



**UNIVERSIDAD  
DE GRANADA**

**MÉTODOS VIBRO-ACÚSTICOS APLICADOS A  
EVALUACIÓN DE DAÑO EN MATERIALES DE  
USO EN CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS DOCTORAL**

**ELISABET SUÁREZ VARGAS**

Memoria presentada para la obtención del grado de Doctor por la  
Universidad de Granada con Mención de Doctorado Internacional

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA  
UNIVERSIDAD DE GRANADA**

**Granada, España**

**Abril de 2017**

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales  
Autora: Elisabet Suárez Vargas  
ISBN: 978-84-9163- 511-6  
URI: <http://hdl.handle.net/10481/48134>



**UNIVERSIDAD  
DE GRANADA**

**MÉTODOS VIBRO-ACÚSTICOS APLICADOS A  
EVALUACIÓN DE DAÑO EN MATERIALES DE  
USO EN CONSTRUCCIÓN E INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS DOCTORAL**

Elisabet Suárez Vargas

DIRIGIDA POR

Dr. Antolino Gallego Molina

Dr. Amadeo Benavent Climent

PROGRAMA DE DOCTORADO EN FÍSICA Y CIENCIAS DEL ESPACIO

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA**

**UNIVERSIDAD DE GRANADA**

Granada, España

Abril de 2017

**Métodos vibro-acústicos aplicados a evaluación de daño en  
materiales de uso en construcción e ingeniería civil**

Copyright©2017 por Elisabet Suárez Vargas



**UNIVERSIDAD  
DE GRANADA**

***VIBRO-ACOUSTIC METHODS FOR DAMAGE  
ASSESSMENT OF MATERIALS USED IN  
CONSTRUCTION AND CIVIL ENGINEERING***

**DOCTORAL THESIS**

Elisabet Suárez Vargas

**SUPERVISORS**

Dr. Antolino Gallego Molina

Dr. Amadeo Benavent Climent

**DOCTORAL PROGRAMME: FÍSICA Y CIENCIAS DEL ESPACIO**

**DEPARTMENT OF APPLIED PHYSICS**

**UNIVERSITY OF GRANADA**

**Granada, Spain**

**April of 2017**

*Vibro-acoustic methods for damage assessment of materials used  
in construction and civil engineering*

Copyright©2017 by Elisabet Suárez Vargas

El doctorando / *The doctoral candidate* Elisabet Suárez Vargas y los directores de la tesis / *and the thesis supervisors*: Antolino Gallego Molina y Amadeo Benavent Climent

Garantizamos, al firmar esta tesis doctoral, que el trabajo ha sido realizado por el doctorando bajo la dirección de los directores de la tesis y hasta donde nuestro conocimiento alcanza, en la realización del trabajo, se han respetado los derechos de otros autores a ser citados, cuando se han utilizado sus resultados o publicaciones.

*Guarantee, by signing this doctoral thesis, that the work has been done by the doctoral candidate under the direction of the thesis supervisors and, as far as our knowledge reaches, in the performance of the work, the rights of other authors to be cited (when their results or publications have been used) has been respected.*

Granada, Abril de 2017

Directores de la Tesis Doctoral

Fdo.: Antolino Gallego Molina  
Catedrático de Universidad  
Dpto. Física Aplicada  
Universidad de Granada

Fdo.: Amadeo Benavent Climent  
Catedrático de Universidad  
Dpto. Mecánica Estructural y  
Construcciones Industriales  
Universidad Politécnica de Madrid

Doctorando

Fdo.: Elisabet Suárez Vargas



Esta Tesis Doctoral ha recibido apoyo económico del Programa de Formación de Profesorado Universitario (FPU) del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España (AP2012-0382), de la *Consejería de Innovación, Ciencia y Tecnología* del Gobierno de España (P07-TEP-02610 y P12 TEP-02429) y de la compañía Heliopol.

La estancia en la Universidad de California Los Angeles (USA) recibió financiación de la convocatoria de Movilidad Internacional de estudiantes de doctorado de la Universidad de Granada y CEI Biotic 2013/2014.

La estancia en la Universidad de Augsburg (Alemania) recibió financiación de la convocatoria de ayudas de movilidad para estancias breves del programa de Formación de Profesorado Universitario 2015.



*A mis padres*

*A mi hermana Alicia*

*A JuanJo*



## Resumen

Actualmente el desarrollo de métodos para la evaluación continua de estructuras (*Structural Health Monitoring*, SHM) y la creación de estructuras inteligentes (*Smart Structures*) en el ámbito de la construcción y la ingeniería civil es un reto constante. En este contexto, los métodos de ensayos no destructivos (END) y en particular los métodos vibro-acústicos juegan un papel preponderante.

Esta Tesis Doctoral se centra en la aplicación experimental de dos métodos vibro-acústicos, vibraciones y emisión acústica, a la evaluación de daño en tres escenarios diferentes en el ámbito de la construcción y de la ingeniería civil.

En primer lugar (Parte A) se aborda la aplicación del método de vibraciones para la evaluación de daño en disipadores de energía histeréticos WPD usados como elementos de protección sísmica de edificios. Se pretende con ello disponer de indicadores fiables de daño para decidir el momento en que su capacidad de disipación se ha agotado y, por tanto, deben ser remplazados por unos nuevos. En particular, se proponen dos nuevos índices de daño basados en la descomposición wavelet (WER, *Wavelet Energy Ratio*; RWEE, *Relative Wavelet Energy Entropy*) y la optimización de un índice previamente desarrollado por el grupo de investigación (ADI, *Area Damage Index*), con objeto de minimizar los recursos electrónicos y computacionales para su implementación práctica en campo. Se ha comprobado que los tres índices de daño proporcionan un alto grado de fiabilidad en escenarios cuasi reales, simulados sobre prototipos de estructuras de hormigón armado con disipadores sometidos a cargas dinámicas con la mesa sísmica de la Universidad. Asimismo, se ha implementado un clasificador que permite decidir automáticamente el nivel de daño del disipador, mediante el uso de una base de datos existente de valores de los tres índices de daño.

En segundo lugar (Parte B) se aborda la evaluación de daño en materiales compuestos de fibra de carbono (CFRP), de uso creciente en la construcción

como elementos de refuerzo de estructuras de hormigón armado y de madera, para rehabilitación y obras de nueva planta. En particular, se ha usado el método de emisión acústica, proponiéndose un procedimiento de adquisición y análisis de señales en tiempo real que permite distinguir entre las delaminaciones, las roturas de fibra y las roturas de matriz del CFRP. Igualmente, en esta parte de la tesis, se ha iniciado el estudio de la influencia en términos de generación de daño de fibra óptica insertada en el laminado de CFRP, usada cada día más para el desarrollo de estructuras inteligentes. El estudio se ha realizado a través de ensayos de tracción comparando las ondas elásticas emitidas (emisión acústica) y la distribución y evolución espacio-temporal del campo de deformaciones del elemento medido mediante el método de correlación digital de imágenes (DIC).

En la última parte de la tesis (Parte C) se ha abordado el estudio de la adherencia hormigón-refuerzo de acero, aspecto clave para la eficiencia mecánica de estructuras de hormigón armado. En este caso se ha utilizado el método de emisión acústica como base física para auscultar el proceso. En particular, mediante ensayos de arrancamiento (*pull-out*) se ha comparado la adherencia de dos tipos de acero, acero galvanizado, el cual mejora la durabilidad de las estructuras de hormigón armado en ambientes corrosivos, y acero desnudo convencional. Los resultados corroboran que la capacidad de adherencia y la rigidez inicial son un 20% y 50% mayores respectivamente cuando se usa acero desnudo respecto de cuando se usa acero galvanizado. Sin embargo, el deslizamiento en el momento de la adherencia máxima es un 20% mayor en el caso del acero galvanizado. Igualmente ha sido posible identificar la transición entre las cuatro etapas que caracterizan la interacción hormigón-acero mediante cambios en la actividad de emisión acústica.

## Summary

Nowadays, the development of methods for continuous evaluation of structures (Structural Health Monitoring, SHM) and the establishment of “Smart structures” in the field of construction and civil engineering is a constant challenge. In this context, the nondestructive testing methods (NDT) and, specially, the vibro-acoustic methods have an important role.

The present Doctoral Thesis investigates the experimental applicability of two vibro-acoustic methods, vibrations and acoustic emission, to assess damage in three different scenarios in the field of construction and civil engineering.

In the first part (Part A), the vibrations method is applied to evaluate the damage suffered during operation by a particular type of hysteretic energy dampers called WPD, used as seismic protection elements of structures. The aim of this study is to provide new reliable damage indices to decide the moment when dissipation capacity of the damper is exhausted and, therefore they must be replaced by new ones.

In particular, two new damage indices have been proposed based on the wavelet packet decomposition (WER, Wavelet Energy Ratio and RWEE, Relative Wavelet Energy Entropy). Moreover, a damage index previously proposed by the research group (ADI, Area Damage Index) has been optimized in order to reduce the electronic and computational resources used, with the objective to achieve a real-time field application in the near future. A good correlation between the three indices and a very well established mechanical index has been demonstrated in a realistic seismic loading scenario. The indices have been validated on dampers installed in two different specimens of reinforced concrete structures subjected to different earthquake sequences of increasing intensity by means of the shaking table of the University of Granada. Furthermore, a classifier has been implemented in order to automatically decide the level of damage of the dampers, using a data base composed by the three damage indices.

The second part (Part B) investigates the damage assessment in carbon fiber reinforced polymer materials (CFRP). The use of this material in the construction field is significantly increasing due to its application as reinforcement elements on both concrete and wooden structures, to rehabilitation or new buildings. This Thesis proposes an acquisition-analysis procedure to evaluate real-time damage in CFRP plates by means of the acoustic emission (AE) method. This algorithm allows to distinguish between delaminations, fiber breaks and matrix breaks of the CFRP. Likewise, this work investigates the influence of an embedded optical fiber in CFRP laminate, increasingly used to develop smart structures. During the monotonic tensile tests, the acoustic emission activity and the strain concentrations measured with the Digital Image Correlation method (DIC) were compared in order to track the evolution of failure.

The Part C experimentally investigates the steel-to-concrete bond phenomenon in two kinds of deformed bars: black steel and hot-dip galvanized steel. The bond phenomenon is a key aspect to the efficiency of reinforced concrete structures. The galvanized steel improves the durability of the reinforced concrete structures in corrosive environments. The differences in the steel-to-concrete bond behavior have been identified in terms of the load-slip curves and the acoustic emission (AE) patterns measured during pull-out tests. Test results corroborate that the bond capacity and the initial stiffness of the bond stress-slip curve of black steel are approximately 20 and 50% greater, respectively, than those of galvanized steel, and the slip corresponding to the maximum bond stress is approximately 20% times larger in the latter. By measuring the AE activity, it is possible to identify the transitional points between the four stages characterizing interaction between the concrete and the bar subjected to pull-out force. Each transition coincides with a sudden drop in the AE activity.

## Colaboraciones

En la elaboración de esta Tesis Doctoral se ha contado con el soporte y apoyo de varios expertos en diferentes áreas de trabajo. Gracias a sus valiosas e imprescindibles contribuciones y aportaciones, ha sido posible la elaboración de esta investigación. Entre todos ellos, se desea mencionar especialmente a:

El Dr. **Andrés Roldán Aranda**, docente e investigador de la Universidad de Granada, integrante del grupo de Investigación en Nanoelectrónica (TIC-216), a quien agradecemos su asesoramiento en los sistemas electrónicos de medida y el desarrollo electrónico de la plataforma hardware Picocom.

El Dr. **Markus G.R. Sause**, docente e investigador en el *Institute für Physics* de la Universidad de Augsburg en Alemania, quien me dio la oportunidad de realizar una estancia de investigación durante la que aprendí el método de correlación digital de imágenes, nuevas metodologías de procesado y análisis de señales de EA y reconocimiento de patrones.

Los Dres. **Leandro Morillas**, docente e investigador de la Universidad de Valladolid y **David Escolano**, investigador de la universidad de Sheffield, ex miembros del grupo “Mecánica de sólidos y estructuras” (TEP-167), a quienes agradecemos su colaboración con el manejo de la mesa sísmica para la realización de los experimentos y su aporte con el cálculo del índice de daño mecánico (ID).

La Dra. **Liliana Romo**, docente e investigadora en la Universidad del Valle en Santiago de Cali (Colombia), que fue integrante del grupo de investigación TEP 232, quien desarrolló la aplicación del ensayo de vibraciones en los disipadores WPD y desarrolló el índice de daño ADI.

Los Graduados de Edificación **Rubén Molina** y **Antonio Martínez** quienes realizaron su Proyecto Fin de Grado dentro de nuestro grupo de investigación y que han contribuido al desarrollo de esta tesis.

A los profesores **José Rodríguez Montero** y **José Luís Piqueras Sala**, por sus enormes contribuciones en la realización de los ensayos de adherencia acero-hormigón, así como a los técnicos del Departamento de Construcciones Arquitectónicas.

El Dr. **Ajit Mal**, docente e investigador la Universidad de California Los Ángeles en Estados Unidos, quien me dio la oportunidad de realizar una estancia de investigación en una de las universidades más prestigiosas del mundo durante la que profundicé en el conocimiento de la EA y la realización de ensayos.

El ingeniero **José Martínez Jequier** de la empresa NDT Ingenieros por su inestimable colaboración para el desarrollo de los ensayos de EA en CFRP y el desarrollo del algoritmo de discriminación de mecanismos de daño.

Los Arquitectos Técnicos **José Gil** y **Juan de Mata Vico** quienes contribuyeron al diseño y elaboración los pórticos de hormigón armado, y a los ensayos de adherencia hormigón-acero.

El Dr. **Francisco Javier Juanes** y el Dr. **Ángel Valea** por su colaboración durante los ensayos de flexión realizados en CFRP y sus aportaciones de C-SCAN ultrasonidos y microscopía SEM.

La empresa **EUROTEGA S.A.** por su ayuda en la preparación del acero galvanizado.

## Agradecimientos

La culminación de esta Tesis Doctoral no hubiera sido posible sin el apoyo y ayuda de un gran número de personas e instituciones que de un modo u otro, han colaborado en su desarrollo. A todos ellos quiero expresarles personalmente mi más inmensa gratitud.

En primer lugar, quiero agradecer a mis directores de tesis, Dr. Antolino Gallego Molina y Dr. Amadeo Benavent-Climent. Gracias por dejarme formar parte de su equipo de trabajo, por haber confiado en mí para desarrollar este trabajo. Gracias por haberme transmitido vuestros amplios, variados y valiosos conocimientos. Gracias por la dedicación y motivación permanente para culminar con éxito esta etapa. Sin duda, toda la dedicación para culminar con éxito esta etapa no podrá ser suficientemente recompensada.

A todas las personas que me han acompañado en este camino. Con mención especial a mis compañeros del grupo SNADS – ADIME, gracias por estar ahí, tanto en los buenos como en los malos momentos.

En el plano personal, a mi familia por apoyarme siempre en todas las etapas que comienzo. Gracias a mis padres, Antonio y María Isabel y a mi hermana Alicia. Gracias a JuanJo, porque sin su comprensión, paciencia y apoyo no habría sido posible terminar esta etapa.



# Índice general

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>1.</b> | <b>INTRODUCCIÓN .....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1.      | MOTIVACIÓN Y ESTADO DEL ARTE .....                                     | 1         |
| 1.2.      | OBJETIVOS .....  | 12        |
| 1.3.      | MARCO DE LA INVESTIGACIÓN .....  | 14        |
| 1.4.      | ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL .....                                  | 14        |
| <b>2.</b> | <b>MÉTODOS DE INSPECCIÓN .....</b>                                     | <b>17</b> |
| 2.1.      | MÉTODOS DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS .....                               | 17        |
| 2.2.      | EL MÉTODO DE EMISIÓN ACÚSTICA .....                                    | 19        |
| 2.2.1.    | <i>Definición y fundamentos físicos del método .....</i>               | <i>19</i> |
| 2.2.2.    | <i>Señales de EA. Características y procesado .....</i>                | <i>32</i> |
| 2.2.2.1.  | Señales continuas y transitorias .....                                 | 32        |
| 2.2.2.2.  | Ruido de fondo y umbral. Definición del hit .....                      | 34        |
| 2.2.2.3.  | Características a lo largo del tiempo: RMS, ASL, ABE .....             | 38        |
| 2.2.2.4.  | Sistemas multicanal .....  | 38        |
| 2.2.2.5.  | Características básicas de señales transitorias .....                  | 40        |
| 2.2.2.6.  | Energía .....  | 42        |
| 2.2.2.7.  | Características espectrales .....                                      | 43        |
| 2.2.2.8.  | Otras características de las señales .....                             | 47        |
| 2.2.3.    | <i>Localización de fuentes de EA .....</i>                             | <i>50</i> |
| 2.2.3.1.  | Planteamiento del problema .....                                       | 50        |
| 2.2.3.2.  | Algoritmos de localización .....                                       | 54        |
| 2.2.3.3.  | Localización lineal por diferencia de tiempos de llegada .....         | 58        |
| 2.2.4.    | <i>Ondas de Lamb de EA .....</i>                                       | <i>61</i> |
| 2.2.4.1.  | Velocidad de propagación: velocidad de fase y velocidad de grupo ..... | 61        |
| 2.2.4.2.  | Dispersión de las ondas de Lamb .....                                  | 62        |
| 2.2.4.3.  | Atenuación de las ondas de Lamb .....                                  | 64        |
| 2.3.      | EL MÉTODO DE VIBRACIONES .....   | 68        |
| 2.3.1.    | <i>Definición y fundamento físico .....</i>                            | <i>68</i> |
| 2.3.2.    | <i>Ensayo de vibraciones para detección de daño .....</i>              | <i>69</i> |
| 2.3.3.    | <i>Metodología del ensayo de vibraciones .....</i>                     | <i>70</i> |
| 2.3.3.1.  | Evaluación operacional de la estructura .....                          | 70        |
| 2.3.3.2.  | Adquisición de datos .....   | 70        |

|   |            |
|---|------------|
| 2.3.3.3. Extracción de características e información .....  | 72         |
| 2.3.3.4. Desarrollo de un modelo estadístico .....  | 72         |
| 2.3.4. Representaciones de un sistema mediante series temporales .....  | 73         |
| 2.4. EL MÉTODO DE CORRELACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES (DIC, <i>DIGITAL IMAGE</i><br><i>CORRELATION</i> ).....     | 74         |
| 2.4.1. Definición y principios de operación .....   | 74         |
| 2.4.2. Exactitud del sistema .....  | 78         |
| 2.4.2.1. Fuentes de error .....   | 78         |
| 2.4.2.2. Resolución del sistema .....   | 81         |
| 2.4.3. Concentración de tensiones .....   | 83         |
| 2.4.3.1. Detectabilidad de defectos usando DIC.....   | 86         |
| 2.4.3.2. Limitaciones debido a la precisión del sistema.....  | 89         |
| <b>PARTE A: EVALUACIÓN DE DAÑO EN DISIPADORES WPD.....</b>  | <b>91</b>  |
| <b>3.    SISTEMAS DE CONTROL PASIVO DE LA RESPUESTA</b><br><b>SÍSMICA DE ESTRUCTURAS. DISIPADOR WPD .....</b> | <b>93</b>  |
| 3.1. SISTEMAS DE CONTROL ESTRUCTURAL .....  | 94         |
| 3.1.1. Evolución histórica .....  | 94         |
| 3.1.2. Clasificación de los sistemas de protección sísmica.....   | 96         |
| 3.1.3. Disipadores histeréticos.....  | 101        |
| 3.1.3.1. Disipadores de barras de pandeo restringido ( <i>Buckling-Restrained Brace</i> ,<br>BRB) .....       | 101        |
| 3.1.3.2. Disipador tipo <i>Added Damping and Stiffness System</i> (ADAS) .....                                | 102        |
| 3.1.3.3. Disipador <i>Triangular Steel plate Added Damping and Stiffness</i> (TADAS) 103                      |            |
| 3.1.3.4. Disipador <i>Steel Slit Damper</i> (SSD) .....   | 104        |
| 3.1.3.5. Disipador <i>Honeycomb Damper System</i> (HDS) .....   | 105        |
| 3.2. DISIPADORES HISTERÉTICOS WPD ( <i>WEB PLASTIFYING DAMPER</i> ).....                                      | 106        |
| 3.2.1. Descripción del disipador WPD .....  | 106        |
| 3.2.2. Fabricación e instalación del disipador WPD.....   | 107        |
| 3.2.3. Ventajas e inconvenientes del uso de disipadores WPD.....  | 109        |
| <b>4.    APLICACIÓN DEL MÉTODO DE VIBRACIONES.</b><br><b>EXPERIMENTOS .....</b>                               | <b>111</b> |
| 4.1. MONITORIZACIÓN DE DAÑO CON VIBRACIONES.....  | 111        |
| 4.1.1. Sistema de instrumentación.....  | 113        |
| 4.1.1.1. Transductores piezoeléctricos .....  | 113        |

|  |            |
|--|------------|
| 4.1.1.2. Transductores PZT utilizados.....   | 118        |
| 4.1.1.3. Colocación de los transductores PZT.....  | 120        |
| 4.1.2. Sistema de medida.....  | 121        |
| 4.1.2.1. Sistema generador de señales.....   | 122        |
| 4.1.2.2. Sistema de acondicionamiento de señal.....  | 124        |
| 4.1.2.3. Sistema de adquisición de señales.....  | 125        |
| 4.1.2.4. Sistema de conexiones entre los diferentes sistemas.....                          | 126        |
| 4.1.2.5. Sistema de apantallamiento y puesta a tierra.....                                 | 129        |
| 4.1.3. Señal de excitación utilizada.....  | 130        |
| 4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS SÍSMICOS Y LOS ESPECÍMENES DE<br>HORMIGÓN ARMADO..... | 131        |
| 4.2.1. Descripción de los especímenes ensayados.....                                       | 132        |
| 4.2.2. Descripción de los ensayos sísmicos.....  | 134        |
| <b>5.    ÍNDICES DE DAÑO BASADOS EN EL MÉTODO DE<br/>VIBRACIONES. RESULTADOS.....</b>      | <b>137</b> |
| 5.1. ÍNDICE DE DAÑO MECÁNICO (ID).....   | 137        |
| 5.1.1. Descomposición de la curva carga-desplazamiento.....                                | 138        |
| 5.1.2. Cálculo del índice de daño mecánico ID.....   | 140        |
| 5.2. ÍNDICE DE DAÑO AREA DAMAGE INDEX (ADI).....   | 143        |
| 5.2.1. Métodos estadísticos de series temporales de vibración para SHM.....                | 143        |
| 5.2.2. Descripción del algoritmo de cálculo.....   | 146        |
| 5.2.3. Resultados obtenidos en los ensayos sísmicos.....                                   | 148        |
| 5.2.4. Optimización de parámetros.....   | 152        |
| 5.3. ÍNDICE DE DAÑO WAVELET ENERGY RATIO (WER).....  | 161        |
| 5.3.1. Introducción a la Transformada Wavelet.....   | 161        |
| 5.3.2. Análisis Wavelet Packet (WPA): descomposición en múltiples niveles.....             | 164        |
| 5.3.3. Índice de daño WER: fundamento y cálculo.....                                       | 168        |
| 5.3.4. Resultados obtenidos en los ensayos sísmicos.....                                   | 170        |
| 5.4. ÍNDICE DE DAÑO BASADO EN LA ENTROPÍA: RELATIVE WAVELET ENERGY<br>ENTROPY (RWEE).....  | 178        |
| 5.4.1. Definición de entropía wavelet.....   | 179        |
| 5.4.2. Índice de daño RWEE: fundamento y cálculo.....                                      | 181        |
| 5.4.3. Resultados obtenidos en los ensayos sísmicos.....                                   | 182        |
| 5.5. CLASIFICADOR DE DAÑO.....   | 185        |

|  |            |
|--|------------|
| 5.6. CLASIFICADOR DE DAÑO .....  | 185        |
| 5.6.1. Algoritmo de clasificación de los $k$ vecinos más cercanos ( $kNN$ ) .....                                  | 185        |
| 5.6.2. Clasificador 1D .....   | 190        |
| 5.6.2.1. Clasificador 1D.....  | 190        |
| 5.6.2.2. Clasificador 1D considerando dos índices de daño .....  | 194        |
| 5.6.2.3. Clasificador 1D considerando tres índices de daño.....  | 199        |
| 5.6.3. Clasificador de daño 2D.....  | 200        |
| 5.6.4. Clasificador 3D .....   | 203        |
| <br>   |            |
| <b>PARTE B: EVALUACIÓN DE DAÑO EN MATERIAL COMPUESTO DE FIBRA DE CARBONO (CFRP) .....</b>                          | <b>209</b> |
| <br>   |            |
| <b>6. DISCRIMINACIÓN DE MECANISMOS DE DAÑO EN CFRP MEDIANTE ONDAS DE LAMB: ALGORITMO .....</b>                     | <b>211</b> |
| <br>   |            |
| 6.1. HIPÓTESIS DE PARTIDA: ASOCIACIÓN DE MECANISMOS DE DAÑO A LOS MODOS DE ONDAS DE LAMB.....                      | 211        |
| 6.2. DESCRIPCIÓN DE LA PLACA ESTUDIADA (DAICA) .....   | 213        |
| 6.3. DETECCIÓN DE MODOS SOBRE LA PLACA DE ESTUDIO.....   | 219        |
| 6.3.1. Ensayos con fuentes $H-N$ sobre la Probeta 1 con sensores enfrentados .....                                 | 220        |
| 6.3.1.1. Descripción del experimento .....   | 220        |
| 6.3.1.2. Análisis de resultados.....   | 223        |
| 6.3.2. Ensayo de rotura de minas sobre la placa DAICA con sensores enfrentados.....                                | 227        |
| 6.3.2.1. Descripción del experimento y configuración de EA .....   | 227        |
| 6.3.2.2. Análisis de los resultados obtenidos .....  | 230        |
| 6.4. ALGORITMO PROPUESTO DE DISCRIMINACIÓN DE EVENTOS OP E IP. PRUEBAS PREVIAS DE FUENTES DE DAÑO CONTROLADAS..... | 234        |
| 6.4.1. Esquema de discriminación de eventos OP e IP .....  | 234        |
| 6.4.2. Configuración de EA .....   | 235        |
| 6.4.3. Ensayo de fuente $H-N$ sobre una probeta. Elección de ventanas temporales .....                             | 236        |
| 6.4.4. Ensayos de mecanismos de daño individuales.....   | 246        |
| 6.4.4.1. Ensayo de delaminación pura .....   | 247        |
| 6.4.4.2. Ensayo de rotura de fibra .....   | 250        |
| 6.4.4.3. Ensayo de micro-rotura de matriz .....  | 253        |

|  |            |
|--|------------|
| 6.5. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO DE DISCRIMINACIÓN DE MECANISMOS DE DAÑO   | 254        |
| 6.5.1. Parte A: Filtros previos  | 255        |
| 6.5.2. Parte B: Constructor de eventos   | 257        |
| 6.5.3. Parte C: Definición y elección de las ventanas temporales de alta frecuencia                                  | 258        |
| 6.5.4. Parte D: Elección de la ventana temporal y el canal de baja frecuencia  | 261        |
| 6.5.5. Parte E: Descripción de decisiones del algoritmo  | 262        |
| 6.5.5.1. Eventos en los que el primer <i>hit</i> corresponde a un canal de baja frecuencia LF (eventos tipo L1 y LS) | 263        |
| 6.5.5.2. Eventos en los que el primer <i>hit</i> corresponde al canal HF   | 263        |
| <b>7. RESULTADOS DEL ALGORITMO PROPUESTO PARA LA DISCRIMINACIÓN DE MECANISMOS DE DAÑO EN CFRP</b>                    | <b>267</b> |
| 7.1. RESULTADOS DE MECANISMOS DE DAÑO INDIVIDUALES   | 267        |
| 7.1.1. Ensayo de delaminación pura   | 267        |
| 7.1.2. Ensayo de rotura de fibra   | 270        |
| 7.1.3. Ensayo de micro-rotura de matriz  | 271        |
| 7.1.4. Ajustes del algoritmo   | 272        |
| 7.2. ENSAYOS A FLEXIÓN A TRES PUNTOS   | 272        |
| 7.2.1. Descripción de la probeta   | 272        |
| 7.2.2. Descripción del ensayo y configuración de EA  | 273        |
| 7.2.3. Resultados mecánicos  | 276        |
| 7.2.4. Resultados y discusión  | 278        |
| 7.2.4.1. Probeta 3_D   | 278        |
| 7.2.4.2. Probeta 9_D   | 282        |
| 7.2.4.3. Probeta 9_3   | 286        |
| 7.2.4.4. Probeta 9_4   | 289        |
| <b>8. INFLUENCE OF AN OPTICAL FIBER EMBEDDED IN UNIDIRECTIONAL CFRP LAMINATES</b>                                    | <b>293</b> |
| 8.1. SAMPLES AND EXPERIMENTAL SETUP  | 293        |
| 8.2. MECHANICAL RESULTS  | 297        |
| 8.3. AE RESULTS  | 298        |
| 8.3.1. Sample with no embedded OF (UT0_NF)   | 299        |

|  |     |
|--|-----|
| 8.3.2. Sample with embedded OF at 0° (UT0_F0) .....  | 300 |
| 8.3.3. Sample with embedded OF at 45° (UT0_F45)..... | 302 |
| 8.3.4. Sample with embedded OF at 90° (UT0_F90)..... | 304 |
| 8.4. DIC RESULTS.....                                | 307 |
| 8.4.1. Sample with no embedded OF (UT0_NF).....      | 307 |
| 8.4.2. Sample with embedded OF at 0° (UT0_F0) .....  | 310 |
| 8.4.3. Sample with embedded OF at 45° (UT0_F45)..... | 313 |
| 8.4.4. Sample with embedded OF at 90° (UT0_F90)..... | 317 |
| 8.5. COMPARISON BETWEEN FOUR TYPES OF SPECIMENS..... | 320 |

**PARTE C: EVALUACIÓN DE ADHERENCIA HORMIGÓN-ACERO GALVANIZADO EN ENSAYOS DE PULL-OUT MEDIANTE EL USO DE EMISIÓN ACÚSTICA..... 325**

**9. CONCRETE-GALVANIZED STEEL BOND ASSESSED BY ACOUSTIC EMISSION..... 327**

|   |     |
|---|-----|
| 9.1. STEEL-TO-CONCRETE BOND .....                     | 327 |
| 9.2. EXPERIMENTAL SET-UP .....                        | 330 |
| 9.3. DESCRIPTION OF THE TEST SPECIMENS .....          | 332 |
| 9.4. RESULTS AND DISCUSSION .....                     | 334 |
| 9.4.1. Bond stress versus slip curves.....            | 334 |
| 9.4.1.1. Mechanical behavior at 28 days .....         | 334 |
| 9.4.1.2. Mechanical behavior at different ages .....  | 336 |
| 9.4.2. Acoustic emission results .....                | 337 |
| 9.4.2.1. AE activity at 28 days.....                  | 337 |
| 9.4.2.2. AE activity at different ages.....           | 341 |
| 9.4.2.3. Amplitude versus duration of AE signals..... | 342 |
| 9.5. CONCLUSIONS .....                                | 343 |

**10. CONCLUSIONS..... 345**

# Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1. Fuente de EA generando una onda de EA por una tensión del material.<br>Cadena del proceso de EA: sensor, señal de EA, preamplificador, sistema de adquisición y ordenador. ....  | 20 |
| Figura 2.2. Generación de emisión acústica debido a la liberación de energía de deformación [100].....   | 21 |
| Figura 2.3. Materiales comunes que emiten EA al someterlos a estímulos mecánicos: deformación plástica del estaño, caída de árboles, rotura de vidrio o papel. ....  | 22 |
| Figura 2.4. Comparación de los métodos UT (a) y AT (b) [100]. ....   | 24 |
| Figura 2.5. Diversas aplicaciones del método de EA. ....   | 26 |
| Figura 2.6. Izquierda: Onda primaria emitida por la fuente de EA (ondas de desplazamiento, velocidad y tensión). Derecha: Directividad (dependencia angular) de la emisión acústica generada por el crecimiento de una microgrieta. ....   | 28 |
| Figura 2.7. Microimpulso producido por el crecimiento rápido de una fractura frágil y lento de una fractura dúctil. ....   | 29 |
| Figura 2.8. a) Señal de EA transitoria generada por la rotura de una fibra de carbono; b) Señal de EA continua generada por el rozamiento interno en hormigón. ....  | 30 |
| Figura 2.9. Señal de EA transitoria. Definición de la amplitud, el umbral, el tiempo de llegada (TOA) y el primer cruce de umbral (FTC). ....  | 31 |
| Figura 2.10. Relación entre el tamaño, la frecuencia de las señales, los defectos y el ámbito de aplicación. ....  | 32 |
| Figura 2.11. Señales transitorias de EA sobre ruido de fondo. ....   | 35 |
| Figura 2.12. Parámetros usados para la definición del <i>hit</i> (PDT, HDT, HLT) y parámetros clásicos de una señal transitoria de EA. ....  | 36 |
| Figura 2.13. Situaciones en las que: a) HDT está correctamente elegido; b) HDT está elegido demasiado alto. ....   | 37 |
| Figura 2.14. Situación en la que HLT es demasiado alto. ....   | 37 |
| Figura 2.15. Diagrama de bloques de un sistema EA multicanal. ....   | 39 |
| Figura 2.16. 2 eventos de EA registrados en un ensayo a flexión de una viga de hormigón usando 8 canales. <i>Ev</i> : Representa el comienzo del evento ( <i>first-hit event</i> ). <i>Ht</i> : Representa los <i>hits</i> subsiguientes del evento. <i>A</i> : Amplitud de cada <i>hit</i> en dB. <i>CHAN</i> : Canal que registra cada <i>hit</i> . <i>SIGS</i> : Número de <i>hits</i> de cada evento. .... | 40 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.17. Señal de EA y su FFT calculada en una ventana de 100 datos (20 $\mu$ s).<br>Frecuencia de muestreo 5 MHz. FFT calculada con 32, 64, 128, 256, 512 y 1024 datos<br>según el caso. Ventana rectangular de suavizado. ....  | 45 |
| Figura 2.18. Diferentes formas de onda en el dominio del tiempo y sus espectros<br>correspondientes (dominio de la frecuencia).....   | 46 |
| Figura 2.19. a) Onda de EA registrada por un sensor en el dominio del tiempo; b) La<br>misma onda en el dominio de la frecuencia (espectro). ....   | 46 |
| Figura 2.20. a) Señal de EA con dos ventanas temporales definidas; b) RMS en dB en<br>cada una de las ventanas definidas a lo largo del ensayo a flexión de una viga de<br>hormigón. ....   | 47 |
| Figura 2.21. Señal registrada por la rotura de una fibra de carbono en material CFRP.<br>a) Ventana temporal; b) Ventana espectral. ....  | 48 |
| Figura 2.22. Diferencia entre la frecuencia de pico y la frecuencia central del espectro de<br>una señal. ....  | 50 |
| Figura 2.23. a) Sismogramas del terremoto ocurrido en la costa central de Chile el 3 de<br>Septiembre de 1998; b) Señal de EA registrada por un sensor resonante a 150 kHz en<br>una tubería de calefacción llena de agua y generada por una fuente situada a 290 cm del<br>sensor..... | 51 |
| Figura 2.24. a) Posición genérica de un sensor ( $S_i$ ) y la fuente (F). b) Posición de la<br>fuente respecto del sensor al que llega primero la onda ( $S_1$ ).....   | 52 |
| Figura 2.25. Clasificación de los métodos de localización.....  | 56 |
| Figura 2.26. Pasos en un proceso de localización. ....  | 56 |
| Figura 2.27. Localización lineal de una fuente de EA, F, situada entre dos sensores $S_1$ y<br>$S_2$ .....  | 58 |
| Figura 2.28. Localización lineal de una fuente de EA, F, no situada entre dos sensores $S_1$<br>y $S_2$ .....   | 59 |
| Figura 2.29. Modos de las ondas de Lamb. a) Modo simétrico (S); b) Modo antisimétrico<br>(A).....   | 61 |
| Figura 2.30. Variación con la frecuencia de la velocidad de grupo y velocidad de fase de<br>los modos A0 y S0 en placas de aluminio de diferente espesor (1 mm, 2 mm y 4 mm)..  | 63 |
| Figura 2.31. Demostración de la dispersión de una onda en los modos S0 y A0 después<br>de la propagación a cierta distancia (frecuencia de la excitación: 300 kHz). En el eje<br>vertical se muestra la densidad espectral de potencia (PSD). ....                                      | 64 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.32. Atenuación total de la onda compuesta por la dispersión geométrica y el amortiguamiento del material (La amplitud a 60 mm se considera el 100%, coeficiente de amortiguamiento $\alpha=0.04$ dB/mm) .....  | 66 |
| Figura 2.33. Señales registradas por 4 sensores a diferentes distancias del actuador en una placa de aluminio de 1.6 mm de espesor. ....  | 68 |
| Figura 2.34. Martillo de impacto de <i>Brüel &amp; Kjær</i> . ....  | 71 |
| Figura 2.35. Representación general de un sistema. ....   | 73 |
| Figura 2.36. Seguimiento de los estados de deformación entre imágenes y el patrón de puntos incluyendo una pequeña zona ( <i>subset</i> ) usada en el proceso de correlación de imágenes [119]. ....  | 76 |
| Figura 2.37. Configuración de cámara normalmente usada y proceso para medir las posiciones de objetos 3D. a) Sistema 2D; b) Sistema 3D [119]. ....  | 77 |
| Figura 2.38. Objeto de calibración usado en el método DIC. ....   | 78 |
| Figura 2.39. Patrón estocástico con defectos. a) Distribución irregular de las partículas; b) Patrón estocástico parcialmente dañado. ....  | 81 |
| Figura 2.40. Arriba: Campo de deformaciones calculado para las mismas imágenes con una resolución de 0.028 mm/px y tamaños de <i>subset</i> diferentes; Abajo: Patrón estocástico con indicación de los <i>subsets</i> [119]. ....  | 82 |
| Figura 2.41. Esquema del flujo de tensiones alrededor de un agujero elíptico (a) y de una grieta (b). ....  | 84 |
| Figura 2.42. Campo de deformaciones de una probeta con dos grietas obtenido mediante DIC (izq.) y mediante simulación con elementos finitos (dcha.) [129]. ....   | 85 |
| Figura 2.43. Campo de deformaciones de una probeta de CFRP con rotura de fibra. a) Resultado obtenido con DIC; b) Resultado obtenido mediante simulación de elementos finitos [119]. ....   | 87 |
| Figura 2.44. Campo de deformaciones obtenido durante un ensayo de tracción con indicación de roturas de fibra a 45° y 90° [119]. ....   | 87 |
| Figura 2.45. Evaluación de una rotura de fibra artificial de 10 mm situada en la segunda capa del laminado. a) Deformación media y deformación en la zona de concentración en función del esfuerzo; b) Diferencia de deformaciones normalizada a la tensión aplicada en función de la tensión [119]. .... | 89 |
| Figura 2.46. Campo de deformaciones registrado cerca de una zona con rotura de fibra en CFRP con diferentes lentes. ....  | 90 |
| Figura 3.1. Colegio Pestalozzi, primer edificio aislado sísmicamente. ....  | 95 |
| Figura 3.2. Clasificación de los sistemas de control estructural [136]. ....  | 99 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 3.3. Ejemplos de sistemas de control pasivo [136].   | 100 |
| Figura 3.4. Ejemplos de sistemas de control activo [136].   | 100 |
| Figura 3.5. Disipador BRB de la casa comercial <i>CoreBrace México</i> . Izq.: Componentes del disipador. Dcha.: Disipadores BRB instalados en la Biblioteca Marriot en Salt Lake City, Utah, USA.                            | 102 |
| Figura 3.6. Disipador tipo ADAS.  | 103 |
| Figura 3.7. Disipador tipo TADAS.   | 104 |
| Figura 3.8. Disipador tipo SSD.   | 104 |
| Figura 3.9. Disipador tipo HDS de la empresa <i>Kajima Corporation</i> instalado en muro de hormigón.   | 105 |
| Figura 3.10. Configuraciones de instalación del disipador HDS. Izq.: Instalación en muro (WDS). Centro: Instalación en vigas (BDS). Dcha.: Instalación en pilares (PDS).  | 105 |
| Figura 3.11. Disipador WPD.   | 106 |
| Figura 3.12. Secciones I y patrón de deformación.   | 106 |
| Figura 3.13. Instalación del disipador WPD en una estructura porticada.   | 108 |
| Figura 3.14. Detalle de la fijación soldada del disipador WPD a la chapa de sujeción entre los nudos viga-pilar en la estructura principal del edificio.  | 108 |
| Figura 4.1. Efecto piezoeléctrico [145].  | 114 |
| Figura 4.2. Polarización de una cerámica piezoeléctrica. Izq.: Dipolos eléctricos antes de la polarización. Centro: Polarización en un campo eléctrico. Dcha.: Polarización remanente tras eliminar el campo eléctrico [144]. | 117 |
| Figura 4.3. Transductores piezoeléctricos usados para instrumentar las secciones I. Izq.: sensor PI®PRYY+0220. Dcha.: actuador PI®PRYY+0842.  | 118 |
| Figura 4.4. Diagrama de Bode del sensor y actuador utilizados.  | 119 |
| Figura 4.5. Zona de fijación del sensor y el actuador en la sección I.  | 121 |
| Figura 4.6. Esquema del sistema electrónico de medida.  | 122 |
| Figura 4.7. Vista general y vista del panel con los canales de entrada y salida del equipo <i>CoCo80</i> .  | 123 |
| Figura 4.8. Amplificador lineal piezoeléctrico EPA 104 [150].   | 124 |
| Figura 4.9. Equipo <i>PULSE 3560-B</i> de <i>Brüel &amp; Kjær</i> .   | 126 |
| Figura 4.10. Detalle de la soldadura de conexión con el sensor piezoeléctrico.  | 127 |
| Figura 4.11. Caja de conexión para 4 sensores.  | 128 |
| Figura 4.12. Salidas BNC de la caja de conexión no diferencial.   | 128 |
| Figura 4.13. Caja de puesta a tierra centralizada.  | 130 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 4.14. Vista general del ensayo de vibraciones. 1: Sistema generador <i>CoCo80</i> ; 2: Sistema amplificador EPA104; 3: Sección I a ensayar; 4: Caja de conexiones RJ45; 5: Caja de conexión no diferencial; 6: Sistema de adquisición <i>PULSE</i> ; 7: Router doméstico; 8: Ordenador de trabajo. .... | 130 |
| Figura 4.15. Señal de ruido blanco utilizada. a) Señal en el dominio del tiempo; b) Densidad espectral de potencia. ....   | 131 |
| Figura 4.16. Vista general del espécimen FD colocado en la mesa sísmica. ....  | 133 |
| Figura 4.17. Vista general del espécimen SD colocado en la mesa sísmica. ....  | 134 |
| Figura 4.18. Aceleraciones aplicadas en las simulaciones sísmicas a la estructura FD..   | 135 |
| Figura 5.1. Curva típica carga-desplazamiento $Q-\delta$ de una sección de acero sometida a cargas cíclicas [3]. ....  | 138 |
| Figura 5.2. Parte del esqueleto de la descomposición de la curva $Q-\delta$ [3]. ....  | 139 |
| Figura 5.3. Parte de Bauschinger de la descomposición de la curva $Q-\delta$ [3]. ....   | 140 |
| Figura 5.4. Esquema general de las etapas del algoritmo de cálculo del índice ADI, incluyendo el % de tiempo de cálculo de cada etapa. ....  | 148 |
| Figura 5.5. Magnitud FRF de la sección SD_F0_C1_I12 tras las diferentes simulaciones sísmicas realizadas. ....   | 149 |
| Figura 5.6. Modos de resonancia de la sección I idealizada como una viga con extremos en empotramiento perfecto. ....  | 149 |
| Figura 5.7. Magnitud FRF de la sección SD_F0_C1_I12 tras las simulaciones sísmicas. a) Frecuencia de resonancia en torno a 18 kHz; b) Frecuencia de resonancia en torno a 25 kHz. ....   | 150 |
| Figura 5.8. Magnitud $ Z $ -estadística de la sección SD_F0_C1_I12 en la quinta frecuencia de resonancia tras las simulaciones sísmicas realizadas. ....   | 151 |
| Figura 5.9. ADI frente a ID de las secciones del espécimen FD. ....  | 152 |
| Figura 5.10. ADI frente a ID de las secciones del espécimen SD. ....   | 152 |
| Figura 5.11. Esquema de un edificio con disipadores instrumentados con la plataforma <i>Picocom</i> . ....   | 154 |
| Figura 5.12. Esquema del sistema de medida electrónica usando <i>Picocom</i> . ....  | 154 |
| Figura 5.13. Valores de ADI de los tres niveles de daño en función de la longitud de la ventana. ....  | 156 |
| Figura 5.14. Valores de ADI de los tres niveles de daño en función de la duración de la señal. Longitud de ventana de a) 2048 muestras; b) 16384 muestras; c) 32768 muestras. ....   | 157 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5.15. Resultados obtenidos para la sección FD_F0_C34_I5. a) Caso HP_3s; b) Caso LS_20s. Arriba: Magnitud FRF para cada nivel de daño en todo el rango de frecuencia; Centro: Magnitud FRF en el ancho de banda seleccionado para el cálculo del ADI; Abajo: Magnitud $ Z $ -estadística en el ancho de banda seleccionado..... | 159 |
| Figura 5.16. Valores de ADI frente a la simulación sísmica para la sección FD_F0_C34_I5 en los 3 casos de estudio.....  | 160 |
| Figura 5.17. Valores de ADI frente a ID para las secciones FD_F0_C34_I5 (Main floor) y FD_F1_C34_I4 (First floor). .....  | 160 |
| Figura 5.18. Familia de wavelets <i>Daubechies</i> . .....  | 164 |
| Figura 5.19. Representación esquemática de una descomposición de WPA de 3 niveles de una señal temporal. ....   | 166 |
| Figura 5.20. Energía wavelet frente a frecuencia obtenida en una sección de planta baja del espécimen SD (SD_F0_C1_I12). a) Ancho de frecuencia registrado; b) Cuarta frecuencia de resonancia; c) Quinta frecuencia de resonancia.....   | 172 |
| Figura 5.21. <b>Vd</b> frente a frecuencia para las secciones I del espécimen FD. ....  | 173 |
| Figura 5.22. FRF frente a frecuencia para las secciones I del espécimen FD.....   | 174 |
| Figura 5.23. <b>Vd</b> frente a frecuencia para las secciones I del espécimen SD. ....  | 175 |
| Figura 5.24. ID frente WER para las secciones del espécimen FD. ....  | 176 |
| Figura 5.25. ID frente WER para las secciones del espécimen SD. ....  | 177 |
| Figura 5.26. ID frente WER para las secciones de los disipadores del espécimen a) FD; b) SD.....  | 178 |
| Figura 5.27. ID frente RWEE para las secciones del espécimen FD.....  | 183 |
| Figura 5.28. ID frente RWEE para las secciones del espécimen SD. ....   | 184 |
| Figura 5.29. ID frente RWEE para las secciones de los disipadores del espécimen a) FD; b) SD.....   | 185 |
| Figura 5.30. Ejemplo de clasificación usando el algoritmo <i>kNN</i> . ....   | 187 |
| Figura 5.31. Ejemplo de distancia de Chebyshev en un tablero de ajedrez. ....   | 189 |
| Figura 5.32. Recta de distribución de los niveles de daño en el algoritmo del clasificador unidimensional (1D). ....  | 190 |
| Figura 5.33. WER frente a ADI para la sección FD_F0_C12_I1. ....  | 201 |
| Figura 5.34. WER frente a ADI para la sección FD_F0_C12_I1, mostrando el resultado de la clasificación sin normalización de índices. ....   | 202 |
| Figura 5.35. Valores normalizados de WER frente a ADI para la sección FD_F0_C12_I1, mostrando el resultado de la clasificación.....   | 203 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5.36. WER frente a ADI para la sección FD_F0_C12_I1, mostrando el resultado de la clasificación normalizada.....   | 203 |
| Figura 5.37. Representación de los tres índices ADI, WER y RWEE para la sección FD_F0_C12_I1, con indicación del resultado de la clasificación para una de las muestras. ....   | 204 |
| Figura 5.38. Plano ADI-WER de la clasificación conjunta 3D para la sección FD_F0_C12_I1.....  | 205 |
| Figura 5.39. Plano ADI-RWEE de la clasificación conjunta 3D para la sección FD_F0_C12_I1.....   | 205 |
| Figura 5.40. Plano WER-RWEE de la clasificación conjunta 3D para la sección FD_F0_C12_I1.....   | 206 |
| Figura 6.1. Representación esquemática de los micro-pulsos producidos por: a) Crecimiento de delaminación (Modo A <sub>0</sub> ); b) Rotura de fibra o (Modo S <sub>0</sub> ). ....   | 213 |
| Figura 6.2. Cajón representativo del tipo de ala a estudiar. ....   | 214 |
| Figura 6.3. Perfil de la zona de cambio de grosor. ....   | 216 |
| Figura 6.4. Imagen C-SCAN de ultrasonidos de la placa DAICA sin delaminación. ....  | 217 |
| Figura 6.5. Imagen C-SCAN de ultrasonidos de la placa DAICA con delaminaciones. ....  | 218 |
| Figura 6.6. Localización de las probetas extraídas sobre la placa DAICA. Cotas en cm. ....  | 219 |
| Figura 6.7. Probeta 1 con delaminación de 50x50 mm <sup>2</sup> .....   | 220 |
| Figura 6.8. Curva de sensibilidad del sensor VS45-H.....  | 221 |
| Figura 6.9. Fuente Hsu-Nielsen (H-N).....   | 221 |
| Figura 6.10. Esquema del ensayo de detección de ondas de Lamb sobre la Probeta 1. ....  | 222 |
| Figura 6.11. Vista del ensayo de detección de ondas de Lamb sobre la Probeta 1. ....  | 222 |
| Figura 6.12. Disposición del ensayo para rotura de mina en la Probeta 1. Izq.: Rotura de mina en superficie (OP); Dcha.: Rotura de mina en canto (IP).....  | 223 |
| Figura 6.13. Señales registradas en el experimento para detectar los modos de Lamb en la Probeta 1. Izq.: Señales originales; Dcha.: Señales filtradas. ....  | 224 |
| Figura 6.14. Transformada Wavelet de las señales representadas en la Figura 6.13. Izq-arriba: Señal sin filtrar de fuente OP; Dcha-arriba: Señal filtrada de fuente OP; Izq-abajo: Señal sin filtrar de fuente IP; Dcha-abajo: Señal filtrada de fuente IP. ....        | 225 |
| Figura 6.15. Izq.: Filtrado en alta frecuencia de la señal registrada por los sensores S1 y S2 tras la rotura de mina en superficie (OP); Dcha.: Filtrado en baja frecuencia de la señal registrada por los sensores S1 y S2 tras la rotura de mina en canto (IP). .... | 226 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 6.16. Esquema de ensayo de detección de ondas de Lamb sobre la placa DAICA.<br>.....  | 227 |
| Figura 6.17. Disposición de ensayo de roturas de mina sobre la placa DAICA con los<br>sensores enfrentados. ....   | 228 |
| Figura 6.18. Equipo AMSY-5 de <i>Vallen Systeme</i> . ....   | 228 |
| Figura 6.19. Esquema de configuración de canales, filtros y umbrales del ensayo de<br>rotura de minas con sensores enfrentados en la placa DAICA. ....   | 230 |
| Figura 6.20. Señales registradas por los sensores S1 y S2 con filtros de [25-850] kHz, [20-<br>55] kHz y [125-660] kHz según la configuración usada. Izq.: Durante la rotura de mina<br>en superficie (OP); Dcha.: Durante la rotura de mina en canto (IP). .... | 232 |
| Figura 6.21. Esquema de descripción de eventos OP e IP. ....   | 235 |
| Figura 6.22. Esquema de configuración de canales, filtros y umbrales del ensayo de<br>rotura de minas sobre la probeta 7_1. ....   | 236 |
| Figura 6.23. Esquema experimental del ensayo de rotura de minas en superficie (OP) y<br>canto (IP) sobre la probeta 7_1. ....  | 237 |
| Figura 6.24. Probeta 7_1 dispuesta para ensayo de rotura de minas. ....  | 238 |
| Figura 6.25. Amplitud frente a tiempo de las señales registradas. Izq.: canales de baja<br>frecuencia; Dcha.: canal de alta frecuencia. ....   | 239 |
| Figura 6.26. Señales registradas en la rotura de mina en el punto OP2 de la probeta<br>7_1. Izq.: Señal temporal; Dcha.: Respuesta espectral. ....   | 241 |
| Figura 6.27. Señales registradas en la rotura de mina en el punto OP7 de la probeta<br>7_1. Izq.: Señal temporal; Dcha.: Respuesta espectral. ....   | 242 |
| Figura 6.28. Señales registradas en la rotura de mina en el punto IP4 de la probeta 7_1.<br>Izq.: Señal temporal; Dcha.: Respuesta espectral. ....   | 243 |
| Figura 6.29. RMS (arriba) y Rd (abajo) para las roturas realizadas en la probeta 7_1.<br>Tiempo < 700 $\mu$ s (roturas OP). Tiempo > 700 $\mu$ s (roturas IP). Valores en dB. ....   | 245 |
| Figura 6.30. Valores de RMS y Rd en función de la ventana temporal para los canales<br>de baja frecuencia. ....  | 246 |
| Figura 6.31. Mitad de la probeta 7_1 previamente ensayada a flexión y pre-delaminada.<br>.....   | 247 |
| Figura 6.32. Izq.: Esquema de disposición del comienzo del ensayo de delaminación pura;<br>Dcha.: Esquema del desarrollo del ensayo de delaminación pura. ....   | 248 |
| Figura 6.33. Vista del ensayo de delaminación pura. ....   | 248 |
| Figura 6.34. Fases de carga, fluencia y descarga realizadas durante el ensayo de<br>delaminación pura. ....  | 249 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 6.35. Izq.: Amplitud de las señales de EA registradas en los canales de baja y alta frecuencia del ensayo de delaminación; Dcha.: Eventos de señales de EA acumulados durante el ensayo de delaminación. ....                               | 249 |
| Figura 6.36. Izq.: Señal de EA registrada con el CH2 de baja frecuencia [20-55] kHz durante el ensayo de delaminación pura. Dcha.: Señal de EA registrada con el CH4 de alta frecuencia [125-660] kHz durante el ensayo de delaminación pura. .... | 250 |
| Figura 6.37. Disposición y esquema del ensayo de rotura de fibra. ....   | 251 |
| Figura 6.38. Amplitudes de las señales de EA registradas durante el ensayo de rotura de fibra. ....  | 252 |
| Figura 6.39. Señal de EA registrada por el canal de alta frecuencia durante el ensayo de rotura de fibra. Izq.: Señal temporal; Dcha.: Respuesta espectral. ....   | 252 |
| Figura 6.40. Elección de la ventana temporal [-2, 4] $\mu$ s de la señal de EA registrada por el canal de alta frecuencia durante el ensayo de rotura de fibra. Izq.: Señal temporal; Dcha.: Respuesta espectral. ....                             | 253 |
| Figura 6.41. Ensayo de micro-rotura de matriz. Izquierda: Señal temporal registrada. Derecha: Respuesta espectral en la ventana temporal [-2,4] $\mu$ s. ....  | 254 |
| Figura 6.42. Ejemplos de señales no computadas donde el $RMS_{PW} \geq 11$ dB. ....  | 256 |
| Figura 6.43. Ejemplos de señales computadas donde el $RMS_{PW} < 11$ dB. ....  | 257 |
| Figura 6.44. Elección de la ventana temporal de alta frecuencia $W_{HF2}$ en diferentes señales. ....  | 260 |
| Figura 6.45. Elección de la ventana temporal de alta frecuencia $W_{HF1}$ en diferentes señales. ....  | 260 |
| Figura 6.46. Elección de la ventana temporal de baja frecuencia $W_{LF}$ en una señal de 58.4 dB de amplitud. ....   | 262 |
| Figura 6.47. Elección de la ventana temporal de baja frecuencia $W_{LF}$ en una señal de 76.1 dB de amplitud. ....   | 262 |
| Figura 6.48. Diagrama de bloques del algoritmo de discriminación de mecanismos de daño propuesto. ....   | 263 |
| Figura 7.1. Clasificación de eventos en el ensayo de delaminación pura. a) $CD=0$ dB; b) $CD=5$ dB; c) $CD=10$ dB; d) $CD=15$ dB. $T_{R\_SRHF1}=6$ dB y $T_{R\_SRHF2}=6$ dB. ....  | 268 |
| Figura 7.2. $R_{LF-HF}$ para los eventos tipo HS del ensayo de delaminación pura. ....   | 269 |
| Figura 7.3. Clasificación de eventos en el ensayo de delaminación pura. $CD=0$ . $T_{R\_SRHF1}=6$ dB y $T_{R\_SRHF2}=6$ dB. Hits no computados si: a) $RMS_{PW} \geq 0$ dB; b) $RMS_{PW} \geq 10$ dB; c) $RMS_{PW} \geq 20$ dB. ....               | 270 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 7.4. Clasificación de eventos en el ensayo de roturas de fibra. CD=0. $T_{R\_SRHF1}= 6$ dB y $T_{R\_SRHF2}= 6$ dB. ....   | 271 |
| Figura 7.5. $R_{SRHF1}$ para los eventos de las roturas de fibra. ....   | 271 |
| Figura 7.6. Clasificación de eventos en el ensayo de micro-rotura de matriz.....   | 272 |
| Figura 7.7. a) Probeta 9_3 sin delaminación; b) Probeta 9_4 sin delaminación; c) Probeta 9_D con delaminación de 25 x 25 mm <sup>2</sup> ; d) Probeta 3_D con delaminación de 40 x 50 mm <sup>2</sup> .....  | 273 |
| Figura 7.8. Esquema del ensayo a flexión a tres puntos. Distancias en mm.....  | 273 |
| Figura 7.9. Probetas sobre la máquina de ensayos. ....   | 274 |
| Figura 7.11. Ensayo a flexión sobre la probeta 9_3.....  | 276 |
| Figura 7.12. Variación de la carga en función del tiempo obtenida en el ensayo a flexión para probetas sin predelaminación. a) Probeta 9_3; b) Probeta 9_4. ....   | 277 |
| Figura 7.13. Variación de la carga en función del tiempo obtenida en el ensayo a flexión para probetas predelaminadas. a) Probeta 9_D; b) Probeta 3_D. ....  | 278 |
| Figura 7.14. Eventos acumulados en el ensayo a flexión de la probeta 3_D clasificados en los tres mecanismos de daño. a) CD=0 dB; b) CD= 5 dB; c) CD=10 dB. $T_{R\_SRHF1}= 6$ dB y $T_{R\_SRHF2}= 6$ dB. ....  | 279 |
| Figura 7.15. Eventos acumulados en el ensayo a flexión de la probeta 3_D clasificados en los tres mecanismos de daño. CD=0 dB. a) $T_{R\_SRHF1}= 3$ dB y $T_{R\_SRHF2}= 3$ dB; b) $T_{R\_SRHF1}= 6$ dB y $T_{R\_SRHF2}= 6$ dB; c) $T_{R\_SRHF1}= 9$ dB y $T_{R\_SRHF2}= 9$ dB..... | 280 |
| Figura 7.16. Imagen de microscopía SEM realizada tras el ensayo a flexión en la que se muestra una delaminación. ....  | 281 |
| Figura 7.17. Fotografía del daño producido en la probeta 3_D. ....   | 281 |
| Figura 7.18. Distribución de los eventos de delaminación en el ensayo a flexión de la probeta 3_D, en función de $RMS_{LF}$ . CD=0 dB. $T_{R\_SRHF1}= 6$ dB y $T_{R\_SRHF2}= 6$ dB. ....   | 282 |
| Figura 7.19. Eventos acumulados en el ensayo a flexión de la probeta 9_D clasificados en los tres mecanismos de daño. a) CD=0 dB; b) CD= 5 dB; c) CD=10 dB. $T_{R\_SRHF1}= 6$ dB y $T_{R\_SRHF2}= 6$ dB. ....  | 283 |
| Figura 7.20. Detalle de los eventos acumulados en el ensayo a flexión de la probeta 9_D. CD=0 dB. $T_{R\_SRHF1}= 6$ dB y $T_{R\_SRHF2}= 6$ dB. ....  | 284 |
| Figura 7.21. Fotografías de los daños producidos en la probeta 9_D.....  | 285 |
| Figura 7.22. C-SCAN de ultrasonidos de la delaminación en la probeta 9_D.....  | 285 |
| Figura 7.23. Distribución de los eventos de delaminación en el ensayo a flexión de la probeta 9_D, en función de $RMS_{LF}$ . CD=0 dB. $T_{R\_SRHF1}= 6$ dB y $T_{R\_SRHF2}= 6$ dB. ....   | 286 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 7.24. Eventos acumulados en el ensayo de flexión de la probeta 9_3 clasificados en los tres mecanismos de daño. a) CD=0 dB; b) CD= 5 dB; c) CD=10 dB. $T_{R\_SRHF1}= 6$ dB y $T_{R\_SRHF2}= 6$ dB. ....   | 287 |
| Figura 7.25. Fotografías de los daños producidos en la probeta 9_3. ....   | 288 |
| Figura 7.26. Imagen de microscopía SEM realizada tras el ensayo a flexión. a) Rotura de fibra; b) Micro-rotura de matriz. ....   | 288 |
| Figura 7.27. Distribución de los eventos de delaminación en el ensayo de flexión de la probeta 9_3, en función de $RMS_{LF}$ . CD=0 dB. $T_{R\_SRHF1}= 6$ dB y $T_{R\_SRHF2}= 6$ dB. ....  | 289 |
| Figura 7.28. Eventos acumulados en el ensayo de flexión de la probeta 9_4 clasificados en los tres mecanismos de daño. a) CD=0 dB; b) CD= 5 dB; c) CD=10 dB. $T_{R\_SRHF1}= 6$ dB y $T_{R\_SRHF2}= 6$ dB. ....   | 290 |
| Figura 7.29. Distribución de los eventos de delaminación en el ensayo de flexión de la probeta 9_4, en función de $RMS_{LF}$ . CD=0 dB. $T_{R\_SRHF1}= 6$ dB y $T_{R\_SRHF2}= 6$ dB. ....  | 290 |
| Figura 7.30. Fotografías de los daños producidos en la probeta 9_4. ....   | 291 |
| Figure 8.1. Types of tested samples with indication of the embedded optical fiber (dashed line).....   | 294 |
| Figure 8.2. General view of the test.....  | 295 |
| Figure 8.3. a) AE and DIC experimental setup; b) Frequency response of WD sensors. ....  | 295 |
| Figure 8.4. View of the sample and DIC equipment. ....   | 296 |
| Figure 8.5. Stress versus $\gamma$ -strain. ....   | 298 |
| Figure 8.6. AE results of the sample UT0_NF. a) Amplitude vs duration; b) Hits distribution vs amplitude; c) AE location results vs stress; d) Distribution of the energy and located events vs X-location; e) AE cumulated energy, energy of the hits and cumulated located events vs stress. ....  | 300 |
| Figure 8.7. AE results of the sample UT0_F0. a) Amplitude vs duration; b) Hits distribution vs amplitude; c) AE location results vs stress; d) Distribution of the energy and located events vs X-location; e) AE cumulated energy, energy of the hits and cumulated located events vs stress. ....  | 302 |
| Figure 8.8. AE results of the sample UT0_F45. a) Amplitude vs duration; b) Hits distribution vs amplitude; c) AE location results vs stress; d) Distribution of the energy and located events vs X-location; e) AE cumulated energy, energy of the hits and cumulated located events vs stress. .... | 304 |
| Figure 8.9. AE results of the sample UT0_F90. a) Amplitude vs duration; b) Hits distribution vs amplitude; c) AE location results vs stress; d) Distribution of the energy   |     |

