 2 y 3 de la estructura: $Cf2=Cf3= 1000 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$. Para el resto de la estructura: $Cf2=5 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf3= 3 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$.

Realización 13: Para todos los nodos de la estructura se asigna $Cf2=Cf3=1000 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$.

Tabla 3-7 Coeficientes de flexibilidad Cf2 y Cf3 en el método de variaciones incrementales por caras.

| Realización | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|-------------|-----|---|---|----|----|-----|-----|-----|-----|------|-------|------|----|------|
| 1 CARA | Cf2 | 2 | 5 | 5 | 10 | 100 | 100 | 100 | 200 | 1000 | 1000* | 1000 | 1 | 1000 |
| | Cf3 | 5 | 3 | 3 | 10 | 100 | 100 | 5 | 200 | 1000 | 1000* | 1000 | 1 | 1000 |
| 2 CARA | Cf2 | 2 | 5 | 5 | 3 | 3 | 100 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1000 | 1 | 1000 |
| | Cf3 | 5 | 3 | 3 | 5 | 5 | 100 | 5 | 3 | 3 | 3 | 1000 | 1 | 1000 |
| 3 CARA | Cf2 | 2 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 100 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 1000 |
| | Cf3 | 5 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1000 |
| 4 CARA | Cf2 | 2 | 4 | 20 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1000 |
| | Cf3 | 5 | 4 | 20 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1000 |
| 5 CARA | Cf2 | 2 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1000 |
| | Cf3 | 5 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1000 |

*Cf=1000 KN·m/rad únicamente la mitad del pórtico que incluyen los nodos 1,2,3,4,5.
KN·m/rad unidades de Cf2 y Cf3

En todas las realizaciones se han calculado las 6 primeras frecuencias y la media. Tanto las condiciones de contorno y los resultados se han resumido en la Tabla 5-6 del apartado de resultados 5.1.1.3.

3.2.2.2 Método probabilista con variación de los intervalos de muestreo adaptados

Para explorar con mayor detalle la influencia de las condiciones de contorno, en este apartado se introduce el primer método probabilístico para encontrar una configuración más aproximada a la configuración sin daño. Este método consiste en realizar variaciones en las condiciones de contorno según una función de densidad de probabilidad uniforme en intervalos estratégicamente adaptados, para mejorar el modelo que representa la configuración inicial (Cf2=5 KN·m/rad y Cf3= 3 KN·m/rad.). En la primera etapa se realizan variaciones en las condiciones de contorno Cf2 y Cf3 simultáneamente y en la segunda etapa únicamente se varía Cf3, mientras Cf2 es constante.

a/ Variaciones en Cf2 y Cf3 simultáneamente

Este proceso está compuesto por 8 etapas (Tabla 3-8). En cada etapa se realiza un número determinado de realizaciones en las cuales se asigna, a todos los nodos, unos valores a Cf2 y Cf3 según una función de densidad de probabilidad uniforme en un intervalo dado. En cada etapa se adapta el intervalo de muestreo estratégicamente, para obtener una mejor aproximación de las frecuencias numéricas respecto a las frecuencias experimentales. Los

criterios de selección de los intervalos y la presentación de todos los resultados se detallan en el apartado 5.1.1.4.

La Tabla 3-9 muestra un ejemplo de la matriz de las condiciones de contorno (Cf2 y Cf3) que se han efectuado en todos los nodos de la estructura en la realización n°1. En las filas se indican las barras y en las columnas se indican los nodos de cada barra (Nodo 1 y Nodo 2).

Tabla 3-8 Intervalos y realizaciones de las etapas en el método probabilístico con variaciones de los intervalos de muestreo adaptados (variables Cf2 y Cf3).

| Etapas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Realizaciones | 1 a 3 | 4-12 | 13 a 21 | 22 a 24 | 25 a 27 | 28 a 30 | 31 y 32 | 33 y 34 |
| Intervalo de Cf2 y Cf3 (KN·m/rad) | 0-1000 | 0-100 | 0-10 | 0-1 | 7-10 | 1-7 | 1-6 | 2-7 |

Tabla 3-9 Condiciones de contorno de la realización 1 del método probabilista con variaciones de los intervalos de muestreo adaptados (variables Cf2 y Cf3). Se indican los coeficientes de flexibilidad Cf2 y Cf3, en los nodos extremos, nodo 1 y nodo 2, en las 35 barras.

| REALIZACIÓN 1 | | | | |
|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Nº Barra | Cf2 Nodo 1 (KN·m/rad) | Cf2 Nodo 2 (KN·m/rad) | Cf3 Nodo 1 (KN·m/rad) | Cf3 Nodo 2 (KN·m/rad) |
| 1 | 186.1 | 496.0 | 373.1 | 930.6 |
| 2 | 551.8 | 75.2 | 97.5 | 629.3 |
| 3 | 566.7 | 203.2 | 78.5 | 832.8 |
| 4 | 186.4 | 194.4 | 891.1 | 443.2 |
| 5 | 742.9 | 46.3 | 848.3 | 573.6 |
| 6 | 477.5 | 365.4 | 591.1 | 628.6 |
| 7 | 365.6 | 838.4 | 86.5 | 162.7 |
| 8 | 130.1 | 143.9 | 391.5 | 150.7 |
| 9 | 199.8 | 688.5 | 785.3 | 168.9 |
| 10 | 637.9 | 147.9 | 850.7 | 331.0 |
| 11 | 882.8 | 353.0 | 932.1 | 875.9 |
| 12 | 215.2 | 334.3 | 306.4 | 739.1 |
| 13 | 319.3 | 92.3 | 897.3 | 778.6 |
| 14 | 194.9 | 613.1 | 705.9 | 710.2 |
| 15 | 720.6 | 251.7 | 939.2 | 584.6 |
| 16 | 244.6 | 222.4 | 515.2 | 30.8 |
| 17 | 359.5 | 496.6 | 564.8 | 741.2 |
| 18 | 793.6 | 159.5 | 660.1 | 124.1 |
| 19 | 545.1 | 843.6 | 549.4 | 200.3 |
| 20 | 583.4 | 579.6 | 324.4 | 345.7 |
| 21 | 817.7 | 234.9 | 629.5 | 500.3 |
| 22 | 887.4 | 25.9 | 51.9 | 52.4 |

| | | | | |
|----|---------|-------|---------|-------|
| 23 | 13.155 | 346.8 | 570.792 | 576.2 |
| 24 | 669.705 | 581.1 | 422.946 | 587.1 |
| 25 | 373.543 | 764.2 | 673.343 | 803.3 |
| 26 | 421.908 | 146.8 | 298.640 | 342.7 |
| 27 | 287.903 | 553.2 | 801.983 | 41.4 |
| 28 | 512.479 | 646.9 | 923.621 | 273.6 |
| 29 | 164.745 | 159.1 | 563.114 | 510.5 |
| 30 | 21.944 | 696.7 | 947.050 | 311.3 |
| 31 | 473.416 | 595.9 | 413.235 | 226.7 |
| 32 | 646.378 | 912.3 | 622.491 | 365.5 |
| 33 | 76.221 | 737.8 | 249.258 | 948.1 |
| 34 | 307.350 | 127.4 | 454.575 | 242.5 |
| 35 | 703.495 | 628.1 | 748.774 | 211.7 |

b/ Variaciones en Cf3

Este método es similar al anterior, pero la variable aleatoria es Cf3, mientras Cf2 se mantiene constante y rígido. Se ha escogido variar incrementalmente el coeficiente de flexibilidad Cf3 en lugar de Cf2 porque la respuesta de la estructura es más sensible con variaciones en Cf3 (sección 5.1.1.1).

De manera similar al apartado anterior, los intervalos de muestreo se adaptan estratégicamente en cada etapa (Tabla 3-10) para disminuir el error de la frecuencia de la respuesta de la estructura. En el apartado de resultados 5.1.1.4.2, se detallan los criterios de selección de los intervalos para converger a la mejor aproximación.

Tabla 3-10 Cf3 y Cf2 de las realizaciones en el método probabilista con variación de los intervalos de muestreo adaptados (variable Cf3).

| Etapas | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Realizaciones | 1 y 2 | 3 y 4 | 5 y 6 | 6 y 7 | 7 y 8 | 9 y 10 | 11 y 12 |
| Intervalo de Cf3 (KN·m/rad) | 0-10 | 0-5 | 5-10 | 0-2 | 2-3 | 3-4 | 4-5 |
| Cf2 (KN·m/rad) | Rígido |

3.2.2.3 Método probabilista automático

El método del apartado anterior resulta lento y manual. En este apartado se diseña un programa probabilista que permite ejecutar automáticamente realizaciones en un intervalo de muestreo definido. El objetivo principal es poder ejecutar un gran número de realizaciones (5000) para poder explorar el máximo de condiciones de contorno y así, ajustar el modelo en la configuración sin daño. Pero antes de ejecutar las 5000 realizaciones, se efectúa un preajuste con el programa automático con un número reducido de realizaciones (15) y modificando estratégicamente los intervalos. De esta

manera se puede aplicar, fácilmente, un amplio rango de condiciones de contorno y validar el buen funcionamiento del programa.

3.2.2.3.1 Programa probabilista automático con 15 realizaciones

En este apartado se diseña el programa que permite ejecutar 15 realizaciones automáticamente para un intervalo de muestreo predefinido. Las condiciones de contorno (Cf2 y Cf3) de cada realización siguen una función de densidad de probabilidad uniforme en este intervalo. Este intervalo de muestreo se ha variado y adaptado, con el objetivo de explorar mejor las condiciones de contorno.

Este programa necesita 7.5 minutos con un ordenador personal Core i7 en generar la solución; éste se considera un tiempo razonable para repetir el cálculo con intervalos diferentes.

La automatización se ha realizado con el programa de estructuras ETABS y las funciones API, las cuales han permitido una interacción entre ETABS y el lenguaje de programación visual Basic y, por lo tanto, con las macros del Excel.

La implementación de las condiciones de contorno del programa automático se ha realizado bajo 3 criterios:

Criterio 1

El número total de barras con los coeficientes de flexibilidad modificados es un valor aleatorio siguiendo una función de densidad de probabilidad uniforme entre 1 y 35 barras. Estas barras se denominarán barras dañadas de la estructura. La Tabla 3-11 muestra el ejemplo del número de barras dañadas para un test de 15 realizaciones.

Criterio 2

La posición de las barras con los coeficientes de flexibilidad modificados (barras dañadas) también es aleatoria siguiendo una función de densidad de probabilidad uniforme. La Tabla 3-12 muestra el ejemplo de la posición de las barras dañadas en la estructura para un test de 15 realizaciones.

Criterio 3

Los coeficientes de flexibilidad Cf2 y Cf3 asignados en los nodos de las barras dañadas son aleatorios siguiendo una función de densidad de probabilidad uniforme en un intervalo de muestreo seleccionado estratégicamente (Tabla 3-13) con el objetivo de encontrar la mejor solución. A continuación, se detallan los intervalos de muestreo:

- En el test 1, el intervalo de muestreo está centrado en la configuración sin daño y la amplitud del intervalo es 2 KN·m/rad. (Tabla 3-13).

- El intervalo de muestreo de las condiciones de contorno del test 2 tiene como límite inferior los valores de la configuración con más daño y el límite superior tiene como valores la configuración sin daño (Tabla 3-13).
- El intervalo de muestreo del test 3 es una situación intermedia entre el test 1 y 4 (Tabla 3-13).
- En el test 4, el intervalo de muestreo está centrado en la configuración con más daño y la amplitud del intervalo es menor que el test 2, 0.1 KN·m/rad (Tabla 3-13).

Tabla 3-11 Ejemplo de número total de barras dañadas de la estructura en cada realización del programa probabilista automático con 15 realizaciones.

| Realización | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|-----------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|---|----|----|----|----|----|----|
| N.º de barras dañadas | 33 | 26 | 20 | 30 | 11 | 29 | 23 | 21 | 9 | 28 | 30 | 34 | 13 | 31 | 16 |

Tabla 3-12 Ejemplo de la posición de las barras dañadas en la estructura en el programa probabilista automático con 15 realizaciones. Las columnas representan las realizaciones y las filas representan la posición de la barra dañada

| POSICIÓN DE LAS BARRAS DAÑADAS EN LA ESTRUCTURA | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Realización | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 7 | 33 | 11 | 26 | 15 | 7 | 34 | 9 | 28 | 8 | 11 | 17 | 5 | 7 | 32 | |
| 10 | 28 | 27 | 8 | 10 | 9 | 19 | 16 | 19 | 12 | 28 | 14 | 28 | 32 | 13 | |
| 24 | 9 | 9 | 15 | 2 | 13 | 35 | 19 | 8 | 11 | 31 | 19 | 29 | 27 | 35 | |
| 28 | 27 | 30 | 5 | 25 | 1 | 13 | 23 | 3 | 33 | 2 | 9 | 11 | 24 | 29 | |
| 22 | 32 | 21 | 14 | 18 | 31 | 12 | 34 | 25 | 19 | 18 | 23 | 24 | 14 | 24 | |
| 15 | 18 | 16 | 22 | 35 | 11 | 28 | 7 | 9 | 32 | 5 | 35 | 13 | 2 | 11 | |
| 14 | 23 | 23 | 24 | 13 | 19 | 23 | 31 | 14 | 25 | 20 | 28 | 23 | 22 | 5 | |
| 1 | 7 | 22 | 30 | 29 | 30 | 29 | 8 | 35 | 6 | 7 | 8 | 3 | 33 | 17 | |
| 29 | 8 | 34 | 3 | 7 | 16 | 7 | 22 | | 9 | 13 | 13 | 32 | 21 | 3 | |
| 6 | 4 | 13 | 25 | 16 | 27 | 10 | 25 | | 17 | 33 | 16 | 25 | 26 | 31 | |
| 30 | 12 | 33 | 17 | | 23 | 15 | 4 | | 13 | 1 | 3 | 31 | 18 | 27 | |
| 18 | 16 | 32 | 18 | | 35 | 16 | 14 | | 3 | 4 | 20 | 12 | 1 | 22 | |
| 11 | 19 | 35 | 33 | | 2 | 17 | 29 | | 18 | 30 | 4 | | 35 | 6 | |
| 34 | 3 | 5 | 7 | | 21 | 6 | 26 | | 23 | 34 | 22 | | 4 | 18 | |
| 27 | 10 | 20 | 11 | | 17 | 20 | 24 | | 15 | 27 | 12 | | 25 | 14 | |
| 33 | 34 | 1 | 16 | | 18 | 24 | 21 | | 1 | 22 | 7 | | 20 | | |
| 19 | 17 | 10 | 28 | | 25 | 27 | 27 | | 27 | 26 | 11 | | 3 | | |
| 8 | 31 | 2 | 10 | | 12 | 18 | 3 | | 22 | 8 | 15 | | 6 | | |
| 32 | 35 | 15 | 2 | | 3 | 32 | 1 | | 34 | 32 | 33 | | 30 | | |
| 12 | 30 | | 32 | | 10 | 9 | 20 | | 7 | 21 | 6 | | 17 | | |
| 17 | 13 | | 23 | | 34 | 22 | | | 14 | 6 | 31 | | 23 | | |
| 23 | 20 | | 12 | | 22 | 4 | | | 26 | 25 | 29 | | 28 | | |
| 16 | 26 | | 21 | | 15 | | | | 28 | 35 | 21 | | 12 | | |
| 31 | 29 | | 9 | | 33 | | | | 16 | 10 | 5 | | 8 | | |
| 35 | 21 | | 35 | | 28 | | | | 4 | 19 | 25 | | 16 | | |
| 21 | | | 27 | | 6 | | | | 2 | 29 | 10 | | 29 | | |
| 20 | | | 13 | | 5 | | | | 20 | 14 | 27 | | 9 | | |
| 4 | | | 29 | | 32 | | | | | 12 | 30 | | 31 | | |
| 26 | | | 4 | | | | | | | 16 | 34 | | 10 | | |
| 13 | | | | | | | | | | | 1 | | 13 | | |
| 5 | | | | | | | | | | | 24 | | | | |
| 25 | | | | | | | | | | | 32 | | | | |
| | | | | | | | | | | | 18 | | | | |

Tabla 3-13 Intervalos y número de realizaciones de los 5 tests con el programa probabilista automático con 15 realizaciones

| | |
|--------|---|
| Test 1 | Cf2 varía según una función de densidad uniforme entre 4 y 6 (KN·m/rad) Cf3 varía según una función de densidad uniforme entre 2 y 4 (KN·m/rad) 1 Test de 15 realizaciones |
| Test 2 | Cf2 varía según una función de densidad uniforme entre 0.3 y 5 (KN·m/rad) Cf3 varía según una función de densidad uniforme entre 0.1 y 3 (KN·m/rad) 41 realizaciones (2 test de 15 realizaciones y uno de 11 realizaciones) |
| Test 3 | Cf2 varía según una función de densidad uniforme entre 1 y 3 (KN·m/rad) Cf3 varía según una función de densidad uniforme entre 0.5 y 1.5 (KN·m/rad) 1 test de 15 realizaciones |
| Test 4 | Cf2 varía según una función de densidad uniforme entre 0.25 (KN·m/rad) y 0.35 (KN·m/rad) Cf3 varía según una función de densidad uniforme entre 0.05 (KN·m/rad) y 0.15 (KN·m/rad) 60 realizaciones (4 test de 15 realizaciones) |
| Test 5 | Reagrupación de todas las realizaciones de los tests 1, 2, 3 y 4 en una misma gráfica. |

Para los resultados de cada realización se ha calculado el error de la frecuencia definido en la fórmula (3-1 del apartado 3.2.2), entre la frecuencia numérica de la realización y la frecuencia de la configuración sin daño (modelo experimental). Los resultados se presentan en el apartado 5.1.1.5.

La Tabla 3-14 muestra, como ejemplo, la matriz de las condiciones de contorno de la realización 1, es decir, los coeficientes de flexibilidad asignados en los nodos (extremos) de las barras. Las filas representan las 35 barras. Las columnas indican los coeficientes de flexibilidad (Cf2 y Cf3) en los nodos extremos (nodo1 y nodo2) de las barras. Los nodos que no han sufrido daño tienen los coeficientes de flexibilidad de la configuración sin daño (Cf2= 5 KN·m/rad y Cf3= 3 KN·m/rad). Sin embargo, en los nodos que tienen daño, los coeficientes de flexibilidad son inferiores a estos valores.

Tabla 3-14 Ejemplo de las condiciones de contorno de la primera realización con el programa probabilista automático con 15 realizaciones. Se indica el número de la realización, el número de barra y la asignación del coeficiente de flexibilidad en cada nodo de la barra. Nodo 1 y Nodo 2 indican los dos nodos extremos de la barra.

| Realización 1 | | | | |
|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Barra | Cf3 nodo 1 (KN·m/rad) | Cf3 nodo 2 (KN·m/rad) | Cf2 nodo 1 (KN·m/rad) | Cf2 nodo 2 (KN·m/rad) |
| 1 | 4.102 | 2.594 | 2.221 | 1.107 |
| 2 | 5.000 | 5.000 | 3.000 | 3.000 |
| 3 | 5.000 | 5.000 | 3.000 | 3.000 |
| 4 | 2.051 | 0.803 | 2.842 | 1.523 |

| | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|
| 4 | 2.252 | 3.123 | 1.113 | 1.191 |
| 6 | 2.333 | 1.460 | 0.295 | 0.114 |
| 7 | 1.731 | 3.899 | 2.583 | 1.108 |
| 8 | 3.701 | 2.653 | 2.780 | 1.770 |
| 9 | 2.735 | 1.400 | 2.635 | 2.351 |
| 10 | 2.214 | 2.176 | 1.206 | 2.267 |
| 11 | 0.808 | 4.735 | 1.713 | 1.687 |
| 12 | 0.683 | 4.309 | 0.357 | 2.767 |
| 13 | 4.982 | 4.369 | 0.916 | 0.530 |
| 14 | 1.893 | 0.572 | 0.947 | 1.853 |
| 15 | 4.623 | 1.818 | 0.750 | 1.191 |
| 16 | 0.884 | 1.930 | 1.527 | 2.435 |
| 17 | 4.379 | 2.109 | 0.305 | 1.524 |
| 18 | 1.812 | 2.236 | 1.765 | 2.930 |
| 19 | 3.218 | 4.377 | 1.258 | 0.610 |
| 20 | 4.542 | 3.481 | 1.568 | 2.268 |
| 21 | 2.572 | 4.727 | 1.372 | 1.606 |
| 22 | 0.689 | 0.751 | 2.625 | 0.941 |
| 23 | 4.862 | 0.385 | 1.827 | 2.683 |
| 24 | 2.936 | 3.720 | 0.906 | 2.020 |
| 25 | 4.461 | 0.445 | 2.387 | 0.446 |
| 26 | 1.047 | 3.302 | 2.791 | 0.280 |
| 27 | 2.013 | 4.556 | 2.936 | 2.599 |
| 28 | 1.693 | 2.952 | 2.677 | 2.184 |
| 29 | 3.098 | 0.393 | 2.169 | 2.764 |
| 30 | 4.303 | 4.914 | 0.491 | 0.776 |
| 31 | 4.341 | 1.161 | 0.398 | 2.600 |
| 32 | 3.174 | 2.288 | 1.983 | 0.612 |
| 33 | 4.222 | 1.878 | 1.310 | 1.853 |
| 34 | 1.291 | 3.012 | 0.336 | 2.847 |
| 35 | 2.089 | 1.750 | 2.749 | 0.447 |

3.2.2.3.2 Programa probabilista automático con 5000 realizaciones: Monte Carlo

La utilización del programa probabilístico con 15 realizaciones ha servido para efectuar un preajuste del modelo y garantizar el buen funcionamiento antes de ejecutar el programa con un mayor número realizaciones. En este apartado se ha utilizado el programa con 5000 realizaciones con el servidor del departamento que pertenece al grupo de investigación GiES con procesador Intel Xeon CPU ES-2660 de 16 GB.

Este proceso permite realizar el método de Monte Carlo con garantías debido a que se efectúa un gran número de realizaciones aleatorias siguiendo una función de densidad de probabilidad uniforme y se comparan los resultados de cada realización con el valor objetivo. El resultado de cada realización es el error entre la frecuencia de la realización y la frecuencia experimental de la configuración sin daño según la fórmula 3-1 (apartado 3.2.2). El error mínimo de todas las realizaciones es la mejor aproximación de las frecuencias de la configuración sin daño. Al incrementar las realizaciones aleatorias, se aumenta la probabilidad de encontrar una mejor aproximación.

El programa con 5000 realizaciones se ha aplicado en dos intervalos de muestreo:

a/ Primer intervalo de muestreo

En este apartado, los coeficientes de flexibilidad en los nodos se han variado siguiendo una función de densidad de probabilidad uniforme en el siguiente intervalo de muestreo:

- Intervalo de muestreo de Cf2 entre 0.25 y 5.5 KN·m/rad
- Intervalo de muestreo de Cf3 entre 0.05 y 3.5 KN·m/rad

Con estos intervalos se ha buscado explorar el espacio más amplio de valores entre aproximadamente la configuración sin daño y el menor coeficiente de flexibilidad (asociado al daño mayor).

Bajo estas condiciones, se han realizado 8 tests (Tabla 3-15) en los cuales se han incrementado el número de realizaciones totales, desde 2 hasta 5000 realizaciones. Puede verse la evolución del tiempo con el número de ejecuciones. Cabe destacar que el test con 5000 realizaciones se ejecutó en el servidor del departamento debido a que el tiempo utilizado para efectuar todos los cálculos era 41.6 horas (Tabla 3-15). Sin embargo, el tests con 15 realizaciones se efectúa en 7.5 min (Fase de preajuste); este es un tiempo razonable para ejecutar el programa con un ordenador personal Core i7 y poder hacer repeticiones del programa fácilmente, con varios intervalos y explorar así las variaciones de las condiciones de contorno.

Tabla 3-15 Número de realizaciones y tiempo total de los tests con el programa probabilista automático.

| Test | Realizaciones | Tiempo |
|-------------|----------------------|---------------|
| 1 | 2 | 1 minuto |
| 2 | 15 | 7.5 minuto |
| 3 | 50 | 25 minuto |
| 4 | 100 | 50 minuto |
| 5 | 500 | 4.16 horas |
| 6 | 1000 | 8.33 horas |
| 7 | 2000 | 16.67 horas |
| 8 | 5000 | 41.6 horas |

Para cada test se ha calculado, igual que en el apartado anterior (3.2.2.3.1), el error de la frecuencia según la fórmula 3.1 del apartado 3.2.2. El valor mínimo del error corresponde a la mejor aproximación del modelo con la configuración no dañada (test 1). Los resultados del proceso se han presentado en el apartado 5.1.1.5.

A modo de ejemplo, la Tabla 3-16 presenta las 25 primeras realizaciones del proceso automático de 5000 realizaciones. La primera columna representa el decremento de los coeficientes de flexibilidad en la estructura (DCf(total)), definido en la sección 2.6. Las columnas siguientes presentan las frecuencias para cada modo y el porcentaje de error de

la frecuencia respecto el test experimental sin daño, según la fórmula 3-1 del apartado 3.2.2 y la última columna indica la media de los errores de las frecuencias modales.

b/ Segundo intervalo de muestreo

El segundo análisis utilizando el programa con 5000 realizaciones se ha efectuado con el objetivo de mejorar la aproximación de las frecuencias del modelo de la configuración sin daño. Las condiciones de contorno se han restringido a un intervalo centrado en la configuración sin daño (test 1), con una amplitud menor (2 KN·m/rad).

- El coeficiente de flexibilidad Cf2 ha variado aleatoriamente siguiendo una función de densidad de probabilidad uniforme entre 4 y 6 KN·m/rad.
- El coeficiente de flexibilidad Cf3 ha variado aleatoriamente siguiendo una función de densidad de probabilidad uniforme entre 2 y 4 KN·m/rad.

Este test numérico considera el inherente error humano en el test experimental debido a que el ajuste de los tornillos con el par de apriete de la configuración sin daño lo realiza un individuo. Como consecuencia, siempre habrá una pequeña variabilidad de precisión o fiabilidad.

Tabla 3-16 Ejemplo de resultados de las 25 primeras realizaciones del programa probabilista automático con 5000 realizaciones. Las columnas indican: DCf(total) es el decremento del coeficiente de flexibilidad en la estructura (en KN·m/rad), Frecuencias (Hz) y decrementos de frecuencia (%) del modo 1 al 6 y la media.

| Nº | DCf (total) (KN·m/rad) | Frec. Modo 1 (Hz) | Error Frec 1 (%) | Frec. Modo 2 (Hz) | Error Frec2 (%) | Frec modo 3 (Hz) | Error Frec3 (%) | Frec Modo 4 (Hz) | Error Frec4 (%) | Frec Modo 5 (Hz) | Error Frec5 (%) | Frec Modo 6 (Hz) | Error Frec6 (%) | Med. Error Frec (%) |
|----|------------------------|-------------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|---------------------|
| 1 | 139.763 | 2.23 | 15.94 | 2.68 | 0.89 | 2.84 | 25.11 | 7.30 | 4.81 | 8.08 | 13.07 | 8.71 | 9.70 | 13.76 |
| 2 | 140.993 | 2.27 | 14.49 | 2.60 | 3.80 | 2.89 | 23.92 | 7.35 | 4.26 | 8.04 | 13.49 | 8.89 | 7.74 | 13.53 |
| 3 | 213.341 | 2.17 | 18.41 | 2.43 | 10.2 | 2.72 | 28.41 | 7.41 | 3.41 | 7.96 | 14.39 | 8.53 | 11.6 | 16.80 |
| 4 | 99.479 | 2.38 | 10.30 | 2.73 | 1.18 | 2.94 | 22.56 | 7.40 | 3.59 | 8.34 | 10.31 | 9.03 | 6.38 | 10.77 |
| 5 | 49.446 | 2.38 | 10.29 | 2.76 | 2.13 | 2.95 | 22.43 | 8.34 | 8.73 | 8.98 | 3.40 | 9.86 | 2.30 | 8.78 |
| 6 | 111.873 | 2.34 | 12.03 | 2.66 | 1.44 | 2.91 | 23.39 | 7.53 | 1.80 | 8.46 | 9.00 | 8.85 | 8.17 | 10.80 |
| 7 | 24.592 | 2.48 | 6.53 | 2.70 | 0.06 | 2.99 | 21.18 | 8.63 | 12.5 | 8.92 | 4.08 | 9.62 | 0.17 | 8.10 |
| 8 | 79.370 | 2.23 | 16.18 | 2.69 | 0.54 | 2.87 | 24.51 | 8.24 | 7.37 | 8.33 | 10.39 | 9.70 | 0.62 | 11.67 |
| 9 | 48.163 | 2.40 | 9.53 | 2.77 | 2.63 | 2.95 | 22.39 | 8.06 | 5.12 | 8.40 | 9.67 | 9.57 | 0.70 | 9.95 |
| 10 | 139.634 | 2.15 | 19.14 | 2.69 | 0.57 | 2.87 | 24.46 | 7.70 | 0.34 | 8.08 | 13.13 | 9.54 | 1.03 | 11.97 |
| 11 | 48.245 | 2.44 | 8.18 | 2.63 | 2.78 | 2.95 | 22.44 | 8.33 | 8.60 | 8.63 | 7.17 | 9.86 | 2.29 | 9.77 |
| 12 | 74.799 | 2.34 | 11.82 | 2.72 | 0.67 | 2.91 | 23.39 | 8.53 | 11.2 | 8.73 | 6.09 | 9.83 | 1.98 | 10.20 |
| 13 | 158.712 | 2.23 | 15.86 | 2.55 | 5.50 | 2.80 | 26.14 | 7.45 | 2.84 | 8.22 | 11.62 | 9.03 | 6.34 | 13.32 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|-------|
| 14 | 44.632 | 2.39 | 10.00 | 2.73 | 1.00 | 2.96 | 21.93 | 8.45 | 10.1 | 8.68 | 6.60 | 9.61 | 0.35 | 9.43 |
| 15 | 210.525 | 2.12 | 20.13 | 2.39 | 11.6 | 2.74 | 27.81 | 7.34 | 4.38 | 8.21 | 11.67 | 8.79 | 8.87 | 16.02 |
| 16 | 135.248 | 2.24 | 15.66 | 2.57 | 4.98 | 2.85 | 24.99 | 7.33 | 4.49 | 7.94 | 14.56 | 8.80 | 8.73 | 14.66 |
| 17 | 109.253 | 2.24 | 15.49 | 2.63 | 2.56 | 2.84 | 25.21 | 8.45 | 10.1 | 8.53 | 8.28 | 9.64 | 0.04 | 11.66 |
| 18 | 215.717 | 2.26 | 14.89 | 2.34 | 13.3 | 2.81 | 26.06 | 6.47 | 15.6 | 7.94 | 14.61 | 8.03 | 16.8 | 19.30 |
| 19 | 7.143 | 2.48 | 6.52 | 2.79 | 3.29 | 3.01 | 20.68 | 8.64 | 12.7 | 9.23 | 0.71 | 9.88 | 2.47 | 7.84 |
| 20 | 18.729 | 2.48 | 6.61 | 2.77 | 2.60 | 3.01 | 20.85 | 8.37 | 9.07 | 8.67 | 6.72 | 9.66 | 0.25 | 8.81 |
| 21 | 150.887 | 2.18 | 17.76 | 2.68 | 0.70 | 2.84 | 25.28 | 7.51 | 2.16 | 8.10 | 12.87 | 8.93 | 7.36 | 13.17 |
| 22 | 127.798 | 2.29 | 13.68 | 2.55 | 5.69 | 2.83 | 25.38 | 8.22 | 7.18 | 8.45 | 9.07 | 9.40 | 2.47 | 12.09 |
| 23 | 219.383 | 2.21 | 16.77 | 2.39 | 11.7 | 2.83 | 25.48 | 6.76 | 11.9 | 7.83 | 15.83 | 7.99 | 17.1 | 19.09 |
| 24 | 205.311 | 2.20 | 17.28 | 2.46 | 9.05 | 2.76 | 27.21 | 7.62 | 0.69 | 7.99 | 14.07 | 8.80 | 8.76 | 15.19 |
| 25 | 113.353 | 2.34 | 11.82 | 2.67 | 1.16 | 2.87 | 24.50 | 7.67 | 0.03 | 8.38 | 9.88 | 9.40 | 2.53 | 9.97 |

3.2.3 Ajuste del modelo numérico para los tests 2, 3, 4 y 5

En este apartado se detalla el proceso para la aproximación numérica para los tests 2, 3, 4 y 5, experimentales. El método consiste en encontrar unos coeficientes de flexibilidad en el modelo numérico dañado para cada test, exigiendo que el decremento de la frecuencia numérica de los tres primeros modos se aproxime al decremento de la frecuencia de los mismos modos del ensayo experimental (fórmulas 3-2 y 3-3 de este apartado). A continuación, se presenta una tabla que indica la fecha, la temperatura y los nodos afectados de los tests experimentales estudiados con daño.

Estos ajustes de los coeficientes de flexibilidad de los nodos representan la calibración del modelo numérico con los test experimentales. Este modelo calibrado, posteriormente se utilizará para realizar simulaciones con estados de daños superiores.

Tabla 3-17 Tests experimentales utilizados para los ajustes numéricos de las configuraciones dañadas.

| Tests experimentales | | | | |
|----------------------|------------|-------|--------|------------|
| Test | Fecha | Hora | T°C | Nodos |
| Test 2 | 30/07/2019 | 16h22 | 23°C | 3,8 |
| Test 3 | 10/09/2019 | 20h06 | 21°C | 3,8 |
| Test 4 | 27/08/2019 | 17h21 | 22°C | 2, 3, 8 |
| Test 5 | 28/08/2019 | 14h58 | 25.8°C | 2, 3, 7, 8 |

Definición de decremento de frecuencia

Para un determinado modo (i), el decremento de frecuencia de la realización (j) cuantifica el porcentaje de la disminución de la frecuencia de dicha realización respecto a la frecuencia del modelo sin daño.

En este apartado, el decremento de frecuencia se ha calculado en dos casos:

El primer caso es el decremento de frecuencia experimental (fórmula 3.2) que se calcula

Decremento de frecuencia numérico:

$$\text{Dec. frec (i; j)} = \frac{\text{Frecuencia numerica modelo sin daño(i)} - \text{Frecuencia numérica(i;j)}}{\text{Frecuencia numérica del modelo sin daño(i)}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (3-3)$$

en el modelo experimental de la estructura metálica a escala del laboratorio. El segundo caso es el decremento de frecuencia numérico (fórmula 3.3) que se calcula en la simulación numérica de la estructura metálica con el programa de cálculo estructural ETABS.

Decremento de frecuencia experimental:

$$\text{Dec. frec (i; j)} = \frac{\text{Frecuencia experimental modelo sin daño(i)} - \text{Frecuencia experimental(i;j)}}{\text{Frecuencia experimental del modelo sin daño(i)}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (3-2)$$

Donde i es el número de modo (de 1 a 6 y la media) y j es el número de la realización.

3.2.4 Evaluación experimental de la forma modal y cálculo del MAC Factor

En este apartado se han evaluado los MAC Factor (fórmula 2-12 de la sección 2.4) de las formas modales experimentales y numéricas. Para la evaluación de la forma modal experimental se han colocado 12 acelerómetros dispuestos en 6 nodos. La temperatura se controló con el objetivo de que este factor no afecte el análisis. Los acelerómetros fueron localizados según la disposición de la Figura 3-4, con el objetivo de calcular las amplitudes. El ensayo experimental para calcular el análisis modal se realizó en la estructura en la configuración no dañada del día 24-07-2019 a las 16:59; la temperatura fue 20.5°C.

Los acelerómetros han permitido medir las amplitudes para poder crear el vector experimental de desplazamientos en los nodos.

Por otro lado, en el modelo numérico, se han calculado los desplazamientos en las direcciones X e Y de los 6 nodos para crear el vector numérico de la fórmula de los MAC Factor.

Finalmente, el MAC Factor se ha calculado a partir del vector experimental de amplitudes y el vector numérico de desplazamiento.

3.3 Procedimiento para el análisis de componentes principales

En primer lugar, se ha realizado el análisis de componentes principales para las matrices de las frecuencias modales a diferentes temperaturas, es decir, obtención de componentes principales y valores principales.

En segundo lugar, se ha estudiado la varianza acumulada de las frecuencias en los ensayos detallados en la sección 3.1.

En tercer lugar, se han estudiado dos estimadores el T^2 y el Q aplicados en los ensayos sobre la matriz de frecuencias de las diferentes configuraciones según las fórmulas 2-17 y 2-18 de la sección 2.5.

A continuación, se detalla el proceso de cálculo para la obtención de T^2 y Q con el método de los componentes principales que se ha aplicado a las matrices de los 5 tests con las distintas configuraciones de daños.

El cálculo se inicia normalizando la matriz de frecuencias. Previamente se ha tenido que calcular la media de las frecuencias de todos los ensayos de temperatura de la configuración sin daño (test 1). Las matrices de datos normalizadas son la diferencia de la matriz de datos y los valores medios de la configuración sin daño, calculados previamente (Yan et al., 2005). A continuación, se han calculado las componentes principales y los valores propios con un programa en MATHLAB. El siguiente paso ha sido la formación de subespacios formados por las componentes principales. El primer subespacio se ha formado con la primera componente principal (dimensión 1), el segundo subespacio se ha formado con las dos primeras componentes principales (2 dimensiones). Se han realizado tantos subespacios como dimensión tiene el espacio de componentes principales.

El valor del estimador T^2 es el cuadrado de la suma de todas las normas de las proyecciones, en los subespacios de los vectores, que forman la matriz de los datos, además cada norma se ha ponderado con la inversa del valor propio.

Para calcular Q , previamente se ha calculado la matriz residuo, definida como la diferencia entre la matriz de datos y la proyección. El valor de Q se ha calculado como el cuadrado de las normas de los residuos en todos los subespacios.

3.4 Procedimiento para el cálculo del índice de daño

Este apartado presenta el procedimiento del estudio del índice de daño (ID). El objetivo final es mostrar la relación entre el índice de daño y las componentes principales de la sección 3.3. El estudio está compuesto por 2 apartados siguiendo la metodología de la

sección 3.2.2. En el primer apartado (3.4.1) se realiza el estudio del índice de daño mediante el método de variación incremental de las condiciones de contorno. Pero los resultados presentan unos valores aproximados porque se han calculado con 9 puntos. Para aumentar el número de realizaciones, en el segundo apartado 3.4.2, se diseña un programa que calcula automáticamente las realizaciones en un intervalo. El objetivo es explorar el índice de daño con un número muy elevado de realizaciones con el servidor del departamento de investigación GiES. Pero antes de ejecutar el programa con 5000 realizaciones se realiza un estudio inicial con un programa automático de 15 realizaciones en 4 intervalos con el ordenador personal Core i7.