|  |     |
|--|-----|
| and located events vs X-location; e) AE cumulated energy, energy of the hits and cumulated located events vs stress.....   | 306 |
| Figure 8.10. a) Detail of the evaluation area of the sample UT0_NF, including the concentration strain areas (1 and 2), the averaging area and the longitudinal sections shown in Figure 8.12; b) DIC image taken at 725 MPa.....                                  | 307 |
| Figure 8.11. y-strain field of the sample UT0_NF during the transition between periods T1 and T2 (from 80 MPa to 156 MPa). .....   | 308 |
| Figure 8.12. Major strain at the longitudinal sections marked along the length of the sample UT0_NF at a) 80; b) 156 MPa.....  | 308 |
| Figure 8.13. y-strain field of the sample UT0_NF from 646 to 725 MPa. ....   | 309 |
| Figure 8.14. UT0_NF. a) y-strain average and strain concentration as function of stress; b) Quantification of the strain exceedance as function of stress; c) Quantification of the strain exceedance normalized by the applied stress as function of stress. .... | 310 |
| Figure 8.15. Detail of the evaluation area of the sample UT0_F0, including the concentration strain area, the averaging area and the FBG direction.....  | 311 |
| Figure 8.16. y-strain field of the sample UT0_F0 from 297 to 350 MPa, during the transition between periods T1 and T2. ....  | 312 |
| Figure 8.17. y-strain field of the sample UT0_F0 from 550 to 626 MPa, during the transition between periods T2 and T3. ....  | 312 |
| Figure 8.18. UT0_F0. a) y-strain average and strain concentration as function of stress; b) Quantification of the strain exceedance as function of stress; c) Quantification of the strain exceedance normalized by the applied stress as function of stress. .... | 313 |
| Figure 8.19. Detail of the evaluation area of the sample UT0_F45, including the concentration strain area, the averaging area and the sections considered in Figure 8.22 and Figure 8.24.....  | 314 |
| Figure 8.20. y-strain field of the sample UT0_F45 from 90 to 160 MPa corresponding with the beginning of the period T1. ....   | 314 |
| Figure 8.21. y- strain field of the sample UT0_F45 from 405 to 475 MPa, the transition between periods T1 and T2. ....   | 315 |
| Figure 8.22. Major strain in sections along the length of the sample UT0_F45 at 405 MPa and 475 MPa.....   | 315 |
| Figure 8.23. y-strain field of the sample UT0_F45 from 684 MPa to 737 MPa, the transition between periods T2 and T3. ....  | 316 |
| Figure 8.24. Major strain in sections along the length of the sample UT0_F45 at 684 MPa and 737 MPa.....   | 316 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure 8.25. UT0_F45. a) y-strain average and strain concentration as function of stress; b) Quantification of the strain exceedance as function of stress; c) Quantification of the strain exceedance normalized by the applied stress as function of stress. .... | 317 |
| Figure 8.26. Detail of the evaluation area of the sample UT0_F90, including the concentration strain area, the averaging area and the section considered in Figure 8.29. ....   | 318 |
| Figure 8.27. y-strain field of the sample UT0_F90 from 425 MPa to 496 MPa, the transition between periods T1 and T2. ....   | 318 |
| Figure 8.28. y-strain field of the sample UT0_F90 from 650 MPa to 757 MPa, the transition between periods T2 and T3. ....   | 319 |
| Figure 8.29. Mayor strain in a longitudinal section of the sample UT0_F90 at 650 MPa and 757 MPa. ....  | 319 |
| Figure 8.30. UT0_F90. a) y-strain average and strain concentration as function of stress; b) Quantification of the strain exceedance as function of stress; c) Quantification of the strain exceedance normalized by the applied stress as function of stress. .... | 320 |
| Figure 8.31. y-strain field of the samples close to the failure (1800 MPa).....   | 322 |
| Figure 8.32. Quantification of the y-strain exceedance as function of stress for the samples. ....  | 322 |
| Figure 8.33. Quantification of the y-strain exceedance normalized by the applied stress as function of stress for the samples. ....   | 323 |
| Figure 9.1. Stages of the concrete-steel interaction in pull-out tests. ....  | 329 |
| Figure 9.2. Diagram of the pull-out experiment monitored by AE. ....  | 332 |
| Figure 9.3. Sample with AE sensors placed in the test machine. ....   | 332 |
| Figure 9.4. a) Scheme of the samples reinforced with the bar, distances in mm; b) Samples with a plastic tube to prevent the bond between steel and concrete, black steel (left) and galvanized steel (right). ....   | 333 |
| Figure 9.5. Strength versus age of concrete. a) Compressive strength; b) Tensile strength. ....   | 334 |
| Figure 9.6. Bond stress vs. slip at 28 days. a) Specimen with black steel; b) Specimen with galvanized steel. ....  | 335 |
| Figure 9.7. Cumulative AE hits in each channel, for two specimens with 28 days concrete-age and different types of steel. a) Black Steel; b) Galvanized steel. ....   | 337 |
| Figure 9.8. AE activity of one specimen with black steel and concrete age 28 days.....  | 338 |
| Figure 9.9. AE activity of one specimen with galvanized steel and concrete age 28 days. ....  | 338 |

Figure 9.10. AE activity at 7 days. a) Specimen with black steel; b) Specimen with  
galvanized steel..... 342

Figure 9.11. AE activity at 90 days. a) Specimen with black steel; b) Specimen with  
galvanized steel..... 342

Figure 9.12. Amplitude versus duration of the AE signals recorded for a 28 day test  
specimen. a) Samples with black steel; b) Samples with galvanized steel. .... 343

# Índice de tablas

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 2.1. Técnicas de procesamiento de señales transitorias y continuas de EA. ....  | 33  |
| Tabla 4.1. Propiedades de la cerámica PIC151 de PI@Ceramic [146]. ....  | 120 |
| Tabla 4.2. Características técnicas del sistema <i>CoCo80 de Crystal Instruments</i> [149].   | 123 |
| Tabla 4.3. Características técnicas del amplificador EPA 104 [150]. ....  | 124 |
| Tabla 4.4. Relación del nivel de daño con el porcentaje de la aceleración máxima de cada simulación sísmica para el espécimen porticado FD. ....                        | 136 |
| Tabla 4.5. Relación del nivel de daño con el porcentaje de la aceleración máxima de cada simulación sísmica para el espécimen reticular SD. ....                        | 136 |
| Tabla 5.1. Valores del índice de daño ID para los disipadores del espécimen FD. ....  | 141 |
| Tabla 5.2. Valores del índice de daño ID para los disipadores del espécimen FD. ....  | 142 |
| Tabla 5.3. Frecuencias de resonancia de una sección IPE-140. ....   | 149 |
| Tabla 5.4. Comparación entre el tiempo empleado por el algoritmo para el cálculo de los valores ADI, variando la duración de la señal. ....                             | 155 |
| Tabla 5.5. Parámetros de los diferentes casos estudiados. (HP: Plataforma <i>Hardware</i> . LS: Sistema de Laboratorio). ....   | 158 |
| Tabla 5.6. Comparación de la codificación de Gray con código binario y la numeración decimal. ....  | 168 |
| Tabla 5.7. Magnitud FRF y magnitud <b><i>vd</i></b> para la sección FD_F0_C12_I1 a diferentes niveles de daño y sus variaciones (%) respecto a la simulación C100. .... | 174 |
| Tabla 5.8. Resultado del clasificador 1D usando el índice ADI para la sección FD_F0_C12_I1. ....  | 191 |
| Tabla 5.9. Resultado del clasificador 1D usando el índice WER para la sección FD_F0_C12_I1. ....  | 192 |
| Tabla 5.10. Resultado del clasificador 1D usando el índice RWEE para la sección FD_F0_C12_I1. ....  | 193 |
| Tabla 5.11. Tasas de acierto del clasificador 1D usando índices de daño independientes para las secciones del espécimen FD. ....  | 194 |
| Tabla 5.12. Tasas de acierto del clasificador 1D usando índices de daño independientes para las secciones del espécimen SD. ....  | 194 |
| Tabla 5.13. Resultado de la clasificación considerando los índices ADI+WER de manera individual para la sección FD_F0_C12_I1. ....                                      | 195 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 5.14. Resultado de la clasificación considerando los índices ADI+RWEE de manera individual para la sección FD_F0_C12_I1. ....            | 196 |
| Tabla 5.15. Resultado de la clasificación considerando los índices WER+RWEE de manera individual para la sección FD_F0_C12_I1. ....            | 197 |
| Tabla 5.16. Tasas de acierto del clasificador de índices independientes ADI+WER, ADI+RWEE y WER+RWEE para las secciones del espécimen FD.....  | 198 |
| Tabla 5.17. Tasas de acierto del clasificador de índices independientes ADI+WER, ADI+RWEE y WER+RWEE para las secciones del espécimen SD. .... | 198 |
| Tabla 5.18. Resultado final de la clasificación de índices independientes ADI+WER+RWEE para la sección FD_F0_C12_I1.....                       | 199 |
| Tabla 5.19. Tasas de acierto del clasificador de índices independientes ADI+WER+RWEE para las secciones del espécimen FD.....                  | 200 |
| Tabla 5.20. Tasas de acierto del clasificador de índices independientes ADI+WER+RWEE para las secciones del espécimen SD. ....                 | 200 |
| Tabla 5.21. Resultado del clasificador conjunto para el nodo 20 de la sección FD_F0_C12_I1: distancias, nodos y nivel de daño. ....            | 207 |
| Tabla 5.22. Tasas de acierto del clasificador 3D usando tres niveles de daño simultáneamente para el espécimen FD. ....                        | 207 |
| Tabla 5.23. Tasas de acierto del clasificador 3D usando tres niveles de daño simultáneamente para el espécimen SD. ....                        | 208 |
| Tabla 6.1. Especificaciones técnicas de la placa DAICA. ....   | 216 |
| Tabla 6.2. Características de cada probeta. ....   | 218 |
| Tabla 6.3. Configuración de canales, filtros y umbrales del ensayo de rotura de minas con sensores enfrentados en la placa DAICA. ....         | 229 |
| Tabla 6.4. Configuración de canales, filtros y umbrales del ensayo de rotura de minas sobre la probeta 7_1.....                                | 236 |
| Tabla 6.5. Valores del RMS en las ventanas de los canales CH3 y CH4 para las fuentes OP2, OP7 e IP4.....                                       | 244 |
| Tabla 6.6. Configuración de EA utilizada para el desarrollo del algoritmo de discriminación de mecanismos de daño. ....                        | 254 |
| Tabla 6.7. Hipótesis de partida: asociación de mecanismos de daño a modos de propagación. ....   | 255 |
| Tabla 7.1. Configuración de canales, filtros y umbrales usados en el ensayo a flexión a tres puntos.....                                       | 275 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 7.10. Esquema de configuración de canales, filtros y umbrales usados en el ensayo a flexión a tres puntos. ....  | 275 |
| Tabla 7.2. Resultados mecánicos de los ensayos a flexión para las probetas ensayadas: carga de rotura, desplazamiento máximo y duración del ensayo. ....                | 277 |
| Table 8.1. Dimensions of the samples (width x length x thickness). ....   | 294 |
| Table 8.2. AE acquisition parameters. ....  | 296 |
| Table 8.3. DIC configuration parameters. ....   | 297 |
| Table 8.4. Maximum stress and displacement for each sample, mean stress for each kind of sample and % of variation compared to the UT0_NF maximum stress. ....          | 298 |
| Table 8.5. % of stress at the transitions between periods T1-T2 and T2-T3 and the stress where the dispersion of the strain exceedance normalized became very low. .... | 321 |
| Table 9.1. Mechanical properties of steel-to-concrete bond. ....  | 336 |



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Motivación y estado del arte

Actualmente el desarrollo de métodos para la evaluación continua de estructuras (*Structural Health Monitoring*, SHM) y la creación de estructuras inteligentes (*Smart Structures*) en el ámbito de la construcción y la ingeniería civil es un reto constante. En este contexto, los métodos de ensayos no destructivos (END) y en particular los métodos vibro-acústicos juegan un papel preponderante.

Todos los ensayos no destructivos están basados en principios físicos, es decir, se fundamentan en la determinación de alguna propiedad física del material o de su variación local. Sirven, por tanto, para medir de forma indirecta lo que no puede ser medido por medidas directas, permiten caracterizar el estado y/o naturaleza de los materiales y poner de manifiesto sus discontinuidades. Es necesario destacar que hoy en día el despegue de un avión, la circulación de trenes de alta velocidad, la producción de coches seguros, la construcción de un puente o el funcionamiento de una planta industrial compleja no son posibles sin la asistencia de los END.

Las técnicas SHM se basan en la observación y evaluación continua en el tiempo de una estructura para determinar su estado de daño. Estas

observaciones se realizan mediante un conjunto de sensores situados sobre la estructura que adquieren los registros de las señales de excitación y de la respuesta dinámica de la estructura. De estos registros se extraen las características sensibles al daño y mediante un análisis estadístico es posible detectar la presencia de daño. Este proceso debe hacerse periódicamente dado el deterioro temporal de la estructura y del sistema de medida. En el desarrollo de los algoritmos de un sistema SHM se debe tener especial cuidado con las condiciones ambientales y de operatividad de la estructura para que no interfieran sobre las predicciones de daño.

La principal ventaja de las técnicas SHM sobre otras técnicas de monitorización de daño es que permiten un conocimiento rápido, en tiempo real, de la salud de una estructura tras un evento extremo como pueden ser fuertes vientos, explosiones o sismos, en el caso de edificios. En los últimos años han ido tomado relevancia los aspectos referentes a la instrumentación, la cantidad, tipo y ubicación de los sensores a la hora de aplicar las técnicas SHM [1].

Muchas de estas técnicas pueden tener mal desempeño en aplicaciones reales debido a las restricciones impuestas por los datos registrados, razón por la cual es importante determinar el número mínimo de sensores requeridos y determinar a priori su ubicación para que la aplicación final produzca resultados satisfactorios. Otro aspecto importante es el concerniente a una correcta selección de parámetros sensibles al daño. El nivel de sensibilidad de dichos parámetros en defectos pequeños es un aspecto que ha provocado controversia, lo cual es importante ya que el usuario final debe tener la plena confianza de si es posible reparar la estructura a tiempo. La posibilidad de utilizar las excitaciones naturales como vibraciones inducidas por el medio ambiente en lugar de excitar de forma artificial es otro aspecto muy investigado en la actualidad, especialmente para estructuras de gran envergadura y que requieren una evaluación durante largos periodos de tiempo como en el caso de puentes y plataformas de alta mar (*offshore*).

Los axiomas fundamentales que rigen las técnicas SHM establecidos en [1] son:

- *Axioma I:* Todos los materiales tienen defectos inherentes.
- *Axioma II:* Para evaluar un estado de daño se requiere hacer una comparación entre dos estados del sistema.
- *Axioma III:* La identificación del daño y su localización pueden hacerse en modo de aprendizaje no supervisado. La identificación del tipo de daño y su magnitud requieren de un aprendizaje supervisado.
- *Axioma IVa:* Los sensores por si solos no pueden medir el daño, sino que se requiere un procesamiento de señales para la extracción de características y un proceso de clasificación estadística para que los datos de los sensores permitan extraer información sobre los daños.
- *Axioma IVb:* Las características seleccionadas deben ser sensibles al daño y robustas frente a los cambios en de las condiciones operacionales y ambientales de la estructura.
- *Axioma V:* Los requerimientos de un sistema SHM son específicos para cada estructura y dependen de la escala y longitud de tiempo con que se prevé el inicio y evolución del daño.
- *Axioma VI:* Es deseable que los algoritmos del sistema de SHM desarrollado tengan la mayor sensibilidad al daño posible y aun así sean robustos ante el ruido, aunque estas dos características se contrarrestan mutuamente.
- *Axioma VII:* Los rangos de frecuencia con que se debe excitar el sistema son inversamente proporcionales a la magnitud de los daños que se pueden detectar. Cuanto más pequeños sean los daños que se desean detectar, más alta debe ser la frecuencia a la que se debe excitar al sistema.

Los elementos fundamentales que componen un sistema de SHM según [1] son: la estructura o sistema a inspeccionar, el conjunto de sensores (que dependen de la variable o característica física sensible al daño que se desea medir), los sistemas de adquisición, transferencia, almacenamiento y gestión de los datos y finalmente los algoritmos desarrollados para la interpretación y diagnóstico.

Hay cinco niveles dentro del proceso completo de detección de daño SHM que responden a las siguientes cinco preguntas [1]:

- *Nivel 1:* Identificación de la existencia del daño. ¿Hay daños en el sistema?
- *Nivel 2:* Identificación la localización del daño. Si hay daño, ¿dónde está?
- *Nivel 3:* Identificación del tipo daño. ¿Qué tipo de daño es?
- *Nivel 4:* Identificación de la magnitud del daño. ¿Cómo de grave es el daño?
- *Nivel 5:* Realización de un pronóstico de la vida útil de la estructura. ¿Cuánto tiempo le queda?

Esta Tesis Doctoral se centra en la aplicación experimental de dos métodos vibro-acústicos, vibraciones y emisión acústica, a la evaluación de daño en tres escenarios diferentes en el ámbito de la construcción y de la ingeniería civil.

En primer lugar (**Parte A**) se aborda la aplicación del método de vibraciones para la evaluación de daño en disipadores de energía histeréticos WPD usados como elementos de protección sísmica de edificios.

Aunque el desarrollo y aplicación de disipadores de energía es un tema en el que se lleva investigando desde hace varias décadas en el mundo, la posibilidad de incluir en el disipador un sistema de sensorización sencillo y económico que permita diagnosticar de forma automática su nivel de daño tras un terremoto es

totalmente novedoso. No se conoce ninguna investigación en este sentido, ni a nivel nacional ni en el extranjero, excepto las realizadas por el grupo de investigación en el que se realiza esta Tesis.

En las últimas décadas, los sistemas de control pasivo se han hecho populares como herramienta para proteger edificios frente a terremotos y limitar los daños de la estructura principal. Una estructura típica de un edificio con sistemas de control pasivo consiste en la estructura principal y una serie de dispositivos especiales para disipar la energía (EDD), también llamados disipadores, cuya función principal es disipar la mayor parte de la energía introducida por el sismo. Uno de los tipos más comunes de EDD son los disipadores histeréticos que se basan en la disipación mediante la deformación plástica del metal. En esta Tesis se estudian los disipadores histeréticos WPD (*Web Plastifying Damper*), desarrollados y patentados en la Universidad de Granada por el equipo del Dr. Amadeo Benavent, que se caracterizan por su bajo coste y facilidad de instalación, especialmente en estructuras ya construidas. Están formados por secciones de perfiles I de acero instalados en una estructura auxiliar y colocados diagonalmente en la estructura principal del edificio. La energía es disipada mediante las deformaciones plásticas del alma de la sección de acero cuando la estructura es sometida a cargas sísmicas [2-5].

En el caso de los disipadores de energía instalados en una construcción, éstos se sustituyen después de un terremoto que se considere moderado/severo porque no es posible conocer el estado de daño del mismo visualmente. A lo largo de su vida útil, un edificio equipado con disipadores puede verse sometido a más de un terremoto de mediana intensidad. Es muy poco probable que sismos de moderada severidad agoten la capacidad del disipador ya que ésta suele ser muy elevada, y por lo tanto no sería necesario sustituirlos si se pudiese conocer con fiabilidad su nivel de daño. El poder predecir de forma fiable el nivel de daño en un disipador tras un terremoto severo permite decidir si es necesario sustituirlo o no, y puede tener unas implicaciones económicas importantes en términos de costes de reparación y de interrupción de las actividades del edificio.

Además, implica un uso injustificado de recursos naturales que va en contra de los criterios de sostenibilidad.

Investigaciones previas han demostrado que el nivel de daño y la proximidad al fallo de los disipadores histeréticos sometidos a cargas cíclicas arbitrarias puede ser estimado mediante la descomposición de las curvas fuerza-desplazamiento soportadas por el disipador en las partes denominadas de esqueleto y Bauschinger [2]. Esta descomposición es la base de un índice de daño mecánico llamado ID, extensamente validado en ensayos estáticos y dinámicos [3, 6, 7]. Este índice presenta el inconveniente de que la fuerza y el desplazamiento deben ser registrados durante el terremoto, lo que conlleva la instalación de instrumentación muy costosa, como células de carga, galgas extensiométricas y transductores de desplazamiento. Además, es difícil de justificar esta instrumentación cuando la probabilidad de ocurrencia de un terremoto es muy baja.

El conocimiento del nivel de daño de un disipador requiere la aplicación de métodos SHM eficientes y el uso de algoritmos y equipos efectivos. En general, los principales requerimientos pueden ser: 1) algoritmos fiables para evaluar el nivel de daño; 2) instrumentación no costosa; 3) evaluación en tiempo real; 4) fácil instalación y mantenimiento. Actualmente, estos requerimientos son comunes a otras aplicaciones como industria aeroespacial, plantas de producción de energía, estructuras de ingeniería civil, etc. [8-10].

El método de vibraciones, como aplicación para realizar la evaluación de daño, presenta una alternativa a la problemática presentada por el índice mecánico mediante el uso de sensores piezocerámicos permanentemente colocados en el disipador [4, 6, 11, 12]. Los sensores piezocerámicos son dispositivos de bajo coste que pueden tanto excitar como medir la respuesta vibracional del elemento o estructura cuya salud se quiere conocer.

La detección de daño basada en vibraciones se basa fundamentalmente en el principio físico de que los cambios en las propiedades físicas de la estructura

producen cambios en la respuesta vibracional del sistema [13-16]. El daño debido a las deformaciones plásticas induce cambios en la respuesta de la estructura ante un ensayo de vibraciones (frecuencias de resonancia, modos, coeficientes de amortiguamiento, etc.) que puede ser evaluados a través de un procesamiento apropiado de las señales y correlacionados con la presencia de daño (nivel 1 de SHM), la posición (nivel 2 de SHM) y la intensidad (nivel 3 de SHM). Existen trabajos publicados que aplican el análisis de vibraciones para la detección de daño en estructuras y materiales [10, 17] pero ninguno de ellos aplicado a la evaluación de daño en disipadores histeréticos, ni comparando y correlacionando los resultados con índices de daño mecánico.

En el grupo de investigación se desarrolló previamente un índice de daño basado en un algoritmo no paramétrico en el dominio de la frecuencia (ADI, *Area Damage Index*) [4, 6, 11, 12] con una muy buena correlación con el nivel de plastificación de los disipadores, evaluado mecánicamente con el llamado índice ID [2, 3]. En ensayos de laboratorio se pueden utilizar equipos de medida electrónicos con altos requerimientos. Sin embargo, para realizar la implementación práctica en campo es necesaria una optimización de los recursos electrónicos y computacionales [18-23]. Básicamente la idea es diseñar disipadores inteligentes con un sistema integrado piezoeléctrico de actuador y sensor que después del análisis de la señal proporcione una evaluación del daño, convirtiendo un sistema con equipamiento caro y especializado solo disponible en laboratorio en una aplicación comercial con uso en edificios reales con disipadores de energía.

Por otra parte, el algoritmo de obtención del índice ADI es de tipo entrada-salida, por lo que es necesario tener la información sobre la excitación empleada durante el ensayo. Con el objetivo de encontrar un algoritmo para la obtención del nivel de daño basado solo en la salida del sistema se ha investigado la transformada wavelet. Se presenta como una herramienta excelente de análisis de señales que ha sido ampliamente usada para la detección de daño estructural [24-33]. Básicamente, mediante la descomposición wavelet de la señal en el

dominio tiempo-frecuencia, es posible observar la variabilidad de la señal y su variación a lo largo del tiempo. Especialmente, los investigadores han intentado desarrollar aproximaciones para proporcionar suficiente fiabilidad para la detección de daños pequeños. Resultados previos han demostrado que la energía de las señales descompuestas siguiendo el análisis del paquete wavelet presenta una mayor sensibilidad para daños pequeños [26-28]. La descomposición del paquete wavelet es un modo efectivo de buscar en todo el ancho de bandas de frecuencia los pequeños cambios de la señal inducidos por el daño.

Se ha estudiado también el concepto de entropía wavelet, que es una combinación de la descomposición wavelet y las teorías estadísticas relacionadas con la entropía [34]. La entropía wavelet está siendo gradualmente más usada en múltiples y variadas aplicaciones como medicina, detección de vibraciones en maquinaria, diagnóstico de fallos en sistemas y otras aplicaciones [35-38]. La entropía espectral se presenta como una medida del grado de concentración o dispersión del espectro de una señal [39, 40].

Una vez obtenidos varios índices de daño usando la misma señal de entrada, se puede implementar un clasificador de daño que permite decidir automáticamente el nivel de daño del disipador mediante el uso de una base de datos existentes con valores de los índices de daños desarrollados [2, 4, 5, 9].

En segundo lugar (**Parte B**) se aborda la evaluación de daño en materiales compuestos de fibra de carbono (CFRP), de uso creciente en la construcción como elementos de refuerzo de estructuras de hormigón armado y de madera, para rehabilitación y obras de nueva planta. Las características del CFRP como su alta relación resistencia-peso, la excelente tolerancia a la corrosión y la fatiga, la resistencia al calor y sus características controladas han permitido su uso extensivo en una gran variedad de aplicaciones. Es bien conocido que el daño en las estructuras de CFRP se produce de forma temprana durante el servicio y que se acumula continuamente durante su vida útil [41-43]. Por esta razón, la monitorización de sus condiciones con métodos no destructivos y los modelos de daño son totalmente necesarios para predecir un fallo catastrófico de la

estructura y actuar con medidas preventivas. El método de EA es un candidato excelente para la monitorización en tiempo real de las estructuras de CFRP porque puede suministrar información sobre la progresión del daño en tiempo real [44-51]. Existen otros métodos END pero son menos adecuados para la monitorización de estructuras en servicio porque requieren un estímulo externo [52].

Existen varias contribuciones que correlacionan los parámetros tradicionales de las señales de EA con los mecanismos específicos de daño que ocurren en el CFRP: rotura de fibra, delaminaciones, micro-rotura de matriz, separación entre la matriz y las fibras y arrancamiento de fibra [53]. En general, la interpretación de los datos de EA puede ser difícil cuando los parámetros a considerar están afectados por los múltiples efectos de la propagación tales como reflexiones, atenuación, conversión de modos o dispersión. Existen técnicas avanzadas para este propósito como el análisis de Fourier [54], transformada wavelet [55-57], reconocimiento de patrones [58] o redes neuronales [59], pero su aplicación práctica es aún limitada.

Desde 1990 se han desarrollado técnicas alternativas para proporcionar una mejor comprensión de la EA que incluye la emisión acústica modal (MAE) [60-62]. Es bien conocido que las ondas de EA se propagan en una estructura en diferentes modos. La separación de estos modos durante la adquisición y/o durante el análisis posterior permite extraer información sobre el mecanismo de daño. En este contexto, las ondas de Lamb ofrecen una buena aproximación para la caracterización de los mecanismos de daño en CFRP [63-67]. La teoría de placas establece que las ondas de EA se propagan en placas en dos modos principales, el modo simétrico (S0) y el modo antisimétrico (A0) [68-73]. La separación de los modos supone un problema aún mayor en aplicaciones reales, debido a reflexiones y otros efectos físicos como dispersión, atenuación e interferencias constructivas/destructivas.

La delaminación, normalmente debida a impactos, constituye un daño interno crítico en materiales compuestos laminados, no detectable mediante una

inspección visual [43, 63-67, 74]. Su detección durante el servicio de las estructuras es un reto atractivo y aun sin resolver. El fallo por delaminación en laminados está comúnmente asociado con la producción de desplazamientos mecánicos de micro-pulsos fuera del plano (OP), es decir, movimientos perpendiculares al plano medio de la placa. Por otro lado, la micro-rotura de matriz y la rotura de fibra puede producir micro-pulsos en el plano (IP), es decir, movimientos en el plano de la placa y simétricos respecto del plano medio [44, 60-79]. Se ha verificado que el modo A0 está favorecido por las excitaciones OP mientras que el modo S0 está favorecido por excitaciones IP.

El uso de sensores de fibra óptica insertados en los materiales (FBG) es una de las estrategias de sensorización más prometedoras debido a su pequeño tamaño, su peso ligero, su inmunidad a las interferencias electromagnéticas y la alta tolerancia a los ruidos en vuelo [80]. Esta fibra óptica se puede usar como sensor para medir concentración de tensiones, microdesplazamientos o como sensores de emisión acústica. Existen numerosos estudios que han utilizado métodos para evaluar diferentes tipos de daño considerando cambios en la propagación de las ondas elásticas y/o las frecuencias propias [81-83]. Actualmente, es posible insertar la fibra óptica dentro del propio material CFRP durante el proceso de fabricación.

La presencia de inhomogeneidades locales como la presencia de la FBG puede producir concentraciones locales de tensiones que deben ser investigadas. Es necesario conocer si la FBG genera una debilidad en el área cercana acelerando el inicio del daño y el fallo del material. El método de EA y la correlación digital de imágenes (DIC) presentan unas excelentes características para este fin.

La aplicabilidad del método de EA para monitorización del daño está completamente comprobada y el análisis de la actividad de EA permite analizar la ocurrencia del primer daño, así como su evolución a lo largo del tiempo. El método DIC permite conocer la distribución y evolución espacio-temporal del campo de deformaciones del elemento medido. Este método es bastante

novedoso y se ha demostrado que, bajo ciertas condiciones, permite apreciar los distintos daños en el CFRP. No se han encontrado referencias de su aplicación en el campo de las fibras ópticas insertadas en el CFRP. La aplicación conjunta de estos dos métodos permite la comparación de la actividad de EA con los campos de deformaciones 3D experimentados por el material para investigar la influencia de la fibra óptica insertada, consiguiendo así analizar la ocurrencia del primer daño, su evolución y las diferentes etapas del daño.

En la última parte de la tesis (**Parte C**) se ha abordado el estudio de la adherencia hormigón-refuerzo de acero. Este fenómeno, que permite la transferencia de las fuerzas longitudinales del acero al hormigón que lo rodea, es un aspecto clave para la eficiencia mecánica de estructuras de hormigón armado. Este tema se ha investigado en los últimos 30 años [84-86] y se ha establecido que los mecanismos de interacción acero-hormigón se pueden dividir en cuatro etapas [87, 88], en las que la adherencia está asegurada por diferentes mecanismos que actúan secuencialmente: primero la adhesión química, después el efecto de la corruga del acero y la interacción acero-hormigón y finalmente la fricción hormigón-hormigón. La adherencia entre el hormigón y el refuerzo de acero ha sido estudiada en los aspectos relacionados con la corrosión [89, 90]. Es conocido que el uso de acero galvanizado como refuerzo mejora la durabilidad de las estructuras de hormigón armado en ambientes agresivos. Sin embargo, la resistencia a arrancamiento es menor en aceros galvanizados que en aceros dulces.

En este caso se ha utilizado el método de emisión acústica como base física para auscultar el proceso y estudiar la diferencia de comportamiento entre el acero dulce y el acero galvanizado. La eficacia del método de EA para monitorizar y estudiar el comportamiento del hormigón armado está suficientemente probado [88, 91-95]. Existen publicaciones recientes que estudian el fenómeno de la adherencia hormigón-acero en ensayos de arrancamiento (*pull-out*) [88, 92, 93, 96]. Aunque este tipo de ensayos no representan las condiciones reales de carga, especialmente en vigas, sirve como base para la comparación

entre diferentes parámetros [90]. En particular, mediante ensayos de arrancamiento se ha comparado la adherencia de dos tipos de acero; acero galvanizado, el cual mejora la durabilidad de las estructuras de hormigón armado en ambientes corrosivos, y acero desnudo convencional.

Existen trabajos que estudian la adherencia entre estos dos materiales comparando los resultados mecánicos y los resultados obtenidos con el método de EA obtenidos en ensayos monótonos y cíclicos [92, 93]. Cabe destacar el estudio realizado en la Universidad de Stuttgart y el Otto-Graf-Institute por C.U. Grosse y sus colaboradores en ensayos e interpretación de resultados de EA [92].

## 1.2. Objetivos

Esta tesis se centra en el desarrollo de métodos de evaluación de distintos materiales de uso en construcción e ingeniería civil y presenta una fuerte componente experimental. Siguiendo esta idea vertebradora, la tesis se divide en tres partes diferenciadas cuyos objetivos se exponen a continuación.

### Parte A.- Evaluación de daño en disipadores WPD.

- Mejora y optimización del índice de daño *Area Damage Index* (ADI) propuesto anteriormente por el grupo de investigación.
- Desarrollo y cálculo de nuevos índices de daño basados en la aplicación de la transformada wavelet y su comparación con el índice de daño mecánico ID, ampliamente validado.
- Desarrollo y aplicación de un clasificador de daño que, para una misma señal obtenida en el ensayo de vibraciones, compare los distintos índices de daño que se desarrollen y determine el nivel de daño de la sección en estudio.

**Parte B.- Evaluación de daño en material compuesto de fibra de carbono (CFRP).** En esta parte se distinguen dos aplicaciones. Los objetivos establecidos respecto a la discriminación de mecanismos de daño son:

- Detectar los modos  $S_0$  y  $A_0$  de las ondas de Lamb de EA y realizar una separación de los mismos.
- Asociar dichos modos con los mecanismos de daño.
- Realizar un algoritmo para clasificar las señales de EA en tres tipos, asociados con los mecanismos de daño clásicos del material compuesto: delaminación, microfisuración de matriz y rotura de fibra.

Los objetivos establecidos en el estudio de la influencia de una fibra óptica insertada en un laminado de CFRP son:

- Estudiar la influencia de una fibra óptica insertada en CFRP en sus propiedades mecánicas.
- Estudiar la aplicabilidad del método DIC a la detección de daño producido por la fibra óptica insertada.
- Estudiar y comparar la concentración de tensiones vistas con el DIC y la actividad de EA para analizar la ocurrencia del primer daño y su evolución.

**Parte C.- Evaluación de adherencia hormigón-acero galvanizado en ensayos de arrancamiento mediante el uso de la emisión acústica.**

- Comparar la diferencia de adherencia entre el hormigón y el acero galvanizado y el acero dulce, considerando los resultados mecánicos y resultados de la emisión acústica.
- Estudiar la diferencia de comportamiento en el ensayo de arrancamiento entre los dos tipos de acero al considerar diferentes edades del hormigón.

### 1.3. Marco de la investigación

Esta Tesis Doctoral se ha financiado mediante el Programa de Formación del Profesorado Universitario (FPU) del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España (AP2012-3882) durante el periodo 2013-2017. Ha formado parte del Proyecto de Excelencia P07-TEP-02610 denominado “Desarrollo e implementación de la tecnología de los disipadores de energía aplicada al control del daño en construcciones sometidas a terremotos, y su evaluación mediante técnicas avanzadas de tratamiento de señales” (DIDETS), cuyo investigador principal es el Dr. Amadeo Benavent-Climent, y en el que participa también el Dr. Antolino Gallego Molina. También ha formado parte del proyecto “Desarrollo de paneles con tecnologías de sensores y cableado integrado” dentro del proyecto FEDER INTERCONECTA “Desarrollo de secciones de fuselaje para operaciones de transporte militar y asistencia – DESAFIO” siendo representante del consorcio la empresa EADS-Construcciones Aeronáuticas S.A. e investigador principal el Dr. Antolino Gallego Molina.

### 1.4. Estructura de la Tesis Doctoral

Esta Tesis Doctoral se divide en tres partes, en las que se estudia la evaluación de daño en tres materiales y escenarios diferentes, y en diez capítulos.

En el **Capítulo 1** se exponen la motivación y el estado del arte, los objetivos, el marco de la investigación y la explicación de la estructura de la Tesis Doctoral.

El **Capítulo 2** está dedicado a los métodos de inspección aplicados. Se presentan conceptos sobre los métodos de ensayos no destructivos y una explicación detallada de los métodos vibro-acústicos utilizados: el método de emisión acústica y el método de vibraciones. Además, se presenta el método de correlación digital de imágenes.

La **parte A** engloba la evaluación de daño en disipadores WPD realizada mediante el ensayo de vibraciones. Incluye los Capítulos 3, 4 y 5.

El **Capítulo 3** presenta una descripción de los sistemas de control estructural centrado en los disipadores de tipo histerético. También se describe el disipador histerético WPD, su fabricación, instalación, sus ventajas y sus inconvenientes.

El **Capítulo 4** expone la monitorización de daño mediante ensayos de vibraciones realizada en los disipadores WPD, indicando el sistema de instrumentación utilizado, el sistema de medida y el tipo de excitación utilizada. Se describen también los experimentos sísmicos y los especímenes de hormigón armado ensayados en la mesa sísmica de 3x3 m<sup>2</sup> del Laboratorio de Dinámica de Estructuras de la Universidad de Granada.

En el **Capítulo 5** se presentan los diferentes índices de daño utilizados y los resultados obtenidos. Se define el índice de daño mecánico (ID). Se explican los tres índices de daño desarrollados basados en el ensayo de vibraciones: ADI, WER y RWEE y se muestran los resultados obtenidos y su comparación con el índice de daño mecánico. Además, se explica un clasificador de daño basado en el algoritmo de los  $k$  vecinos más cercanos (kNN) utilizando la base de datos de los tres índices de daño calculados.

La **Parte B** se centra en la evaluación de daño en materiales compuestos de fibra de carbono (CFRP) y se divide en dos capítulos: Capítulos 6 y 7.

El **Capítulo 6** expone las hipótesis de partida que asocian los mecanismos de daño y los modos de ondas de Lamb. A continuación, se describe la placa utilizada y los ensayos realizados para detectar los diferentes modos. Se describe detalladamente el algoritmo propuesto para la discriminación de eventos OP e IP y los ensayos realizados, tanto de fuentes H-N como de mecanismos de daño individuales y se definen los parámetros necesarios para la descripción del algoritmo de discriminación de mecanismos de daño.

El **Capítulo 7** muestra los resultados y la discusión del algoritmo propuesto en el Capítulo 6 aplicado a ensayos de mecanismos de daño individuales y a ensayos de flexión a tres puntos realizados en probetas sin delaminación y con delaminación previa de dos tamaños diferentes.

En el **Capítulo 8** se presenta el estudio de la influencia de una fibra óptica insertada en probetas de CFRP unidireccional, analizando los resultados mecánicos y comparando los resultados de EA con la concentración de deformaciones vistas con el método DIC.

La **Parte C** se dedica a la evaluación de la adherencia entre el hormigón y el acero galvanizado con ensayos de arrancamiento mediante el uso de EA.

El **Capítulo 9** desarrolla este estudio para aclarar las diferencias entre el acero galvanizado y el acero dulce según la adherencia con el hormigón mediante el uso del método de EA. Las diferencias se identifican en términos de las curvas carga-desplazamiento y la actividad de EA registrada durante los ensayos de arrancamiento. Se comparan dos tipos de acero y cinco edades diferentes del hormigón.

En el **Capítulo 10** se exponen las conclusiones de esta Tesis Doctoral.

Finalmente se incluye una sección con las referencias bibliográficas citadas en esta Tesis.

## 2. MÉTODOS DE INSPECCIÓN

### 2.1. Métodos de ensayos no destructivos

Se entiende por ensayo no destructivo (END) la prueba que proporciona información acerca del objeto ensayado sin que éste experimente ningún deterioro, tanto durante el ensayo como al finalizar éste. Por tanto, los END son aplicables en cualquier fase del proceso productivo, incluso durante la vida útil del componente o pieza a ensayar.

Todos los ensayos no destructivos están basados en principios físicos, es decir, se fundamentan en la determinación de alguna propiedad física del material o de su variación local. Sirven, por tanto, para medir de forma indirecta lo que no puede ser medido por medidas directas, permiten caracterizar el estado y/o naturaleza de los materiales y poner de manifiesto sus discontinuidades.

En cuanto a sus aplicaciones, los ensayos no destructivos cubren, en general, tres amplias áreas:

- a) Defectología: detección de heterogeneidades, discontinuidades, posibles fallos durante el servicio, etc. El conocimiento del origen de un defecto es muy importante para llevar a cabo acciones correctivas en todos los campos relacionados: ingeniería, fabricación, uso y servicio.

b) Caracterización de los materiales: identificación de sus propiedades y del grado de fiabilidad de los mismos; características químicas, estructurales, mecánicas, etc. Las propiedades de los materiales pueden evaluarse en ciertos casos por métodos de END; no obstante, se debe tener en cuenta que los END son métodos comparativos y hay que comprobar si se requieren valores absolutos.

c) Metrología: el control dimensional garantiza que los equipos estén completos, sean dimensional y geoméricamente correctos y estén montados en el orden establecido.

Dado que estos métodos permiten la inspección del 100% de una pieza o una producción, contribuyen a mantener un nivel de calidad uniforme en el producto y en la producción. Pero, además, aplicados a operaciones de mantenimiento de los sistemas a lo largo de su servicio, contribuyen a asegurar su calidad funcional y colaboran en la prevención de accidentes.

Las etapas básicas de la inspección de un material, elemento, etc., mediante los métodos de ensayos no destructivos son los siguientes:

a) Elección del método y las técnicas adecuadas de ensayo, teniendo en cuenta la naturaleza del material, su estado estructural y la forma del producto, así como conocer el tipo de heterogeneidades que se pretenden detectar. Es necesario conocer las limitaciones de interpretación y la sensibilidad de cada método.

b) Obtención de las indicaciones. Una característica común de los métodos de END es que siguen procedimientos indirectos, esto es, que determinan la característica buscada en el producto a través de cualquier otra propiedad relacionada con ella.

c) Interpretación de la indicación. Una vez obtenida la indicación, es preciso interpretarla, es decir, establecer la correlación entre la indicación

observada con su propia naturaleza, morfología, situación, orientación y tamaño.

d) Evaluación. Por último, después de obtenida e interpretada la indicación, se deberá evaluar, o lo que es lo mismo, tomar la decisión sobre cuando una heterogeneidad es aceptable o no.

Es necesario destacar que hoy en día el despegue de un avión, la circulación de trenes de alta velocidad, la producción de coches seguros, la construcción de un puente o el funcionamiento de una planta industrial compleja no son posibles sin la asistencia de los END.

En este Capítulo se explican tres métodos de END: el método de emisión acústica, el método de vibraciones y la correlación digital de imágenes.

## **2.2. El método de emisión acústica**

### **2.2.1. Definición y fundamentos físicos del método**

Desde el punto de vista del proceso físico, la emisión acústica (EA) consiste en la liberación espontánea de energía de los materiales cuando se someten a cambios en el campo de deformaciones [97]. Formalmente definida, según las normas EN 13554 [98] y ASTM E1316-2010 [99], la EA comprende la clase de fenómenos en los que ondas elásticas transitorias son generadas por la rápida liberación de energía dentro del material. La Figura 2.1 ilustra la generación de una onda de EA por una fuente (fuente de EA) producida al someter el material a un esfuerzo. Las ondas elásticas se propagan dentro del material y, eventualmente, alcanzan la superficie del mismo, produciendo pequeños desplazamientos temporales de su superficie.

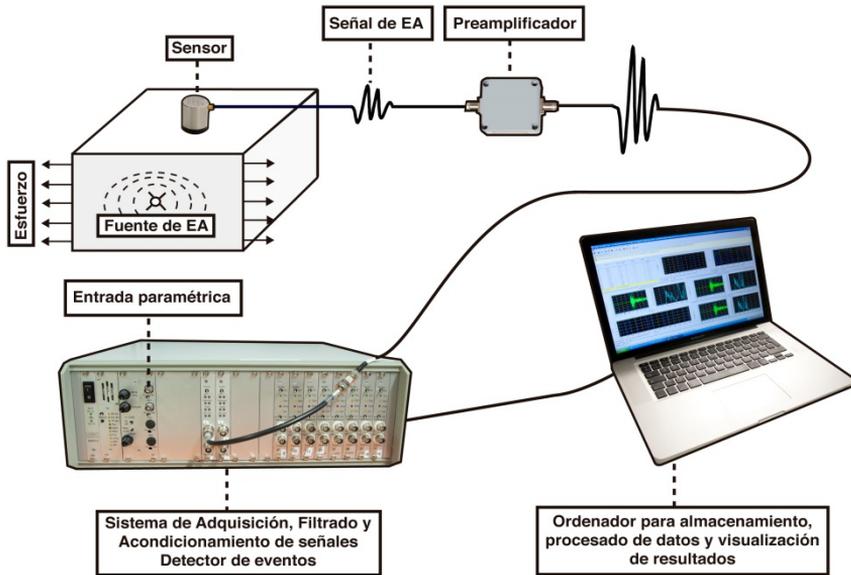


Figura 2.1. Fuente de EA generando una onda de EA por una tensión del material. Cadena del proceso de EA: sensor, señal de EA, preamplificador, sistema de adquisición y ordenador.

El proceso físico es básicamente el siguiente. Cuando se aplica una fuerza externa a un material sólido, el material se deforma. En el caso en que se aplique una carga pequeña, la deformación será pequeña y estará en el rango elástico, con lo que este recuperará su forma original si se elimina la carga aplicada (Figura 2.2-a). En este rango elástico, la fuerza aplicada permite que el material acumule energía en forma de energía de deformación.

Sin embargo, existe un límite de acumulación de energía en el material. Si la energía de deformación almacenada en el material debido a la fuerza externa alcanza dicho límite, esta se libera y como consecuencia aparece deformación plástica en el material. Es decir, incluso cuando el material se descarga, este no puede recuperar su forma original (Figura 2.2-b). Si además se aplica una fuerza mayor, usualmente aparecen fracturas en el material (Figura 2.2-c). Tanto cuando el material se deforma plásticamente o se fractura, este consume energía de deformación. La mayoría de dicha energía se libera para formar dichas fracturas, en forma de calor, o en forma de onda elástica, constituyendo así la onda de emisión acústica.

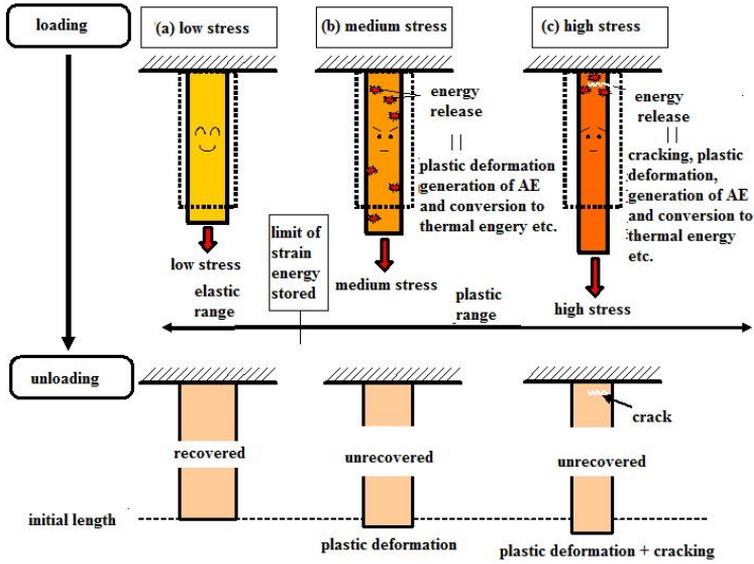


Figura 2.2. Generación de emisión acústica debido a la liberación de energía de deformación [100].

En algunos casos es posible detectar estas ondas elásticas emitidas sin más que escuchar el sonido emitido por ellas. Este es el caso de la rotura de materiales tan comunes como el papel, el vidrio, la madera, el maclado del estaño (grito del estaño), etc. Estos serían ejemplos del fenómeno de la EA dentro del rango de frecuencias audibles (20-20.000 Hz). Véanse las fotografías de la Figura 2.3.

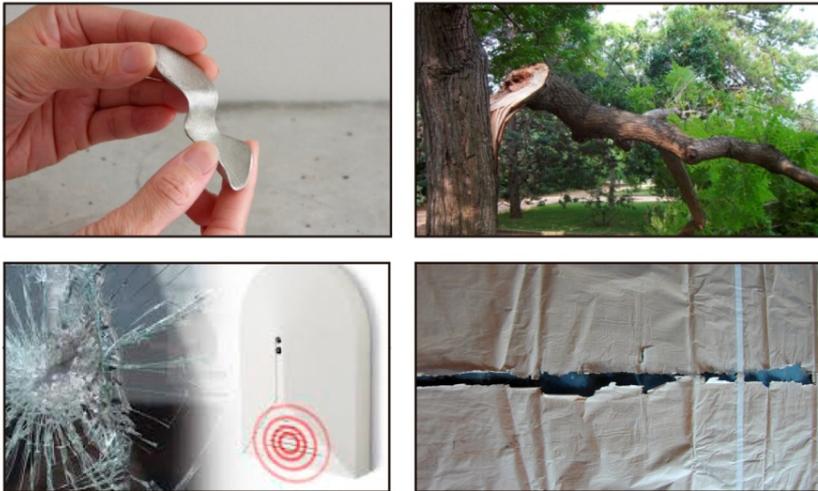


Figura 2.3. Materiales comunes que emiten EA al someterlos a estímulos mecánicos: deformación plástica del estaño, caída de árboles, rotura de vidrio o papel.

Sin embargo, en muchas otras ocasiones esto no es posible, ya que o bien la intensidad de las ondas elásticas generadas es muy débil (por debajo del umbral de audición), o bien, porque su frecuencia está fuera del rango audible de frecuencias, o por ambos factores a la vez. Esto es lo que ocurre en la mayoría de las aplicaciones de la EA como método de ensayos no destructivos (END), en las cuales la emisión ocurre con amplitudes muy pequeñas y frecuencias superiores a 20 kHz, es decir, en el rango de los ultrasonidos. En estos casos, para poder detectar las ondas elásticas, registrarlas, procesarlas y mostrarlas en formatos adecuados para su análisis y visualización, es necesario disponer de un dispositivo denominado sistema de EA, que no es más que una sucesión de diversos pasos denominados en su conjunto como cadena del proceso de EA (Figura 2.1).

El fenómeno físico de la EA es la base del método de END denominado **Método de Emisión Acústica**, o en inglés *Acoustic Emission Testing* (AT), reconocido por su elevada capacidad para monitorización de la integridad estructural en tiempo real, para detectar la aparición de defectos y fallos incipientes en equipamiento mecánico, así como para la caracterización de

materiales. Las aplicaciones de la EA al campo de las estructuras de ingeniería se han documentado desde los años 60.

El fundamento físico del método es el siguiente. El fallo de los materiales y estructuras no ocurre inmediatamente, sino generalmente comienza a nivel microscópico, llegándose al fallo final tras una larga acumulación de fracturas a nivel microscópico. AT es un método que sirve para monitorizar o medir este proceso hasta el final del fallo. En otras palabras, detectando la EA en la fase inicial de la generación y crecimiento de fracturas (fases en las que dichos daños son aun reparables), se puede detener el proceso de operación de dicho material o estructura y ensayarla mediante AT para evitar su fallo final último. Es por esto por lo que AT es considerado un método END.

Este método, a diferencia del método de UT (ultrasonidos), es pasivo, en el sentido de que no hay que excitar el elemento de ensayo con ninguna onda, sino solamente recibir las ondas elásticas que éste emite cuando se somete a esfuerzos (Figura 2.4). En este sentido, el método de EA difiere de otros métodos en dos aspectos fundamentales:

- La onda de EA se origina en el elemento inspeccionado;
- Detecta movimientos en tiempo real (procesos dinámicos), y no discontinuidades geométricas sin movimiento o avance, previamente existentes en el material. La evolución de grietas y la deformación plástica de materiales son fuentes tradicionales y muy importantes de ondas de EA.

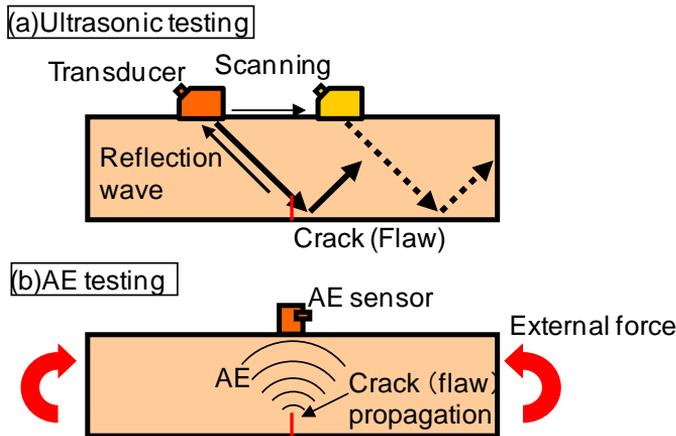


Figura 2.4. Comparación de los métodos UT (a) y AT (b) [100].

Se trata de una tecnología con un tremendo potencial de uso en un amplio rango de aplicaciones en el ámbito de los END, entre las que se pueden citar:

- Diagnóstico de vasijas de presión y tanques de almacenamiento;
- Reactores nucleares;
- Componentes sometidos a fuerte tensión mecánica o estructuras completas de materiales compuestos o plásticos reforzados con fibras, como es el caso de la industria aeronáutica y más recientemente la ingeniería civil;
- Monitorización de estructuras de construcción e ingeniería civil, especialmente en materiales con base hormigón y acero en puentes;
- Investigación de las propiedades de materiales. Mecanismos de fallo y comportamiento frente al daño;
- Control e inspección de calidad de diferentes procesos, como por ejemplo soldadura, secado de madera, inspección de componentes cerámicos, inspección de recubrimientos, etc.;

- Detección de fugas y localización de las mismas en tiempo real, desde pequeñas válvulas hasta fondos de grandes tanques, o tuberías enterradas;
- Investigación geológica y macrosísmica;
- Detección y localización de descargas de alto voltaje en grandes transformadores;
- Desgaste de herramientas de corte;
- Detección de xilófagos (termitas) en maderas;
- Diagnóstico de obras de arte y patrimonio cultural;
- Biomedicina. Monitorización de huesos humanos.