En este apartado se han aprovechado los resultados obtenidos en el análisis modal de la sección 5.1, pero en este caso, los decrementos de las frecuencias (DF) se han calculado respecto las frecuencias del modelo numérico en lugar de la configuración experimental según la fórmula 3-3 del apartado 3.2.3.

3.4.1 Método de las variaciones incrementales de las condiciones de contorno

La primera metodología para estudiar el comportamiento del índice de daño consiste en realizar variaciones incrementales de las condiciones de contorno en el modelo. Para ello se ha aprovechado la metodología y resultados del apartado 3.2.3.

El índice de daño se ha calculado como el cociente entre el decremento del coeficiente de flexibilidad de toda la estructura en la realización ($DC_f(\text{total})$) y el decremento del coeficiente de flexibilidad de referencia tal como se define en la fórmula 2-19 de la sección 2-6. El decremento del coeficiente de flexibilidad de referencia ($DC_{f_{ref}}(\text{total})$) definido en la sección 2-6 es la diferencia entre los coeficientes de flexibilidad de la configuración sin daño y la configuración resultante de aplicar en todos los nodos el coeficiente de flexibilidad mínimo (Tabla 3-18). En el caso del presente trabajo, el decremento del coeficiente de flexibilidad de referencia ($DC_{f_{ref}}(\text{total})$) tiene un valor de 539 KN·m/rad.

Tabla 3-18 Condiciones de contorno en las configuraciones sin daño y mínimas

| | Configuración Mínima | Configuración sin daño |
|--------------|-------------------------|---------------------------|
| Cf2 KN·m/rad | 0.2 | 5 |
| Cf3 KN·m/rad | 0.1 | 3 |

El estudio del índice de daño en función del decremento de frecuencia se ha realizado en dos fases:

Fase 1

En esta fase se detalla el procedimiento para el análisis del índice de daño según las variaciones incrementales de las condiciones de contorno para los 5 primeros tests de la calibración del modelo numérico (apartado 5.1.2).

En primer lugar, se calcula el índice de daño en el modelo numérico de dichos tests (Tabla 3-19).

El índice de daño aumenta desde 0 (test 1) correspondiente a la configuración sin daño, hasta el valor (0.113) de la configuración con los coeficientes de flexibilidad menores (test 5).

El test 2 tiene un índice de daño de 0.015. En este caso, la estructura tiene dos nodos con un coeficiente de flexibilidad del 75% del valor de la configuración sin daño.

Una vez se ha calculado el índice de daño, se calcula el decremento de la frecuencia según la fórmula 3-3 del apartado 3.2.3. Estos resultados se presentan en el apartado 7.1.

Tabla 3-19 Índice de daño de los tests 1-5, Fase 1, en el método de variaciones incrementales de las condiciones de contorno.

| FASE 1 | | | | | |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| NUMERICO | | | | | |
| TEST | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Nodos dañados | | 2 | 2 | 3 | 4 |
| Cf2 (KN·m/rad) | 5 | 3.75 | 0.5 | 0.5 | 0.3 |
| Cf3 (KN·m/rad) | 3 | 2.25 | 0.3 | 0.3 | 0.1 |
| D.Cf (KN·m/rad) | 0 | 8 | 28.8 | 43.2 | 60.8 |
| Ind. Daño | 0 | 0.015 | 0.054 | 0.080 | 0.113 |

Fase 2

En esta fase se realiza el análisis del índice de daño con una simulación numérica. Mediante el modelo numérico calibrado, en esta fase, se obtienen 4 realizaciones (Tabla 3-20) con un estado de daño más avanzado que la fase anterior. Para ello, se utilizan los resultados de los tests 6, 7, 8 y 9 de la sección 5.1.1.1.

En la configuración que tiene 15 barras dañadas (Figura 3-17a) con un coeficiente de flexibilidad mínimo (test 6), el índice de daño aumenta un 278% respecto el test 5.

En la configuración con 20 barras dañadas (Figura 3-17b, test 7) el índice de daño aumenta un 32% respecto el anterior.

Finalmente, en el test con todos los nodos dañados (test 9) se obtiene un índice de daño máximo (ID=1).

Tabla 3-20 Índice de daño de test 6, 7, 8, 9, fase 2, en el método de variaciones incrementales de las condiciones de contorno

| FASE 2 | | | | |
|-----------------|-------|-------|-------|-----|
| TEST | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Barras dañadas | 15 | 20 | 35 | 35 |
| Nodos dañados | 30 | 40 | 70 | 70 |
| Cf2 (KN·m/rad) | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.2 |
| Cf3 (KN·m/rad) | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| D.Cf (KN·m/rad) | 228 | 304 | 532 | 539 |
| Ind. Daño | 0.428 | 0.564 | 0.987 | 1 |

Las frecuencias y decrementos de frecuencias de las dos fases del proceso se presentan en el apartado de resultados 7.1.

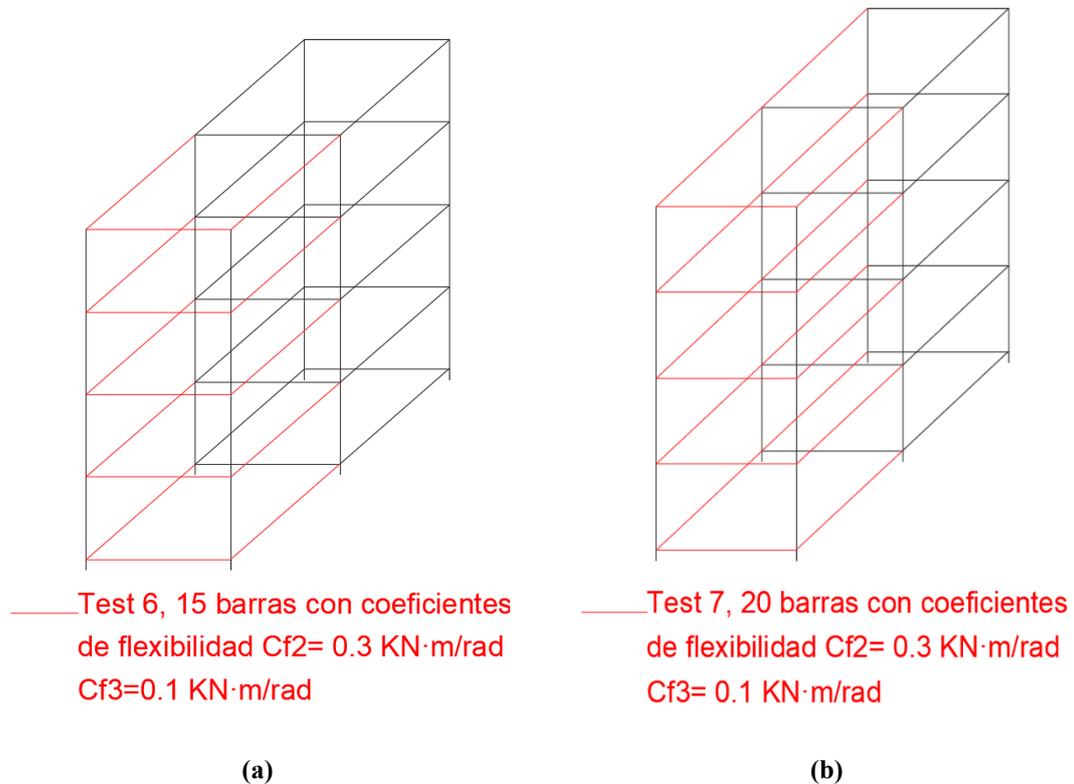


Figura 3-17 (a) Test 6. Estructura que asigna a 15 barras (en rojo) los coeficientes de flexibilidad de $Cf_2 = 0.3 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf_3 = 0.1 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$. (b) Test 7. Estructura que asigna a 20 barras (en rojo) los coeficientes de flexibilidad de $Cf_2 = 0.3 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf_3 = 0.1 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$.

3.4.2 Método probabilista automático

Debido a que el proceso del apartado anterior es una primera aproximación manual con 9 puntos, en este apartado se calcula el índice de daño con el mismo programa probabilístico automático utilizado en el apartado 3.2.2.3.

El objetivo final es efectuar el análisis del índice de daño utilizando el programa para un gran número de realizaciones (5000). Pero debido a que el tiempo de ejecución de las 5000 realizaciones es de 41.6 horas, previamente se realiza un estudio inicial utilizando el programa con 15 realizaciones, que tarda 7.5 min en ejecutarse; de esta manera se puede repetir fácilmente la ejecución en varios intervalos, y así, garantizar la viabilidad del proceso antes de iniciar la ejecución de las 5000 realizaciones.

El programa con 15 realizaciones se utiliza en los 4 intervalos de las condiciones de contorno de los 4 tests del apartado 3.2.2.3.1 para explorar todos los valores posibles del índice de daño. Finalmente, se efectúa el test 5 que reagrupa todas las realizaciones de los 4 tests anteriores en una misma gráfica para analizar la tendencia de los datos. Pero el hecho de combinar puntos de diferentes muestreos con diferentes intervalos de los coeficientes de flexibilidad, introduce un sesgo en el resultado estadístico.

El programa con 5000 realizaciones permite realizar un estudio completo del índice de daño y garantizar la fiabilidad del método de Monte Carlo. Además, el problema del sesgo del apartado anterior se elimina. El proceso se ha dividido en 4 etapas para conseguir el objetivo principal del presente trabajo, es decir, la relación entre el índice de daño y las componentes principales. La primera etapa es la obtención del ajuste de las 5000 muestras del proceso. En la segunda etapa se han realizado las curvas de excedencia o de fragilidad. En la tercera etapa se han calculado los índices de daño medio definidos en el apartado 2.10. En la etapa final, se ha incluido en la gráfica del índice de daño, los puntos de la fase 1 y 2 del apartado 3.4.1. Esta gráfica permite determinar la relación entre índice de daño y las componentes principales puesto que en los tests de la fase 1 se calcularon el número de componentes (apartado 3.3).

4 RESULTADOS DE LA VARIACIÓN FRECUENCIAL SEGÚN LA TEMPERATURA

Este capítulo presenta los resultados de las respuestas frecuenciales del modelo experimental en forma de matrices. El capítulo está compuesto por 5 apartados para cada uno de los tests experimentales.

Tal como se detalló en la sección 3.1.5.2, la formación de las matrices frecuenciales, se realiza mediante un Pick-Picking de las frecuencias naturales de los autoespectros para las frecuencias inferiores al modo 13. Debido a que por encima de este modo los picos de las frecuencias naturales son irregulares y no lineales. Las frecuencias no son estables y dificulta determinar el valor, tal como se aprecia en el final del espectro de la Figura 3-12 (sección 3.1.5.2). Este mismo patrón se repite en todos los ensayos experimentales.

El objetivo del capítulo es formar las matrices frecuenciales para el posterior análisis de componentes principales.

4.1 Resultados del test 1: Estructura sin daño

El test 1 se ha realizado en la estructura sin daño. Para ello, el par de apriete de todos los tornillos de la estructura ha sido de 5.1 N·m. En el Test 1 se han realizado trece ensayos con temperaturas variando entre 20.50°C y 30.60°C (Tabla 4-1). La fecha del test, la temperatura ambiente y la temperatura de la estructura están presentadas en las columnas de la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Temperatura ambiente, temperatura de la estructura y fecha del test 1 (Configuración sin daño).

| Número ensayo | Fecha ensayo | Temp. ambiente (°C) | Temp. estructura (°C) |
|---------------|--------------|---------------------|-----------------------|
| 1 | 17/07/2019 | 31.2 | 30.6 |
| 2 | 17/07/2019 | 30.8 | 29.6 |
| 3 | 17/07/2019 | 30.2 | 28.9 |
| 4 | 23/07/2019 | 29 | 28.8 |
| 5 | 23/07/2019 | 28.7 | 29.4 |
| 6 | 23/07/2019 | 28.2 | 26.4 |
| 7 | 24/07/2019 | 27.4 | 20.5 |
| 8 | 24/07/2019 | 26 | 22.3 |
| 9 | 24/07/2019 | 25.5 | 23.3 |
| 10 | 24/07/2019 | 24.5 | 24.7 |
| 11 | 24/07/2019 | 23.5 | 24 |
| 12 | 25/07/2019 | 22.3 | 27.3 |
| 13 | 25/07/2019 | 21.2 | 27.3 |

Las frecuencias de los modos se han recogido y se han puesto en una tabla (4-2) en orden creciente. Cada fila es un ensayo con temperatura diferente. Cada columna es la frecuencia para cada uno de los 13 modos de vibración. Esta matriz se ha podido formar porque todos los espectros han presentado frecuencias similares desde los números 1 hasta el 13. La frecuencia del modo 1, en naranja, únicamente se ha presentado en los canales transversales.

Tabla 4-2 Frecuencias (Hz) de los modos de vibración en el test 1, configuración sin daño. Las filas indican el número de ensayo con diferentes temperaturas. En la última fila se indica la desviación estándar de las frecuencias modales.

| FRECUENCIAS (Hz) | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Modos de vibración | | | | | | | | | | | | | |
| Núm. ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 1 | 2.64 | 2.703 | 3.781 | 7.672 | 9.281 | 9.609 | 12.14 | 13.33 | 15.22 | 17.67 | 18.77 | 19.77 | 21.25 |
| 2 | 2.64 | 2.687 | 3.781 | 7.687 | 9.281 | 9.609 | 12.09 | 13.34 | 15.25 | 17.67 | 18.77 | 19.73 | 21.27 |
| 3 | 2.66 | 2.703 | 3.797 | 7.687 | 9.281 | 9.625 | 12.17 | 13.36 | 15.28 | 17.69 | 18.8 | 19.78 | 21.27 |
| 4 | 2.66 | 2.703 | 3.797 | 7.703 | 9.281 | 9.625 | 12.19 | 13.36 | 15.28 | 17.7 | 18.8 | 19.8 | 21.3 |
| 5 | 2.64 | 2.703 | 3.797 | 7.703 | 9.281 | 9.625 | 12.17 | 13.37 | 15.27 | 17.7 | 18.8 | 19.8 | 21.31 |
| 6 | 2.66 | 2.703 | 3.797 | 7.703 | 9.297 | 9.64 | 12.22 | 13.37 | 15.31 | 17.72 | 18.83 | 19.81 | 21.31 |
| 7 | 2.66 | 2.703 | 3.797 | 7.703 | 9.297 | 9.64 | 12.19 | 13.36 | 15.23 | 17.7 | 18.81 | 19.81 | 21.3 |
| 8 | 2.66 | 2.703 | 3.797 | 7.703 | 9.297 | 9.64 | 12.22 | 13.36 | 15.27 | 17.72 | 18.86 | 19.81 | 21.31 |
| 9 | 2.66 | 2.703 | 3.797 | 7.687 | 9.297 | 9.64 | 12.2 | 13.3 | 15.27 | 17.72 | 18.86 | 19.77 | 21.31 |
| 10 | 2.66 | 2.703 | 3.797 | 7.687 | 9.297 | 9.64 | 12.22 | 13.3 | 15.27 | 17.7 | 18.84 | 19.77 | 21.31 |
| 11 | 2.66 | 2.703 | 3.797 | 7.672 | 9.297 | 9.64 | 12.2 | 13.28 | 15.25 | 17.72 | 18.87 | 19.77 | 21.31 |
| 12 | 2.66 | 2.703 | 3.797 | 7.672 | 9.297 | 9.64 | 12.23 | 13.27 | 15.27 | 17.72 | 18.89 | 19.77 | 21.31 |
| 13 | 2.66 | 2.703 | 3.797 | 7.672 | 9.297 | 9.64 | 12.22 | 13.27 | 15.31 | 17.72 | 18.89 | 19.77 | 21.33 |
| Desv.Std(Hz) | 0.0066 | 0.0044 | 0.0060 | 0.0134 | 0.0081 | 0.0120 | 0.0395 | 0.0391 | 0.0262 | 0.0185 | 0.0418 | 0.0234 | 0.0222 |

La desviación estándar de las frecuencias modales (Tabla 4-2) en el test no dañado es menor a 0.016 Hz para los 6 primeros modos y menor que 0.05 Hz para los otros modos mientras que la resolución frecuencial de los tests es de 0.016 Hz. La desviación estándar media de las frecuencias es de 0.020Hz.

4.2 Resultados del test 2: Estructura con daño medio en 2 nodos

El test 2 se ha realizado en la estructura con un daño medio en dos nodos. En esta estructura los tornillos en los nodos 3 y 8, de las barras longitudinales y transversales, tenían un par de apriete 2.5 N·m. En el test 2 se han realizado 11 ensayos variando la temperatura entre 20.50°C y 30.00°C (Tabla 4-3).

Tabla 4-3 Temperatura ambiente, temperatura de la estructura y fecha del test 2.

| Número Ensayo | Fecha ensayo | Temp. Ambiente (°C) | Temp. estructura (°C) |
|---------------|--------------|---------------------|-----------------------|
| 1 | 30-jul | 24.65 | 23.0 |
| 2 | 30-jul | 26.20 | 24.9 |
| 3 | 30-jul | 27.40 | 26.4 |
| 4 | 31-jul | 31.45 | 30.0 |
| 5 | 31-jul | 30.30 | 29.0 |
| 6 | 31-jul | 29.30 | 27.5 |
| 7 | 01-ago | 20.10 | 20.5 |
| 8 | 01-ago | 21.40 | 21.2 |
| 9 | 01-ago | 22.55 | 22.2 |
| 10 | 01-ago | 23.50 | 24.1 |
| 11 | 01-ago | 24.40 | 23.9 |

Las frecuencias de los modos se han recogido y se han puesto en el mismo orden tal como se aprecia en la Tabla 4-4 formando la matriz del test 2. Cada fila es un ensayo con temperatura diferente. Cada columna es la frecuencia para cada uno de los 13 modos de vibración. Al igual que en el test 1, todos los espectros presentan una frecuencia similar desde los números 1 hasta el 13 y la frecuencia del modo 1, en naranja, únicamente se presenta en los canales transversales.

Tabla 4-4 Frecuencias (Hz) de los modos de vibración en el test 2. Las filas indican el número de ensayo con diferentes temperaturas. En la última fila se indica la desviación estándar de las frecuencias modales.

| FRECUENCIAS (Hz) | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Modos de vibración | | | | | | | | | | | | | |
| Núm. ensayo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 1 | 2.641 | 2.703 | 3.781 | 7.687 | 9.281 | 9.625 | 12.22 | 13.31 | 15.28 | 17.72 | 18.87 | 19.77 | 21.28 |
| 2 | 2.641 | 2.703 | 3.781 | 7.687 | 9.281 | 9.625 | 12.19 | 13.33 | 15.3 | 17.72 | 18.86 | 19.77 | 21.3 |
| 3 | 2.641 | 2.703 | 3.781 | 7.687 | 9.281 | 9.609 | 12.17 | 13.33 | 15.23 | 17.69 | 18.83 | 19.75 | 21.28 |
| 4 | 2.641 | 2.703 | 3.781 | 7.687 | 9.281 | 9.625 | 12.17 | 13.33 | 15.23 | 17.69 | 18.81 | 19.75 | 21.27 |
| 5 | 2.641 | 2.687 | 3.781 | 7.687 | 9.281 | 9.625 | 12.2 | 13.34 | 15.28 | 17.7 | 18.83 | 19.77 | 21.27 |
| 6 | 2.641 | 2.703 | 3.781 | 7.703 | 9.281 | 9.625 | 12.2 | 13.34 | 15.28 | 17.7 | 18.86 | 19.77 | 21.27 |
| 7 | 2.641 | 2.703 | 3.781 | 7.656 | 9.297 | 9.64 | 12.2 | 13.23 | 15.28 | 17.72 | 18.91 | 19.72 | 21.28 |
| 8 | 2.641 | 2.703 | 3.797 | 7.656 | 9.297 | 9.64 | 12.16 | 13.23 | 15.28 | 17.72 | 18.89 | 19.72 | 21.28 |
| 9 | 2.641 | 2.703 | 3.781 | 7.672 | 9.281 | 9.625 | 12.14 | 13.25 | 15.27 | 17.69 | 18.87 | 19.72 | 21.28 |
| 10 | 2.641 | 2.703 | 3.781 | 7.672 | 9.281 | 9.625 | 12.16 | 13.27 | 15.27 | 17.7 | 18.87 | 19.73 | 21.28 |
| 11 | 2.641 | 2.703 | 3.781 | 7.672 | 9.281 | 9.625 | 12.14 | 13.28 | 15.25 | 17.7 | 18.84 | 19.73 | 21.27 |
| Desv.Std(Hz) | 0.0000 | 0.0048 | 0.0048 | 0.0145 | 0.0065 | 0.0083 | 0.0265 | 0.0439 | 0.0223 | 0.0129 | 0.0289 | 0.0221 | 0.0087 |

La desviación estándar de las frecuencias medidas para el test 2 (Tabla 4-3) es menor que la resolución (0.016 Hz) para los primeros 6 modos, el décimo y el decimotercero. La

media de la desviación estándar (0.0157 Hz) es menor en un 21% a la media de la desviación estándar del test sin daño.

4.3 Resultados del test 3: Estructura con daño alto en 2 nodos

El test 3 se ha realizado en la estructura con un daño alto en dos conexiones. En esta estructura los tornillos en los nodos 3 y 8, de las barras longitudinales y transversales tienen un par de apriete 0 N·m.

En el test 3 se han realizado 13 ensayos variando la temperatura entre 20.20°C y 29.10°C. (Tabla 4-5).

Tabla 4-5 Temperatura ambiente, temperatura de la estructura y fecha del test 3.

| RESULTADOS DEL TEST 3: Estructura con daño alto en dos nodos | | | |
|---|---------------------|----------------------------|------------------------------|
| Núm.ensayo | Fecha ensayo | Temp. ambiente (°C) | Temp. estructura (°C) |
| 1 | 13-sep-19 | 19.55 | 20.2 |
| 2 | 13-sep-19 | 20.06 | 21 |
| 3 | 16-sep-19 | 21.65 | 20.9 |
| 4 | 19-sep-19 | 30.05 | 29.1 |
| 5 | 19-sep-19 | 29.3 | 26.6 |
| 6 | 19-sep-19 | 28.7 | 27 |
| 7 | 19-sep-19 | 28.35 | 26.4 |
| 8 | 19-sep-19 | 27.15 | 25.7 |
| 9 | 19-sep-19 | 25.75 | 24.7 |
| 10 | 19-sep-19 | 24.9 | 22.9 |
| 11 | 19-sep-19 | 23.95 | 21.6 |
| 12 | 19-sep-19 | 23.45 | 23.3 |
| 13 | 19-sep-19 | 22.8 | 22.7 |

Las frecuencias de los modos se han recogido y se han puesto en el mismo orden como se aprecia en la Tabla 4-6 formando la matriz del test 3.

Cada fila es un ensayo con temperatura diferente. Cada columna es la frecuencia para cada uno de los 13 modos de vibración. Al igual que en el test 1 todos los espectros presentan una frecuencia similar desde los números 2 hasta el 13 y la frecuencia. La frecuencia del modo 1, que corresponde a la forma modal transversal, en este caso no se detecta probablemente porque esta confundida con la frecuencia del modo 2, que corresponde a la forma modal longitudinal.

Tabla 4-6 Frecuencias (Hz) de los modos de vibración en el test 3. Las filas indican el número de ensayo con diferentes temperaturas. En la última fila se indica la desviación estándar de las frecuencias modales.

| FRECUENCIAS (Hz) | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Modos de vibración | | | | | | | | | | | | |
| Núm. ensayo | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 1 | 2.58 | 3.672 | 7.391 | 9.203 | 9.547 | 11.97 | 12.86 | 15.09 | 17.59 | 18.59 | 19.33 | 20.81 |
| 2 | 2.58 | 3.672 | 7.391 | 9.203 | 9.547 | 11.95 | 12.86 | 15.06 | 17.59 | 18.58 | 19.33 | 20.78 |
| 3 | 2.58 | 3.678 | 7.422 | 9.219 | 9.562 | 12 | 12.98 | 15.17 | 17.59 | 18.61 | 19.39 | 20.89 |
| 4 | 2.56 | 3.672 | 7.422 | 9.203 | 9.547 | 11.97 | 13.05 | 15.14 | 17.61 | 18.53 | 19.34 | 20.83 |
| 5 | 2.56 | 3.672 | 7.437 | 9.203 | 9.547 | 12 | 13.05 | 15.16 | 17.61 | 18.53 | 19.36 | 20.84 |
| 6 | 2.56 | 3.672 | 7.422 | 9.203 | 9.562 | 12 | 13.06 | 15.16 | 17.61 | 18.55 | 19.36 | 20.84 |
| 7 | 2.56 | 3.672 | 7.422 | 9.203 | 9.562 | 12 | 13.05 | 15.16 | 17.61 | 18.53 | 19.36 | 20.84 |
| 8 | 2.56 | 3.672 | 7.422 | 9.203 | 9.562 | 11.98 | 13.03 | 15.17 | 17.61 | 18.55 | 19.34 | 20.84 |
| 9 | 2.56 | 3.672 | 7.422 | 9.203 | 9.562 | 11.98 | 13.02 | 15.17 | 17.61 | 18.56 | 19.33 | 20.84 |
| 10 | 2.56 | 3.672 | 7.422 | 9.203 | 9.562 | 11.98 | 13 | 15.12 | 17.62 | 18.58 | 19.31 | 20.86 |
| 11 | 2.56 | 3.672 | 7.422 | 9.203 | 9.562 | 11.98 | 12.98 | 15.19 | 17.61 | 18.59 | 19.31 | 20.84 |
| 12 | 2.56 | 3.672 | 7.406 | 9.203 | 9.562 | 11.97 | 12.98 | 15.16 | 17.61 | 18.62 | 19.31 | 20.86 |
| 13 | 2.56 | 3.672 | 7.406 | 9.203 | 9.562 | 11.95 | 12.97 | 15.16 | 17.61 | 18.59 | 19.31 | 20.84 |
| Desv.Std.(Hz) | 0.0070 | 0.0017 | 0.0135 | 0.0044 | 0.0072 | 0.0175 | 0.0663 | 0.0364 | 0.0096 | 0.0310 | 0.0250 | 0.0256 |

Para el caso del test 3, la desviación estándar es menor que 0.016 Hz (resolución) para los 6 primeros modos y el décimo (Tabla 4-6). La media de la desviación estándar (0.03983 Hz) es mayor en un 98% a la media de la desviación estándar del test sin daño.

4.4 Resultados del test 4: Estructura con daño alto en 3 nodos

El test 4 se ha realizado en una estructura con un daño alto en tres conexiones. En esta estructura los tornillos en los nodos 2, 3 y 8, de las barras longitudinales y transversales, tienen un par de apriete 0 KN·m.

En el test 4 se han realizado 13 ensayos variando la temperatura entre 19.00°C y 28.50°C. (Tabla 4-7). Esta tabla muestra los datos del test: La fecha, la temperatura ambiente, la temperatura de la estructura.

Tabla 4-7 Temperatura ambiente, temperatura de la estructura y fecha del test 4.

| RESULTADOS DEL TEST 4: Estructura con daño alto en tres nodos | | | |
|---|--------------|---------------------|-----------------------|
| Núm. Ensayo | Fecha ensayo | Temp. ambiente (°C) | Temp. Estructura (°C) |
| 1 | 26-ago | 29.15 | 28.5 |
| 2 | 26-ago | 28.05 | 27.4 |
| 3 | 26-ago | 27.15 | 25.7 |
| 4 | 26-ago | 26.35 | 24.9 |

| | | | |
|----|--------|-------|------|
| 5 | 26-ago | 26.35 | 24.5 |
| 6 | 27-ago | 19.4 | 19 |
| 7 | 27-ago | 20.15 | 19.6 |
| 8 | 27-ago | 20.75 | 20.2 |
| 9 | 27-ago | 21.6 | 22 |
| 10 | 27-ago | 22.05 | 21.5 |
| 11 | 27-ago | 23 | 23 |
| 12 | 27-ago | 23.95 | 23.5 |
| 13 | 27-ago | 29.45 | 28.3 |

Las frecuencias de los modos se recogen y se ponen en el mismo orden como se aprecia en la Tabla 4-8 formando la matriz del test 4. Cada fila es un ensayo con temperatura diferente. Cada columna es la frecuencia para cada modo de vibración. La Tabla 4-8 muestra la matriz de las frecuencias del test 4, desde los modos 2 hasta el 13 para cada temperatura. Todos los espectros presentan una frecuencia similar desde los números 2 hasta el 13. El modo 1, que corresponde a la forma modal transversal, en este caso no se detecta probablemente porque esta confundida con la frecuencia 2, que corresponde a la forma modal longitudinal.

Tabla 4-8 Frecuencias (Hz) de los modos de vibración en el test 4. Las filas indican el número de ensayo con diferentes temperaturas. En la última fila se indica la desviación estándar de las frecuencias modales.

| FRECUENCIAS (Hz) | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Modos de frecuencia | | | | | | | | | | | | |
| Núm. ensayo | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 1 | 2.5 | 3.594 | 7.156 | 9.109 | 9.344 | 11.67 | 12.84 | 14.86 | 17.45 | 18.45 | 19.06 | 20.53 |
| 2 | 2.516 | 3.594 | 7.156 | 9.125 | 9.344 | 11.72 | 12.87 | 14.94 | 17.3 | 18.45 | 19.11 | 20.58 |
| 3 | 2.5 | 3.594 | 7.156 | 9.125 | 9.359 | 11.73 | 12.87 | 14.95 | 17.48 | 18.48 | 19.11 | 20.58 |
| 4 | 2.516 | 3.594 | 7.156 | 9.125 | 9.359 | 11.73 | 12.87 | 14.97 | 17.47 | 18.48 | 19.09 | 20.58 |
| 5 | 2.516 | 3.594 | 7.156 | 9.125 | 9.359 | 11.73 | 12.87 | 14.97 | 17.48 | 18.48 | 19.09 | 20.58 |
| 6 | 2.516 | 3.594 | 7.156 | 9.141 | 9.375 | 11.72 | 12.84 | 14.87 | 17.48 | 18.55 | 19.06 | 20.61 |
| 7 | 2.516 | 3.594 | 7.156 | 9.141 | 9.375 | 11.72 | 12.86 | 14.92 | 17.5 | 18.53 | 19.08 | 20.61 |
| 8 | 2.516 | 3.594 | 7.156 | 9.141 | 9.359 | 11.7 | 12.86 | 14.92 | 17.48 | 18.53 | 19.08 | 20.59 |
| 9 | 2.516 | 3.594 | 7.172 | 9.141 | 9.359 | 11.72 | 12.86 | 14.92 | 17.48 | 18.52 | 19.09 | 20.61 |
| 10 | 2.5 | 3.594 | 7.156 | 9.125 | 9.359 | 11.72 | 12.86 | 14.89 | 17.48 | 18.52 | 19.11 | 20.59 |
| 11 | 2.516 | 3.594 | 7.156 | 9.125 | 9.359 | 11.72 | 12.86 | 14.98 | 17.48 | 18.5 | 19.11 | 20.59 |
| 12 | 2.516 | 3.594 | 7.156 | 9.125 | 9.359 | 11.75 | 12.87 | 14.95 | 17.47 | 18.5 | 19.11 | 20.61 |
| 13 | 2.516 | 3.594 | 7.156 | 9.125 | 9.344 | 11.73 | 12.87 | 14.92 | 17.47 | 18.44 | 19.11 | 20.56 |
| Desv.Std.(Hz) | 0.0070 | 0.0000 | 0.0044 | 0.0096 | 0.0099 | 0.0187 | 0.0107 | 0.0377 | 0.0502 | 0.0348 | 0.0189 | 0.0229 |

Para el caso de daño alto en tres nodos, la desviación estándar de las frecuencias es menor que la frecuencia de resolución (0.016 Hz) en los 6 primeros modos y el octavo (Tabla

4-8) y la media de la desviación estándar (0.0187 Hz) es un poco menor que la media de la desviación estándar del test no dañado.

4.5 Resultados del test 5: Estructura con daño alto en 4 nodos

El test 5 se ha realizado en una estructura con un daño alto en 4 conexiones. En esta estructura los tornillos en los nodos 2, 3, 7 y 8, de las barras longitudinales y transversales, se han fijado con un par de apriete 0 N·m.

En el test 5 se han realizado 12 ensayos variando la temperatura entre 19.20°C y 29.50°C. (Tabla 4-9). Esta tabla muestra los datos del test 5: La fecha, la temperatura ambiente, la temperatura de la estructura.

Tabla 4-9 Temperatura ambiente, temperatura de la estructura y fecha del test 5.

| RESULTADOS DEL TEST 5: Estructura con daño alto en cuatro nodos | | | |
|--|---------------------|----------------------------|------------------------------|
| Número ensayo | Fecha ensayo | Temp. ambiente (°C) | Temp. estructura (°C) |
| 1 | 28/08/2019 | 29.75 | 29.5 |
| 2 | 28/08/2019 | 28.7 | 29.2 |
| 3 | 28/08/2019 | 27.8 | 26.8 |
| 4 | 28/08/2019 | 27 | 25.8 |
| 5 | 29/08/2019 | 19.4 | 19.2 |
| 6 | 29/08/2019 | 20.1 | 20.4 |
| 7 | 29/08/2019 | 21.1 | 21.3 |
| 8 | 29/08/2019 | 22.05 | 22.3 |
| 9 | 29/08/2019 | 23 | 22.4 |
| 10 | 29/08/2019 | 23.95 | 23.8 |
| 11 | 29/08/2019 | 25.2 | 27.2 |
| 12 | 29/08/2019 | 26 | 26.3 |

Las frecuencias de los modos se recogen y se ponen en el mismo orden como se aprecia en la Tabla 4-10 formando la matriz del test 5. Cada fila es un ensayo con temperatura diferente. Cada columna es la frecuencia para cada modo de vibración. La Tabla 4-10 muestra la matriz de las frecuencias del test 5, desde los modos 2 hasta el 13 para cada temperatura. Todos los espectros presentan una frecuencia similar desde el modo 2 hasta el 13. El modo 1, que corresponde a la forma modal transversal, en este caso no se detecta probablemente porque esta confundida con la frecuencia modal 2, que corresponde a la forma modal longitudinal.

Tabla 4-10 Frecuencias (Hz) de los modos de vibración en el test 5. Las filas indican el número de ensayo con diferentes temperaturas. En la última fila se indica la desviación estándar de las frecuencias modales.

| FRECUCIAS (Hz) | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Modos de frecuencia | | | | | | | | | | | | |
| Núm. ensayo | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 1 | 2.453 | 3.5 | 6.875 | 8.906 | 9.156 | 11.22 | 12.52 | 14.64 | 17.19 | 18.37 | 19 | 20.16 |
| 2 | 2.453 | 3.5 | 6.891 | 8.906 | 9.781 | 11.23 | 12.55 | 14.75 | 17.2 | 18.41 | 18.87 | 20.19 |
| 3 | 2.453 | 3.484 | 6.891 | 8.922 | 9.172 | 11.22 | 12.55 | 14.66 | 17.2 | 18.39 | 18.87 | 20.2 |
| 4 | 2.453 | 3.5 | 6.906 | 8.922 | 9.172 | 11.23 | 12.55 | 14.72 | 17.2 | 18.41 | 18.89 | 20.22 |
| 5 | 2.453 | 3.516 | 6.891 | 8.937 | 9.203 | 11.25 | 12.55 | 14.81 | 17.22 | 18.45 | 18.92 | 20.23 |
| 6 | 2.484 | 3.531 | 6.906 | 9.047 | 9.219 | 11.52 | 12.58 | 14.78 | 17.27 | 18.33 | 18.98 | 20.23 |
| 7 | 2.469 | 3.531 | 6.906 | 9.047 | 9.219 | 11.53 | 12.58 | 14.78 | 17.25 | 18.33 | 18.98 | 20.25 |
| 8 | 2.484 | 3.531 | 6.891 | 9.031 | 9.219 | 11.52 | 12.58 | 14.72 | 17.25 | 18.31 | 18.97 | 20.23 |
| 9 | 2.469 | 3.547 | 6.906 | 9.047 | 9.234 | 11.52 | 12.58 | 14.75 | 17.25 | 18.30 | 18.98 | 20.23 |
| 10 | 2.469 | 3.547 | 6.891 | 9.031 | 9.219 | 11.5 | 12.58 | 14.7 | 17.23 | 18.28 | 18.97 | 20.22 |
| 11 | 2.469 | 3.531 | 6.906 | 9.031 | 9.203 | 11.5 | 12.58 | 14.7 | 17.22 | 18.27 | 18.98 | 20.2 |
| 12 | 2.469 | 3.547 | 6.906 | 9.031 | 9.203 | 11.52 | 12.59 | 14.7 | 17.25 | 18.27 | 18.98 | 20.2 |
| Desv.Std.(Hz) | 0.0118 | 0.0216 | 0.0102 | 0.0622 | 0.1689 | 0.1475 | 0.0211 | 0.0504 | 0.0263 | 0.0612 | 0.3020 | 0.0242 |

La desviación estándar de las frecuencias para el test 5 (Tabla 4-10) es mayor que la frecuencia de resolución (0.016 Hz) en la mayoría de modos (solo el segundo y el cuarto modo tienen una desviación estándar menor) y la media de la desviación estándar (0.0756 Hz) es mayor que la del test no dañado (276%).

5 RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL

En este capítulo se muestran los resultados más importantes del análisis modal para calibrar el modelo numérico y experimental. El análisis se realiza para cada test experimental. Además, se presentan los resultados del MAC factor para validar el modelo de la configuración sin daño.

5.1 Resultados del análisis modal numérico

Este apartado muestra los resultados para calibrar las condiciones de contorno del modelo numérico para los cinco tests experimentales.

5.1.1 Resultados del modelo para el test 1

En este apartado se presentan los resultados de las técnicas para calibrar las condiciones de contorno de la configuración sin daño (test 1) detalladas en el apartado 3.2.2. El primer subapartado (5.1.1.1) presenta los resultados de las realizaciones con variaciones incrementales en las condiciones de contorno para calibrar los parámetros de la estructura; de esta manera se halla la configuración inicial.