Como método de END su utilización industrial más difundida es la detección y ubicación de grietas en estructuras bajo carga, así como la detección de corrosión y fugas en estructuras que contienen líquidos. La Figura 2.5 ilustra mediante fotografías algunas de estas aplicaciones.

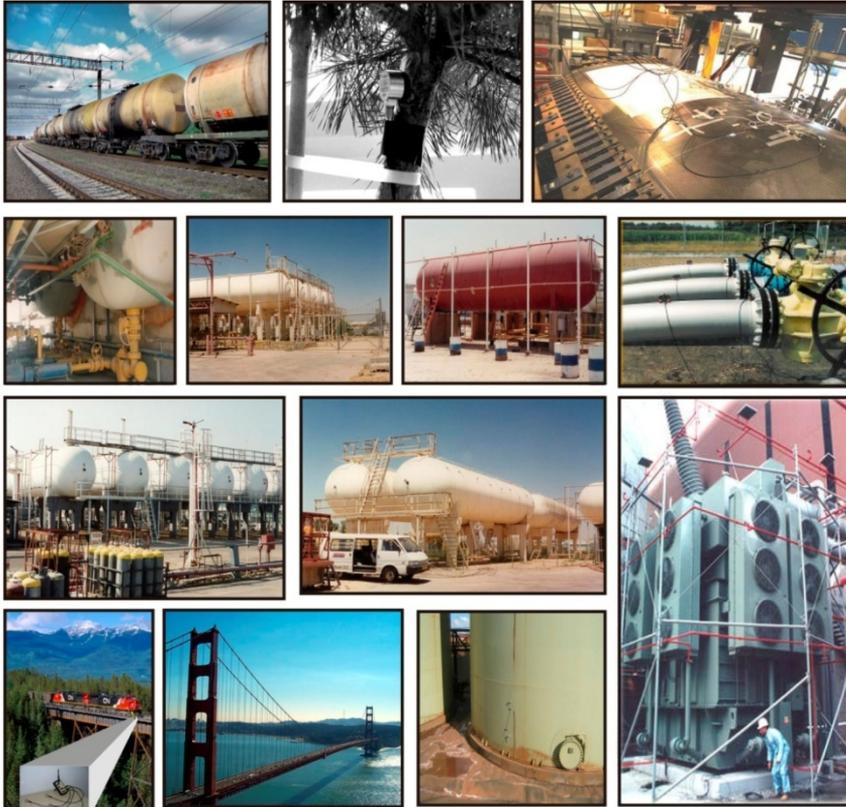


Figura 2.5. Diversas aplicaciones del método de EA.

Hay un amplio rango de posibles fuentes de eventos de EA, siendo las más importantes las siguientes:

- Degradación de materiales y procesos de fallo, tales como crecimiento de grietas, deformaciones, formación de huecos, fallo en las interfases, corrosión, fracturas de segunda fase, descohesión fibra/matriz en materiales compuestos. Estas fuentes son generalmente irreversibles, y, a menudo, se les denominan **eventos primarios de EA**;
- Procesos tribológicos, especialmente fricción entre superficies, rascado entre las caras de una fractura, cohesión y descohesión de productos de corrosión, fugas de líquidos o gases, procesos de soldadura, detección de piezas sueltas, descargas parciales en transformadores de alta tensión,

etc. Estos son reversibles y son llamados, habitualmente, **eventos secundarios de EA**.

En muchos casos no es trivial la identificación precisa de eventos de EA en situaciones prácticas, pues aparecen incluso combinados.

Las fuentes de EA más comunes en **materiales metálicos** están relacionadas con su fractura y deformación. La formación de nuevas caras de una fractura está acompañada por súbitos cambios del campo de tensiones y el consiguiente campo de desplazamientos en la vecindad de la grieta. Variaciones de tensiones y deformaciones, por definición, actuarán como fuentes de ondas elásticas. Si el cambio de tensiones es grande y rápido, se irradian ondas elásticas de alta amplitud hacia fuera de la fractura, que transportan una gran porción de la energía de la fuente. En **materiales compuestos** reforzados, las fibras o partículas de refuerzo detienen el crecimiento de grietas en una matriz relativamente frágil. En tales materiales a menudo es la interfase entre la matriz y el refuerzo la que es crucial para definir su resistencia. Cuando el material se daña, la energía se absorbe por descohesión de la interfase matriz-fibra, y/o agrietando la matriz del polímero. Estos procesos generalmente disipan una gran cantidad de energía en forma de onda elástica, generándose una gran cantidad de eventos de EA.

La onda primaria liberada por la fuente de EA se puede ver en la Figura 2.6-a. La onda de desplazamiento es básicamente una función escalón. Las ondas de velocidad y tensión asociadas son básicamente tipo pulso (Figura 2.6-a). El alto y el ancho del pulso primitivo dependen de la dinámica del proceso de fuente. Los procesos tales como formación de grietas o fractura de precipitados duran unos pocos microsegundos o fracciones de microsegundo, de tal forma que el pulso primitivo generado en la fuente tiene una duración muy corta. La amplitud y energía del pulso primitivo varía enormemente desde los movimientos submicroscópicos hasta grandes valores asociados a grandes grietas. La onda primitiva se irradia desde la fuente en todas las direcciones, a menudo

con una fuerte directividad dependiente del proceso de fuente, tal y como se muestra en la Figura 2.6-b.

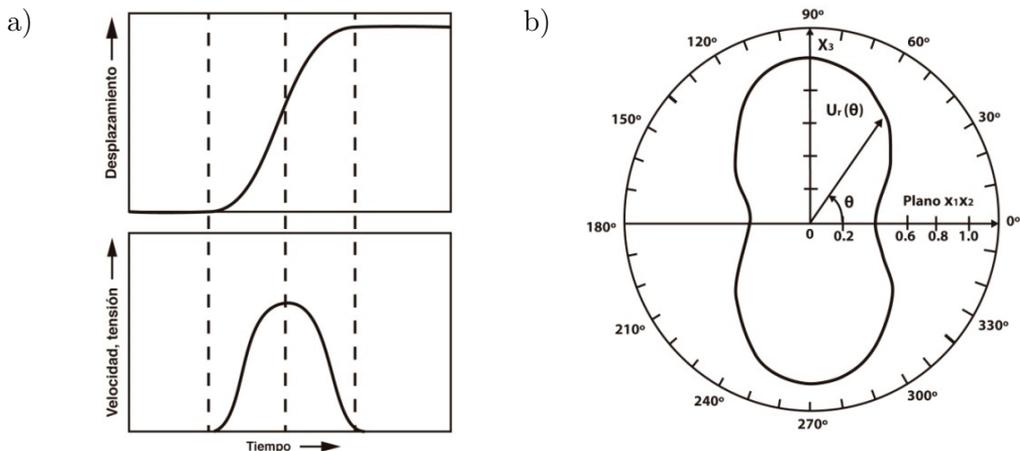


Figura 2.6. Izquierda: Onda primaria emitida por la fuente de EA (ondas de desplazamiento, velocidad y tensión). Derecha: Directividad (dependencia angular) de la emisión acústica generada por el crecimiento de una microgrieta.

La forma de onda primitiva generada en la fuente cambia profundamente durante su propagación a través del medio, de tal forma que la señal detectada por un sensor en la superficie se parece poco a ella. Esta transformación de la forma de onda de EA suele ser de interés para investigación, en análisis de la función de fuente (determinar el tipo de fuente que generó la EA) así como para la inspección con el método de AT. La relación entre el pulso generado en la fuente y el movimiento resultante en el punto de detección donde se coloca el sensor ha sido intensamente estudiada durante varias décadas, siendo éste un objetivo en general complicado de abordar, incluso si la geometría del medio es simple.

La energía elástica radiada en forma de onda es proporcional a la tasa de energía de deformación liberada por el evento de fuente  $\sigma Av$ , donde  $\sigma$  es la tensión local,  $A$  es el área de la grieta y  $v$  es la velocidad de crecimiento de la grieta. Un determinado evento de EA será medible únicamente si la señal excede un cierto umbral  $W$  de nuestro sistema de detección, habitualmente impuesto

por el ruido de fondo del ambiente donde se realiza la medición, es decir (Figura 2.7):

$$\sigma Av \geq W \rightarrow \text{Evento detectable}$$

$$\sigma Av < W \rightarrow \text{Evento no detectable.}$$

En el caso de las fracturas en un **material frágil**, la velocidad de fractura será grande, del orden 100-1.000 m/s, generándose eventos de EA intensos, fácilmente detectables y de una gran variedad de frecuencias, desde muy baja frecuencia hasta 1 MHz, 10 MHz o incluso mayor.

Por el contrario, la fractura de un **material dúctil** conlleva velocidades de fractura inferiores a 1 m/s, generándose eventos de baja energía, que pueden no exceder el umbral de ruido  $W$  y, por tanto, no ser detectables.

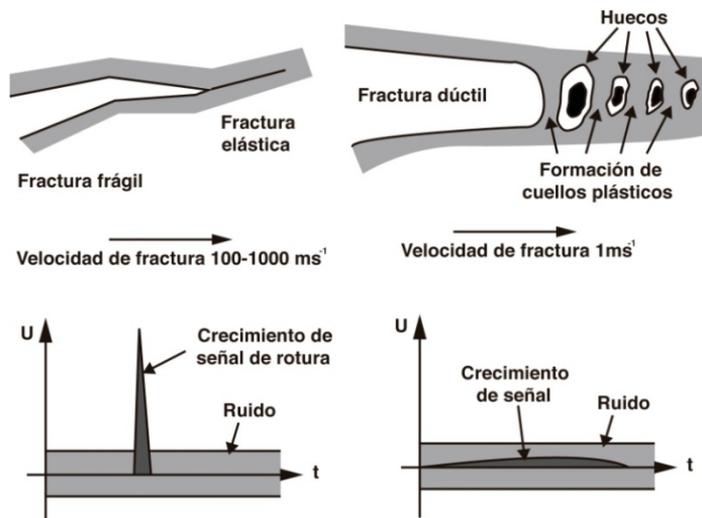


Figura 2.7. Microimpulso producido por el crecimiento rápido de una fractura frágil y lento de una fractura dúctil.

Una vez que la onda elástica ha sido captada por el sensor en la superficie del material de ensayo, ésta se convierte en una señal de EA, medida en voltios. Básicamente existen dos tipos de señales de EA, señales transitorias y señales continuas. Las señales transitorias tienen un inicio y un final claramente definidos respecto del ruido de fondo, y por tanto una duración bien definida,

dependiente de la fuente que las ha generado y del medio de propagación. Por el contrario, las señales continuas, aunque presentan variaciones en su amplitud y frecuencia a lo largo del tiempo, no tienen un principio ni un final definidos, y se mantienen mientras el proceso que las ha generado esté activo. La Figura 2.8 muestra un ejemplo de cada una de estas señales. Las señales transitorias se generan, por ejemplo, por grietas activas o por roturas de fibra en materiales compuestos. Las señales continuas se generan, por ejemplo, durante procesos de fricción, flujo de fluidos, fugas de líquidos en tuberías y tanques, o deformación de materiales. En muchas ocasiones, las señales de EA son una mezcla de señales transitorias y señales continuas, siendo en este caso más complicado su análisis.

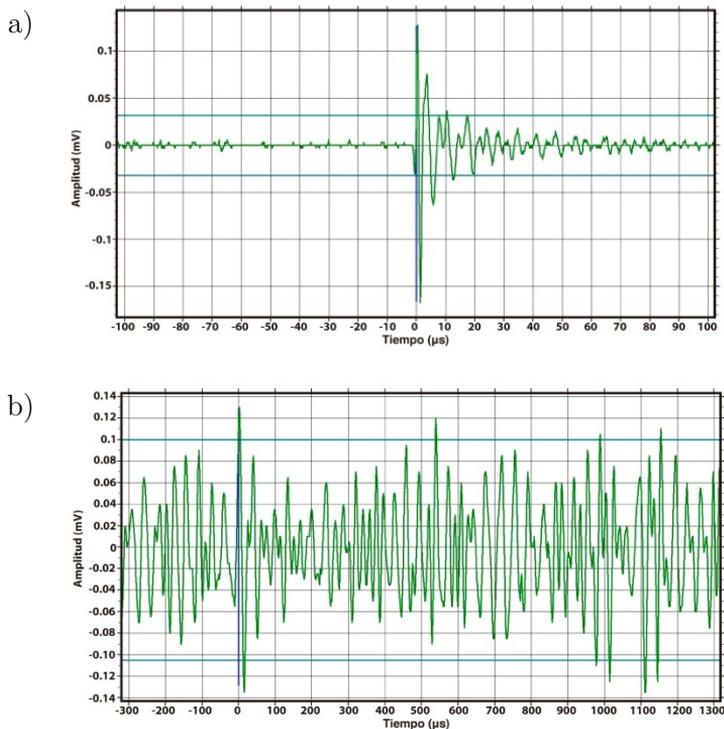


Figura 2.8. a) Señal de EA transitoria generada por la rotura de una fibra de carbono; b) Señal de EA continua generada por el rozamiento interno en hormigón.

Uno de los aspectos más importantes en un sistema de EA es la conversión de las señales transitorias en conjuntos de datos compactos que sólo contengan las señales emitidas, y no la señal de ruido de fondo, la cual es,

aproximadamente, una señal continua. Para ello los sistemas de EA usan umbrales de detección, los cuales deben ser elegidos por el usuario. Si la señal excede el umbral en sentido positivo o negativo, se inicia el registro de una nueva señal transitoria de EA. El tiempo en el que la señal supera el umbral por primera vez se denomina en inglés *First Threshold Crossing* (FTC) (Figura 2.9). Este tiempo no tiene que coincidir con el tiempo de llegada de la señal, denominado en inglés como *Time of Arrival* (TOA), valor clave para la localización espacial de fuentes de EA. La elección del umbral de detección es un aspecto crítico en un ensayo de EA. Si éste se elige demasiado elevado, el FTC será muy diferente al TOA, y por tanto el FTC no será un tiempo significativo para su uso en la localización de fuentes de EA. Si por el contrario, el umbral se elige demasiado bajo, éste se cruzará con facilidad y se generarán señales de EA falsas, que generalmente corresponden a ruido de fondo.

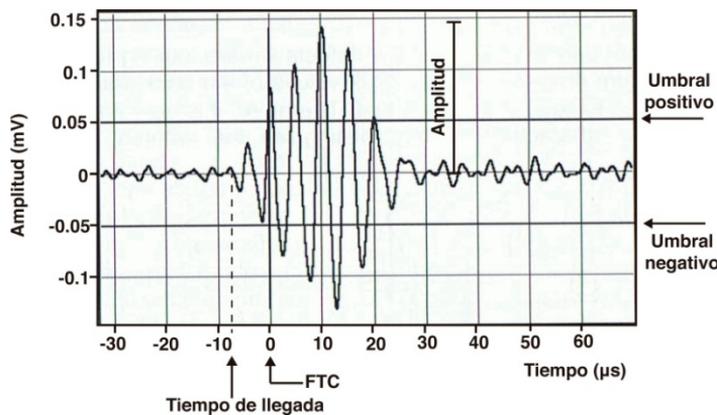


Figura 2.9. Señal de EA transitoria. Definición de la amplitud, el umbral, el tiempo de llegada (TOA) y el primer cruce de umbral (FTC).

Otra característica clave de una señal de EA es su amplitud. La amplitud de una señal es el voltaje más alto (amplitud de pico) en la representación *Voltaje-Tiempo* (Figura 2.9). Para manejar el amplio rango de amplitudes de señal que se pueden encontrar en la práctica, es conveniente usar una escala de decibelios, que en el caso del método de EA, se denominan de forma estandarizada  $\text{dB}_{\text{AE}}$ .

Por otro lado, las señales de EA detectadas son generalmente muy ricas en frecuencia. Las frecuencias de las ondas de EA van desde la zona audible del

espectro (20 kHz) hasta aproximadamente los 10 MHz. Sin embargo, en aplicaciones industriales en el ámbito de los END se limita el ancho de banda de trabajo. En bajas frecuencias se suele establecer el límite superior audible de 20 kHz, mientras que en frecuencias altas se suele establecer el límite de 1 MHz. El límite inferior se impone con objeto de no tener en cuenta ruidos procedentes de vibraciones de estructuras, rodamientos, actividad habitual del ser humano, etc. El límite superior se fija por varias razones como el filtrado de ruidos eléctricos y electrónicos y la alta atenuación de las ondas elásticas por encima de 1MHz. La Figura 2.10 muestra un esquema de las frecuencias de operación del método de AT, en comparación con otros escenarios de trabajo. Cabe señalar que, a medida que se aumenta la frecuencia, la longitud de onda será menor y, por tanto, será posible detectar defectos activos más pequeños.

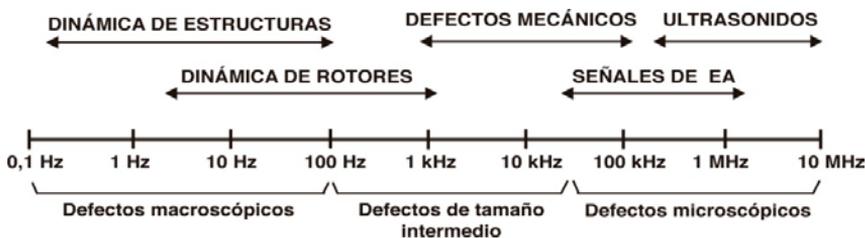


Figura 2.10. Relación entre el tamaño, la frecuencia de las señales, los defectos y el ámbito de aplicación.

## 2.2.2. Señales de EA. Características y procesado

### 2.2.2.1. Señales continuas y transitorias

Como se comentó en el Apartado 2.1, las señales de EA básicamente pueden catalogarse en señales continuas y transitorias (Figura 2.8), aunque en muchos casos esta división no está clara. Las técnicas de procesado de dichas señales son en cada caso muy diferentes, y quedan resumidas en la Tabla 2.1. Las señales transitorias son *hits* de EA, a los que se les pueden extraer una serie de características, también llamadas parámetros tradicionales de EA. Las características a lo largo del tiempo, así como el clásico análisis en frecuencia (análisis espectral) pueden usarse en ambos tipos de señales, aunque de forma muy diferente. Además, en ambos casos han surgido, durante las últimas

décadas, numerosas técnicas avanzadas para su tratamiento, que difieren de manera importante según sean señales transitorias o continuas.

| Señales transitorias  | Señales continuas                                      |
|---|--|
| Características basadas en el <i>hit</i> (parámetros de EA) | Características a lo largo del tiempo (RMS, ASL, etc.) |
| Combinación de parámetros de EA                             | Análisis en frecuencia                                 |
| Características a lo largo del tiempo (RMS, ASL, etc.)      | Técnicas avanzadas                                     |
| Análisis en frecuencia                                      |  |
| Técnicas avanzadas  |  |

**Tabla 2.1. Técnicas de procesamiento de señales transitorias y continuas de EA.**

Mediante estas técnicas se trata de obtener lo que se conoce como características de la señal. Las características de EA describen la forma y el contenido de la forma de onda. Cuando se observan muchas formas de onda, y se trata de distinguir unas de otras o agruparlas en tipos de formas de onda, se puede llegar a usar información básica como que la amplitud de una es menor que la de la otra, que la duración de una es mayor que la de la otra, o que la frecuencia central de una es mayor que la de la otra. En este contexto, son dos los propósitos para la extracción de características de las señales:

- **Separación de mecanismos de fuente:** Extraer la máxima información posible acerca de la forma y el contenido de la onda para diferenciarla de otras ondas relacionadas con mecanismos de fuente diferentes;
- **Comprimir la información:** Las características de la señal también proporcionan una reducción o compresión de la forma de onda, permitiendo procesar la información de una manera más rápida. A modo de ejemplo, consideremos una forma de onda de 8.000 muestras (16 bits). Para guardarla en memoria y procesarla se requieren 16 kilobytes de datos. Sin embargo, si se usan 10 características de la misma (10

números) que proporcionen una adecuada descripción de la forma de onda, se requiere guardar únicamente 32 bytes de datos o menos.

Básicamente existen 4 tipos principales de características de EA:

- Características asociadas al *hit* (a la señal transitoria);
- Características en base a promediados a lo largo del tiempo;
- Combinación de características;
- Características basadas en la frecuencia.

#### 2.2.2.2. Ruido de fondo y umbral. Definición del hit

La Figura 2.11 describe una típica señal transitoria de EA la cual, en líneas generales (unas señales pueden diferir mucho de las otras), es una señal que crece rápidamente hasta un valor máximo de amplitud y decae exponencialmente. Su duración puede ser muy variable, desde unos pocos microsegundos hasta pocos milisegundos. Sin embargo, el registro de las señales de EA se realiza siempre en presencia de una señal continua de ruido, denominada ruido de fondo, es decir, la señal registrada,  $y(t)$ , es:

$$y(t) = x(t) + n(t) , \quad (2.1)$$

siendo  $x(t)$  la señal sin ruido y  $n(t)$  el ruido de fondo.

Este ruido de fondo siempre existe y puede ser de naturaleza:

- **Electromagnética:** Generado en el propio equipo de adquisición; generado en el sensor o amplificador; generado por lazos de masa; ondas electromagnéticas ambientales (luces, sistemas de navegación, radioemisores, etc.); generado por los cables; generado por el propio sistema de suministro eléctrico, etc.;

- **Mecánica:** Maquinaria; flujo de fluidos; fugas; bombas; válvulas; cavitaciones; fricción; actividades humanas.

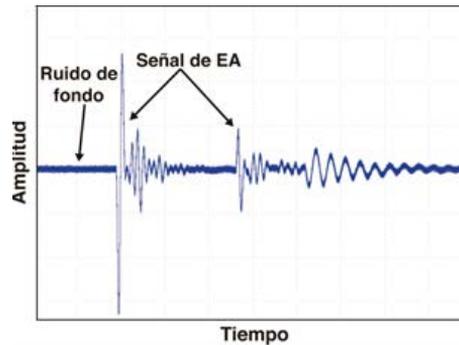


Figura 2.11. Señales transitorias de EA sobre ruido de fondo.

De esta forma, y asumiendo siempre la existencia de un umbral de ruido que debe estar medido previamente por el operador de un ensayo de EA, para aislar los diferentes *hits* de EA (señales transitorias de EA), es necesario establecer una serie de criterios que permitan definirlos, lo que conlleva básicamente a resolver estos aspectos:

- Establecer cuándo la señal detectada comienza a considerarse como tal, sobre el ruido de fondo. Para esto se usa un **umbral de detección**;
- Establecer la separación entre unos *hits* y otros. Esto se hace con una serie de parámetros que debe elegir el usuario, y que difieren de un equipo de adquisición a otro. Son los denominados parámetros para la **definición del *hit***.

**Umbral de detección:** El umbral de detección es un parámetro clave que debe seleccionar el operador de un ensayo de EA, pues es el que establece cuando se comienza a registrar un *hit* de EA, frente al ruido de fondo. Lógicamente este umbral debe estar por encima del ruido de fondo, razón por la cual el nivel de ruido de fondo debe ser conocido con anterioridad.

**Definición del *hit*:** Por definición o detección de un *hit* se entiende su separación de otros *hits* anteriores o posteriores. Para ello se usan los siguientes

parámetros, cuya elección suele ser de capital importancia en un ensayo de EA (Figura 2.12):

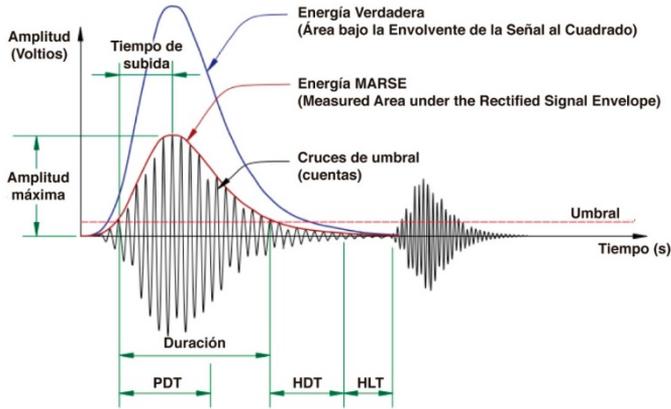


Figura 2.12. Parámetros usados para la definición del *hit* (PDT, HDT, HLT) y parámetros clásicos de una señal transitoria de EA.

- **HDT (*Hit Definition Time*) o DDT (*Duration Discrimination Time*)**: Si no hay más cruces de umbral durante este tiempo, se considera que el *hit* ha finalizado. En la Figura 2.13-a se muestra un ejemplo en el que el HDT se ha elegido apropiadamente, y el sistema separa adecuadamente los dos *hits* de EA. Sin embargo, si el HDT se elige demasiado elevado, el sistema considerará un solo *hit* en lugar de dos (Figura 2.13-b).

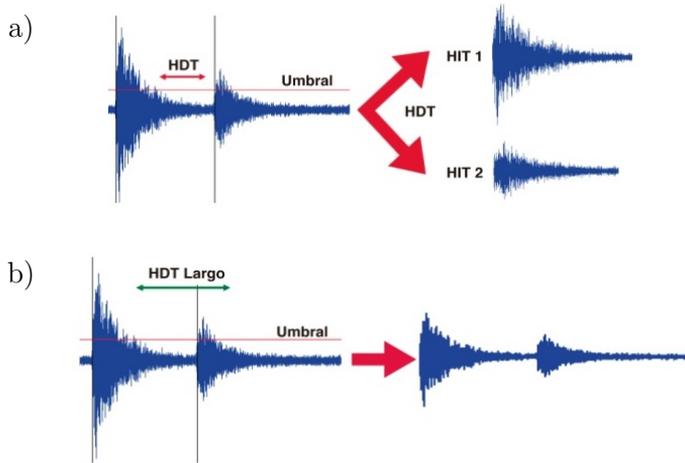


Figura 2.13. Situaciones en las que: a) HDT está correctamente elegido; b) HDT está elegido demasiado alto.

- **HLT (*Hit Lockout Time*)** o **RT (*Rearm Time*)**: Es el tiempo que tiene que pasar después de haber detectado un *hit* antes de que se pueda detectar uno nuevo. Es, por tanto, un tiempo muerto en el que el sistema no detecta ningún nuevo *hit*, es decir, el sistema no responde a ningún cruce de umbral durante dicho tiempo HLT. Si este tiempo se elige muy alto, puede ocurrir que ciertos *hits* no se registren (Figura 2.14). Por el contrario, si ese *hit* es muy corto y se produce algún cruce de umbral por una subida del ruido de fondo o porque aún quedan reflexiones relevantes y tardías del *hit* anterior, el sistema podría capturar un nuevo *hit* que realmente no corresponde a un nuevo evento de EA.

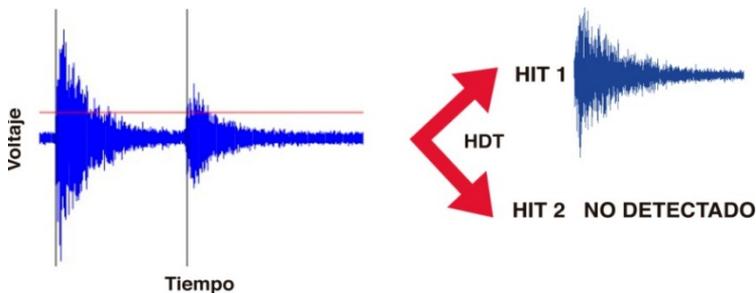


Figura 2.14. Situación en la que HLT es demasiado alto.

### 2.2.2.3. Características a lo largo del tiempo: RMS, ASL, ABE

Las características de EA a lo largo del tiempo se recogen y registran sobre una base de tiempos, la cual da una idea de la tasa de adquisición de señal. Los datos a lo largo del tiempo reflejan cómo el ruido de fondo o la actividad de emisión acústica continua cambian a lo largo del tiempo, mostrando así las tendencias en el análisis de los cambios del proceso inspeccionado, fugas o fallos de componentes como mecanismos rodantes de maquinaria o procesos continuos como el maquinado de una herramienta. Las típicas características a lo largo del tiempo son el error cuadrático medio (RMS, *Root Mean Square*), el nivel medio de señal (ASL, *Average Signal Level*) y la energía absoluta (ABE, *Absolute Energy*), definidas como:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [y(t)]^2 dt} ; \quad ASL = \frac{1}{T} \int_0^T |y(t)| dt ; \quad (2.2)$$

$$ABE = \int_0^T |E(t)| dt ,$$

siendo  $y(t)$  la señal medida en voltios,  $E(t)$  la energía de la señal y  $T$  es el tiempo de promediado, es decir, el periodo de medida en el cual se calculan dichos parámetros.

### 2.2.2.4. Sistemas multicanal

El registro de la EA en un material o estructura de ensayo puede realizarse con un sensor (sistema monocanal) o mediante varios sensores a la vez (sistema multicanal). La Figura 2.15 muestra un esquema de bloques de un sistema de 4 canales. En sistemas de  $N$  canales, la onda de EA generada por una determinada fuente en un determinado instante de tiempo (tiempo de fuente) puede llegar a generar hasta  $N$  señales, cada una de ellas registrada por cada uno de los  $N$  sensores. A este conjunto de señales procedentes de una misma fuente de EA, se le llama también evento de EA, mientras que a cada señal del evento, se le

denomina *hit* del evento. El *hit* del evento que primero llega se denomina en inglés *first-hit event* o máster. A los *hits* del evento que llegan después del máster, se les denomina *hits* subsecuentes o esclavos (*slaves*). Debe tenerse en cuenta que no todos los eventos tienen que tener el número máximo  $N$  hits. Puede haber eventos en los que el número de *hits* sea menor que  $N$ , debido a que la onda de EA no fue registrada por alguno/algunos de los  $N$  sensores por no superar el umbral establecido por el usuario. Incluso puede haber eventos de un solo *hit*. En la Figura 2.16 se muestra un ejemplo de dos eventos obtenidos en un ensayo a flexión de una viga de hormigón, en la que se usaron  $N = 8$  sensores. El primero de los eventos tiene 8 *hits*, mientras que el segundo tiene 6 *hits*.

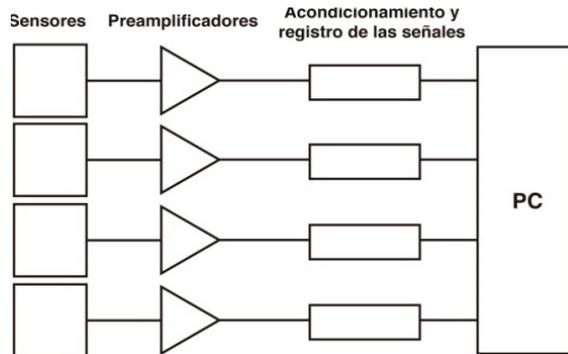


Figura 2.15. Diagrama de bloques de un sistema EA multicanal.

| Id | A<br>[dB] | CHAN | SIGS |
|----|-----------|------|------|
| Ev | 46,4      | 6    | 8    |
| Ht | 44,2      | 7    |      |
| Ht | 48,7      | 2    |      |
| Ht | 45,2      | 3    |      |
| Ht | 47,5      | 8    |      |
| Ht | 40,7      | 1    |      |
| Ht | 44,2      | 4    |      |
| Ht | 46,0      | 5    |      |
| Ev | 52,0      | 6    | 6    |
| Ht | 46,4      | 2    |      |
| Ht | 44,5      | 1    |      |
| Ht | 46,4      | 5    |      |
| Ht | 43,4      | 3    |      |
| Ht | 46,3      | 7    |      |

Figura 2.16. 2 eventos de EA registrados en un ensayo a flexión de una viga de hormigón usando 8 canales. *Ev*: Representa el comienzo del evento (*first-hit event*). *Ht*: Representa los *hits* subsiguientes del evento. *A*: Amplitud de cada *hit* en dB. *CHAN*: Canal que registra cada *hit*. *SIGS*: Número de *hits* de cada evento.

### 2.2.2.5. Características básicas de señales transitorias

La Figura 2.12 representa gráficamente sobre una señal transitoria modelo la definición de los parámetros de EA tradicionalmente usados como características tradicionales:

- **Amplitud;**
- **Cuentas o Pulsos:** Es el número de veces que la señal cruza el umbral en una polaridad. Es la característica más antigua y más simple para contabilizar la actividad de EA, aunque está influenciada por el comportamiento acústico del material y por factores instrumentales ocultando información asociada a factores de la fuente de EA. Depende del umbral. Por esa razón ha sido sustituida de manera importante por la energía de la señal. El primer *hit* del evento de la Figura 2.12 tiene 18 cuentas;
- **Cuentas hasta el pico:** Son las cuentas contabilizadas únicamente desde que la señal cruza el umbral hasta que se alcanza el máximo de la señal. El primer *hit* del evento de la Figura 2.12 tiene 7 cuentas;

- **Duración:** Intervalo de tiempo entre la primera y la última vez que la señal discreta cruza el umbral de detección. Es una característica valiosa para la cualificación de la señal y excelente para reconocer ciertos procesos de fuente como delaminaciones en materiales compuestos y para caracterizar/filtrar ruido indeseado (de larga duración). Depende de la magnitud de la fuente, del tipo y forma del elemento de ensayo, de las características del sensor usado, del umbral y de la reverberación del material;
- **Tiempo de subida (*Rise-time*):** Intervalo de tiempo entre el primer cruce del umbral y la amplitud máxima de la señal discreta. Es igualmente útil para la cualificación de señales de EA y para el filtrado de ruido, tanto acústico como eléctrico. Está condicionado por la dispersión de la onda en su viaje entre la fuente y el sensor. Depende del umbral y da una idea de la actividad de la fuente, pues tiene estrecha relación con el periodo de actividad de la misma.

En muchas ocasiones se usan en el análisis características de EA que sean combinación de otras más simples, siendo por tanto infinito el número de posibilidades. Se utilizan tres características de frecuencia basadas en las cuentas de un *hit*: la frecuencia de inicio,  $f_{init}$ , la frecuencia de reverberación,  $f_{reverb}$  y la frecuencia promedio,  $f_{av}$ , que proporcionan una frecuencia característica antes y después del pico máximo y de la señal completa, respectivamente:

$$f_{init} = \frac{\text{Cuentas hasta el pico}}{\text{Tiempo de subida}} (kHz) \quad (2.3)$$

$$f_{reverb} = \frac{\text{Cuentas EA} - \text{Cuentas hasta el pico}}{\text{Duración} - \text{Tiempo de subida}} (kHz) \quad (2.4)$$

$$f_{av} = \frac{\text{Cuentas EA}}{\text{Duración}} (\text{kHz}) \quad (2.5)$$

### 2.2.2.6. Energía

Existen varias formas de definir la energía de una señal transitoria de EA (también llamada *strength* en inglés):

- MARSE (*Measured Area under Rectified Signal Envelope*): Definida como la integral de la tensión rectificadora de la señal de emisión acústica durante la duración de la señal discreta. También se denomina potencia de la señal, y sus unidades son  $V \cdot s$ , es decir

$$MARSE = \int V^r(t) dt , \quad (2.6)$$

siendo  $V^r(t)$  la envolvente de la señal rectificadora de EA. El cálculo de la integral se extiende sobre toda su duración. Lógicamente su valor está afectado por la amplitud y la duración de la señal, aunque no depende del umbral.

- Energía verdadera (*true energy*):

$$E = \frac{1}{R} \int |V(t)|^2 dt , \quad (2.7)$$

donde  $V(t)$  es el voltaje de salida del sensor y  $R$  es una resistencia de referencia, habitualmente  $10 \text{ k}\Omega$ . El cálculo de la integral se extiende sobre toda su duración. Sus unidades son julios, aunque suelen usarse attojulios (aJ;  $1 \text{ aJ} = 10^{-18} \text{ J}$ ).

Los valores obtenidos para ambos parámetros de energía referidos al voltaje o potencia de la señal en general son valores relativos y no absolutos, ya que no se tiene en cuenta en la medición ni las pérdidas en el sensor ni la atenuación del material. Es decir, no está aún establecida completamente la relación entre la

energía generada por la fuente, transmitida por el material y recibida por el sensor.

### 2.2.2.7. Características espectrales

Uno de los procesados de señales de EA más usado es el de su **Transformada de Fourier**, ya que proporciona información del contenido en frecuencia de la señal (distribución de la energía de la señal en las diferentes frecuencias). La Transformada de Fourier de una señal analógica temporal  $x(t)$  viene dada por

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt , \quad (2.8)$$

donde  $f$  es la frecuencia.

Sin embargo, en la práctica se dispone de una señal discreta  $x(n)$ , por lo que se habla entonces de **Transformada Discreta de Fourier (DFT)**, definida por

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} w(n)x(n) e^{-j2\pi \frac{k}{N}n} ; \quad k = 0,1, \dots, N-1 \quad (2.9)$$

$$X(f_k) = \sum_{n=0}^{N-1} w(n)x(n) e^{-j2\pi f_k n} ; \quad f_k = \frac{k}{\Delta t N} ; \quad (2.10)$$

$$k = 0,1, \dots, N-1 .$$

Como puede verse, la DFT se calcula en una serie de frecuencias discretas

$$f_k = \frac{k}{N\Delta t} = \frac{k}{N} f_s , \quad (2.11)$$

con una resolución dada por

$$\Delta f_k = \frac{1}{N\Delta t} = \frac{f_s}{N}, \quad (2.12)$$

donde  $\Delta t$ ,  $f_s$  y  $N$  son el periodo de muestreo, la frecuencia de muestreo y el número de datos de la señal, respectivamente. Nótese que al aumentar la frecuencia de muestreo, disminuye la resolución espectral. Igualmente, al disminuir el número de datos, disminuye la resolución espectral.

En la práctica, lo más usado es un algoritmo rápido de cálculo denominado **Transformada Rápida de Fourier** (*Fast Fourier Transform-FFT*). En la Figura 2.17 se muestra el espectro de una señal transitoria de EA para diferentes valores del número de datos.

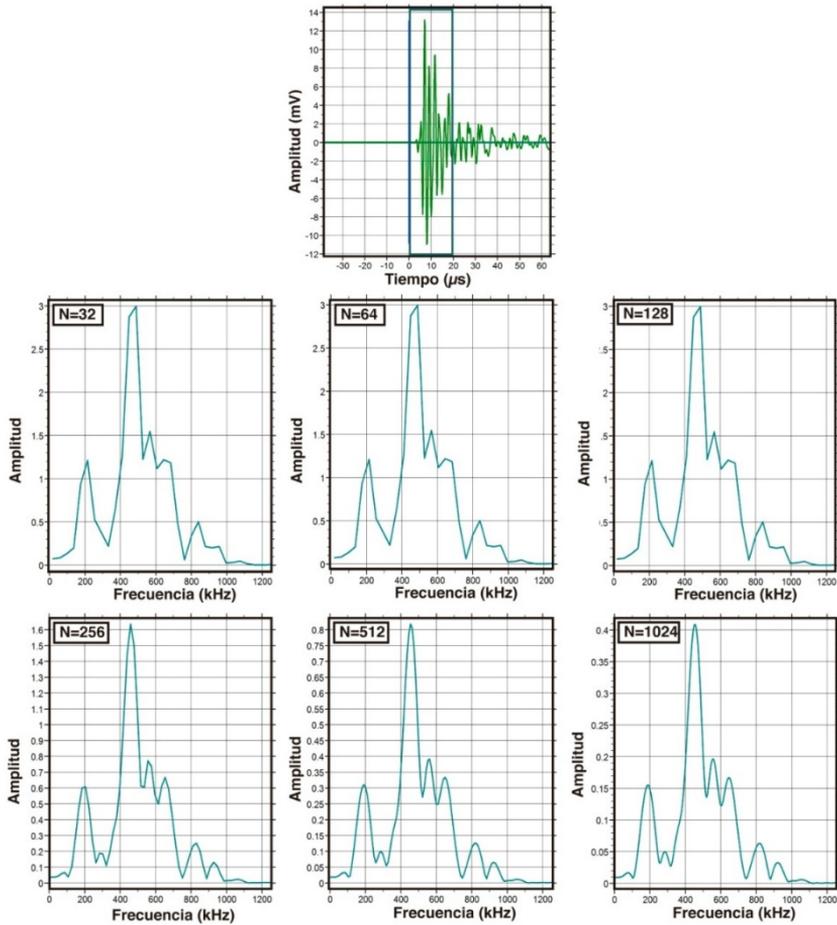


Figura 2.17. Señal de EA y su FFT calculada en una ventana de 100 datos ( $20 \mu\text{s}$ ). Frecuencia de muestreo 5 MHz. FFT calculada con 32, 64, 128, 256, 512 y 1024 datos según el caso. Ventana rectangular de suavizado.

La Figura 2.18 muestra el espectro de diferentes formas de onda tradicionales.

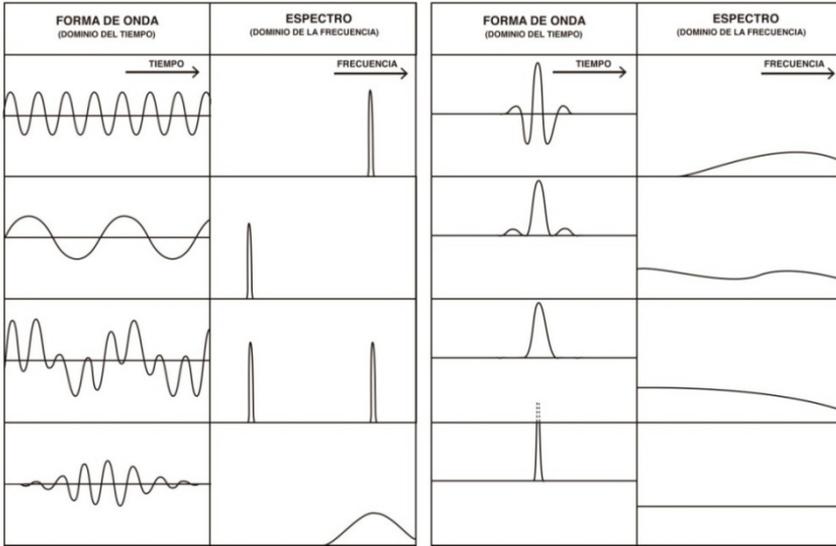
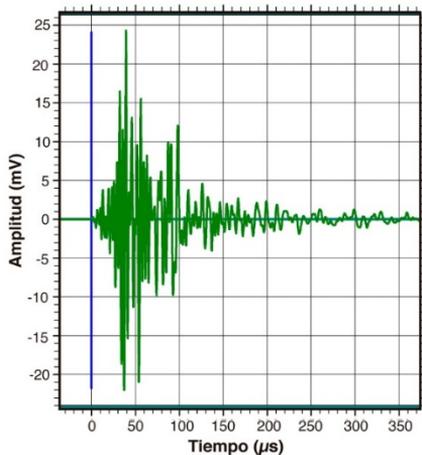


Figura 2.18. Diferentes formas de onda en el dominio del tiempo y sus espectros correspondientes (dominio de la frecuencia).

Lo más común es que una onda generada por una fuente de EA sea compleja y no sea una onda armónica. La Figura 2.19 muestra una forma de onda de EA en el dominio del tiempo (amplitud de la onda en función del tiempo),  $x(t)$ , y su espectro,  $X(f)$ .

a)



b)

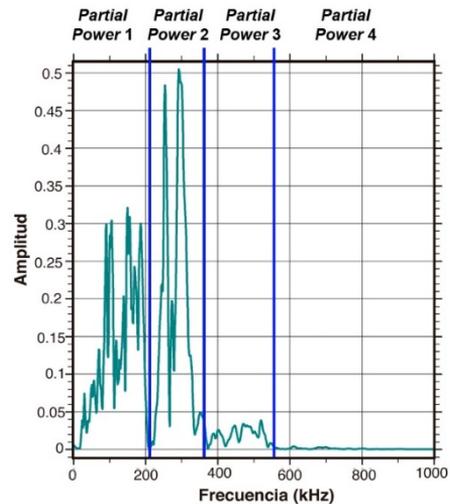


Figura 2.19. a) Onda de EA registrada por un sensor en el dominio del tiempo; b) La misma onda en el dominio de la frecuencia (espectro).

### 2.2.2.8. Otras características de las señales

A lo largo de este capítulo ya se han definido las características más importantes de la forma de onda. No obstante, los programas de análisis suelen incorporar alguna aplicación para la extracción de éstas y otras características más avanzadas de las formas de onda. Estas características se calculan directamente sobre la forma de onda registrada, y pueden diferir de las características calculadas para cada *hit* en tiempo real, siempre que la duración de la onda registrada y el tiempo que estuvo el *hit* abierto no coincidan. Se definen a continuación algunas características especiales en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

**Promediado temporal en una ventana de tiempos:** El usuario puede elegir una o varias ventanas de tiempo de la señal y calcular su promedio en esta ventana. Este promedio puede realizarse en RMS o en ASL. En la Figura 2.20-a se muestra un ejemplo en el que se han usado dos ventanas, V0 (de -300 a -50  $\mu\text{s}$ ) y V1 (de -50 a 200  $\mu\text{s}$ ) y se ha calculado el promedio RMS en cada una de ellas a lo largo de un ensayo. El resultado se muestra en la Figura 2.20-b.

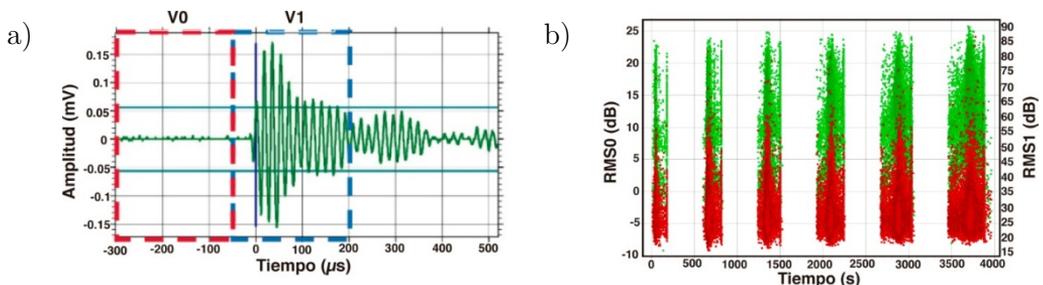


Figura 2.20. a) Señal de EA con dos ventanas temporales definidas; b) RMS en dB en cada una de las ventanas definidas a lo largo del ensayo a flexión de una viga de hormigón.

Igualmente pueden obtenerse promedios en el dominio de la frecuencia dentro de ciertas ventanas temporales de tiempo. Para el cálculo de promedios en el dominio de la frecuencia el usuario también puede usar RMS o ASL. A su vez, para el cálculo del espectro, el usuario puede elegir las variables

tradicionales como el número de datos, tipo de ventana, etc. Algunas de estas características son las siguientes:

**Relaciones espectrales (*Spectral Ratio* y *Partial Power*):** El *Spectral Ratio* es básicamente la amplitud del espectro en un ancho de banda concreto  $[f_1, f_2]$  normalizada por una determinada cantidad  $S_0$ , es decir

$$SR = \frac{\sum_{f \in [f_1, f_2]} X}{S_0} \quad (2.13)$$

La cantidad de referencia para la normalización puede diferir y ser una cantidad en el dominio del tiempo o la frecuencia. Algunas de las usadas son: a) 1  $\mu\text{V}$ ; b) Promedio temporal (RMS/ASL) en alguna ventana de tiempo determinada; c) Promedio en frecuencia (RMS/ASL) en alguna ventana de frecuencia determinada. La Figura 2.21 muestra un ejemplo de cálculo de una relación espectral en una ventana temporal y una ventana espectral.

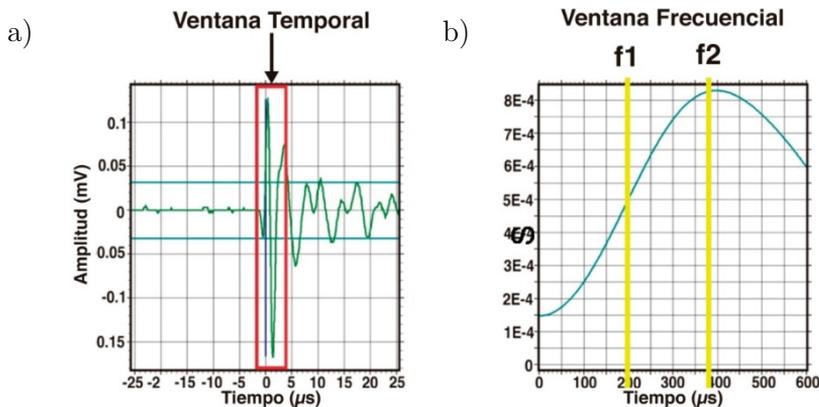


Figura 2.21. Señal registrada por la rotura de una fibra de carbono en material CFRP. a) Ventana temporal; b) Ventana espectral.

Los niveles *Partial Power* miden la contribución frecuencial de las señales en un intervalo dado y se usan para expresar la composición frecuencial de la señal en más de un valor característico. Se trata de un parámetro porcentual que indica la energía de la señal en un intervalo de frecuencias de interés dividido por la energía de la señal en todo el rango de frecuencias estudiado, es decir

$$PP = \frac{\int_{f_2}^{f_1} X^2(f)df}{\int_{f_{inicio}}^{f_{fin}} X^2(f)df} \quad (2.14)$$

siendo  $[f_1, f_2]$  el rango de frecuencias de interés y  $[f_{inicio}, f_{fin}]$  el rango de frecuencias de estudio. Se puede calcular en toda la señal temporal o en una ventana de tiempos determinada. Se pueden establecer diferentes rangos de frecuencias de interés. Por ejemplo, en la Figura 2.19-b, se han establecido 4 niveles diferentes, siendo el rango total de estudio  $f_{inicio} = 0$  kHz y  $f_{fin} = 1000$  kHz.

**Frecuencia central o centroide, frecuencia de pico y frecuencia pico ponderada:** La frecuencia de pico es la frecuencia a la que se produce la máxima amplitud del espectro en toda la señal. La frecuencia central o centroide (C) del espectro se usa para caracterizar el contenido general de frecuencias de un *hit*, de manera similar a como describe el centro de masa las propiedades geométricas de un objeto de densidad uniforme. Viene definida por

$$f_{centroide} = C = \frac{\sum_f Xf}{\sum_f X} \quad (2.15)$$

donde  $X$  es la amplitud del espectro, y las sumas se extienden a todo el ancho espectral.

Para mejorar la representación de una frecuencia característica asociada a una señal de emisión acústica, se introduce la frecuencia de pico ponderada (*weighted peak frequency*) que combina la eficacia de la frecuencia pico con la información sobre el contenido promedio de frecuencias expresado por la frecuencia central. La frecuencia pico ponderada se define como

$$\langle f_{pico} \rangle = \sqrt{f_{pico} \cdot f_{centroide}} \quad (2.16)$$

La Figura 2.22 muestra la diferencia entre frecuencia de pico y frecuencia central de un espectro.

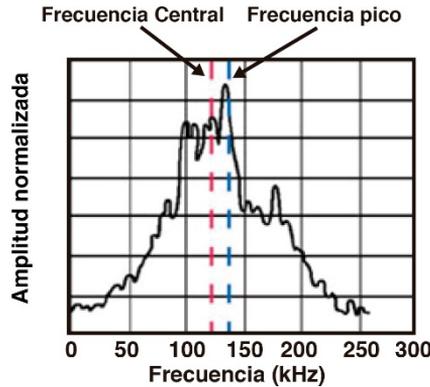


Figura 2.22. Diferencia entre la frecuencia de pico y la frecuencia central del espectro de una señal.

## 2.2.3. Localización de fuentes de EA

### 2.2.3.1. Planteamiento del problema

Un aspecto de enorme interés y utilidad del método de EA es determinar las coordenadas de las fuentes de EA de la forma más precisa que sea posible a partir de los datos recogidos por uno o más sensores. Una buena localización puede ahorrar muchos costes en numerosas aplicaciones industriales, como, por ejemplo en la detección de fugas en tuberías o de zonas de debilidad estructural en tanques de almacenamiento. Son muchas las técnicas y los algoritmos desarrollados para ello, dependiendo de muchos factores fundamentalmente asociados a la geometría del problema y al tipo de fuente. La mayoría de ellas están inspiradas en sismología. De hecho, muchas de las técnicas para localización de terremotos son aplicables a la localización de fuentes de EA, con pequeñas modificaciones.

La ubicación de una fuente de EA está definida por sus coordenadas  $r_F(x_F, y_F, z_F)$  y por el tiempo en que ésta se produjo,  $T_F$ , respecto de un origen de tiempos determinado. En sismología, la resolución de este problema suele involucrar, en primer lugar, la determinación del tiempo de llegada de la onda P. Si además, se puede detectar la llegada de la onda S, esta información también se puede usar junto con la información de la llegada de la onda P. Sin embargo, a diferencia de lo que suele ocurrir en sismología, en las señales de EA,

la onda S suele estar enmascarada por la cola de la onda P (que, además incluye efectos geométricos como reflexiones en los contornos, difracciones y efectos de la respuesta del sensor), de tal forma que las ondas P y S no suelen ser del todo separables. En la Figura 2.23 se observan señales registradas por sismógrafos, en las que se ve una clara separación entre las ondas P y S, y señales registradas por sensores de EA. En este último caso, la separación es imposible.

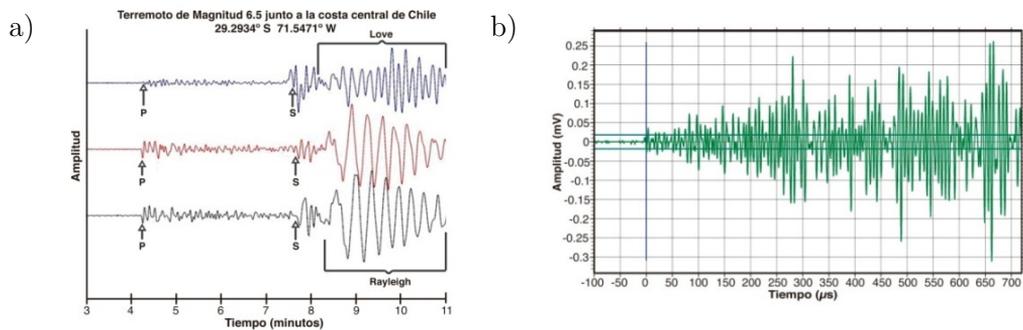


Figura 2.23. a) Sismogramas del terremoto ocurrido en la costa central de Chile el 3 de Septiembre de 1998; b) Señal de EA registrada por un sensor resonante a 150 kHz en una tubería de calefacción llena de agua y generada por una fuente situada a 290 cm del sensor.

Para resolver un problema de localización de fuentes de EA, en general, es necesario conocer la siguiente información:

- Los tiempos de llegada de las ondas a cada sensor;
- Las coordenadas de los sensores usados;
- La velocidad de propagación de las ondas.

En el caso de materiales homogéneos e isótropos se pueden asumir las siguientes simplificaciones:

- Las ondas se propagan por el camino directo entre el sensor y la fuente;
- La velocidad de propagación de las ondas es constante en todo punto.

Lógicamente, estas suposiciones simplificadoras no son aplicables al caso más habitual de materiales heterogéneos y anisótropos, como es el caso, por ejemplo, de materiales compuestos laminados.

En lo que sigue en este capítulo se considerará que el material es homogéneo e isótropo, es decir, se usará una velocidad de propagación única para la onda en todo el material.

Consideremos que sobre una estructura de ensayo se coloca un conjunto de  $N$  sensores en posiciones  $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$ , con  $i = 1 \dots N$ , con objeto de determinar la posición de una fuente  $\mathbf{r}_F(x_F, y_F, z_F)$  (Figura 2.24-a). Para el sensor  $S_i$ , se cumple que

$$v_i t'_i = \pm \sqrt{(x_i - x_F)^2 + (y_i - y_F)^2 + (z_i - z_F)^2} \quad (2.17)$$

donde  $v_i$  es la velocidad de propagación de la onda entre la fuente y el sensor  $S_i$  y  $t'_i$  es el tiempo que tarda la onda desde que se genera en la fuente hasta que llega al sensor  $S_i$ . En esta ecuación los tiempos  $t'_i$  están medidos respecto del instante en que se genera la fuente. Como este instante de referencia es desconocido, y como las coordenadas  $(x_F, y_F, z_F)$  son también desconocidas, el número de incógnitas del problema es 4.

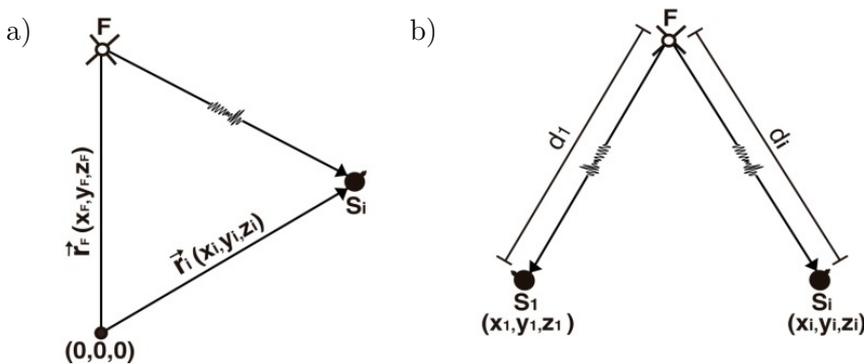


Figura 2.24. a) Posición genérica de un sensor ( $S_i$ ) y la fuente ( $F$ ). b) Posición de la fuente respecto del sensor al que llega primero la onda ( $S_1$ ).

La ecuación anterior también puede escribirse como

$$v_i(t_i - T_F) = \pm \sqrt{(x_i - x_F)^2 + (y_i - y_F)^2 + (z_i - z_F)^2} \quad (2.18)$$

donde  $T_F$  es el tiempo en que se genera la fuente respecto de un origen de tiempos determinado y  $t_i$  es el tiempo de llegada de la onda a cada sensor respecto del mismo origen de tiempos, es decir y  $t'_i = t_i - T_F$ . En esta ecuación se observa más claramente la existencia de 4 incógnitas: las tres coordenadas de la posición de la fuente  $(x_F, y_F, z_F)$  y el tiempo en que se genera la fuente ( $T_F$ ).