Para mejorar el modelo, el siguiente subapartado (5.1.1.2) muestra los resultados del primer método con variaciones probabilistas de las condiciones de contorno, en donde, los coeficientes de flexibilidad varían según una función de densidad de probabilidad uniforme en unos intervalos de muestreo adaptados para buscar la mejor solución.

En el siguiente subapartado (5.1.1.3), se presentan los resultados del programa automático probabilista que mejora la velocidad y autonomía de la exploración de la mejor aproximación.

5.1.1.1 Variaciones incrementales del coeficiente de flexibilidad Cf2, Cf3

Para hallar la mejor aproximación numérica de la configuración sin daño, en este apartado se presentan los resultados variando por separado y de forma incremental los coeficientes de flexibilidad Cf2 y Cf3 (detallado en 3.2.2.1.1).

Por un lado, el valor mínimo de la media de los errores de las frecuencias según la variación de Cf3 (con Cf2 constante), se presenta en la realización 2 (Cf3=3 KN·m/rad) con un valor de 9.34% (En rojo en la Tabla 5-1, y el mínimo en la Figura 5-1). Por otro lado, si se realiza la variación de Cf2 con Cf3= 3 KN·m/rad constante, el valor mínimo está en la realización 8 (Cf2=5 KN·m/rad) y disminuye un 17.34% respecto el anterior (En rojo en la Tabla 5-2, y el mínimo en la Figura 5-2). Como primera conclusión, se

toma como configuración inicial de la estructura sin daño estas condiciones de contorno: $Cf2= 5KN \cdot m/rad$ y $Cf3= 3KN \cdot m/rad$.

En esta configuración solo hay 2 modos con el error de la frecuencia superior a 12% (3 y 4) y el error de la frecuencia modal 3 (20%) es el mayor de todos los modos (en rojo en la Tabla 5-2). El ajuste de este modo ha presentado problemas probablemente porque el modelo experimental tiene más rotación que el modelo numérico.

Los errores de las frecuencias modales 1 y 2 son muy estables en todas las realizaciones y presentan valores menores (6.5% y 3.3% respectivamente). Estos dos modos probablemente se han ajustado mejor porque se relacionan con la dirección transversal y longitudinal de los modelos experimental y numérico (5.1.3).

La frecuencia modal 5, 6 y la media presentan los errores mínimos (0.7%; 2.4%, 7.7%) de todas las realizaciones y tienen unas disminuciones del 89%, 60%, 17% respecto a la primera realización (Tabla 5-2).

Tabla 5-1 Seis primeras frecuencias y la media (y sus errores en %) de las 5 realizaciones para el método de variaciones incrementales en $Cf3$.

| Realización | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | | | | |
|---------------------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|
| Cf2 (KN·m/rad) | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | | | | | | |
| Cf3 (KN·m/rad) | 1 | 3 | 5 | 8 | 10 | | | | | | |
| Modo | Frec. Exp. (Hz) | Frec. Num. (Hz) | Error (%) | Frec. Num. (Hz) | Error (%) | Frec. Num. (Hz) | Error (%) | Frec. Num. (Hz) | Error (%) | Frec. Num. (Hz) | Error (%) |
| 1 | 2.656 | 2.003 | 24.597 | 2.485 | 6.442 | 2.663 | 0.261 | 2.789 | 5.019 | 2.837 | 6.817 |
| 2 | 2.703 | 2.233 | 17.389 | 2.792 | 3.304 | 2.998 | 10.903 | 3.143 | 16.288 | 3.198 | 18.322 |
| 3 | 3.797 | 2.605 | 31.386 | 3.014 | 20.614 | 3.175 | 16.371 | 3.292 | 13.293 | 3.337 | 12.116 |
| 4 | 7.672 | 7.728 | 0.736 | 8.687 | 13.226 | 9.045 | 17.892 | 9.298 | 21.188 | 9.393 | 22.428 |
| 5 | 9.297 | 8.526 | 8.289 | 9.880 | 6.265 | 10.393 | 11.784 | 10.758 | 15.717 | 10.897 | 17.205 |
| 6 | 9.640 | 9.279 | 3.749 | 10.235 | 6.174 | 10.619 | 10.154 | 10.899 | 13.055 | 11.006 | 14.167 |
| MEDIA | | | 14.358 | | 9.338 | | 11.228 | | 14.093 | | 15.176 |

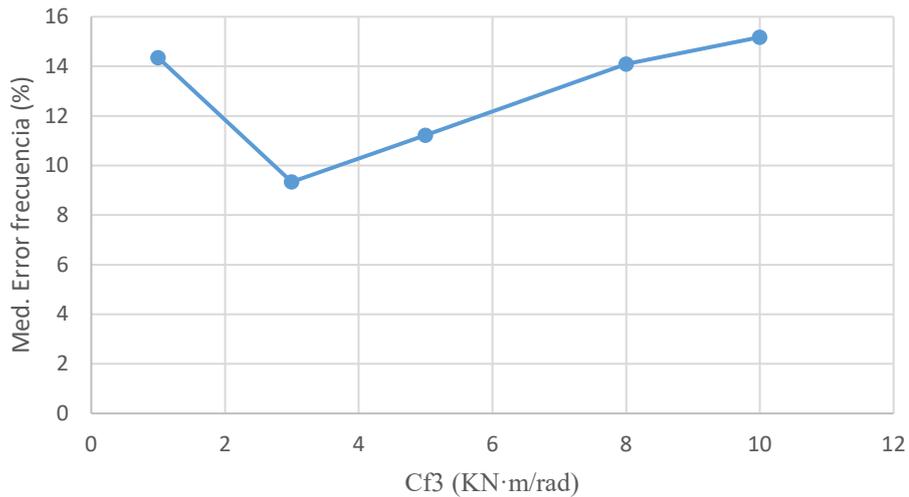


Figura 5-1 Curva de la media de los errores de las frecuencia (%) vs Cf3 (KN·m/rad) en el método de variaciones incrementales en Cf3.

Tabla 5-2 Seis primeras frecuencias y la media (y sus errores en %) de las diez realizaciones para el método de variaciones incrementales en Cf2.

| REALIZACIÓN | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | |
|----------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|
| Cf2 (KN.m/rad) | 35 | | 30 | | 25 | | 20 | | 15 | |
| Cf3 (KN.m/rad) | 3 | | 3 | | 3 | | 3 | | 3 | |
| Modo | Frec. Num. (Hz) | Error (%) |
| 1 | 2.485 | 6.428 | 2.485 | 6.432 | 2.485 | 6.436 | 2.485 | 6.442 | 2.485 | 6.452 |
| 2 | 2.792 | 3.304 | 2.792 | 3.304 | 2.792 | 3.304 | 2.792 | 3.304 | 2.792 | 3.304 |
| 3 | 3.015 | 20.601 | 3.015 | 20.604 | 3.015 | 20.608 | 3.014 | 20.614 | 3.014 | 20.623 |
| 4 | 8.695 | 13.333 | 8.693 | 13.308 | 8.690 | 13.274 | 8.687 | 13.226 | 8.681 | 13.151 |
| 5 | 9.880 | 6.266 | 9.880 | 6.265 | 9.880 | 6.265 | 9.880 | 6.265 | 9.879 | 6.265 |
| 6 | 10.247 | 6.295 | 10.244 | 6.268 | 10.241 | 6.230 | 10.235 | 6.174 | 10.226 | 6.080 |
| MEDIA | 9.371 | | 9.364 | | 9.353 | | 9.338 | | 9.313 | |

| REALIZACIÓN | 6 | | 7 | | 8 | | 9 | | 10 | |
|----------------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|---------------|-----------|
| Cf2 (KN.m/rad) | 10 | | 6 | | 5 | | 4 | | 2 | |
| Cf3 (KN.m/rad) | 3 | | 3 | | 3 | | 3 | | 3 | |
| Modo | Frec. | Error (%) | Frec. | Error (%) |
| 1 | 2.484 | 6.471 | 2.483 | 6.503 | 2.483 | 6.517 | 2.482 | 6.537 | 2.480 | 6.620 |
| 2 | 2.792 | 3.304 | 2.792 | 3.304 | 2.792 | 3.304 | 2.792 | 3.304 | 2.792 | 3.304 |
| 3 | 3.013 | 20.639 | 3.012 | 20.666 | 3.012 | 20.678 | 3.011 | 20.693 | 3.009 | 20.752 |
| 4 | 8.671 | 13.017 | 8.653 | 12.785 | 8.643 | 12.659 | 8.566 | 11.646 | 6.849 | 10.731 |
| 5 | 9.879 | 6.265 | 9.734 | 4.704 | 9.231 | 0.708 | 8.683 | 6.604 | 7.802 | 16.076 |
| 6 | 10.207 | 5.883 | 9.880 | 2.485 | 9.880 | 2.484 | 9.879 | 2.484 | 8.630 | 10.477 |
| MEDIA | 9.263 | | 8.408 | | 7.725 | | 8.545 | | 11.327 | |

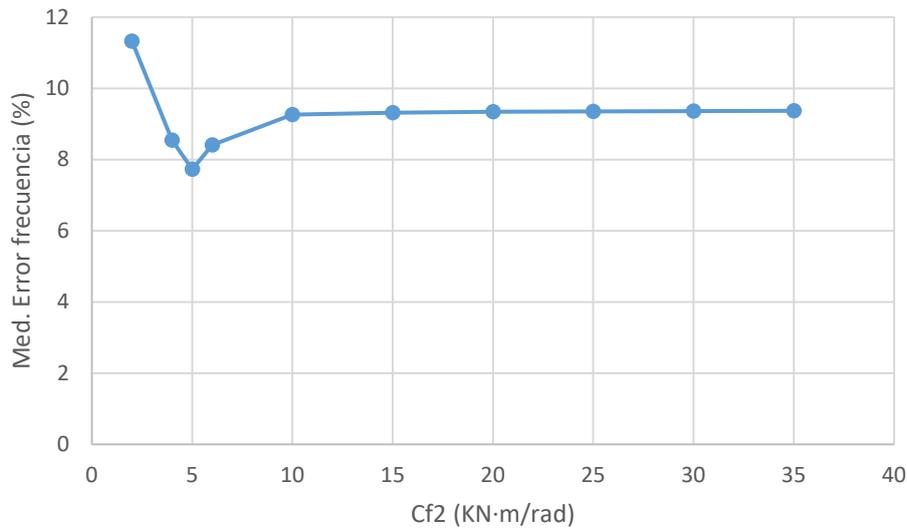


Figura 5-2 Media de los errores de las frecuencias (%) vs Cf2 (KN·m/rad) en el método de variaciones incrementales en Cf2.

Una vez se ha definido la configuración inicial, se analiza la evolución de las frecuencias con variaciones incrementales de las condiciones de contorno (Cf2 y Cf3) por separado. Este análisis sirve para estudiar la estabilidad de las frecuencias cerca de la configuración inicial.

a/ Variación incremental del coeficiente de flexibilidad Cf2, conservando Cf3 rígido

Esta sección muestra los resultados de la evolución de las frecuencias (La Figura 5-3 y la Tabla 5-3) en función de la variación incremental de Cf2. Cf3 se ha mantenido constante asumiendo un coeficiente de flexibilidad rígido.

Se observa que a partir del valor Cf2= 10KN·m/rad las frecuencias son máximas y se mantienen constante. Para Cf2>10KN·m/rad la rigidez de la unión se estabiliza, es decir, no hay cambios significativos en las propiedades modales del sistema.

Además, las frecuencias modales 1, 2 y 3 son constantes en todo el rango de Cf2, mientras que las frecuencias modales 4, 5, y 6 son constantes para Cf2>10KN·m/rad.

Tabla 5-3 Seis primeras frecuencias y la media (Hz) de las siete realizaciones con variaciones incrementales de Cf2.

| Evolución de las frecuencias (Hz) en función de Cf2 | | | | | | | |
|---|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| Cf3 (KN·m/rad) | R | R | R | R | R | R | R |
| Cf2 (KN·m/rad) | 0 | 1 | 5 | 10 | 20 | 30 | R |
| Modo 1 | 2.864 | 2.974 | 2.99 | 2.987 | 2.988 | 2.989 | 2.99 |
| Modo 2 | 3.345 | 3.372 | 3.37 | 3.372 | 3.372 | 3.372 | 3.372 |
| Modo 3 | 3.372 | 3.47 | 3.48 | 3.479 | 3.48 | 3.48 | 3.481 |

| | | | | | | | |
|---------------|-------|-------|------|-------|-------|--------|--------|
| Modo 4 | 3.493 | 5.735 | 9.37 | 9.664 | 9.692 | 9.702 | 9.721 |
| Modo 5 | 3.626 | 6.291 | 9.65 | 11.23 | 11.33 | 11.333 | 11.333 |
| Modo 6 | 9.461 | 9.545 | 10.8 | 11.38 | 11.35 | 11.363 | 11.382 |

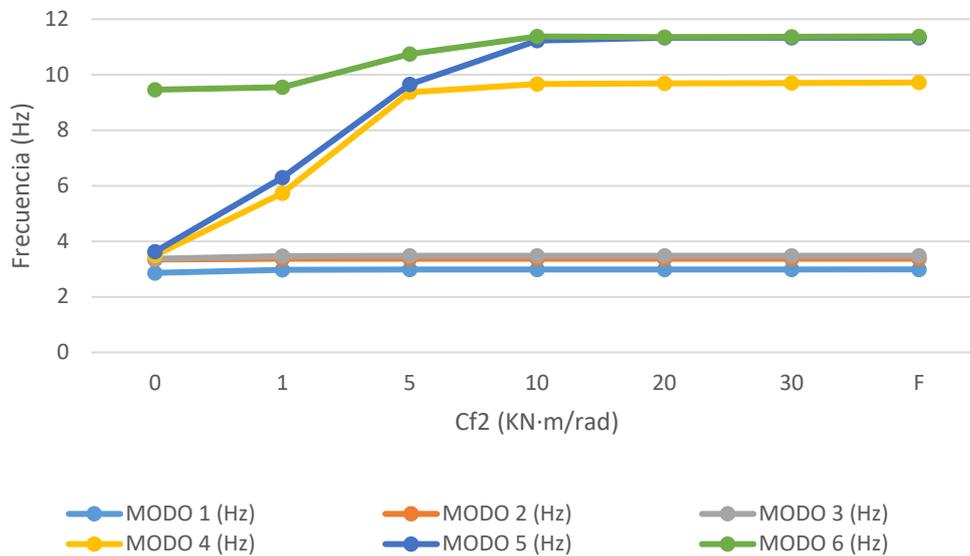


Figura 5-3 Evolución de las seis primeras frecuencias (Hz) con variaciones incrementales de Cf2 (KN·m/rad).

b/ Variación del coeficiente de flexibilidad Cf3, conservando Cf2 constante

Esta sección es similar a la anterior pero la variación incremental es en la variable Cf3 en lugar de Cf2. La Figura 5-4 y Tabla 5-4 muestran la evolución de las frecuencias en función de la variación incremental de Cf3 y Cf2 se ha mantenido constante y rígido. Para $Cf2 > 20 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ la rigidez de la unión se estabiliza, es decir, no hay cambios significativos en las propiedades modales del sistema.

Tanto en este caso como en el anterior, se observa que, las frecuencias de la configuración inicial ($Cf2 = 5 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$, $Cf3 = 3 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$) son ligeramente inferiores a la condición de máxima rigidez y que, en esta zona, las curvas son suavemente crecientes, por lo tanto, estos puntos se encuentran en una zona de bastante estabilidad y no hay cambios abruptos en la respuesta frecuencial de la estructura.

También se puede observar que las curvas de Cf3 son monótonamente creciente en todo el intervalo mientras que las curvas Cf2 son más constantes en todo el intervalo para los tres primeros modos y para los modos 4, 5 y 6 son más constantes a partir de $10 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$. Por lo tanto, se puede concluir que las frecuencias son más sensibles a las variaciones de Cf3.

Tabla 5-4 Seis primeras frecuencias de las nueve realizaciones con variaciones incrementales en Cf3.

| Evolución de las frecuencias (Hz) en función de Cf3 | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Cf2 (KN·m/rad) | R | R | R | R | R | R | R | R | R |
| Cf3 (KN·m/rad) | 0 | 0.5 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 | R |
| Modo 1 | 0.976 | 1.697 | 2.003 | 2.318 | 2.486 | 2.664 | 2.838 | 2.944 | 2.99 |
| Modo 2 | 0.979 | 1.873 | 2.233 | 2.599 | 2.792 | 2.998 | 3.198 | 3.32 | 3.372 |
| Modo 3 | 1.968 | 2.375 | 2.606 | 2.868 | 3.015 | 3.177 | 3.338 | 3.438 | 3.481 |
| Modo 4 | 6.097 | 7.165 | 7.739 | 8.365 | 8.704 | 9.066 | 9.418 | 9.631 | 9.721 |
| Modo 5 | 6.272 | 7.729 | 8.526 | 9.405 | 9.88 | 10.393 | 10.897 | 11.204 | 11.333 |
| Modo 6 | 7.906 | 8.772 | 9.296 | 9.909 | 10.259 | 10.645 | 11.035 | 11.278 | 11.382 |

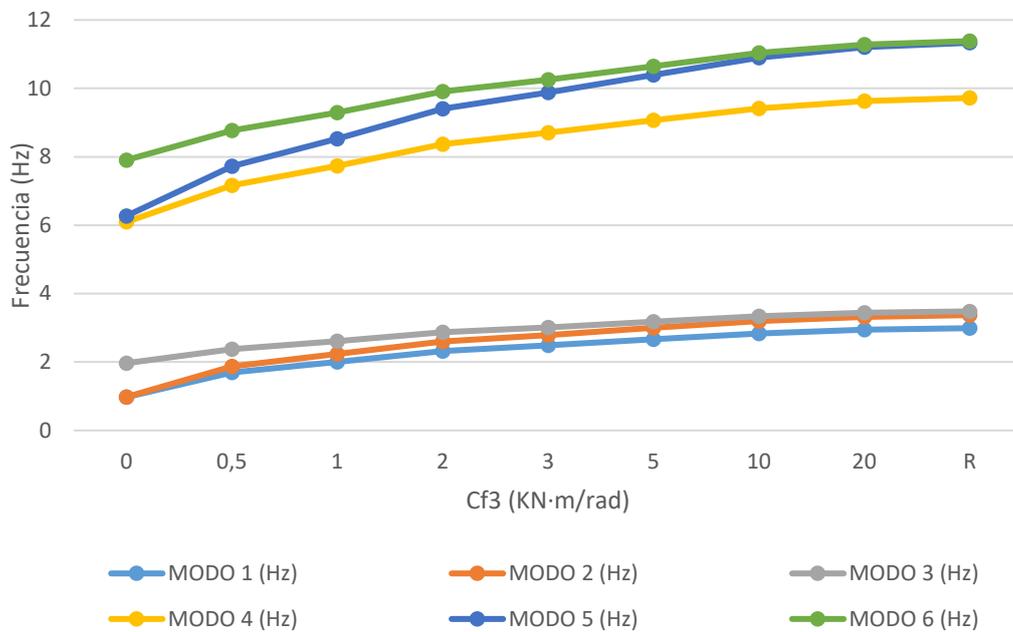


Figura 5-4 Evolución de las seis primeras frecuencias (Hz) con variaciones incrementales en Cf3.

5.1.1.2 Método de variaciones incrementales no homogéneas

En la configuración inicial del apartado anterior (Tabla 5-2), el error de la frecuencia modal 3 (forma modal de torsión) no tiene un buen ajuste. En este apartado se efectúan una serie de realizaciones no homogéneas, es decir, se introducen modificaciones de los coeficientes de flexibilidad en ciertas barras, para intentar mejorar los errores de las frecuencias relacionadas con la torsión. Los errores de las frecuencias se calculan según

la fórmula 3-1 del apartado 3.2.2. En la Tabla 5-5 y la Figura 5-5 se presentan los resultados.

Tabla 5-5 Resultados del método de variaciones incrementales no homogéneas. Frecuencias (Hz) y los errores de frecuencias (%) de los 6 primeros modos y la media.

| Realización | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Modo | Frec. Num. (Hz) | Error frec. (%) | Frec. Num. (Hz) | Error frec. (%) | Frec. Num. (Hz) | Error. Frec. (%) | Frec. Num. (Hz) | Error frec. (%) | Frec. Num. (Hz) | Error frec. (%) |
| 1 | 2.483 | 6.51 | 2.792 | 5.12 | 2.484 | 6.48 | 2.663 | 0.26 | 2.003 | 24.59 |
| 2 | 2.792 | 3.29 | 2.987 | 10.51 | 2.36 | 12.69 | 2.792 | 3.29 | 2.757 | 2.00 |
| 3 | 3.012 | 20.67 | 3.324 | 12.46 | 3.249 | 14.43 | 3.12 | 17.83 | 2.792 | 26.47 |
| 4 | 8.643 | 12.66 | 9.65 | 25.78 | 8.667 | 12.97 | 9.041 | 17.84 | 7.742 | 0.91 |
| 5 | 9.231 | 0.71 | 9.88 | 6.27 | 9.99 | 7.45 | 9.88 | 6.27 | 9.585 | 3.10 |
| 6 | 9.88 | 2.49 | 11.04 | 14.52 | 10.142 | 5.21 | 10.515 | 9.08 | 9.88 | 2.49 |
| Media | | 7.72 | | 12.44 | | 9.87 | | 9.10 | | 9.93 |

| Realización | 6 | | 7 | | 8 | | 9 | |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Modo | Frec. Num. (Hz) | Error frec. (%) |
| 1 | 2.003 | 24.59 | 2.187 | 17.66 | 2.236 | 15.81 | 2.252 | 15.21 |
| 2 | 2.766 | 2.33 | 2.89 | 6.92 | 2.925 | 8.21 | 2.928 | 8.32 |
| 3 | 2.993 | 21.17 | 3.059 | 19.44 | 3.164 | 16.67 | 3.185 | 16.12 |
| 4 | 7.746 | 0.96 | 7.982 | 4.04 | 8.106 | 5.66 | 8.302 | 8.21 |
| 5 | 9.633 | 3.61 | 9.769 | 5.08 | 9.86 | 6.06 | 10.006 | 7.63 |
| 6 | 10.32 | 7.05 | 10.337 | 7.23 | 10.352 | 7.39 | 10.398 | 7.86 |
| Media | | 9.95 | | 10.06 | | 9.97 | | 10.56 |



Figura 5-5 Evolución de la media de los errores de las frecuencias (%) según las realizaciones con el método de variaciones incrementales no homogéneas.

A pesar de que no se consigue mejorar la media de los errores de las frecuencias de la configuración inicial, a continuación, se detallan algunos resultados interesantes en las realizaciones.

La realización 4, presenta el mínimo error de la frecuencia modal 1(0.26%) y ha mejorado un 96% respecto el valor de la configuración inicial; el error de la frecuencia modal 2 (3.29%) es el mismo que el valor de la configuración inicial. En el modo 3, el error de la frecuencia (17.8%) ha mejorado un 13.7% respecto el valor de la configuración inicial, pero la media de los errores de las frecuencias (9.1%) es un 17.9% mayor que la configuración inicial.

En la realización 3, el error de la frecuencia modal 3 (14.4%) ha mejorado un 30.3% respecto a la configuración inicial pero el error de la frecuencia modal 2 (12.69%) es bastante mayor a la configuración inicial. El error de la frecuencia modal 1 (6.48%) es similar a la configuración inicial con una variación de un 0.52% respecto el valor de la configuración inicial.

En la realización 2, se encuentra el error mínimo de la frecuencia modal 3 (12.46%); este valor ha disminuido un 39.7% respecto el valor de la configuración inicial, pero los errores de las frecuencias modales 2 y 4 (10.51% y 25.78%) son mayores a los valores de la configuración inicial. El error de la frecuencia modal 1 (5.12%) disminuye un 21.4% respecto los valores de la configuración inicial.

Los resultados muestran que el procedimiento de variaciones no homogéneo no ha conseguido mejorar uniformemente todas las frecuencias de manera simultánea. Por ejemplo, cuando el error del modo 3 mejora, otros modos empeoran.

5.1.1.3 Método de variaciones incrementales por caras

En este apartado se presentan los resultados (Tabla 5-6) de las realizaciones cuando se varía los coeficientes de flexibilidad Cf2 y Cf3 por caras para intentar mejorar el error de las frecuencias.

Tabla 5-6 Resultados del método de la variación incrementales por caras. Frecuencias (Hz) y errores de frecuencia (%) de los seis primeros modos y la media, en función de la realización.

| Realización | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | | |
|---------------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|--|--|
| Cf2 (KN·m/rad) | 5 | | 5 | | 5 | | 5 | | | |
| Cf3 (KN·m/rad) | 3 | | 3 | | 3 | | 3 | | | |
| Cf2, Cf3 (KN·m/rad) | | | 3 (Cara 4) | | 20 (Cara 4) | | 10 (Cara 1) | | | |
| MODOS | Frec. Num. (Hz) | Error (%) | | |
| 1 | 2.483 | 6.514 | 2.482 | 6.551 | 2.653 | 0.113 | 2.484 | 6.494 | | |

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------------|------------------|--------------------------|------------------|---------------------------|------------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------|
| 2 | 2.792 | 3.293 | 2.792 | 3.293 | 2.792 | 3.293 | 2.920 | 8.028 | | |
| 3 | 3.012 | 20.674 | 3.023 | 20.385 | 3.013 | 20.648 | 3.148 | 17.092 | | |
| 4 | 8.643 | 12.656 | 8.625 | 12.422 | 9.013 | 17.479 | 8.656 | 12.827 | | |
| 5 | 9.231 | 0.710 | 8.806 | 5.281 | 9.879 | 6.260 | 9.597 | 3.229 | | |
| 6 | 9.88 | 2.490 | 9.88 | 2.490 | 10.07 | 4.461 | 10.105 | 4.819 | | |
| MEDIA | | 7.723 | | 8.404 | | 8.709 | | 8.748 | | |
| Realización | 5 | | 6 | | 7 | | 8 | | 9 | |
| Cf2 (KN·m/rad) | 5 | | 5 | | 5 | | 5 | | 5 | |
| Cf3 (KN·m/rad) | 3 | | 3 | | 3 | | 3 | | 3 | |
| Cf2, Cf3 | 100 (Cara 1) | | 100 (Cara 1 y 2) | | 100 (Cara 1 y 3) | | 200 (Cara 1) | | 1000 (Cara 1) | |
| Cf2, Cf3 | | | | | | | | | | |
| MODOS | Frec. Num. (Hz) | Error (%) | Frec. Num. (Hz) | Error (%) | Frec. Num. (Hz) | Error (%) | Frec. Num. (Hz) | Error (%) | Frec. Num. (Hz) | Error (%) |
| 1 | 2.484 | 6.470 | 2.485 | 6.428 | 2.634 | 0.833 | 2.484 | 6.469 | 2.484 | 6.467 |
| 2 | 2.939 | 8.739 | 3.199 | 18.356 | 3.026 | 11.937 | 2.940 | 8.766 | 2.941 | 8.787 |
| 3 | 3.286 | 13.465 | 3.432 | 9.615 | 3.397 | 10.527 | 3.295 | 13.217 | 3.303 | 13.015 |
| 4 | 8.667 | 12.975 | 8.692 | 13.296 | 9.079 | 18.337 | 8.668 | 12.985 | 8.669 | 12.993 |
| 5 | 9.986 | 7.413 | 10.474 | 12.664 | 10.234 | 10.076 | 10.008 | 7.653 | 10.026 | 7.840 |
| 6 | 10.144 | 5.226 | 10.844 | 12.493 | 10.559 | 9.530 | 10.148 | 5.273 | 10.153 | 5.319 |
| MEDIA | | 9.048 | | 12.142 | | 10.207 | | 9.060 | | 9.070 |
| Realización | 10 | | 11 | | 12 | | 13 | | | |
| Cf2 (KN·m/rad) | 5 | | 5 | | 5 | | 5 | | | |
| Cf3 (KN·m/rad) | 3 | | 3 | | 3 | | 3 | | | |
| Cf2, Cf3 | 1000 (Cara 1) | | 1000 (Cara 1 y 2) | | Cf2=1 (Cara 1,2,3) | | | | | |
| Cf2, Cf3 | Nodo 1 1000 (Cara 3) | | | | Cf3=1 | | | | | |
| MODOS | Frec. Num. (Hz) | Error (%) | Frec. Num. (Hz) | Error (%) | Frec. Num. (Hz) | Error (%) | Frec. Num. (Hz) | Error (%) | | |
| 1 | 2.572 | 3.171 | 2.485 | 6.423 | 2.649 | 0.254 | 3.066 | 15.421 | | |
| 2 | 2.984 | 10.382 | 3.208 | 18.677 | 3.404 | 25.939 | 3.459 | 27.969 | | |
| 3 | 3.345 | 11.917 | 3.459 | 8.900 | 3.459 | 8.899 | 3.554 | 6.406 | | |
| 4 | 8.959 | 16.781 | 8.695 | 13.329 | 9.114 | 18.798 | 9.877 | 28.747 | | |
| 5 | 10.191 | 9.611 | 10.497 | 12.909 | 10.796 | 16.123 | 11.549 | 24.228 | | |
| 6 | 10.313 | 6.977 | 10.934 | 13.422 | 11.554 | 19.855 | 11.567 | 19.989 | | |
| MEDIA | | 9.806 | | 12.277 | | 14.978 | | 20.460 | | |

A continuación, se presentan los resultados más relevantes:

En la realización 6, el error de la frecuencia modal 3 (9.61%) tiene una disminución del 53% respecto el valor de la configuración inicial, sin embargo, el error de la frecuencia modal 2 y la media (18.3% y 12.14%) son mayores que los valores de la configuración inicial.

En la realización 5, el error de la frecuencia modal 3 (13.46%) mejora un 34.9% respecto al valor de la configuración inicial, pero los errores de las frecuencias modales 2, 5 y 6 son mayores (8.73%, 7.41%, 5.23%) a la configuración inicial. En esta realización, los errores de las frecuencias, en general, están más acotados que los valores de la configuración inicial debido a que dos modos tienen errores entre 12% y 13% (modo 3 y 4) y el resto de modos están por debajo del 10%. Mientras que, en la configuración inicial, el error de la frecuencia modal 3 es 20.67% y para el modo 4 es 12.66%.

En la realización 7, el error de las frecuencias de los modos 1 y 3 (0.83% y 10.52%) mejoran respecto los valores de la configuración inicial. Pero las frecuencias modales 2 y 4 son mayores (11.94% y 18.34%) a la configuración inicial.

En la realización 8, el error de la frecuencia del modo 3 (13.22%) mejora bastante respecto al valor de la configuración inicial pero el error de la frecuencia modal 2 (8.77%) es mayor. El error de la frecuencia modal 1 (6.47%) es muy parecida al valor de la configuración inicial. La realización 9 es muy parecida a la 8.

En la realización 13 se encuentra el error mínimo para el modo 3 (6.41%) pero los errores del resto de frecuencias son las mayores de todas las realizaciones, por ejemplo, el error de la frecuencia modal 1 (15.42%) tiene un aumento del 136% respecto la configuración inicial.

En conclusión, este método presenta la mejor aproximación para el modo 3, pero no permite mejorar todos los errores simultáneamente en la misma realización.

5.1.1.4 Método probabilista con variación de los intervalos de muestreo adaptados

Este apartado muestra los resultados del método probabilista variando los intervalos de muestreo de las condiciones de contorno. Estos intervalos se irán adaptando estratégicamente en función de la respuesta de la estructura para mejorar la configuración inicial. Los resultados se presentan en dos secciones. En la primera sección, se varían las condiciones de contorno Cf2 y Cf3 simultáneamente. En la segunda sección, únicamente se varía Cf3.

5.1.1.4.1 Variación en Cf2 y Cf3

En esta sección, la exploración de las condiciones de contorno está compuesta por 8 etapas. Cada etapa (Tabla 5-7) está formada por un número determinado de realizaciones

en las cuales se varían simultáneamente Cf_2 y Cf_3 según una función de densidad de probabilidad uniforme en un intervalo. En cada etapa (Figura 5-6 y Tabla 5-7) se adapta estratégicamente el intervalo para mejorar la media de los errores de las frecuencias definido por la fórmula 3-1 del apartado 3.2.2. A continuación, se detalla el proceso de selección de los intervalos en cada etapa para converger con la mejor solución. En la gráfica de la Figura 5-6 se puede seguir la evolución la media de los errores de las frecuencias del proceso.

En primer lugar, en la etapa 1 se escoge el intervalo 0-1000 KN·m/rad; pero el valor mínimo (19.97%) es un 158% superior a la configuración inicial. Para mejorar esta aproximación, en la etapa 2 se restringe el intervalo a 0-100 KN·m/rad; el valor mínimo (16.31%) es un 111% superior al valor de la configuración sin daño. En la siguiente etapa el intervalo se restringe a 0-10 KN·m/rad, y el valor fluctúa entre 6.78% y 9.51%. En las tres etapas siguientes, el intervalo 0-10 KN·m/rad se divide en tres: 0-1 KN·m/rad, 1-7 KN·m/rad, 7-10 KN·m/rad. Las mejores aproximaciones se obtienen en el intervalo 1-7 KN·m/rad con un valor mínimo de 7.95%; este valor es un 2.98% superior a la configuración inicial. Los dos intervalos siguientes son: 1-6 KN·m/rad y 2-7 KN·m/rad; pero los resultados son similares a la anterior etapa.

La mejor aproximación se encuentra en la realización 20 con una media de los errores de las frecuencias de 6.78%. Este resultado mejora en un 12% el valor de la configuración inicial (Tabla 5-8). Pero el error de la frecuencia modal 3 (17.6%) solo disminuye en un 14.8 % el valor de la configuración inicial. El error de la frecuencia modal 1 (1.2%) disminuye un 81.5% respecto el valor de la configuración inicial. Pero la frecuencia modal 2 (5.9%) aumenta un 79.1% respecto la configuración inicial. Un ejemplo de la matriz de condiciones de contorno de la realización se muestra en la Tabla 5-9.

La mejor aproximación del error de la frecuencia del modo 3 (6.518%) se encuentra en la realización 3 (Tabla 5-8). Este valor mejora un 68.4% el valor de la configuración inicial. Pero el resto de errores de las frecuencias (modos 1, 2, 4, 5 y 6) aumentan, 131%, 741%, 125%, 3272%, 692% respectivamente. En esta realización, se puede observar que cuando la aproximación de la frecuencia modal 3 disminuye, el error del resto de modos aumenta. La realización 21 optimiza el error de la frecuencia modal 1 (0.077%), además, el error de la frecuencia modal 3 (16.2%) disminuye en un 21.6% el valor de la configuración inicial. Pero el error de la frecuencia del modo 2 (8.9%) aumenta un 170% el valor de la configuración inicial.

Este método probabilístico no obtiene una mejora homogénea de todas las frecuencias modales, respecto la configuración inicial. Se obtienen mejoras parciales debido a que cuando se aproxima una frecuencia modal, el resto de modos no mejoran simultáneamente.

Para conseguir resultados más concluyentes se tendrían que realizar más realizaciones por intervalos e ir variando los intervalos. Pero este proceso probabilístico es bastante largo y manual debido a que se tiene que calcular primero todas las condiciones de contorno para cada nodo y luego se tienen que asignar a los nodos en el programa de estructuras ETABS. Para mejorar el proceso, en el apartado 5.1.1.5 se presentan los resultados de la exploración automática de las condiciones de contorno con un programa probabilista.

Tabla 5-7 Resultados del método probabilista con variaciones de los intervalos de muestreo adaptados de variable Cf3 y Cf2: media de los errores de las frecuencias (%), etapas, realización e intervalos.

| Etapa | Etapa 1 | | | Etapa 2 | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------|--------|--------|---------|-------|-------|---------|-------|---------|-------|-------|-------|
| Realización | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| Intervalo Cf3 y Cf2 (KN·m/rad) | 0-1000 | 0-1000 | 0-1000 | 0-100 | 0-100 | 0-100 | 0-100 | 0-100 | 0-100 | 0-100 | 0-100 | 0-100 |
| Media error frec. (%) | 20.25 | 19.97 | 20.25 | 16.31 | 17.94 | 18.30 | 17.78 | 16.97 | 17.09 | 17.33 | 18.27 | 17.66 |
| Etapa | Etapa 3 | | | | | | Etapa 4 | | | | | |
| Realización | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| Intervalo Cf3 y Cf2 (KN·m/rad) | 0-10 | 0-10 | 0-10 | 0-10 | 0-10 | 0-10 | 0-10 | 0-10 | 0-10 | 0-1 | 0-1 | 0-1 |
| Media error frec. (%) | 8.47 | 7.35 | 8.03 | 9.51 | 7.84 | 9.03 | 9.46 | 6.78 | 7.29 | 40.17 | 39.46 | 40.06 |
| Etapa | Etapa 5 | | | Etapa 6 | | | Etapa 7 | | Etapa 8 | | | |
| Realización | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | | |
| Intervalo Cf3 y Cf2 (KN·m/rad) | 7-10 | 7-10 | 7-10 | 1-7 | 1-7 | 1-7 | 2-7 | 2-7 | 1-6 | 1-6 | | |
| Media error frec. (%) | 13.85 | 13.95 | 13.99 | 7.95 | 7.43 | 8.10 | 8.37 | 8.85 | 7.92 | 8.40 | | |

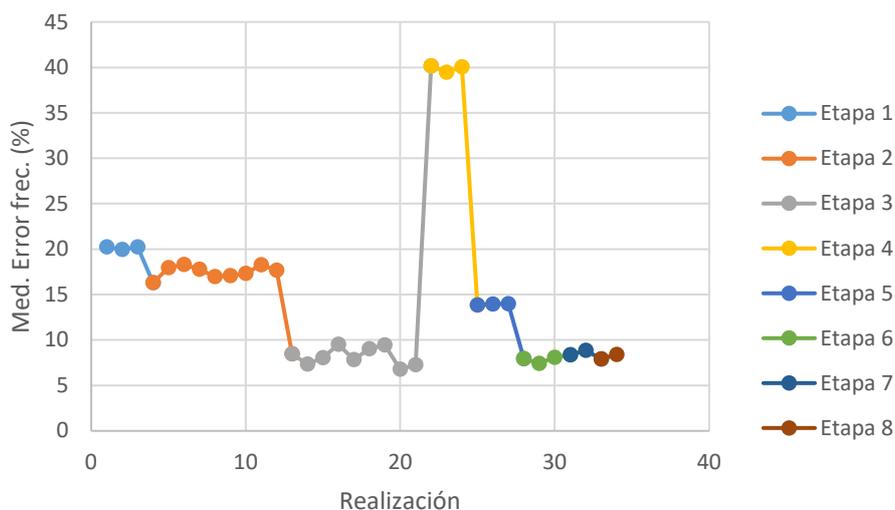


Figura 5-6 Media de los errores de las frecuencias (%) vs realizaciones variando los coeficientes de flexibilidad Cf2 y Cf3, en el método probabilista con variación de los intervalos de muestreo adaptados.