Otra posibilidad, a veces muy usada consiste en medir los tiempos respecto de la llegada de la onda al primer sensor,  $t_1$ . En este caso, para  $i = 2 \dots N$ , se cumple que (Figura 2.24-b)

$$v_i(t_i - t_1) = d_i - d_1 \quad (2.19)$$

donde

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_F)^2 + (y_i - y_F)^2 + (z_i - z_F)^2} \quad (2.20)$$

$$d_1 = \sqrt{(x_1 - x_F)^2 + (y_1 - y_F)^2 + (z_1 - z_F)^2} \quad (2.21)$$

En otro orden de cosas, desde un punto de vista geométrico, los algoritmos de localización se suelen dividir en algoritmos en una (1-D), dos (2-D) o tres dimensiones (3-D). Sea cual fuere la formulación usada, el número de incógnitas a calcular en una localización de dimensión  $N_d$ , es  $N_d + 1$ , por lo que el número mínimo de sensores requeridos es  $N_d + 1$  (2 para localización 1-D, 3 para localización 2-D, y 4 para localización 3-D). En general, dependiendo del número de sensores usados ( $N$ ), se pueden presentar las siguientes situaciones:

- Si  $N < N_d + 1$ , es imposible hacer una localización puntual de la fuente de EA;

- Si  $N = N_d + 1$ , el problema de localización tiene solución única, en cuyo caso se suele hablar de algoritmos convencionales de localización o de solución cerrada (solo hay una solución posible);
- Si  $N > N_d + 1$ , el problema de localización tiene varias soluciones, es decir, se trata de resolver un sistema de ecuaciones sobredeterminado, pues se dispone de más ecuaciones que de incógnitas. Se habla entonces de algoritmos de localización de alto orden. En este caso se suelen usar métodos estadísticos, tales como mínimos cuadrados, existiendo para su resolución diversos algoritmos. Esto en general mejora la calidad de la localización, aunque a costa de un mayor gasto por el uso de un mayor número de sensores.

### 2.2.3.2. Algoritmos de localización

Una localización precisa de las fuentes de EA depende de muchos factores. Para conseguirla, se tiene que poder seleccionar el algoritmo más adecuado para las condiciones dadas. Un método de localización se refiere al procedimiento matemático que resuelve el problema a partir de observaciones físicas del evento de EA expresadas como parámetros del hipocentro. Existen básicamente cuatro tipos de aproximaciones matemáticas:

- **Aproximación triaxial:** Se hace con dos tipos de datos físicos, la amplitud y el tiempo de llegada. Con esta aproximación la localización de un evento de EA se obtiene mediante la diferencia de tiempos de llegada de las ondas P y S y la información de la amplitud en las tres direcciones ortogonales. Por tanto, deben usarse las tres componentes del sensor.
- **Aproximación del tiempo de llegada (TOA):** Este tipo de algoritmos usa exclusivamente la información del tiempo de llegada, que puede corresponder a cualquier tipo de onda, aunque habitualmente se usa la onda P de las ondas de volumen o el modo S0 de las ondas de Lamb. La información se considera más estable que la proporcionada por

la aproximación triaxial, pues la amplitud está muy influenciada por las propiedades del medio de propagación. Por esta razón, es la que habitualmente se usa en ensayos de EA.

- **Localización zonal y puntual:** La localización puntual se refiere a algoritmos que tratan de obtener unas coordenadas espaciales para la fuente de EA. Por el contrario, la localización zonal se refiere a los algoritmos que determinan si la fuente de EA proviene de una zona predeterminada. Ambas localizaciones requieren los tiempos de llegada (TOA) al grupo de sensores usados. La localización puntual requiere la velocidad de propagación, mientras que la zonal no. Además, en términos generales, si  $M$  es el número de ecuaciones y  $N$  el número de incógnitas:  
a) Si  $M < N$ , el problema no tiene solución (no se puede hacer la localización);  
b) Si  $N = M$ , el problema aporta una solución única (de solución cerrada);  
c) Si  $N > M$ , el problema aporta infinitas soluciones, es decir, es un problema sobre-determinado, y se requiere algún método de regresión para obtener la solución óptima.
- **Métodos no iterativos e iterativos:** El conjunto de ecuaciones de localización no es lineal. Este conjunto puede resolverse por métodos iterativos o no iterativos. Los no iterativos se refieren a los algoritmos que resuelven las ecuaciones de localización sin el uso de ninguna aproximación numérica. Estos métodos son simples y fáciles de aplicar. El usuario no se tiene que preocupar por problemas computacionales diversos, como la solución huésped, convergencia, etc. Son, además, más rápidos que los iterativos. El problema que tienen es no ser flexibles para incluir modelos de velocidad. Los métodos iterativos son más flexibles para adaptarse a problemas prácticos. Entre ellos cabe citar el método de Geiger y el método Simplex como los más destacados.

La Figura 2.25 muestra esquemáticamente esta clasificación de métodos.

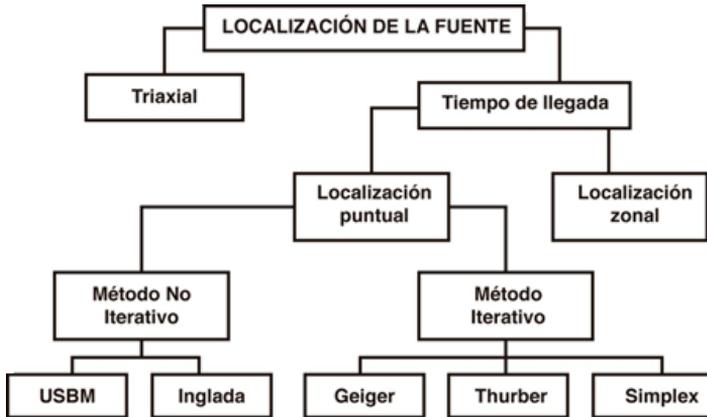


Figura 2.25. Clasificación de los métodos de localización



Figura 2.26. Pasos en un proceso de localización.

Por otro lado, en un proceso de localización, sea puntual o zonal, pueden distinguirse los siguientes pasos (Figura 2.26) antes de proporcionar el resultado final (la ubicación de la fuente, en un punto o en una zona):

- Paso 1: Determinación del tiempo de llegada.** Este es un aspecto fundamental en todo proceso de localización, siendo, además, el origen de muchos errores. La técnica más sencilla y más comúnmente usada en equipos comerciales para ensayos de EA es la de establecer el tiempo de llegada como el primer cruce del umbral (FTC), es decir  $TOA = FTC$ . Sin embargo, la elección del umbral resulta determinante en este caso. Si el umbral es muy alto, el tiempo de llegada está sobreestimado, y si es muy bajo, está determinado de manera errónea por el ruido de fondo. Aparte de esta técnica existen otras más avanzadas, como el método de Akaike o la Transformada Wavelet.
- Paso 2: Construcción del evento.**

- **Paso 3: Algoritmo de localización.** Una vez que se conocen los tiempos de llegada para los diferentes *hits* de cada evento, se debe aplicar un determinado algoritmo de localización para determinar la posición puntual de la fuente (si es un algoritmo puntual) o la zona de la fuente (si es un algoritmo zonal).

Existen multitud de algoritmos de localización específicos para determinados tipos de estructuras geométricas de ensayo (lineal, plana, etc.). El algoritmo básicamente se encarga de establecer una regla por la que se determina la localización. Para ello requiere:

- La posición de los sensores (sus coordenadas).
- El conjunto de eventos, junto con los tiempos de llegada de cada *hit* del evento. Habitualmente se usa la diferencia de llegada entre un *hit* determinado y el primer *hit* del evento.
- La velocidad de propagación de la onda. Esta variable no se requiere en los algoritmos de localización zonal.
- El número mínimo de *hits* que debe tener el evento para que se localice, al margen de que para cada algoritmo ya se requerirá de por sí un número mínimo de sensores.

Entre los algoritmos más habituales cabe citar:

- Lineales, en 1D;
- Planares, en 2D;
- De fondo de tanque, para inspeccionar fondos de tanque;
- Algoritmos de 3D;
- Esféricos.

### 2.2.3.3. Localización lineal por diferencia de tiempos de llegada

La localización en una dimensión (1-D) o localización lineal se usa principalmente en estructuras de ensayo en las que su dimensión en una dirección dada es mucho más grande que sus dimensiones en las direcciones transversales (por ejemplo en la longitud de una columna de un edificio). También se usa cuando la separación entre sensores es grande comparada con el diámetro de la estructura de ensayo (por ejemplo, en tuberías).

Consideremos la posición de los sensores  $S_1$  y  $S_2$  ubicados en el sistema de referencia de la Figura 2.27, en las posiciones conocidas  $x_1$  y  $x_2$ , respectivamente, así como una fuente, F, cuya posición  $x_F$  tratamos de calcular. En este caso, la ecuación general de localización, particularizada para los sensores  $S_1$  y  $S_2$  y asumiendo una velocidad de propagación constante en el medio, nos conduce a que

$$\begin{aligned} vt'_1 &= x_F - x_1 \\ vt'_2 &= x_2 - x_F, \end{aligned} \quad (2.22)$$

de donde, teniendo en cuenta que  $\Delta t = t_1 - t_2 = t'_1 - t'_2$ , se obtiene fácilmente que

$$x_F = \frac{1}{2} v \Delta t + \frac{x_1 + x_2}{2}. \quad (2.23)$$

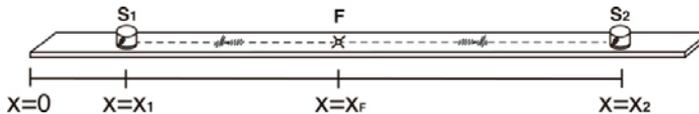


Figura 2.27. Localización lineal de una fuente de EA, F, situada entre dos sensores  $S_1$  y  $S_2$ .

Esta ecuación nos permite obtener la posición de la fuente,  $x_F$ , respecto del sistema de coordenadas elegido, conociendo la velocidad de propagación de la onda en el medio y la diferencia de tiempos de llegada ( $\Delta t$ ) del evento de EA generado por la fuente en los sensores cuya posición es, obviamente, conocida.

No obstante, es importante resaltar que esta ecuación ha sido obtenida bajo la suposición representada en la Figura 2.27, es decir, que la fuente se encuentra entre los dos sensores,

$$x_1 \leq x_F \leq x_2 . \quad (2.24)$$

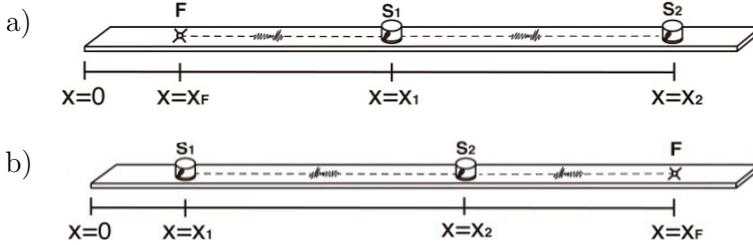


Figura 2.28. Localización lineal de una fuente de EA,  $F$ , no situada entre dos sensores  $S_1$  y  $S_2$ .

Otro caso a estudiar es cuando la fuente se encuentra fuera de la región entre los dos sensores, es decir, si  $x_1 > x_F$  (Figura 2.28-a) o  $x_2 < x_F$  (Figura 2.28-b). Considerando el caso de la Figura 2.28-a ( $x_1 > x_F$ ), se cumple que

$$vt'_1 = x_1 - x_F \quad (2.25)$$

$$vt'_2 = x_2 - x_F ,$$

teniendo en cuenta que  $\Delta t = t_1 - t_2 = t'_1 - t'_2$ , se obtiene fácilmente que

$$\Delta t = \frac{x_1 - x_2}{v} . \quad (2.26)$$

Haciendo un cálculo similar, para el caso de la Figura 2.28-b ( $x_2 < x_F$ ), se llega a que

$$\Delta t = \frac{x_2 - x_1}{v} . \quad (2.27)$$

En las ecuaciones anteriores se observa que la posición de la fuente ( $x_F$ ) no aparece y que la diferencia de tiempos de llegada sólo depende de la separación

entre sensores y la velocidad de propagación. Por lo tanto, no será posible determinar la posición de fuentes situadas fuera de la región comprendida entre los dos sensores. Únicamente, dependiendo del signo de la diferencia de tiempos, será posible determinar si la fuente se encuentra en el lado de un sensor o de otro: Si  $\Delta t < 0$ , la fuente se encontrará a la izquierda del sensor  $S_1$ , y si  $\Delta t > 0$ , la fuente se encontrará a la derecha del sensor  $S_2$ . No obstante, las ecuaciones proporcionan un adecuado procedimiento para calcular la velocidad de propagación efectiva de la onda en el material de estudio, sin más que medir la diferencia de tiempos de llegada,  $\Delta t$ , y la distancia entre sensores, para cualquier fuente situada fuera del rango entre sensores, independientemente de su posición, esto es

$$v = \left| \frac{x_2 - x_1}{\Delta t} \right|. \quad (2.28)$$

Un algoritmo de localización lineal requiere habitualmente (algunos detalles pueden variar según el software usado):

- Un grupo de sensores con los que hacer la localización. Se requiere un número mínimo de 2 sensores, en cuyo caso la solución es única. Si se usan más de 2 sensores, el algoritmo puede incluir el cálculo de una solución óptima, mejorándose así, en general, los resultados.
- La velocidad de propagación.
- Las coordenadas de los sensores:  $x_1$ ,  $x_2$ , etc., respecto de un origen de coordenadas elegido por el usuario.

El máximo número de *hits* por evento. Lógicamente este valor debe ser mayor que 2. Si se usan cuatro sensores, y se elige un máximo número de *hits* por evento igual a 2, sólo se usarán los dos primeros *hits* del evento para la localización.

### 2.2.4. Ondas de Lamb de EA

Las ondas de Lamb son ondas elásticas que se producen en placas delgadas, entendiéndose como placa delgada aquella en la cual las dimensiones en el plano son mucho mayores que el espesor y siendo la longitud de onda del orden de dicho espesor. La placa debe proporcionar superior e inferiormente condiciones para permitir la propagación continua de las ondas, es decir, deben ser superficies libres.

Existen dos modos de ondas de Lamb: modo simétrico ( $S_i$ ) y modo antisimétrico ( $A_i$ ), siendo  $i$  el orden. La Figura 2.29 muestra un esquema de ambos modos. El modo simétrico, que se produce cuando la propagación se realiza a través de la superficie de la placa, se muestra en la Figura 2.29-a. Sin embargo, el modo antisimétrico (a la derecha) se produce cuando la placa vibra en la dirección del espesor (Figura 2.29-b). En esta Tesis se han estudiado los modos  $S_0$  y  $A_0$ , correspondiente al menor orden de los modos.

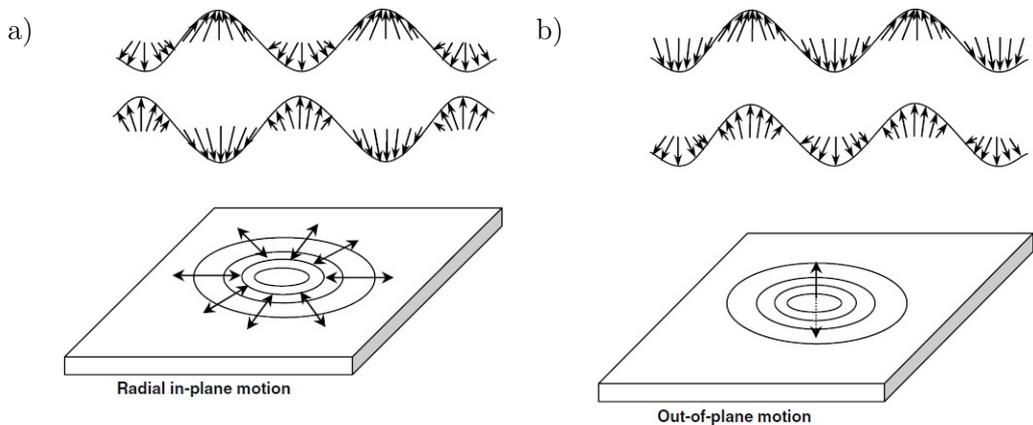


Figura 2.29. Modos de las ondas de Lamb. a) Modo simétrico (S); b) Modo antisimétrico (A).

#### 2.2.4.1. Velocidad de propagación: velocidad de fase y velocidad de grupo

La propagación de las ondas de Lamb se caracteriza en primer lugar por la velocidad de fase ( $c_p$ ) y por la velocidad de grupo ( $c_g$ ). La velocidad de fase se

refiere a la velocidad de propagación de una onda monocromática de una frecuencia particular contenida en la señal, que puede relacionarse con la frecuencia angular ( $\omega$ ) y con la longitud de onda ( $\lambda_{wave}$ ):

$$c_p = \frac{\omega}{2\pi} \lambda_{wave} \quad (2.29)$$

La velocidad de grupo se refiere a la velocidad con la que se propaga toda la forma de la onda en el espacio. Esta velocidad está relacionada con el transporte de energía de la onda. Depende fuertemente de la frecuencia, del espesor de la placa y del modo:

$$\begin{aligned} c_g(f \cdot d) &= d\omega \left[ d \left( \frac{\omega}{c_p} \right) \right]^{-1} = d\omega \left[ \frac{d\omega}{c_p} - \omega \left( \frac{dc_p}{c_p^2} \right) \right]^{-1} \\ &= c_p^2 \left[ c_p - \omega \frac{dc_p}{d\omega} \right]^{-1} = c_p^2 \left[ c_p(f \cdot d) \frac{dc_p}{d(f \cdot d)} \right]^{-1} \end{aligned} \quad (2.30)$$

siendo  $f$  la frecuencia central de la onda,  $f = \frac{\omega}{2\pi}$ ,  $d$  el espesor de la placa y  $c_p$

la velocidad de fase.

Cuando la derivada de  $c_p$  respecto de  $f \cdot d$  es nula, la velocidad de grupo coincide con la velocidad de fase.

Es conocido que el modo S0 tiende a viajar más rápido que el modo A0 en la inmensa mayoría de los materiales.

#### 2.2.4.2. Dispersión de las ondas de Lamb

Como la mayoría de las ondas guiadas, las ondas de Lamb se ven afectadas por la dispersión. Tanto la velocidad de fase como la velocidad de grupo dependen de la frecuencia de la onda y del espesor de la placa. En la Figura 2.30 se muestra la dependencia de las velocidades de grupo y de fase con la frecuencia para los modos A0 y S0 en una placa de aluminio de espesores 1 mm, 2 mm y 4 mm. Se puede observar que ambas velocidades tienden a coincidir en frecuencias

menores cuanto mayor es el espesor de la placa, tanto en el modo A0 como en el modo S0.

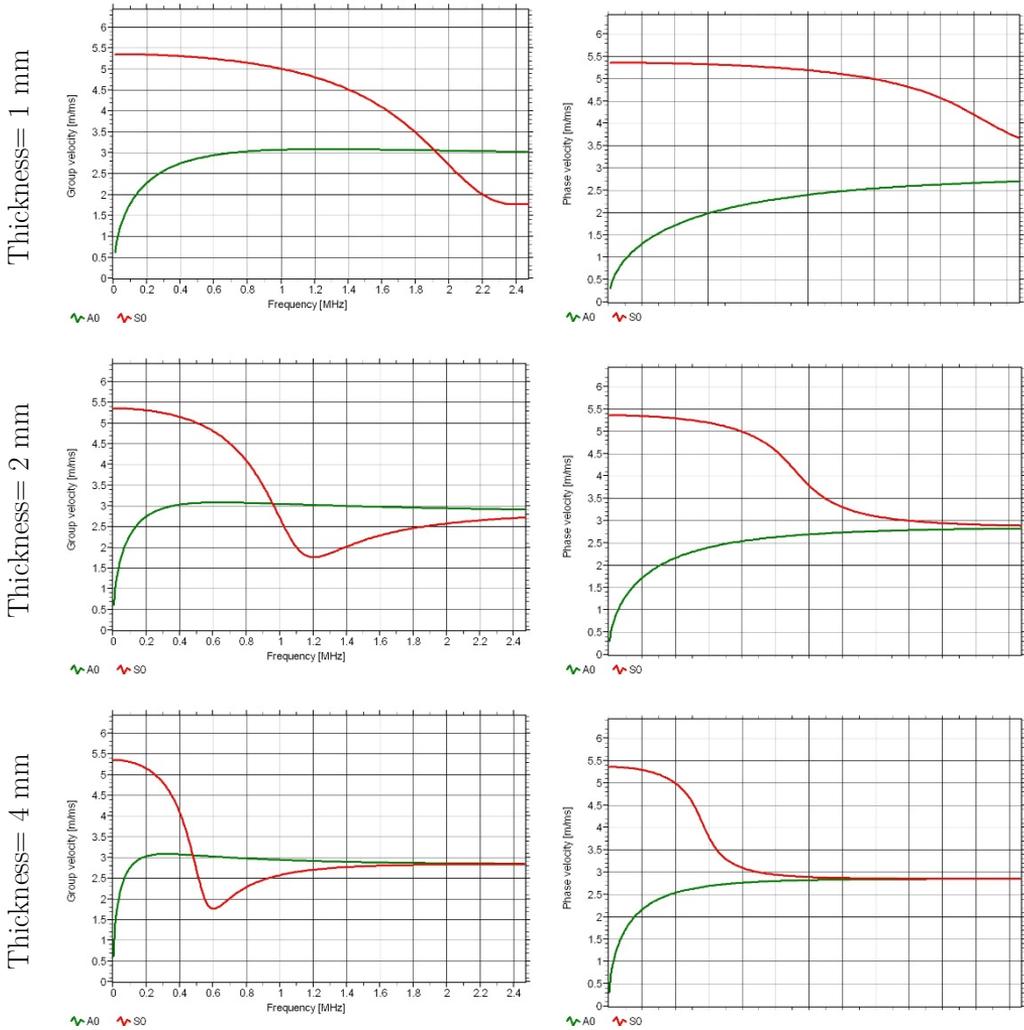


Figura 2.30. Variación con la frecuencia de la velocidad de grupo y velocidad de fase de los modos A0 y S0 en placas de aluminio de diferente espesor (1 mm, 2 mm y 4 mm).

Si analizamos una señal de una onda de Lamb a una cierta distancia después de la propagación, podemos apreciar como las frecuencias pico de los modos S0 y A0 son diferentes entre sí y distintas a la frecuencia central de la señal generada. La variación de la frecuencia central de la frecuencia con la

excitación manifiesta la dispersión de la onda. La Figura 2.31 muestra un ejemplo de dispersión de una onda [101]. La excitación original tenía una frecuencia de 300 kHz. Realizando el análisis espectral de las ondas de Lamb después de propagarse una cierta distancia, se obtuvo que el pico de frecuencia del modo  $S_0$  era de 293 kHz y el del modo  $A_0$  de 332 kHz. Esta desviación de la frecuencia de la excitación indica la existencia de dispersión.

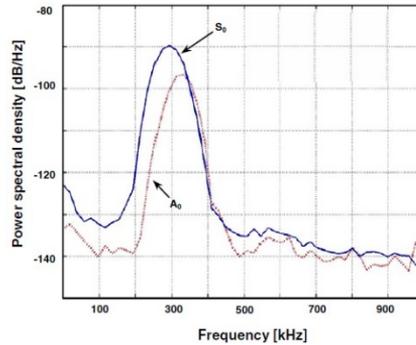


Figura 2.31. Demostración de la dispersión de una onda en los modos  $S_0$  y  $A_0$  después de la propagación a cierta distancia (frecuencia de la excitación: 300 kHz).

En el eje vertical se muestra la densidad espectral de potencia (PSD).

### 2.2.4.3. Atenuación de las ondas de Lamb

La atenuación de ondas en materiales compuestos es un tema importante que determina cómo de lejos puede viajar una onda. La atenuación se refiere a la disipación de energía de la onda con la distancia, manifestada con una reducción gradual de la magnitud de la señal de la onda. Con la existencia de daño o inhomogeneidades, la disipación debería aumentar. Según Pollock [102], hay varios factores que contribuyen a la atenuación, siendo los cuatro más importantes:

1. Dispersión geométrica de la onda
2. Amortiguamiento del material
3. Disipación de la onda en el medio adyacente
4. Pérdidas relacionadas con la dispersión de la onda

Cerca de la fuente de excitación, la atenuación se encuentra dominada por la dispersión geométrica. Para placas con una fuente de excitación omnidireccional, la amplitud de la onda decrece inversamente con la raíz cuadrada de la distancia de propagación. Así, si medimos la magnitud de la onda en dos puntos separados cierta distancia:

$$A_2 = \sqrt{\frac{d_1}{d_2}} A_1 \quad (2.31)$$

siendo  $A_1$  y  $A_2$  las amplitudes de la onda de Lamb a las distancias  $d_1$  y  $d_2$  desde la fuente, respectivamente.

El segundo factor, que domina en campo lejano, es la atenuación de la onda debida al amortiguamiento del material. Dicho factor es el más discutido en la investigación. El amortiguamiento del material compuesto está influenciado por sus componentes, como las fibras, la matriz y la microestructura del material. Las principales fuentes de disipación de energía y amortiguamiento en materiales compuestos son:

- Forma, geometría, tipo y orientación de las fibras
- Interacción fibra-matriz, por ejemplo, concentración de esfuerzos y picos de esfuerzos en la interfaz
- Rozamiento entre fibras y matriz
- Imperfecciones en el laminado: poros, microfracturas, delaminaciones, etc.

La energía puede ser disipada por muchos factores. Este tipo de atenuación, debida al amortiguamiento del material, se aproxima normalmente por una relación exponencial de atenuación respecto a la distancia:

$$A_2 = A_1 e^{\alpha|d_2-d_1|} \quad (2.32)$$

siendo  $\alpha$  el coeficiente de atenuación

Debido al alto amortiguamiento de los materiales compuestos, la atenuación tiende a un decaimiento de la amplitud de las ondas de Lamb mucho mayor que en estructuras metálicas, por lo que la atenuación es un factor crucial en la propagación en campo lejano en materiales compuestos. El amortiguamiento en materiales compuestos es anisótropo, mostrando altos coeficientes de amortiguamiento en matrices dominadas por una dirección, por ejemplo, la dirección transversal en un laminado unidireccional.

La Figura 2.32 muestra la atenuación total de una onda, compuesta por la dispersión geométrica y por el amortiguamiento del material. Se puede observar, como se ha comentado anteriormente, que más cerca de la fuente la atenuación se encuentra dominada por la dispersión geométrica. A una cierta distancia de la fuente, ambas curvas se igualan, siendo dominante a partir de este punto el amortiguamiento del material.

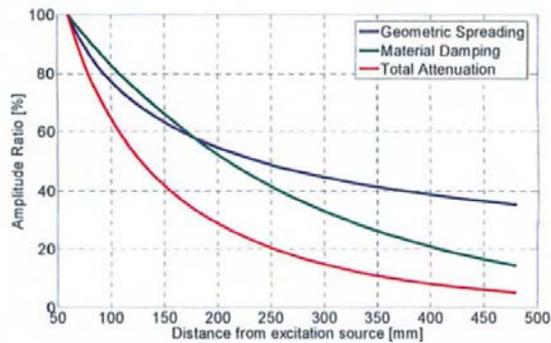


Figura 2.32. Atenuación total de la onda compuesta por la dispersión geométrica y el amortiguamiento del material (La amplitud a 60 mm se considera el 100%, coeficiente de amortiguamiento  $\alpha=0.04$  dB/mm)

Otro de los mecanismos de atenuación está relacionado con las pérdidas de energía en los medios adyacentes, como en una tubería llena de fluido, atenuación en juntas o incluso en estructuras rodeadas de aire. Este mecanismo es comúnmente conocido como “fuga”. Este factor no puede ser obviado en estructuras reales, que son normalmente bastante complejas en comparación con las placas estudiadas en condiciones de laboratorio.

La relativamente alta atenuación del modo A0 puede deberse al movimiento dominante fuera del plano de las partículas, puesto que parte de la energía pasa al ambiente que rodea la placa, comparado con el modo simétrico cuyos movimientos tienen lugar en el plano y la energía queda confinada en el plano. La alta atenuación del modo A0 llega a ser más pronunciada cuando el modo es usado para detectar daño en estructuras inmersas en agua o enterradas, debido al fenómeno de fuga. La presencia de líquidos en una o las dos superficies de la placa puede causar una ligera atenuación en el modo S0 pero mucho mayor en el modo A0. Por ejemplo, a una frecuencia de 150 kHz en una placa de 5 mm de espesor con agua en una de sus superficies, la atenuación del modo S0 es aproximadamente 1 dB/m, mientras que para el modo A0 es de aproximadamente de 57 dB/m [101].

El último mecanismo es la atenuación debida a la dispersión, que ocurre debido a velocidades diferentes para componentes con diferentes frecuencias. Este tipo de atenuación ha sido poco estudiada en la literatura y se comentó en el apartado anterior.

El modelo de atenuación usado en el análisis de los resultados de este proyecto viene dado por

$$A = A_0 \frac{1}{\sqrt{x}} e^{\alpha x} \quad (2.33)$$

Siendo  $A_0$  la amplitud en el punto inicial,  $x$  la distancia actuador-sensor,  $\alpha$  el coeficiente de atenuación - absorción (coeficiente de amortiguamiento).

El término  $\frac{1}{\sqrt{x}}$  se refiere a la contribución de la atenuación geométrica (atenuación por distancia) y el término  $e^{\alpha x}$  es la contribución de la atenuación termoelástica (atenuación por absorción).

Esta última expresión incluye las dos expresiones indicadas anteriormente, la establecida para la dispersión geométrica y la debida a la atenuación del material.

El resultado de un ejemplo experimental para demostrar la existencia de la atenuación se muestra en la Figura 2.33 [101]. Se colocaron 5 sensores piezoeléctricos separados una distancia de 200 mm entre sí en línea recta en una placa de aluminio de 1.6 mm de espesor. El primer piezoeléctrico se usó como actuador. Las señales registradas por los 4 sensores se muestran en dicha figura. Se determinó una atenuación del modo S0 de 0.5 dB/m para una frecuencia de 0.3 MHz. También se observa la capacidad de las ondas de Lamb de mantener su forma original hasta 1 metro de distancia de la generación de la excitación.

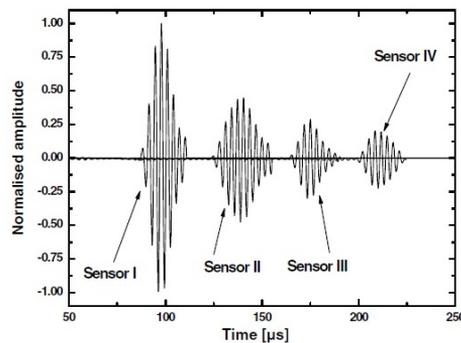


Figura 2.33. Señales registradas por 4 sensores a diferentes distancias del actuador en una placa de aluminio de 1.6 mm de espesor.

## 2.3. El método de vibraciones

### 2.3.1. Definición y fundamento físico

Como es bien conocido, la dinámica de un sistema puede ser descrita mediante su respuesta a las vibraciones. Las propiedades dinámicas de una estructura son función de su masa, rigidez y amortiguamiento. Un cambio en estas propiedades, ya sea debido a pérdida de material, corrosión, degradación, fatiga del material, erosión o fractura, va a tener una influencia directa en el comportamiento dinámico de la estructura. Así pues, los métodos basados en el

análisis de vibraciones, se fundamentan en el principio físico de que los cambios en las propiedades físicas de la estructura producen cambios en la respuesta vibracional del sistema [17].

El objetivo es obtener la respuesta de vibración de un elemento cuando éste es excitado bien de forma natural o mecánica. Con este ensayo se obtienen señales de respuesta que se analizan mediante técnicas avanzadas. Estas señales se pueden analizar desde dos vertientes diferentes. En primer lugar, puede aplicarse para caracterizar de forma dinámica un elemento, es decir, conocer sus parámetros modales: frecuencia natural, modos de vibraciones, etc. En segundo lugar, el ensayo de vibraciones se puede usar para la detección de daño. Este apartado se centra en la detección de daño puesto que es el objetivo con el que se usa en esta Tesis.

### **2.3.2. Ensayo de vibraciones para detección de daño**

La detección de daño basada en vibraciones ha estado muy relacionada con los avances asociados a la evolución y reducción de costes en el análisis de frecuencias y computación digital. Las aplicaciones más exitosas están relacionados con la monitorización de condiciones en maquinarias rotatorias. El esfuerzo más considerable para el desarrollo de este método se produjo entre 1970 y 1980 por la industria del petróleo para la monitorización sus plataformas *offshore*. La industria aeroespacial empezó sus investigaciones a finales de los años 1970 en los transbordadores. Desde 1987 todos los satélites han sido sometidos a un sistema de inspección modal de transbordadores (SMIS). La NASA ha identificado la monitorización de salud estructural (SHM) como una tecnología necesaria para las futuras exploraciones del espacio [103]. En el ámbito de la ingeniería civil se empezó a usar en 1980 para la monitorización de puentes. El puente Tsing Ma que conecta con el aeropuerto de Hong Kong se instrumentó con 600 sensores [103].

### **2.3.3. Metodología del ensayo de vibraciones**

La detección de daño basada en vibraciones presenta un procedimiento general que incluye cuatros pasos que se desarrollan a continuación: evaluación operacional de la estructura, adquisición de datos, extracción de características e información y desarrollo de un modelo estadístico. [103].

#### **2.3.3.1. Evaluación operacional de la estructura**

Un ensayo de vibraciones siempre debe comenzar con la planificación y estudio de las consideraciones sobre la implementación de esta metodología en el elemento: justificación de la monitorización en términos económicos y/o de seguridad estructural, definición de los tipos de daño específicos del sistema y sus posibles localizaciones, definición de las condiciones operacionales y ambientales del sistema y definición de las limitaciones en la adquisición de datos según el ambiente operacional previsto. Es necesario definir la regularidad de los ensayos, bien sean ensayos periódicos o después de eventos importantes.

Una vez constatado que es posible utilizar el ensayo de vibraciones en la aplicación concreta se puede proceder a su realización.

#### **2.3.3.2. Adquisición de datos**

El proceso de adquisición de datos se divide en cinco partes. En primer lugar hay que decidir el tipo de excitación, que puede ser una excitación ambiental o forzada. La vibración ambiental es definida como la excitación dinámica experimentada por una estructura bajo sus condiciones operativas normales [104]. Todas las estructuras están sujetas a una excitación ambiental de orígenes variados como el tráfico o el viento, entre otros. Una desventaja de usar vibración ambiental es que el tipo de entrada es a menudo no estacionario (las características del mismo varían con el tiempo), y que se desconoce la contribución de cada causante particular de la excitación, además de que las fuentes de vibración ambiental producto de impactos no uniformes, producen contribuciones adicionales de ruido en la señal de la vibración de la estructura

[105]. Aunque se reconoce el potencial del uso de vibración ambiental para detectar daños, su implementación práctica para edificios en ambientes no controlados, aún es tema de investigación [106]. La excitación forzada consiste en aplicar una fuerza o desplazamiento de entrada al sistema que se elegirá según el tamaño del elemento, el rango de frecuencias y amplitudes requeridas, el coste y los condicionantes externos. Algunas excitaciones forzadas pueden ser registradas o no. Las señales de excitación forzada pueden ser aleatorias, periódicas o transitorias. La Figura 2.34 muestra un martillo de impacto electrónico de *Brüel & Kjær*, diseñado para excitar y medir la fuerza de impacto sobre estructuras pequeñas y medianas. Además incorpora sensores para medir la señal de excitación que se está aplicando y la fuerza de impacto.



Figura 2.34. Martillo de impacto de *Brüel & Kjær*.

En segundo lugar hay que decidir el sistema de sensorización que convierte la magnitud medida (fuerza, aceleración, desplazamiento, etc.) en una señal analógica, según el tipo de datos a registrar: movimiento, ambientales u operacionales. Los sensores se clasifican en sensores discretos, sensores insertados y sensores sin contacto. Los sensores discretos realizan las medidas en superficie. Entre ellos destacan los transductores piezoeléctricos y los acelerómetros. Los sensores insertados son principalmente sensores de fibra óptica que se integran en la estructura. Los sensores de no contacto son típicamente de naturaleza óptica como holografía láser, GPS o sistemas de medida de desplazamientos láser o microondas. Hay que resolver otras cuestiones relacionadas con los

sensores como número de ellos, tipo, localización, sensibilidad, rango de trabajo, estabilidad, coste, ruido, fiabilidad y estabilidad ambiental.

El sistema de acondicionamiento de la señal está compuesto por los diferentes dispositivos electrónicos e interfaces que facilitan la conexión y dan calidad a las señales de vibración.

En cuarto lugar se encuentra la conversión analógico-digital que convierte la señal analógica captada por el sensor en una señal digital que represente adecuadamente el parámetro físico medido. Hay que considerar varios aspectos como la frecuencia de muestreo que vendrá determinada por la máxima frecuencia a registrar, los filtros analógicos, la duración de la señal registrada y la cuantización.

Por último, se realiza el almacenamiento de la información registrada durante los ensayos.

Es muy importante dejar constancia en el informe del ensayo de cualquier eventualidad surgida durante su desarrollo como cambios ambientales o de las condiciones operacionales.

#### **2.3.3.3. Extracción de características e información**

Es necesario identificar los parámetros sensibles a la presencia de daño y la posibilidad de condensar la información. Hay que conocer y cuantificar las fuentes que aportan variabilidad e incorporar comentarios críticos sobre la adquisición y el proceso de cálculo. Se incorpora en esta etapa el preprocesado de las señales. En esta etapa se pueden caracterizar los parámetros modales del sistema como las frecuencias propias de vibración.

#### **2.3.3.4. Desarrollo de un modelo estadístico**

Para la detección de daño se puede construir un modelo supervisado en el que se disponen de datos del sistema sin daño y dañado o un modelo sin supervisión, en el que solo están disponibles los datos del sistema sin daño. Se

pueden crear tres tipos generales de modelos estadísticos para la detección del daño: clasificación por grupos (modelo supervisado discreto), análisis regresivo (modelo supervisado continuo) e identificación de valores atípicos (modelo sin supervisión).

También se incluyen en estas técnicas otros procedimientos como los que usan un modelado numérico y de detección de respuestas no lineales. Es importante resaltar que no existen modelos estadísticos o características universales aplicables a todas las situaciones, depende del tipo de problema y del tipo de estructura en cuestión.

Un requisito indispensable para el uso de estas técnicas en detección de daño es el conocimiento a priori de la estructura no dañada (modelos analíticos del sistema, modelos de elementos finitos, datos experimentales, etc.). Si este tipo de datos no está disponible, no es posible la detección del daño ya que estos métodos se basan en la comparación y observación de cambios sufridos por la estructura en referencia con su estado sano.

Esta última etapa no es aplicable si se emplea el método de vibraciones para conocer el comportamiento modal de la estructura.

### 2.3.4. Representaciones de un sistema mediante series temporales

Un sistema en general en el que se realiza un ensayo de vibraciones puede ser representado como una caja negra de la que se desconoce su comportamiento, con una entrada  $x(t)$  y una salida  $y(t)$  como se muestra en la Figura 2.35.

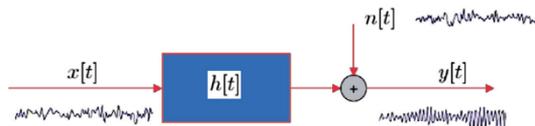


Figura 2.35. Representación general de un sistema.

Si la señal de excitación  $x(t)$  es aleatoria (ruido blanco, viento, turbulencia, tráfico, terremotos, etc.), el sistema responde ante dicho estímulo con otra señal aleatoria  $y(t)$  que en la mayoría de los casos está contaminada por un ruido  $n[t]$  que también es aleatorio.

En este sentido, las series temporales  $x(t)$  e  $y(t)$  son secuencias de observaciones aleatorias que pueden ser escalares o vectoriales. El sistema, representado en la Figura 2.35 como  $h(t)$ , generalmente se considera determinista y estacionario (invariante en el tiempo). Si se desea realizar un modelo del sistema a través de las observaciones de excitación y respuesta, dicho modelo será una representación aproximada del sistema real, dado que depende exclusivamente de las medidas hechas en un determinado tiempo. Dada la aleatoriedad de estas observaciones, el proceso se puede definir como un proceso estocástico, que puede ser descrito en función de la distribución de probabilidad de dichas observaciones aleatorias.

## **2.4. El método de correlación digital de imágenes (DIC, *Digital Image Correlation*)**

### **2.4.1. Definición y principios de operación**

Muchas de las técnicas tradicionales para medir desplazamientos y deformaciones como LVDT, galgas extensiométricas, acelerómetros e inspección visual, presentan algunas limitaciones: son destructivas, de contacto, gran consumo de tiempo, mantenimiento costoso y problemas en su instalación.

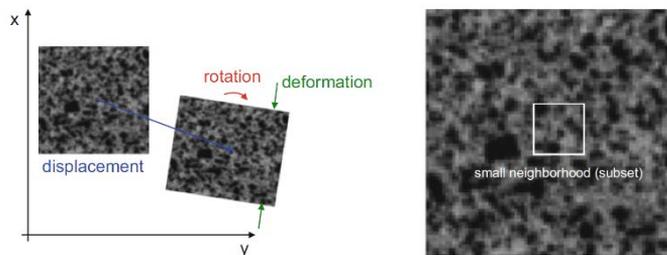
La correlación digital de imágenes (DIC) es un método de ensayo no destructivo que no requiere contacto con el elemento a inspeccionar. Consiste en una inspección visual basada en rastrear y medir los cambios entre imágenes obtenidas secuencialmente de un objeto que se está moviendo y deformando para medir desplazamientos y deformaciones. Se puede aplicar en un amplio rango de escalas, desde  $10^{-9}$  a  $10^2$  m. Constituye una alternativa a las galgas

extensiométricas tecnológicamente muy eficaz, aunque más cara, para evaluar cuantitativamente cambios en el campo de deformaciones, algo que resulta clave para diagnosticar el comportamiento mecánico y de fallo de los elementos estructurales [107]. Aunque el fallo global de un material puede observarse visualmente en muchos casos, para detectar pequeños cambios debidos al inicio del primer fallo es necesario un análisis más minucioso.

Una de los primeros intentos de usar la correlación de imágenes como técnica de medida para registrar características en diferentes vistas de las imágenes se realizó en los años 1950 por Hobrough, uno de los pioneros en fotogrametría digital [108, 109]. Unos años más tarde desarrolló un sistema para obtener la primera medida posicional cuantitativa extraída de un proceso de correlación de imágenes. Con la disponibilidad de imágenes digitalizadas, el área de los algoritmos basados en la visión representados en los métodos DIC ha generado un ámbito de investigación creciente. El desarrollo de los algoritmos del método DIC ha ido acompañado de las aplicaciones en la investigación de materiales. Desde la primera aplicación experimental en ciencia de los materiales en 1982 [110], se han realizado muchos experimentos en el campo de los materiales compuestos de fibra de carbono usando DIC como técnica de medida [111-116]. En las últimas décadas, se han desarrollado aplicaciones para medir deformaciones con gran magnificación (por ejemplo, dentro de un microscopio electrónico de barrido) y sistemas con cámaras de gran velocidad que permiten realizar la correlación digital de las imágenes durante ensayos con alta velocidad de carga [117, 118].

Este método se basa en principios ópticos, de imagen en perspectiva y análisis digital de imágenes. Permite medir cuantitativamente el movimiento, rotación y deformación que se produce entre dos imágenes adquiridas consecutivamente de un objeto como se muestra en la Figura 2.36. En general, no es posible encontrar la correspondencia de un pixel en la imagen subsiguiente debido a que el valor de gris de un único pixel puede encontrarse también en muchas posiciones de otros pixeles en dichas imágenes. Por ello, no hay una

correspondencia única en la posición de un pixel en las siguientes imágenes adquiridas. La solución se encuentra en seleccionar una pequeña zona alrededor del pixel de interés para crear un subconjunto más característico detectable en las imágenes subsiguientes. Esta pequeña zona se usa como referencia y es denominada faceta o *subset*. Sin embargo, si se repiten las estructuras como una cuadrícula de puntos, líneas o cualquier otro patrón regular, la correspondencia única entre imágenes no está asegurada. Es lo que se conoce como problema de correspondencia. Una forma eficaz de eludir este problema de correspondencia única es usar un patrón estocástico (*speckle pattern*) sobre la superficie del elemento. Este patrón suele crearse pintando la superficie de color blanco y pulverizando unos puntos de color negro, como se muestra en la Figura 2.36. Es importante que este patrón estocástico se deforme con el elemento, que no se degrade durante el ensayo y que no refuerce el elemento. Durante el proceso de combinación entre dos imágenes se pueden aplicar varios algoritmos como el algoritmo de Lucas-Kanade [107].



**Figura 2.36.** Seguimiento de los estados de deformación entre imágenes y el patrón de puntos incluyendo una pequeña zona (*subset*) usada en el proceso de correlación de imágenes [119].

En el método DIC se distinguen dos aplicaciones diferentes, bien aplicación 2D o 3D. La configuración típica del método 2D usa una cámara para adquirir las imágenes del objeto. Solo se pueden medir elementos planos. Por tanto, el uso de una única cámara realiza una transformación de la perspectiva de un punto de un objeto en 3D a un punto en 2D. Esto implica que no se recoge información de la tercera dimensión, es decir, de los movimientos fuera del plano. Como se muestra en la Figura 2.37, esto provoca que los puntos  $\overline{O}_1$  y  $\overline{O}_2$

se proyecten en el mismo punto  $\overline{P}_1 = \overline{P}_2$ . Sin embargo, el uso de dos sistemas de cámaras con diferentes ángulos de enfoque permite recuperar la posición 3D de los puntos del objeto. Usando el sistema de visión estéreo el error de medida debido a movimiento fuera del plano puede ser casi compensado, lo que permite estudiar elementos con cualquier forma y medir los movimientos en las tres direcciones.

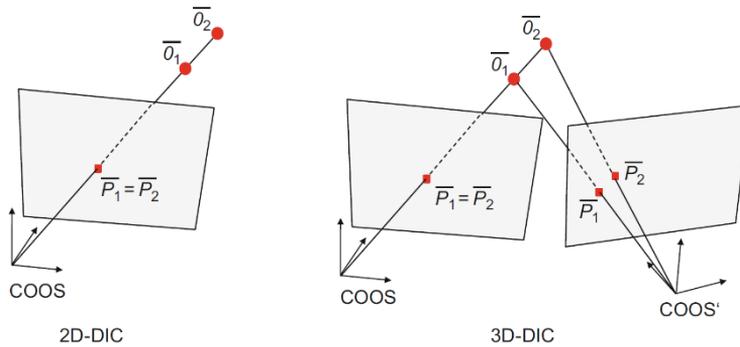


Figura 2.37. Configuración de cámara normalmente usada y proceso para medir las posiciones de objetos 3D. a) Sistema 2D; b) Sistema 3D [119].

La fase de calibración del sistema antes de la realización de las medidas es imprescindible para conseguir unas medidas precisas. Durante la calibración se proporciona información sobre la escala y se crea un volumen de calibración en el que las coordenadas 3D son conocidas. Para ello se usan objetos de calibración que poseen una densa malla de puntos con posición conocida (Figura 2.38) y que proporcionan la información espacial. Se coloca el objeto en diversas posiciones y ángulos a distintas distancias respecto de las cámaras para proporcionar también datos relativos a la profundidad de campo y coordenadas fuera del plano.



Figura 2.38. Objeto de calibración usado en el método DIC.

### 2.4.2. Exactitud del sistema

Para ensayo de materiales, la extracción de desplazamientos cuantitativos y valores de deformaciones de las imágenes adquiridas presenta un gran interés práctico. Por ello, se requiere un conocimiento claro de la exactitud de las medidas. Se pueden distinguir varios factores que influyen en los valores medidos.

Una primera fuente de error es la introducida por el sistema óptico de medida. Se debe a distorsiones en la lente, tales como aberraciones esféricas o curvatura de campo [119]. Sin embargo, estos efectos se pueden compensar mediante un proceso de calibración preciso. Existen otros errores de medida debido a la adquisición digital de las imágenes, al proceso de correlación de imágenes y a la computación del proceso de visión estéreo.

#### 2.4.2.1. Fuentes de error

Es conocido que el método DIC mide desplazamientos con una precisión de sub-píxel y deformaciones de la superficie lateral en el rango  $<10^{-3}$ . Existen varias fuentes referidas al sistema que influyen en el resultado obtenido que pueden deberse a ruido intrínseco de las imágenes adquiridas, errores estadísticos y sistemáticos introducidos por el sistema de calibración, efectos resultantes de

la resolución de la cámara o debidos a incertidumbres intrínsecas del algoritmo de correlación de imágenes.

En primer lugar, los errores de correlación describen incertidumbre de la correlación de las correspondientes posiciones de las áreas a considerar. Estos errores se pueden dividir en sistemáticos y aleatorios. En segundo lugar, errores debidos al uso de métodos 3D-DIC. El método de reconstrucción de coordenadas 3D también introduce fuentes de errores en los valores calculados. Aunque los valores de desplazamiento y deformaciones son cantidades de interés para el ensayo de materiales, el valor primario de medida es el pixel.

Los errores sistemáticos son causados por efectos de sub-pixel que ocurren por la discretización del patrón estocástico. Hay tres factores principales considerados como fuentes de errores sistemáticos: el nivel de ruido de la imagen, la elección del tamaño de las zonas a evaluar y la elección del tamaño del patrón estocástico [107, 120]. El procedimiento típico para determinar la influencia de estos parámetros es la evaluación sistemática y experimental del patrón estocástico. Se mueve el elemento en una dirección una distancia conocida y se calcula esa distancia por el método DIC y se comparan hasta ajustarlo.

Si la imagen presenta ruido, la evaluación correcta durante el proceso de correlación se reduce. Existen algoritmos que se ven muy poco afectados por el ruido aleatorio mientras que otros algoritmos muestran una dependencia lineal con el ruido.

Un efecto general aparece en el tamaño del *subset*. La mayoría de los algoritmos casi no presentan errores de concordancia en función de diferentes tamaños de área (por ejemplo, al aumentar el área desde 6 px a 32 px). Sin embargo, otros algoritmos se ven muy afectados al variar el tamaño de estas áreas provocando una magnificación de los errores de asignación por un factor de cuatro al reducir el tamaño del área.

En general, el mismo efecto se produce con el tamaño del patrón estocástico. Como el *subset* es una versión discretizada del patrón estocástico, ambas elecciones tienen un impacto similar. El error sistemático [121] tiene en cuenta el gradiente de valores en escala de grises de las imágenes inicial y trasladada (o deformada) así como el nivel de ruido. Es una tendencia común que la mayoría de los algoritmos incrementa su sensibilidad a la presencia de ruido cuando se usa un patrón estocástico áspero.

Los errores aleatorios se deben al número limitado de pixels y sus correspondientes valores en cada *subset* y el proceso de correlación entre *sub-subset*. El correspondiente error estadístico decrece con la raíz cuadrada del número de pixels de cada *subset* usado en el proceso de correlación. Otros errores aleatorios se deben a ruido estadístico en la escala de grises, a diferencias de iluminación para las dos cámaras, al contraste de la imagen y al tamaño del patrón estocástico de la superficie de la pieza. Estos errores normalmente se pueden compensar con operaciones de suavizado o de promedio de las imágenes adquiridas.

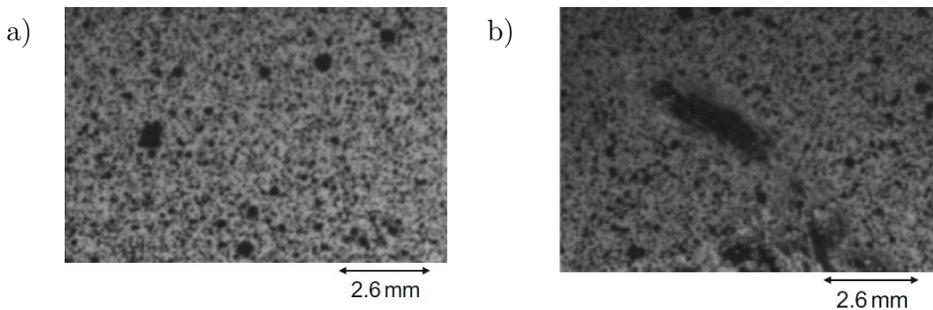
Por último, los errores introducidos durante el proceso de posicionamiento del objeto en la visión en 3D se añaden a los generados en el proceso de correlación. La incertidumbre de los parámetros de la calibración se traduce en errores cuando se reconstruyen las coordenadas 3D tras la correlación de las imágenes de las dos cámaras.

Es importante tener en cuenta la existencia de varios tipos de efectos que pueden generar una computación errónea de valores de deformaciones locales como [119]:

- Partículas de polvo en las lentes. Se puede detectar porque la posición de la partícula no cambia durante la medida.
- Un incorrecto seguimiento del *subset*. Normalmente se debe a imperfecciones en el patrón estocástico que causan un incorrecto

seguimiento del *subset* imagen tras imagen y en consecuencia se obtienen valores de deformaciones altos.

- Un patrón estocástico con defectos. Uno de los defectos es la variación accidental del tamaño de las partículas (Figura 2.39-a). Otro posible defecto es que el patrón estocástico se dañe durante el manipulado previo a la realización del ensayo como se muestra en la Figura 2.39-b. Como consecuencia, las deformaciones calculadas en dichas áreas no proporcionan la suficiente precisión para evaluar pequeñas concentraciones de deformaciones.



**Figura 2.39.** Patrón estocástico con defectos. a) Distribución irregular de las partículas; b) Patrón estocástico parcialmente dañado.

#### 2.4.2.2. Resolución del sistema

Para la interpretación final de los desplazamientos y deformaciones se debe considerar la resolución del sistema, entendida como el intervalo más pequeño que se puede medir. Según los principios de óptica, hay una relación directa con la resolución de los pixels. La resolución teórica espacial del campo de deformaciones está determinada por la resolución de la cámara y la elección de los parámetros del *subset* y se define como pixels por unidad de longitud. La resolución de la cámara depende de la densidad de pixel del sensor de la cámara y la distancia al objeto. Este valor se puede optimizar con la elección del sistema de lentes con diferentes factores de aumento y ajustando la distancia al objeto. Por lo tanto, el desplazamiento medido se obtiene directamente del cambio en pixels por la resolución. De forma análoga, las deformaciones medidas

normalmente se derivan del cambio en pixels relativos a la longitud de referencia local. Por tanto, las deformaciones son más tolerables a la ocurrencia de distorsiones debido a que el desplazamiento y la longitud de referencia están afectados por dichas distorsiones en el mismo modo.

Aunque los sistemas DIC proporcionan una precisión sub-píxel, esto no permite necesariamente la interpretación de los valores de deformaciones a esa escala. Más allá de la resolución de un píxel, el factor limitante es la elección del tamaño del *subset*. En la Figura 2.40 se puede visualizar esta afirmación. Se muestra un ejemplo de cálculo de deformaciones realizado sobre las mismas imágenes con una resolución de 0.028 mm/px pero usando diferentes tamaños de *subsets*. Se puede observar la variación entre los campos de deformaciones al modificar el tamaño del *subset*. Para tamaños más grandes no se observan anomalías en el campo de deformaciones. Al reducir el tamaño del *subset* aparecen dichas anomalías y el campo de deformaciones aparece más detallado a causa del incremento de la resolución espacial generado por el aumento del número de ventanas de *subset*. Cuando la ventana es muy pequeña, como ocurre con 5 píxels, se incrementan los errores de correlación. Cabe destacar que el análisis se hace durante el post-procesado por lo que se pueden modificar el tamaño del *subset* y recalculan las deformaciones.

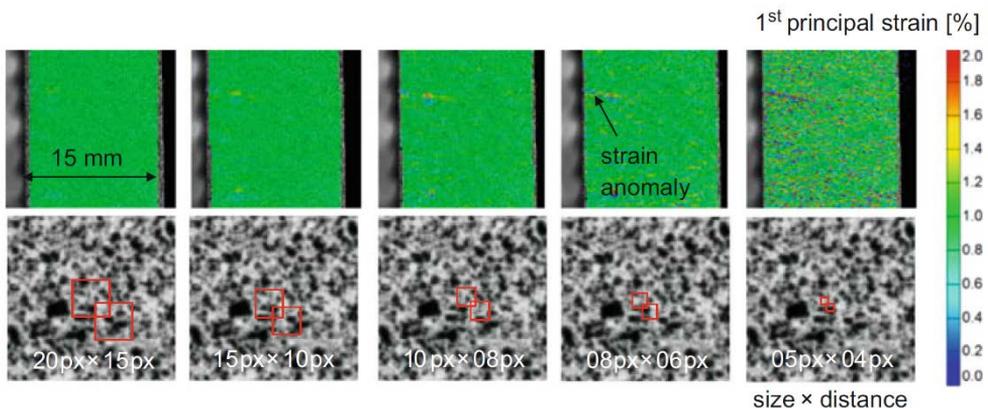


Figura 2.40. Arriba: Campo de deformaciones calculado para las mismas imágenes con una resolución de 0.028 mm/px y tamaños de *subset* diferentes; Abajo: Patrón estocástico con indicación de los *subsets* [119].

Como estimación de las capacidades de los sistemas actuales, para un sistema 3D-DIC y teniendo en cuenta las fuentes de error, los errores de desplazamiento son menores de 0.02 px, lo que genera errores de deformaciones limitados a  $0.05 \cdot 10^{-3}$  cuando se usa una distancia focal de 50 mm o  $0.2 \cdot 10^{-3}$  para distancias focales de 17 mm. Si el desplazamiento entre dos imágenes es pequeño (menor de 50 px) los respectivos errores aumentan linealmente. Para un sistema con lentes de ángulo ancho con una distancia focal de 4.8 mm, las distorsiones introducidas por la cámara no pueden ser suficientemente compensadas durante la calibración [122].

### **2.4.3. Concentración de tensiones**

Según la mecánica de materiales, la presencia de discontinuidades geométricas está asociada normalmente con el concepto de concentración de esfuerzos. La Figura 2.41 muestra el cambio que sufre el flujo de tensiones ante la presencia de un agujero o una fisura cuando el material está sometido a un esfuerzo de tracción. Estas fisuras crean una concentración de tensiones en sus extremos y pueden propagarse después de superar un valor crítico de tensión. Para materiales típicos en la construcción y la ingeniería como metales, polímeros o cerámicos, el tamaño crítico de estas fisuras y los valores de tensión críticos pueden ser obtenidos directamente usando conceptos de mecánica de la fractura [123, 124]. Debido a la complejidad de la microestructura y la forma de las fisuras, una aproximación similar para materiales compuestos de fibra están aún siendo investigados [125-128].