Tabla 5-8 Resultados de las realizaciones 1, 21, 22 y 25 según el método probabilista con variación de los intervalos de muestreo adaptados en Cf2 y Cf3. Se muestran las frecuencias (Hz), y los errores de frecuencias (%), de los 6 primeros modos y la media.

| REALIZACIÓN | | 1 | | 3 | |
|--------------|-----------------|---------------|-----------------|--------------|--|
| MODO | Frec. Num. (Hz) | Error (%) | Frec. Num. (Hz) | Error (%) | |
| 1 | 2.965 | 11.636 | 3.057 | 15.111 | |
| 2 | 3.275 | 21.148 | 3.452 | 27.717 | |
| 3 | 3.447 | 9.208 | 3.549 | 6.518 | |
| 4 | 9.097 | 18.579 | 9.858 | 28.497 | |
| 5 | 11.185 | 20.309 | 11.522 | 23.942 | |
| 6 | 11.279 | 17.007 | 11.541 | 19.721 | |
| MEDIA | | 16.315 | | 20.25 | |
| REALIZACIÓN | | 20 | | 21 | |
| MODO | Frec. Num. (Hz) | Error (%) | Frec. Num. (Hz) | Error (%) | |
| 1 | 2.622 | 1.276 | 2.654 | 0.077 | |
| 2 | 2.863 | 5.936 | 2.946 | 8.986 | |
| 3 | 3.128 | 17.623 | 3.181 | 16.211 | |
| 4 | 8.441 | 10.021 | 8.742 | 13.941 | |
| 5 | 8.835 | 4.970 | 9.055 | 2.607 | |
| 6 | 9.722 | 0.849 | 9.826 | 1.932 | |
| MEDIA | | 6.779 | | 7.292 | |

Tabla 5-9 Ejemplo de condiciones de contorno en la realización 21 del método probabilista con variación de los intervalos de muestreo adaptados (variable Cf3 y Cf2). Coeficientes de flexibilidad en los nodos extremos de las 35 barras, Cf2 y Cf3. Nodo 1 y nodo 2 indican los dos nodos extremos de las barras.

| REALIZACIÓN 21 | | | | |
|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Barras | Cf2 Nodo 1 (KN·m/rad) | Cf2 Nodo 2 (KN·m/rad) | Cf3 Nodo 2 (KN·m/rad) | Cf3 Nodo 2 (KN·m/rad) |
| 1 | 6.302 | 1.421 | 4.277 | 7.508 |
| 2 | 1.693 | 7.772 | 3.828 | 6.759 |
| 3 | 7.063 | 7.669 | 4.984 | 8.959 |
| 4 | 4.356 | 2.351 | 2.417 | 5.349 |
| 5 | 2.829 | 4.795 | 8.588 | 5.010 |
| 6 | 7.415 | 7.470 | 4.581 | 9.174 |
| 7 | 5.139 | 2.458 | 9.392 | 1.149 |
| 8 | 1.159 | 5.225 | 1.687 | 3.766 |
| 9 | 3.720 | 9.763 | 8.807 | 6.965 |
| 0 | 1.101 | 5.778 | 6.905 | 3.065 |
| 11 | 6.694 | 3.041 | 3.817 | 4.320 |
| 12 | 8.498 | 9.313 | 2.650 | 4.636 |
| 13 | 9.202 | 1.768 | 1.659 | 6.409 |
| 14 | 4.341 | 2.778 | 8.329 | 8.205 |
| 15 | 9.434 | 1.087 | 8.504 | 2.803 |
| 16 | 1.296 | 9.105 | 7.597 | 8.335 |
| 17 | 4.649 | 9.256 | 6.112 | 4.671 |
| 18 | 4.065 | 4.484 | 1.134 | 1.933 |
| 19 | 2.864 | 4.779 | 6.715 | 8.581 |
| 20 | 1.766 | 6.890 | 3.615 | 3.444 |
| 21 | 1.553 | 2.375 | 2.856 | 4.196 |
| 22 | 3.044 | 2.098 | 8.993 | 1.477 |
| 23 | 5.165 | 3.343 | 2.729 | 3.074 |
| 24 | 1.614 | 7.129 | 9.198 | 9.449 |
| 25 | 5.333 | 7.716 | 7.138 | 3.635 |
| 26 | 5.361 | 9.171 | 5.637 | 1.395 |
| 27 | 2.820 | 7.670 | 3.678 | 3.926 |
| 28 | 3.906 | 2.057 | 9.207 | 1.529 |
| 29 | 7.233 | 2.453 | 7.569 | 7.095 |
| 30 | 9.806 | 7.277 | 2.009 | 5.567 |
| 31 | 7.341 | 1.247 | 9.748 | 9.386 |
| 32 | 3.874 | 2.206 | 2.224 | 5.166 |
| 33 | 1.174 | 1.578 | 5.521 | 9.255 |
| 34 | 3.101 | 6.940 | 1.240 | 4.476 |
| 35 | 9.284 | 8.773 | 4.808 | 9.853 |

5.1.1.4.2 Variación en Cf3

En esta sección la metodología es similar a la anterior pero el único parámetro que varía es Cf3, mientras Cf2 se mantiene constante y rígido. Este proceso está formado por 8 etapas. Cada etapa (Tabla 5-10) está compuesta por varias realizaciones en las cuales Cf3

varía según una función de densidad de probabilidad uniforme en un intervalo, con el objetivo de mejorar la media de los errores de las frecuencias según la fórmula 3-1 del apartado 3.2.2. La Figura 5-7 muestra la evolución de la media de los errores de las frecuencias en cada etapa.

En la primera etapa se escoge el intervalo de muestreo 0-10 KN·m/rad, pero la media de los errores de las frecuencias es superior a 9.94%. En la segunda y tercera etapa se divide el intervalo 0-10 KN·m/rad en dos intervalos de muestreo: 0-5 KN·m/rad y 5-10 KN·m/rad. Los mejores resultados están en el intervalo 0-5 KN·m/rad de la etapa 2 con un valor de 9.68%. A continuación, en las etapas 4 y 5, se divide el intervalo 0-5 KN·m/rad en dos: 0-2 KN·m/rad y 2-5 KN·m/rad. El mejor resultado está en el intervalo 2-5 KN·m/rad con un valor de 9.80%. Finalmente, el intervalo de muestreo 2-5 KN·m/rad se divide en 3 intervalos 2-3, 3-4, 4-5 KN·m/rad. El mejor resultado se encuentra en el intervalo de muestreo 2-3 KN·m/rad en la realización 12, en rojo en la Tabla 5-10, con una media de los errores de las frecuencias de 8.66%. Este valor es un 12.17% superior al valor de la configuración inicial. El error de la frecuencia modal 2 ha disminuido hasta un valor de 0.15% (Tabla 5-12) pero el error de la frecuencia modal 1 (9.95%) ha aumentado el valor de la configuración inicial. La Tabla 5-11 muestra las condiciones de contorno de la realización 12.

Tabla 5-10 Resultados del método probabilista con variación de los intervalos de muestreo adaptados de variable Cf3: Media de los errores de las frecuencias (%), etapas, realización e intervalos.

| Etapas | Etapas 1 | | Etapas 2 | | Etapas 3 | | Etapas 4 | |
|---------------------------------|-----------------|----------|-----------------|-------------|-----------------|----------|-----------------|----------|
| Realización | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Intervalo Cf3 (KN·m/rad) | 0-10 | 0-10 | 0-5 | 0-5 | 5-10 | 5-10 | 0-2 | 0-2 |
| Cf2 (KN·m/rad) | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Med. error frec. (%) | 9.97 | 9.94 | 9.68 | 10.03 | 13.80 | 13.36 | 16.68 | 15.39 |
| Etapas | Etapas 5 | | Etapas 6 | | Etapas 7 | | Etapas 8 | |
| Realización | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Intervalo Cf3 (KN·m/rad) | 2-5 | 2-5 | 2-3 | 2-3 | 3-4 | 3-4 | 4-5 | 4-5 |
| Cf2 (KN·m/rad) | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Med. Error frec. (%) | 9.80 | 9.80 | 8.68 | 8.66 | 10.00 | 10.10 | 11.01 | 10.86 |

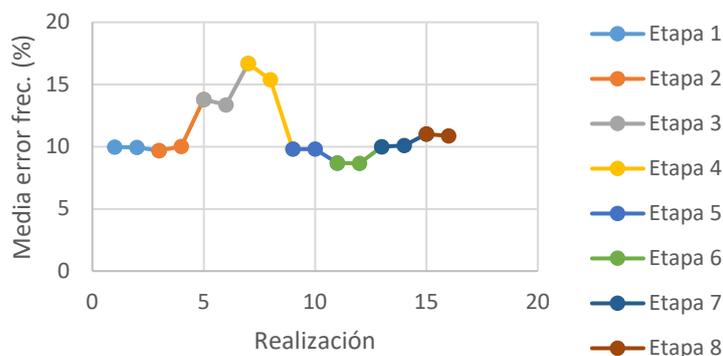


Figura 5-7 Media de los errores de las frecuencias (%) vs realizaciones variando el coeficiente de flexibilidad Cf3 en el método probabilista con variación de los intervalos de muestreo adaptados.

Tabla 5-11 Condiciones de contorno de la realización 6 del método probabilista con variación de intervalos de muestreo adaptados (variable Cf3). Coeficientes de flexibilidad en los nodos extremos de las 35 barras Cf2 y Cf3. Nodo 1 y nodo 2 indican los dos extremos de las barras.

| Realización 6 | | | | |
|---------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Barra | Cf2 Nodo1 (KN·m/rad) | Cf2 Nodo2 (KN·m/rad) | Cf3 Nodo 1(KN·m/rad) | Cf3 Nodo 2 (KN·m/rad) |
| 1 | Ríg. | Ríg | 2.280 | 2.491 |
| 2 | Ríg | Ríg | 2.102 | 2.911 |
| 3 | Ríg | Ríg | 2.746 | 2.426 |
| 4 | Ríg | Ríg | 2.636 | 2.339 |
| 5 | Ríg | Ríg | 2.668 | 2.629 |
| 6 | Ríg | Ríg | 2.082 | 2.246 |
| 7 | Ríg | Ríg | 2.247 | 2.919 |
| 8 | Ríg | Ríg | 2.439 | 2.238 |
| 9 | Ríg | Ríg | 2.142 | 2.633 |
| 10 | Ríg | Ríg | 2.623 | 2.051 |
| 11 | Ríg | Ríg | 2.602 | 2.730 |
| 12 | Ríg | Ríg | 2.518 | 2.024 |
| 13 | Ríg | Ríg | 2.487 | 2.381 |
| 14 | Ríg | Ríg | 2.598 | 2.622 |
| 15 | Ríg | Ríg | 2.810 | 2.542 |
| 16 | Ríg | Ríg | 2.131 | 2.423 |
| 17 | Ríg | Ríg | 2.365 | 2.883 |
| 18 | Ríg | Ríg | 2.710 | 2.466 |
| 19 | Ríg | Ríg | 2.381 | 2.487 |
| 20 | Ríg | Ríg | 2.726 | 2.852 |
| 21 | Ríg | Ríg | 2.192 | 2.633 |
| 22 | Ríg | Ríg | 2.369 | 2.017 |
| 23 | Ríg | Ríg | 2.265 | 2.192 |
| 24 | Ríg | Ríg | 2.416 | 2.084 |
| 25 | Ríg | Ríg | 2.115 | 2.220 |
| 26 | Ríg | Ríg | 2.012 | 2.792 |
| 27 | Ríg | Ríg | 2.672 | 2.721 |
| 28 | Ríg | Ríg | 2.696 | 2.611 |
| 29 | Ríg | Ríg | 2.148 | 2.053 |
| 30 | Ríg | Ríg | 2.648 | 2.576 |
| 31 | Ríg | Ríg | 2.903 | 2.175 |
| 32 | Ríg | Ríg | 2.395 | 2.521 |
| 33 | Ríg | Ríg | 2.443 | 2.391 |
| 34 | Ríg | Ríg | 2.400 | 2.535 |
| 35 | Ríg | Ríg | 2.130 | 2.818 |

Tabla 5-12 Frecuencias (Hz) y Error de frecuencia (%), de los 6 primeros modos y la media, de la realización 12 del método probabilista con variación de intervalos de muestreo adaptados (variable Cf3).

| Realización 12 | | | |
|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------|
| MODO | Frec. Num. (Hz) | Frec. Exp. (Hz) | Error (%) |
| 1 | 2.392 | 2.656 | 9.9515 |
| 2 | 2.707 | 2.703 | 0.1578 |
| 3 | 2.942 | 3.797 | 22.512 |
| 4 | 8.508 | 7.672 | 10.9 |
| 5 | 9.657 | 9.297 | 3.8687 |
| 6 | 10.078 | 9.64 | 4.547 |
| MEDIA | | | 8.6561 |

5.1.1.5 Resultados del método probabilista automático

En este apartado se presenta los resultados del método probabilista utilizando un programa automático. En primer lugar se exponen los resultados utilizando el programa probabilista automático con 15 realizaciones y a continuación se detallan los resultados efectuando 5000 realizaciones con el mismo programa.

5.1.1.5.1 Programa probabilista automático con 15 realizaciones

El método probabilista del apartado anterior (5.1.1.4) es poco práctico y difícilmente generalizable para llevar a cabo simulaciones probabilistas considerando cientos o miles de realizaciones. Por tanto, se ha diseñado un programa que genera automáticamente 15 realizaciones para un intervalo predeterminado. En este intervalo, las condiciones de contorno de cada realización siguen una función de densidad de probabilidad uniforme. A partir de este programa, se han realizado los 5 tests que se detallaron en la sección 3.2.2.3.1. A modo de ejemplo, en la Tabla 5-13 se presentan los resultados del test 2 con 15 realizaciones. El tiempo medio utilizado para un test con 15 realizaciones fue 7.5 minutos con un ordenador personal Core i7.

En las columnas se muestran las 6 primeras frecuencias, con sus respectivos errores (en %) respecto a las frecuencias experimentales de la configuración sin daño según la fórmula 3-1 del apartado 3.2.2. También se muestran en la primera columna el decremento de los coeficientes de flexibilidad de la realización (DCf(total)) según la definición del apartado 2.6.

Tabla 5-13 Resultados del método probabilista automático con 15 realizaciones, para el test 2. Se indican el decremento de los coeficientes de flexibilidad (DCf) en KN·m/rad, frecuencias (Hz) y error de la frecuencia (%) para las seis primeras frecuencias.

| DCf (total)(KN·m/rad) | Frec.1 (Hz) | Err. Frec.1 (%) | Frec. 2 (Hz) | Err. Frec 2 (%) | Frec.3 (Hz) | Err. Frec.3 (%) | Frec.4 (Hz) | Err. Frec.4 (%) | Frec.5 (Hz) | Err. Frec.5 (%) | Frec.6 (Hz) | Err. Fre.6 (%) |
|-----------------------|-------------|-----------------|--------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|----------------|
| 2443 | 2.22 | 16.3 | 2.39 | 11.2 | 2.71 | 28.5 | 7.28 | 5.0 | 7.96 | 14.3 | 8.42 | 12.7 |
| 1933 | 2.31 | 12.7 | 2.37 | 11.9 | 2.83 | 25.2 | 7.96 | 3.8 | 8.36 | 10.0 | 9.16 | 5.0 |
| 1569 | 2.22 | 16.0 | 2.67 | 1.0 | 2.91 | 23.2 | 7.70 | 0.4 | 8.17 | 12.1 | 9.45 | 1.9 |
| 2257 | 2.11 | 20.3 | 2.41 | 10.6 | 2.74 | 27.6 | 7.27 | 5.1 | 7.82 | 15.8 | 8.45 | 12.4 |
| 765.4 | 2.40 | 9.4 | 2.66 | 1.3 | 2.94 | 22.3 | 8.24 | 7.4 | 8.51 | 8.4 | 9.53 | 1.1 |
| 2196 | 2.22 | 16.0 | 2.36 | 12.6 | 2.79 | 26.2 | 6.74 | 12.1 | 8.13 | 12.4 | 8.39 | 13.0 |
| 1757 | 2.12 | 20.1 | 2.51 | 6.9 | 2.72 | 28.1 | 7.58 | 1.1 | 8.20 | 11.7 | 8.97 | 6.9 |
| 1640 | 2.18 | 17.5 | 2.59 | 4.0 | 2.83 | 25.2 | 7.68 | 0.1 | 8.31 | 10.6 | 9.30 | 3.5 |
| 637.9 | 2.40 | 9.4 | 2.64 | 2.1 | 2.93 | 22.7 | 8.37 | 9.1 | 8.57 | 7.8 | 9.69 | 0.5 |
| 2139 | 2.27 | 14.4 | 2.34 | 13.3 | 2.82 | 25.6 | 6.73 | 12.1 | 8.06 | 13.3 | 8.36 | 13.3 |
| 2258 | 2.15 | 18.9 | 2.34 | 13.1 | 2.77 | 27.0 | 7.50 | 2.1 | 7.76 | 16.4 | 7.91 | 17.9 |
| 2526 | 2.22 | 16.2 | 2.30 | 14.8 | 2.71 | 28.5 | 7.50 | 2.1 | 8.06 | 13.2 | 8.68 | 9.9 |
| 1002 | 2.40 | 9.4 | 2.59 | 4.1 | 2.92 | 22.9 | 8.46 | 10.3 | 8.55 | 7.9 | 9.17 | 4.9 |
| 2279 | 2.13 | 19.4 | 2.42 | 10.2 | 2.72 | 28.3 | 7.28 | 5.013 | 7.87 | 15.3 | 8.49 | 12.0 |
| 1135 | 2.37 | 10.6 | 2.65 | 1.9 | 2.87 | 24.3 | 8.06 | 5.072 | 8.46 | 9.0 | 9.21 | 4.5 |

La Tabla 5-14 presenta los valores mínimos de los errores de las frecuencias de los 6 modos y la media (fórmula 3-1 del apartado 3.2.2) y los valores máximos de los decrementos del coeficiente de flexibilidad para los tests 1, 2, 3, 4, 5. En rojo se presentan los errores mínimos de cada frecuencia modal según el test.

Tabla 5-14 Resultados del método probabilista automático con 15 realizaciones. Errores mínimos de las frecuencias (1, 2, 3, 4, 5, 6 y la media) y máximo decremento del coeficiente de flexibilidad. Para los 5 tests.

| | Test 1 | Test 2 | Test 3 | Test 4 | Test 5 |
|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Cf2 (KN·m/rad) | 4.0-6.0 | 0.3-5 | 1.0-3.0 | 0.25-0.35 | |
| Cf3 (KN·m/rad) | 2.0-4.0 | 0.1-3 | 0.5-1.5 | 0.05-0.15 | |
| MODO | Error Frec min (%) |
| 1 | 6.00 | 6.52 | 6.95 | 6.52 | 6.00 |
| 2 | 1.83 | 0.015 | 0.27 | 0.16 | 0.015 |
| 3 | 20.53 | 20.71 | 21.30 | 20.70 | 20.53 |
| 4 | 11.95 | 0.069 | 1.089 | 1.22 | 0.069 |
| 5 | 0.074 | 1.092 | 5.31 | 0.71 | 0.074 |
| 6 | 1.58 | 0.065 | 0.29 | 1.27 | 0.065 |
| Media | 7.36 | 7.52 | 8.46 | 7.35 | 7.35 |
| MAX DCf | 2.15 | 47.60 | 58.45 | 98.77 | 98.77 |

El valor mínimo de la media de los errores de las frecuencias es 7.35 % (en rojo en la Tabla 5-14). Este valor corresponde al modelo donde los coeficientes de flexibilidad son los menores (test 4). La disminución de esta media de los errores de las frecuencias es de 4.86% respecto al error de la configuración numérica sin daño (Tabla 5-15).

El valor mínimo del error de la frecuencia modal 1 (6%) disminuye un 7.86% (Tabla 5-15) del valor de la configuración inicial. Las frecuencias de los modos 2, 4, 5 y 6 son aproximadamente igual al valor de la configuración inicial ya que tiene errores aproximadamente nulos (0.015%, 0.069%, 0.074%, 0.065%) (Tabla 5-15).

Este programa con 15 realizaciones permite explorar fácilmente entre 6 y 7 tests en una hora; esto es una ventaja porque facilita evaluar un amplio rango de soluciones en diferentes intervalos. De esta manera se ha podido utilizar el programa para realizar un preajuste antes de efectuar las 5000 realizaciones. En el siguiente apartado se efectuarán 5000 realizaciones con el mismo programa, pero se ejecutarán con el servidor de departamento que pertenece al grupo de investigación GiES.

Tabla 5-15 Disminución los errores mínimos de frecuencias del test 5 respecto el error de la configuración sin daño.

| MODO | Min. Error. Frec. (%) | Error. Frec. Conf. Sin daño. (%) | Dism. (%) |
|-------------|------------------------------|---|------------------|
| Media | 7.348 | 7.723 | 4.86 |
| 1 | 6.002 | 6.514 | 7.86 |
| 2 | 0.015 | 3.293 | 99.55 |
| 3 | 20.529 | 20.674 | 0.70 |
| 4 | 0.069 | 12.656 | 99.45 |
| 5 | 0.074 | 0.710 | 89.59 |
| 6 | 0.064 | 2.449 | 97.37 |

5.1.1.5.2 Programa probabilista automático con 5000 realizaciones

En este apartado se presentan los resultados de aplicar 5000 realizaciones al mismo programa automático en un intervalo predeterminado. En este intervalo, las condiciones de contorno de todos los nodos de la estructura siguen una función de densidad de probabilidad uniforme.

En esta sección el programa se ha aplicado considerando dos intervalos de muestreo. El primer intervalo varía desde aproximadamente la configuración inicial hasta las condiciones de contorno mínimas (correspondientes al ajuste del test 5 de la sección 5.1.2). El segundo intervalo de muestreo está centrado en la configuración inicial y varía +/- 1 KN·m/rad (Tabla 5-16).

Tabla 5-16 Intervalos de las condiciones de contorno de los dos procesos con el programa probabilista automático con 5000 realizaciones.

| | |
|-------------------|--|
| Primer intervalo | Cf2 varía según una función de densidad uniforme entre 0.25 y 5.5 (KN·m/rad) |
| | Cf3 varía según una función de densidad uniforme entre 0.05 y 3.5 (KN·m/rad) |
| Segundo intervalo | Cf2 varía según una función de densidad uniforme entre 4 y 6 (KN·m/rad) |
| | Cf3 varía según una función de densidad uniforme entre 2 y 4 (KN·m/rad) |

a/ Primer intervalo de muestreo

En esta sección se muestran los resultados de la aplicación del programa automático en 8 tests, en donde el número total de realizaciones varía desde 2 hasta 5000 (sección 3.2.2.3.2). De esta manera, se ha evaluado el error de la frecuencia (ecuación 3-1 de la sección 3.2.2) con el número de realizaciones, tal y como se muestra en la Figura 5-8.

A medida que aumenta el número de las realizaciones en los tests, los errores de todas las frecuencias disminuyen (Figura 5-8 a Figura 5-14). Esto se debe a que, a mayor número de realizaciones, mayores posibilidades de encontrar una mejor aproximación de la función objetivo (Tabla 5-17). No obstante, esta disminución se estabiliza en cada modo en un valor diferente (en rojo en la Tabla 5-17). Para los modos 1 y 3 se estabiliza a partir de 11 realizaciones, para los modos 2, 5 y 6 se estabiliza a partir de 50 realizaciones, y para los modos 4 y la media, se estabiliza a partir de 500 y 100 realizaciones respectivamente. A pesar de la estabilidad del error, resulta más adecuado efectuar 5000 realizaciones ya que aumenta la probabilidad de encontrar una mejor aproximación. Esto es debido a que el programa se basa en la función de densidad de probabilidad uniforme.

La mejor aproximación se encuentra en la realización 1698 del test 8 (Tabla 5-18) con una media del error de las frecuencias de 7.22%; este valor disminuye un 6.46% respecto al valor de la configuración inicial.

En el test 8, se han encontrado realizaciones en que las frecuencias de los modos 2, 4 y 6 son aproximadamente igual al valor de la configuración inicial ya que los errores frecuenciales son los menores y prácticamente cero ($3 \cdot 10^{-4} \%$, $3.89 \cdot 10^{-3} \%$, $3.62 \cdot 10^{-4} \%$ respectivamente). Sin embargo, el error de la frecuencia modal 3 (20.53%) no se ha podido mejorar respecto la configuración inicial. El error de la frecuencia modal 5 disminuye 0.42% respecto a la configuración inicial, pero tiene un valor bajo (0.707%). El error de la frecuencia modal 1 (6.328%) solo disminuye un 2.8% respecto de la configuración inicial.

Tabla 5-17 Error de frecuencia mínima (%) para los 6 primeros modos y la media de los 8 test con el programa probabilista automático con 5000 realizaciones (primer intervalo de muestreo).

| RESULTADOS DEL ERROR DE LA FRECUENCIA MÍNIMA PARA LOS TESTS PROBABILISTICOS AUTOMÁTICOS | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------|
| Test | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| Nº Realizaciones | 2 | 11 | 50 | 100 | 500 | 1000 | 2000 | 5000 | |
| Error Frec. Min. (%) | Media | 10.562 | 8.135 | 7.797 | 7.277 | 7.384 | 7.214 | 7.327 | 7.224 |
| | Modo 1 | 10.023 | 6.529 | 6.448 | 6.520 | 6.482 | 6.348 | 6.308 | 6.328 |
| | Modo 2 | 4.238 | 0.473 | 0.040 | 0.011 | 0.038 | 0.003 | 0.002 | 3·10 ⁻⁴ |
| | Modo 3 | 22.360 | 20.768 | 20.679 | 20.705 | 20.678 | 20.677 | 20.678 | 20.526 |
| | Modo 4 | 5.130 | 0.223 | 0.055 | 0.248 | 0.004 | 0.009 | 0.008 | 0.004 |
| | Modo 5 | 7.845 | 2.082 | 0.708 | 1.315 | 0.708 | 0.707 | 0.478 | 0.707 |
| | Modo 6 | 1.107 | 0.917 | 0.006 | 0.080 | 0.008 | 0.003 | 0.004 | 4·10 ⁻⁴ |

Tabla 5-18 Resultado de la realización 1698, solución óptima con el programa probabilista con 5000 realizaciones en el primer intervalo de muestreo. Frecuencia (Hz) y error de frecuencia (%) para los 6 primeros modos y media.

| Modo | Frec. exp.(Hz) Conf, sin daño | Frec (Hz) Realización 1698 | Error frec. (%) |
|-------|----------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| 1 | 2.656 | 2.483 | 6.521 |
| 2 | 2.703 | 2.724 | 0.777 |
| 3 | 3.797 | 2.999 | 21.008 |
| 4 | 7.672 | 8.638 | 12.590 |
| 5 | 9.297 | 9.215 | 0.881 |
| 6 | 9.64 | 9.574 | 0.683 |
| Media | | | 7.224 |

Tabla 5-19 Condiciones de contorno de la realización 1698 (solución óptima) con el programa probabilista automático con 5000 realizaciones en el primer intervalo de muestreo. Coeficientes de flexibilidad en los nodos extremos de las 35 barras, Cf2 y Cf3. Nodo 1 y nodo 2 indican los dos extremos de las barras.

| Condiciones de contorno en la realización 1698 | | | | |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Barra | Cf2 Nodo 1 (KN·m/rad) | Cf2 Nodo 2 (KN·m/rad) | Cf3 Nodo 1 (KN·m/rad) | Cf3 Nodo 2 (KN·m/rad) |
| 1 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 2 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 3 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 4 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 5 | 5.309 | 4.978 | 0.232 | 0.545 |
| 6 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 7 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 8 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 9 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 10 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 11 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 12 | 5 | 5 | 3 | 3 |

| | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|
| 13 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 14 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 15 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 16 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 17 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 18 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 19 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 20 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 21 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 22 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 23 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 24 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 25 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 26 | 3.423 | 1.853 | 0.417 | 1.531 |
| 27 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 28 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 29 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 30 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 31 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 32 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 33 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 34 | 5 | 5 | 3 | 3 |
| 35 | 5 | 5 | 3 | 3 |

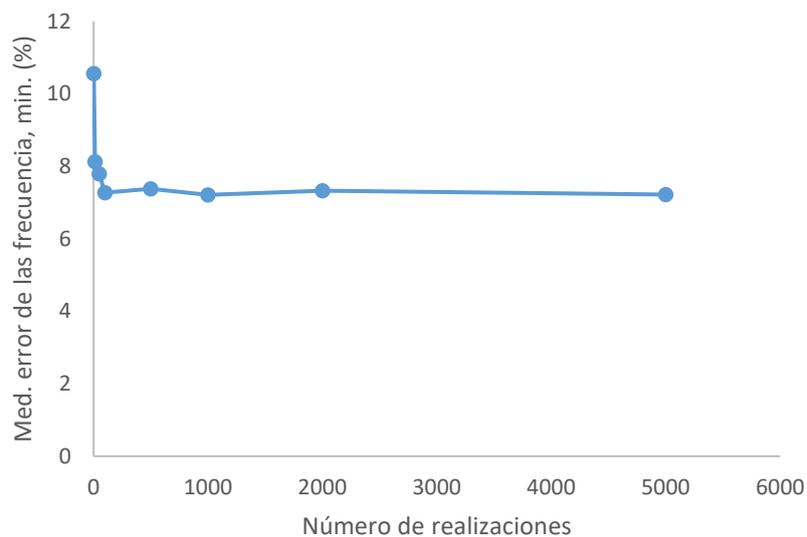


Figura 5-8 Gráfica de la media de los errores de las frecuencias (mínima) vs los tests con realizaciones 2, 11, 50, 500, 1000, 5000.

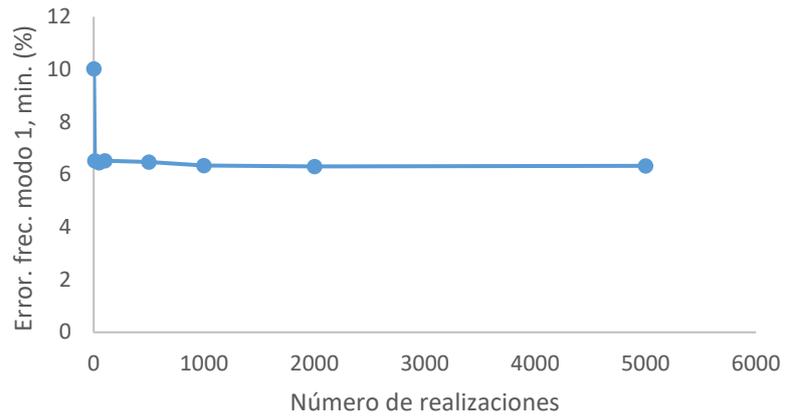


Figura 5-9 Gráfica del error de frecuencia del modo 1 mínimo vs los tests con realizaciones 2, 11, 50, 100, 500, 1000, 5000.

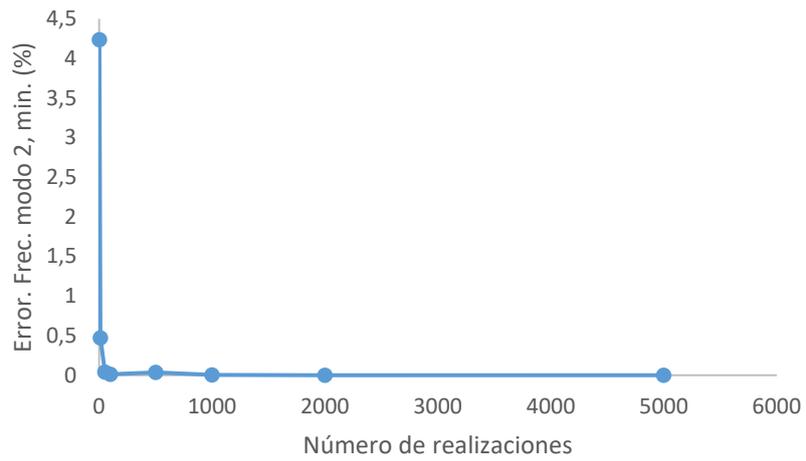


Figura 5-10 Gráfica del error de frecuencia del modo 2 mínimo vs los tests con realiciones: 2, 11, 50, 100, 500, 1000, 5000.

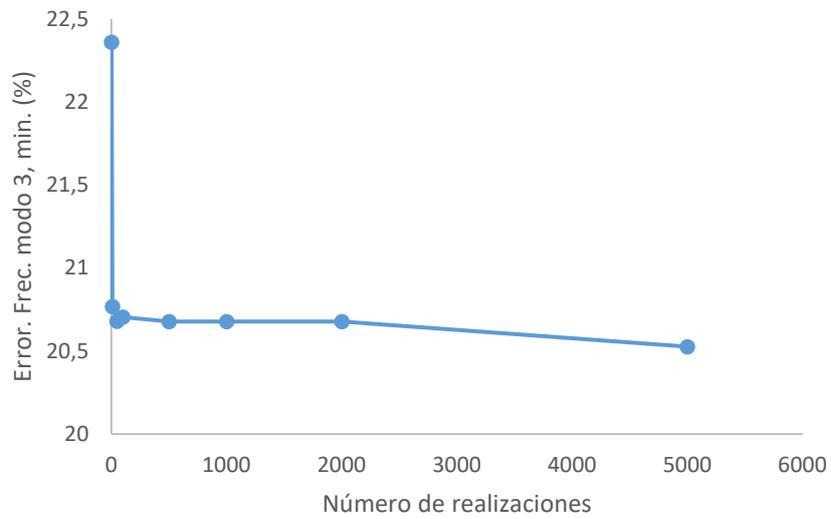


Figura 5-11 Gráfica del error de frecuencia del modo 3 mínimo vs los tests con realizaciones 2, 11, 50, 100, 500, 1000, 5000.

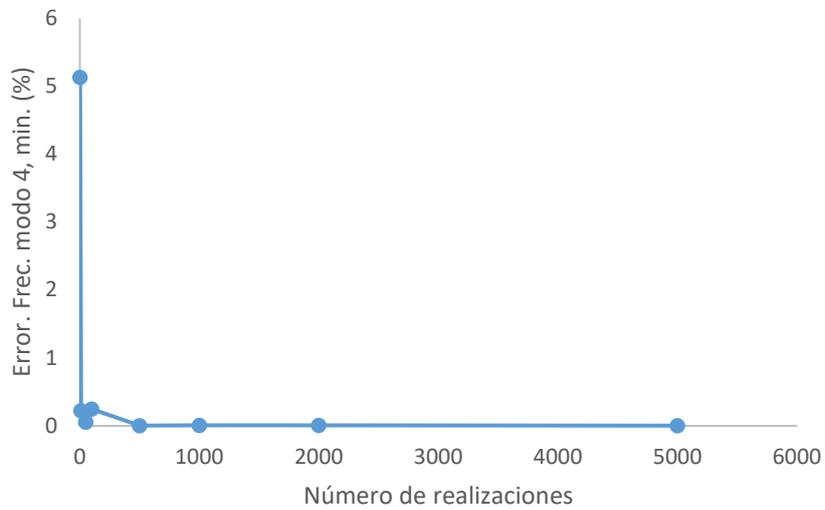


Figura 5-12 Gráfica del error de frecuencia del modo 4 mínimo vs los tests con realizaciones 2, 11, 50, 100, 500, 1000, 5000.

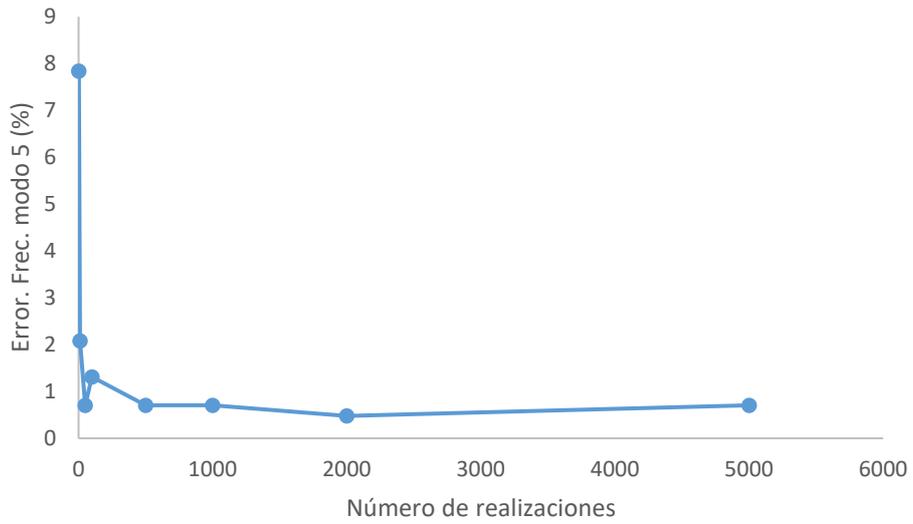


Figura 5-13 Gráfica del Error de frecuencia del modo 5 mínimo vs los tests con realizaciones 2, 11, 50, 100, 500, 1000, 5000.

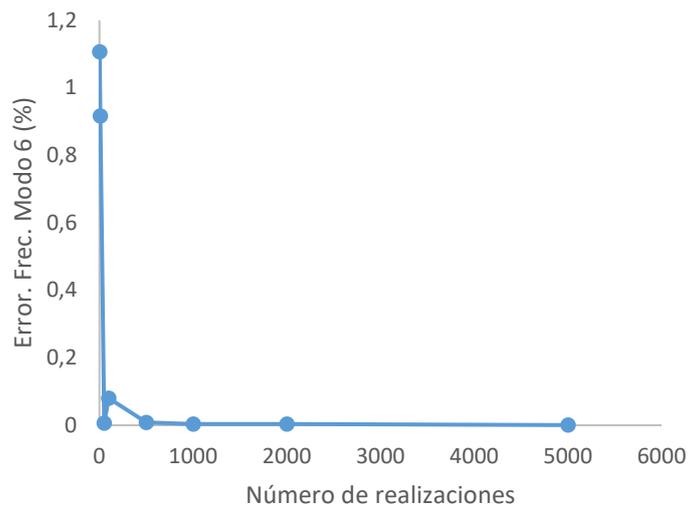


Figura 5-14 Gráfica del Error de frecuencia del modo 6 mínimo vs los tests con realizaciones 2, 11, 50, 100, 500, 1000, 5000.

b/ Segundo intervalo de muestreo

En esta sección se muestran los resultados de utilizar el programa con 5000 realizaciones en el segundo intervalo (Tabla 5-16). El resultado de las realizaciones es el error de las frecuencias definido según la fórmula 3-1 del apartado 3.2.2.

En este proceso, la mejor aproximación se encuentra en la realización 1337 (Tabla 5-20 y Tabla 5-21) con una media de los errores de las frecuencias de 7.11%; este valor es un 7.8% menor que el valor de la configuración inicial (Tabla 5-20). Además, esta media de los errores ha disminuido un 1.54% respecto el primer intervalo, debido a que el intervalo de las condiciones de contorno se ha centrado en la configuración inicial con una amplitud de intervalo menor (sección 3.2.2.3.2), aumentando, de esta forma, la posibilidad de encontrar una mejor aproximación. La Tabla 5-22 presenta los errores mínimos del resto frecuencias en este segundo intervalo muestreo.

Tabla 5-20 Resultado de la realización 1337, solución óptima del programa probabilista automático con 5000 realizaciones en el segundo intervalo de muestreo.

| Realización 1337 | | | |
|-------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Modo | Frecuencia (Hz) | Error de Frec. (%) | Disminución error (%) |
| 1 | 2.499 | 5.929 | 8.980 |
| 2 | 2.750 | 1.731 | 47.415 |
| 3 | 3.006 | 20.830 | -0.756 |
| 4 | 8.659 | 12.860 | -1.605 |
| 5 | 9.298 | 0.010 | 98.598 |
| 6 | 9.768 | 1.325 | 46.798 |
| Media | | 7.116 | 7.860 |

Tabla 5-21 Condiciones de contorno de la realización 1337, con el programa probabilista automático con 5000 realizaciones en el segundo intervalo de muestreo. Se indican el número de la barra, los coeficientes de flexibilidad Cf2 y Cf3 en cada barra y en los nodos extremos de la barra (Nodo 1 y nodo 2).

| Realización 1337 | | | | |
|-------------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|
| Barra | Cf2 Nodo1 | Cf2 Nodo 2 | Cf3 Nodo1 | Cf3 Nodo2 |
| 1 | 5.027 | 4.576 | 3.558 | 2.598 |
| 2 | 5.916 | 5.741 | 3.065 | 3.569 |
| 3 | 4.719 | 5.919 | 3.765 | 2.769 |
| 4 | 4.754 | 5.211 | 3.201 | 2.025 |
| 5 | 5.950 | 5.033 | 2.501 | 2.826 |
| 6 | 4.634 | 4.931 | 2.958 | 2.997 |
| 7 | 4.087 | 5.716 | 2.679 | 3.112 |
| 8 | 4.378 | 5.970 | 2.536 | 3.683 |
| 9 | 5.232 | 5.843 | 2.608 | 3.397 |
| 10 | 5.010 | 4.173 | 3.622 | 3.340 |
| 11 | 4.549 | 5.944 | 2.151 | 3.226 |
| 12 | 5.694 | 4.071 | 2.079 | 3.511 |
| 13 | 4.258 | 5.690 | 2.294 | 2.655 |
| 14 | 5.403 | 5.817 | 2.222 | 2.940 |
| 15 | 4.856 | 4.601 | 3.944 | 3.055 |
| 16 | 5.147 | 4.855 | 3.801 | 3.626 |
| 17 | 5.096 | 5.160 | 2.429 | 3.111 |
| 18 | 4.839 | 4.198 | 2.008 | 3.797 |
| 19 | 4.770 | 5.614 | 3.136 | 3.283 |
| 20 | 4.941 | 5.589 | 2.751 | 2.826 |

| | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|
| 21 | 4.976 | 4.881 | 2.186 | 2.083 |
| 22 | 5.267 | 5.135 | 2.044 | 2.654 |
| 23 | 5.625 | 5.487 | 3.208 | 2.998 |
| 24 | 4.052 | 4.423 | 3.244 | 3.855 |
| 25 | 5.181 | 4.147 | 3.236 | 2.882 |
| 26 | 5.779 | 5.058 | 2.886 | 3.283 |
| 27 | 5.659 | 4.779 | 2.644 | 2.254 |
| 28 | 5.368 | 4.525 | 2.786 | 3.683 |
| 29 | 5.796 | 5.462 | 2.822 | 2.541 |
| 30 | 5.539 | 4.500 | 2.401 | 3.226 |
| 31 | 4.172 | 4.703 | 3.486 | 2.883 |
| 32 | 4.463 | 4.957 | 3.344 | 3.454 |
| 33 | 5.865 | 4.046 | 3.694 | 3.054 |
| 34 | 4.343 | 4.677 | 3.101 | 2.426 |
| 35 | 5.830 | 4.754 | 2.258 | 3.797 |

Tabla 5-22 Error de la frecuencia mínima para los 6 primeros modos y la media (%) con el programa probabilista automático con 5000 realizaciones en el segundo intervalo de muestreo.

| Modo | Min. Error. frec. (%) | Error. Frec. (%) Conf. sin daño | Disminución (%) |
|-------|-----------------------|---------------------------------|-----------------|
| 1 | 5.121 | 6.514 | 21.377 |
| 2 | 1.106 | 3.293 | 66.401 |
| 3 | 19.970 | 20.674 | 3.406 |
| 4 | 10.976 | 12.656 | 13.273 |
| 5 | 0.001 | 0.710 | 99.857 |
| 6 | 0.835 | 2.490 | 66.441 |
| Media | 7.116 | 7.723 | 7.860 |

5.1.2 Resultados de los modelos para el test 2, test 3, test 4 y test 5

Este apartado presenta los resultados para la calibración del modelo numérico con el test 2, test 3, test 4 y test 5 (experimentales). El método consiste en encontrar unos coeficientes de flexibilidad en el modelo numérico dañado para cada test, exigiendo que el decremento de las frecuencias numéricas de los tres primeros modos se aproxime al decremento de las frecuencias del ensayo experimental de los mismos modos. A continuación se presentan para cada test los decrementos de frecuencias aproximados, tanto para el test experimental como para el test numérico. Los decrementos de frecuencias numéricos y experimentales están definidos en las fórmulas 3-2 y 3-3 del apartado 3.2.3.

A/ Modelo numérico del Test 2

A continuación se presentan los resultados de la calibración del modelo con el test 2:

En el test experimental (Tabla 5-23), el decremento de frecuencia entre el test 2 y la configuración sin daño (test 1), ha sido de 0.565% para el modo 1, 0% para el modo 2 y 0.421% para el modo 3. Para la media ha sido 0.186%.

En el test numérico (Tabla 5-24), las condiciones de contorno asignadas en los nodos 3 y 8, han sido: $Cf_2= 3.75 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf_3=2.25 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$. Los resultados obtenidos corresponden a un decremento de frecuencia de 0.6% para el modo 1, 0.46% para el modo 3 y 0.46% para la media. En cuanto a la media del error de las frecuencias entre el modelo numérico y experimental, el resultado ha sido un 0.65% menor que el valor del test 1 (Tabla 5-25).

Tabla 5-23 Resultados experimentales para el test 2. Decremento de frecuencias para los 6 modos y la media.

| Tipo de test | | | |
|-----------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------------|
| EXPERIMENTAL | | | |
| Test | 1 (sin daño) | 2 | |
| Día | 24/07/2029 | 30/07/2019 | |
| Hora | 16:59 | 16:22 | |
| Temperatura | 20.5°C | 23°C | |
| Nodos afectados | 0 | 2 | |
| Par de apriete (N·m) | 5.1 | 2.5 | |
| MODO | Frecuencia (Hz) | Frecuencia (Hz) | Decremento frecuencia (%) |
| 1 | 2.656 | 2.641 | 0.565 |
| 2 | 2.703 | 2.703 | 0.000 |
| 3 | 3.797 | 3.781 | 0.421 |
| 4 | 7.672 | 7.687 | -0.196 |
| 5 | 9.297 | 9.281 | 0.172 |
| 6 | 9.64 | 9.625 | 0.156 |
| Media | | | 0.186 |

Tabla 5-24 Resultados numéricos para el test 2. Decremento de frecuencias para los 6 modos y la media.

| TIPO DE TEST | | | |
|-----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| NUMERICO | | | |
| Test | 1 (sin daño) | 2 | |
| Barras | 0 | 1 | |
| Nodos | 0 | 2 | |
| Cf2 (KN·m/rad) | 5 | 3.75 | |
| Cf3 (KN·m/rad) | 3 | 2.25 | |
| Modo | Frecuencia | Frecuencia | Decremento |
| 1 | 2.483 | 2.468 | 0.604 |
| 2 | 2.792 | 2.779 | 0.466 |
| 3 | 3.012 | 2.998 | 0.465 |
| 4 | 8.643 | 8.642 | 0.012 |
| 5 | 9.231 | 9.196 | 0.379 |
| 6 | 9.88 | 9.878 | 0.020 |
| Media | | | 0.324 |

Tabla 5-25 Error de la frecuencia (experimental – numérico) del test 2, para los 6 primeros modos y la media.

| TEST 2 | | | |
|---------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|
| Tipo de test | Experimental | Numérico | |
| Modo | Frecuencia (Hz) | Frecuencia (Hz) | Error de frecuencia (%) |
| 1 | 2.641 | 2.468 | 6.551 |
| 2 | 2.703 | 2.779 | 2.812 |

| | | | |
|--------------|-------|-------|--------------|
| 3 | 3.781 | 2.998 | 20.709 |
| 4 | 7.687 | 8.642 | 12.424 |
| 5 | 9.281 | 9.196 | 0.916 |
| 6 | 9.625 | 9.878 | 2.629 |
| Media | | | 7.673 |

B/ Modelo numérico del test 3

A continuación, se presentan los resultados de la calibración del modelo con el test 3:

En el test experimental (Tabla 5-26), el decremento de frecuencia entre el test 3 y la configuración sin daño (Test 1), ha sido de 4.62% para el modo 2 y 2.71% para la media.

En el test numérico (Tabla 5-27), las condiciones de contorno asignadas a los nodos 3 y 8 han sido: $Cf_2 = 0.5 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf_3 = 0.3 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$. Los resultados obtenidos corresponden a un decremento de frecuencia de 3.65% para el modo 1 y un 2.43% para la media. En cuanto la media del error de las frecuencias entre el modelo numérico y experimental, el resultado ha sido 0.26% menor que el valor del test 1 (Tabla 5-28).

Tabla 5-26 Resultados experimentales para el test 3. Decremento de frecuencias para los 6 modos y la media.

| Tipo de test | | EXPERIMENTAL | |
|----------------------|------------|--------------|--|
| Test | 1 (sin | 3 | |
| Día | 24/07/2029 | 13/09/2019 | |
| Hora | 16:59 | 20:06 | |
| Temperatura | 20.5°C | 21°C | |
| Nodos afectados | 0 | 2 | |
| Par de apriete (N·m) | 5.1 | 0 | |

| Modo | Frecuencia (Hz) | Frecuencias (Hz) | Decremento frecuencia (%) |
|--------------|-----------------|------------------|---------------------------|
| 1 | 2.656 | | |
| 2 | 2.703 | 2.578 | 4.624 |
| 3 | 3.797 | 3.672 | 3.292 |
| 4 | 7.672 | 7.391 | 3.663 |
| 5 | 9.297 | 9.203 | 1.011 |
| 6 | 9.64 | 9.547 | 0.965 |
| Media | | | 2.711 |

Tabla 5-27 Resultados numéricos para el test 3. Decremento de frecuencias para los 6 modos y la media. En dos casos: coeficiente de flexibilidad mínimo numérico ($Cf_2 = 0.5 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf_3 = 0.3 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$) y el coeficiente de flexibilidad nulo

| Tipo de test | | NUMERICO | | | |
|-------------------|--------|----------|--|---|--|
| Test | 1 (sin | 3 | | 3 | |
| Barras | | 1 | | 1 | |
| Nodos | | 2 | | 2 | |
| Cf_2 (KN·m/rad) | 5 | 0.5 | | 0 | |
| Cf_3 (KN·m/rad) | 3 | 0.3 | | 0 | |

| Modo | Frecuencia (Hz) | Frecuencia (Hz) | Dec. Frec. (%) | Frecuencia (Hz) | Dec. Frec. (%) |
|------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 1 | 2.483 | 2.361 | 4.913 | 2.318 | 6.645 |
| 2 | 2.792 | 2.690 | 3.653 | 2.652 | 5.014 |

| | | | | | |
|--------------|-------|-------|--------------|-------|--------------|
| 3 | 3.012 | 2.925 | 2.888 | 2.902 | 3.652 |
| 4 | 8.643 | 8.635 | 0.093 | 8.631 | 0.139 |
| 5 | 9.231 | 8.958 | 2.957 | 8.935 | 3.207 |
| 6 | 9.88 | 9.869 | 0.111 | 9.865 | 0.152 |
| Media | | | 2.436 | | 3.135 |

Tabla 5-28 Error de la frecuencia (experimental – numérico) del test 3, para los 6 primeros modos y la media.

| TEST 3 | | | |
|---------------------|------------------------|------------------------|--------------------------------|
| Tipo de test | Experimental | Numérico | |
| Modo | Frecuencia (Hz) | Frecuencia (Hz) | Error de Frecuencia (%) |
| 1 | | 2.409 | |
| 2 | 2.578 | 2.708 | 5.043 |
| 3 | 3.672 | 2.946 | 19.771 |
| 4 | 7.391 | 8.484 | 14.788 |
| 5 | 9.203 | 8.712 | 5.335 |
| 6 | 9.547 | 9.67 | 1.288 |
| Media | | | 7.704 |

C/ Modelo numérico del Test 4

A continuación se presenta los resultados de la calibración del modelo con el test 4:

En el test experimental (Tabla 5-29), el decremento de frecuencia entre el test 4 y la configuración sin daño (Test 1), ha sido de 6.92% para el modo 2 y 4.68% para la media.

En el test numérico (Tabla 5-30), las condiciones de contorno asignadas en los nodos 2, 3 y 8, han sido: $Cf_2 = 0.5 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf_3 = 0.3 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$. Los resultados obtenidos corresponden a un decremento de frecuencia de 4.79% para el modo 2 y un 4.42% para la media. En cuanto a la media del error de la frecuencia entre el modelo numérico y experimental el resultado ha sido un 10.9% superior al valor del test 1 (Tabla 5-31).

Tabla 5-29 Resultados experimentales para el test 4. Decremento de frecuencias para los 6 modos y la media.

| Tipo de test | EXPERIMENTAL | | |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| Test | 1 (sin | 4 | |
| Día | 24/07/2029 | 27/08/2019 | |
| Hora | 16:59 | 17:21 | |
| Temperatura | 20.5°C | 22°C | |
| Nodos afectados | 0 | 3 | |
| Par de apriete (N·m) | 5.1 | 0 | |
| Modo | Frecuencia (Hz) | Frecuencias (Hz) | Decremento frecuencia (%) |
| 1 | 2.656 | | |
| 2 | 2.703 | 2.516 | 6.918 |
| 3 | 3.797 | 3.594 | 5.346 |
| 4 | 7.672 | 7.172 | 6.517 |
| 5 | 9.297 | 9.141 | 1.678 |
| 6 | 9.64 | 9.359 | 2.915 |
| Media | | | 4.675 |

Tabla 5-30 Resultados numéricos para el test 4. Decremento de frecuencias para los 6 modos y la media. En dos casos: coeficiente de flexibilidad mínimo numérico (Cf2=0.5 KN·m/rad y Cf3= 0.3 KN·m/rad) y el coeficiente de flexibilidad nulo

| Tipo de test | | NUMERICO | | | |
|----------------|---------|----------|--|--|---|
| Test | 1 (sin) | 4 | | | |
| Barras | | 2 | | | 1 |
| Nodos | | 3 | | | 3 |
| Cf2 (KN·m/rad) | 5 | 0.5 | | | 0 |
| Cf3 (KN·m/rad) | 3 | 0.3 | | | 0 |

| Modo | Frecuencia (Hz) | Frecuencia (Hz) | Dec. Frec. (%) | Frecuencia (Hz) | Dec. Frec. (%) |
|-------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 1 | 2.483 | 2.289 | 7.813 | 2.207 | 11.116 |
| 2 | 2.792 | 2.658 | 4.799 | 2.608 | 6.590 |
| 3 | 3.012 | 2.898 | 3.785 | 2.87 | 4.714 |
| 4 | 8.643 | 8.425 | 2.522 | 8.338 | 3.529 |
| 5 | 9.231 | 8.679 | 5.980 | 8.515 | 7.756 |
| 6 | 9.88 | 9.718 | 1.640 | 9.658 | 2.247 |
| Media | | | 4.423 | | 5.992 |

Tabla 5-31 Error de la frecuencia (experimental – numérico) del test 4, para los 6 primeros modos y la media.

| TEST 4 | | | |
|--------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| Tipo de test | Experimental | Numérico | |
| Modo | Frecuencia (Hz) | Frecuencia (Hz) | Error de frecuencia |
| 1 | | 2.289 | |
| 2 | 2.516 | 2.658 | 5.644 |
| 3 | 3.594 | 2.898 | 19.366 |
| 4 | 7.172 | 8.425 | 17.471 |
| 5 | 9.141 | 8.679 | 5.054 |
| 6 | 9.359 | 9.718 | 3.836 |
| Media | | | 8.562 |

D/ Modelo numérico del Test 5

A continuación, se presenta los resultados de la calibración del modelo con el test 5:

En el test experimental (Tabla 5-32), el decremento de frecuencia entre el test 5 y la configuración sin daño (Test 1) ha sido de 9.24% para el modo 2 y 7.19% para la media.

En el test numérico (Tabla 5-33), las condiciones de contorno asignadas (Cf2 y Cf3) a los nodos 2, 3, 7 y 8, han sido Cf2= 0.5 KN·m/rad y Cf3=0.3 KN·m/rad. Los resultados obtenidos corresponden a un decremento de frecuencia de 7.30% para el modo 2 y un 6.95% para la media. En cuanto la media de los errores de la frecuencia entre el modelo numérico y experimental, el resultado ha sido un 38.2% superior al valor del test 1 (Tabla 5-34).

Tabla 5-32 Resultados experimentales para el test 5. Decremento de frecuencias para los 6 modos y la media.

| Tipo de test | | EXPERIMENTAL | |
|----------------------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| Test | 1 (sin | 5 | |
| Día | 24/07/2019 | 28/08/2019 | |
| Hora | 16.59 | 14.58 | |
| Temperatura | 20.5°C | 25.8°C | |
| Nodos afectados | 0 | 4 | |
| Par de apriete (N·m) | 5.1 | 0 | |
| Modo | Frecuencia (Hz) | Frecuencia (Hz) | Decremento frecuencia (%) |
| 1 | 2.656 | | |
| 2 | 2.703 | 2.453 | 9.249 |
| 3 | 3.797 | 3.5 | 7.822 |
| 4 | 7.672 | 6.906 | 9.984 |
| 5 | 9.297 | 8.922 | 4.034 |
| 6 | 9.64 | 9.172 | 4.855 |
| Media | | | 7.189 |

Tabla 5-33 Resultados numéricos para el test 5. Decremento de frecuencias para los 6 modos y la media. En dos casos: coeficiente de flexibilidad mínimo numérico (Cf2=0.5 KN·m/rad y Cf3= 0.3 KN·m/rad) y el coeficiente de flexibilidad nulo

| Tipo de test | | NUMERICO | | | |
|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|
| Test | 1 (sin daño) | 5 | | 5 | |
| Barras | | 2 | | 2 | |
| Nodos | | 4 | | 4 | |
| Cf2 (KN·m/rad) | 5 | 0.3 | | 0 | |
| Cf3 (KN·m/rad) | 3 | 0.1 | | 0 | |
| Modo | Frecuencia (Hz) | Frecuencia (Hz) | Dec. Frec. (%) | Frecuencia (Hz) | Dec. Frec. (%) |
| 1 | 2.483 | 2.199 | 11.438 | 2.195 | 11.599 |
| 2 | 2.792 | 2.588 | 7.307 | 2.563 | 8.202 |
| 3 | 3.012 | 2.864 | 4.914 | 2.81 | 6.707 |
| 4 | 8.643 | 8.23 | 4.778 | 8.073 | 6.595 |
| 5 | 9.231 | 8.333 | 9.728 | 8.505 | 7.865 |
| 6 | 9.88 | 9.53 | 3.543 | 9.494 | 3.907 |
| Media | | | 6.951 | | 7.479 |

Tabla 5-34 Error de la frecuencia (experimental – numérico) del test 5, para los 6 primeros modos y la media.

| TEST 5 | | | |
|--------------|-----------------|-----------------|-------------------------|
| Tipo de test | Experimental | Numérico | |
| Modo | Frecuencia (Hz) | Frecuencia (Hz) | Error de frecuencia (%) |
| 1 | | 2.199 | |
| 2 | 2.453 | 2.588 | 5.503 |
| 3 | 3.5 | 2.864 | 18.171 |
| 4 | 6.906 | 8.23 | 19.172 |
| 5 | 8.922 | 8.333 | 6.602 |
| 6 | 9.172 | 9.53 | 3.903 |
| Media | | | 10.670 |

También se ha realizado el test asignando coeficientes de flexibilidad nulos en los nodos 2, 3, 7 y 8 ($Cf2=0 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf3=0 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$). Pero los decrementos de frecuencia del modo 2 y la media (8.20% y 7.47%) son superiores al caso anterior (Tabla 5-33). De esta forma, el modelo numérico correspondiente a estas condiciones de contorno deriva en una aproximación menos precisa que la anterior. Además, el coeficiente de flexibilidad de la estructura en los nodos no puede llegar a ser cero debido a que en la configuración real las barras no pierden el contacto con los nodos. Luego, el coeficiente de flexibilidad mínimo en los nodos se ha modelizado mejor con las condiciones de contorno anteriores ($Cf2=0.5 \text{ KN}\cdot\text{m}$ y $Cf3=0.3 \text{ KN}\cdot\text{m}$). En los casos de los test 3 y 4 se realiza la misma conclusión.

5.1.3 Modos de vibración

Cada frecuencia presenta una forma modal diferente para cada modo. A continuación, desde Figura 5-15 la hasta la Figura 5-20, se presentan las 6 primeras formas modales analizadas con el programa numérico ETABS.

El primer modo es de flexión en la dirección transversal (Figura 5-15). Los nodos tienen un movimiento en el eje X.

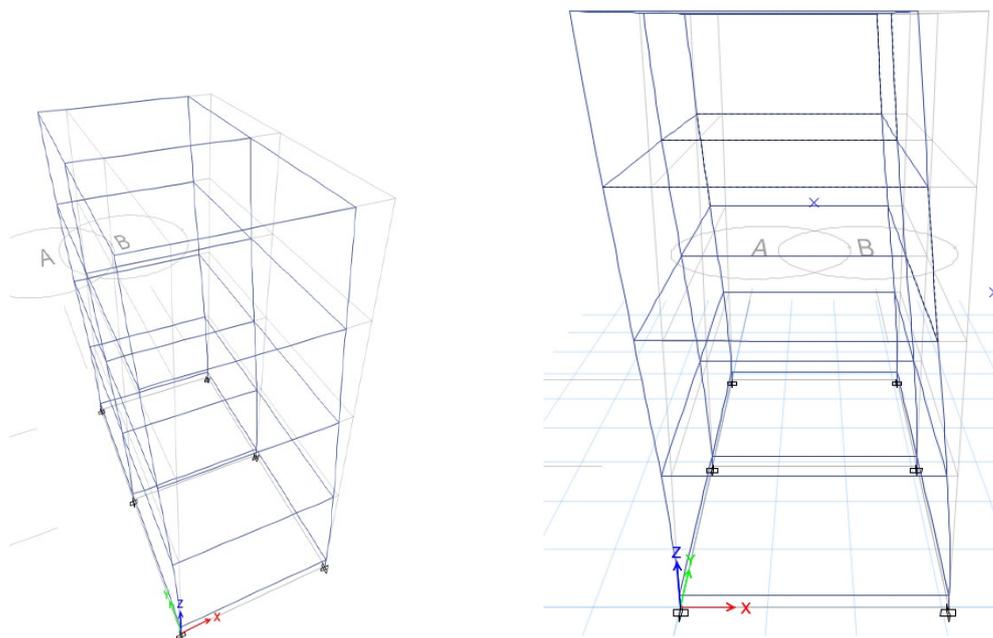


Figura 5-15 Forma modal 1, transversal. 2.483 Hz

El segundo modo es una flexión en dirección longitudinal (Figura 5-16). Los nodos tienen un movimiento en el eje Y.

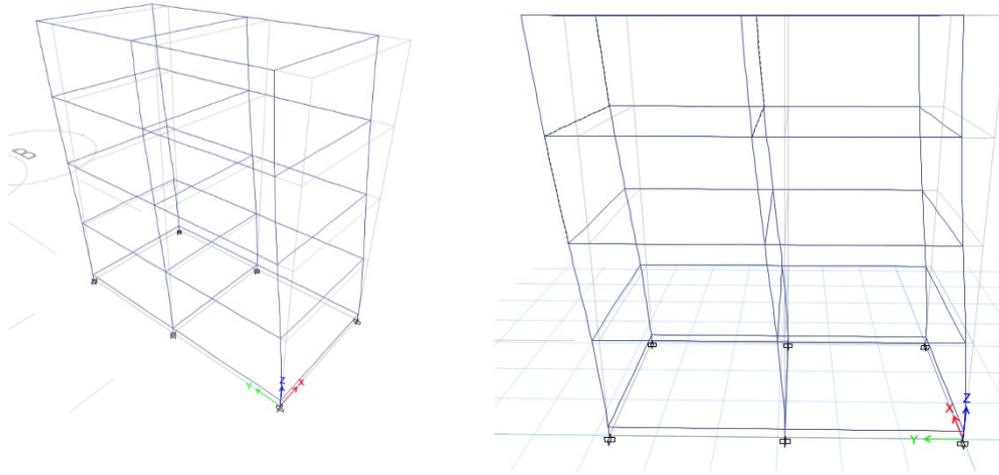


Figura 5-16 Forma modal 2, longitudinal 2.792 Hz

La tercera forma modal es la torsión. En la Figura 5-17 se puede observar una rotación de la estructura respecto un eje vertical el centro de la cara 5 (Figura 3-2).

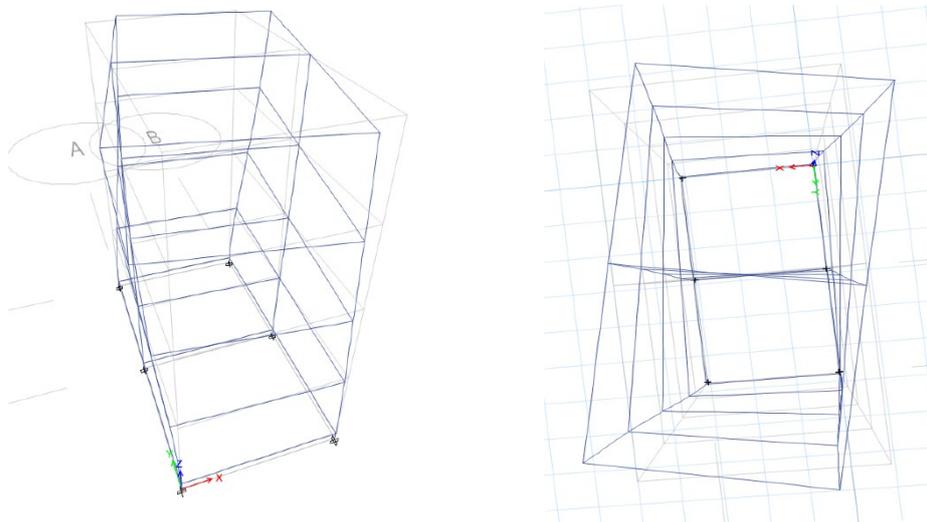


Figura 5-17 Forma modal 3, torsión 3.012 Hz

La cuarta forma modal es una flexión transversal de segundo orden (Figura 5-18).

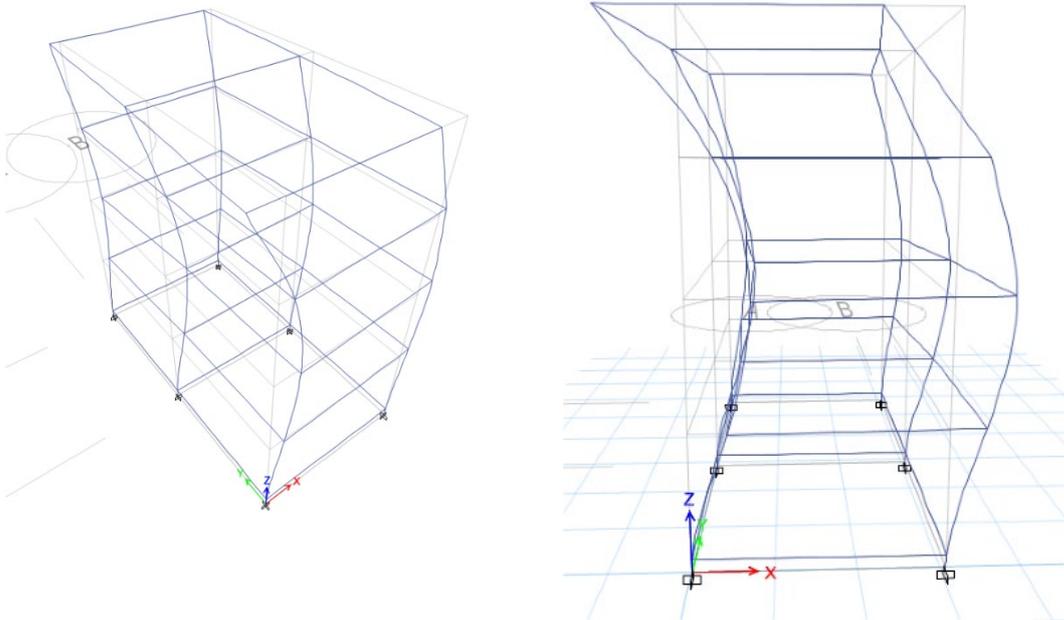


Figura 5-18 Forma modal 4, flexión transversal de segundo orden. 8.643 Hz

La quinta forma modal (Figura 5-19) corresponde una torsión de segundo orden.

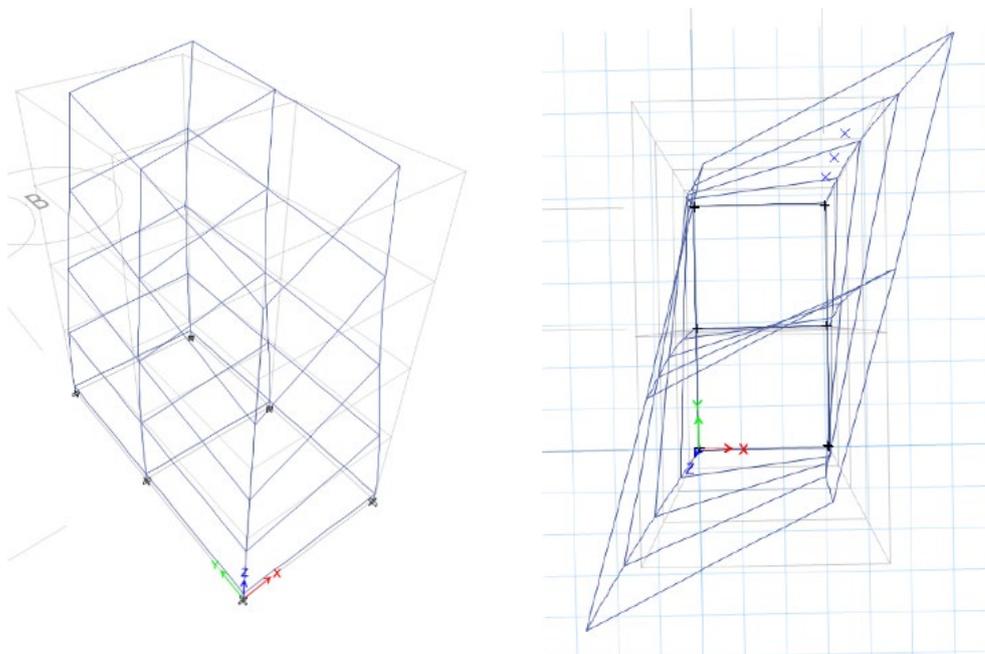


Figura 5-19 Forma modal 5, torsión de segundo orden. 9.231 Hz

La sexta forma modal es una flexión longitudinal de segundo orden (Figura 5-20).

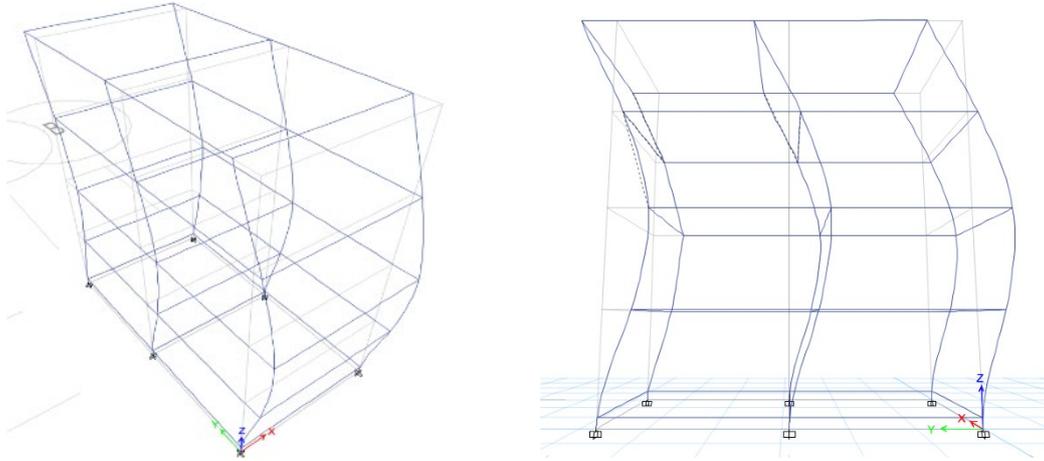


Figura 5-20 Forma modal 6, longitudinal de segundo orden. 9.880Hz

5.2 Resultados del análisis modal experimental

El análisis modal experimental que se ha realizado y se presenta en este apartado no es un análisis modal completo del modelo ya que la finalidad de esta parte del estudio es corroborar el ajuste del modelo numérico. A continuación, se presentan los resultados para cada modo estudiado. Para calcular la forma modal, el primer requisito que han de presentar las señales es una alta correlación en las frecuencias modales. Para el sexto y los cuatro primeros modos de vibración, esta correlación no ha bajado de 0.9 lo que asegura una muy alta relación lineal entre los canales a sus frecuencias respectivas. Para el quinto modo de vibración existe una alta correlación entre los canales transversales o longitudinales pero la correlación entre longitudinales y transversales es mediana (mayor de 0.6). Para todos los modos de vibración, la amplitud espectral de los acelerómetros del 9 al 12 es muy pequeña o no aparecen. Además, no ha sido posible utilizar el canal 5 debido a problemas instrumentales.

Las fases de los espectros cruzados de dos canales nos indican el movimiento relativo entre ellos y por tanto de los modos. Si se toma como positiva la dirección del canal con el que se han calculado las fases del espectro cruzado, aquellos canales que estén en fase con él, serán positivos; mientras que los que presenten fases cercanas a $\pm\pi$ tendrán

direcciones negativas respecto a la dirección en que está colocado el acelerómetro. Hay que tener en cuenta que la dirección de la componente transversal del acelerómetro situado en el nodo 6 (canal 7) es contraria a la de los demás (Figura 3-4) por lo que cuando existe un desfase de π radianes con los demás significa realmente que los nodos están en fase en la dirección transversal. Así, si tanto el canal longitudinal como el transversal de un modo son positivos significa que el movimiento de éste está en el cuadrante XY y (-X) (-Y) de la Figura 3-11.

MODO 1

Como ya se ha comentado anteriormente, el modo 1 solo presenta picos de resonancia en los canales transversales 2, 3 y 7 (Tabla 5-35). Debido a la ausencia de pico en el canal 1 todas las correlaciones y fases del autoespectro se han tomado respecto al canal 2. La fase cercana a 0 entre el canal 2 y 3 indican que los nodos 1 y 2 se desplazan en fase, es decir, en el cuadrante XY y (-X) (-Y) de la Figura 3-11. La fase cercana a $-\pi$ entre la fase del espectro cruzado del canal 2 y 7 indica que el nodo 7 también está en fase con el nodo 1 ya que, como se ha mencionado anteriormente, el canal 7 tiene una dirección positiva inversa a la del canal 2. Estos datos, junto con la menor amplitud del nodo 2 respecto al 1 y 6 y la baja amplitud en los nodos 3, 4 y 5 indicarían una forma modal compatible con una flexión transversal (Tabla 5-36).

Tabla 5-35 Amplitud, coherencia y fase de la frecuencia del modo 1 para la configuración sin daño (test1), 24/07/2019, 16:59

| Canal | 2 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Frecuencia (Hz) | 2.656 | 2.656 | -- | -- | 2.656 | -- |
| Amplitud (ESD m2/S/Hz) | 3.436 | 1.345 | -- | -- | 3.370 | -- |
| Coherencia | -- | 0.9875 | -- | -- | 0.9984 | -- |
| Fase (rad) | -- | -0.089 | -- | -- | -3.117 | -- |

Tabla 5-36 Vector amplitud experimental para el modo 1

| NODO | X (ESD m2/S/Hz) | Y (ESD m2/S/Hz) |
|-------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 3436.00 | 0 |
| 2 | 1345.00 | 0 |
| 3 | -- | -- |
| 4 | -- | -- |
| 5 | -- | --- |
| 6 | 3370.00 | 0 |

MODO 2

En el modo 2 todos los canales presentan resonancia excepto los canales 9, 11 y el 12 que no se aprecia pico ni energía importante (Tabla 5-37).

Las altas coherencias entre cada canal y el canal 1 determinan una clara dependencia lineal de los desplazamientos entre todos los canales.