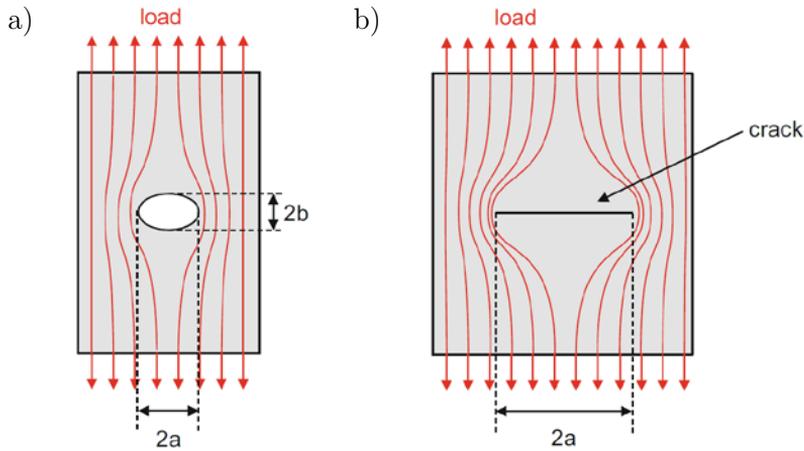


Figura 2.41. Esquema del flujo de tensiones alrededor de un agujero elíptico (a) y de una grieta (b).

La máxima tensión que aparece cerca del extremo de una grieta se sitúa en la región de menor radio de curvatura. Para una grieta elíptica de longitud  $2a$  y ancho  $2b$  (Figura 2.41-a) bajo una tensión aplicada  $\sigma$ , la tensión en los extremos del eje mayor viene dada por

$$\sigma_{max} = \sigma \left( 1 + 2 \frac{a}{b} \right) = \sigma \left( 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{r_c}} \right) \quad (2.34)$$

donde  $r_c$  es el radio de curvatura del extremo de la grieta. El denominado factor de concentración de tensiones es el cociente entre la máxima tensión ( $\sigma_{max}$ ) respecto a la tensión de referencia ( $\sigma$ ) para la sección. El análisis elástico implica que si el radio de curvatura se aproxima a cero, el máximo de tensión se aproxima a infinito. Nótese que el factor de concentración de tensiones es función de la geometría de grieta o el defecto que provoca la concentración de tensiones pero no de su tamaño.

La Figura 2.42 muestra el campo de deformaciones que aparece en una probeta con dos grietas previas obtenido mediante DIC y mediante una simulación con elementos finitos [129]. Se puede apreciar que los valores máximos se obtienen en los extremos de ambas grietas y con los mismos valores.

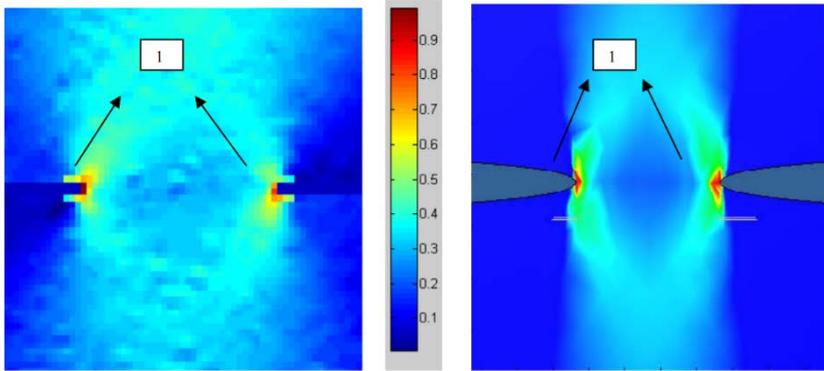


Figura 2.42. Campo de deformaciones de una probeta con dos grietas obtenido mediante DIC (izq.) y mediante simulación con elementos finitos (dcha.) [129].

Basado en la relación entre tensión y deformación de la Ley de Hooke, hay una relación también entre la concentración de tensiones y la concentración de deformaciones. Aunque el comportamiento elástico lineal de un material no es válido para la zona cercana a los extremos de la fisura, se mantiene aún una proporcionalidad distinta entre los valores de concentración de tensiones y deformaciones en el caso de materiales reforzados de fibra [125-128].

Existen varios métodos experimentales para estimar los factores de concentración, entre los que están la fotoelasticidad, shearografía, galgas extensiométricas o correlación digital de imágenes. Se han desarrollado diversas formulaciones analíticas para el diseño de estructuras. Sin embargo, debido a la complejidad del material compuesto por su anisotropía, condiciones de contorno y heterogeneidad, se han propuesto métodos numéricos basados en elementos finitos [126, 128].

Gracias a la combinación de estas consideraciones sobre concentración de deformaciones y la disponibilidad de cámaras de alta resolución para la medida del campo de deformaciones es factible detectar dichas concentraciones producidas por los fallos típicos en los materiales compuestos de fibra gracias a las capacidades de los sistemas DIC.

En todos los casos, después del inicio de la fisura se produce una discontinuidad geométrica en el material compuesto de fibra. Por tanto, el campo de deformaciones está afectado por la presencia de esta discontinuidad. Su efecto dependerá del tamaño de la fisura y del tipo de reducción de rigidez.

#### **2.4.3.1. Detectabilidad de defectos usando DIC**

Para estimar la visibilidad de tales defectos en el campo de deformaciones se presentan algunos ejemplos de estudios para comprobar la aplicabilidad de los sistemas de DIC [130, 131]. Las aplicaciones más importantes son las que detectan defectos que no alcanzan la superficie porque no se pueden detectar visualmente. La Figura 2.43-a muestra el campo de deformaciones obtenido en un probeta de CFRP con una rotura de fibra inducida entre la segunda y tercera capa del laminado calculado con el método DIC [119]. Se observa un gradiente de deformaciones en el eje  $y$  cuyo origen puede ser diverso, como imperfecciones del material, mala adherencia en los tacones del refuerzo o una mala alineación de la probeta durante el ensayo. El mismo ensayo se simuló con elementos finitos y el resultado se muestra en la Figura 2.43-b. Se observa un cambio de deformaciones visible y similar al obtenido con los datos experimentales. Además, la concentración de deformaciones debida al defecto embebido es claro en ambos casos.

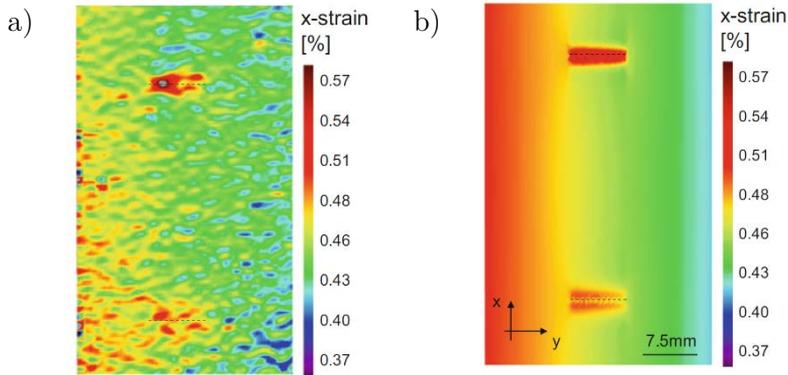


Figura 2.43. Campo de deformaciones de una probeta de CFRP con rotura de fibra.  
 a) Resultado obtenido con DIC; b) Resultado obtenido mediante simulación de elementos finitos [119].

La Figura 2.44 muestra el campo de deformaciones en un laminado con fibras a  $45^\circ$  y  $90^\circ$ . Se observa claramente la concentración de deformaciones alineadas con la direcciones de las capas que indican la rotura de fibras.

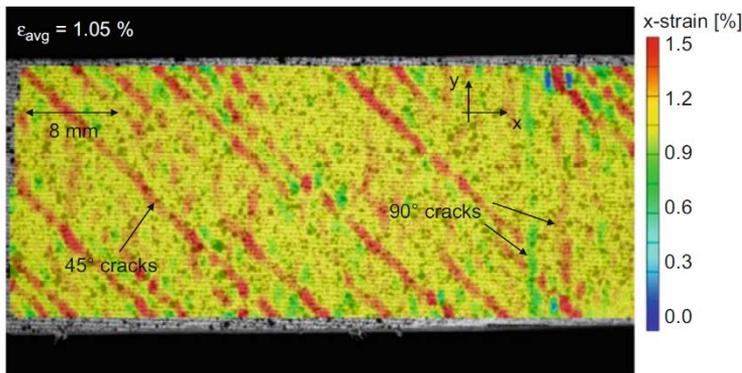


Figura 2.44. Campo de deformaciones obtenido durante un ensayo de tracción con indicación de roturas de fibra a  $45^\circ$  y  $90^\circ$  [119].

Una medida de la concentración de deformaciones se establece mediante comparación entre la deformación media en una región y el valor de la concentración de deformaciones en una zona concreta en la que se encuentra el defecto.

Se establecen varios parámetros para cuantificar las deformaciones. El primero de ellos es la tensión media,  $\langle \epsilon \rangle_{avg}$ , calculada como la media aritmética

de todos los valores de *subset* sin incluir la zona con el defecto. El segundo parámetro es el valor de la deformaciones,  $\langle \varepsilon \rangle_{conc}$ , en la zona del defecto. La medida de la concentración relativa de deformaciones en un área,  $\Delta \varepsilon$ , viene dada por

$$\Delta \varepsilon = |\langle \varepsilon \rangle_{conc} - \langle \varepsilon \rangle_{avg}| \quad (2.35)$$

usando como procedimiento de promediado

$$\langle \varepsilon \rangle_{conc} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \varepsilon_j \quad (2.36)$$

$$\langle \varepsilon \rangle_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_k \quad (2.37)$$

donde  $m$  es el número de *subsets* evaluados en el campo global de deformaciones y  $n$  el número de puntos de evaluación de la concentración de deformaciones en la región del defecto.  $\Delta \varepsilon$  se interpreta como una desviación escalar relativa a  $\langle \varepsilon \rangle_{avg}$ . Esta definición usada para la detectabilidad de un defecto no distingue entre valores positivos y negativos.

La Figura 2.45 muestra el resultado obtenido tras el análisis de resultados de una probeta con una rotura de fibra artificial de 10 mm en la segunda capa del laminado [119]. Se puede observar que la tensión en la zona del defecto es siempre mayor que la tensión media en el resto de la probeta, ambas con un comportamiento lineal. Al dividir el valor de  $\Delta \varepsilon$  por la tensión aplicada, se obtiene un valor casi independiente del esfuerzo aplicado, que se puede atribuir a la relación elástica lineal entre  $\langle \varepsilon \rangle_{conc}$  y  $\langle \varepsilon \rangle_{avg}$  con la carga aplicada. Tomando la media aritmética de estos valores y su correspondiente desviación estándar permite obtener un valor característico para este tipo de defecto en la posición indicada, en este caso  $(0.457 \pm 0.037)$  [% GPa<sup>-1</sup>]. Para obtener un valor característico se debe repetir para un número representativo de evaluaciones.

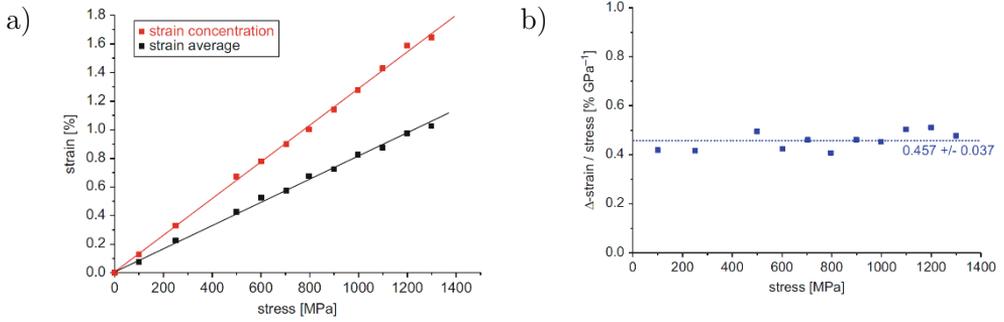


Figura 2.45. Evaluación de una rotura de fibra artificial de 10 mm situada en la segunda capa del laminado. a) Deformación media y deformación en la zona de concentración en función del esfuerzo; b) Diferencia de deformaciones normalizada a la tensión aplicada en función de la tensión [119].

### 2.4.3.2. Limitaciones debido a la precisión del sistema

El último paso para juzgar la detectabilidad de un mecanismo específico de daño consiste en la evaluación de las limitaciones del sistema de medida. Para ellos hay dos parámetros que influyen. El primero de ellos es la detección de la concentración de deformaciones  $\Delta\epsilon$  relativa al ruido de fondo. En segundo lugar, el efecto de apertura dado por el tamaño del *subset* será evaluado con el establecimiento según el límite en la resolución espacial del sistema.

Con referencia a la precisión del sistema, el equipo de medida necesitará detectar un pequeño aumento en la concentración de deformaciones  $\Delta\epsilon$  relativo a las áreas contiguas. El límite absoluto de detectabilidad se puede definir en términos de  $\langle\epsilon\rangle_{avg} \pm \Delta\langle\epsilon\rangle_{avg}$  y  $\langle\epsilon\rangle_{conc} \pm \Delta\langle\epsilon\rangle_{conc}$ , teniendo en cuenta la incertidumbre en ambas medidas. Por tanto, la detectabilidad de un defecto viene dada por

$$\langle\epsilon\rangle_{conc} - (\langle\epsilon\rangle_{avg} + \Delta\langle\epsilon\rangle_{conc} + \Delta\langle\epsilon\rangle_{avg}) > 0 \quad (2.38)$$

Es decir, el valor medio de  $\langle\epsilon\rangle_{conc}$  tiene que ser mayor que  $\langle\epsilon\rangle_{avg}$  más las incertidumbres de ambas medidas  $\Delta\langle\epsilon\rangle_{avg}$  y  $\Delta\langle\epsilon\rangle_{conc}$ . En general, se puede aplicar que una concentración de deformaciones será detectada si  $\langle\epsilon\rangle_{conc} > \langle\epsilon\rangle_{avg}$ .

Como se ha comentado en el Apartado 2.4.2.2, la resolución espacial tiene una implicación directa con el sistema de magnificación usado. La Figura 2.46 muestra el campo de deformaciones en una probeta con una rotura de fibra obtenido con dos lentes diferentes, de 50 mm y 100 mm [119]. Se puede observar que no hay cambios significativos en la deformación media global. Sin embargo, hay diferencias en los valores locales de  $\langle \varepsilon \rangle_{conc}$ , la resolución espacial que proporciona el objetivo de 100 mm es mayor.

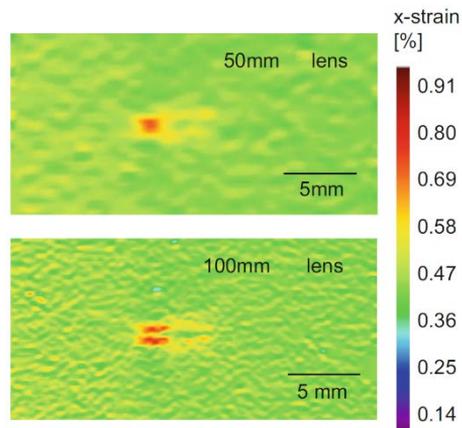


Figura 2.46. Campo de deformaciones registrado cerca de una zona con rotura de fibra en CFRP con diferentes lentes.

**PARTE A:**  
**EVALUACIÓN DE DAÑO EN**  
**DISIPADORES WPD**



### **3.**

## **SISTEMAS DE CONTROL PASIVO DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS. DISIPADOR WPD**

Cualquier tipo de estructura de ingeniería, ya sea un edificio, puente, barco o avión, se encuentra expuesta a cargas dinámicas que pueden ser de origen natural, como las debidas al viento o a movimientos sísmicos, o artificial, como las producidas de forma controlada en un laboratorio. Estas cargas generalmente varían en intensidad, dirección y posición de forma repentina. Cuando una estructura se encuentra sometida a una carga dinámica, desarrolla fuerzas de tipo inercial y puede sufrir deformaciones que no siempre son proporcionales a la intensidad de la carga. La búsqueda de alternativas que permitieran reducir la vulnerabilidad de las estructuras civiles ante los efectos de las cargas dinámicas, comenzó a ser estudiada a comienzos del S.XX cuando se propusieron los primeros sistemas de control estructural.

Este capítulo presenta una revisión del estado del arte de los sistemas de control estructural, comenzando con un breve repaso histórico general, siguiendo con la clasificación de sistemas de protección sísmica según la norma ISO3010:2001, describiendo con más detalle los disipadores histeréticos, para terminar explicando el disipador histerético denominado WPD, *Web Plastifying Damper*, en el que se centra esta tesis.

### **3.1. Sistemas de control estructural**

Los sistemas de control estructural se han desarrollado con el objetivo de reducir y controlar el daño estructural asociado principalmente a sismos. Ante este tipo de cargas dinámicas, las estructuras deben tener un comportamiento adecuado en resistencia, rigidez y ductilidad. Es imprescindible diseñar y construir las edificaciones para que resistan eventos sísmicos grandes sin colapsar y eventos sísmicos recurrentes sin daños en la estructura o daños mínimos o nulos en los elementos no estructurales. Los parámetros dinámicos de una estructura como la masa, la rigidez y la capacidad de amortiguamiento se pueden modificar durante el diseño estructural para controlar los efectos de la carga dinámica [132].

#### **3.1.1. Evolución histórica**

Los primeros experimentos relacionados con los aisladores sísmicos se realizaron entre 1876 y 1895 por el ingeniero inglés John Milne, profesor de Ingeniería de Minas en la Universidad de Tokio. El objetivo era demostrar que era posible aislar una estructura para reducir los efectos de los movimientos sísmicos sobre ella. Los ensayos consistieron en construir una pequeña casa sobre unos cojinetes esféricos de 10 pulgadas de diámetro. Aparentemente el edificio no presentaba buen comportamiento frente a cargas de viento así que repitió el ensayo varias veces hasta determinar que la estructura se volvía estable frente a cargas de viento si el diámetro de las esferas era de 1/4 de pulgada. Fue el primer intento de construir un edificio antisísmico de la historia [132, 133]. En 1885, John Malne envió un informe describiendo este primer experimento a la Asociación Británica de Avance de la Ciencia. También destaca por ser el inventor del primer sismógrafo.

En 1909, J. A. Calantarients de Reino Unido afirmó que un edificio esencial podría construirse en un país sísmico con total seguridad si había una junta entre la base de la estructura y el suelo rellena de un material fino (arena, mica o talco) que le permitiese deslizarse durante el evento sísmico; esto hace que las

fuerzas horizontales transmitidas a la estructura se reduzcan y como consecuencia no colapse. Evidentemente, estaba haciendo referencia al concepto primitivo de aislamiento sísmico.

A partir de la Segunda Guerra Mundial, la tecnología de control estructural experimentó su mayor crecimiento debido a la aplicación de los conceptos de amortiguamiento, aislamiento y absorción de vibraciones en estructuras aeronáuticas [133].

En 1950 se empezó a aplicar la teoría de sistemas lineales al campo de las vibraciones y la dinámica estructural, lo que provocó un rápido desarrollo de estas tecnologías [134]. A partir de 1960 los sistemas de control estructural se adaptaron a las estructuras civiles, con el objetivo de reducir y controlar los efectos de cargas dinámicas naturales como cargas sísmicas y eólicas.

El primer edificio aislado sísmicamente se construyó en 1969 en Skopje, Yugoslavia: el colegio Pestalozzi, un edificio de tres plantas aislado con bloques de caucho en la base para alargar su período de vibración fundamental y reducir las posibilidades de que entrara en resonancia. En la Figura 3.1 se muestra el edificio, junto una sección estructural y una vista de uno de los 54 aisladores de goma natural de  $70 \times 70 \times 20 \text{ cm}^3$ .

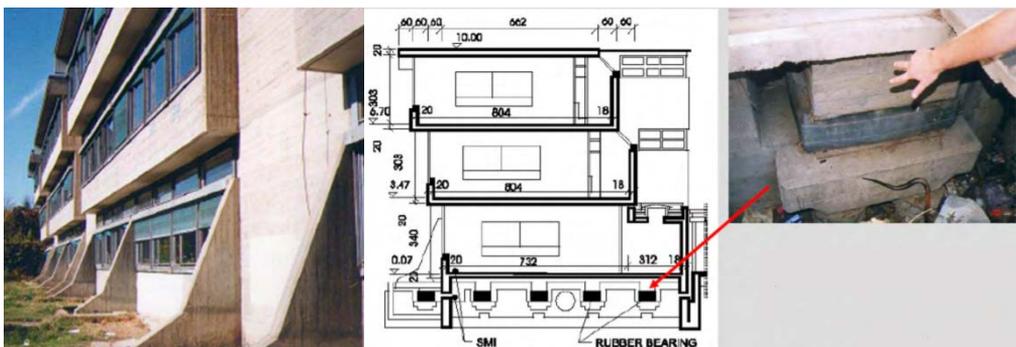


Figura 3.1. Colegio Pestalozzi, primer edificio aislado sísmicamente.

Japón, como país con una elevada sismicidad, fue el pionero en extender y regular el uso de estas tecnologías en sus edificios. Una de las primeras

tecnologías que se emplearon en Japón en los años 80 consistió en añadir finas capas de arena en las bases de las edificaciones, principalmente en protección de templos.

La regulación normativa en Estados Unidos empezó con la publicación de la *Tentative Seismic Isolation Design Requirements* (SEAOC 1986) por la Asociación de Ingenieros estructurales de Carolina del Norte, que se basaba en el diseño con métodos estáticos. Tanto el comité sismológico del SEAOC como el del UBC (*Uniform Building Code*) han ido revisando periódicamente sus códigos y actualizándolos. En 1995 se incorporaron los requerimientos para el diseño de estructuras con aislamiento sísmicos y disipación de energía en el NEHRP (*National Earthquake Hazard Reduction Program*).

En 1994 se celebró el primer *Congreso Mundial sobre Control Estructural* en Los Ángeles, a la vez que se creó la *Asociación Internacional para Control Estructural* (IASC). Sin embargo, la aplicación comercial de los disipadores de energía se extendió tras el terremoto de Kobe de 1995. En Japón se construyeron más de 150 edificios usando estos sistemas [135]. Japón es uno de los países en los que más se utilizan las técnicas de control estructural y donde se ha demostrado su efectividad ante un evento sísmico. Debido a sus alta sismicidad, la población japonesa considera la resistencia del edificio ante terremotos como uno de los principales factores a la hora de adquirir una vivienda. Tras Japón, los países que más aportan al desarrollo de los sistemas de control estructural son Estados Unidos, Italia, Nueva Zelanda y China [133]. España también se está vinculando a la investigación creando nuevos dispositivos sismorresistentes cada vez más accesibles en el mercado.

### **3.1.2. Clasificación de los sistemas de protección sísmica**

La clasificación de los sistemas de protección sísmica se basa en la forma en que disipan la energía de las cargas dinámicas. La norma ISO 3010:2001 *Basis for design of structures – Seismic actions on structures* [136] plantea una

clasificación general en dos sistemas de control de respuesta sísmica: sistemas de control pasivo y sistemas activos e híbridos, como se muestra en la Figura 3.2.

Los **sistemas de control pasivo** están formados por dispositivos de disipación energía que absorben gran parte de la energía aplicada por una acción sísmica sobre la estructura. De este modo, se incrementa el amortiguamiento de la estructura y se modifican sus frecuencias propias de vibración para alejarlas de las frecuencias de la excitación y así evitar la resonancia. Estos sistemas no requieren ninguna fuente de potencia externa para su funcionamiento. A su vez, se pueden clasificar en 3 tipos:

- Aisladores de base: estos dispositivos reducen de una manera considerable las fuerzas que actúan sobre una estructura durante el sismo. Reducen la rigidez lateral del sistema estructural provocando un aumento de su período fundamental y alejando a la estructura de los períodos predominantes del suelo. Consiste en colocar algún tipo de capa flexible entre la estructura y los cimientos. Son elementos muy resistentes y rígidos en dirección vertical, pero flexibles en dirección horizontal [132]. La Figura 3.3-a muestra un ejemplo de edificio con aisladores de base.
- Disipación de energía: en estos sistemas se usan materiales y dispositivos que, en general, aumentan el amortiguamiento, la rigidez y la capacidad estructural. Habitualmente se colocan conectando los nudos viga-pilar entre los que se esperan desplazamientos horizontales relativos importantes. Un esquema se muestra en la Figura 3.3-b. Su principal característica es la capacidad de aumentar la disipación de energía de la estructura mediante la conversión de energía cinética a calor o por la plastificación de los metales [132]. Se pueden usar de forma independiente o en conjunto con otros sistemas. A su vez, los sistemas de disipación de energía se dividen en 3 subgrupos: de tipo histerético, sistemas de fricción y sistemas viscosos.

- Efecto masa: este tipo de amortiguadores utilizan masa de alta densidad y masa líquida para atenuar los efectos de las vibraciones. Suelen realizar un tipo de sintonización entre la resonancia de la masa y de la estructura. Un esquema de un edificio con un amortiguador de efecto masa puede verse en la Figura 3.3-c.

Los **sistemas de control activo** se componen de sensores físicos, normalmente sensores de movimiento y controladores con retroalimentación. Los sensores registran el estado de la estructura y el sistema de control procesa esa información en tiempo real y como respuesta envía una señal al dispositivo de control. Esta señal puede implicar que se aplique algún tipo de fuerza para disipar energía en la estructura. Estos sistemas requieren fuentes de energía externas para funcionar. Se pueden distinguir 3 sistemas de control activo: el efecto de masa adicional (Figura 3.4-a), el control de rigidez (Figura 3.4-b) y el control de fuerza.

Los **sistemas de control híbrido** utilizan una combinación de la tecnología activa y pasiva.

La selección del sistema de protección sísmica a utilizar en una edificación está relacionado con factores muy diversos como la altura, el uso de la edificación, el sistema estructural, el propósito del diseño (rehabilitación o proyecto nuevo), relación coste-beneficio, planeamiento arquitectónico, experiencia del proyectista, sismicidad de la zona, etc.

Para el caso de edificaciones, aunque existen varias proyectadas con técnicas de control activo, semiactivo o híbrido, su aplicación sigue siendo baja debido al alto coste y demanda de procesos de verificación. En general, las estructuras con estas técnicas de control requieren mayor atención a: los dispositivos de control, las fuentes de energía externa, las operaciones de mantenimiento y los métodos de análisis y diseño estructurales. [137].

En este trabajo nos vamos a centrar en un sistema de control pasivo de absorción de energía de tipo histerético de acero.

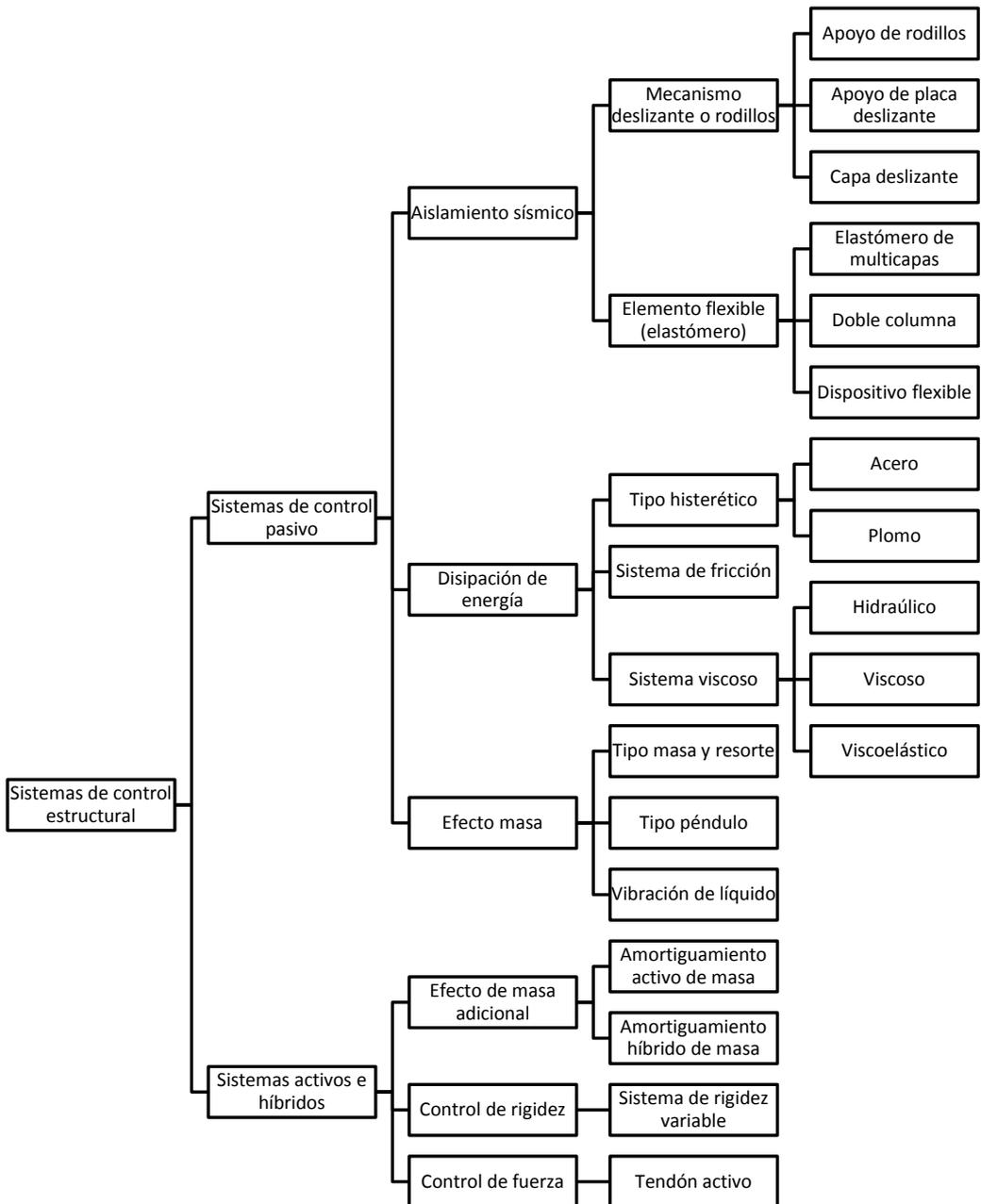
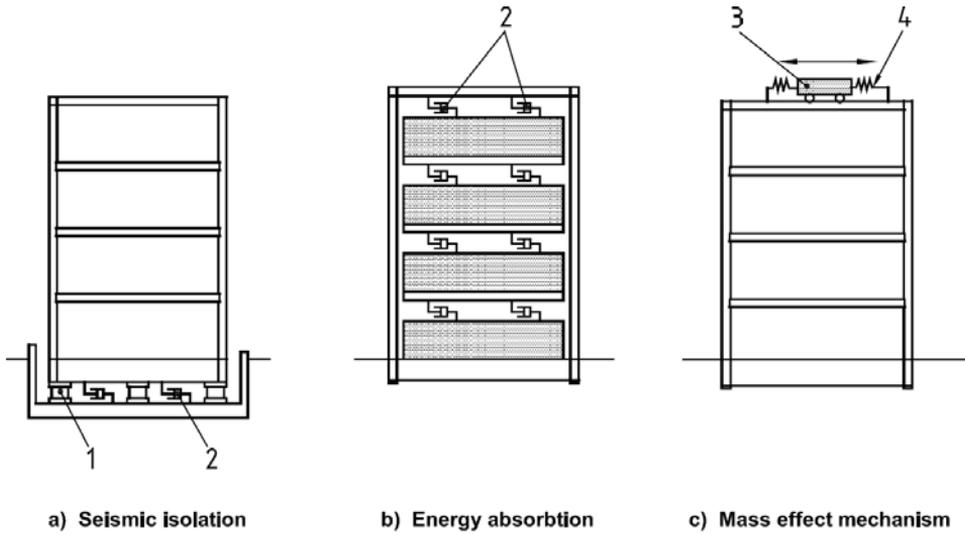
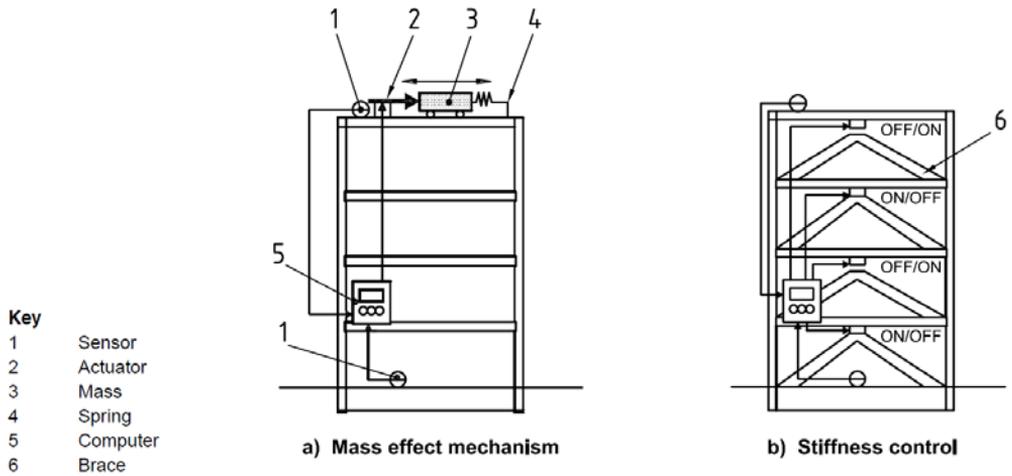


Figura 3.2. Clasificación de los sistemas de control estructural [136].



- Key**
- 1 Isolator
  - 2 Damper
  - 3 Mass
  - 4 Spring

Figura 3.3. Ejemplos de sistemas de control pasivo [136].



- Key**
- 1 Sensor
  - 2 Actuator
  - 3 Mass
  - 4 Spring
  - 5 Computer
  - 6 Brace

Figura 3.4. Ejemplos de sistemas de control activo [136].

### 3.1.3. Disipadores histeréticos

Los disipadores histeréticos son un sistema de control pasivo que disipa la energía en forma de energía térmica y a través de la fluencia de los metales. Son denominados histeréticos ya que la disipación de energía depende principalmente del desplazamiento relativo y es poco sensible a la velocidad relativa [138]. Existen numerosos modelos de comportamiento histerético comúnmente usados para representar la relación fuerza-desplazamiento no lineal de los disipadores. Existen también diversas aproximaciones a su capacidad límite.

Estos disipadores se consideran una buena alternativa para el control estructural debido al comportamiento histerético estable, la fiabilidad a largo plazo y la insensibilidad a la temperatura ambiental. Como principales desventajas destacan su comportamiento no lineal y la necesidad de reemplazo tras una carga sísmica.

A continuación se exponen algunos de los disipadores histeréticos más usados.

#### 3.1.3.1. Disipadores de barras de pandeo restringido (*Buckling-Restrained Brace, BRB*)

El disipador de barras de pandeo restringido consiste en un elemento lineal metálico compuesto de un núcleo de acero de bajo límite elástico embebido que transmite la fuerza axial, recubierto por una capa confinadora que restringe la abolladura ante las fuerzas compresoras. Así, estos disipadores presentan una respuesta similar en compresión y tracción, por lo que su comportamiento histerético se simplifica. Normalmente, el disipador BRB se instala en tubos, aunque puede colocarse también confinado en paneles.

Estos dispositivos se empezaron a estudiar en 1971 en Japón en muros de cortante con diagonales de acero embutidas [139]. Desde entonces, se han creado múltiples tipos de BRBs [140] variando el material del confinamiento del núcleo (resinas de silicona, resina epoxi, mortero, cintas vinílicas...), las secciones

transversales y los tipos de acero del núcleo. La Figura 3.5 muestra un disipador BRB de la casa comercial *CoreBrace México* utilizado en la rehabilitación para mejorar la estabilidad sísmica de la Biblioteca Marriot en Salt Lake City, en Utah (Estados Unidos). Gracias a esta mejora, el edificio está preparado para soportar un terremoto de magnitud 7.2.

Los disipadores BRB presentan grandes prestaciones y están muy estudiados en estructuras de acero. Como inconveniente, requiere una fabricación con tecnología industrial avanzada y muy especializada, por lo su aplicación podría considerarse excesiva en zonas de sismicidad moderada.

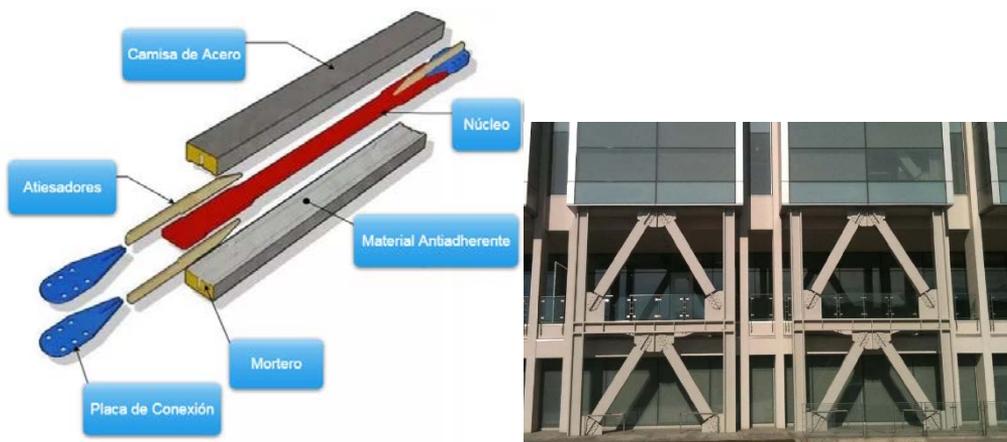


Figura 3.5. Disipador BRB de la casa comercial *CoreBrace México*. Izq.: Componentes del disipador. Dcha.: Disipadores BRB instalados en la Biblioteca Marriot en Salt Lake City, Utah, USA.

### 3.1.3.2. Disipador tipo *Added Damping and Stiffness System* (ADAS)

Este disipador está compuesto por múltiples chapas de acero colocadas en paralelo, sujetas por perfiles auxiliares en sus partes inferior y superior como se muestra en la Figura 3.6. Es un sistema de disipación de energía de elevada rigidez. Normalmente, la geometría de las chapas es en X puesto que en esta disposición las tensiones se distribuyen de manera uniforme en la sección variable de la pieza, resultando curvaturas mayores que las obtenidas para

piezas rectangulares en un mismo desplazamiento [141]. La energía disipada por estos elementos se debe a la plastificación de los elementos metálicos, por lo que después de una carga sísmica considerable el disipador queda dañado y podría ser necesario su reemplazo.

También se ha investigado el comportamiento de estructuras con este tipo de disipadores en cobre, denominados Cu-ADAS, dada la baja ductilidad, baja carga de fluencia y resistencia a la corrosión de este material.

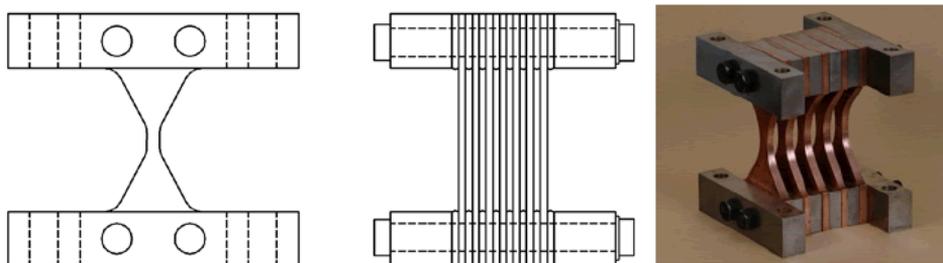


Figura 3.6. Disipador tipo ADAS.

### 3.1.3.3. Disipador *Triangular Steel plate Added Damping and Stiffness (TADAS)*

Se trata de una variante del disipador ADAS [142] en el que las piezas de acero tienen forma triangular (Figura 3.7). La innovación de este diseño consiste en que un extremo está empotrado por soldadura, mientras que la conexión del otro extremo asegura el movimiento libre en la dirección vertical por la disposición de las ranuras. La gran ventaja de estos disipadores es que el efecto de las cargas gravitatorias puede separarse completamente de los efectos de los desplazamientos horizontales de los pisos. Así, el disipador sólo tiene solicitaciones de flexión, facilitando la simulación de su plasticidad y eliminando el riesgo de inestabilidades por pandeo.

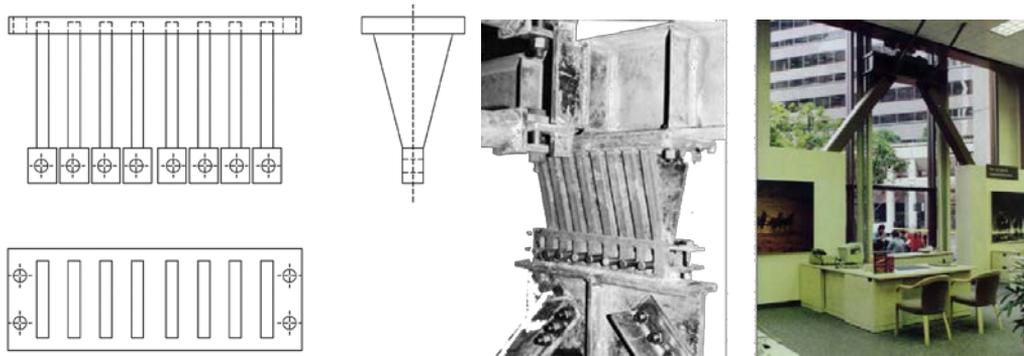


Figura 3.7. Disipador tipo TADAS.

### 3.1.3.4. Disipador *Steel Slit Damper* (SSD)

El disipador *Steel Slit Damper*, SSD, fue desarrollado en 2007 por Chan y Albermani [143]. Consiste en una hilera de fragmentos de acero doble T con el alma ranurada como se aprecia en la Figura 3.8. Este disipador se instala en una diagonal chevron, lo que permite la colocación de varias piezas unidas. Bajo la aplicación de las cargas laterales, las pequeñas columnas verticales de acero se comportan como vigas fijas por sus extremos y sufren deformación en doble curvatura.

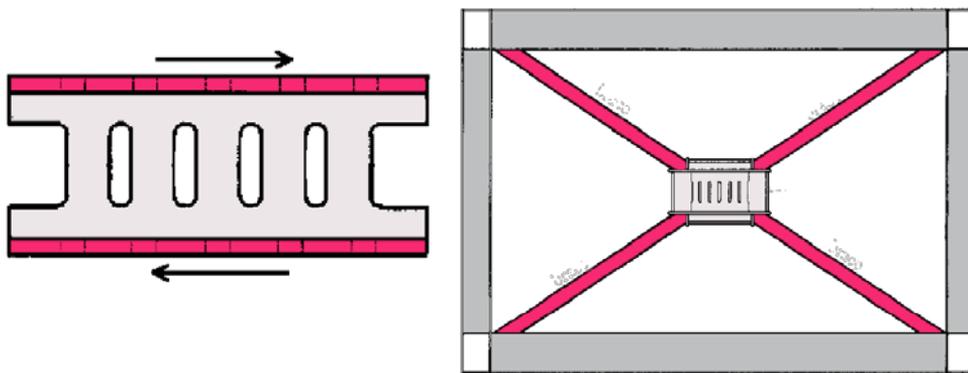


Figura 3.8. Disipador tipo SSD.

### 3.1.3.5. Disipador *Honeycomb Damper System* (HDS)

Este tipo de disipadores, con forma de panel, consiste en una placa metálica, generalmente acero, con ranuras en la parte central, formando una configuración tipo rejilla, dividiendo el mismo en tres zonas claramente definidas: los dos extremos son rígidos mientras que la zona central es la encargada de disipar la energía. Esta zona plastifica de manera uniforme proporcionando una respuesta histerética estable. Presenta el mismo principio de disipación de energía que los sistemas ADAS y TADAS explicados anteriormente, con la diferencia de que la placa se coloca en dirección paralela a la acción de la excitación lateral.

Estos disipadores se pueden instalar en las tres configuraciones diferentes que se muestran en la Figura 3.10.



Figura 3.9. Disipador tipo HDS de la empresa *Kajima Corporation* instalado en muro de hormigón.

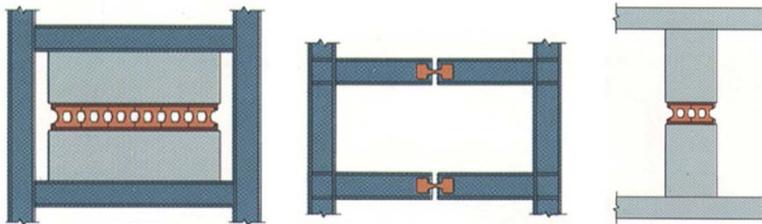


Figura 3.10. Configuraciones de instalación del disipador HDS. Izq.: Instalación en muro (WDS). Centro: Instalación en vigas (BDS). Dcha.: Instalación en pilares (PDS).

### 3.2. Disipadores histeréticos WPD (*Web Plastifying Damper*)

Los disipadores histeréticos *Web Plastifying Damper* (WPD) son unos dispositivos de disipación pasiva de energía basados en las propiedades histeréticas y de deformación plástica del acero. Estos disipadores han sido desarrollados por el Dr. Amadeo Benavent-Climent, patentados por la Universidad de Granada y se encuentran en explotación por la empresa Heliopol S.A.

#### 3.2.1. Descripción del disipador WPD

El disipador WPD se compone de varios segmentos de perfiles estructurales de acero en forma de doble T (secciones IPE), que conforman la parte disipadora. Estos perfiles se ensamblan en unos elementos auxiliares de acero en forma de U mediante tornillos de alta resistencia, como se muestra en la Figura 3.11.

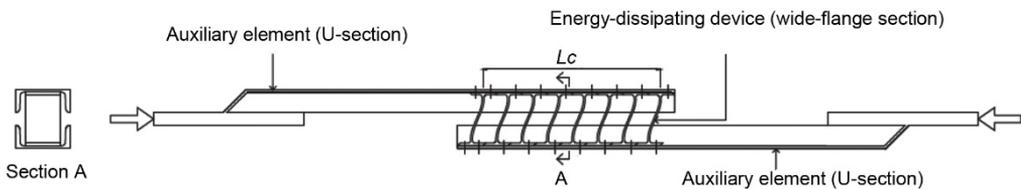


Figura 3.11. Disipador WPD.

Tanto las dimensiones de las secciones I como el número de ellas que conforman el disipador (Figura 3.12) se determinan en función de las especificaciones estructurales de cada caso.

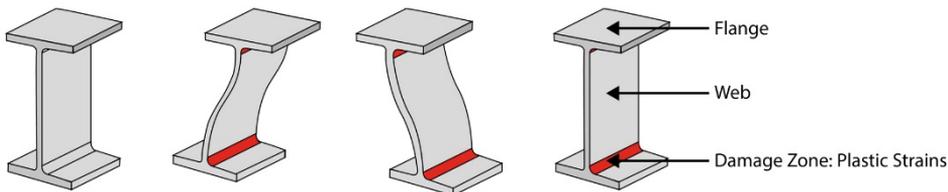


Figura 3.12. Secciones I y patrón de deformación.

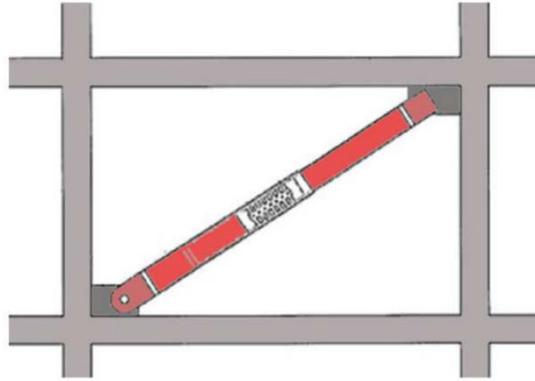
Cuando el disipador WPD se somete a deformaciones en la dirección de su eje, el alma de las secciones I sufre deformaciones fuera del plano como se muestra en la Figura 3.12. Estas deformaciones crean zonas de plastificación en las uniones entre el alma y las alas de la sección. Las deformaciones plásticas de las secciones son las responsables de la disipación de la energía [2].

Benavent-Climent y su equipo [3, 7] han realizado diversos ensayos aplicando cargas cíclicas a estos segmentos I hasta la rotura. Estos ensayos permitieron analizar la capacidad de disipación de energía y su comportamiento histerético. Tras la realización de los ensayos experimentales, se formuló un modelo numérico para predecir el comportamiento histerético de las secciones ante una carga arbitraria. También se planteó un procedimiento para predecir la carga máxima de disipación de energía para una sección y realizar una previsión de su rotura.

### **3.2.2. Fabricación e instalación del disipador WPD**

Las estructuras con disipadores WPD están formados por una estructura primaria encargada de soportar y transmitir las cargas gravitatorias, y de una serie de disipadores de energía que trabajan en paralelo a dicha estructura, cuya función es absorber las deformaciones provocadas por los movimientos laterales causados por el sismo. De esta forma, el daño provocado por el terremoto se concentra en los elementos disipadores, protegiendo así el resto de la construcción.

En una estructura porticada, los disipadores WPD se colocan de forma diagonal en el marco de la misma, como puede verse en la Figura 3.13. No precisa de ninguna estructura secundaria auxiliar. El disipador WPD puede ser soldado, anclado o atornillado a unas chapas de sujeción que se instalan en el nudo pilar-viga. En la Figura 3.14 se muestra un detalle de la fijación mediante soldadura del disipador WPD a la chapa de sujeción colocada en la unión viga-pilar en la estructura principal del edificio.



**Figura 3.13.** Instalación del disipador WPD en una estructura porticada.



**Figura 3.14.** Detalle de la fijación soldada del disipador WPD a la chapa de sujeción entre los nudos viga-pilar en la estructura principal del edificio.

El disipador WPD se puede colocar, no sólo en construcciones de obra nueva, sino también en rehabilitaciones y reacondicionamientos sísmicos de edificios ya construidos. Cuando se tiene en cuenta la aportación de los disipadores durante el cálculo estructural, es posible reducir el tamaño de los elementos estructurales, produciéndose una reducción de la inversión inicial para la estructura principal. Ese ahorro económico se invierte en la implementación de los disipadores, por lo que, se obtienen estructuras de coste similar pero con una protección sísmica más elevada y una protección adicional de los elementos principales. En consecuencia, ante un sismo, los daños de la estructura principal serían menores, con una reparación a menor coste y mayor rapidez [137].

Al contrario que otros disipadores, los WPD no requieren extrema precisión en su fabricación ni mantenimiento, su diseño es sencillo, y están conformados con materiales utilizados tradicionalmente en la construcción, lo que significa que su coste de producción es bajo.

Su fabricación es sencilla: consiste en cortar un perfil IPE en segmentos I de una longitud establecida y realizar en cada una de sus alas cuatro orificios de conexión para colocar los tornillos que unen la sección I con las barras auxiliares. Las barras auxiliares pueden conformarse con perfiles UPN, que proporcionan mayor estabilidad al sistema. Como condición la serie de UPN debe ser tal que entre las caras internas de sus alas puedan fijarse las secciones-I.

En caso de que tras un sismo de elevada magnitud las secciones I agotasen su capacidad de disipación de energía, pueden ser fácilmente sustituidas por unas nuevas, lo que lo convierte en un sistema económico y viable para un uso extenso para todo tipo de edificaciones, sobre todo, en países en desarrollo.

### **3.2.3. Ventajas e inconvenientes del uso de disipadores WPD**

El uso de este tipo de disipadores presenta diversas ventajas. A continuación se explican algunas de ellas:

- Una de las ventajas más importantes es la sencillez de su diseño, lo que permite su uso en construcciones de carácter general y cuando el presupuesto sea limitado.
- El uso de disipadores WPD permite concentrar el daño de un terremoto en las secciones I del disipador, cuyo nivel de deterioro puede ser evaluado y, en su caso, sustituirlas. Esto hace que el daño en la estructura principal se reduzca.
- Los resultados experimentales [3] han demostrado que el disipador WPD presenta un comportamiento histerético robusto y estable. También se

puede predecir, bajo cargas cíclicas, el daño mecánico en el mismo y la proximidad a la rotura.

- El disipador está diseñado con materiales comúnmente usados en la construcción, por lo tanto, son fáciles de conseguir y su precio se reduce.
- El precio de la instalación y la puesta en obra es relativamente bajo.
- La vida útil de los disipadores es relativamente alta, siempre que su capacidad de disipación no se agote.
- Los disipadores WPD se pueden utilizar tanto en edificación nueva como en obras de rehabilitación y en refuerzo de estructuras existentes.
- No se requiere la interrupción del funcionamiento de la estructura durante la instalación ni el reemplazo del disipador.
- Simplicidad en la instalación en distintos tipos de estructuras, no requiere de mano de obra altamente cualificada.

Como inconvenientes cabe destacar que se ha desarrollado para zonas de sismicidad baja y media, por tanto, no se recomienda su uso en zonas de sismicidad elevada, donde se requieren otro tipo de dispositivos.

## 4.

# APLICACIÓN DEL MÉTODO DE VIBRACIONES. EXPERIMENTOS

### 4.1. Monitorización de daño con vibraciones

Como ya se ha explicado en el capítulo anterior, los disipadores histeréticos disipan la energía gracias a la deformación plástica de los metales. Evaluar el nivel de daño de los disipadores después de un sismo es un gran reto, puesto que la decisión sobre la necesidad de reemplazar dicho disipador tiene grandes implicaciones económicas y de seguridad estructural. No es necesario reemplazar los disipadores histeréticos después de un terremoto de pequeña o media intensidad, incluso, tampoco después de un gran terremoto, si éstos aun poseen una alta capacidad de disipar energía. Estas condiciones provocan que la evaluación del nivel de daño sea algo esencial para determinar la vida útil del disipador, es decir, la capacidad que aún posee de disipar energía ante un nuevo terremoto.

La evaluación de daño en los disipadores WPD debida a la plastificación del acero no puede basarse en una simple inspección visual, puesto que para que el daño sea visible el elemento debe estar muy cercano al fallo. El equipo de investigación del profesor Benavent-Climent ha demostrado que el nivel de daño y la proximidad al fallo de los disipadores histeréticos sometidos a cargas cíclicas

arbitrarias puede ser estimado mediante la descomposición de las curvas fuerza-desplazamiento del disipador en las partes *skeleton* y Bauschinger [2]. Mediante esta descomposición se obtiene el índice de daño mecánico llamado ID que ha sido validado extensamente en ensayos estáticos y dinámicos [2, 3, 7]. Sin embargo, la medida de la fuerza y el desplazamiento sufrido por los disipadores durante un terremoto implica la instalación de sistemas de instrumentación muy costosos (células de carga, galgas extensiométricas y transductores de desplazamiento). El coste de esta instrumentación es difícil de justificar cuando la probabilidad de ocurrencia de un terremoto es muy baja.

Una alternativa es el uso de sensores piezocerámicos pegados a los disipadores WPD y la realización de ensayos simples de vibraciones [4, 7, 11, 12]. Los sensores piezoeléctricos son dispositivos de bajo coste que pueden excitar y medir la respuesta del elemento cuya salud se quiere evaluar.

La detección de daño basada en vibraciones está basada en la correlación que existe entre la respuesta vibracional de una estructura y la presencia de daño [10]. El daño debido a deformaciones plásticas induce cambios en la respuesta ante un ensayo de vibraciones: frecuencias de resonancia, modos, coeficientes de amortiguamiento, etc. Estos cambios pueden ser evaluados mediante el uso apropiado del procesamiento de señales registradas por sensores piezoeléctricos y correlacionarlos con la presencia (Nivel 1 en *Structural Health Monitoring*, SHM), posición (Nivel 2 en SHM), tipo (Nivel 3 en SHM) e intensidad del daño (Nivel 4 en SHM).

Aunque existen publicaciones sobre detección de daño en estructuras y materiales usando análisis temporal de vibraciones [7, 10], nuestro grupo de investigación ha sido el primero en evaluar el daño en disipadores histeréticos, comparando y correlacionando dicho daño con el daño mecánico sufrido por los disipadores durante un evento sísmico.

El ensayo de vibraciones aplicado a la detección de daño en disipadores de energía consta de los siguientes pasos:

1. Preparación de las secciones I y colocación de la instrumentación.
2. Realizar la excitación del elemento induciendo vibraciones.
3. Registrar su respuesta vibracional.
4. Realizar el análisis de las señales registradas aplicando los distintos algoritmos explicados en el Capítulo 5 de esta Memoria.

A continuación se explica el sistema de instrumentación, el sistema de medida y el tipo de excitación utilizado para la realización de los ensayos de vibraciones para la determinación del daño en las secciones I que componen el disipador WPD.

#### **4.1.1. Sistema de instrumentación**

##### **4.1.1.1. Transductores piezoeléctricos**

Aunque existen multitud de sistemas de instrumentación, en este trabajo nos hemos centrado en los transductores piezoeléctricos de tipo cerámico; en concreto, en los denominados PZT (cerámica de Titanato Zirconato de Plomo).

Este tipo de transductores se basa en el efecto piezoeléctrico de los materiales. La palabra *piezo* procede del griego “presión”. En 1880, Jacques and Pierre Curie descubrieron una inusual característica de ciertos minerales cristalinos: cuando se someten a una fuerza mecánica, en los cristales se producen cambios eléctricos, se polarizan. Denominaron a este fenómeno “efecto piezoeléctrico”. Se percataron de que la tracción y la compresión generan voltajes de polaridad opuesta y proporcionales a la fuerza aplicada. Este comportamiento se conoce como “efecto piezoeléctrico directo”. Posteriormente, se confirmó la relación inversa: si los cristales se exponen a un campo eléctrico, su longitud aumenta o disminuye de acuerdo a la polaridad del campo y en la misma proporción de la intensidad de dicho campo. Este comportamiento se denomina “efecto piezoeléctrico inverso” [144].

Aunque las magnitudes de voltaje piezoeléctrico, movimientos o fuerzas son pequeñas y a menudo requieren amplificación, los materiales piezoeléctricos se han adaptado a un amplio rango de aplicaciones. Un mismo transductor piezoeléctrico puede comportarse siguiendo el efecto piezoeléctrico directo o el inverso. El efecto piezoeléctrico se usa cuando el transductor funciona como sensor: transforma las deformaciones mecánicas que sufre el material cuando está vibrando en una señal eléctrica para transmitirla al sistema de medida, es decir, convierte energía mecánica en eléctrica. Cuando el transductor hace la función de actuador utiliza el efecto piezoeléctrico inverso: transforma la señal eléctrica transmitida por el generador en una señal de movimiento que hace vibrar el elemento [144-146]. El efecto piezoeléctrico inverso según el voltaje aplicado se muestra en la Figura 4.1.

Cuando un material piezoeléctrico deja de ser sometido a un campo eléctrico, se relaja y recupera su forma. De la misma manera, cuando el material deja de someterse a tensiones mecánicas, el potencial de voltaje y la carga eléctrica generadas son nulas.