Tabla 5-37 Amplitud, coherencia y fase de la frecuencia del modo 2 para la configuración sin daño (test 1), 24/07/2019, 16:59

| Canal | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 | 10 |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Frecuencia (Hz) | 2.703 | 2.703 | 2.703 | 2.703 | 2.703 | 2.703 | 2.703 | 2.703 |
| Amplitud (ESD m2/S/Hz) | 250600 | 5048 | 6391 | 159300 | 76890 | 3157 | 228400 | 23910 |
| Coherencia | | 0.996 | 0.9981 | 0.9998 | 0.9999 | 0.9929 | 0.9998 | 0.9427 |
| Fase (rad) | | -3.066 | -2.973 | -0.00649 | 0.00089 | 0.1009 | 0.4101 | 0.0817 |

Las amplitudes de los canales en la dirección longitudinal son claramente superiores a los de las direcciones transversales y mayores cuanto más alto está el piso del nodo, no siendo detectables para las componentes transversales en los nodos inferiores (Tabla 3-39). Estudiando las fases de los espectros cruzados se observa que todos los nodos están en fase, lo que sería compatible con un modo de flexión longitudinal con cierta componente de torsión (Tabla 5-38).

Tabla 5-38 Vector amplitud experimental para el modo 2

| NODO | X (ESD m2/S/Hz) | Y (ESD m2/S/Hz) |
|-------------|------------------------|------------------------|
| 1 | -5048 | 250600 |
| 2 | -6391 | 159300 |
| 3 | -- | -- |
| 4 | -- | -- |
| 5 | -- | -- |
| 6 | 3157 | 228400 |

MODO 3

El modo 3 se aprecia en todos los canales excepto en los 9, 10, 11 y 12 (Tabla 5-39). Excepto para el nodo 3, la amplitud espectral en la dirección transversal es algo mayor que en la longitudinal y mayor cuanto superior es el nivel de la estructura, lo que sería compatible con una torsión con cierta componente de flexión en la dirección transversal (Tabla 5-40).

Tabla 5-39 Amplitud, coherencia y fase de la frecuencia del modo 3 para la configuración sin daño (test1), 24/07/2019, 15:59

| Canal | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Frecuencia (Hz) | 3.797 | 3.797 | 3.797 | 3.797 | 3.797 | 3.797 | 3.797 |
| Amplitud (ESD m2/S/Hz) | 1569 | 7857 | 2538 | 983 | 546 | 7899 | 2152 |

| | | | | | | | |
|------------|---|--------|--------|---------|----------|------|--------|
| Coherencia | - | 0.9593 | 0.9605 | 0.9663 | 0.9653 | 0.96 | 0.9389 |
| Fase (rad) | - | 3.028 | 3.059 | -0.0413 | -0.06521 | 2.75 | -3.04 |

Todos los nodos están en fase (Tabla 5-39) ya que hay que recordar que el canal 7 está en dirección opuesta a los demás canales transversales. Las altas coherencias entre cada canal y el canal 1 determinan una clara dependencia lineal de los desplazamientos entre todos los canales.

Tabla 5-40 Vector amplitud experimental para el modo 3

| NODO | X (ESD m2/S/Hz) | Y (ESD m2/S/Hz) |
|------|-----------------|-----------------|
| 1 | -7857.00 | 1569.00 |
| 2 | -2538.00 | 982.70 |
| 3 | -- | -- |
| 4 | -- | -- |
| 5 | -- | -- |
| 6 | -7899.00 | -2152.00 |

MODO 4

En el modo 4 se aprecia picos de resonancia en todos los canales excepto en el 9, 10, 11 y 12 (Tabla 5-41). Las coherencias en todos los canales superiores a 0.9, indican una buena dependencia lineal con el canal 1.

Los valores de los nodos indican que hay una flexo-torsión compleja y para un estudio más completo, se necesitaría la monitorización de más nodos (Tabla 5-42).

Tabla 5-41 Amplitud, coherencia y fase de la frecuencia del modo 4 para la configuración sin daño (test1), 24/07/2019, 16:59

| Canal | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 |
|------------------------|-------|--------|---------|--------|---------|--------|--------|
| Frecuencia (Hz) | 7.672 | 7.672 | 7.672 | 7.672 | 7.672 | 7.672 | 7.672 |
| Amplitud (ESD m2/S/Hz) | 1309 | 390 | 107 | 678 | 361 | 383 | 974 |
| Coherencia | | 0.9746 | 0.9891 | 0.9841 | 0.9089 | 0.9752 | 0.9475 |
| Fase (rad) | | -0.381 | -0.3597 | -0.328 | -0.8702 | 2.809 | 2.519 |

Tabla 5-42 Vector amplitud experimental para el modo 4.

| NODO | X (ESD m2/S/Hz) | Y (ESD m2/S/Hz) |
|------|-----------------|-----------------|
| 1 | 1309 | 390 |
| 2 | 107 | 678 |
| 3 | -- | -- |
| 4 | -- | -- |
| 5 | -- | -- |
| 6 | -383 | -974 |

MODO 5

En el modo 5 se detecta el pico de resonancia en los nueve primeros canales. En los canales 10, 11 y 12 no se aprecia ningún pico ni tampoco energía importante.

En este modo se detecta una coherencia baja entre los canales transversales y longitudinales pero la coherencia es alta para los canales en las mismas direcciones. Los valores de los nodos indican que hay una flexo-torsión compleja y para un estudio más completo, se necesitaría la monitorización de más nodos (Tabla 5-44).

Tabla 5-43 Amplitud, coherencia y fase de frecuencia del modo 5 para la configuración sin daño (test1), 24/07/2019, 16:59

| Canal | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------------------------|-------|--------|--------|---------|--------|--------|-----------|--------|
| Frecuencia (Hz) | 9.297 | 9.297 | 9.297 | 9.297 | 9.297 | 9.297 | 9.297 | 9.297 |
| Amplitud (ESD m2/S/Hz) | 9.039 | 13.647 | 21.737 | 474.954 | 9.873 | 13.493 | 5.124.520 | 9997 |
| Coherencia | | 0.619 | 0.612 | 0.81 | 0.985 | 0.6155 | 0.809 | 0.585 |
| Fase (rad) | | 1.83 | -1.355 | -2.49 | -2.992 | -1.349 | 0.711 | -1.359 |

Tabla 5-44 Vector amplitud experimental para el modo 5

| NODO | X (ESD m2/S/Hz) | Y (ESD m2/S/Hz) |
|------|-----------------|-----------------|
| 1 | -13647 | 9039 |
| 2 | -21737 | -474954 |
| 3 | -- | -- |
| 4 | -- | -- |
| 5 | -- | -- |
| 6 | -13493 | 5124520 |

MODO 6

En este modo se detecta un pico de resonancia en los primeros 8 canales. En los canales 9, 10, 11 y 12 no se detecta pico o energía. La alta coherencia de los canales determina una muy buena dependencia lineal de los canales (Tabla 5-45). Los valores de los nodos indican que el movimiento en los nodos es compatible con una flexión longitudinal de orden superior (Tabla 5-46).

Tabla 5-45 Amplitud, coherencia y fase de la frecuencia del modo 6 para la configuración sin daño (test1), 24/07/2019, 16:59

| Canal | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | 7 | 8 |
|------------------------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|
| Frecuencia (Hz) | 9.640 | 9.640 | 9.640 | 9.640 | 9.640 | 9.640 | 9.640 |
| Amplitud (ESD m2/S/Hz) | 5093000 | 8582 | 547 | 475000 | 5093000 | 123 | 5125000 |
| Coherencia | | 0.9987 | 0.974 | 1 | 1 | 0.8907 | 1 |
| Fase (rad) | | 3.092 | -0.418 | 3.137 | -3.141 | -1.605 | 0.0475 |

Tabla 5-46 Vector amplitud experimental para el modo 6

| NODO | X (ESD m2/S/Hz) | Y (ESD m2/S/Hz) |
|------|-----------------|-----------------|
| 1 | -8582 | 5093000 |
| 2 | 547 | -475000 |

| | | |
|---|------|---------|
| 3 | -- | -- |
| 4 | -- | -- |
| 5 | -- | -- |
| 6 | -123 | 5125000 |

5.3 Resultados del Mac Factor

Después de calcular la amplitud experimental para cada modo y el desplazamiento numérico para cada modo (desde la Tabla 5-47 hasta Tabla 5-52), se ha calculado el Mac Factor según la fórmula 2-12 del apartado 2.4.

En el modo 1 los resultados indican que los valores en X son bastante mayores que los valores en Y, por consiguiente, el movimiento de los nodos es transversal (Tabla 5-47). El Mac Factor tiene un valor extremadamente bueno (0.9443) debido a que el modelo numérico muestra un movimiento transversal puro y el modelo experimental, también, parece detectar un movimiento transversal puro.

Tabla 5-47 Vector amplitud experimental y vector desplazamiento numérico en el modo 1 para el cálculo del Mac Factor.

| NODO | Vector amplitud experimental | | Vector desplazamiento numérico | |
|------|------------------------------|-----------------|--------------------------------|--------|
| | X (ESD m2/S/Hz) | Y (ESD m2/S/Hz) | X (mm) | Y (mm) |
| 1 | 3436.00 | 0 | -3.364 | -0.121 |
| 2 | 1345.00 | 0 | -2.649 | -0.083 |
| 3 | -- | -- | -- | -- |
| 4 | -- | -- | -- | -- |
| 5 | -- | -- | -- | -- |
| 6 | 3370.00 | 0 | -3.364 | 0.122 |

En el modo 2 los resultados indican que los valores en Y son bastante mayores que los valores en X, por consiguiente, el movimiento de los nodos es longitudinal (Tabla 5-48). El Mac Factor tiene un valor extremadamente bueno (0.9920) debido a que el modelo numérico muestra un movimiento longitudinal puro y el modelo experimental, también, parece detectar un movimiento longitudinal puro.

Tabla 5-48 Vector amplitud experimental y vector desplazamiento numérico en el modo 2 para el cálculo del Mac Factor.

| NODO | Vector amplitud experimental | | Vector desplazamiento numérico | |
|------|------------------------------|-----------------|--------------------------------|--------|
| | X (ESD m2/S/Hz) | Y (ESD m2/S/Hz) | X (mm) | Y (mm) |
| 1 | -5048.00 | 250600.00 | 0.024 | 3.542 |
| 2 | -6391.00 | 159300.00 | 0.02 | 2.843 |
| 3 | -- | -- | -- | -- |
| 4 | -- | -- | -- | -- |
| 5 | -- | -- | -- | -- |
| 6 | 3157.00 | 228400.00 | 0.024 | 3.565 |

En el modo 3 el Mac Factor tiene un valor muy bueno (0.8765) debido a que el modelo numérico muestra una torsión pura, mientras que, el modelo experimental parece detectar una torsión con una pequeña componente de flexión (Tabla 5-49).

Tabla 5-49 Vector amplitud experimental y vector desplazamiento numérico en el modo 3 para el cálculo del Mac Factor.

| NODO | Vector amplitud experimental | | Vector desplazamiento numérico | |
|------|------------------------------|-----------------|--------------------------------|--------|
| | X (ESD m2/S/Hz) | Y (ESD m2/S/Hz) | X (mm) | Y (mm) |
| 1 | -7857.00 | 1569.00 | -4.025 | 2.049 |
| 2 | -2538.00 | 982.70 | -3.237 | 1.649 |
| 3 | -- | -- | -- | -- |
| 4 | -- | -- | -- | -- |
| 5 | -- | -- | -- | -- |
| 6 | -7899.00 | -2152.00 | -4.025 | -2.005 |

En el modo 4 el Mac Factor tiene un valor muy bajo (0.5134) debido a que el modelo numérico muestra una flexión transversal de segundo orden, mientras que, el modelo experimental parece detectar una flexo-torsión de orden superior (Tabla 5-50).

Tabla 5-50 Vector amplitud experimental y vector desplazamiento numérico en el modo 4 para el cálculo del Mac Factor.

| NODO | Vector amplitud experimental | | Vector desplazamiento numérico | |
|------|------------------------------|-----------------|--------------------------------|--------|
| | X (ESD m2/S/Hz) | Y (ESD m2/S/Hz) | X (mm) | Y (mm) |
| 1 | 1309 | 390.2 | -1.733 | -0.312 |
| 2 | 107.8 | 678.3 | 0.62 | 0.189 |
| 3 | -- | -- | -- | -- |
| 4 | -- | -- | -- | -- |
| 5 | -- | -- | -- | -- |
| 6 | -383.8 | -974.7 | -1.733 | 0.32 |

En el modo 5, el Mac Factor tiene un valor muy malo (0.5111) debido a que el modelo numérico muestra una torsión de segundo orden, mientras que el modelo experimental parece detectar una flexo-torsión de segundo orden (Tabla 5-51).

Tabla 5-51 Vector amplitud experimental y vector desplazamiento numérico en el modo 5 para el cálculo del Mac Factor.

| NODO | Vector amplitud experimental | | Vector desplazamiento numérico | |
|------|------------------------------|-----------------|--------------------------------|--------|
| | X (ESD m2/S/Hz) | Y (ESD m2/S/Hz) | X (mm) | Y (mm) |
| 1 | -13647 | 9039 | 0.068 | 2.878 |
| 2 | -21737 | -474954 | -0.018 | -0.88 |
| 3 | -- | -- | -- | -- |
| 4 | -- | -- | -- | -- |
| 5 | -- | -- | -- | -- |
| 6 | -13493 | 5124520 | 0.068 | 2.928 |

En el modo 6, el Mac Factor tiene un valor bueno (0.8632) debido a que el modelo numérico detecta una flexión longitudinal de segundo orden y el modelo experimental parece detectar también una flexión longitudinal de segundo orden (Tabla 5-52).

Tabla 5-52 Vector amplitud experimental y vector desplazamiento numérico en el modo 6 para el cálculo del Mac Factor.

| Vector amplitud experimental | | | Vector desplazamiento numérico | |
|------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------|--------|
| NODO | X (ESD m2/S/Hz) | Y (ESD m2/S/Hz) | X (mm) | Y (mm) |
| 1 | -8582 | 5093000 | 3.835 | -1.439 |
| 2 | 547.1 | -475000 | -1.148 | 0.522 |
| 3 | -- | -- | -- | -- |
| 4 | -- | -- | -- | -- |
| 5 | -- | -- | -- | -- |
| 6 | -123.3 | 5125000 | 3.835 | 1.339 |

5.3.1 Resumen de resultados

A continuación, en la Tabla 5-53, se presenta un resumen de los resultados. Modos 1, 2, 3 y 6 tienen un buen Mac Factor, sin embargo, los modos 4 y 5 tienen peores Mac Factors. Los Mac Factors han determinado que los modos 1, 2, 3 y 6 están bien ajustado mientras que los modos 4 y 5 presentan deficiencias en su ajuste. Los modos bien ajustados corresponden a la forma modal transversal, la forma modal longitudinal, la forma modal de torsión y la forma modal flexión longitudinal de segundo orden.

Tabla 5-53 Resumen de los resultados del Mac Factor por modos

| Modo | Frecuencia Numérica (Hz) | Frecuencia Experimental (Hz) | Mac Factor |
|------|--------------------------|------------------------------|------------|
| 1 | 2.485 | 2.656 | 0.94 |
| 2 | 2.792 | 2.703 | 0.99 |
| 3 | 3.014 | 3.797 | 0.87 |
| 4 | 8.687 | 7.672 | 0.51 |
| 5 | 9.88 | 9.297 | 0.51 |
| 6 | 10.235 | 9.64 | 0.86 |

6 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

Este capítulo presenta los resultados del análisis de componentes principales. En primer lugar, se presentan los resultados de las varianzas acumulada, en segundo lugar se presentan los resultados del estimador Q de las matrices de componentes principales y finalmente se presenta los resultados del estimador T^2 (Caselles et al. 2022).

6.1 Resultados de la varianza acumulada

Para cada test se analiza la varianza explicada. Cada componente principal tiene asociado un porcentaje de la varianza explicada.

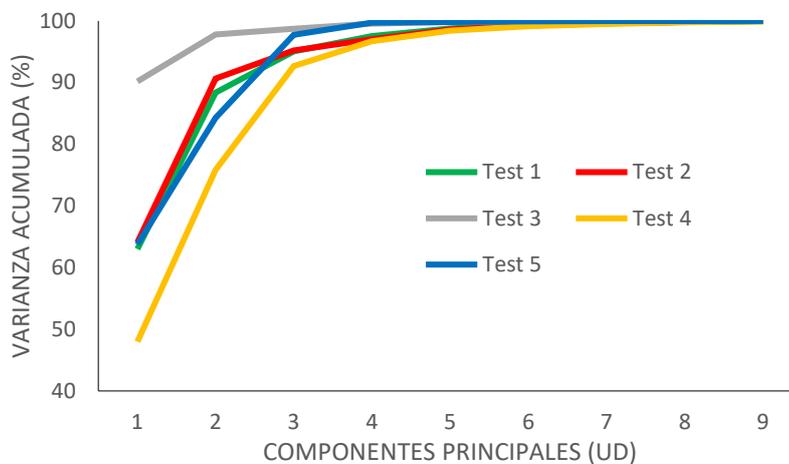


Figura 6-1 Varianza explicada acumulada (%) vs componentes principales (UD) para los 5 tests.

En los test 1, 2 y 3 la inflexión de las curvas está en la segunda componente principal. Para la configuración del test sin daño, tres componentes principales son suficientes para explicar el 95% de los datos de la varianza y para que la curva sea plana (Figura 6-1 y en amarillo en la Tabla 6-7). La configuración del daño medio test 2 (daño medio en dos nodos) también necesita tres componentes principales antes del punto de inflexión para explicar el 95.5% del total de la varianza (en amarillo en la Tabla 6-7). El test 3 (daño alto en dos nodos) y 5 (daño alto en 4 nodos) también necesitan 3 componentes principales para explicar el 98% de los datos de la varianza (en amarillo en la Tabla 6-7). El test 4 (daño alto en tres nodos), la única configuración de daño asimétrico, necesita 4 componentes principales para conseguir la parte de la curva plana y explicar el 97% de los datos (en amarillo en la Tabla 6-7). También se puede observar que el test, que tiene la varianza acumulada explicada mayor para casi todas las componentes principales es la configuración de daño alto test 3 (daño alto en dos nodos); mientras que el test que tiene

la menor varianza acumulada explicada es la configuración del daño alto test 4 (daño alto en tres nodos).

A continuación, en la Tabla 6-7, se presenta la varianza acumulada en función de las componentes principales tomadas para cada test. En amarillo se presentan los puntos de inflexión a partir del cual la pendiente de la curva es constante.

Tabla 6-1 Varianza acumulada (%) vs componentes principales (Ud) los 5 tests. En amarillo se marcan los puntos de inflexión.

| Componentes Principales (Ud) | Varianza acumulada (%) | | | | |
|------------------------------|------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | Test 1 | Test 2 | Test 3 | Test 4 | Test 5 |
| 1 | 63.0124 | 64.0901 | 90.1898 | 47.9918 | 63.7393 |
| 2 | 88.3974 | 90.6798 | 97.7993 | 75.8395 | 84.2723 |
| 3 | 95.0810 | 95.1924 | 98.7480 | 92.6658 | 97.7265 |
| 4 | 97.5503 | 97.0475 | 99.5794 | 96.7299 | 99.7066 |
| 5 | 98.7835 | 98.6042 | 99.8443 | 98.4290 | 99.8123 |
| 6 | 99.4225 | 99.2467 | 99.9466 | 99.1551 | 99.9059 |
| 7 | 99.6452 | 99.5919 | 99.9878 | 99.4968 | 99.9518 |
| 8 | 99.8275 | 99.8409 | 99.9970 | 99.7544 | 99.9792 |
| 9 | 99.9535 | 99.9868 | 99.9998 | 99.9023 | 99.9910 |
| 10 | 99.9852 | 100.0000 | 100.0000 | 99.9839 | 99.9992 |
| 11 | 100.0000 | 100.0132 | 100.0000 | 100.0000 | 100.0000 |
| 12 | 100.0000 | 100.0263 | 100.0000 | 100.0000 | 100.0000 |

Para la aplicación propuesta se necesita suficiente rango de temperaturas para asegurar que las variaciones de frecuencias sean mayores que la resolución de las frecuencias. Por el contrario, la varianza obtenida por el análisis de componentes principales principalmente refleja el error aleatorio producido por la falta de resolución.

La evolución de las componentes principales con la temperatura para la configuración del test no dañado muestra que se necesitan un mínimo de 9 grados de rango de temperatura para asegurar la estabilidad de la varianza acumulada de las componentes principales (Figura 6-2). En el resto de tests se obtienen resultados similares.

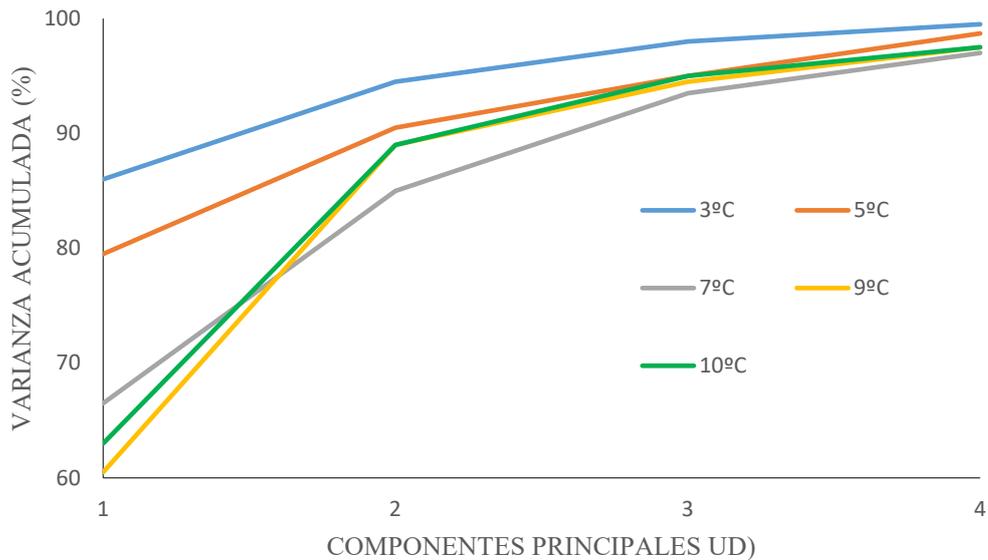


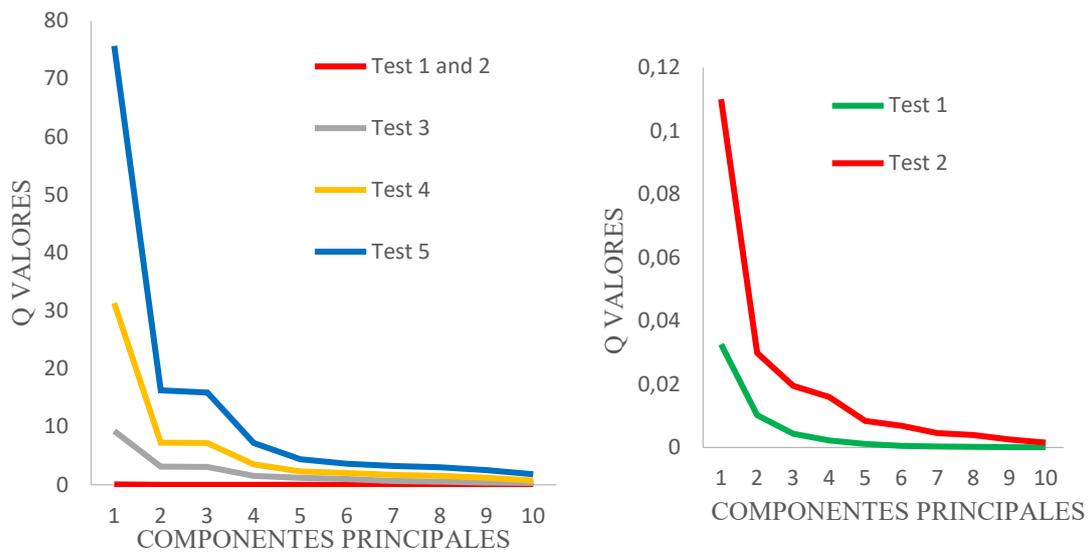
Figura 6-2 Varianza explicada acumulada (%) vs componentes principales (Ud) según el rango de temperaturas.

6.2 Resultados de los valores de Q

Para cada configuración dañada de los tests se calcula Q tal como se detalla en la fórmula 2-18 de la sección 2.5.1.

La configuración del test no dañado (test 1) muestra los menores valores de Q para todos los componentes principales (Figura 6-3), mientras que el test con mayores valores de Q es la configuración con daño alto del test 5 (daño en 4 nodos).

Los valores de Q de los tests están ordenados según aumenta el daño. (Figura 6-3 (a)). Los valores de Q de la configuración no dañada y con daño medio (test 1 y 2) son menores que los valores de las configuraciones con daño alto de las estructuras (tests 3, 4, 5). Los valores de Q de la configuración del daño alto test 5 (daño en 4 nodos) es mayor que los valores de la configuración de daño alto test 4 (daño en tres nodos). Además, los valores de Q en la configuración de daño alto del test 4 (daño en tres nodos) es mayor que los valores de la configuración de daño alto del test 3 (daño en dos nodos).



a)

b)

Figura 6-3 (a) Valores de Q vs componentes principales para los cinco tests. (b) Valores de Q vs componentes principales del test 1 y 2.

En los tests 3, 4 y 5 (estructuras con configuraciones de daño alto), los valores Q decrecen uniformemente después de la quinta componente principal, por consiguiente, la quinta componente principal es el punto de inflexión (Figura 6-3 (a)). Pero, para los tests 1 y 2 (test no dañado y daño medio en 2 nodos), los valores de Q decrecen monótonamente desde la primera componente principal. Entonces, en estos dos casos solo se necesita una componente principal para alcanzar el punto de inflexión (Figura 6-3 (a)).

A pesar de que los gráficos de los tests 1 y 2 se confunden (Figura 6-3 (a)) cuando aumentamos la resolución del gráfico en la Figura 6-3(b), se evidencia que los valores de Q en las configuraciones no dañadas de la estructura (test1) son menores que los valores de la configuración de la estructura con daño medio (test 2). Por consiguiente, no solo los valores de Q son suficientemente sensibles para evaluar la diferencia entre daño alto y daño medio y sin daño, pero también se puede diferenciar los valores de la configuración del daño medio (daño en 2 nodos) de la configuración de la estructura sin daño. Para todos los tests realizados, cuando aumentan el número de las componentes principales, los valores de Q disminuyen, debido a que cuando el espacio de proyección de X aumenta, el vector proyección de X es cada vez mejor aproximación de X, luego el vector residuo es menor (Tabla 6-8).

Tabla 6-2 Valores de Q vs componentes principales de todos los tests. En amarillo se marcan los puntos de inflexión.

| Valores de Q en función de las componentes principales | | | | | |
|--|--------------------------|--------------------------|--------|---------|---------|
| PC | Test 1 | Test 2 | Test 3 | Test 4 | Test 5 |
| 1 | 3.261 · 10 ⁻² | 7.744 · 10 ⁻² | 9.2033 | 22.0526 | 44.3376 |
| 2 | 1.023 · 10 ⁻² | 1.959 · 10 ⁻² | 3.0966 | 4.1711 | 8.9825 |
| 3 | 4.338 · 10 ⁻³ | 1.510 · 10 ⁻² | 3.0529 | 4.1588 | 8.6664 |
| 4 | 2.16 · 10 ⁻³ | 1.380 · 10 ⁻² | 1.5256 | 1.9602 | 3.7044 |
| 5 | 1.073 · 10 ⁻³ | 7.320 · 10 ⁻³ | 1.1854 | 1.1064 | 2.1258 |
| 6 | 5.09 · 10 ⁻⁴ | 6.350 · 10 ⁻³ | 0.9690 | 1.0478 | 1.6142 |
| 7 | 3.13 · 10 ⁻⁴ | 4.170 · 10 ⁻³ | 0.6491 | 1.0370 | 1.5403 |
| 8 | 1.52 · 10 ⁻⁴ | 3.800 · 10 ⁻³ | 0.5609 | 1.0060 | 1.4541 |
| 9 | 4.10 · 10 ⁻⁵ | 2.469 · 10 ⁻³ | 0.3908 | 0.8074 | 1.3118 |
| 10 | 1.31 · 10 ⁻⁵ | 1.508 · 10 ⁻³ | 0.3184 | 0.4105 | 1.0937 |

6.3 Resultados de los valores de T²

Para cada test dañado, el valor de T² se calcula tal como se explica en la fórmula 2-17 de la sección 2.5.1.

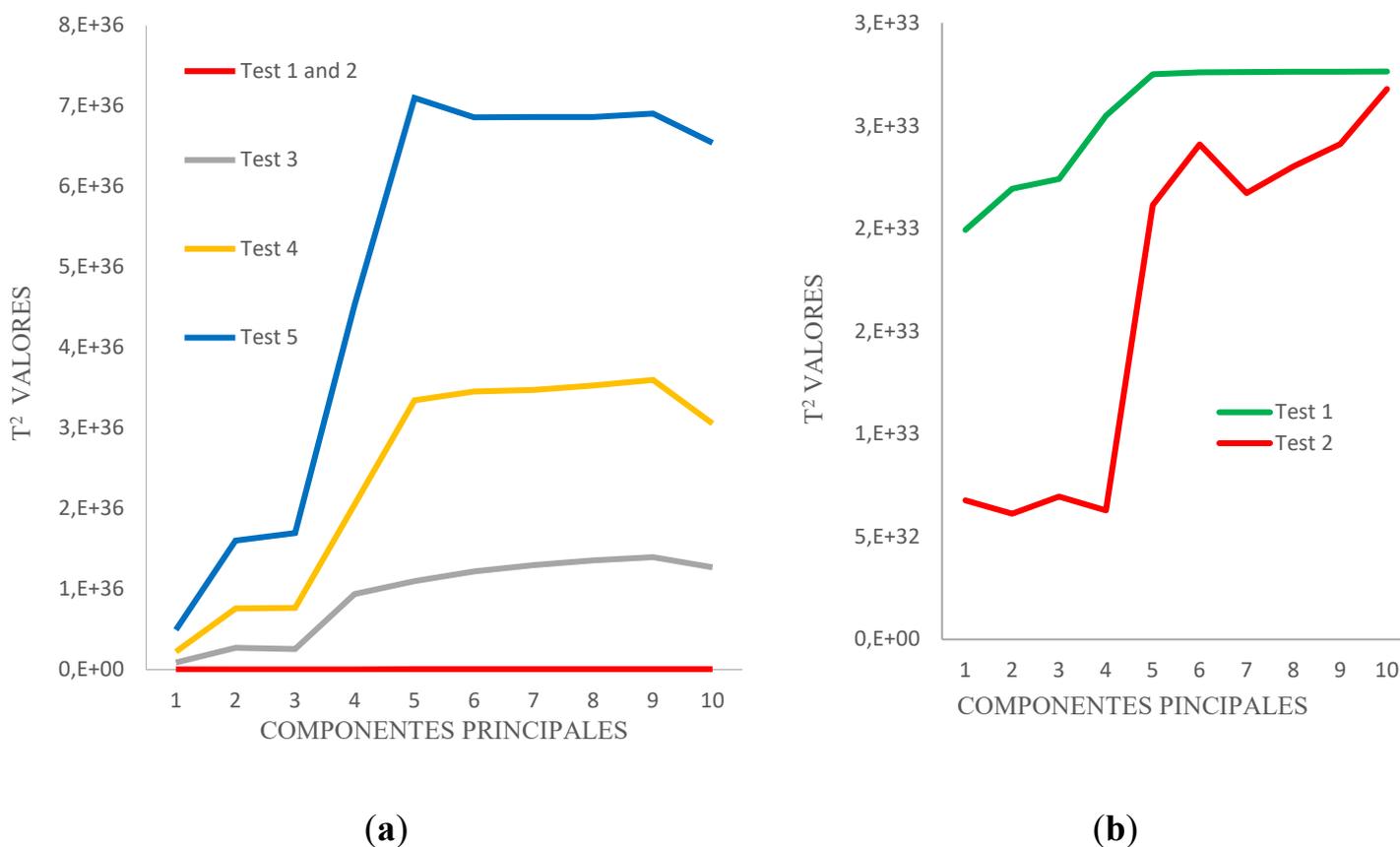


Figura 6-4 (a) Valores de T² vs componentes principales para los cinco tests. (b) Valores de T² vs componentes principales de test 1 y 2

Para todos los tests, cuando las componentes principales aumentan, los valores de T^2 también aumentan (Figura 6-4) porque el espacio de proyección es mayor, por consiguiente, la proyección es una mejor aproximación de X. La forma creciente de la gráfica de T^2 es opuesta a la variación decreciente de la gráfica de la Q.

Los valores de T^2 de los tests están ordenados según el daño creciente (Figura 6-4 (a) y Tabla 6-9). Los valores de T^2 de las estructuras no dañadas y con daño medio (test 1 y test 2) son menores que los valores de las tres estructuras con daños altos (tests 3, 4 y 5). Los valores de T^2 de la estructura de daño alto en 4 nodos (test 5) es mayor que los valores de la estructura con daño alto en 3 nodos (test 4). Además, los valores de T^2 en la estructura con daño alto en tres nodos (test 4) es mayor que los valores de la estructura con daño alto en dos nodos (test 3).

En los tests 3, 4 y 5 (daño alto en la estructura), los valores de T^2 se incrementan uniformemente después de la quinta componente principal, por consiguiente, la quinta componente es el punto de inflexión (Figura 6-4 (a)). Sin embargo, para los tests 1 y 2 (Estructura no dañada y con daño medio), los valores de T^2 se incrementan monótonamente desde la primera componente principal. Luego, en estos dos casos solo se necesita una componente principal para alcanzar el punto de inflexión (Figura 6-4 (a)). Incrementando la resolución del grafico (Figura 6-4 (b)), se observa que los valores de T^2 para la estructura no dañada (test 1) son mayores que los valores de T^2 para la estructura con daño medio en dos nodos (test 2).

Tabla 6-3 Valores de T^2 vs componentes principales de todos los tests. En amarillo se marcan los puntos de inflexión.

| Valores de T^2 en función de las componentes principales | | | | | |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| PC | Test 1 | Test 2 | Test 3 | Test 4 | Test 5 |
| 1 | 1.99 · 10 ³³ | 6.76 · 10 ³² | 8.80 · 10 ³⁴ | 2.22 · 10 ³⁵ | 4.94 · 10 ³⁵ |
| 2 | 2.19 · 10 ³³ | 6.12 · 10 ³² | 2.70 · 10 ³⁵ | 7.60 · 10 ³⁵ | 1.60 · 10 ³⁶ |
| 3 | 2.24 · 10 ³³ | 6.96 · 10 ³² | 2.55 · 10 ³⁵ | 7.68 · 10 ³⁵ | 1.70 · 10 ³⁶ |
| 4 | 2.55 · 10 ³³ | 6.27 · 10 ³² | 9.37 · 10 ³⁵ | 2.05 · 10 ³⁶ | 4.53 · 10 ³⁶ |
| 5 | 2.75 · 10 ³³ | 2.11 · 10 ³² | 1.10 · 10 ³⁶ | 3.35 · 10 ³⁶ | 7.10 · 10 ³⁶ |
| 6 | 2.76 · 10 ³³ | 2.41 · 10 ³² | 1.23 · 10 ³⁶ | 3.45 · 10 ³⁶ | 6.86 · 10 ³⁶ |
| 7 | 2.76 · 10 ³³ | 2.17 · 10 ³² | 1.30 · 10 ³⁶ | 3.47 · 10 ³⁶ | 6.86 · 10 ³⁶ |
| 8 | 2.76 · 10 ³³ | 2.30 · 10 ³² | 1.36 · 10 ³⁶ | 3.53 · 10 ³⁶ | 6.86 · 10 ³⁶ |
| 9 | 2.76 · 10 ³³ | 2.41 · 10 ³² | 1.40 · 10 ³⁶ | 3.60 · 10 ³⁶ | 6.91 · 10 ³⁶ |
| 10 | 2.76 · 10 ³³ | 2.68 · 10 ³² | 1.27 · 10 ³⁶ | 3.06 · 10 ³⁶ | 6.54 · 10 ³⁶ |

A continuación se presenta una tabla que resume el número de componentes en cada test:

Tabla 6-4: Resumen de número de componentes principales en cada test

| TEST | Número de componentes principales |
|--------|-----------------------------------|
| Test 1 | 1 |
| Test 2 | 1 |
| Test 3 | 5 |
| Test 4 | 5 |
| Test 5 | 5 |

7 RESULTADOS DEL ÍNDICE DE DAÑO

En este capítulo se presentan los resultados del estudio del índice de daños para conseguir una relación con las componentes principales. En primer lugar, se muestran los resultados del método de variación incremental de las condiciones de contorno. En segundo lugar, se presentan los resultados de los índices de daño utilizando el programa probabilista automático.

7.1 Método de variación incremental de las condiciones de contorno

En este apartado se presenta los resultados del índice de daño mediante variaciones incrementales de las condiciones de contorno. Los resultados se muestran en dos fases.

Fase 1

En la fase 1 se aprovechan los resultados de los cinco primeros tests de la fase de calibración del modelo del apartado 5.1.2; en los tests experimentales usados, se calcularon un número de componentes principales en el apartado 6 (Tabla 6-10).

La menor media de los decrementos de las frecuencias y menor índice de daño están en la configuración con un daño medio en dos nodos (test 2) con valores, 0.324% y 0.015 respectivamente (Tabla 7-1).

La media de los decrementos de frecuencia (DF=6.39%) del test con un daño alto en 4 nodos (Test 5) es el valor mayor de todos los tests (Tabla 7-1). En este caso el índice de daño es 0.113.