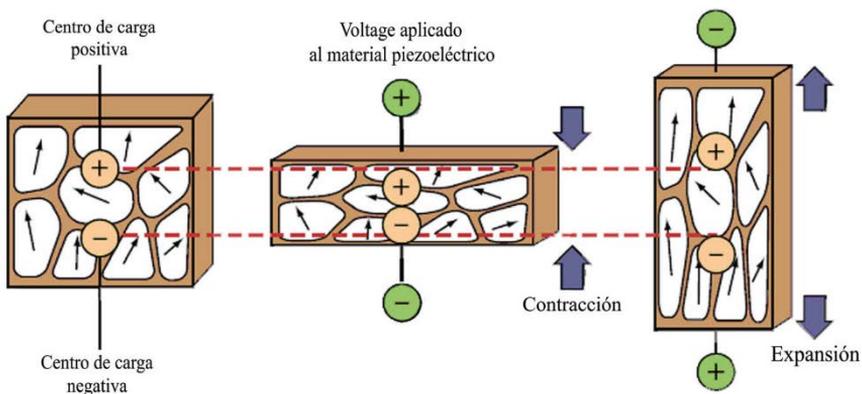


Figura 4.1. Efecto piezoeléctrico [145].

Los materiales piezoeléctricos se clasifican en dos grandes grupos: los piezoeléctricos naturales, que carecen de aplicación comercial en la actualidad, y los piezoeléctricos sintéticos. En la fabricación de los piezoeléctricos sintéticos se utiliza una gran variedad de materiales como cristales de cuarzo, cristales

solubles en agua, semiconductores piezoeléctricos, cerámicas piezoeléctricas, polímeros piezoeléctricos y piezo-compuestos [145]. Las propiedades piezoeléctricas dependen del material. Es decir, tanto la magnitud de voltaje generado por la deformación como el porcentaje de deformación generado por el voltaje aplicado, dependen de los parámetros del material piezoeléctrico. Se suelen usar materiales anisótropos, en los que sus propiedades varían según la estructura interna, el medio de propagación, las condiciones de contorno y las propiedades electro-mecánicas, por lo que su análisis no es trivial. Debido a la gran variedad de materiales piezoeléctricos, es necesario realizar una elección adecuada en función de la aplicación a la que estén destinados [145].

Teniendo en cuenta la variedad de posibilidades y el tipo de problema a resolver, es necesario realizar una elección adecuada en función de la aplicación a la que estén destinados. Para esta aplicación se eligieron transductores cerámicos piezoeléctricos. Este tipo de transductores es ampliamente utilizado en equipos industriales, ultrasonidos, para ensayos no destructivos y en equipos de monitorización de vibraciones.

En el siglo XX, el uso de cerámicas piezoeléctricas basadas en el óxido de metales y otros materiales sintéticos permitió la aplicación del efecto piezoeléctrico directo e inverso en muchos campos. Estos materiales son, en general, fuertes físicamente y químicamente inertes y su proceso de fabricación es relativamente barato. La composición, forma y dimensiones de un elemento piezocerámico pueden ser modificados para adaptarse a los requerimientos de un aplicación concreta. Existen diferentes tipos de cerámicas como las PT, PMN, de titanato de bario, metaniobato de plomo o niobato de sodio. Las cerámicas creadas a partir de formulaciones de zirconato de plomo-titanato de plomo (PZT) muestran una mayor sensibilidad y mayores temperaturas de operatividad en comparación con otras composiciones cerámicas. Normalmente, se les adicionan ciertos elementos químicos para optimizar sus propiedades mejorando notablemente su resistividad eléctrica. Por ello, los materiales PZT

son actualmente los más usados cuando se trata de cerámicas piezoeléctricas [147] y fueron seleccionados para esta aplicación.

Una cerámica piezoeléctrica tradicional es una masa de cristales cerámicos de perovskita. Cada uno consiste en un pequeño ion de metal tetravalente, normalmente de titanio o circonio, en un entramado más grande de iones de metal divalente, normalmente plomo o bario, e iones de  $O_2$ . Bajo ciertas condiciones, los cristales presentan simetría tetragonal o romboédrica y cada uno tiene un momento dipolo.

Los transductores cerámicos se fabrican mediante prensado o extrusión de finos polvos de los diferentes componentes en unas proporciones específicas. Así se crean elementos macizos constituidos por millones de microscópicos cristales ferro-eléctricos, también conocidos como cerámicas policristalinas [148].

Los dipolos de cada microcristal se orientan de forma aleatoria pero la suma total de los momentos del conjunto es nula (Figura 4.2-derecha). Para conseguir el comportamiento piezoeléctrico de la cerámica, es necesario alinear la orientación de los dipolos. Para lograrlo, se realiza un proceso de polarización (Figura 4.2). Durante dicho proceso, se aplica un campo eléctrico de elevada potencia manteniendo una temperatura inferior a la temperatura de Curie, que es la temperatura por encima de la cual un material ferromagnético pierde su magnetismo. Durante este proceso, los dipolos se alinean generando un momento dipolar macroscópico permanente. Tras la polarización, la mayoría de los dipolos permanecen en una configuración muy cerca del alineamiento, constituyendo una polarización permanente. Este proceso es uno de los secretos mejor guardados de los fabricantes.

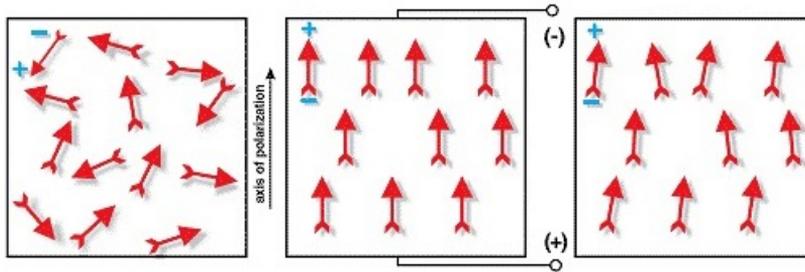


Figura 4.2. Polarización de una cerámica piezoeléctrica. Izq.: Dipolos eléctricos antes de la polarización. Centro: Polarización en un campo eléctrico. Dcha.: Polarización remanente tras eliminar el campo eléctrico [144].

Los sensores cerámicos PZT presentan una serie de ventajas y de inconvenientes que se enumeran a continuación.

#### Ventajas de los sensores cerámicos PZT

- Extensa variedad de formas y tamaños.
- Bajo coste debido al proceso de fabricación convencional.
- Posibilidad de elegir la dirección de polarización según la necesidad.
- Posibilidad de ajustar la temperatura de Curie según la aplicación.
- Posibilidad de realizar diferentes dopajes según la aplicación.
- Elevados coeficientes piezoeléctricos que implican una elevada sensibilidad.

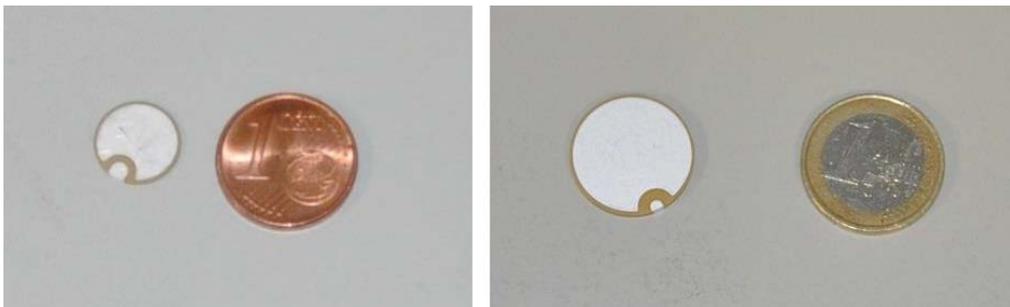
#### Inconvenientes de los sensores cerámicos PZT

- Posible variación de las propiedades con la temperatura.
- Susceptibilidad a la fractura debido a su naturaleza cerámica.
- Envejecimiento o despolarización del piezoeléctrico con el paso del tiempo y/o uso prolongado.

#### 4.1.1.2. Transductores PZT utilizados

Para instrumentar las secciones I de acero que forman parte de los disipadores WPD se han elegido sensores piezoeléctricos cerámicos, debido a sus características y múltiples ventajas ya comentadas. Se realizaron pruebas con varios tipos de sensores, materiales y tamaños, pero los mejores resultados se obtuvieron con los transductores PZT seleccionados [12].

Cada una de las secciones se instrumentó con dos transductores piezoeléctricos de la marca PI@Ceramic, uno ejercía de actuador y el otro realizaba la función de sensor. Como sensor se eligió el modelo PI@PRYY+0220, con un diámetro de 10 mm y un espesor de 0.5 mm (Figura 4.3-izq) y como actuador el modelo PI@PRYY+0842, con un diámetro de 20 mm y un espesor de 2 mm (Figura 4.3-dcha). Ambos transductores son de cerámica tipo PIC151, usada para aplicaciones que no requieren alta potencia. Está elaborada a base de zirconato de plomo modificado con titanato de plomo, que aporta elevada permitividad, alto factor de acoplamiento y una elevada constante de carga piezoeléctrica.



**Figura 4.3. Transductores piezoeléctricos usados para instrumentar las secciones I. Izq.: sensor PI@PRYY+0220. Dcha.: actuador PI@PRYY+0842.**

En ambos transductores se eligieron electrodos con contacto tipo *wrapped*, es decir, el electrodo positivo y negativo están situados en la misma cara del disco, como puede apreciarse en la Figura 4.3. Esta disposición facilita la adherencia entre el transductor y la superficie de la sección I, ya que la superficie de contacto es plana y está libre de soldadura.

Las características de la respuesta en frecuencia hasta 33 kHz de ambos transductores se muestran en el diagrama de Bode de la Figura 4.4 [12]. Se puede apreciar la respuesta plana para frecuencias a partir de 1400 Hz, demostrándose su uso en esta aplicación.

La Tabla 4.1 presenta diversas propiedades de la cerámica utilizada.

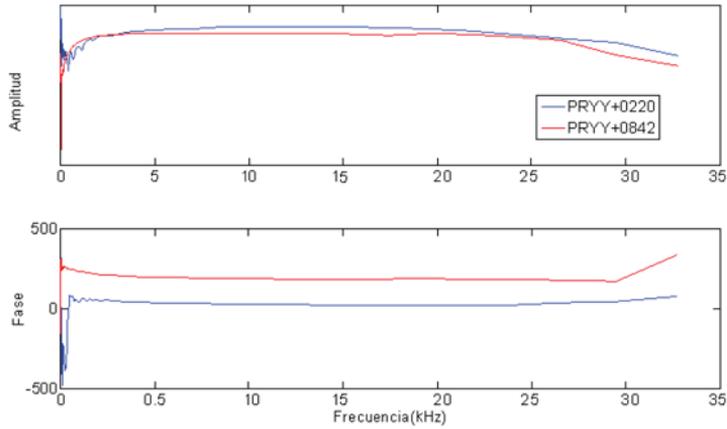


Figura 4.4. Diagrama de Bode del sensor y actuador utilizados.

| <b>Propiedades físicas y dieléctricas</b>                                    |                                    |                                       |
|--|------------------------------------|---------------------------------------|
| Densidad   | $\rho$                             | 7.80 g/cm <sup>3</sup>                |
| Temperatura de Curie   | $T_c$                              | 250 °C                                |
| Permitividad relativa en la polarización                                     | $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ | 2400                                  |
| Factor de pérdida dieléctrica  | $\tan \delta$                      | $20 \cdot 10^{-3}$                    |
| <b>Propiedades electro-mecánicas</b>   |                                    |                                       |
| Factor de acoplamiento   | $k_p$                              | 0.62                                  |
|  | $k_t$                              | 0.53                                  |
|  | $k_{31}$                           | 0.38                                  |
|  | $k_{15}$                           | 0.69                                  |
| Constante de carga piezoeléctrica  | $d_{31}$                           | $-210 \cdot 10^{-12}$ C/N             |
|  | $d_{33}$                           | $500 \cdot 10^{-12}$ C/N              |
| Coeficiente de voltaje piezoeléctrico  | $g_{31}$                           | $-11.5 \cdot 10^{-3}$ Vm/N            |
|  | $g_{33}$                           | $22 \cdot 10^{-3}$ Vm/N               |
| <b>Propiedades acústico-mecánicas</b>  |                                    |                                       |
| Coeficiente de rigidez elástica  | $C_{33}^D$                         | $10.0 \cdot 10^{12}$ N/m <sup>2</sup> |
| Factor de calidad mecánica   | $Q_m$                              | 100                                   |
| <b>Estabilidad a la temperatura</b>  |                                    |                                       |
| Factor de temperatura de $\varepsilon_{33}^T$ (en el rango -20 °C a +125 °C) | $TK \varepsilon_{33}$              | $6 \cdot 10^{-3}$ /K                  |

Tabla 4.1. Propiedades de la cerámica PIC151 de PI@Ceramic [146].

#### 4.1.1.3. Colocación de los transductores PZT

Para elegir la ubicación de los transductores PZT en la sección I se tuvieron en cuenta distintas condiciones. Debido a la rigidez de los transductores piezoeléctricos utilizados y para evitar su rotura durante los eventos sísmicos, se eligió la zona de mínimo nivel de deformación que coincide con la zona central del alma de la sección I. Se colocó el actuador en una de las caras de la zona central del alma de la sección y justo en la misma posición pero en la cara opuesta el sensor, como se aprecia en la Figura 4.5. Se corroboró que en la

ubicación de los transductores seleccionada, el sensor era capaz de detectar un amplio rango de frecuencias de resonancia [11].

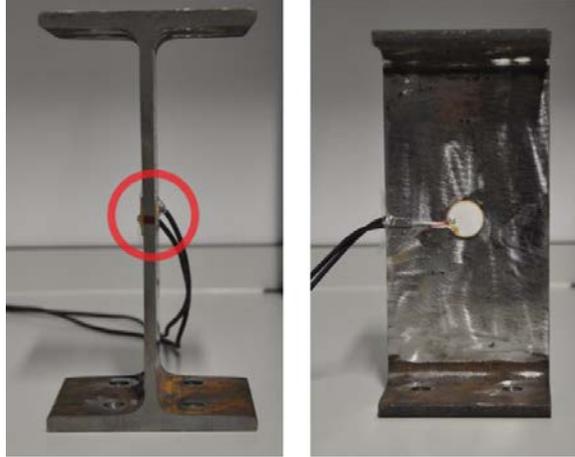


Figura 4.5. Zona de fijación del sensor y el actuador en la sección I.

Antes de colocar los transductores, es necesario lijar y limpiar la superficie de contacto. A continuación, se aplica una capa de adhesivo de cianocrilato para asegurar que no existe continuidad entre la sección I de acero y los transductores. Los transductores se pegan con una fina capa del mismo pegamento y se ejerce presión durante unos minutos hasta que la fijación es estable.

#### 4.1.2. Sistema de medida

La existencia de un sistema de medida preciso y robusto frente al ruido electromagnético es indispensable para obtener registros fiables. En este apartado se describen todos los componentes del sistema de sistema de medida utilizado para la realización del ensayo de vibraciones. La Figura 4.6 muestra un esquema del sistema electrónico de medida que se explica a continuación.

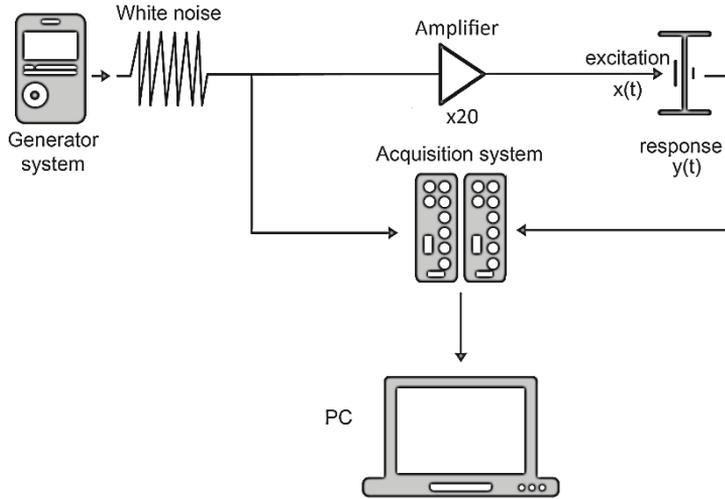


Figura 4.6. Esquema del sistema electrónico de medida.

#### 4.1.2.1. Sistema generador de señales

El primer equipo necesario es un generador de señales. Para esta función se eligió el equipo portátil *CoCo80* de *Crystal Instruments*. Este equipo es un sistema portátil para la generación y adquisición de señales en tiempo real (Figura 4.7). Aunque durante estos ensayos de vibraciones solo se va a utilizar su función de generación de señales, este dispositivo permite la grabación fácil, rápida y precisa de datos y control de las vibraciones en tiempo real. También permite el almacenamiento de datos y la comunicación con otros elementos mediante conexiones USB y RJ45. Destaca que no requiere la conexión con ningún otro equipo auxiliar para su funcionamiento. La Tabla 4.2 muestra sus características técnicas más importantes.



Figura 4.7. Vista general y vista del panel con los canales de entrada y salida del equipo *CoCo80*.

### Especificaciones

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Canales de entrada            | 8 (configurables para grabación simultánea)        |
| Canales de salida             | 1 (señales seno, triangular, ruido blanco, etc.)   |
| Voltajes máximos              | 10 V <sub>p</sub> para canales de entrada y salida |
| Máxima frecuencia de muestreo | 102.4 kHz  |
| Rango dinámico                | 130 dB   |
| Peso                          | 1.7 kg   |
| Duración de la batería        | 8 h  |
| Puertos de comunicación       | Ethernet, USB, tarjeta SD                          |
| Pantalla                      | LCD a color de 5.7 pulgadas                        |
| Memoria interna               | 4 Gb   |

Tabla 4.2. Características técnicas del sistema *CoCo80* de *Crystal Instruments* [149].

El *CoCo80* permite generar distintos tipos de señales de excitación: señal tipo seno, impulsos de tipo triangular y cuadrado, ruido rosa, ruido blanco, etc., incluso señales creadas por el usuario. El voltaje máximo de las señales de salida es de 10 V<sub>p</sub>. En esta aplicación se usaron señales de tipo ruido blanco. Esta señal generada es la encargada de realizar la excitación de la sección I a través del actuador piezoeléctrico tras ser amplificada. A su vez, la señal es registrada por el equipo de adquisición.

#### 4.1.2.2. Sistema de acondicionamiento de señal

El sistema de acondicionamiento de señal es un amplificador piezoeléctrico con ganancia lineal. Su misión es aumentar la potencia de la señal excitación creada por el generador antes de llegar al actuador piezoeléctrico colocado sobre la sección I a estudiar. Se ha utilizado un amplificador piezoeléctrico lineal EPA 104 de *Piezo Systems* (Figura 4.8). Su respuesta es lineal en un amplio rango de frecuencias, hasta los 300 kHz, en el que está incluido el rango de frecuencias de este trabajo [12]. Otras características del amplificador utilizado se muestran en la Tabla 4.3. En esta tesis se aplicó la máxima ganancia posible, multiplicando el voltaje de la señal generada por 20.



Figura 4.8. Amplificador lineal piezoeléctrico EPA 104 [150].

#### Especificaciones

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Voltaje máximo            | $\pm 200 V_p$                          |
| Corriente máxima          | $\pm 200 mA_p$                         |
| Potencia de salida        | $40 W_p$                               |
| Ancho de banda            | Según carga capacitiva                 |
| Ganancia de voltaje       | Ganancia variable, ajustable de 0 a 20 |
| Máxima entrada de voltaje | $\pm 10 V_p$                           |

Tabla 4.3. Características técnicas del amplificador EPA 104 [150].

#### 4.1.2.3. Sistema de adquisición de señales

Es el sistema encargado de recibir las señales de vibraciones producidas en el sensor piezoeléctrico para almacenarlas de forma digital (conversión analógica-digital). Las conversiones analógico-digital, ADC, y digital-analógico, DAC, requieren de operaciones de cuantificación y codificación [151]. Durante este proceso, se produce una pérdida de información tanto en frecuencia como en magnitud de la señal, por lo que es imprescindible elegir una frecuencia de muestreo adecuada para reducir lo máximo posible el error de cuantificación. Estas variables dependen de la precisión y complejidad electrónica del sistema de adquisición y generación de señales.

En nuestro montaje experimental se eligió como sistema de adquisición el equipo *PULSE 3560-B* de *Brüel & Kjær*. Este equipo está especialmente diseñado para el análisis de ruido y vibraciones. Cada unidad de *PULSE 3560-B* está formada por 5 canales analógicos de entrada y uno de salida, con una frecuencia máxima de muestreo de 65536 Hz. Los conectores de entrada al equipo son tipo BNC, como puede verse en la Figura 4.9. En este caso se utilizaron dos sistemas de adquisición *PULSE 3560-B* conectados en paralelo. También se registró la señal de la excitación obtenida directamente desde el sistema generador (antes de la amplificación).

El equipo *PULSE* posee un software que permite su configuración y conexión con cualquier ordenador, por medio de un router clásico, a través de conexión *Ethernet*. Dicho software permite visualizar las señales en tiempo real tanto en frecuencia como en tiempo, programar ciertas operaciones básicas entre las señales registradas por cada canal, así como exportar los datos registrados a otros formatos para su posterior análisis en otros programas.



Figura 4.9. Equipo *PULSE 3560-B* de *Brüel & Kjær*.

#### 4.1.2.4. Sistema de conexiones entre los diferentes sistemas

Se exponen en este apartado las diferentes conexiones entre equipos.

La salida del generador de señales se realiza a través de un cable de audio con terminación BNC. Dicha señal se divide en dos conexiones a través de una T tipo BNC, con una entrada y dos salidas. Una de las señales, a través de cable coaxial con terminación BNC, es registrada por el equipo de adquisición PULSE. La otra señal, con cable coaxial RG58, es la señal de entrada en el sistema amplificador con conexión BNC. La señal que proporciona el amplificador se conduce hasta el actuador a través de un cable de audio apantallado C-202 con pantalla en espiral 2x0.08 mm.

La conexión al actuador se realiza a través de soldadura. Como se observa en la Figura 4.10, cada uno de los cables que conforman el cable de audio se suelda a un electrodo diferente. La conexión en el sensor se realiza del mismo modo.



**Figura 4.10.** Detalle de la soldadura de conexión con el sensor piezoeléctrico.

La señal del sensor, transmitida por el cable de audio C-202 con terminación con conectores de pines hembra, se centraliza en una caja de conexiones que sirve de adaptación entre dichos conectores y el conector RJ45 donde se conecta el cable S/FTP, como la que se muestra en la Figura 4.11 [12, 152]. Dicha caja, situada cerca de las secciones instrumentadas, permite la conexión de las señales de hasta cuatro sensores diferentes y recoge y transmite la conexión a tierra de los sensores.

Debido a la considerable distancia que puede existir entre los disipadores instrumentados y el centro de operaciones donde se adquieren las señales, en este caso, desde la caja de conexiones hasta el centro de trabajo, fue necesario elegir un cable de prestaciones adecuadas [12]. Esta distancia fue de 10 metros en los ensayos sísmicos realizados en laboratorio. Se eligió cable S/FTP Cat-7, *Screened Shielded Twisted Pair*, resultado de una combinación entre el cable FTP, *Foild Twisted Pair*, y el cable STP, *Shielded Twisted Pair*. El S/FTP es un cable de cuatro pares de hilos de cobre trenzados y apantallados, con una malla metálica de protección en su conjunto para un mejor blindaje ante interferencias EMI y entre pares vecinos. El cable elegido opera en un ancho de banda de hasta 600 MHz y no atenúa la señal hasta distancias mayores de 100 metros. Este cable se conecta a la salida RJ45 de la caja de conexiones. Al disponer de cuatro pares de hilos es posible que transmita la información de cuatro sensores simultáneamente.

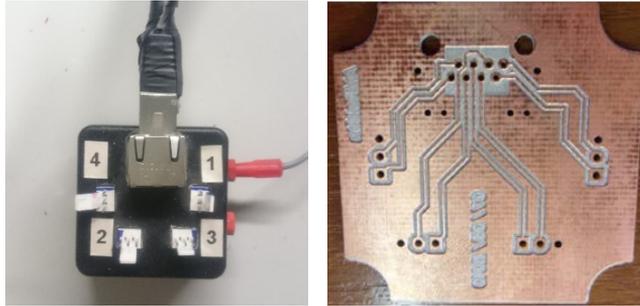


Figura 4.11. Caja de conexión para 4 sensores.

En la siguiente etapa, la señal registrada en los sensores procedente de la caja de conexiones RJ45 es recibida por una caja de conexión no diferencial [152]. Este sistema de adaptación (Figura 4.12) recibe las señales del cable S/FTP y las distribuye a canales de salida mediante conectores BNC hembra. Por cada sensor se disponen de 2 salidas tipo BNC, una para cada cara del sensor. Mediante un cable coaxial RG58 se conectan estas salidas BNC al equipo PULSE para la adquisición de las señales.

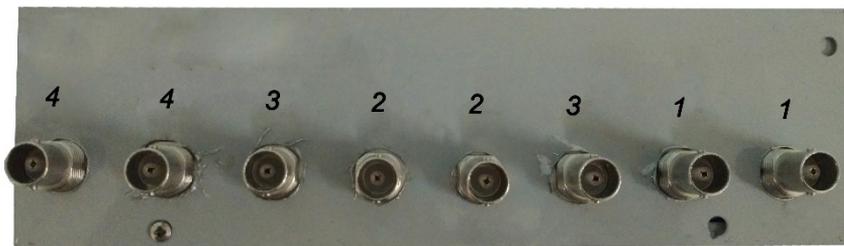


Figura 4.12. Salidas BNC de la caja de conexión no diferencial.

La conexión entre el sistema de adquisición PULSE y el ordenador de trabajo se puede realizar directamente a través de un cable de red si solo se necesita una unidad de adquisición. Si se necesitan dos unidades del sistema PULSE conectadas en paralelo es necesaria una comunicación LAN de transferencia de acuerdo al protocolo estándar TCP/IP a través de conectores RJ45, un *Multiframe Control* a través de un conector BNC para la sincronización entre los diferentes módulos y una interfaz RS-232 para la comunicación serial que permite la configuración de las direcciones IP de la LAN

en cada uno de los módulos. Las conexiones entre las unidades de equipo de adquisición y el router y entre dicho router y el ordenador se realizan mediante *Ethernet* 10 Base-T (a 10 Mbps).

#### **4.1.2.5. Sistema de apantallamiento y puesta a tierra**

Una parte primordial de todo el sistema de medida es el sistema de apantallamiento y puesta a tierra. Para conseguir un sistema de medida robusto, controlar las condiciones de ruido y obtener señales de vibraciones de calidad es necesario proteger dichas señales de cualquier ruido externo o interferencias en todo el recorrido de la señal, como las procedentes de otros equipos electrónicos, interferencias externas o interferencias electromagnéticas de otras máquinas y aparatos eléctricos existentes en el laboratorio [12].

Para ello se adoptaron dos medidas. En primer lugar, se utilizó un sistema de blindaje y apantallamiento de todos los cables y conexiones utilizados. El objetivo es proteger las señales de fuentes externas del ruido generado por las señales dentro del mismo cable y reducir la pérdida de señal. Todos los cables elegidos en este sistema de medida poseen blindaje conductivo externo. Los blindajes se conectaron al sistema de tierra centralizado para desviar cualquier señal parásita. Al sistema de tierra también se conectaron los distintos interfaces de conexión mediante un cable de baja impedancia unido a su caja metálica protectora.

La segunda medida fue instalar un sistema de toma de tierra independiente al existente en el edificio. Se diseñó una caja centralizada de toma a tierra para poner todos los equipos e interfaces a una misma referencia de tierra mediante cable de núcleo de cobre estañado de 2.65 mm de diámetro, con revestimiento en PVC verde-amarillo. (Figura 4.13). Desde este punto sale un único cable que se conecta a una toma de tierra construida especialmente para este fin. A dicha caja se conecta el sistema generador de señales, la caja de conexiones RJ45, la caja de conexiones no diferencial, los dos sistemas PULSE y el amplificador.

La Figura 4.14 muestra una vista general del montaje completo del equipo para el ensayo de vibraciones realizado en el laboratorio.

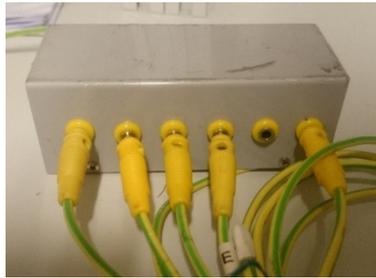


Figura 4.13. Caja de puesta a tierra centralizada.

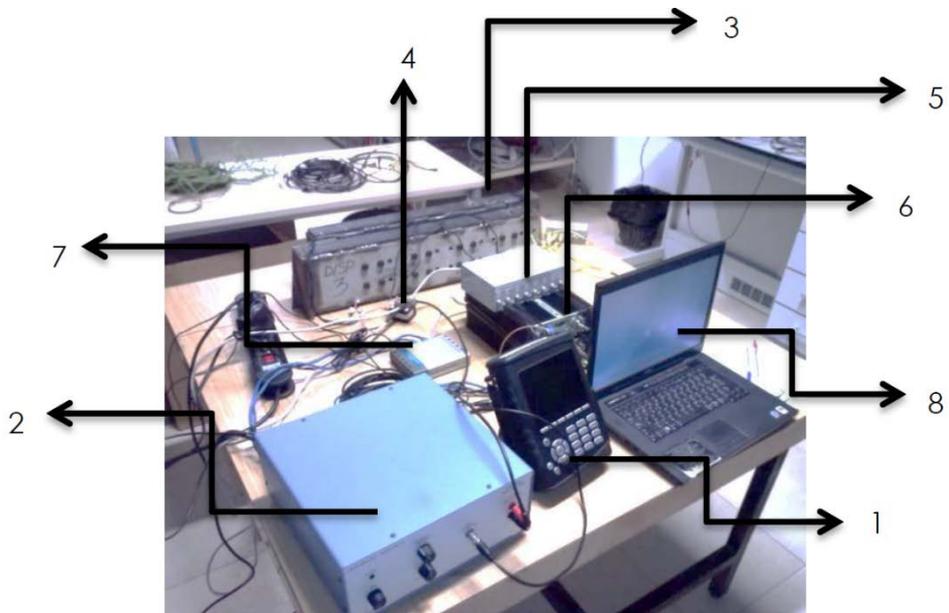


Figura 4.14. Vista general del ensayo de vibraciones. 1: Sistema generador *CoCo80*; 2: Sistema amplificador *EPA104*; 3: Sección I a ensayar; 4: Caja de conexiones RJ45; 5: Caja de conexión no diferencial; 6: Sistema de adquisición *PULSE*; 7: Router doméstico; 8: Ordenador de trabajo.

### 4.1.3. Señal de excitación utilizada

Para excitar una estructura y medir su respuesta se pueden utilizar diferentes tipos de excitaciones. Cuando una de las frecuencias de excitación coincide con alguna frecuencia propia de la sección I se genera una resonancia

que puede ser detectada en el dominio de la frecuencia. En un trabajo previo se probaron diferentes excitaciones como un martillo de impacto, señales impulsivas sintéticas, señales armónicas como barridos senoidales y señales aleatorias de ruido blanco [12]. Se concluyó que la señal que permitía realizar el análisis dinámico más completo excitando el mayor número de frecuencias posible en el ancho de banda de trabajo es la señal aleatoria de ruido blanco. La señal de ruido blanco utilizada se muestra en la Figura 4.15.

El ruido blanco es una señal aleatoria caracterizada por una densidad espectral de potencia (PSD, *power spectral density*) igual en todas las frecuencias (Figura 4.15-b). Puede considerarse una suma de series armónicas en la que se encuentran todas las frecuencias y todas con la misma potencia. Esta característica hace que el ruido blanco sea una buena alternativa para caracterizar una sección puesto que permite excitar todas las frecuencias con la misma intensidad.

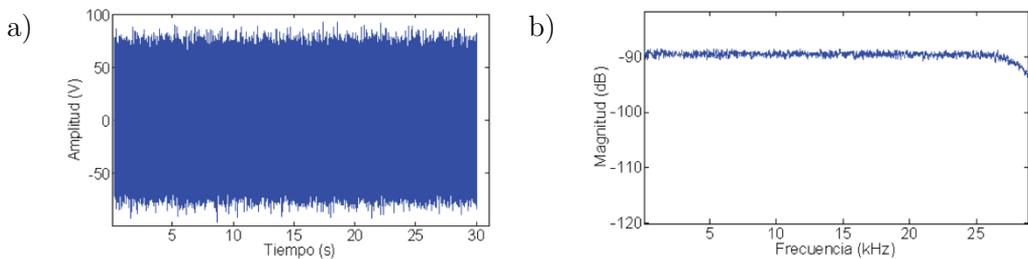


Figura 4.15. Señal de ruido blanco utilizada. a) Señal en el dominio del tiempo; b) Densidad espectral de potencia.

## 4.2. Descripción de los experimentos sísmicos y los especímenes de hormigón armado

En este apartado se van a explicar los experimentos sísmicos realizados y las dos estructuras de hormigón armado de diferente tipología constructiva instrumentados con disipadores de energía WPD que se ensayaron con la mesa sísmica del Laboratorio de Estructuras. Las secciones I que forman dichos

disipadores fueron sometidas a los ensayos de vibraciones para determinar su nivel de daño.

#### 4.2.1. Descripción de los especímenes ensayados

En este apartado se describen brevemente los dos especímenes ensayados. El cálculo de las estructuras, de los disipadores, así como la descripción detallada del montaje experimental puede consultarse en [3, 24, 25, 153]. En ambos casos se trata de dos estructuras de hormigón armado a escala.

En primer lugar se diseñaron los prototipos de las estructuras de hormigón armado como edificios de tres plantas y 3x3 vanos para soportar estrictamente las cargas gravitatorias indicadas en el Código Técnico de la Edificación [154]. Cada prototipo fue equipado con disipadores WPD diseñados para soportar las cargas sísmicas según indica la Norma de Construcción Sismorresistente NCSE-02 [155]. El dimensionado de los disipadores se realizó siguiendo el procedimiento propuesto por Benavent-Climent [3].

Los especímenes de ensayo son subestructuras a escala 4/10 extraídas del edificio de tres plantas. Para simular las conexiones con el resto del edificio se emplearon articulaciones a la mitad de la altura de la columna de planta primera y en el centro de las vigas, correspondiendo con los puntos de inflexión de la ley de momento flector bajo carga lateral. Las cargas gravitatorias se simulan con chapas de acero añadidas. Siguiendo estas premisas se realizaron dos esquemas constructivos diferentes: una estructura porticada y otra estructura reticular, que se comentan a continuación.

La estructura porticada de hormigón armado con disipadores, denominada FD (*Frame with Dampers*) puede verse en la Figura 4.16. La estructura se compone de cuatro pilares y cuatro vigas. En ella se colocaron cuatro disipadores de energía: dos en planta baja formados por 10 secciones de IPE-140 y dos en planta primera, formados por 8 secciones del mismo tipo. Se instrumentaron tres secciones I en planta baja y otras tres secciones en los

disipadores de planta primera; seis secciones en total, sobre las que se realizaron los ensayos de vibraciones correspondientes.

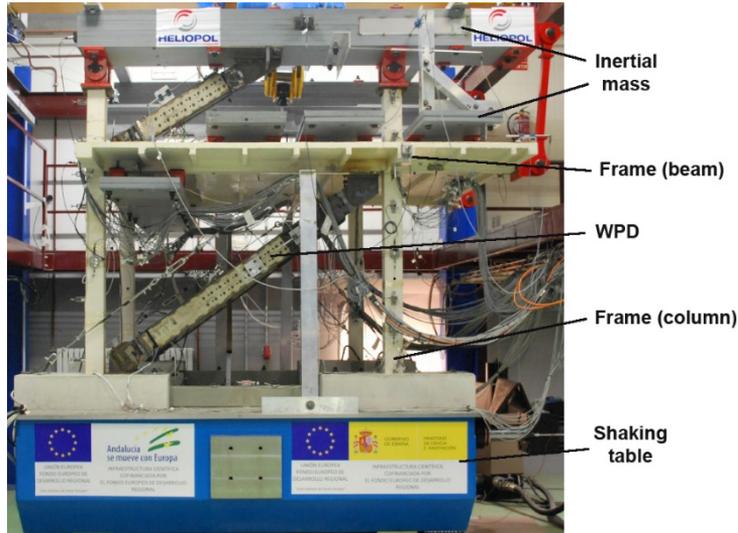


Figura 4.16. Vista general del espécimen FD colocado en la mesa sísmica.

La estructura reticular, también de hormigón armado con disipadores, se denominó SD (*Slab with Dampers*). La Figura 4.17 muestra esta estructura instrumentada y colocada sobre la mesa sísmica. Está formada por tres pilares y dos disipadores, uno en planta baja y otro en planta primera. El disipador de planta baja está formado por 20 secciones IPE-140, de las cuales 3 estaban instrumentadas con sensores piezoeléctricos. En el disipador de planta alta se instrumentaron 4 secciones de las 15 que lo formaban en total.

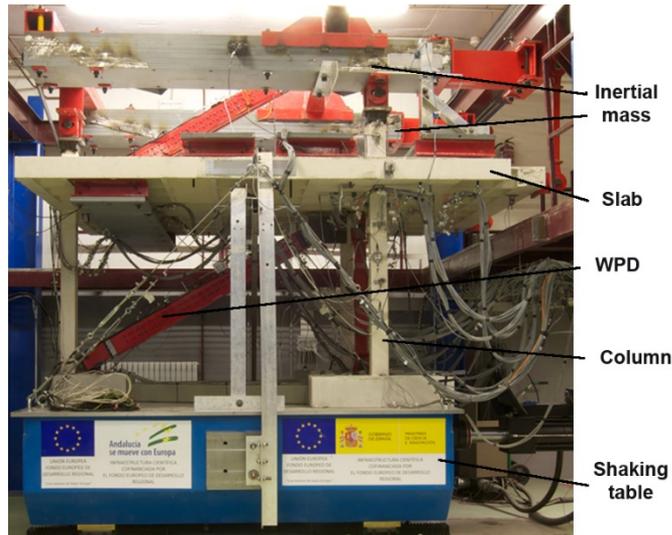


Figura 4.17. Vista general del espécimen SD colocado en la mesa sísmica.

#### 4.2.2. Descripción de los ensayos sísmicos

Se realizaron ensayos con historias de cargas dinámicas de tipo sísmico con el objetivo de simular de la forma más realista posible el tipo de cargas que un terremoto impone a una estructura y su efecto sobre los disipadores WPD.

Los ensayos sísmicos se realizaron en la mesa sísmica de  $3 \times 3 \text{ m}^2$  del Laboratorio de Estructuras del Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica de la Universidad de Granada. Las estructuras de hormigón descritas se sometieron a diferentes ensayos sísmicos consecutivos y de magnitud creciente. Las simulaciones consistieron en la reproducción del acelerograma N-S del terremoto sufrido por Campano-Lucano en Italia y registrado en la estación de Calitri el 23 de Noviembre de 1980. La aceleración pico registrada fue de  $0.16 \text{ g}$  (donde  $g$  es la aceleración de la gravedad).

La Figura 4.18 muestra las historia de aceleraciones aplicadas en las distintas simulaciones sísmicas a la estructura FD. La primera simulación sísmica reproduce dicho terremoto tal y como se registró, es decir, al 100% de la aceleración registrada. Cada una de las simulaciones tuvo una duración de 78 s, coincidiendo con la duración el terremoto real. A este ensayo se le ha

denominado C100, donde C hace referencia a la estación de Calitri y 100 al % relativo a la aceleración registrada. La estructura FD fue sometida a cuatro simulaciones con aceleración creciente: C100, C200, C300 y C350. Los picos de aceleración fueron 0.16 g, 0.31 g, 0.47 g y 0.54 g, respectivamente. Los respectivos niveles de daño de los disipadores WPDs al final de cada simulación se denominaron d0, d1, d2 y d3. En la Figura 4.18 se muestran con cuadrados los momentos en los que se realiza en ensayo de vibraciones de las secciones I de los disipadores. Entre cada una de las simulaciones la estructura estaba en reposo. Debe recordarse que el ensayo de vibraciones de los disipadores se puede realizar en cualquier momento de su vida útil, por lo que no hay que estar registrando datos en el momento del terremoto.

Los factores de escala aplicados al espécimen SD fueron 100%, 200%, 300%, 400%, 500% y 600% veces la aceleración original registrada. Los correspondientes niveles de daño se identificaron como d0, d1, d2, d3, d4 y d5.

Hay que señalar que cada simulación sísmica se realizó sobre la misma estructura que ya se había sometido a las simulaciones anteriores, por lo que el daño fue acumulativo, como puede verse en la Tabla 4.4 para el espécimen porticado FD y en la Tabla 4.5 para el espécimen reticular SD. Por ejemplo, para el nivel de daño d2, la estructura y, en consecuencia, el disipador, ha sido sometida al sismo con aceleración escalada al 100%, 200% y 300% del original.

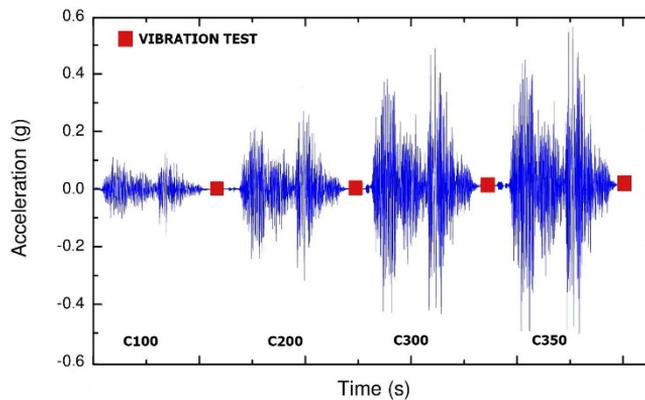


Figura 4.18. Aceleraciones aplicadas en las simulaciones sísmicas a la estructura FD.

| Nivel de daño | 100% | 200% | 300% | 350% |
|---------------|------|------|------|------|
| d0            | x    |      |      |      |
| d1            | x    | x    |      |      |
| d2            | x    | x    | x    |      |
| d3            | x    | x    | x    | x    |

Tabla 4.4. Relación del nivel de daño con el porcentaje de la aceleración máxima de cada simulación sísmica para el espécimen porticado FD.

| Nivel de daño | 100% | 200% | 300% | 400% | 500% | 600% |
|---------------|------|------|------|------|------|------|
| d0            | x    |      |      |      |      |      |
| d1            | x    | x    |      |      |      |      |
| d2            | x    | x    | x    |      |      |      |
| d3            | x    | x    | x    | x    |      |      |
| d4            | x    | x    | x    | x    | x    |      |
| d5            | x    | x    | x    | x    | x    | x    |

Tabla 4.5. Relación del nivel de daño con el porcentaje de la aceleración máxima de cada simulación sísmica para el espécimen reticular SD.

## 5.

# ÍNDICES DE DAÑO BASADOS EN EL MÉTODO DE VIBRACIONES. RESULTADOS

En este capítulo se realiza un análisis de las señales registradas en ensayos de vibraciones realizados sobre las secciones I que conforman los disipadores de energía histeréticos WPD, colocados en dos prototipos diferentes de estructuras de hormigón armado a escala y sometidas a simulaciones sísmicas. En concreto, se proponen distintos índices de daño que se comparan con un índice de daño mecánico, previamente validado en otras publicaciones.

### 5.1. Índice de daño mecánico (ID)

El índice ID es un índice de daño mecánico que permite cuantificar el nivel de daño estructural y la proximidad al fallo de elementos de acero, tales como las secciones I que se estudian en este trabajo, sometidas a cargas cíclicas arbitrarias, tales como terremotos. En este apartado se describe brevemente su fundamento y cálculo. Una versión completa puede consultarse en [2] y [3].

A diferencia de otras aproximaciones existentes que consideran el daño como una combinación de la energía total disipada y el desplazamiento máximo, el índice de daño ID está basado en dos parámetros: la cantidad total de energía disipada y la porción de energía consumida en la parte del esqueleto de la curva

carga-desplazamiento. Este índice tiene en cuenta que la capacidad última de disipación de energía de los componentes de acero depende de la historia de carga sufrida.

Para el cálculo de este índice de daño mecánico se requiere medir la fuerza y el desplazamiento de los disipadores histeréticos durante el terremoto mediante la instalación de una costosa instrumentación como células de carga, galgas extensiométricas, transductores de desplazamiento, etc. Este elevado coste y la necesidad de que las medidas se realicen durante el evento sísmico reducen una de las principales ventajas de los disipadores WPD, su bajo coste, y puede no estar justificado para las acciones con muy poca probabilidad de ocurrencia como son los terremotos.

A continuación se explican cómo se descompone la curva carga-desplazamiento y cómo se calcula dicho índice.

### 5.1.1. Descomposición de la curva carga-desplazamiento

La Figura 5.1 muestra una típica curva carga-desplazamiento,  $Q-\delta$ , de una sección de acero sometida a una historia cíclica de deformación hasta el inicio del deterioro de su resistencia (asumida como el punto de fallo). Esta curva se puede dividir en dos partes: la parte del esqueleto y la parte de Bauschinger.

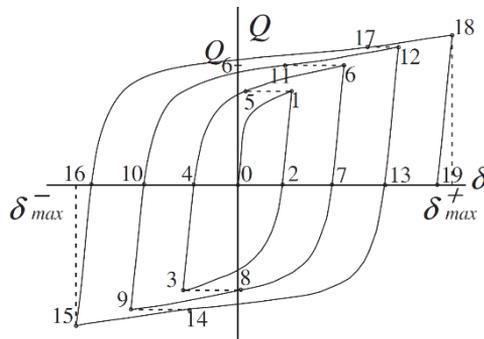


Figura 5.1. Curva típica carga-desplazamiento  $Q-\delta$  de una sección de acero sometida a cargas cíclicas [3].

La parte del esqueleto se obtiene de la conexión secuencial de los segmentos 0-1, 5-6, 11-12 y 17-18 en el dominio positivo y los segmentos 2-3, 8-9 y 14-15 en el negativo, correspondientes a los segmentos que exceden el nivel de carga máximo alcanzado en el ciclo anterior en el mismo dominio de carga. Está verificado experimentalmente [156] que bajo una historia de deformación arbitraria, las curvas del esqueleto coinciden con la curva carga-desplazamiento obtenida baja carga monotónica. La Figura 5.2 muestra la curva del esqueleto obtenida y una aproximación trilineal en línea discontinua. Los segmentos 1-2, 6-7, 12-13, 18-19, 3-4, 9-10 y 15-16 de la curva  $Q-\delta$  son los caminos de descarga elástica y su pendiente indica la rigidez elástica inicial del elemento  $K_e$  ( $K_e=Q_y/\delta_y$ ). Para cada dominio de cargas, el área bajo la curva hasta un punto dado  $(Q_i, \delta_i)$  se denomina  ${}_sW_i^+$  y  ${}_sW_i^-$ .

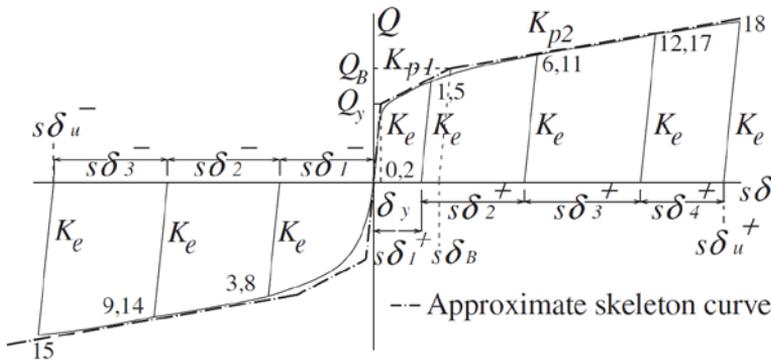


Figura 5.2. Parte del esqueleto de la descomposición de la curva  $Q-\delta$  [3].

La parte de Bauschinger (Figura 5.3) se compone de los segmentos 4-5, 10-11 y 16-17 en el dominio positivo y de los segmentos 7-8 y 13-14 en el negativo. Estos segmentos parten de  $Q=0$  y terminan en el máximo nivel de carga alcanzado en el ciclo anterior en el mismo dominio de carga. Para cada dominio de carga, la suma de las áreas bajo la curva de Bauschinger hasta un punto dado  $(Q_i, \delta_i)$  se denomina  ${}_B W_i^+$  y  ${}_B W_i^-$ .

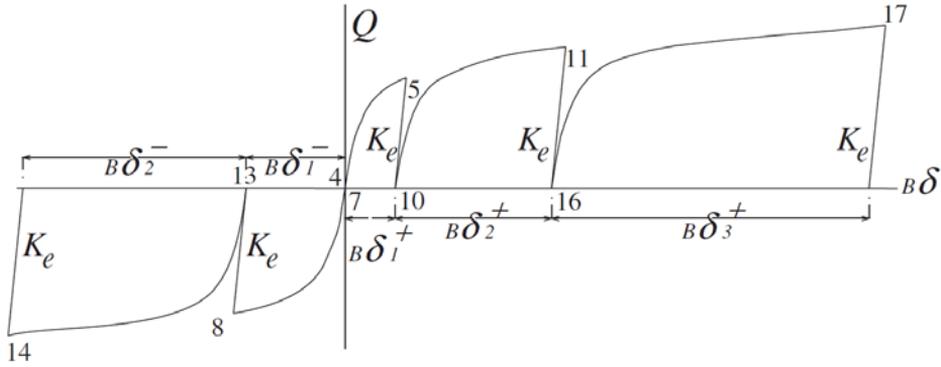


Figura 5.3. Parte de Bauschinger de la descomposición de la curva  $Q-\delta$  [3].

La suma  ${}_sW_i^+ + {}_B W_i^+$  en el dominio positivo y  ${}_sW_i^- + {}_B W_i^-$  en el dominio negativo proporciona el total de energía plástica disipada por la sección I en cada dominio de carga. Estas energías se pueden expresar de forma adimensional en los índices  ${}_s\bar{\eta}_i^+, \bar{\eta}_i^+, {}_s\bar{\eta}_i^-, \bar{\eta}_i^-$ .

$${}_s\bar{\eta}_i^+ = \frac{{}_sW_i^+}{N_y \delta_y}; \quad (5.1)$$

$$\bar{\eta}_i^+ = \frac{{}_sW_i^+ + {}_B W_i^+}{N_y \delta_y}; \quad (5.2)$$

$${}_s\bar{\eta}_i^- = \frac{{}_sW_i^-}{N_y \delta_y}; \quad (5.3)$$

$$\bar{\eta}_i^- = \frac{{}_sW_i^- + {}_B W_i^-}{N_y \delta_y}; \quad (5.4)$$

donde  $N_y$  y  $\delta_y$  son la fuerza axial y el desplazamiento axial en la plastificación.

### 5.1.2. Cálculo del índice de daño mecánico ID

El nivel de daño mecánico en un disipador metálico sometido a cargas cíclicas arbitrarias hasta un punto  $i (Q_i, \delta_i)$ , según se demostró en [3], puede obtenerse mediante el índice ID definido como

$$ID_i = \max\{\overline{ID}_i^+, \overline{ID}_i^-\} \quad (5.5)$$

donde

$$\overline{ID}_i^+ = \frac{\bar{\eta}_i^+}{\bar{\eta}_u^+} \quad (5.6)$$

$$\overline{ID}_i^- = \frac{\bar{\eta}_i^-}{\bar{\eta}_u^-} \quad (5.7)$$

Las variables  $\bar{\eta}_u^+$  y  $\bar{\eta}_u^-$  representan la capacidad última de disipación del disipador, que dependen de los valores de  $s\bar{\eta}_i^+$ ,  $\bar{\eta}_i^+$ ,  $s\bar{\eta}_i^-$ ,  $\bar{\eta}_i^-$  y de dos parámetros empíricos  $a$  y  $b$  relacionados con las propiedades del material de acero y la geometría de la sección I.

El índice ID puede tomar valores entre 0 y 1, indicando ID=0 disipador sin daño mientras que ID=1 indica daño completo. Considerando los ensayos experimentales, se obtuvo un valor ID para cada uno de los disipadores de la estructura. La Tabla 5.1 muestra los valores del índice ID para cada uno de los cuatro disipadores que se instalaron en el espécimen FD y la Tabla 5.2 muestra los valores obtenidos en los disipadores del espécimen SD. Se puede observar que el índice es creciente al aumentar la aceleración del sismo y que el daño sufrido por los disipadores de planta baja es mayor que el sufrido por disipadores instalados en la planta primera.

| Disipador | C100 | C200 | C300 | C350 |
|-----------|------|------|------|------|
| FD_F0_C12 | 0.00 | 0.17 | 0.45 | 0.77 |
| FD_F0_C34 | 0.00 | 0.12 | 0.42 | 0.78 |
| FD_F1_C12 | 0.00 | 0.03 | 0.07 | 0.12 |
| FD_F1_C34 | 0.00 | 0.03 | 0.06 | 0.12 |

Tabla 5.1. Valores del índice de daño ID para los disipadores del espécimen FD.

| Disipador | C100 | C200 | C300 | C400 | C500 | C600 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
| SD_F0_C1  | 0.00 | 0.01 | 0.06 | 0.31 | 0.76 | 1.15 |
| SD_F1_C1  | 0.00 | 0.02 | 0.05 | 0.15 | 0.27 | 0.40 |

**Tabla 5.2. Valores del índice de daño ID para los disipadores del espécimen FD.**

Además, en los sismos frecuentes y muy frecuentes, el índice ID toma valores bajos (0.02 y 0.05 sobre 1) por lo que se puede admitir que el daño es nulo. Tras los sismos raros y muy raros, aparecen daños ligeros y moderados en el disipador, pero no es necesario reemplazarlos tomando como criterio de proyecto que la sustitución sea necesaria cuando el índice ID alcance el valor de 0.50 [157]. Finalmente tras el sismo extremo, sismo C350 en el espécimen FD y sismo C500 en el SD, el daño en los disipadores de planta baja fue severo  $ID=0.78$ , haciéndose necesaria su sustitución a pesar de que la rigidez y su resistencia no se hayan visto disminuidas en los datos experimentales obtenidos [157].

A partir de estos resultados mecánicos, se determinó que [157]:

- las prestaciones globales de la estructura eran totalmente funcionales en los casos de sismos frecuentes y muy frecuentes;
- en el caso de sismos raros la estructura seguía operativa, aunque pueden aparecer daños moderados en elementos no estructurales debido al desplazamiento entre plantas;
- se mantenía la seguridad vital en el caso de sismos muy raros, ya que, aunque los disipadores, el pórtico y los elementos no estructurales requieran reparaciones, la resistencia lateral de la estructura no estaba comprometida;
- se produce la prevención de colapso en el caso de sismos extremos, ya que se producen daños severos en los disipadores pero el pórtico principal conserva su capacidad portante y los daños en el mismo son reducidos permitiendo incluso su ocupación tras el sismo.

Centrados en el daño en el pórtico de hormigón, se puede concluir que el comportamiento estructural de una estructura porticada con disipadores es claramente superior a los de una estructura porticada convencional de hormigón armado dimensionada para resistir cargas gravitatorias y sísmicas. Estas mejoras son más evidentes considerando que las estructuras de hormigón ensayadas se calcularon teniendo en cuenta solo cargas gravitatorias, por lo que las secciones son menores.

## 5.2. Índice de daño *Area Damage Index* (ADI)

### 5.2.1. Métodos estadísticos de series temporales de vibración para SHM

En este apartado se realiza una breve introducción a los métodos estadísticos de series temporales para SHM. Estos métodos usan la respuesta de vibraciones del sistema y/o las señales de excitación para construir un modelo estadístico (identificación del modelo) en base al que realizar una prueba o ensayo, también estadístico, para tomar decisiones sobre el daño. Principalmente son de tipo inverso, es decir, se basan en datos (*data-based*) y no en constantes físicas (*physics-based*).

Los métodos estadísticos de series temporales se pueden clasificar según las señales de vibraciones disponibles y según la técnica utilizada para estimar los modelos. En base a las señales de vibraciones disponibles, el método puede ser de excitación-respuesta (*input-output*) si usa tanto los datos de la excitación como los de respuesta del sistema o de solo respuesta (*output-only*) en los que el modelo se realiza solo con los datos de respuesta del sistema.

Atendiendo a la técnica utilizada para estimar el modelo, los métodos estadísticos de series temporales se pueden dividir en paramétricos y no paramétricos. Los métodos paramétricos, debido a su complejidad, requieren un elevado coste computacional y una elevada experiencia del usuario que los implementa. Están basados en parámetros del modelo, en los residuos del

modelo (varianza residual, función de verosimilitud, etc.) o en el modelo funcional del sistema y son recomendables para aplicaciones que requieren mucha precisión. Los métodos no paramétricos son menos complejos y requieren menor coste computacional, sin embargo, su precisión es menor. Se basan principalmente en modelos en el dominio de la frecuencia y tienen en cuenta la información sobre resonancias, modos de vibración, etc. Los métodos basados en la densidad espectral de potencia, PSD, la función de respuesta en frecuencia, FRF o la función de coherencia son métodos no paramétricos.

Los métodos basados en la FRF para detección de daño usan tanto la excitación  $\mathbf{x}(t)$  como la señal respuesta  $y(t)$  y su principio básico es la detección de cambios en la respuesta en frecuencia del elemento inspeccionado cuando el daño aparece. Es decir, la detección de daño se basa en la confirmación de desviaciones estadísticas en el espécimen inspeccionado en ciertas frecuencias respecto del espécimen sin daño [17]. La magnitud FRF,  $|\hat{H}(j\omega)|$ , se calcula según la ecuación

$$Q_{FRF} = |\hat{H}(j\omega)| = \frac{|\hat{S}_{xy}(j\omega)|}{\hat{S}_x(\omega)} \quad (5.8)$$

donde  $\hat{S}_{xy}(j\omega)$  y  $\hat{S}_x(\omega)$  son las funciones de densidad cross-espectro y auto-espectro, respectivamente, ambas estimadas mediante el método Welch [158]. El estimador de la FRF,  $|\hat{H}(j\omega)|$ , presenta una distribución aproximadamente normal con una media  $|H(j\omega)|$  y una desviación estándar  $\sigma^2(\omega)$ , que es [19]

$$|\hat{H}(j\omega)| \sim N(|H(j\omega)|, \sigma^2(\omega)) \quad (5.9)$$

En general, los métodos estadísticos para SHM presentan una serie de ventajas e inconvenientes [13] que se exponen a continuación. Entre las ventajas destacan:

- No requieren conocimiento detallado de las bases físicas del comportamiento de la estructura ni la implementación de modelos de elementos finitos o simulaciones.

- No requieren una modelación completa y detallada del sistema. Son suficientes las estimaciones de modelos realizados con las señales de excitación y respuesta del sistema.
- Tienen en cuenta las incertidumbres inherentes debidas a las condiciones operacionales y ambientales en la toma de los datos.
- La toma de decisiones estadísticas se hace en base a características de rendimiento específicas.
- Se puede hacer uso de registros de vibraciones aleatorias naturales del sistema sin necesidad de interrumpir su normal funcionamiento.
- No requieren inspección visual.
- Hacen una cobertura global de la estructura.
- Permiten la reducción de coste y de tiempo en la evaluación del daño.
- Permiten que el proceso pueda realizarse de forma automática.
- Permiten una respuesta rápida, casi en tiempo real, y de forma continua.

Los principales inconvenientes de los métodos estadísticos son:

- Los fallos detectados pertenecen solo a las señales de vibraciones con las que se cuenta. No se usan modelos completos.
- Requieren un conocimiento previo de la estructura y de los datos para su adecuada implementación e interpretación de resultados.
- Son menos sensibles que los métodos locales.
- El grado de incertidumbre puede ser elevado.
- Es posible que los cambios detectados no tengan relación con el daño.

- Es posible que se vean afectados por los cambios en las condiciones de contorno y conectividad del sistema.
- Las variaciones ambientales y operacionales (temperatura, humedad y condiciones de carga) pueden afectar la respuesta a las vibraciones.
- Es posible que la estructura no presente un comportamiento estacionario.

### 5.2.2. Descripción del algoritmo de cálculo

En este apartado se describe el algoritmo de cálculo usado para obtener el índice de daño ADI [7]. Se trata de un método estadístico de series temporales, en concreto de un método no paramétrico inverso de excitación-respuesta.

La obtención del índice ADI se divide en dos fases. En la primera fase, llamada Fase 0 o Fase de caracterización, se determina la respuesta de la sección I sin daño ante el ensayo de vibraciones. En la segunda fase, la Fase de inspección se estudia la respuesta de la sección I ante un ensayo de vibraciones para conocer su “salud” y suele realizarse después de un terremoto pero puede llevarse a cabo en cualquier momento de la vida de la sección I. Los pasos a seguir para la obtención del índice ADI se sintetizan a continuación.

#### Fase de caracterización

1. En primer lugar, se realiza una normalización de las señales:

$$f(t) = \frac{f(t)_r - \bar{f}(t)_r}{\sigma(f(t)_r)} \quad (5.10)$$

10 donde  $f(t)$  es la señal normalizada,  $f(t)_r$  es la señal registrada y  $\bar{f}(t)_r$  y  $\sigma(f(t)_r)$  son la media y la desviación estándar de  $f(t)_r$ , respectivamente.

2. Se calcula la FRF de la señal obtenida tras el ensayo de vibraciones en la sección I sin daño.

3. Se selecciona la frecuencia del pico de resonancia a considerar en el estudio ( $f_{pk}$ ).

4. Se selecciona un ancho de banda apropiado (BW) para la detección del daño. Este ancho de banda depende de la frecuencia de resonancia seleccionada en el paso anterior y un factor de escala:

$$BW = [f_{pk} - (Q \cdot \Delta f_{max}), f_{pk} + (Q \cdot \Delta f_{max})] \quad (5.11)$$

donde  $f_{pk}$  es la frecuencia pico de resonancia de la sección I sin daño,  $Q$  es un factor de escala, en este caso se aplicó  $Q = 3$  y  $\Delta f_{max}$  [4] se obtiene según

$$\Delta f_{max} = 1.5 \cdot 10^{-15} f_{pk}^4 - 3.7 \cdot 10^{-11} f_{pk}^3 + 1.9 \cdot 10^{-7} f_{pk}^2 + 2.3 \cdot 10^{-4} f_{pk} + 36.3 \quad (5.12)$$

#### Fase de inspección

1. Mismo paso que en la fase de caracterización.
2. Mismo paso que en la fase de caracterización.
3. Se obtiene la magnitud  $|Z|$ -estadística en el ancho de banda establecido en la paso 4 de la fase inicial aplicando la expresión

$$|Z| = \frac{\delta |\hat{H}(j\omega)|}{\sqrt{2\hat{\sigma}_0^2(\omega)}}; \quad \delta |\hat{H}(j\omega)| = |\hat{H}_0(j\omega)| - |\hat{H}_u(j\omega)| \quad (5.13)$$

donde

$|\hat{H}_0(j\omega)|$  es la magnitud FRF de la sección sin daño

$|\hat{H}_u(j\omega)|$  es la magnitud FRF de la sección a inspeccionar

$2\hat{\sigma}_0^2(\omega)$  es la varianza de  $|\hat{H}_0(j\omega)|$

- El índice ADI se obtiene como el área bajo la curva del  $|Z|$ -estadístico en el ancho de banda seleccionado mediante integración numérica por trapecios:

$$ADI = \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} |Z|(\omega) d\omega \quad (5.14)$$

La Figura 5.4 muestra el esquema general del método aplicado y el coste computacional relativo de cada una de las etapas del cálculo. Se puede observar que la FRF y el ancho de banda seleccionado en la Fase 0 son utilizadas en la Fase de inspección. Además, más del 79% del tiempo de cálculo es empleado en la obtención de la FRF.

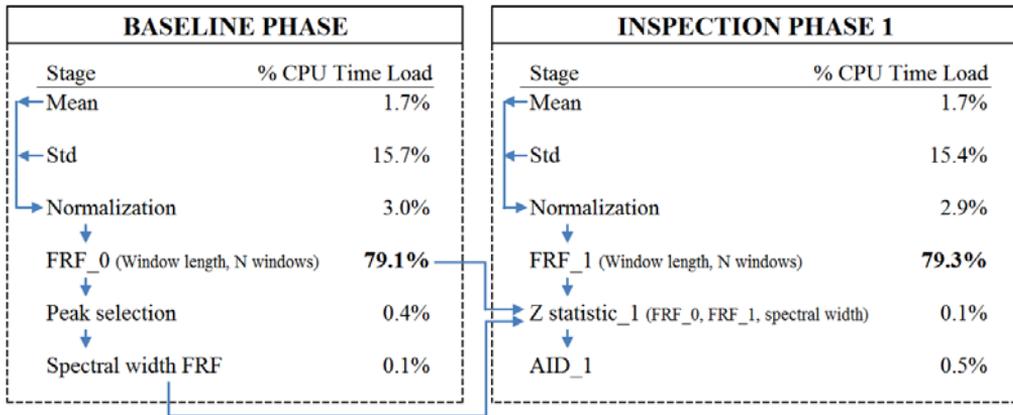


Figura 5.4. Esquema general de las etapas del algoritmo de cálculo del índice ADI, incluyendo el % de tiempo de cálculo de cada etapa.

### 5.2.3. Resultados obtenidos en los ensayos sísmicos

La Figura 5.5 muestra la magnitud FRF de la sección SD\_F0\_C1\_I12. Se pueden observar varios picos que corresponden con las frecuencias de resonancia de la sección. Mediante cálculo teórico, idealizando la sección I como una viga en condiciones de empotramiento perfecto, se determinaron las frecuencias teóricas de la sección I. Dentro del intervalo de frecuencias de trabajo, entre 0 y 32768 Hz, para la sección I estudiada (tipo IPE-140) aparecen 5 modos de

resonancia (Figura 5.6) a los que le corresponden las frecuencias propias mostradas en la Tabla 5.3.

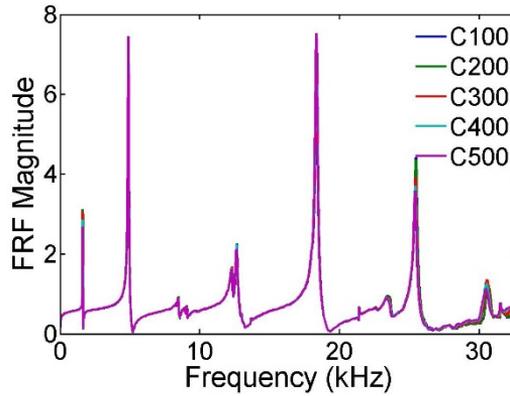


Figura 5.5. Magnitud FRF de la sección SD\_F0\_C1\_I12 tras las diferentes simulaciones sísmicas realizadas.

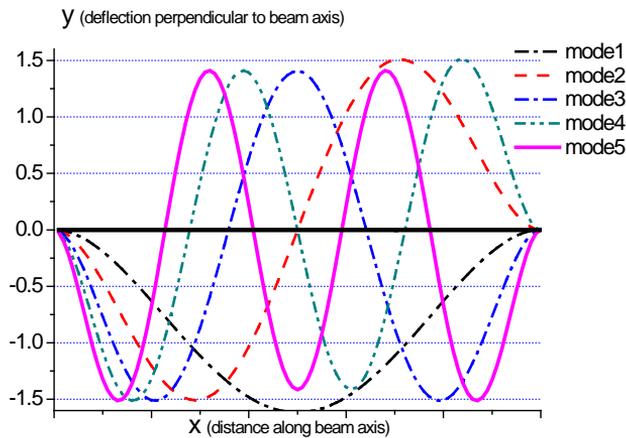


Figura 5.6. Modos de resonancia de la sección I idealizada como una viga con extremos en empotramiento perfecto.

| Disipador       | f1 (Hz) | f2 (Hz) | f3 (Hz) | f4 (Hz) | f5 (Hz) |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Sección IPE-140 | 1985    | 5467    | 10735   | 17738   | 26522   |

Tabla 5.3. Frecuencias de resonancia de una sección IPE-140.

Como es bien conocido, es más fácil detectar cambios en la respuesta en frecuencia al considerar frecuencias más altas. La justificación mecánica aplicada a las secciones I se explica a continuación. Como puede verse en la

representación de los cinco primeros modos de vibración de la sección I mostrados en la Figura 5.6, el quinto modo es el que presenta los máximos desplazamientos y tensiones más cercanos al final de la viga que simula el alma de la sección. Cuando el dissipador WPD está sometido a deformaciones en la dirección de su eje, las máximas tensiones y las consiguientes deformaciones plásticas aparecen cerca del extremo del alma de la sección I como se mostró en la Figura 3.12. Esto demuestra que el quinto modo sea más sensible al daño que modos inferiores.

La Figura 5.7 muestra en detalle y en rangos equivalentes, la cuarta y quinta frecuencia de resonancia, en torno a 18 y 25.5 kHz respectivamente. En consonancia con la explicación mecánica, aunque la magnitud FRF es mayor en torno a la cuarta frecuencia de resonancia que a la quinta frecuencia, al aumentar el nivel de daño se obtienen mayores cambios en la FRF en la quinta frecuencia. Por esta razón, se utilizó la quinta frecuencia de resonancia como la frecuencia pico ( $f_{pk}$ ) del algoritmo de cálculo del índice ADI.

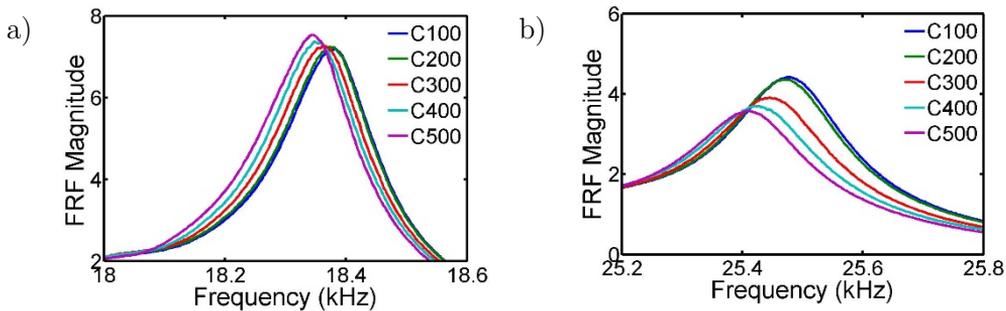


Figura 5.7. Magnitud FRF de la sección SD\_F0\_C1\_I12 tras las simulaciones sísmicas. a) Frecuencia de resonancia en torno a 18 kHz; b) Frecuencia de resonancia en torno a 25 kHz.

La Figura 5.8 muestra el resultado de la magnitud del  $|Z|$ -estadístico. Se puede observar que al aumentar el nivel de daño, la magnitud aumenta. El valor ADI se calcula como el área bajo la curva del  $|Z|$ -estadístico, es decir, el área marcada en gris.

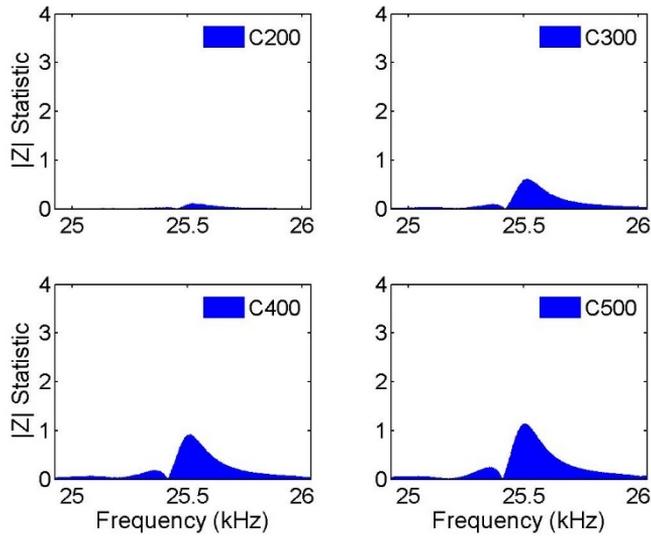


Figura 5.8. Magnitud  $|Z|$ -estadística de la sección SD\_F0\_C1\_I12 en la quinta frecuencia de resonancia tras las simulaciones sísmicas realizadas.

Como se ha comentado, el índice de daño mecánico ID ha sido suficientemente validado en distintos tipos de ensayos. La Figura 5.9 muestra los valores del índice ADI frente al índice mecánico ID para las 6 secciones instrumentadas en el espécimen FD, 3 en planta baja (FD\_F0) y 3 en planta primera (FD\_F1). Se observa una relación aproximadamente lineal entre ambos índices. También se puede comprobar que el daño sufrido por los disipador de planta primera es menor que en planta baja, en consonancia con el daño mecánico.

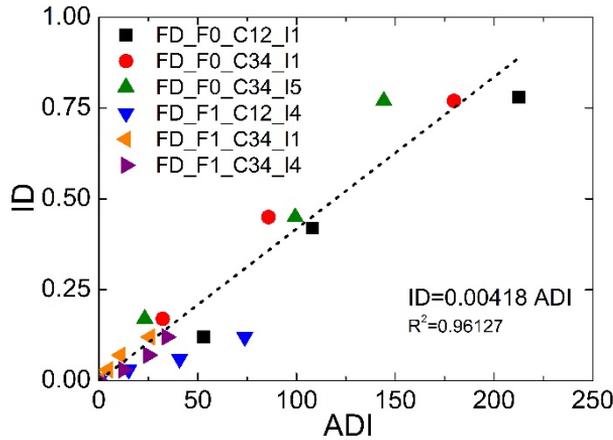


Figura 5.9. ADI frente a ID de las secciones del espécimen FD.

En el caso del espécimen reticular SD, la representación del índice ADI frente al ID se muestra en la Figura 5.10 para las secciones de planta baja y planta primera. Se observan similares resultados, aunque una mayor dispersión entre secciones.

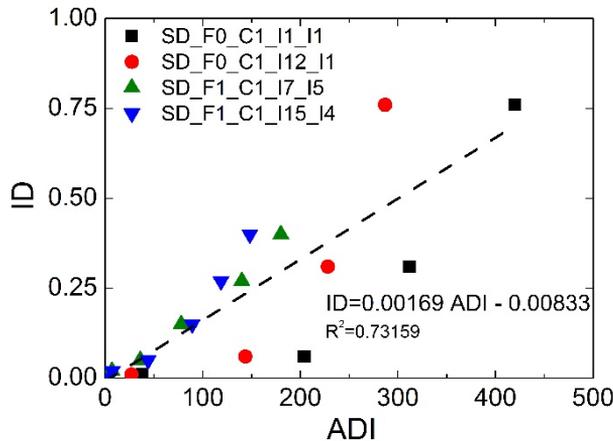


Figura 5.10. ADI frente a ID de las secciones del espécimen SD.

#### 5.2.4. Optimización de parámetros

En este apartado se presenta una estrategia para reducir el número de datos requeridos para ensayos realizados in situ. Esta optimización es totalmente necesaria para implementar los índices de daño en evaluaciones de estructuras

en tiempo real. Básicamente la idea es diseñar disipadores inteligentes con un sistema integrado de sensor y actuador piezoeléctricos que proporcione la evaluación de daño del disipador.

En ensayos de laboratorio, el sistema electrónico utilizado, detallado en el Capítulo 4, está formado por un generador de señales, un sistema de adquisición, una estación de trabajo y un complejo sistema de conexiones diferenciales con una caja de distribución para suprimir el ruido eléctrico. Sin embargo, se necesita la realización de un estudio de optimización para minimizar los recursos necesarios para obtener un valor similar del índice de daño ADI calculado evitando el uso de grandes recursos. Esta optimización permitirá implementar el algoritmo en una única plataforma *hardware* comercial de bajo coste. Mediante el uso de esta plataforma, se puede convertir un sistema de laboratorio con caros y especializados equipos en una aplicación comercial para ser usada en edificios reales con disipadores histeréticos. Esta aplicación, usando ordenadores empotrados, permitirá realizar el ensayo de vibraciones y conocer el índice de daño de los disipadores en tiempo real incluso por control remoto.

El sistema alternativo formado por una plataforma *hardware* como *Picocom* de *F&S Elektronik Systeme* se instalará en aplicaciones de campo en edificios como se muestra en la Figura 5.11. Esta plataforma consiste solo en un ordenador empotrado, un amplificador piezocerámico de entrada diferencial, un amplificador de salida con arquitectura *DirectDrive* para generar la señal de excitación, ahorrando costes, espacio y peso de componentes y conexiones con la sección I, como se muestra en la Figura 5.12.

El núcleo de *Picocom* es un procesador ATMEL ARM 926 EJ 210 MHz, que incluye 33 MB de memoria *Flash* ROM y 32 MB de RAM. El sistema operativo usado es WCE 6.0 R3 (*Windows Embedded Compact*). Aunque las señales de entrada y salida están disponibles en estéreo, solo se va a usar señal simple para llevar a cabo la adquisición de datos. Se dispone de una conexión *Ethernet* 10/100 MB para enviar la información desde el software de la aplicación ubicada

en el edificio como se muestra en la Figura 5.12. La plataforma dispone de una pantalla táctil LCD de 3 pulgadas que simplifica la configuración local.

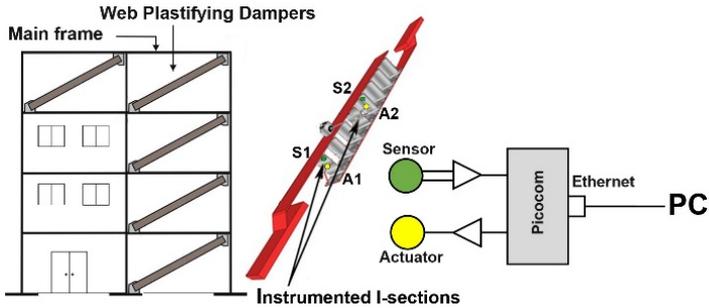


Figura 5.11. Esquema de un edificio con disipadores instrumentados con la plataforma *Picocom*.

La capacidad de cálculo y de registro de información de esta plataforma es limitada. La frecuencia de muestro del sistema de laboratorio es de 65536 Hz mientras que la de la plataforma es de 44100 Hz. Además, en la plataforma la máxima duración de las señales registradas y la longitud de la ventana es de 3 s y 2048 muestras, respectivamente, mientras que no existe limitación en el sistema de laboratorio. El nivel de optimización dependerá de las características de la plataforma elegida.

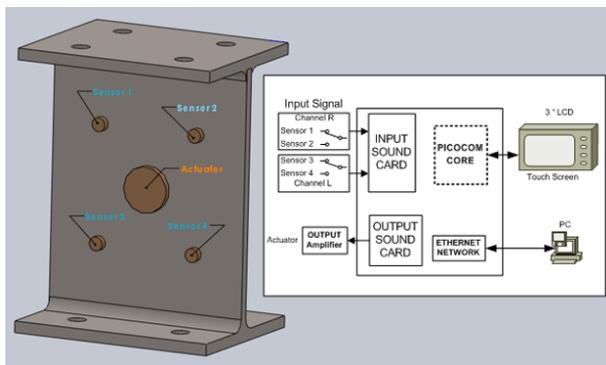


Figura 5.12. Esquema del sistema de medida electrónica usando *Picocom*.

El análisis de datos obtenidos en el ensayo de vibraciones está basado en la optimización de las variables del algoritmo descrito en términos de la longitud de ventana, número de ventanas y duración de las señales para conseguir un uso

mínimo de los recursos. La relación entre estos parámetros se muestra en la siguiente ecuación

$$\text{Número de ventanas} = \frac{\text{Duración de la señal} \cdot f_s}{\text{Longitud de la ventana}} \quad (5.15)$$

donde  $f_s$  es la frecuencia de muestreo. Conocidas las restricciones de la plataforma: máxima duración de las señales de 3 s, frecuencia de muestreo de 44100 Hz y longitud de ventana de 2048 muestras, es necesario verificar que los valores de ADI obtenidos con estos parámetros son similares a los obtenidos sin estas limitaciones.

En primer lugar, la Tabla 5.4 muestra en detalle el tiempo empleado en cada una de las etapas del algoritmo para diferentes duraciones de la señal, usando una longitud de ventana de 32768 muestras. Claramente, la reducción de la duración de la señal reduce el tiempo empleado en el cálculo, pero en menor proporción. El cálculo de la FRF es el paso que implica mayor tiempo, seguido del cálculo de la desviación estándar requerida para la normalización.

| STAGE                  | d=20 s   | d=15 s   | d=10 s   | d=5 s     | d=3 s    | d=2 s    | d=1 s    |
|------------------------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|
| Total Time (s)         | 0.696    | 0.533    | 0.365    | 0.193     | 0.127    | 0.103    | 0.063    |
| Select data (s)        | 57.2E-3  | 43.9E-3  | 29.9E-3  | 26.4E-3   | 9.0E-3   | 6.3E-3   | 8.6E-3   |
| Mean (s)               | 10.2E-3  | 7.9E-3   | 5.5E-3   | 3.8E-3    | 2.6E-3   | 2.1E-3   | 1.3E-3   |
| Standard deviation (s) | 97.5E-3  | 75.5E-3  | 49.0E-3  | 40.9E-3   | 18.6E-3  | 15.6E-3  | 8.0E-3   |
| Normalization (s)      | 20.0E-3  | 15.6E-3  | 9.9E-3   | 6.3E-3    | 4.0E-3   | 2.8E-3   | 1.4E-3   |
| FRF_d0 (s)             | 126.5E-3 | 96.6E-3  | 68.2E-3  | 35.0E-3   | 22.8E-3  | 20.4E-3  | 14.1E-3  |
| Peak selection_d0 (s)  | 1.2E-3   | 1.2E-3   | 1.2E-3   | 1.3E-3    | 1.3E-3   | 1.3E-3   | 1.8E-3   |
| Spectral width (s)     | 387.5E-6 | 361.6E-6 | 391.8E-6 | 404.8E-6  | 489.9E-6 | 397.8E-6 | 372.8E-6 |
| Spectral width FRF (s) | 31.4E-6  | 31.7E-6  | 30.2E-6  | 30.2E-6   | 30.5E-6  | 31.4E-6  | 30.8E-6  |
| FRF_d1 (s)             | 127.1E-3 | 96.4E-3  | 66.4E-3  | 34.7E-3   | 22.7E-3  | 17.7E-3  | 9.6E-3   |
| Z_statistic_d1 (s)     | 215.8E-6 | 223.7E-6 | 228.5E-6 | 224.3E-6  | 227.3E-6 | 236.7E-6 | 212.2E-6 |
| ADI_d1 (s)             | 901.7E-6 | 925.8E-6 | 921.3E-6 | 930.01E-6 | 942.7E-6 | 950.2E-6 | 994.3E-6 |
| FRF_d2 (s)             | 126.7E-3 | 96.7E-3  | 65.8E-3  | 34.7E-3   | 21.7E-3  | 16.6E-3  | 10.3E-3  |
| Z_statistic_d2 (s)     | 233.4E-6 | 216.4E-6 | 218.2E-6 | 233.9E-6  | 221.6E-6 | 216.7E-6 | 216.7E-6 |
| ADI_d2 (s)             | 176.0E-6 | 148.2E-6 | 126.2E-6 | 138.8E-6  | 139.2E-6 | 147.9E-6 | 127.7E-6 |
| FRF_d3 (s)             | 127.0E-3 | 97.2E-3  | 66.7E-3  | 34.4E-3   | 22.2E-3  | 17.4E-3  | 9.9E-3   |
| Z_statistic_d3 (s)     | 208.6E-6 | 224.3E-6 | 227.9E-6 | 225.8E-6  | 224.9E-6 | 710.3E-6 | 346.2E-6 |
| ADI_d3 (s)             | 143.4E-6 | 149.7E-6 | 131.9E-6 | 131.3E-6  | 143.1E-6 | 268.9E-6 | 119.2E-6 |

**Tabla 5.4.** Comparación entre el tiempo empleado por el algoritmo para el cálculo de los valores ADI, variando la duración de la señal.

Para tomar decisiones sobre la reducción del número de datos, es necesario verificar que los valores ADI obtenidos con las limitaciones que impone la plataforma elegida son similares a los valores obtenidos sin limitaciones. Para ello se realizó un estudio paramétrico. Los resultados mostrados corresponde con la sección FD\_F0\_C34\_I5 y el cálculo del ADI se realizó en torno a la frecuencia de resonancia de 17.5 kHz (máxima frecuencia de resonancia que se puede medir con las restricciones de la plataforma). Los resultados obtenidos en el resto secciones son similares.

El primer paso realizado en la optimización fue verificar la variación del índice de daño al modificar la longitud de la ventana usada para el cálculo de la FRF. Para ello, usando la señal completa de 20 s, se utilizaron diferentes ventanas desde 2048 a 131072 muestras. Es bien conocido que los algoritmos espectrales son más eficientes si la longitud de la ventana es potencia de 2. El resultado se muestra en la Figura 5.13. Puede verse que la variación del índice ADI con las diferentes ventanas es muy pequeña en las diferentes simulaciones sísmicas. Por lo tanto, una longitud de ventana de 2048 muestras puede considerarse apropiada para el cálculo.

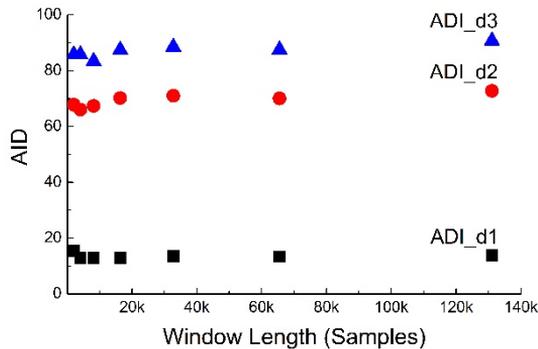


Figura 5.13. Valores de ADI de los tres niveles de daño en función de la longitud de la ventana.

El segundo paso consistió en verificar la variación del índice de daño al modificar la duración de la señal. Los resultados obtenidos con una longitud de la ventana de 2048 ( $2^{11}$ ), 16384 ( $2^{14}$ ) y 32768 ( $2^{15}$ ) muestras se exponen en la Figura 5.14. La duración de las señales varía entre 1 s y 20 s. Se puede observar

que los valores de ADI obtenidos son similares para todas las duraciones de señales y longitudes de ventanas consideradas. Hay que destacar que los valores de ADI para los diferentes niveles de daño no se mezclan entre ellos, manteniéndose independientes, lo que hace posible su discriminación.

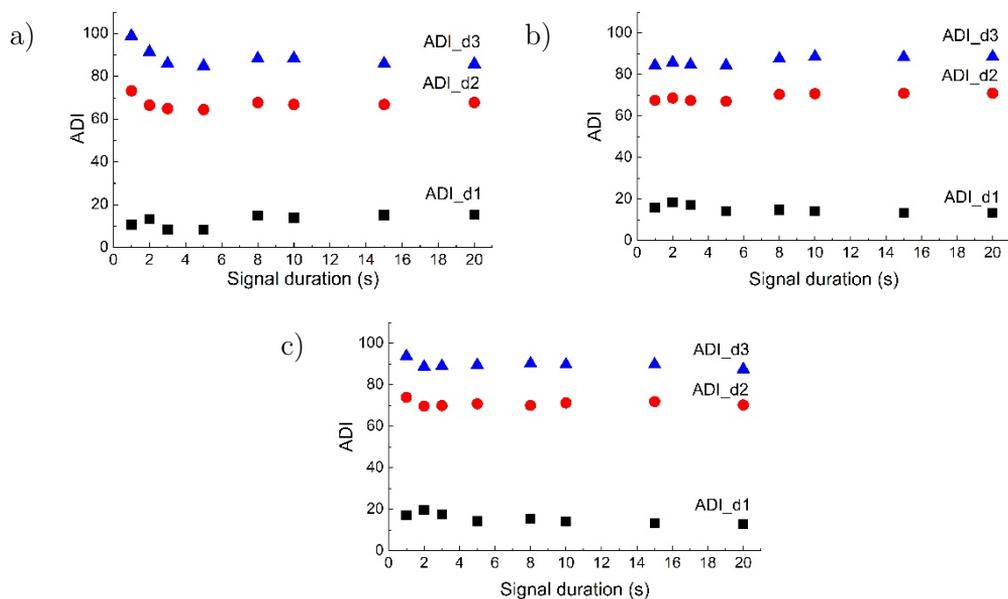


Figura 5.14. Valores de ADI de los tres niveles de daño en función de la duración de la señal. Longitud de ventana de a) 2048 muestras; b) 16384 muestras; c) 32768 muestras.

Después de verificar, para la frecuencia de muestreo de laboratorio de 65536 Hz, que la longitud de la ventana y la duración de la señal no tiene una fuerte influencia en los valores de ADI obtenidos, se repitió el cálculo del ADI usando los recursos de la plataforma. Se estudian 3 casos con diferentes parámetros mostrados en la Tabla 5.5.

|                     | HP_3s | LS_3s | LS_20s |
|---------------------|-------|-------|--------|
| Duration (s)        | 3     | 3     | 20     |
| L_windows (samples) | 2048  | 2048  | 32768  |
| N_windows           | 65    | 96    | 40     |
| fs (Hz)             | 44100 | 65536 | 65536  |
| f_peak (Hz)         | 17.5  | 17.5  | 17.5   |
| Resolution FRF (Hz) | 21.53 | 32    | 2      |

**Tabla 5.5. Parámetros de los diferentes casos estudiados. (HP: Plataforma *Hardware*. LS: Sistema de Laboratorio).**

La Figura 5.15 muestra los resultados obtenidos para los casos HP\_3s y LS\_20s. Las magnitudes FRF son muy similares, pero la frecuencia máxima representada en el caso LS\_20s es mayor puesto que la frecuencia de muestreo es también mayor. La resolución de la FRF del caso HP\_3s es menor, como ya se había calculado. El comportamiento de la magnitud  $|Z|$ -estadístico es también similar. El área marcada corresponde con el valor del índice ADI.

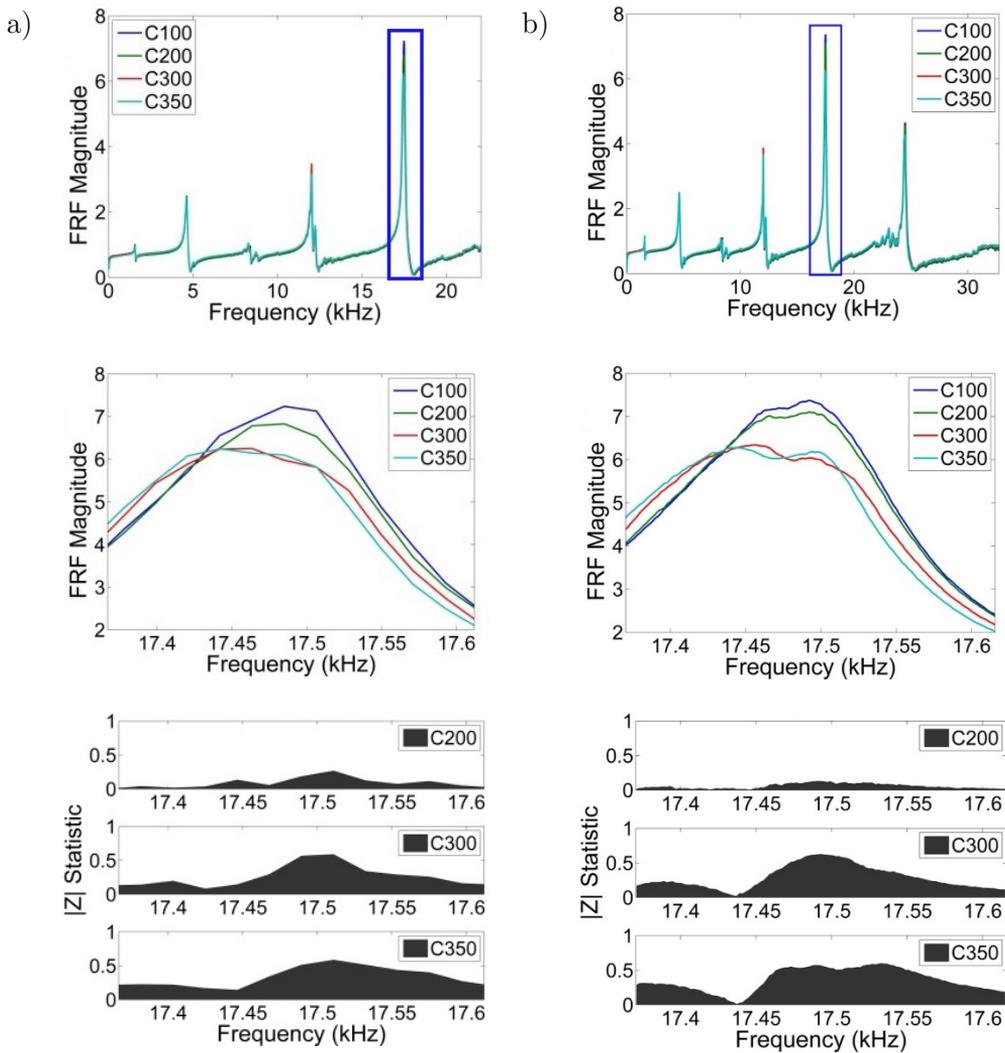


Figura 5.15. Resultados obtenidos para la sección FD\_F0\_C34\_I5. a) Caso HP\_3s; b) Caso LS\_20s. Arriba: Magnitud FRF para cada nivel de daño en todo el rango de frecuencia; Centro: Magnitud FRF en el ancho de banda seleccionado para el cálculo del ADI; Abajo: Magnitud  $|Z|$ -estadística en el ancho de banda seleccionado.

La Figura 5.16 muestra los valores del índice ADI obtenidos en los 3 casos de estudio para la sección FD\_F0\_F34\_I5. Se puede observar que los valores obtenidos son muy similares usando los diferentes parámetros.

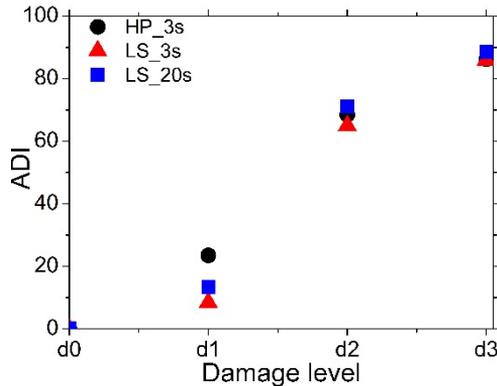


Figura 5.16. Valores de ADI frente a la simulación sísmica para la sección FD\_F0\_C34\_I5 en los 3 casos de estudio.

La Figura 5.17 muestra la correlación entre los valores ADI y el índice mecánico ID para las secciones FD\_F0\_C34\_I5 y FD\_F1\_C34\_I4. La relación entre ambos índices es aproximadamente lineal.

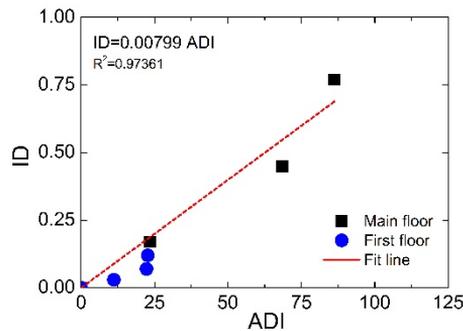


Figura 5.17. Valores de ADI frente a ID para las secciones FD\_F0\_C34\_I5 (Main floor) y FD\_F1\_C34\_I4 (First floor).

En resumen, se ha propuesto y validado una estrategia para reducir el número de datos requeridos para implementar el algoritmo de cálculo del índice de daño ADI en una plataforma *hardware* de bajo coste. Se ha conseguido reducir los recursos necesarios para obtener valores de índices de daño similares que usando grandes recursos solo disponibles en aplicaciones de laboratorio. Los resultados demuestran que es totalmente posible extraer información fiable usando un 90% menos de número de datos que usando equipos de laboratorio, reduciendo así en un 81.25% el tiempo de cálculo. Esta optimización podría ser

incluso más favorable si se realizara con señales de 1 s en vez de señales de 3 s, lo que supondría un ahorro de 96.5% en número de datos y 91% en tiempo de cálculo. Por tanto, esta estrategia permite la implementación del algoritmo de cálculo del ADI en una plataforma *hardware* como *Picocom*. Así es posible convertir un sistema con equipos caros y especializados disponibles en laboratorio, en una aplicación comercial con uso en edificios reales con disipadores histeréticos. Esta aplicación permitirá llevar a cabo el ensayo de vibraciones y conocer el índice de daño en los disipadores en tiempo real incluso por control remoto. Esta misma estrategia puede ser aplicada a otros campos y situaciones de SHM.

### 5.3. Índice de daño *Wavelet Energy Ratio* (WER)

El índice de daño WER, *Wavelet Energy Ratio*, está basado en la Análisis Wavelet Packet (WPA) y se desarrolla en dos pasos. El primero es descomponer las señales de vibraciones registradas en sus componentes usando el WPA. El segundo paso consiste en calcular la energía de cada componente y obtener el índice de daño WER.

En esta sección se realiza una introducción a la Transformada Wavelet y al análisis Wavelet Packet. Seguidamente se explica el fundamento y el cálculo del índice WER y se exponen los resultados obtenidos.

#### 5.3.1. Introducción a la Transformada Wavelet

La Transformada Wavelet es una herramienta matemática de análisis y representación de señales en tiempo/espacio - frecuencia, cuyas propiedades tienen una gran aplicación en física, ingeniería, economía, procesamiento de señales y aplicaciones matemáticas [159]. Surgió a principios de 1980 y se desarrolló rápidamente en diversos campos de la ingeniería [159-131].

La mayoría de señales no son estacionarias, es decir, no son constantes en sus parámetros estadísticos en el tiempo y suelen cubrir un amplio rango de

frecuencias. Suelen contener componentes transitorias, cuya aparición y desaparición son físicamente muy importantes. Generalmente, las frecuencias altas tienden a concentrarse en cortos intervalos de tiempo mientras que las bajas frecuencias suelen ocupar buena parte de la duración total de la señal.

El análisis clásico de este tipo de señales con la herramienta de la Transformada de Fourier (FT) puede resultar insuficiente. Este tipo de análisis permite conocer el contenido en frecuencias de una señal y su amplitud, pero la información sobre localización en tiempo de una determinada componente en frecuencia se pierde. Debido a su carácter general, la Transformada de Fourier es muy inestable con respecto a las perturbaciones.

Por estas razones, apareció el análisis en tiempo-frecuencia (TF). Para llevar a cabo esta idea se necesitan dos parámetros: el primero denominado  $a$ , que caracteriza la frecuencia, y el segundo,  $b$ , que indica la posición del intervalo temporal de señal.

Suponiendo que la transformación que sufre la señal es lineal, una transformación general en tiempo-frecuencia se define como:

$$s(x) \rightarrow S(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\psi_{ab}(x)} s(x) dx \quad (5.16)$$

donde  $s$  es la señal,  $\psi_{ab}$  es la función de análisis y  $S(a, b)$  es la transformada.

El análisis TF puede ser de dos tipos: la Transformada de Fourier por ventanas (STFT, *Short Time Fourier Transform*) y la Transformada Wavelet (WT, *Wavelet Transform*), en la que se basa el índice de daño propuesto. En ambos casos, la función de análisis  $\psi_{ab}$  se obtiene aplicando una función base conocida como “función madre” o “wavelet madre”,  $\psi$ . La principal diferencia entre ambos métodos es la forma en que aparece el parámetro  $a$  dependiente de la frecuencia.

#### Transformada de Fourier por ventanas (STFT)

En este caso la función de análisis se define como

$$\psi_{ab}(x) = e^{ix/a}\psi(x - b) \quad (5.17)$$

donde  $\psi$  es la función ventana y  $a$  depende de la frecuencia tal que  $1/a \sim$  frecuencia. La ventana tiene longitud constante pero cuanto más pequeño es el valor de  $a$ , en dicha ventana aparecen más oscilaciones.

### Transformada Wavelet (WT)

La función de análisis de la WT es

$$\psi_{ab}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{x - b}{a}\right) \quad (5.18)$$

donde  $a \neq 0$  es el factor de escala y  $b$  el factor de tiempo. El valor de  $a$  influye en la función  $\psi$  dilatándola si  $a > 1$  y contrayéndola si  $a < 1$ , pero sin cambiar su forma.

Las funciones wavelet madre empleadas como funciones de análisis se agrupan en familias que poseen las mismas características. Dentro de cada familia las funciones se diferencian por el número de orden.

Las propiedades más importantes que pueden tener las wavelets madre son [162, 163]:

- $\square$ El soporte compacto, propiedad por la que una wavelet madre posee duración finita, lo cual facilita una mayor resolución en el tiempo.
- La simetría, que permite que los filtros sean de fase lineal.
- La ortogonalidad, que se materializa cuando el producto de dos vectores es igual a cero.

Existen diversas familias de wavelet madre con diferentes características que las hacen idóneas para un tipo de análisis u otro. Las más usadas son las wavelet *Morlet*, wavelet *Haar*, wavelet *Mexican Hat*, wavelet *Symlets*, wavelet *Coiflets* y wavelet *Daubechies*. En esta tesis, se ha seleccionado la familia de

wavelet *Daubechies* de orden 5 (db5), decisión basada en ensayos de prueba y error. Además, esta familia se presentaba como la más adecuada para el tipo de análisis a realizar [164].

Las funciones de las wavelet *Daubechies* de orden N (dbN) no tienen una única expresión explícita que las defina. El número de orden indica la cantidad de momentos de desvanecimiento nulos que posee cada una. Las wavelet *Daubechies* desde orden 2 a orden 10 pueden verse en la Figura 5.18. Al aumentar el número de orden también aumenta su regularidad. Si N es el número de orden de wavelet, la longitud de la ventana es de  $(2N-1)$  y se comporta como un soporte compacto. Esta familia de funciones presenta las propiedades de ortogonalidad y biortogonalidad.

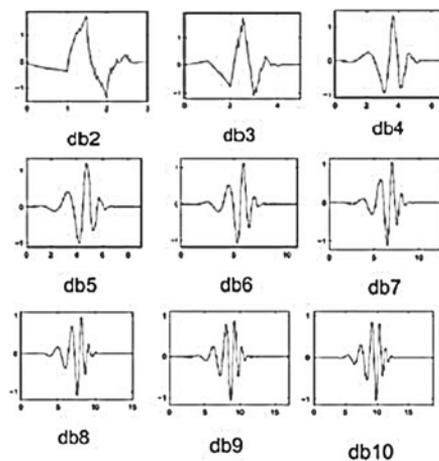


Figura 5.18. Familia de wavelets *Daubechies*.

### 5.3.2. Análisis *Wavelet Packet* (WPA): descomposición en múltiples niveles

El análisis *Wavelet Packet* (WPA) es una extensión de la Transformada Wavelet para descomponer una señal repetidamente en sus componentes de baja y alta frecuencia, denominadas aproximación y detalle, respectivamente. Se diferencia del Análisis Wavelet en Multi-Resolución (WMRA) en el hecho de que no solo se descompone la parte de baja frecuencia, sino también las

componentes en alta frecuencia. Por lo que los resultados obtenidos del análisis WPA son más flexibles y amplios [165, 166].

Un paquete wavelet es una familia de funciones de escala y funciones wavelets construidas siguiendo un árbol binario de dilataciones y translaciones. Un paquete wavelet,  $\psi_{j,k}^i(t)$ , es una función de tres índices, donde  $i, j, k$  son números enteros que representan los parámetros de modulación, escala y translación, respectivamente. Se puede escribir como

$$\psi_{j,k}^i(t) = 2^{j/2} \psi^i(2^j t - k), \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (5.19)$$

donde las wavelets  $\psi^i$  se obtiene de las siguientes relaciones recursivas

$$\psi^{2i}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \psi^i(2t - k) \quad (5.20)$$

$$\psi^{2i+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) \psi^i(2t - k) \quad (5.21)$$

siendo  $h(k)$  y  $g(k)$  filtros espejo en cuadratura asociados con la función de escala y la función wavelet respectivamente [29, 167]. En las ecuaciones (5.20) y (5.21),  $\psi^i(t)$  es la función wavelet madre, en nuestro caso, la wavelet *Daubechies* de orden 5 (db5).

Una señal temporal se puede descomponer en un número de niveles  $N$  aplicando el WPA. Esto significada que hay  $2^N$  componentes en cada  $N$ -ésimo nivel. Una representación esquemática de un WPA de una señal en el dominio del tiempo  $f(t)$  hasta el tercer nivel de descomposición se muestra en la Figura 5.19. En dicho esquema,  $f_j^i(t)$  es la subseñal donde  $j$  indica el nivel de descomposición en la estructura de árbol y el superíndice  $i$  es el número de nodo. Por ejemplo, la señal original,  $f_0^1(t)$ , se puede obtener mediante la suma de las componentes  $f_1^1(t)$ ,  $f_3^5(t)$ ,  $f_3^6(t)$  y  $f_2^4(t)$ . Las aproximaciones (ecuación (5.23)) corresponden con escala baja, es decir, componentes de baja frecuencia de la

señal, mientras que los detalles (ecuación (5.24)) corresponden a alta escala, las componentes de alta frecuencia de la señal.

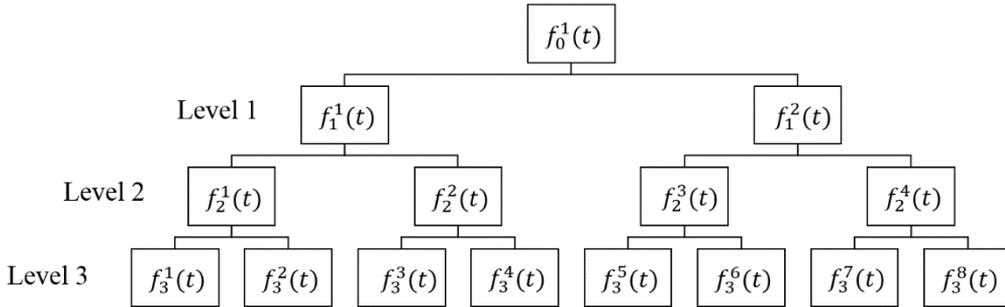


Figura 5.19. Representación esquemática de una descomposición de WPA de 3 niveles de una señal temporal.

Es necesario mencionar que se produce un proceso de submuestreo en cada etapa de la descomposición. Si no se produjera esta operación durante la descomposición, el número de muestras consideradas en cada etapa se duplicaría. Por ejemplo, si la señal original está compuesta de 100 muestras, las señales de aproximación y detalle tendrían también 100 muestras, es decir, 200 muestras en total. Para solucionar este problema que aumenta el tiempo de computación y el almacenamiento de datos, se produce el submuestreo, ignorando la segunda muestra de cada par.

Las relaciones recursivas entre las componentes de los niveles  $j$  y  $j + 1$  se muestran a continuación.

$$f_j^i(t) = f_{j+1}^{2i-1}(t) + f_{j+1}^{2i}(t) \quad (5.22)$$

$$f_{j+1}^{2i-1}(t) = Hf_j^i(t) \quad (5.23)$$

$$f_{j+1}^{2i}(t) = Gf_j^i(t) \quad (5.24)$$

donde  $H$  y  $G$  representan los operadores de filtrado, relacionados con los filtros discretos de paso baja y paso alta,  $h(k)$  y  $g(k)$ , respectivamente, mediante

$$H\{\cdot\} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k - 2t) \quad (5.25)$$

$$G\{\cdot\} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k - 2t) \quad (5.26)$$

Después de  $j$  niveles de descomposición, la señal original  $f(t)$  se puede expresar como

$$f(t) = \sum_{i=1}^{2^j} f_j^i(t) \quad (5.27)$$

donde  $f_j^i(t)$  es la subseñal del nivel de descomposición  $j$  y del nodo  $i$ . La componente  $f_j^i(t)$  se puede expresar como una combinación lineal de las funciones del paquete wavelet  $\psi_{j,k}^i(t)$  como sigue

$$f_j^i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j,k}^i \psi_{j,k}^i(t) \quad (5.28)$$

y los coeficientes  $c_{j,k}^i$  se obtienen aplicando

$$c_{j,k}^i = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}^i(t) dt \quad (5.29)$$

manteniéndose la ortogonalidad de las funciones del paquete wavelet:

$$\psi_{j,k}^m(t) \psi_{j,k}^n(t) = 0 \quad \text{if } m \neq n \quad (5.30)$$

Cada componente en el árbol del WPA se puede entender como un filtrado aplicado a una función particular, tal que el árbol completo puede entenderse como un banco de filtros. En la parte superior del árbol del WPA (niveles más bajos), el WPA proporcionar una buena resolución en el dominio del tiempo pero una resolución pobre en el dominio de la frecuencia. En las partes inferiores

del árbol (niveles más altos), los resultados del WPA presentan buena resolución en el dominio de la frecuencia pero una resolución pobre en el dominio temporal.

El orden de los coeficientes del paquete wavelet no está ordenado por frecuencia sino siguiendo el código de Gray. Esta codificación fue desarrollada a partir del código binario por el investigador Frank Gray y se caracteriza porque para pasar de un número al siguiente solamente es necesario cambiar un dígito del mismo. Esta codificación se debe a la alteración del orden de las componentes de baja y alta frecuencia durante el proceso de filtrado y submuestreo realizado en los diferentes niveles de la descomposición [168]. Este factor deber ser considerado durante la identificación de las diferentes bandas y la asignación de los intervalos de frecuencias. La Tabla 5.6 muestra la relación entre la codificación de Gray con el código binario y la numeración decimal.

| Decimal | Binario | Gray |
|---------|---------|------|
| 1       | 001     | 001  |
| 2       | 010     | 011  |
| 3       | 011     | 010  |
| 4       | 100     | 110  |
| 5       | 101     | 111  |
| 6       | 110     | 101  |
| 7       | 111     | 100  |

Tabla 5.6. Comparación de la codificación de Gray con código binario y la numeración decimal.

### 5.3.3. Índice de daño WER: fundamento y cálculo

En este apartado se explica el procedimiento y la formulación necesaria para obtener el índice de daño llamado *Wavelet Energy Ratio*, WER. Este índice está basado en la evaluación de energía del WPA y se divide en dos fases. Cabe destacar que para la obtención de este índice no se utiliza la señal de excitación usada para la realización del ensayo de vibraciones, pues se trata de un algoritmo de solo respuesta. La primera fase del algoritmo, Fase 0 o Fase de caracterización, consiste en caracterizar la sección I sin daño a través del ensayo

de vibraciones. La siguiente fase, Fase 1 o Fase de inspección, consiste en realizar ensayos de vibraciones en cualquier momento durante la vida para conocer su “salud”, especialmente, tras la ocurrencia de un terremoto.

Con el objetivo de extraer la información del daño estructural de las señales registradas en los ensayos de vibraciones y calcular el índice WER, se siguen los siguientes pasos:

1. En primer lugar, se realiza una normalización de las señales:

$$f(t) = \frac{f(t)_r - \bar{f}(t)_r}{\sigma(f(t)_r)} \quad (5.31)$$

donde  $f(t)$  es la señal normalizada,  $f(t)_r$  es la señal registrada y  $\bar{f}(t)_r$  y  $\sigma(f(t)_r)$  son la media y la desviación estándar de  $f(t)_r$ , respectivamente.

2. La señal normalizada  $f(t)$  se descompone en múltiples subseñales usando la descomposición del WPA. Mediante ensayos de prueba y error, se encontró que el nivel óptimo de descomposición era 7, por lo que, el número de subseñales que se obtienen en este procedimiento es de  $2^7$ , 128 nodos. Este paso se debe realizar tanto en la Fase 0 como en la Fase 1.

3. La energía de cada subseñal se calcula de acuerdo con la ecuación

$$E_j^i = \int |f_j^i(t)|^2 dt \quad (5.32)$$

La energía de las señales obtenidas en la Fase 0 se denomina  $E_j^{i0}$  y las de la fase de inspección  $E_j^i$ , donde  $i$  es el número de nodo y  $j$  es el nivel de descomposición.

4. La energía de cada subseñal obtenida en la Fase 1 ( $E_j^i$ ) se compara con la energía de la subseñal que ocupa la misma posición ( $j, i$ ) obtenida en la Fase 0 ( $E_j^{i0}$ ). La variación de la energía de cada subseñal de orden  $i$  se caracteriza por el parámetro  $\Lambda_i$  definido en la ecuación (5.33), que

proporciona una medida del aumento o disminución de la energía de dicha subseñal.

$$\Lambda_i = 1 - \frac{E_j^{i0}}{E_j^i} \quad i=1, 2, \dots, 2^j \quad (5.33)$$

5. Se compone un vector de índices adimensional con todas las subseñales del nivel de descomposición seleccionado ( $j=7$ ):

$$V_d = [\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_{2^j}] = [\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_{128}] \quad (5.34)$$

6. Finalmente, el índice WER se define como el máximo valor de las componentes del vector de índices considerando una banda de frecuencia alrededor de 25 kHz, correspondiente a la máxima frecuencia de resonancia de la sección I que puede ser registrada con los equipos de medida utilizados, en este caso, 32768 Hz. La señal está dividida en 128 nodos, lo que indica que a cada nodo le corresponde una banda de frecuencia de 256 Hz. El vector de índices  $V_d$  que corresponde con esta banda de frecuencia se va a denominar  $V_d^5$  e incluye la banda [24576, 26112] Hz. Por tanto,

$$V_d^5 = V_d [24576, 26112] \text{ Hz} = [\Lambda_{97}, \Lambda_{98}, \Lambda_{99}, \Lambda_{100}, \Lambda_{101}, \Lambda_{102}] \quad (5.35)$$

$$WER = \max[V_d^5] = \max[\Lambda_{97}, \Lambda_{98}, \Lambda_{99}, \Lambda_{100}, \Lambda_{101}, \Lambda_{102}] \quad (5.36)$$

#### 5.3.4. Resultados obtenidos en los ensayos sísmicos

En esta sección se muestran los resultados del índice WER obtenidos en las diferentes secciones I de los disipadores instalados en los especímenes FD y SD, tanto en planta baja como en planta primera.

La Figura 5.20-a muestra, a modo de ejemplo, la energía wavelet registrada en cada uno de los nodos ordenados por frecuencia obtenida para una de las secciones ubicadas en la planta baja del espécimen SD (SD\_F0\_C1\_I12). Se puede observar que la energía wavelet en torno a 18 kHz, coincidente con la

cuarta frecuencia de resonancia, es bastante más elevada que la registrada en torno a 25 kHz (quinta frecuencia de resonancia). Sin embargo, si observamos a igual escala y en detalle ambos casos, Figura 5.20-b y c respectivamente, se observa que las diferencias de energía wavelet entre un nivel de daño y el siguiente son mayores en el caso de la última frecuencia de resonancia registrada. Este resultado coincide con la explicación mecánica asociada a los modos de vibración expuesta en el Apartado 5.2.3.

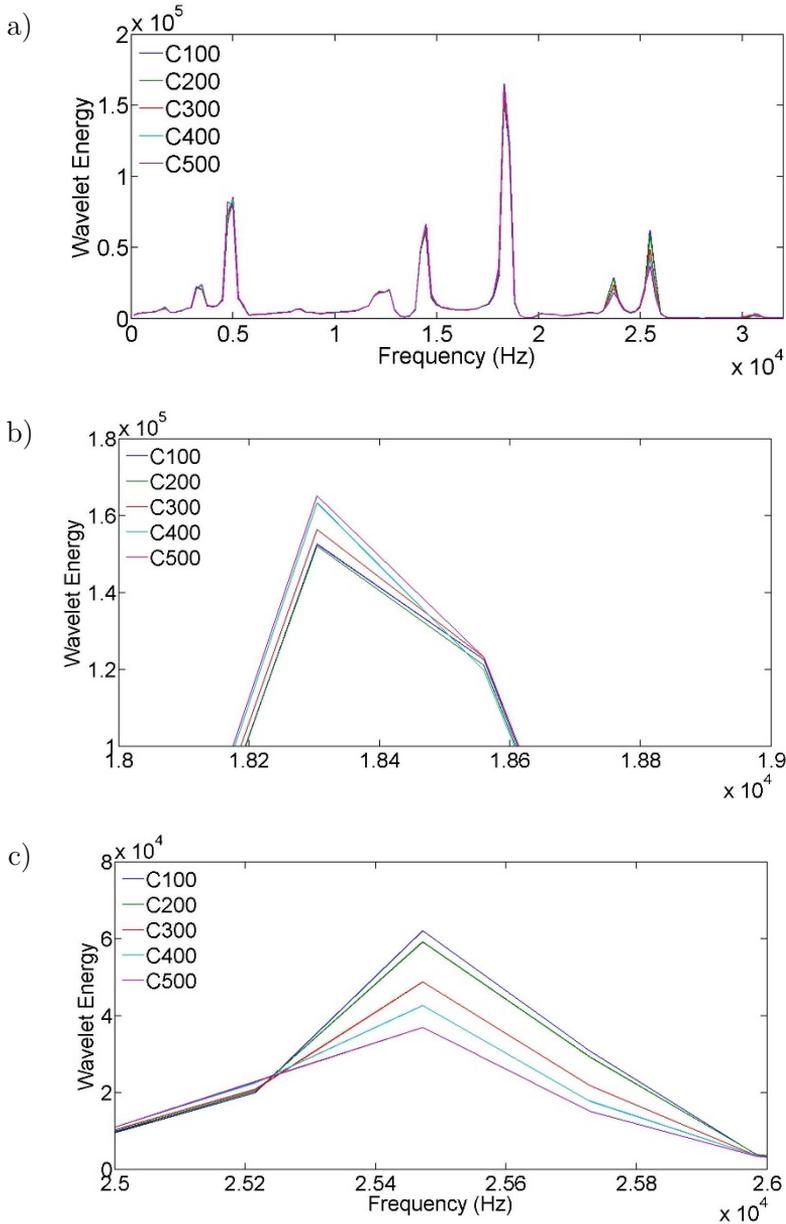


Figura 5.20. Energía wavelet frente a frecuencia obtenida en una sección de planta baja del espécimen SD (SD\_F0\_C1\_I12). a) Ancho de frecuencia registrado; b) Cuarta frecuencia de resonancia; c) Quinta frecuencia de resonancia.