Tabla 7-1 Resultados de los tests numéricos de la fase 1. Frecuencias (Hz) y decrementos de frecuencias (%). Para los 6 modos y la media.

| FASE 1 | | | | | | | | | | |
|--------------|---------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|--|
| TEST | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | |
| MODO | Frec. (Hz) | Frec. (Hz) | d.frec. (%) | Frec. (Hz) | d.frec. (%) | Frec. (Hz) | d.frec. (%) | Frec. (Hz) | d.frec. (%) | |
| 1 | 2.483 | 2.468 | 0.604 | 2.361 | 4.913 | 2.289 | 8.217 | 2.199 | 11.438 | |
| 2 | 2.792 | 2.779 | 0.466 | 2.69 | 3.653 | 2.658 | 4.981 | 2.588 | 7.307 | |
| 3 | 3.012 | 2.998 | 0.465 | 2.925 | 2.888 | 2.898 | 3.897 | 2.864 | 4.914 | |
| 4 | 8.643 | 8.642 | 0.012 | 8.635 | 0.093 | 8.425 | 2.525 | 8.23 | 4.778 | |
| 5 | 9.231 | 9.196 | 0.379 | 8.958 | 2.957 | 8.679 | 6.162 | 8.333 | 9.728 | |
| 6 | 9.88 | 9.878 | 0.020 | 9.869 | 0.111 | 9.718 | 1.642 | 9.53 | 3.543 | |
| MEDIA | | | 0.324 | | 2.436 | | 4.571 | | 6.951 | |

Fase 2

El modelo que se ha calibrado a partir de los resultados experimentales en la fase 1, se ha usado, en esta fase, para ejecutar realizaciones que representan estados de daño más avanzados (test 6, 7, 8 y 9).

La curva del índice de daño vs media de los decrementos de las frecuencias es creciente, es decir, el índice de daño aumenta a medida que las medias de los decrementos de frecuencia lo hacen (Figura 7-1) hasta el máximo en los test 8 y 9, con valores aproximados de ID=1 y DF=50% (Media).

La media de los decrementos de las frecuencias de los test 6 y 7 son aproximadamente la mitad del valor máximo (test 9) y han aumentado un 229% y 311% respecto el test 5.

La Figura 7-1 muestra la evolución de los puntos de las dos fases. Las curvas del índice de daño vs decremento de frecuencia para los modos 3 y 6 tienen un crecimiento mayor que los modos 1, 2 y la media, ya que tienen un decremento de frecuencia menor (31.9% y 35.9% respectivamente) cuando alcanzan un índice de daño igual a 1. De igual forma, el crecimiento de los modos 1, 2 y la media (aproximadamente 50%) es menor a los modos 4 y 5 (65.1% y 62.4% respectivamente).

Tabla 7-2 Resultados de los tests numéricos de la fase 2. Frecuencias (Hz) y decrementos de frecuencias (%). Para los 6 modos y la media.

| FASE 2 | | | | | | | | |
|---------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| MODO | Test 6 | | Test 7 | | Test 8 | | Test 9 | |
| | Frec. (Hz) | d. frec. (%) |
| 1 | 1.913 | 22.956 | 1.727 | 30.447 | 1.205 | 51.470 | 1.204 | 51.510 |
| 2 | 2.254 | 19.269 | 1.952 | 30.086 | 1.277 | 54.262 | 1.277 | 54.262 |
| 3 | 2.759 | 8.400 | 2.727 | 9.462 | 2.056 | 31.740 | 2.051 | 31.906 |
| 4 | 4.108 | 52.470 | 4.048 | 53.164 | 3.343 | 61.321 | 3.012 | 65.151 |
| 5 | 7.294 | 20.984 | 7.175 | 22.273 | 3.866 | 58.119 | 3.462 | 62.496 |
| 6 | 8.56 | 13.360 | 7.264 | 26.478 | 6.331 | 35.921 | 6.327 | 35.962 |
| MEDIA | | 22.907 | | 28.652 | | 48.806 | | 50.214 |

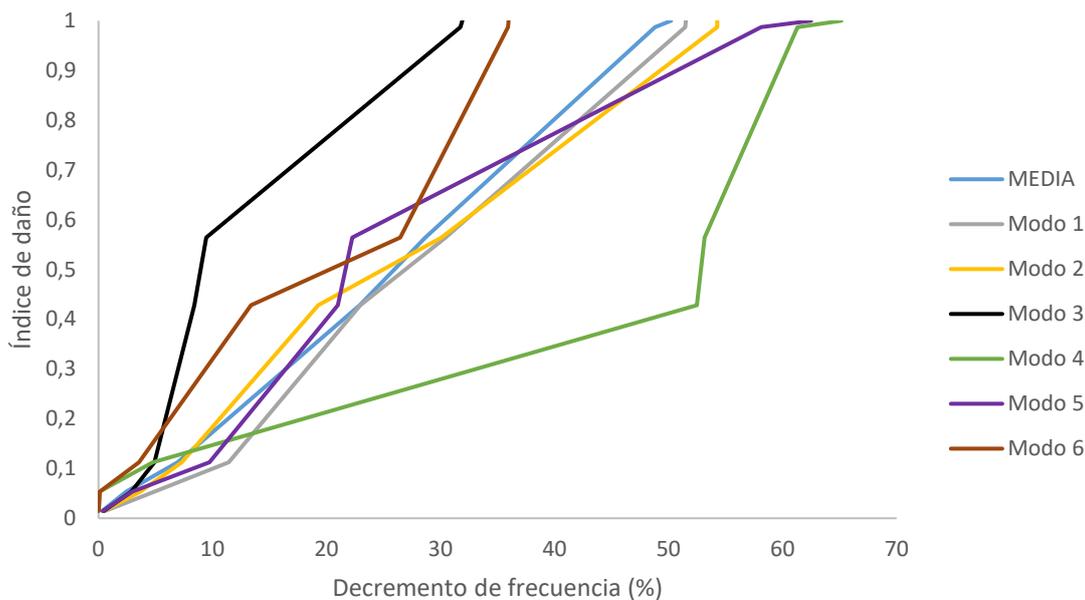


Figura 7-1 Gráfico del índice de daño (%) vs decremento de frecuencia (%), de fase 1 y 2. Para los 6 modos y la media.

7.2 Método probabilista automático

El apartado anterior es una primera aproximación al cálculo del índice de daño ya que se obtiene a partir de una variación incremental de solo 9 puntos. En este apartado se presentan los resultados del cálculo del índice de daño mediante el programa automático probabilístico. El objetivo final es poder realizar un estudio completo del índice de daño utilizando el programa con 5000 realizaciones y poder aplicar con garantías el método de Monte Carlo, pero en primer lugar se realiza un estudio inicial con el programa con 15 realizaciones en varios intervalos.

7.2.1 Programa probabilista automático con 15 realizaciones

En este apartado se presentan los resultados del cálculo del índice de daño utilizando el programa con 15 realizaciones en 4 intervalos. En cada test, el intervalo se adapta estratégicamente para variar el índice de daño de la estructura (Tabla 7-3 y Figura 7-2).

Tabla 7-3 Intervalos de Cf e índice de daño máximo para los tests con el programa probabilista automático de 15 realizaciones. (Test 1, test 2, test 3, test 4, test 5).

| | Test 1 | Test 2 | Test 3 | Test 4 | Test 5 |
|-----------------------|--------|---------|-----------|-------------|--------|
| Cf2 (KN·m/rad) | 4 a 6 | 0.3 a 5 | 1 a 3 | 0.25 a 0.35 | |
| Cf3 (KN·m/rad) | 2 a 4 | 0.1 a 3 | 0.5 a 1.5 | 0.05 a 0.15 | |
| Índice de daño máximo | 0.021 | 0.476 | 0.584 | 0.987 | 0.987 |

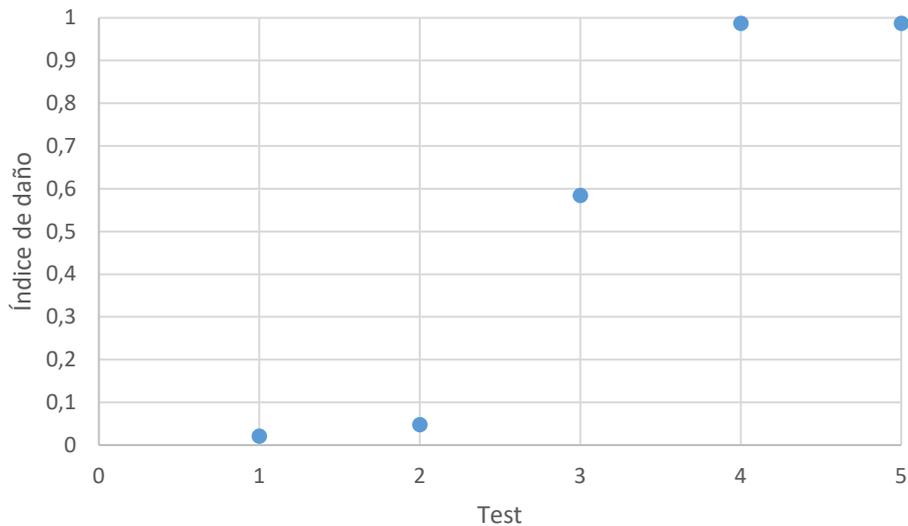


Figura 7-2 Índice de daño vs test 1-5, para los tests con el programa probabilista automático de 15 realizaciones. (Test 1, test 2, test 3, test 4, test 5).

En el test 1, el intervalo de muestreo está centrado en la configuración sin daño y con una amplitud de $2\text{KN}\cdot\text{m}/\text{rad}$. En estos intervalos los índices de daño y la media de los decrementos de las frecuencias han sido los menores y son inferiores a 0.021 y 0.63% respectivamente (Figura 7-3).

En el test 2, el intervalo de muestreo fluctúa entre los coeficientes de flexibilidad mínimos y los coeficientes de flexibilidad de la configuración sin daño. En este test el índice de daño máximo ($ID=0.47$) es aproximadamente la mitad que el índice de daño máximo del apartado 7.1 ($ID=1$), mientras que la media de los decrementos de las frecuencias máximo ($DF=15.33\%$) es aproximadamente una tercera parte respecto el valor máximo del apartado 7.1 ($DF=50\%$).

Con el objetivo de aumentar el índice de daño de 0.47 %, se han realizado los tests 3 y 4, en los que se ha aumentado el decremento de los coeficientes de flexibilidad de la estructura en el modelo numérico, y en consecuencia ha aumentado el índice de daño.

En la configuración de la estructura del test 3, el índice de daño máximo ($ID=0.58$) aumenta un 23% respecto el test 2 (Figura 7-5) mientras que la media de los decrementos de frecuencia es aproximadamente igual que el test 2.

En la configuración que tienen los coeficientes de flexibilidad mínimos (test 4), tanto el índice de daño máximo del test como la media de los decrementos de las frecuencias

máximo son aproximadamente iguales a los valores máximos del apartado anterior (7.1), 0.98 y 48% respectivamente.

El test 5 reagrupa todas las realizaciones de los 4 tests anteriores en una misma gráfica con el objetivo de obtener las ecuaciones de las rectas de regresión para cada modo (Figura 7-7 y Tabla 7-4).

Las pendientes de las rectas se han ordenado (por modos) en el mismo orden que la evolución de las curvas del apartado anterior (Figura 7-1 sección 7.1). Los coeficientes directores de las rectas de los modos 4 y 5 (0.011 y 0.014) son menores que los valores de las rectas 1, 2 y la media (0.018), y éstos a su vez, son menores que los coeficientes de los modos 3 y 6 (0.030 y 0.021).

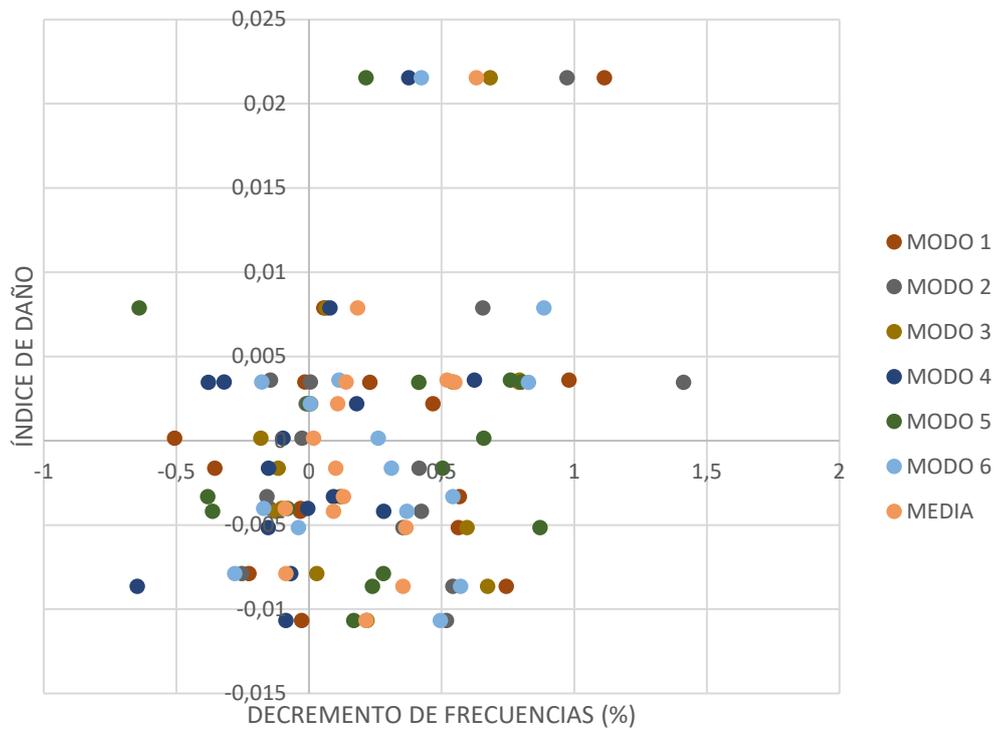


Figura 7-3 Índice de daño (test 1) vs decremento de frecuencias (%). Programa probabilista automático de 15 realizaciones.

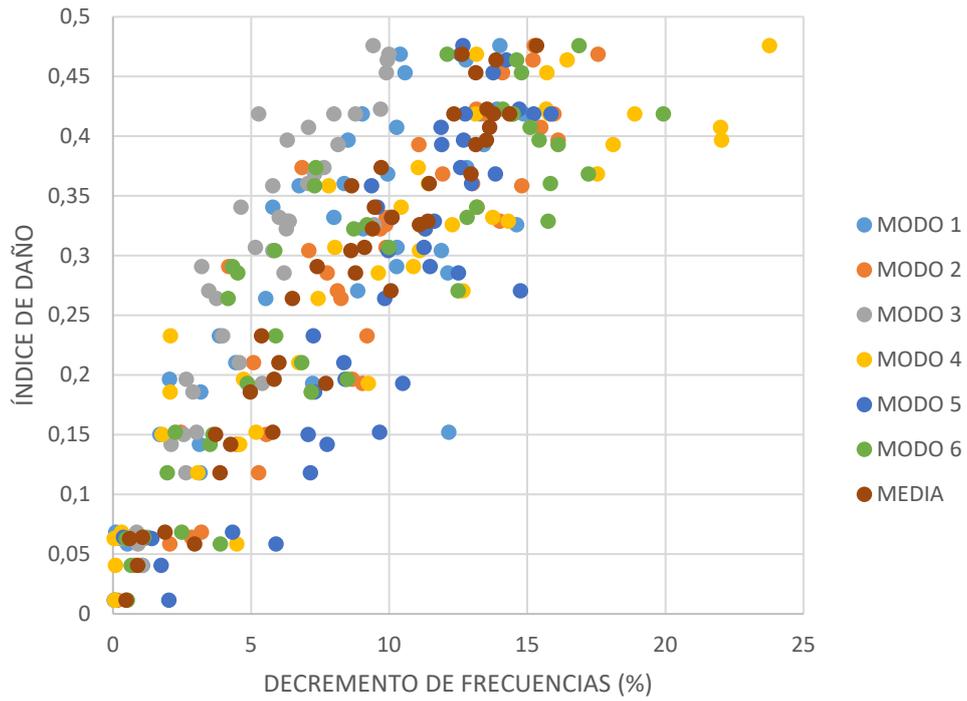


Figura 7-4 Índice de daño (test 2) vs decremento de frecuencia (%). Programa probabilista automático de 15 realizaciones.

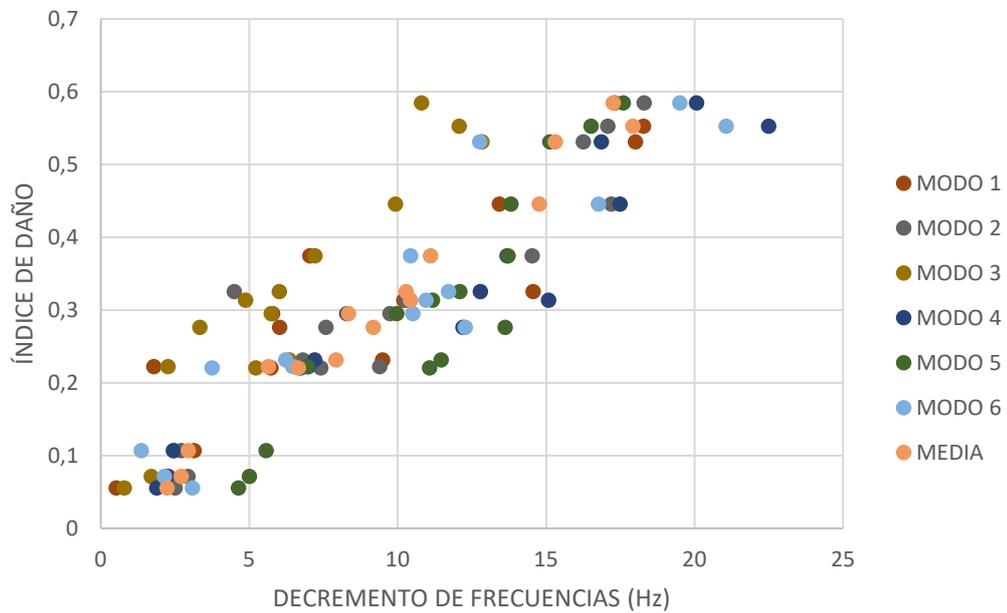


Figura 7-5 Índice de daño (test 3) vs Decremento de frecuencia (%). Programa probabilista automático de 15 realizaciones.

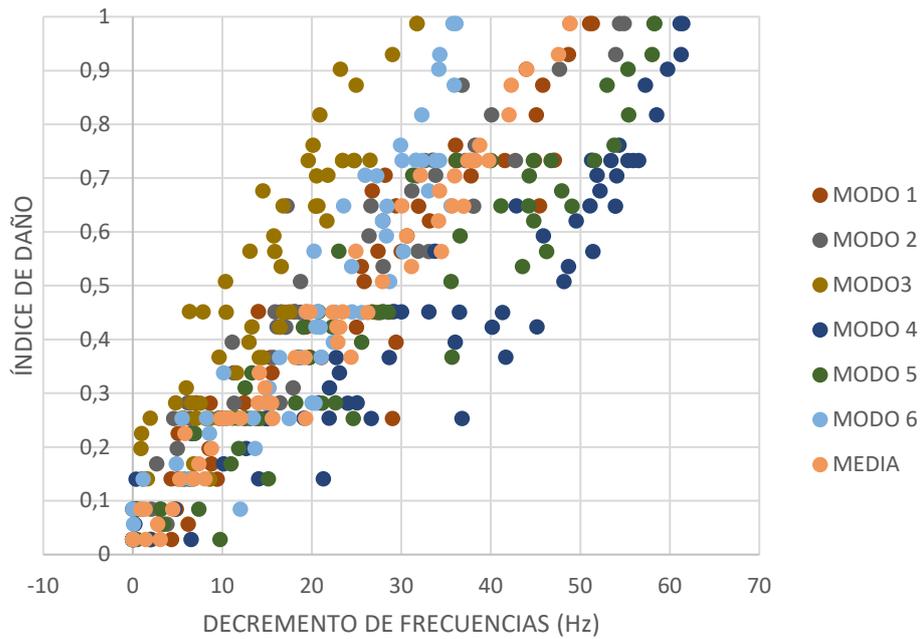


Figura 7-6 Índice de daño (test 4) vs decremento de frecuencia (%). Programa probabilista automático de 15 realizaciones.

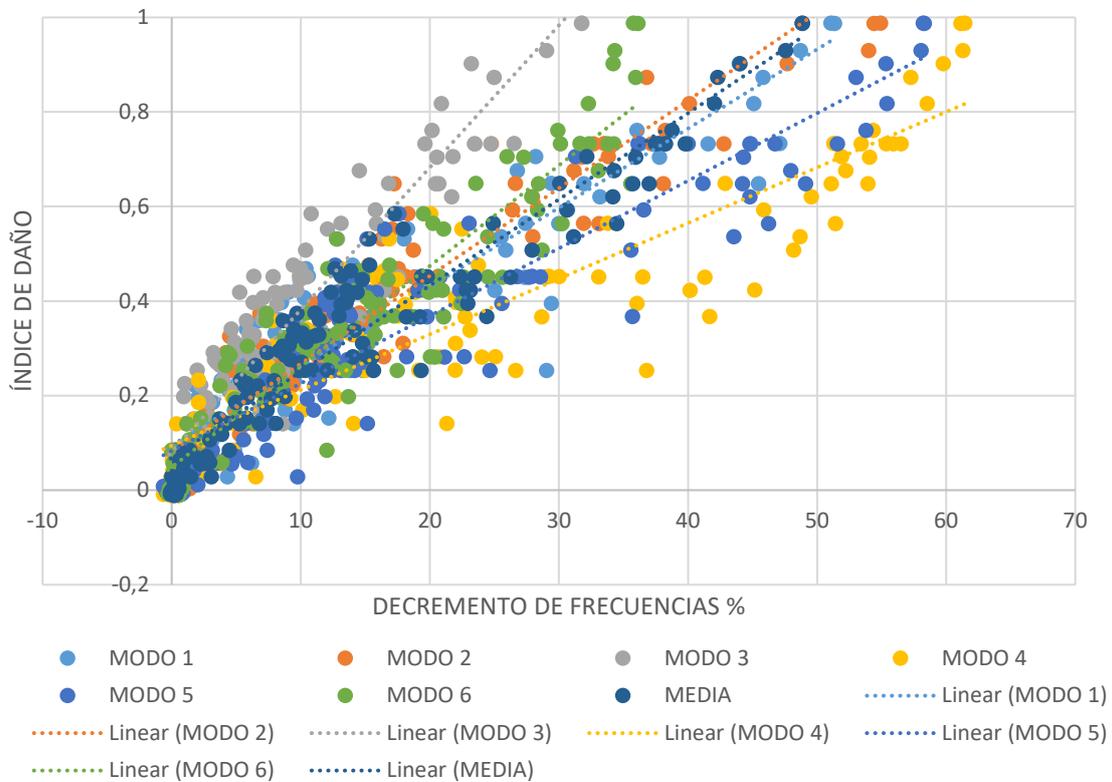


Figura 7-7 Índice de daño (test 5) vs decremento de frecuencia (%). Programa probabilista automático de 15 realizaciones.

Tabla 7-4 Ecuaciones de los ajustes lineales en el test 5, para los seis modos y la media. Programa probabilista automático con 15 realizaciones.

| Modo | Ecuación |
|-------|----------------------------|
| 1 | $y = 0.01822x + 0.088569$ |
| 2 | $y = 0.018559x + 0.082089$ |
| 3 | $y = 0.030073x + 0.081156$ |
| 4 | $y = 0.011763x + 0.094399$ |
| 5 | $y = 0.014287x + 0.08302$ |
| 6 | $y = 0.021282x + 0.04861$ |
| Media | $y = 0.01822x + 0.088569$ |

7.2.2 Programa probabilista automático con 5000 realizaciones

En este apartado se presentan los resultados del estudio del índice de daño utilizando el programa con 5000 realizaciones; este gran número de realizaciones garantiza la aplicación del Método de Monte Carlo de manera fiable.

El programa se ha utilizado con las condiciones de contorno variando según una función de densidad de probabilidad uniforme en los intervalos 0.25-5.5 KN·m/rad y 0.05-3.5 KN·m/rad para Cf2 y Cf3 respectivamente; de esta manera se ha eliminado el sesgo del apartado anterior.

Este apartado se ha dividido en 5 subapartados.

En el primer subapartado 7.2.2.1, se estudia evolución del índice de daño en función del número de realizaciones.

En el subapartado 7.2.2.2, se realiza un ajuste con una regresión lineal en el espacio log-log de los datos. A continuación (subapartado 7.2.2.3), se realizan las curvas de excedencia de acuerdo a los lineamientos descritos en el apartado 2.9.

En el subapartado 7.2.2.4 se calculan los índices de daño medio según la definición de la sección 2.10. Finalmente, en el subapartado 7.2.2.5, se resume en una misma gráfica el test con 5000 realizaciones, los 15 puntos obtenidos mediante el método con variaciones incrementales de las condiciones de contorno (sección 7.1) y los puntos con los índices de daño medio (sección 7.2.2.4).

7.2.2.1 Evolución del índice de daño en función del número de realizaciones

En este apartado se estudia la evolución del índice de daño máximo de un test en función del número de ensayos, hasta 5000 realizaciones.

La curva del índice de daño (Figura 7-11) es creciente debido a que, a mayor número de realizaciones, mayor probabilidad de encontrar una estructura más dañada.

El índice de daño aumenta rápidamente desde 0.367 (test con dos realizaciones) hasta 0.489 en el test con 500 realizaciones (Tabla 7-5). A partir de este valor la curva aumenta suavemente hasta alcanzar el máximo (0.519) en el test con el número máximo de realizaciones; este valor es aproximadamente la mitad que el índice de daño máximo del apartado 7.1.

Para realizar el estudio probabilístico del índice de daño se tomará el test de 5000 realizaciones ya que es el test que tiene el índice de daño mayor.

Tabla 7-5 Índice de daño máximo para los tests con realizaciones 2, 11, 50, 100, 500, 1000, 5000. Con programa probabilista automático.

| Test | Nº Realizaciones | Índice de daño máximo |
|------|------------------|-----------------------|
| 1 | 2 | 0.367 |
| 2 | 11 | 0.390 |
| 3 | 50 | 0.446 |
| 4 | 100 | 0.464 |
| 5 | 500 | 0.489 |
| 6 | 1000 | 0.487 |
| 7 | 2000 | 0.483 |
| 8 | 5000 | 0.519 |

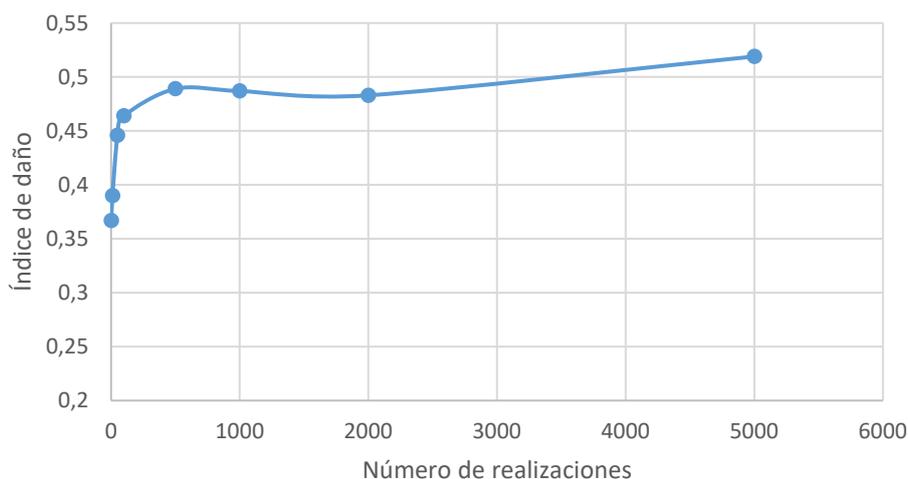


Figura 7-8 Gráfica del índice de daño máximo para los tests con realizaciones 2, 11, 50, 100, 500, 1000, 5000. Con programa probabilista automático.

7.2.2.2 Gráfica: índice de daño vs decremento frecuencia

En este apartado se presentan las gráficas de los índices de daño vs decremento de frecuencia para el test de 5000 realizaciones (Figura 7-9) para cada frecuencia modal. En la gráfica se realiza un ajuste con una regresión lineal en el espacio log-log (Figura 7-10) de los datos para las seis frecuencias modales y para la media.

Para todos los modos, el ajuste pasa por el origen, y la pendiente de la curva aumenta a medida que se aproxima al origen (Figura 7-9). La curva de la media de los decrementos de las frecuencias es la que mejor se ajusta debido a que tiene un R^2 de 0.92. Los ajustes para los modos 2, 3, 4 y 6 son bastante buenos ya que R^2 fluctua entre 0.70 y 0.78. Pero el ajuste para el modo 5 es regular con un valor de $R^2= 0.57$. En este caso se aprecia que el ajuste tiene una tendencia contraria a la nube de puntos.

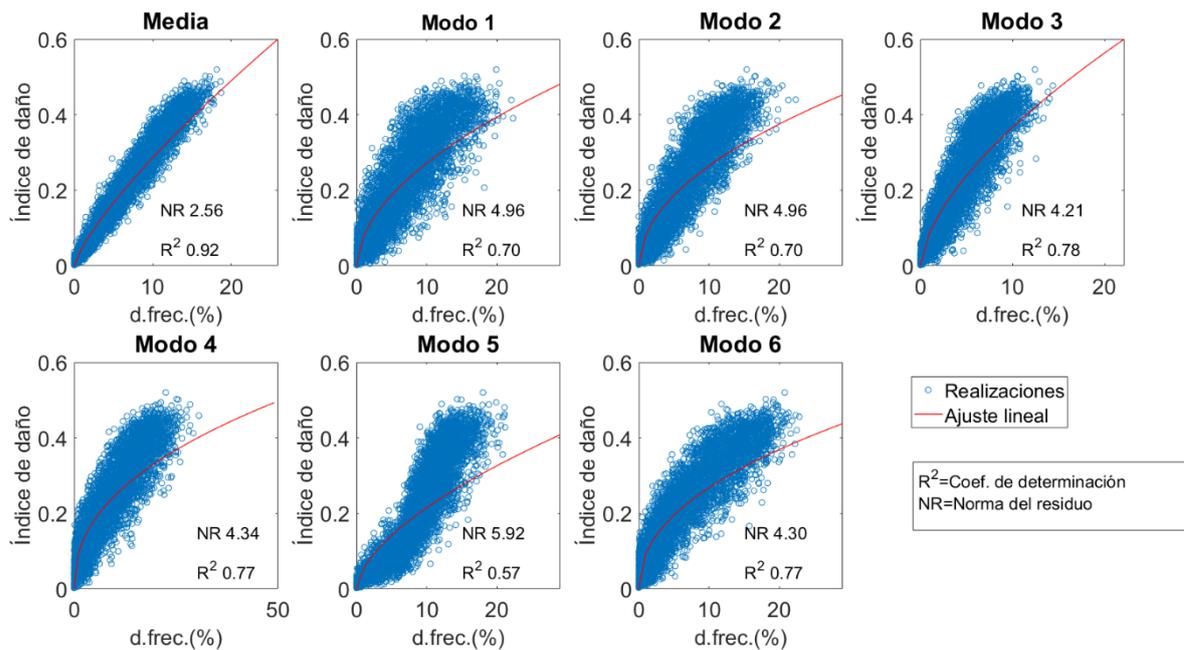


Figura 7-9 Gráfica del índice de daño vs decremento de frecuencia (%) para cada modo y la media. Ajuste con una regresión lineal en el espacio log-log (rojo). En azul se representa las 5000 realizaciones. NR es la norma del residuo y R^2 es el coeficiente de determinación. Programa probabilista automático con 5000 realizaciones.

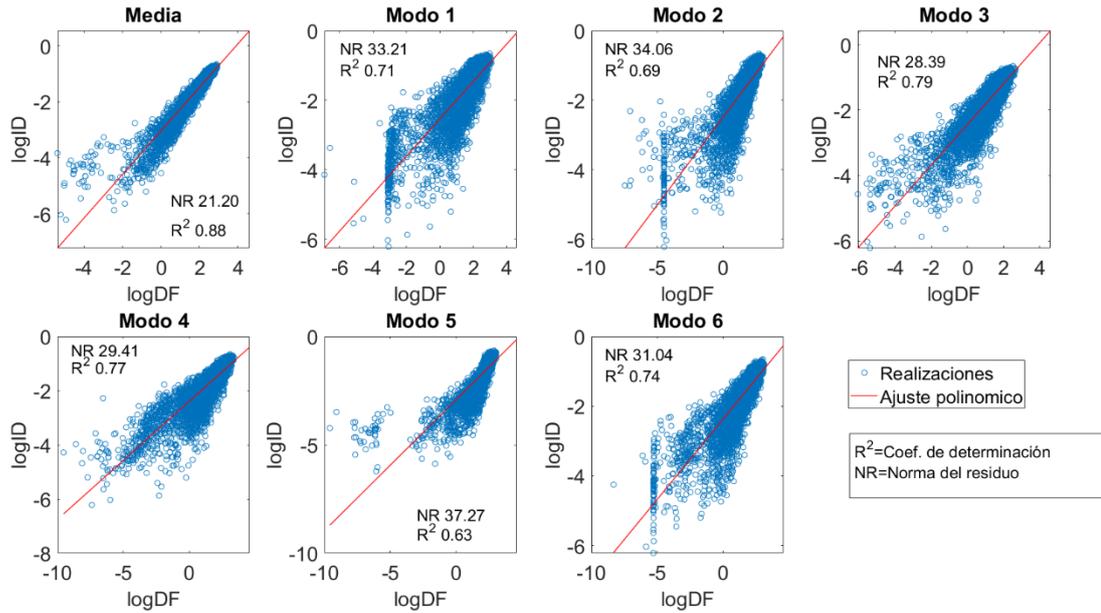


Figura 7-10 Gráfica del índice de daño vs decremento de frecuencia (%) en el espacio log-log. Para cada frecuencia modal y la media. Ajuste con una regresión lineal en el espacio log-log, en rojo. En azul se representa las 5000 realizaciones. NR es la norma del residuo y R^2 es el coeficiente de determinación. Programa probabilista automático con 5000 realizaciones.

7.2.2.3 Curvas de excedencia

Este apartado presenta las curvas de excedencia o curvas de fragilidad según la definición la sección 2.9, para el test de 5000 realizaciones y para las seis frecuencias modales y la media (Figura 7-11). Los estados de daños definidos en este trabajo (Figura 7-11 y Tabla 7-7) se basan en los definidos por Vargas Alzate (2020) en la Tabla 7-6.

Tabla 7-6 Definición de los estados de daño (Vargas Alzate, 2020).

| Estados de daño | Intervalo |
|-----------------|----------------------------|
| Nulo | $DI_{pa}=0.00$ |
| Ligero | $0.00 < DI_{pa} \leq 0.10$ |
| Moderado | $0.10 < DI_{pa} \leq 0.40$ |
| Severo | $0.40 < DI_{pa} \leq 0.65$ |
| Completo | $0.65 < DI_{pa} \leq 1.00$ |
| Colapso | $DI_{pa} \geq 1.00$ |

Para comprobar que estas curvas son compatibles con un caso real, en la frecuencia fundamental (modo1), para una probabilidad de excedencia superior a 70% el decremento de frecuencia es de 42% (curva del índice de daño medio en verde en la Figura 7-12). Es decir, el incremento de periodo es de 72.7%. Este valor se aproxima al cambio de periodo

del modo fundamental de la vibración medida en los edificios de hormigón de Lorca antes y después del terremoto del 11 de mayo de 2011, equivalente a un grado de daño 4 (Vidal et al., 2014). En este trabajo, el daño se basa en el cambio de las características dinámicas de un conjunto de edificio. De esta manera se comprueba que las curvas de excedencias calculadas en este trabajo son compatibles con un caso real.

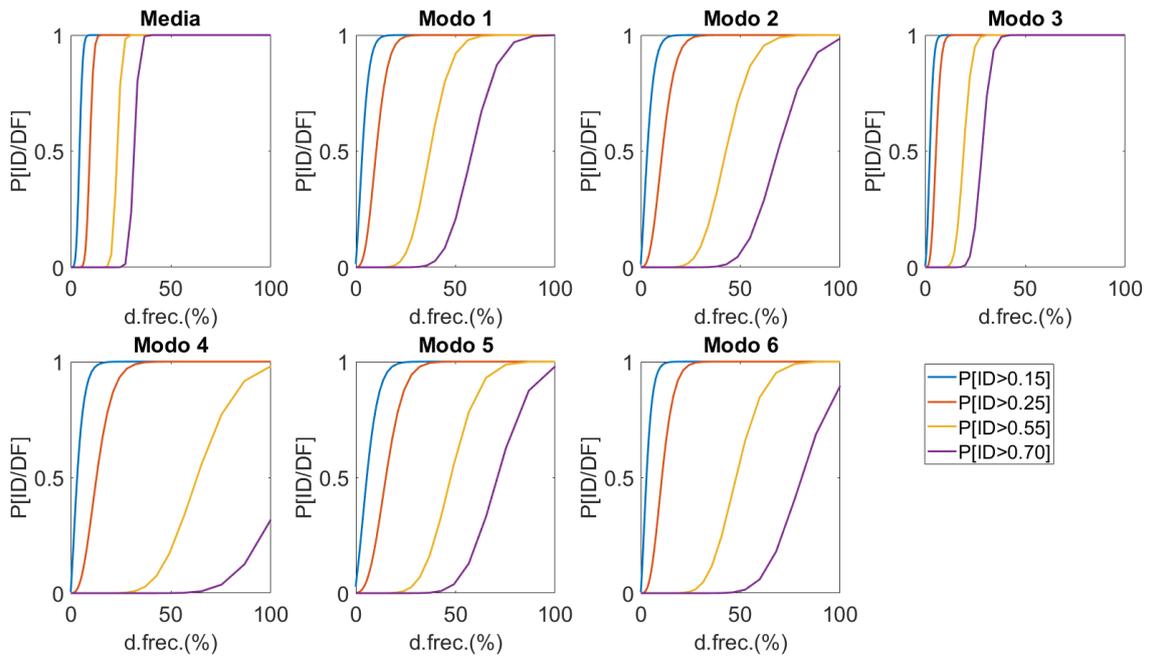


Figura 7-11 Curva de excedencia o fragilidad para los 6 modos y la media. Programa probabilista automático con 5000 realizaciones.

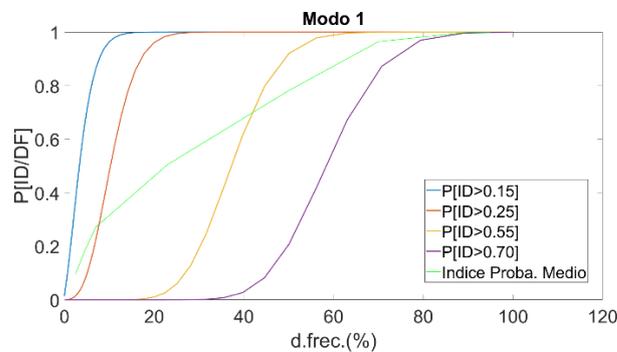


Figura 7-12 Curvas de excedencia del modo 1 y curva del índice de daño medio en verde.

7.2.2.4 Índice de daño medio

En este apartado se calculan los índices de daño medio para los decrementos de frecuencia de 2.436% (test 3), 4.571% (test 4), 6.961% (test 5), 22.907% (test 6), 28.806% del apartado 7.1.

El índice de daño medio definido en el apartado 2.10 se ha obtenido a partir de las curvas de excedencia según el ajuste de la media de los decrementos de las frecuencias (7.2.2.3) debido a que es el que tiene mejor coeficiente de determinación (sección 7.2.2.2).

En la Tabla 7-7 se presentan los resultados del cálculo del índice de daño medio y se indica la probabilidad de excedencia en cada umbral para cada decremento de frecuencia.

Tabla 7-7 Índice de daño medio, estados de daño y límites, probabilidad de excedencia y probabilidad acumulada.

| Dec. Frec. Media (%) | Estado de daño | Limite | Coef. | Prob. Exced. | Prob. Acum. | Índice de daño medio |
|----------------------|----------------|--------|-------|---------------------|-------------|----------------------|
| 2.436 | Nulo | 0 | 0 | 1 | 0 | 0.0141 |
| | Ligero | 0.15 | 0 | 0.0566 | 0.9434 | |
| | Moderado | 0.25 | 1 | $9.8 \cdot 10^{-8}$ | 0.0566 | |
| | Severo | 0.55 | 2 | 0 | 0 | |
| | Completo | 0.70 | 3 | 0 | 0 | |
| | Colapso | 1 | 4 | 0 | 0 | |
| 4.571 | Nulo | 0 | 0 | 1 | 0 | 0.1408 |
| | Ligero | 0.15 | 0 | 0.5630 | 0.437 | |
| | Moderado | 0.25 | 1 | 10^{-4} | 0.563 | |
| | Severo | 0.55 | 2 | 0 | 0 | |
| | Completo | 0.70 | 3 | 0 | 0 | |
| | Colapso | 1 | 4 | 0 | 0 | |
| 6.961 | Nulo | 0 | 0 | 1 | 0 | 0.2533 |
| | Ligero | 0.15 | 0 | 0.9709 | 0.0291 | |
| | Moderado | 0.25 | 1 | 0.0423 | 0.9286 | |
| | Severo | 0.55 | 2 | 0 | 0.0423 | |
| | Completo | 0.70 | 3 | 0 | 0 | |
| | Colapso | 1 | 4 | 0 | 0 | |
| 22.907 | Nulo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.6099 |
| | Ligero | 0.15 | 0 | 1 | 0 | |
| | Moderado | 0.25 | 1 | 1 | 0 | |
| | Severo | 0.55 | 2 | 0.4399 | 0.5601 | |
| | Completo | 0.70 | 3 | 0 | 0.4399 | |
| | Colapso | 1 | 4 | 0 | 0 | |
| 28.806 | Nulo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.7690 |
| | Ligero | 0.15 | 0 | 1 | 0 | |
| | Moderado | 0.25 | 1 | 1 | 0 | |
| | Severo | 0.55 | 2 | 0.9983 | 0.0017 | |
| | Completo | 0.70 | 3 | 0.0784 | 0.9199 | |
| | Colapso | 1 | 4 | 0 | 0.0784 | |

7.2.2.5 Relación entre el índice de daño (ID), el decremento de frecuencia (DF) y las componentes principales (CP)

El objetivo de este apartado es presentar la relación del índice de daño con las componentes principales. Para ello se utilizan los test numéricos que están calibrados con los experimentales (tests 1 a 5 del apartado 7.1), dado que en el apartado 6 se calcularon el número de componentes principales en cada test (Tabla 6-10).

En el gráfico del índice de daño vs media de los decrementos de las frecuencias con 5000 realizaciones (Figura 7-13) se han situado los puntos (1 al 9) obtenidos por los métodos de variaciones incrementales (apartado 7.1) y los puntos (10 al 15) calculados a partir del índice de daño medio (apartado 7.2.2.4).

El valor del índice de daño aumenta a medida que la media de los decrementos de las frecuencias y el número de componentes principales lo hacen; de esta manera se muestra de manera explícita la relación entre los índices de daño y las componentes principales.

Los puntos 1 y 2 (en magenta en la Figura 7-13) tienen los índices de daño y media de los decrementos de las frecuencias menores, 0.015, 0.324% respectivamente. Estos puntos tienen asociada 1 componente principal que corresponde a las dos configuraciones menos dañadas (Tabla 6-10).

Los puntos 3, 4 y 5 (en verde en la Figura 7-13) tienen asociados 5 componentes principales (Tabla 6-10). No obstante, los índices de daño son bajos e inferiores a 0.113, al igual que las medias de los decrementos de frecuencia que son inferiores a 6.95%.

En los puntos 6, 7, 8 y 9 (color cian en la Figura 7-13) se ha aumentado el daño numéricamente hasta el valor máximo del apartado 7.1 (ID=1).

Todos los puntos siguen aproximadamente la misma tendencia que el ajuste logarítmico (en rojo en la Figura 7-13) con un residuo inferior a 0.11 excepto para el punto 15 con un valor máximo de 0.14. A lo largo de la curva del ajuste, el índice de daño aumenta a medida que los decrementos de frecuencia lo hacen hasta un valor máximo muy aproximado a los puntos 8 y 9, con ID y DF máximos (ID=1 y DF=50%).

Los 7 primeros puntos (ID<0.57; DF<29%) se encuentran en la parte inferior del ajuste logarítmico mientras que los puntos 8 y 9 están aproximadamente en la curva. En cuanto a los puntos calculados con el índice de daño medio (color azul en la Figura 7-13), los dos primeros (ID<0.14; DF<4.6%) se encuentran en la parte inferior del ajuste logarítmico mientras que los 4 restantes se encuentran en la parte superior.

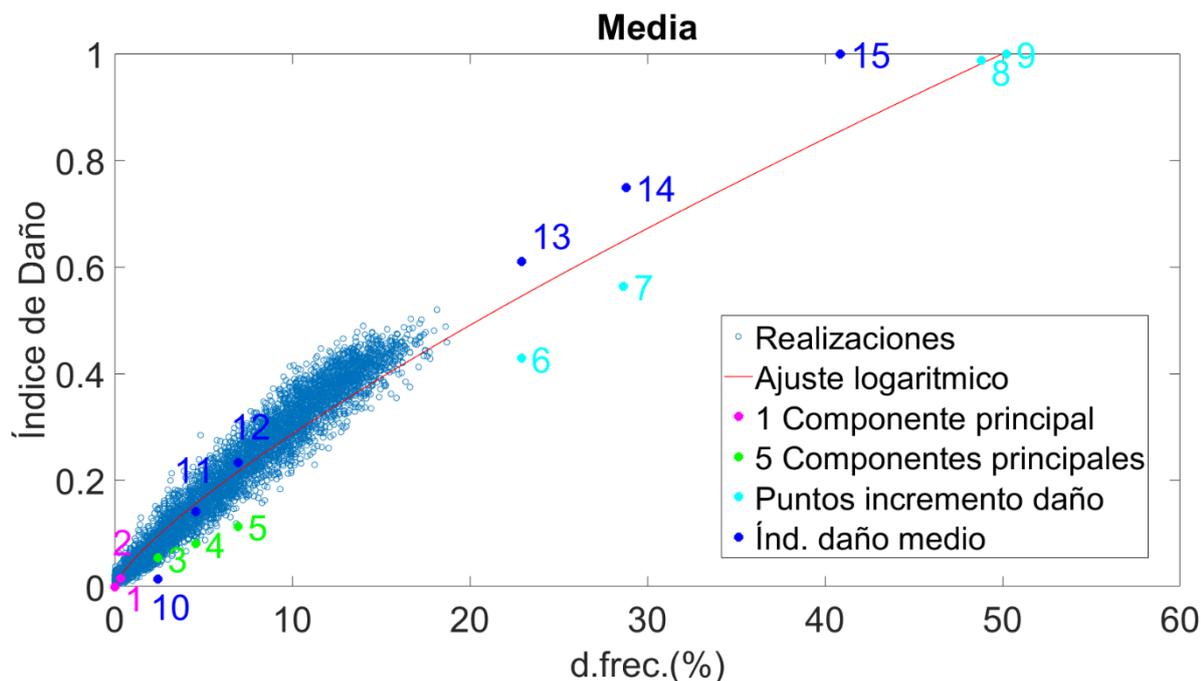


Figura 7-13 Índice de daño vs decremento de frecuencia (%) para la media en el método probabilista automático con 5000 realizaciones. Se indican (magenta, cian, verde y azul) los puntos del 1 al 15 de la Tabla 7-8. En azul los de puntos de las realizaciones y en rojo el ajuste logaritmico log-log.

Tabla 7-8 Resumen de puntos del método de condiciones de contorno incremental (1-9) y con índice de daño medio (9-15). Decremento de frecuencia (%) para la media, índice de daño y componentes principales.

| Número | Dec. Frec. Med. (DF,%) | Índice de daño (ID) | Color | Estimación | Test Numérico | Test Exper. | Componentes principales (CP) |
|--------|------------------------|---------------------|---------|--------------|---------------|-------------|------------------------------|
| 1 | 0 | 0 | magenta | Var. Increm. | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 0.324 | 0.015 | magenta | Var. Increm. | 2 | 2 | 1 |
| 3 | 2.436 | 0.053 | verde | Var. Increm. | 3 | 3 | 5 |
| 4 | 4.571 | 0.080 | verde | Var. Increm. | 4 | 4 | 5 |
| 5 | 6.951 | 0.113 | verde | Var. Increm. | 5 | 5 | 5 |
| 6 | 22.907 | 0.429 | cian | Var. Increm. | 6 | | |
| 7 | 28.652 | 0.564 | cian | Var. Increm. | 7 | | |
| 8 | 48.806 | 0.987 | cian | Var. Increm. | 8 | | |
| 9 | 50.214 | 1.000 | cian | Var. Increm. | 9 | | |
| 10 | 2.436 | 0.0141 | azul | ID medio | | | |
| 11 | 4.571 | 0.1408 | azul | ID medio | | | |
| 12 | 6.961 | 0.2533 | azul | ID medio | | | |
| 13 | 22.907 | 0.6099 | azul | ID medio | | | |
| 14 | 28.806 | 0.769 | azul | ID medio | | | |
| 15 | 48.8 | 1.000 | azul | ID medio | | | |

8 CONCLUSIONES

En los dos primeros apartados se presentan las conclusiones más importantes del trabajo sobre el estudio de índice de daños y análisis de componentes principales.

En los cuatro apartados finales se presentan otras conclusiones relevantes sobre el modelo numérico, modelo experimental, la variación con la temperatura y el análisis modal.

Finalmente se exponen las futuras líneas de investigación.

8.1 Índice de daño

Se ha definido el índice de daño (ID) de la estructura a partir de los decrementos de los coeficientes de flexibilidad (DCf) de los nodos respecto una configuración inicial no dañada. El ID se definió como el decremento del coeficiente de flexibilidad total de todos los nodos de la estructura dividido por el decremento de referencia de la estructura.

En esta tesis se muestra la relación entre el índice de daño, el decremento de frecuencias y el número de componentes principales. El principal objetivo ha sido analizar la relación funcional entre dichas variables. De esta manera se buscado relacionar, por ejemplo, el decremento de frecuencia con el índice de daño. Se ha buscado además que, únicamente sabiendo el número de componentes principales de la estructura, se pueda estimar el índice de daño. Esto es importante ya que no es necesario conocer características de la configuración sin daño de la estructura, información que normalmente no está disponible. Para ello, las 5000 realizaciones efectuadas por el método de Monte Carlo se han sintetizado en la gráfica índices de daño (ID) vs media de los decrementos de frecuencia (DF). La curva del ajuste log-log de las realizaciones es creciente, es decir, el ID aumenta a medida que el DF lo hace hasta el índice máximo (ID=1) cuando el decremento de las frecuencias alcanza aproximadamente 50%. Los tests numéricos calculados con variaciones incrementales y con el índice de daño medio (tests 1-15) se ajustan adecuadamente (residuo menor al 0.14). Los tests numéricos calculados con variaciones incrementales, para $ID < 0.57$ y $DF < 29\%$ (test 1-7) se sitúan en la parte inferior de la curva, mientras que los tests numéricos calculados con variaciones incrementales, cuyo ID máximo es igual a la unidad y DF igual a 50% (Test 8 y 9), están aproximadamente en la misma curva (Figura 7-13). En cuanto a los tests numéricos calculados con el índice de daño medio (test 10-15), éstos se sitúan en la parte superior de la curva, excepto cuando los $ID < 0.14$ y $DF < 4.6\%$ (test 10 y 11).

Cabe destacar que el índice de daños aumenta simultáneamente con el decremento de frecuencia y el número de componentes principales. De esta forma se muestra de manera explícita la relación entre los índices de daño y las componentes principales.

El ajuste log-log del índice de daño con el decremento de la frecuencia es mejor para la media de las frecuencias modales ($R^2= 0.91$) que para los modos individuales (R^2 alrededor de 0.75, excepto para el modo 5 que es $R^2=0.57$).

Para obtener las 5000 realizaciones por el método de Monte Carlo se ha diseñado progresivamente un programa probabilístico automático. En primer lugar, se efectúa una exploración ‘manual’ de variaciones incrementales de las condiciones de contorno (Cf). A continuación, se realiza un estudio inicial con el programa probabilista automático considerando 15 realizaciones y distintos intervalos.

En el primer método con variaciones incrementales de Cf, la curva del índice de daño es creciente hasta el valor máximo (ID=1), en el test con todas las barras dañadas. Los dos tests con menos daño (test 1 y test 2), tienen las menores medias de decrementos de frecuencia e índices de daños. Mientras que los tests 3, 4, y 5 tienen mayores índices de daño y medias de los decrementos de las frecuencias. En la fase de simulación se realizaron 4 tests numéricos (tests 6, 7, 8 y 9) aumentando el índice de daño hasta alcanzar el daño máximo (aproximadamente ID=1) con una media de decrementos de frecuencia del 50%.

En el estudio inicial se ha utilizado el programa automático con 15 realizaciones en 4 intervalos hasta efectuar 131 realizaciones. En estos intervalos se disminuyeron los coeficientes de flexibilidad para poder aumentar el índice de daño de la estructura hasta el valor máximo (aproximadamente ID=1). El menor índice de daño (0.021) se encuentra en el test con el intervalo de coeficientes de flexibilidad mayor. A continuación, se reagruparon las realizaciones de los 4 tests en la misma gráfica y se ajustó una regresión lineal que indicó la tendencia media para cada modo de vibración. Tanto en el método con variaciones incrementales como en el estudio inicial, se han encontrado evoluciones del índice de daño similares por modos; por ejemplo, el crecimiento de los índices de daño de los modos 3 y 6, es mayor que para los modos 1, 2 y media; estos a su vez son mayores que los modos 4 y 5.

Además, el estudio del índice de daño con el programa probabilístico automático para las 5000 realizaciones ha permitido deducir las curvas de excedencia o fragilidad por modos y el cálculo del índice de daño medio.

Los índices de daño bajos (de los 5 primeros test) reflejan un número de componentes principales relativamente altos. Esta conclusión conlleva ventajas e inconvenientes. Por un lado, el número de componentes principales necesarios es muy sensible al índice de daño. Por otro lado, se necesitarían un gran número de componentes principales para detectar índices de daño elevados, lo que conlleva medir un gran número de frecuencias modales.

Como conclusión final del estudio, el presente trabajo presenta una definición del índice de daño basado en el decremento del coeficiente de flexibilidad de los nodos, lo que conlleva a un decremento de frecuencia en el modelo. Este concepto es útil porque si conocemos el decremento de frecuencia que ha tenido una estructura se puede estimar su índice de daño. Esta variación puede ser un factor de decisión para intervenir en el edificio. Además, este trabajo relaciona el número de componentes principales con el decremento de frecuencia y, consecuentemente, con el índice de daño. De esta manera, las componentes principales se convierten en un parámetro para detectar un daño y decidir si se tiene que intervenir en la estructura. Dicho de otra manera, únicamente conociendo el número de componentes principales del edificio, se puede detectar un nivel de daño que permita decidir si se interviene un edificio o no.

8.2 Análisis de Componentes Principales (PCA)

Los estimadores T^2 y Q basados en las componentes principales han permitido concluir que las estructuras dañadas necesitan más componentes principales que las menos dañadas. Este resultado ha sido posible a pesar de que el estimador de la varianza no ha sido concluyente, posiblemente debido a que el rango de temperaturas no fue suficientemente grande.

Los valores de los estimadores T^2 y Q han mostrado que las estructuras con daño alto (tests 3, 4 y 5) han necesitado 5 componentes principales para explicar la variación de frecuencia modal con la temperatura. Pero, la estructura sin daño y con daño medio (Test 1 y Test 2) solo han necesitado una componente principal.

Los valores del estimador Q se han ordenado de acuerdo con la intensidad del daño (Figura 6-3). Además, el estimador Q ha sido suficientemente sensible para establecer que los valores de la configuración sin daño (test1) fueran menores que los valores de la configuración de daño medio en dos nodos (test 2).

Los valores del estimador T^2 se han ordenado de acuerdo con la intensidad de daño (Figura 6-4). Pero el estimador T^2 no ha sido suficientemente sensible, ya que los valores

de T^2 en la configuración de la estructura sin daño (test 1), han sido mayores que los valores de la configuración de estructura con daño medio (test 2). Probablemente, las principales causas de este resultado hayan sido la reducida resolución y el pequeño rango de temperaturas.

No obstante, los resultados de los estimadores indican que su comportamiento sirve para detectar daños y distinguir su rango de intensidad. Potenciales actuaciones para reforzar la estructura podrían detectarse a partir de estos resultados.

Además, parece posible predecir una estructura con daño alto únicamente sabiendo el mínimo número de componentes principales de Q y T^2 que expliquen la variación de frecuencias modales, luego, no es necesario conocer la configuración inicial para detectar las estructuras dañadas. Este concepto es importante porque en muchas ocasiones no existe información sobre la estructura no dañada.

Además, los resultados han mostrado la importancia del estudio de la estabilidad de la varianza acumulativa explicada. Para ello, habrían dos maneras para mejorar la estabilidad de la varianza: incrementar el rango de la temperatura o incrementar la resolución (0.016 Hz).

8.3 Modelo numérico

El ajuste del modelo numérico de la configuración sin daño se ha realizado progresivamente. En primer lugar, se explora la mejor solución con variaciones incrementales y probabilistas. A continuación se utiliza el programa automático probabilista con 15 realizaciones en varios intervalos para efectuar un preajuste. Finalmente se efectúan 5000 realizaciones con el programa automático para hallar la mejor aproximación.

El primer método de las variaciones incrementales en las condiciones de contorno del modelo logra una aproximación de la configuración no dañada de la estructura en donde la media de los errores de las frecuencias es de 7.72% para las condiciones de contorno: $Cf_2=5 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$ y $Cf_3=3 \text{ KN}\cdot\text{m/rad}$.

En el preajuste con el programa de 15 realizaciones, la media de los errores de las frecuencias disminuye un 4.86% respecto la configuración inicial, mientras que, utilizando el programa con 5000 realizaciones, el error disminuye 7.8% respecto la configuración inicial.

Se han encontrado en diferentes realizaciones errores de frecuencia bajos (inferiores a 0.01%) para los modos 2, 4, 5 y 6 pero no simultáneamente en la misma realización. La

frecuencia del modo 3 ha sido difícil de aproximar ya que el error (20.53%) solo ha disminuido un 0.715% respecto la configuración sin daño después de 5000 realizaciones. Posiblemente, una mejora en los algoritmos de simulación de muestras aleatorias, que tenga en cuenta como sería la evolución progresiva del daño en una estructura, sirva para lograr mejores ajustes en todas las frecuencias de interés.

Para las configuraciones dañadas, se han determinado las condiciones de contorno del modelo que mejor ajustan el decremento de frecuencia experimental y numérico. Este proceso equivale a la calibración del modelo numérico con los test experimentales dañados. Este modelo calibrado se utiliza para efectuar las simulaciones en el estudio del índice de daño, para daños superiores.

En el ajuste del modelo numérico del test experimental más dañado (test 5) se ha obtenido considerando en los 4 nodos de control, los coeficientes de flexibilidad: $Cf_2=0.3$ KN·m/rad y $Cf_3=0.1$ KN·m/rad. Estos valores son los mínimos que se pueden aplicar en un nodo debido a que, en el modelo experimental, las vigas siempre mantienen el contacto con la columna, a pesar de que el par de apriete sea cero, luego siempre hay una transmisión de esfuerzos.

El programa basado en el Método de Monte Carlo ofrece varias ventajas interesantes. En primer lugar, se trata de un programa probabilista; tanto la posición de la barra dañada como el valor de los Cf sigue una función de densidad de probabilidad uniforme. En segundo lugar, es un programa automático; es decir, el programa permite de forma autónoma efectuar 5000 realizaciones para garantizar la correcta aplicación del método Monte Carlo. Para alcanzar este número de realizaciones, el programa necesita 41.6 horas en el servidor del departamento que pertenece al grupo de investigación GiES, con un procesador Intel Xeon CPU ES-2660 de 16 GB.

Además, el programa permite efectuar preajustes de menos iteraciones (p. ej. 15 realizaciones) en diferentes intervalos de muestreo, para explorar de manera rápida todos los rangos de soluciones. Cabe destacar que este programa necesita 7.5 min, con un ordenador personal Core i7, para ejecutar las 15 realizaciones.

Finalmente, el programa estructural ETABS se controla desde el Excel con las funciones AOPI. Esto permite guardar todas las condiciones de contorno y respuestas del programa en una hoja Excel, lo que facilita el análisis posterior de los resultados.

8.4 Modelo experimental

En esta tesis se ha utilizado un modelo experimental de una estructura metálica a escala. El par de apriete de los tornillos de las uniones se ha liberado progresivamente en algunos nodos de interés para simular un daño y poder medir el decremento de las frecuencias. En el presente trabajo se han realizado 5 tests experimentales. Un test en una configuración sin daño y 4 tests en configuraciones con daños incrementales. Estos test han servido de base para el calibrado/validación del modelo numérico. Los decrementos de frecuencias experimentales que se han encontrado son bastante bajos: desde 0.186% para el test de la configuración sin daño (test 1) y hasta 7.186% para el test más dañado (test 5).

8.5 Variación de la frecuencia con la temperatura

Para la aplicación propuesta se necesita suficiente rango de temperaturas para asegurar que las variaciones de frecuencias sean mayores que la resolución de las mismas. De lo contrario, la varianza obtenida por el análisis de componentes principales reflejaría principalmente el error aleatorio producido por la falta de resolución.

La evolución de las componentes principales con la temperatura para la configuración del test no dañado muestra que se necesitan un mínimo de 9 grados de rango de temperatura para asegurar la estabilidad de la varianza acumulada de las componentes principales.

En la estructura metálica del laboratorio, la frecuencia del modo 1 solo se ha podido identificar en los canales transversales de la configuración de la estructura sin daño (test 1) y de la configuración de daño medio en dos nodos (test 2). En las demás configuraciones de la estructura con daño alto, la frecuencia del modo 1 es muy similar a la frecuencia del modo 2, es decir, la frecuencia modal de la flexión transversal es similar a la frecuencia modal longitudinal.

La transformada de Fourier (obtenida mediante el algoritmo Fast Fourier Transformation) ha determinado el espectro en el dominio de la frecuencia. Las frecuencias de las densidades de energía espectral han mostrado patrones similares para todos los tests. La forma de los picos ha presentado similitudes en la primera parte del espectro hasta la frecuencia 13, sin embargo, en la segunda parte del espectro, a partir de la frecuencia 13, la forma de los picos ha sido irregular.

Gracias al patrón similar del comportamiento de las frecuencias para los 13 primeros modos, se han podido formar las matrices de frecuencias para el análisis en componentes principales.

La variación de las frecuencias con el daño es superior a la variación de la frecuencia producido por un aumento de temperatura, para daños de cierta relevancia. La disminución de las frecuencias (respecto a la configuración sin daño) crece con el daño variando desde un valor muy pequeño para el test 2 (0.5% para el modo 1 y 0.1% para la media de los 13 primeros modos) hasta valores superiores al 5% para el test 5 (2.1%, 3.6% y 5.3% para la media de la disminución de las frecuencias modales de los test 3, 4 y 5 respectivamente). De hecho, para el test 2, las frecuencias de los modos 9, 10 y 11 aumentan respecto al test sin daño. De esta manera, excepto para el test 2, la variación de las frecuencias modales debida al daño es superior a la variación producida por el cambio de temperatura. El hecho de ser una estructura metálica puede producir que el efecto térmico sea mayor que en edificios de otras topologías.

8.6 Análisis modal

El análisis modal es un método que permite conocer las características dinámicas de la estructura. Esta tesis ha calculado el Mac Factor para comparar, en la configuración sin daño, la forma modal experimental y numérica con el objetivo de determinar la bondad del ajuste entre ambas. En esta tesis se ha procedido al ajuste de los primeros 6 modos. Los modos 1, 2, 3 y 6 se han ajustado bastante bien con un Mac Factor de 0.94, 0.99, 0.87 y 0.86, respectivamente. Sin embargo, los modos 4 y 5 han mostrado problemas para la modelación, debido a que han presentado un Mac Factor de 0.51 y 0.48, respectivamente. A pesar de las dificultades en ajustar el modelo, los modos 1, 2, 3 y 6 (flexión transversal, flexión longitudinal, torsión y flexión longitudinal de segundo orden) han presentado la misma forma modal tanto numérica como experimentalmente.

8.7 Futuras investigaciones

Se tendría que buscar un método para conseguir que el programa probabilístico automático de grandes realizaciones alcance índices de daño mayores. El actual programa únicamente consigue un índice de daño igual a 0.51 (Figura 7-8).

En cuanto a los tests experimentales, se tendrían que realizar ensayos con mayores daños que el test 5, es decir, se tendría que aflojar los tornillos en más de 4 nodos, hasta el máximo número de nodos, 35, de la estructura. En consecuencia, es probable que se supere el índice de daño del test 5 (0.113). A continuación, se tendrían que calcular los estimadores varianza acumulada, T^2 , y Q para calcular el número de componentes principales mínimas que explique la variación de frecuencias. Así pues, se podría

completar la gráfica de índice de daño en función del decremento de frecuencia situando los puntos con las nuevas componentes principales.

Los tests experimentales se tendrían que realizar con más rango de temperatura para asegurar que las variaciones de frecuencias sean mayores que la resolución de las mismas. Con ello, se conseguirán unos resultados para la varianza acumulada más concluyentes. También sería interesante estudiar si las diferencias térmicas dentro de la estructura tienen un papel relevante para el presente estudio.

En el método de componentes principales se tendría que calcular los estimadores KPCA (Kernel Principal Component Analysis approach), LEV (Length of the Eigenvector) y DAEV (Directional Angle of the Eigenvector Variation) utilizados por Nguyen et al. (2014) y Zhang et al. (2021). Por consiguiente, se podría comparar las sensibilidades de cada uno de ellos con los utilizados en esta tesis, la varianza acumulada, T^2 y Q .

Se podría realizar un estudio de la viabilidad de extrapolar la relación obtenida del índice de daño con el número de componentes principales a cualquier tipología de estructura.

Se podría realizar un estudio con un daño de un elemento nuevo de la estructura más importante, como por ejemplo una o varias columnas. Sería interesante en estos casos saber el número mínimo de componentes principales necesarias para explicar la variación de frecuencias.

Otra línea de investigación sería encontrar una metodología para definir el número de componentes principales mediante el modelo numérico. De esta manera se podría simular una gran cantidad de realizaciones calculando las componentes principales, índices de daño y decrementos de frecuencias.

Otro tema de investigación consiste en realizar el ajuste del modelo numérico únicamente variando los nodos afectados. Se podría mejorar los ajustes de los modos 1, 2, 3, 4, 5, y 6 con otras curvas para tener mejores coeficientes de determinación o con una curva polinómica de segundo o tercer orden en el dominio log-log.

También sería interesante realizar el estudio probabilístico del índice de daño respecto al decremento de frecuencia del modo fundamental (Modo 1), puesto que es el modo que tiene más masa y es el más utilizado en otras investigaciones. Aunque con solo una frecuencia (1 modo) hay una incertidumbre importante, correlacionándolo con los dos primeros esta incertidumbre puede disminuir. Finalmente, se podría buscar un método para representar la curva de índice de daño en función del decremento de frecuencia del modo 1 y del modo 2. Así pues, se mostraría la variación del índice de daño según las

variaciones de los decrementos de los dos primeros modos. Considerar los coeficientes de participación de los modos puede también contribuir con este objetivo.

9 Bibliografía

- Beconcini, M. L., Bennati, S., & Salvatore, W. (2001). Structural characterisation of a medieval bell tower: First historical, experimental and numerical investigations. *Historical Constructions*, 431-444.
- Canavos, G. C., & Medal, E. G. U. (1987). *Probabilidad y estadística* (p. 651). México: McGraw Hill.
- Cao, V. V., Ronagh, H. R., Ashraf, M., & Baji, H. (2014). A new damage index for reinforced concrete structures. *Earthquakes and Structures*, 6(6), 581-609.
- Caselles, J. O., Clapés, J., Sáenz Sagasti, J. I., Pérez Gracia, V., & Rodríguez Santana, C. G. (2021). Integrated GPR and Laser Vibration Surveys to Preserve Prehistorical Painted Caves: Cueva Pintada Case Study. *International Journal of Architectural Heritage*, 15(5), 669-677.
- Caselles, O., Martínez, G., Clapes, J., Roca, P., & Pérez-Gracia, M. D. L. V. (2015). Application of particle motion technique to structural modal identification of heritage buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(3), 310-323.
- Caselles, O., Clapes, J., Elyamani, A., Lana, J., Seguí, C., Martín, A., & Roca, P. (2018, June). Damage detection using Principal Component Analysis applied to temporal variation of natural frequencies. In 16th European Conference on Earthquake Engineering, 18-21 June 2018, Thessaloniki, Greece.
- Caselles, J. O., Martín, A., & Clapés, J. (2022). Detection of Damage Using Temporal Variation in Natural Frequencies and Principal Component Analysis. *International Journal of Architectural Heritage*, 16(4), 616-629.
- Caselles Magallón, J. O., Clapes Boixader, J., Elyamani, A., Lana Pons, F. J., Seguí Fernández, C., Martín Balet, A., & Roca Fabregat, P. (2018). Damage detection using principal component analysis applied to temporal variation of natural frequencies. In 16th European Conference on Earthquake Engineering (pp. 1-12).
- Caselles, O., Martín, A., Vargas-Alzate, Y. F., Gonzalez-Drigo, R., & Clapés, J. (2022). Estimators for Structural Damage Detection Using Principal Component Analysis. *Heritage*, 5(3), 1805-1818.
- Chaudhari, M. A., & Chaudhari, K. K. (2017). Study on effect of crack inclination and location on natural frequency for inclined edge cracked beam using free vibration.
- Diaz, S. A., Pujades, L. G., Barbat, A. H., Vargas, Y. F., & Hidalgo-Leiva, D. A. (2017). Energy damage index based on capacity and response spectra. *Engineering Structures*, 152, 424-436.

- Elyamani, A., Caselles, O., Roca, P., & Clapes, J. (2017). Dynamic investigation of a large historical cathedral. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(3), e1885.
- Foti, D., & Canas, J. A. (1999). Earthquake simulator testing of a steel model seismically protected with friction energy dissipators. *Monograph Series in Earthquake Engineering*, editor AH Barbat.
- Foti, D. (1999). Numerical and experimental efficiency assessment of energy dissipators for seismic protection of buildings (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)).
- Gharehbaghi, V. R., Kalbkhani, H., Noroozinejad Farsangi, E., Yang, T. Y., & Mirjalili, S. (2022). A data-driven approach for linear and nonlinear damage detection using variational mode decomposition and GARCH model. *Engineering with Computers*, 1-18.
- Golinval, J. C. (2017). Damage detection in structures based on principal component analysis of forced harmonic responses. *Procedia engineering*, 199, 1912-1918.
- Grande, C. J. (2013). Correlation between weather conditions, heating of structural elements, and the dynamic behavior of Mallorca Cathedral (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Icomos–iscarsah Committee. (2003, October). ICOMOS Charter—Principles for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage. In *Proceedings of the ICOMOS 14th General Assembly and Scientific Symposium*, Victoria Falls, Zimbabwe (Vol. 2731).
- Ivorra, S., & Cervera, J. R. (2001). Analysis of the dynamic actions when bells are swinging on the bell tower of Bonreposi Mirambell Church (Valencia, Spain). In *IProc. of the 3rd international seminar of historical constructions* (Vol. 413, p. 19). University of Minho Guimarães.
- Llorens, M., Mata, P., Araiza, J. C., & Roca, P. (2001). Damage characterization in stone columns by dynamic test. Application to the Cloister of Girona Cathedral, Spain. *Historical Constructions*, University of Minho, Guimarães, 469-478.
- Martín, A. (2018). Damage degree determination of structure from natural frequencies variation. *Advanced Masters in structural analysis of monuments and historical constructions Master's thesis*. UPC. 82 pp.
- Mai, C., Konakli, K., & Sudret, B. (2017). Seismic fragility curves for structures using non-parametric representations. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 11, 169-186.

- Mironovs, D., Ručevskis, S., & Dzelzītis, K. (2022). Prospects of structural damage identification using modal analysis and anomaly detection. *Procedia Structural Integrity*, 37, 410-416.
- Moropoulou, A., & Polikreti, K. (2009). Principal component analysis in monument conservation: three application examples. *Journal of Cultural Heritage*, 10(1), 73-81.
- Mujica, L. E., Rodellar, J., Fernandez, A., & Güemes, A. (2011). Q-statistic and T2-statistic PCA-based measures for damage assessment in structures. *Structural Health Monitoring*, 10(5), 539-553.
- Nguyen, V. H., Mahowald, J., Golinval, J. C., & Maas, S. (2014). Damage detection in civil engineering structure considering temperature effect. In *Dynamics of Civil Structures*, Volume 4 (pp. 187-196). Springer, Cham.
- Pan, P., Yang, W., Zhang, Y., & Li, P. P. (2023). Optimized strength modelling of foamed concrete using principal component analysis featurized regressors. In *Structures* (Vol. 48, pp. 1730-1745). Elsevier.
- Park Y.J. and Ang A.H.S. (1985) Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering*. 111(4): 722-739
- Peña Sánchez de Rivera, Daniel. (1994). *Estadística, modelos y métodos: Fundamentos* Vol. 1. Madrid: Alianza Universidad. ISBN 84-206-8993-1.
- Peña Sánchez de Rivera, Daniel. (1994). *Estadística, modelos y métodos: Modelos lineales y series temporales*. Vol. 2. Madrid: Alianza Universidad. ISBN 84-206-8110-5.
- Pospisil S. (2014). *Lecture Monitoring and Diagnostics of Historic Structures and materials*. Advanced Masters in Structural Analysis of monuments and Historical constructions. SA4, inspection and Diagnosis.
- Pitilakis, D., & Petridis, C. (2022). Fragility curves for existing reinforced concrete buildings, including soil–structure interaction and site amplification effects. *Engineering Structures*, 269, 114733.
- Ramos, L. F., Marques, L., Lourenço, P. B., De Roeck, G., Campos-Costa, A., & Roque, J. (2010). Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: two case studies. *Mechanical systems and signal processing*, 24(5), 1291-1305.
- Roca P. (2014) Flow chart of the scientific method of the inspection and diagnosis of historic structures. *Advanced Masters in structural analysis of monuments and historical constructions*.

- Sakiyama, F. I., Veríssimo, G. S., Lehmann, F., & Garrecht, H. (2023). Quantifying the extent of local damage of a 60-year-old prestressed concrete bridge: A hybrid SHM approach. *Structural Health Monitoring*, 22(1), 496-517.
- Smith, L. I. (2002). A tutorial on principal components analysis.
- Súnico, M. R. (2005). *Análisis modal operacional: Teoría y práctica*.
- Tibaduiza, D. A., Mujica, L. E., & Rodellar, J. (2013). Damage classification in structural health monitoring using principal component analysis and self-organizing maps. *Structural Control and Health Monitoring*, 20(10), 1303-1316.
- Vargas Alzate, Y. F. (2013). *Análisis estructural estático y dinámico probabilista de edificios de hormigón armado. Aspectos metodológicos y aplicaciones a la evaluación del daño*
- Vargas-Alzate, Y. F., Lantada, N., González-Drigo, R., & Pujades, L. G. (2020). Seismic risk assessment using stochastic nonlinear models. *Sustainability*, 12(4), 1308.
- Vidal, F., Navarro, M., Aranda, C., & Enomoto, T. (2014). Changes in dynamic characteristics of Lorca RC buildings from pre-and post-earthquake ambient vibration data. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12, 2095-2110.
- Yan, A. M., Kerschen, G., De Boe, P., & Golinval, J. C. (2005). Structural damage diagnosis under varying environmental conditions—part I: a linear analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(4), 847-864.
- Yan, A. M., Kerschen, G., De Boe, P., & Golinval, J. C. (2005). Structural damage diagnosis under varying environmental conditions—part II: local PCA for non-linear cases. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19(4), 865-880.
- Williams, M. S., & Sexsmith, R. G. (1995). Seismic damage indices for concrete structures: a state-of-the-art review. *Earthquake spectra*, 11(2), 319-349.
- Wu, S., Shan, Z., Chen, K., Liu, X., Jiang, X., Wang, S., & Ren, Y. (2023, April). Investigation of bending properties of continuous fiber reinforced resin T-beams made by 3D printing. In *Structures* (Vol. 50, pp. 835-841). Elsevier.
- Zhang, G., Tang, L., Liu, Z., Zhou, L., Liu, Y., Jiang, Z., ... & Sun, S. (2021). Enhanced features in principal component analysis with spatial and temporal windows for damage identification. *Inverse Problems in Science and E*
- Zhou, Y. L., Maia, N. M., & Abdel Wahab, M. (2018). Damage detection using transmissibility compressed by principal component analysis enhanced with distance measure. *Journal of Vibration and Control*, 24(10), 2001-2019.