La Figura 5.21 muestra los valores del vector  $V_d$  obtenidos para los diferentes niveles de daño en función de la frecuencia para dos de las secciones situadas en la planta baja (FD Ground floor I1 corresponde con

FD\_F0\_C12\_I1 y FD Ground floor I2 corresponde con FD\_F0\_C34\_I1) y dos secciones de la planta primera (FD First floor I1 corresponde con FD\_F1\_C12\_I4 y FD First floor I2 con FD\_F1\_C34\_I1) del espécimen FD. Se puede observar un aumento claro de  $V_d$  en torno a 25 kHz, coincidiendo con la frecuencia de resonancia más alta registrada y en consonancia con los resultados de energía wavelet mostrados en la Figura 5.20. Por estos motivos, se considera la banda de frecuencia [24576, 26112] para calcular el índice WER. También se demuestra, como era de esperar, que el daño se incrementa al aumentar la aceleración del sismo.

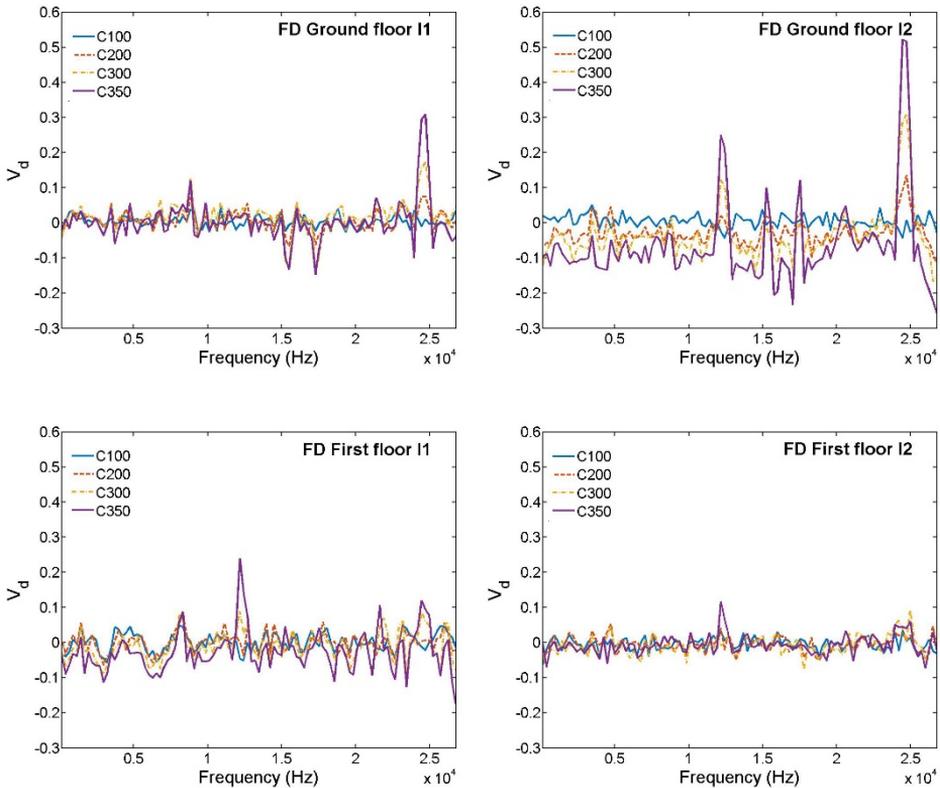


Figura 5.21.  $V_d$  frente a frecuencia para las secciones I del espécimen FD.

Con el objetivo de realizar una comparación entre el uso del WPA y el análisis de Fourier, la Figura 5.22 muestra la magnitud FRF en el rango [0-32] kHz y un detalle del rango en torno a la quinta frecuencia para la sección

FD\_F0\_C12\_I1 (FD Ground floor I1). Puede comprobarse como el cambio inducido por el daño es más notable en el vector  $V_d$  que en la magnitud FRF. Estas diferencias se han evaluado en la Tabla 5.7, donde se muestra en porcentaje los cambios en amplitud del vector  $V_d$  y los cambios en la magnitud FRF, respecto a la simulación sísmica C100. Las diferencias son significativamente más grandes para el vector de daño  $V_d$  que para la magnitud FRF. Por ejemplo, para la simulación C350, los cambios en la FRF son de aproximadamente el 16% mientras que la magnitud  $V_d$  cambia alrededor de un 970%.

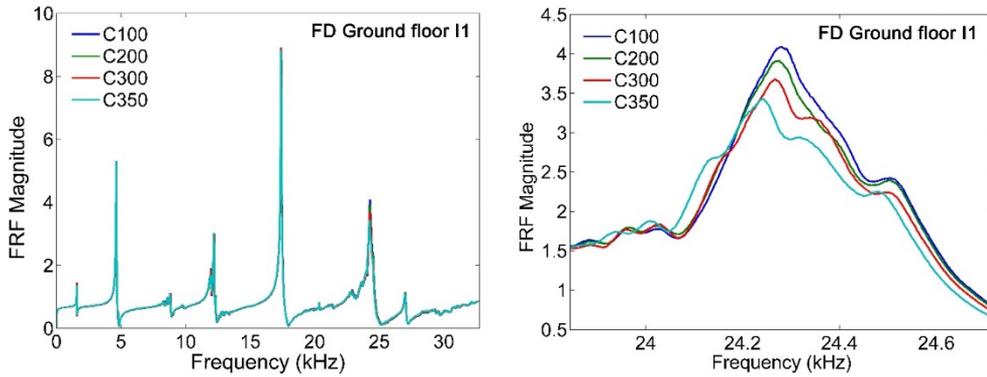


Figura 5.22. FRF frente a frecuencia para las secciones I del espécimen FD.

|      | $\Delta$ Magnitud FRF (%) |                 | $\Delta$ Magnitud $V_d$ (%) |                 |
|------|---------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------|
|      | Magnitud FRF              | [respecto C100] | Magnitud $V_d$              | [respecto C100] |
| C100 | 4.093                     | 0.00            | 0.028                       | 0               |
| C200 | 3.914                     | -4.37           | 0.0762                      | 172.14          |
| C300 | 3.681                     | -10.07          | 0.1686                      | 502.14          |
| C350 | 3.435                     | -16.08          | 0.3008                      | 974.29          |

Tabla 5.7. Magnitud FRF y magnitud  $V_d$  para la sección FD\_F0\_C12\_I1 a diferentes niveles de daño y sus variaciones (%) respecto a la simulación C100.

La Figura 5.23 muestra los resultados obtenidos para secciones I localizadas en el espécimen SD, en concreto las secciones SD\_F0\_C1\_I12, SD\_F0\_C1\_I1, SD\_F1\_C1\_I7 y SD\_F1\_C1\_I15 (mostradas como SD Ground floor I1 e I2 y SD First floor I1 e I2, respectivamente).

En ambos especímenes, los valores de  $V_d$  y, en consecuencia, los valores del índice WER son mayores en planta baja que en planta primera, indicando que los mayores daños se concentran en la planta inferior. Debido a la gran aceleración de la última simulación sísmica llevada a cabo en el espécimen SD, el disipador de planta baja quedó muy dañado, por lo que no se pudo realizar el ensayo de vibraciones de la simulación C600 en ese caso.

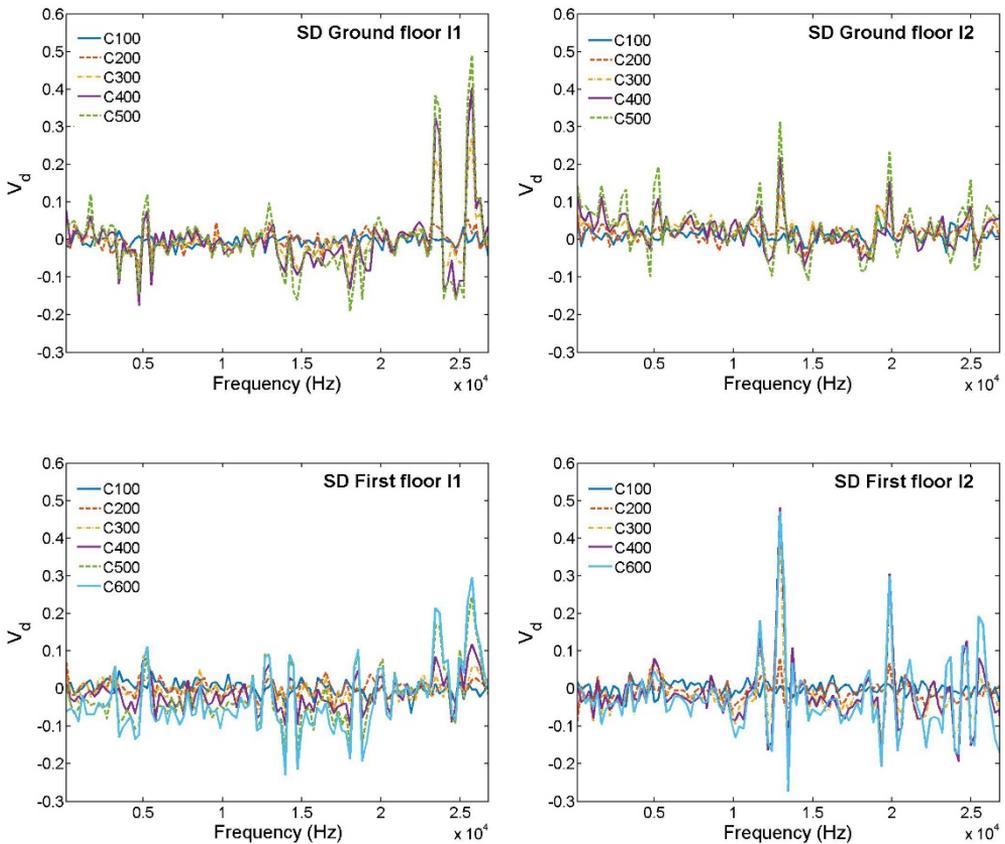


Figura 5.23.  $V_d$  frente a frecuencia para las secciones I del espécimen SD.

Con objeto de establecer la fiabilidad del índice WER propuesto se ha realizado una comparación con el índice de daño mecánico ID, ampliamente validado [4, 6]. En primer lugar, la comparación se ha realizado considerando los valores WER obtenidos para cada nivel de daño y en cada una de las repeticiones del ensayo de vibraciones (T1, T2, T3 y T4 en el espécimen FD y

T1, T2 y T3 en el espécimen SD). Los resultados se muestran en la Figura 5.24 para el espécimen FD y en la Figura 5.25 para el espécimen SD. Se puede observar que el índice WER se adapta al comportamiento del índice ID al aumentar el nivel de daño y que no existen diferencias entre las distintas repeticiones del ensayo en cada caso.

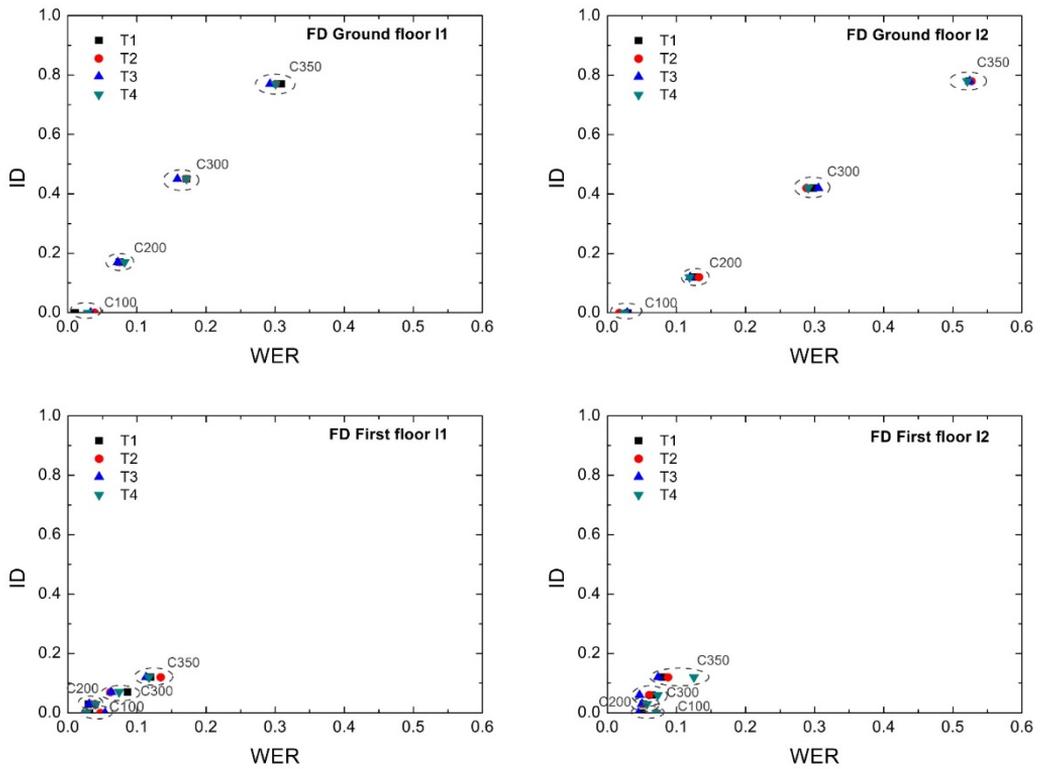


Figura 5.24. ID frente WER para las secciones del espécimen FD.

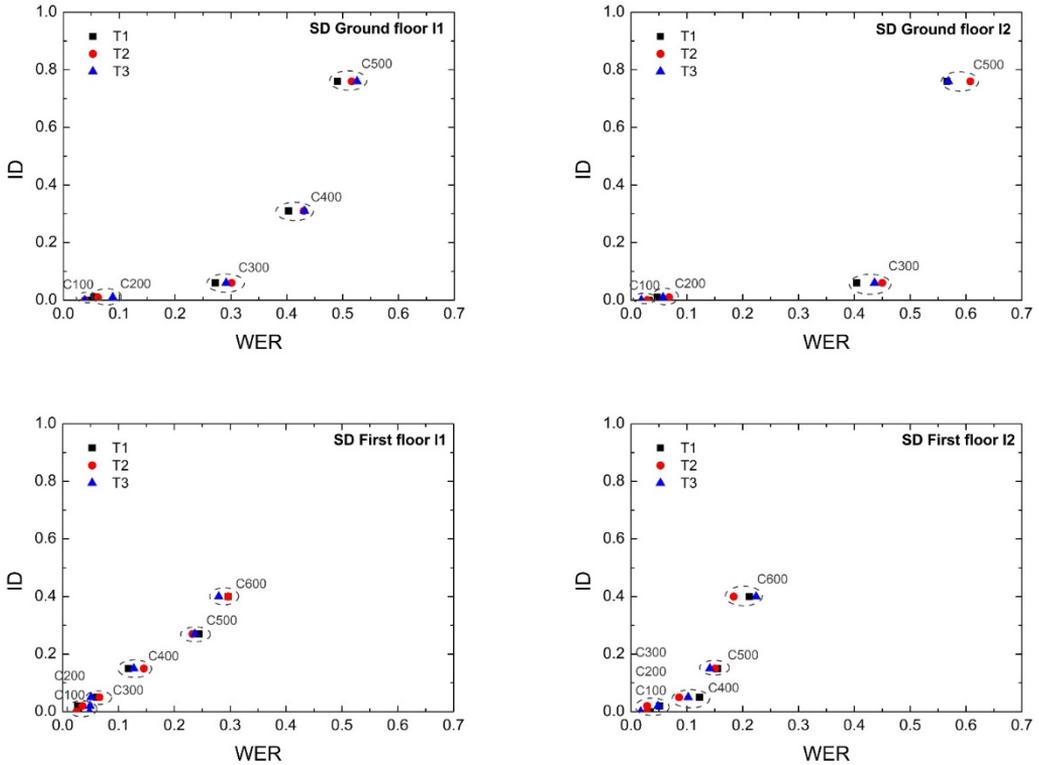


Figura 5.25. ID frente WER para las secciones del espécimen SD.

La Figura 5.26 muestra la representación del índice WER frente al ID agrupando las secciones de cada espécimen. Cada punto indica la media de los índices WER obtenidos en las distintas repeticiones del ensayo de vibraciones. En cada caso se ha realizado un ajuste lineal y se muestra los coeficientes de correlación. Los resultados son en general muy satisfactorios, especialmente para el espécimen FD.

Conocida la buena correlación entre los índices ID y WER, el valor del índice ID puede ser obtenido directamente una vez conocido el índice WER, lo que presenta dos importantes ventajas: (i) no se necesita instrumentación registrando información en tiempo real durante el terremoto y (ii) la instrumentación requerida en los ensayos de vibraciones es más simple y económica.

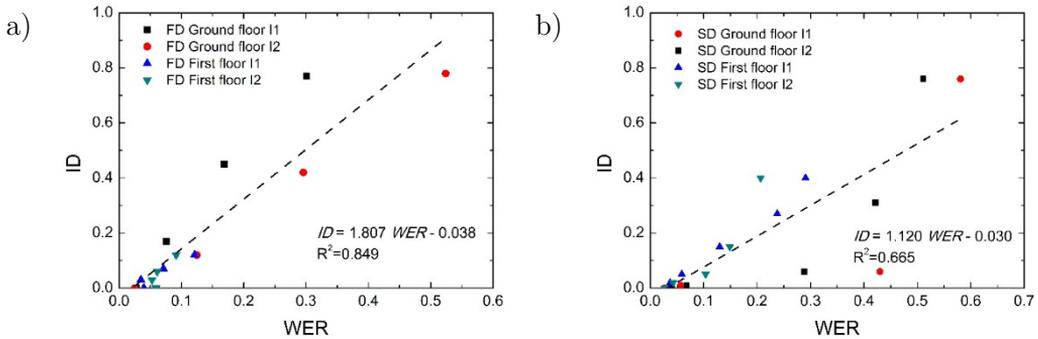


Figura 5.26. ID frente WER para las secciones de los disipadores del espécimen a) FD; b) SD.

Las secciones I usadas para los especímenes FD y SD no fueron cortadas del mismo perfil de acero. Además, se admiten tolerancias en las dimensiones de los perfiles de acero. Según la norma EN 10034:1993, para las secciones I estudiadas (perfiles IPE140) la tolerancia permitida es  $\pm 3.0$  mm en el alto de la sección y  $\pm 0.70$  mm en el espesor del alma. Como resultado, las dimensiones (y las propiedades mecánicas del acero) de las secciones I usadas en los especímenes FD y SD no son exactamente las mismas. Por otro lado, cada espécimen (FD y SD) tiene una tipología constructiva totalmente diferente con unos disipadores de dimensiones diferentes. Por ambas razones, la correlación entre los índices WER e ID es diferente para ambos especímenes, y son mostrados en diferentes figuras (Figura 5.26-a y b).

#### 5.4. Índice de daño basado en la entropía: *Relative Wavelet Energy Entropy* (RWEE)

La extracción de características de señales transitorias es una parte importante del análisis de señales. La entropía wavelet ha atraído la atención de los expertos como un nuevo algoritmo para conseguirlo [34, 37, 38, 40].

El nuevo índice que se propone pretende combinar la transformada wavelet con la información que proporciona la entropía para acumular las ventajas de ambas técnicas.

### 5.4.1. Definición de entropía wavelet

La entropía wavelet es una combinación de la descomposición wavelet y las teorías estadísticas relacionadas con la entropía. Presenta las ventajas del análisis multiresolución y la complejidad de la evaluación de las señales variantes en el tiempo, que quiere decir, que los aspectos macro y micro de algunas señales pueden ser investigados en el dominio tiempo-frecuencia [34].

Por estas razones, la entropía wavelet está siendo gradualmente más usada en múltiples aplicaciones como en medicina, detección de vibración en maquinaria, diagnóstico de fallos en sistemas y otras aplicaciones [35-38].

El daño se muestra como un desorden en la señal de respuesta estructural. Una aproximación natural para cuantificar el grado de orden de una señal compleja es su entropía espectral o entropía de Shannon, definida a partir de su espectro de potencia de Fourier [39].

La entropía espectral es una medida del grado de concentración o dispersión del espectro de una señal. Una actividad ordenada, como una señal sinusoidal, presenta un espectro formado por una pico estrecho. Esta concentración del espectro en un solo pico corresponde con un valor bajo de entropía. Si consideramos una actividad muy desordenada tendrá una respuesta frecuencia en una banda ancha del espectro, lo que indica un valor alto de entropía [40].

La entropía de Shannon puede ser calculada mediante la expresión

$$E = - \sum_{i=1}^N p_i \cdot \log(p_i) \quad (5.37)$$

donde  $p_i$  es la probabilidad de que un sistema se encuentre en el estado  $i$  y  $N$  es el número total de estados.

La entropía wavelet se usa para caracterizar el grado de orden/desorden asociado a una señal de respuesta multifrecuencial. Si relacionamos el concepto de entropía con la energía obtenida en cada una de las bandas de frecuencia en

la que hemos dividido la señal mediante la aplicación del WPA explicada en el Apartado 5.3.2, obtenemos la expresión de la entropía de la energía wavelet (WEE)

$$WEE = - \sum_{i=1}^N \frac{E_i}{E_t} \cdot \log \left[ \frac{E_i}{E_t} \right] \quad (5.38)$$

siendo  $E_i$  la energía de cada nodo  $i$  y  $E_t$  la suma de la energía de todos los  $N$  nodos considerados.

Los resultados demuestran que la entropía basada en la transformada wavelet es una buena candidata para caracterizar el daño puesto que es sensible al daño estructural local [39]. Cuando una estructura se encuentra dañada se produce un cambio en la entropía wavelet. Sabemos también que la energía wavelet relativa asociada a diferentes bandas de frecuencia de señales obtenidas en la fase de caracterización y de inspección, permite detectar cambios en el nivel de daño de la sección I. Si unificamos este concepto y el de entropía, obtenemos la llamada entropía de energía wavelet relativa (RWEE, *Relative Wavelet Energy Entropy*). La RWEE se define como

$$RWEE = - \sum_{i=1}^N p_i \cdot \log \left[ \frac{p_i}{q_i} \right] \quad (5.39)$$

siendo  $p_i$  y  $q_i$  los vectores que relacionan la energía wavelet de cada nodo respecto a la energía total de los nodos considerados de la señal de vibraciones obtenida en la fase de inspección y en la fase de caracterización (elemento sin daño), respectivamente. Los vectores  $p_i$  y  $q_i$  se pueden expresar

$$p_i = \left( \frac{E_i}{E_t} \right)_{inspected} \quad (5.40)$$

$$q_i = \left( \frac{E_i}{E_t} \right)_{undamaged} \quad (5.41)$$

Cuando la sección a estudiar se encuentra sin daño o con un nivel de daño muy pequeño, el valor de RWEE estará muy cercano a cero, puesto que se están comparando dos señales muy similares. Cuando la estructura está dañada, el valor de RWEE se aleja del valor nulo.

Cabe destacar que la RWEE se puede utilizar también para comparar diferentes segmentos de una misma señal.

#### 5.4.2. Índice de daño RWEE: fundamento y cálculo

Se procede a explicar el procedimiento seguido para obtener el índice de daño asociado a la entropía de energía wavelet relativa, RWEE. Este índice está basado en la entropía calculada con la evaluación de energía obtenida mediante el WPA. Como ocurre con los índices explicados anteriormente, ADI y WER, el proceso se divide en dos fases: la Fase 0 o Fase de caracterización, en la que se caracteriza la sección I sin daño y la Fase 1 o Fase de inspección, que se realiza en cualquier momento durante la vida para conocer su “salud”, especialmente tras un terremoto. Este algoritmo es de tipo solo respuesta, puesto que no necesita la señal excitación utilizada en el ensayo de vibraciones.

Los pasos a seguir para obtener el índice de daño RWEE se enumeran a continuación:

1. En primer lugar, se realiza una normalización de las señales:

$$f(t) = \frac{f(t)_r - \bar{f}(t)_r}{\sigma(f(t)_r)} \quad (5.42)$$

donde  $f(t)$  es la señal normalizada,  $f(t)_r$  es la señal registrada y  $\bar{f}(t)_r$  y  $\sigma(f(t)_r)$  son la media y la desviación estándar de  $f(t)_r$ , respectivamente.

2. La señal normalizada  $f(t)$  se descompone en múltiples subseñales usando la descomposición del WPA, aplicando 7 niveles de descomposición, resultando  $2^7$ , 128 nodos.

3. La energía de cada subseñal se calcula de acuerdo con la ecuación

$$E_j^i = \int |f_j^i(t)|^2 dt \quad (5.43)$$

La energía de las señales obtenidas en la Fase 0 se denomina  $E_j^{i0}$  y las de la fase de inspección  $E_j^i$ , donde  $i$  es el número de nodo y  $j$  es el nivel de descomposición.

Los pasos 1, 2 y 3 se realizan tanto en las Fases de caracterización como de inspección. Además, son pasos comunes para el cálculo del índice WER explicado en el Apartado 5.3.

4. El índice de daño RWEE se obtiene tras aplicar la ecuación (5.44), siendo  $E_j^i$  la energía de cada subseñal en el nivel de descomposición  $j$ ,  $E_{jt}$  es la suma de la energía de todas las subseñales del nivel  $j$ , ambas obtenidas en la Fase 1; los mismos parámetros obtenidos en la Fase 0 se denominan  $E_j^{i0}$  y  $E_{jt}^0$ ;  $N$  es el número total de subseñales, en este caso, 128.

$$RWEE = - \sum_{i=1}^N \left( \frac{E_j^i}{E_{jt}} \right) \cdot \log \left( \frac{\frac{E_j^i}{E_{jt}}}{\frac{E_j^{i0}}{E_{jt}^0}} \right) \quad (5.44)$$

Cabe destacar que este índice se calcula para la señal completa, es decir, considerando todas las frecuencias de la señal. Es una gran diferencia con los índices explicados anteriormente, ADI y WER, donde se tenía en cuenta solo una banda de frecuencia en torno a una determinada frecuencia de resonancia. Esta característica presenta la ventaja de que no es necesario establecer previamente anchos de banda para el cálculo.

### 5.4.3. Resultados obtenidos en los ensayos sísmicos

En esta apartado se muestran los resultados del índice RWEE obtenidos en diferentes secciones I de los disipadores instalados en los especímenes FD y SD,

tanto en planta baja como en planta primera y su correlación con el índice mecánico ID.

Las Figuras 5.27 y 5.28 muestra los valores del índice de daño mecánico ID frente al índice de daño RWEE obtenido en cada una de las cuatro repeticiones del ensayo de vibraciones llevadas a cabo tras cada simulación sísmica en las secciones I de los especímenes FD y SD situadas en las plantas baja y primera. Se puede observar que los valores obtenidos en las distintas repeticiones son muy similares y siempre crecientes al aumentar el nivel de daño. Además, las diferencias entre las distintas repeticiones del ensayo en un mismo nivel de daño son muy pequeñas.

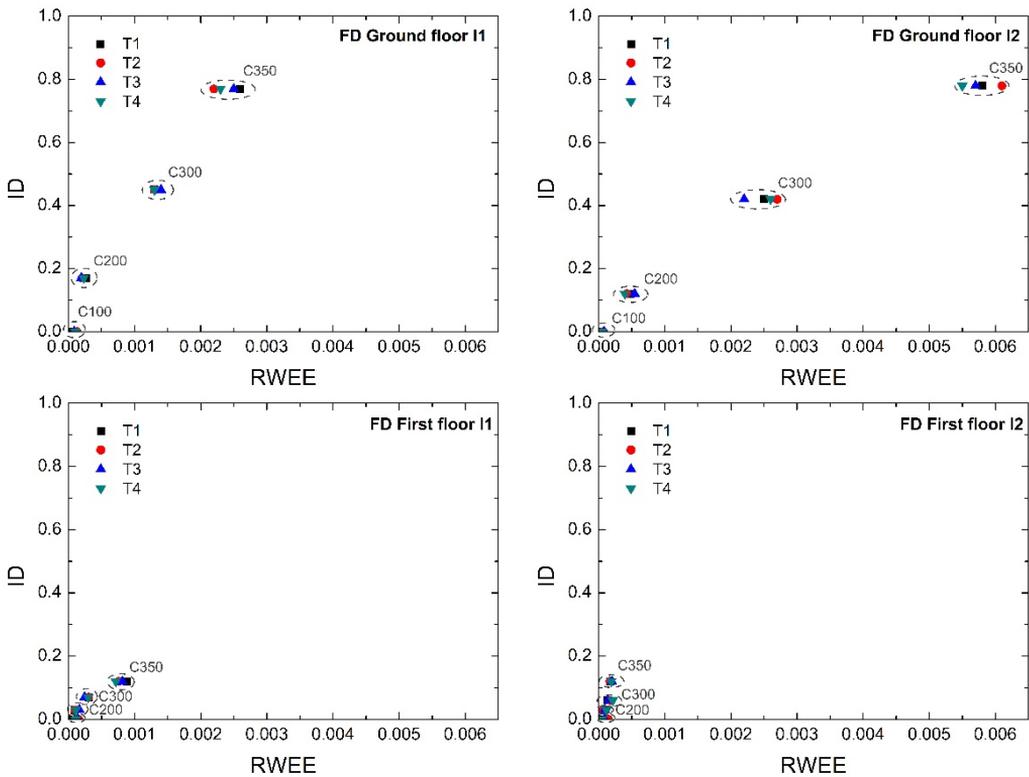


Figura 5.27. ID frente RWEE para las secciones del espécimen FD.

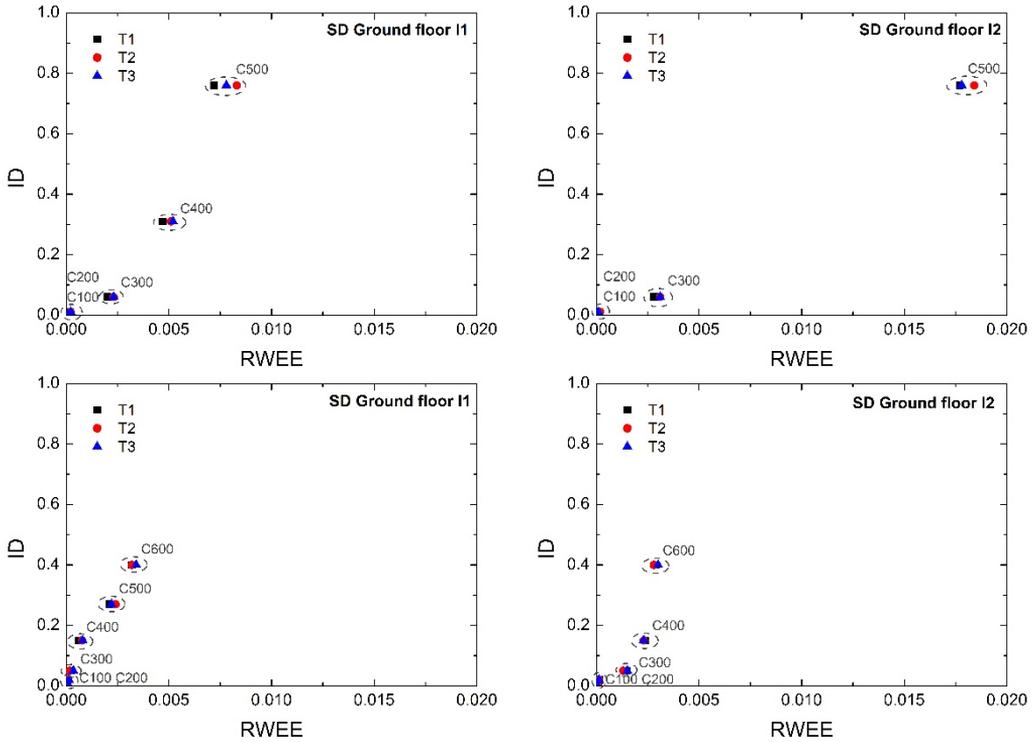


Figura 5.28. ID frente RWEE para las secciones del espécimen SD.

La Figura 5.29 muestra los valores de RWEE obtenidos como la media de las repeticiones frente a ID para las secciones I del espécimen FD y por otro lado, para las secciones del espécimen SD. Se puede comprobar que existe una relación creciente entre los valores de RWEE y el índice de daño mecánico, confirmando una vez la relación entre los índices de daño obtenidos mediante ensayo de vibraciones y el índice de daño mecánico. En este caso, tratándose de un algoritmo que sólo tiene en cuenta la señal de salida y todo el rango de frecuencia.

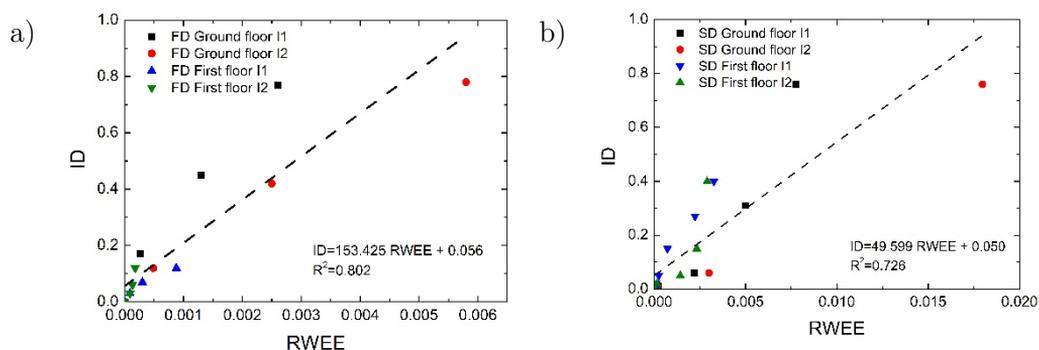


Figura 5.29. ID frente RWEE para las secciones de los disipadores del espécimen a) FD; b) SD.

## 5.5. Clasificador de daño

## 5.6. Clasificador de daño

En este apartado se propone un clasificador para asignar un nivel de daño a las secciones I asociado a los índices de daño calculados durante la fase de inspección. De este modo se llega hasta el Nivel 3 en Monitorización Estructural, es decir, clasificar el nivel de daño. La clasificación se ha realizado considerando los distintos índices de daño basados en el ensayo de vibraciones, teniendo en cuenta un solo índice (clasificación 1D), dos índices (2D) o los tres índices simultáneamente (3D).

Una clasificación es una tarea de minería de datos para predecir la categoría de una variable mediante la construcción de un modelo basado en uno o varios atributos.

### 5.6.1. Algoritmo de clasificación de los $k$ vecinos más cercanos ( $kNN$ )

En este trabajo se ha elegido el algoritmo de clasificación de los  $k$  vecinos más cercanos, denominado algoritmo  $kNN$  ( $k$ -Nearest Neighbors algorithm). Se trata de uno de los algoritmos más fácil de entender y de implementar, muy

versátil para multitud de aplicaciones. De hecho, está considerado como uno de los 10 mejores algoritmos de procesamiento de datos [169]. El algoritmo  $kNN$  pertenece a un tipo de clasificadores basado en funciones de similitud denominados *lazy learner*, es decir, clasificadores “vagos” en los que no se requiere una fase explícita de entrenamiento o es mínima. También se considera como método de clasificación no paramétrico [170]. En el proceso de aprendizaje no se hace ninguna suposición acerca de la distribución de las variables predictoras [171].

Este algoritmo se basa en encontrar en una base de datos los  $k$  objetos más cercanos al objeto a clasificar. La asignación de clase se basa en la clase más frecuente de sus  $k$  vecinos más próximos [172]. Si se utiliza el algoritmo  $kNN$  con datos ordenados en categorías o clases, el algoritmo devuelve la categoría a la cual debería pertenecer el objeto de clase desconocida. Si se utiliza con datos continuos, el algoritmo devuelve la media de los valores de los vecinos [173].

El algoritmo se compone de cuatro elementos básicos: la base de datos conocida  $D$ , el número  $k$  de vecinos más cercanos, el objeto a clasificar y el tipo de distancia a calcular entre el objeto a clasificar y los objetos de la base de datos.

El proceso se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Se dispone de una base de datos  $D$  compuesta por los objetos de entrenamiento  $(\mathbf{x}, y)$  y de un objeto a clasificar  $x=(\mathbf{x}', y')$ , donde  $\mathbf{x}$  es el vector que contiene los datos del objeto e  $y$  es su clase. La clase a determinar es  $y'$ .
2. Se calcula la distancia entre el objeto a clasificar y todos los objetos de la base de datos  $d(\mathbf{x}', \mathbf{x})$ .
3. Se determinan los  $k$  vecinos más cercanos en los que la distancia calculada es mínima.

4. Se establece la clase del objeto  $y'$  a clasificar según la clase más frecuente de los  $k$  vecinos más cercanos.

Una elección fundamental que se debe realizar para el correcto funcionamiento de este algoritmo  $kNN$  es el valor de  $k$ . Si se elige  $k=1$ , entonces se asignará directamente la clase del vecino más próximo. Si  $k$  es demasiado pequeño, entonces el resultado es sensible a puntos ruidosos. Pero si  $k$  es demasiado grande, entonces la vecindad del punto desconocido incluirá muchos puntos de otras clases lejanas. Por tanto, como regla general,  $k$  debe ser grande para disminuir la probabilidad de una mala clasificación, pero pequeño en comparación con el número de puntos. Es preferible que  $k$  sea impar para evitar empates [174].

La Figura 5.30 muestra una representación de una base de datos con dos clases diferentes, cuadrados azules y triángulos rojos, y un punto verde a clasificar. Si se elige  $k=3$ , el círculo verde es clasificado como un triángulo rojo. Sin embargo, si elegimos  $k=5$ , es clasificado como un cuadrado azul.

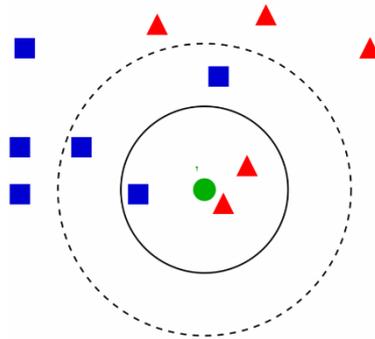


Figura 5.30. Ejemplo de clasificación usando el algoritmo  $kNN$ .

También es importante la sección del tipo de distancia. Se han calculado tres distancias diferentes: euclidiana, de Minkowski y de Chebyshev. Generalmente se usa la distancia euclidiana dada por

$$d_{euclidean}(\mathbf{x}', \mathbf{x}) = \sqrt{\sum_{r=1}^p (\mathbf{x}'_r - \mathbf{x}_r)^2} \quad (5.45)$$

siendo  $p$  el número de atributos considerados,  $\mathbf{x}'$  y  $\mathbf{x}$  los atributos del objeto a clasificar y de los objetos de la base de datos, respectivamente.

La distancia de Minkowski puede ser considerada como una generalización de la distancia euclidiana y la distancia Manhattan. Esta distancia viene definida en la ecuación (5.46)

$$d_{Minkowski}(\mathbf{x}', \mathbf{x}) = \left( \sum_{r=1}^p (\mathbf{x}'_r - \mathbf{x}_r)^q \right)^{1/q} \quad (5.46)$$

donde  $q$  es un parámetro a decidir. Si  $q=2$  se obtiene la distancia euclidiana. En la aplicación concreta que aquí se muestra, se ha utilizado un valor de  $q=\infty$ .

La distancia de Chebyshev está definida en un espacio vectorial donde la distancia entre dos vectores es la mayor de sus diferencias a lo largo de sus dimensiones de coordenadas. También es conocida como la distancia de “tablero de ajedrez” como se muestra en la Figura 5.31. Su expresión genérica viene dada en la ecuación (5.47). Si lo aplicamos considerando tres variables, la expresión coincide con la mostrada en la ecuación (5.48).

$$d_{Chebyshev}(\mathbf{x}', \mathbf{x}) = \max_i (|\mathbf{x}'_i - \mathbf{x}_i|); \quad (5.47)$$

$$d_{Chebyshev}(\mathbf{x}', \mathbf{x}) = \max_i (|\mathbf{x}'_1 - \mathbf{x}_1|, |\mathbf{x}'_2 - \mathbf{x}_2|, |\mathbf{x}'_3 - \mathbf{x}_3|); \quad (5.48)$$

|   | a | b | c | d | e | f | g | h |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 8 |
| 7 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 7 |
| 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 6 |
| 5 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 5 |
| 4 | 5 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 |
| 3 | 5 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 2 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 |
| 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 |
|   | a | b | c | d | e | f | g | h |   |

Figura 5.31. Ejemplo de distancia de Chebyshev en un tablero de ajedrez.

Otro parámetro a considerar es el método de la elección de la asignación de clase. El método más simple consiste en considerar un voto de mayoría, pero puede ser un problema si la distancia con los vecinos más cercanos varía de forma importante y los vecinos que aportan la clase son los más lejanos. Una aproximación más sofisticada, que suele ser menos sensible que la elección de  $k$ , es asignar a cada objeto un voto de peso por su distancia, donde el factor de peso normalmente se obtiene como el inverso de la raíz cuadrada de la distancia:  $\omega_i = 1/d(\mathbf{x}', \mathbf{x}_i)^2$ , donde  $i$  es cada uno de los objetos de la base de datos.

En la aplicación de los clasificadores, la base de datos está formada por los índices de daño obtenidos en las distintas repeticiones para los distintos niveles de daño. Con el objetivo de duplicar la base de datos disponible y tras haber comprobado que la longitud de la señal no tiene una influencia importante en el valor del índice de daño calculado, se ha dividido la señal original registrada en el ensayo de vibraciones con una duración de 20 s en dos señales de 10 s. Se ha vuelto a corroborar que los valores de los índices de daño son muy similares para señales de 10 y 20 s. Además, la base de datos se encuentra agrupada por niveles de daño según la simulación sísmica tras la que se registraron los ensayos de vibraciones.

### 5.6.2. Clasificador 1D

En primer lugar se ha creado un clasificador unidimensional que tiene en cuenta un solo índice de daño, ADI, WER o RWE. En este caso se ha calculado la distancia euclidiana y se ha usado un número de vecinos  $k=3$ .

Como resultado de las clasificaciones individuales se obtiene un nivel de daño asociado para cada índice de daño analizado. De esta forma, se pueden establecer varios resultados finales considerando uno, dos o los tres índices de daño individualmente, como se explica en los apartados 5.6.2.1, 5.6.2.2 y 5.6.2.3, respectivamente.

En el clasificador 1D la base de datos queda ordenada de forma lineal como se muestra en la Figura 5.32. Para probar la eficacia del clasificador, se clasifica un valor de la base de datos cuyo nivel de daño es conocido previamente y se verifica si es clasificado correctamente o no.



Figura 5.32. Recta de distribución de los niveles de daño en el algoritmo del clasificador unidimensional (1D).

#### 5.6.2.1. Clasificador 1D

Se exponen en este apartado los resultados de las clasificaciones considerando cada índice de manera individual. A modo de ejemplo se analiza su aplicación a la sección I situada en un disipador de planta baja del espécimen FD (sección FD\_F0\_C12\_I1).

La Tabla 5.8 muestra el resultado de la clasificación utilizando el índice de daño ADI. Por filas se aprecian las variables  $t_0$ , correspondiente a la señal completa (20 segundos),  $t_1$  (10 primeros segundos) y  $t_2$  (10 últimos segundos), divididos a su vez por el número de repeticiones. En el caso del espécimen FD fueron cuatro repeticiones. Cada columna corresponde a un nivel de daño. La

columna C100 corresponde con el daño 0, es decir, que si aparece un 0 en dicha columna es que esa muestra está bien clasificada. Un valor de 1 en la columna C200, 2 en la columna C300 y 3 en la columna C350 indican que la muestra está correctamente clasificada. En la clasificación correspondiente al índice ADI todas las muestras han sido correctamente clasificadas, por lo que la tasa de acierto es del 100%, como se ve en la Tabla 5.8.

| FD_F0_C12_I1 - ADI |      |      |      |      |
|--------------------|------|------|------|------|
|                    | C100 | C200 | C300 | C350 |
| t0                 | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 1    | 2    | 3    |
| t1                 | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 1    | 2    | 3    |
| t2                 | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 1    | 2    | 3    |
| Tasa de acierto    |      |      |      | 100% |

**Tabla 5.8. Resultado del clasificador 1D usando el índice ADI para la sección FD\_F0\_C12\_I1.**

Siguiendo el mismo procedimiento, la Tabla 5.9 muestra los resultados de la clasificación utilizando el índice WER. Se puede apreciar que existen dos muestras pertenecientes a t2 y nivel de daño C100 que se han clasificado erróneamente como daño 1 cuando pertenecen a daño 0. Este fallo se debe a que los valores de dichos índices en daños C100 y C200 son muy bajos y similares entre sí. Además, se produce en niveles de daño muy bajos y a favor de la seguridad, por lo que el fallo no sería crítico para la integridad estructural. En este caso la tasa de acierto se sitúa en un 96%.

| FD_F0_C12_I1 – WER |      |      |      |      |
|--------------------|------|------|------|------|
|                    | C100 | C200 | C300 | C350 |
| t0                 | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 1    | 2    | 3    |
| t1                 | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 1    | 2    | 3    |
| t2                 | 1    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 1    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 1    | 2    | 3    |
| Tasa de acierto    |      |      |      | 96%  |

**Tabla 5.9. Resultado del clasificador 1D usando el índice WER para la sección FD\_F0\_C12\_I1.**

Los resultados del clasificador 1D usando el índice RWEE se muestran en la Tabla 5.10. En este caso, hay once valores clasificados erróneamente, todos ellos entre los niveles de daño más bajos, C100 y C200. La tasa de acierto es del 77%.

| FD_F0_C12_I1 -RWEE |      |      |      |      |
|--------------------|------|------|------|------|
|                    | C100 | C200 | C300 | C350 |
| t0                 | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 0    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 0    | 2    | 3    |
|                    | 0    | 1    | 2    | 3    |
| t1                 | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 1    | 0    | 2    | 3    |
|                    | 1    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 1    | 1    | 2    | 3    |
| t2                 | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 1    | 0    | 2    | 3    |
|                    | 1    | 1    | 2    | 3    |
|                    | 1    | 0    | 2    | 3    |
| Tasa de acierto    |      |      |      | 77%  |

Tabla 5.10. Resultado del clasificador 1D usando el índice RWEE para la sección FD\_F0\_C12\_I1.

La Tabla 5.11 muestra las tasas de acierto del clasificador 1D usando los tres índices de daño individuales para cada una de las secciones del espécimen FD, incluyendo una media por cada índice de daño y por planta. En planta baja se obtienen tasas de acierto superiores al 90%, destacando una tasa de acierto del 100% considerando el índice ADI. En planta alta la tasa de acierto es menor en todos los casos, lo que corrobora una vez más que el daño se detecta con mayor precisión en planta baja.

|       |              | ADI  | WER  | RWEE |
|-------|--------------|------|------|------|
| FD_F0 | FD_F0_C12_I1 | 100% | 96%  | 77%  |
|       | FD_F0_C34_I1 | 100% | 100% | 100% |
|       | FD_F0_C34_I5 | 100% | 85%  | 100% |
|       |              | 94%  | 100% | 94%  |
| FD_F1 | FD_F1_C12_I4 | 98%  | 65%  | 65%  |
|       | FD_F1_C34_I1 | 75%  | 35%  | 50%  |
|       | FD_F1_C34_I4 | 100% | 27%  | 27%  |
|       |              | 74%  | 91%  | 42%  |
| FD    | 84%          | 96%  | 68%  | 70%  |

Tabla 5.11. Tasas de acierto del clasificador 1D usando índices de daño independientes para las secciones del espécimen FD.

En el espécimen SD (Tabla 5.12), la mayor tasa de acierto se vuelve a alcanzar con el índice ADI, casi del 100%. La tasa de acierto del índice WER presenta una gran variabilidad de unas secciones a otras.

|       |              | ADI  | WER  | RWEE |
|-------|--------------|------|------|------|
| SD_F0 | SD_F0_C1_I12 | 100% | 89%  | 98%  |
|       | SD_F0_C1_I20 | 98%  | 20%  | 98%  |
|       |              | 77%  | 99%  | 54%  |
| SD_F1 | SD_F1_C1_I1  | 100% | 94%  | 94%  |
|       | SD_F1_C1_I7  | 100% | 57%  | 72%  |
|       |              | 88%  | 100% | 76%  |
| SD    | 82%          | 100% | 65%  | 91%  |

Tabla 5.12. Tasas de acierto del clasificador 1D usando índices de daño independientes para las secciones del espécimen SD.

### 5.6.2.2. Clasificador 1D considerando dos índices de daño

Una vez obtenidos los resultados del clasificador individual 1D, se muestran los resultados obtenidos con el clasificador 1D usando dos índices independientes: ADI+WER, ADI+RWEE y WER+RWEE. En este caso se debe tomar la decisión sobre el nivel de daño a asignar. Si ambos resultados coinciden, ese será el nivel de daño asignado. En caso de que ambos resultados

sean diferentes, se asignará como nivel de daño el mayor de ellos, para estar del lado de la seguridad.

La Tabla 5.13 muestra el resultado al considerar las clasificaciones con los índices ADI y WER. En este caso aparecen dos asignaciones de nivel de daño erróneas como el caso del clasificador individual WER, por lo que la tasa de acierto es del 96%.

| FD_F0_C12_I1 – ADI+WER |      |      |      |      |
|------------------------|------|------|------|------|
|                        | C100 | C200 | C300 | C350 |
| t0                     | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                        | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                        | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                        | 0    | 1    | 2    | 3    |
| t1                     | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                        | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                        | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                        | 0    | 1    | 2    | 3    |
| t2                     | 1    | 1    | 2    | 3    |
|                        | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                        | 1    | 1    | 2    | 3    |
|                        | 0    | 1    | 2    | 3    |
| Tasa de acierto        |      |      |      | 96%  |

**Tabla 5.13. Resultado de la clasificación considerando los índices ADI+WER de manera individual para la sección FD\_F0\_C12\_I1.**

En el caso de la clasificación final usando los índices ADI y RWEE de manera individual (Tabla 5.14) la tasa de acierto es del 87%, menor que considerando únicamente el índice ADI pero mayor que el obtenido en la clasificación con RWEE.

| FD_F0_C12_I1 – ADI+RWEE |      |      |      |      |
|-------------------------|------|------|------|------|
|                         | C100 | C200 | C300 | C350 |
| t0                      | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                         | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                         | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                         | 0    | 1    | 2    | 3    |
| t1                      | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                         | 1    | 1    | 2    | 3    |
|                         | 1    | 1    | 2    | 3    |
|                         | 1    | 1    | 2    | 3    |
| t2                      | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                         | 1    | 1    | 2    | 3    |
|                         | 1    | 1    | 2    | 3    |
|                         | 1    | 1    | 2    | 3    |
| Tasa de acierto         |      |      |      | 87%  |

**Tabla 5.14. Resultado de la clasificación considerando los índices ADI+RWEE de manera individual para la sección FD\_F0\_C12\_I1.**

La Tabla 5.15 muestra el resultado de la clasificación al considerar los índices WER y RWEE. Los errores de asignación aparecen solo en el nivel de daño C100, situándose la tasa de acierto en un 85%.

| FD_F0_C12_I1 – WER+RWEE |      |      |      |      |
|-------------------------|------|------|------|------|
|                         | C100 | C200 | C300 | C350 |
| t0                      | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                         | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                         | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                         | 0    | 1    | 2    | 3    |
|                         | 0    | 1    | 2    | 3    |
| t1                      | 1    | 1    | 2    | 3    |
|                         | 1    | 1    | 2    | 3    |
|                         | 1    | 1    | 2    | 3    |
|                         | 1    | 1    | 2    | 3    |
| t2                      | 1    | 1    | 2    | 3    |
|                         | 1    | 1    | 2    | 3    |
|                         | 1    | 1    | 2    | 3    |
|                         | 1    | 1    | 2    | 3    |
| Tasa de acierto         |      |      |      | 85%  |

**Tabla 5.15. Resultado de la clasificación considerando los índices WER+RWEE de manera individual para la sección FD\_F0\_C12\_I1.**

Las tasas de acierto de las secciones del espécimen FD para las tres combinaciones de los pares de índices de daño se muestran en la Tabla 5.16. De nuevo se obtienen mayores tasas de acierto en planta baja, obteniéndose valores similares para las distintas combinaciones.

|       |              | ADI+<br>WER | ADI+<br>RWEE | WER+<br>RWEE |
|-------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| FD_F0 | FD_F0_C12_I1 | 96%         | 87%          | 85%          |
|       | FD_F0_C34_I1 | 100%        | 100%         | 100%         |
|       | FD_F0_C34_I5 | 87%         | 100%         | 90%          |
|       |              | 94%         | 96%          | 92%          |
| FD_F1 | FD_F1_C12_I4 | 75%         | 81%          | 65%          |
|       | FD_F1_C34_I1 | 54%         | 63%          | 46%          |
|       | FD_F1_C34_I4 | 58%         | 65%          | 38%          |
|       |              | 62%         | 70%          | 50%          |
| FD    |              | 78%         | 83%          | 71%          |

Tabla 5.16. Tasas de acierto del clasificador de índices independientes ADI+WER, ADI+RWEE y WER+RWEE para las secciones del espécimen FD.

La Tabla 5.17 muestra las tasas de acierto para las secciones del espécimen SD, al usar la combinación de dos de los índices. En general, la tasa de acierto es mayor del 80% excepto en dos casos. Para este espécimen, se obtienen tasas de acierto similares en planta baja y alta.

|       |              | ADI+<br>WER | ADI+<br>RWEE | WER+<br>RWEE |
|-------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| SD_F0 | SD_F0_C1_I12 | 96%         | 98%          | 96%          |
|       | SD_F0_C1_I20 | 60%         | 96%          | 60%          |
|       |              | 78%         | 97%          | 78%          |
| SD_F1 | SD_F1_C1_I1  | 98%         | 100%         | 96%          |
|       | SD_F1_C1_I7  | 81%         | 83%          | 69%          |
|       |              | 90%         | 91%          | 83%          |
| SD    |              | 84%         | 94%          | 80%          |

Tabla 5.17. Tasas de acierto del clasificador de índices independientes ADI+WER, ADI+RWEE y WER+RWEE para las secciones del espécimen SD.

### 5.6.2.3. Clasificador 1D considerando tres índices de daño

Por último se ha realizado una clasificación global considerando los tres índices de daño calculados de manera independiente, siguiendo el mismo procedimiento realizado al considerar dos índices.

La Tabla 5.18 muestra el resultado de esta clasificación para la sección FD\_F0\_C12\_I1, con una tasa de acierto del 85%. Todos los errores detectados se han producido al clasificar como daño 1 ensayos realizados en daño 0, es decir, son fallos pero del lado de la seguridad.

| <b>FD_F0_C12_I1 – ADI+WER+RWEE</b> |             |             |             |             |
|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                                    | <b>C100</b> | <b>C200</b> | <b>C300</b> | <b>C350</b> |
| <b>t0</b>                          | 0           | 1           | 2           | 3           |
|                                    | 0           | 1           | 2           | 3           |
|                                    | 0           | 1           | 2           | 3           |
|                                    | 0           | 1           | 2           | 3           |
| <b>t1</b>                          | 0           | 1           | 2           | 3           |
|                                    | 1           | 1           | 2           | 3           |
|                                    | 1           | 1           | 2           | 3           |
|                                    | 1           | 1           | 2           | 3           |
| <b>t2</b>                          | 1           | 1           | 2           | 3           |
|                                    | 1           | 1           | 2           | 3           |
|                                    | 1           | 1           | 2           | 3           |
|                                    | 1           | 1           | 2           | 3           |
| Tasa de acierto                    |             |             |             | 85%         |

**Tabla 5.18. Resultado final de la clasificación de índices independientes ADI+WER+RWEE para la sección FD\_F0\_C12\_I1.**

La Tabla 5.19 muestra las tasas de acierto de las secciones del espécimen FD al considerar los tres índices de daño individuales. Se obtienen mayores tasas de acierto para planta baja, lo que indica que existe mayor diferencia entre los índices de daño de los distintos niveles de daño.

|       |              | <b>ADI+WER+RWEE</b> |
|-------|--------------|---------------------|
| FD_F0 | FD_F0_C12_I1 | 85%                 |
|       | FD_F0_C34_I1 | 100%                |
|       | FD_F0_C34_I5 | 87%                 |
|       |              | 91%                 |
| FD_F1 | FD_F1_C12_I4 | 69%                 |
|       | FD_F1_C34_I1 | 50%                 |
|       | FD_F1_C34_I4 | 52%                 |
|       |              | 57%                 |
| FD    |              | 74%                 |

**Tabla 5.19. Tasas de acierto del clasificador de índices independientes ADI+WER+RWEE para las secciones del espécimen FD.**

La Tabla 5.20 muestra las tasas de acierto para las secciones del espécimen SD considerando los tres índices individuales, las cuales son mayores en todos los casos a las tasas de acierto calculadas al considerar los índices individualmente o en pares.

|       |              | <b>ADI+WER+RWEE</b> |
|-------|--------------|---------------------|
| SD_F0 | SD_F0_C1_I12 | 98%                 |
|       | SD_F0_C1_I20 | 60%                 |
|       |              | 79%                 |
| SD_F1 | SD_F1_C1_I1  | 98%                 |
|       | SD_F1_C1_I7  | 78%                 |
|       |              | 88%                 |
| SD    |              | 84%                 |

**Tabla 5.20. Tasas de acierto del clasificador de índices independientes ADI+WER+RWEE para las secciones del espécimen SD.**

### 5.6.3. Clasificador de daño 2D

El clasificador de daño que considera dos índices de daño simultáneamente tiene una base de datos formada por parejas de valores de índices de daño obtenidos para una misma señal, es decir, una base de datos (ADI,WER), otra (ADI,RWEE) y otra (WER,RWEE).

En este clasificador se ha considerado un número de vecinos  $k=3$  y tres distancias diferentes: euclidiana, de Chebyshev y de Minkowski con un exponente  $q=\infty$ .

La Figura 5.33 muestra la base de datos ADI+WER para la sección FD\_F0\_C12\_I1. Se distinguen claramente cuatro grupos de puntos correspondientes a los niveles de daño y representados con diferentes colores. Se puede observar que ambos índices de daño tienen órdenes de magnitud muy distintos (valores de ADI entre 0 y 250 y valores de WER entre 0 y 0.35). Por esta razón, al realizar la clasificación los dos índices no tienen el mismo peso en el resultado final.

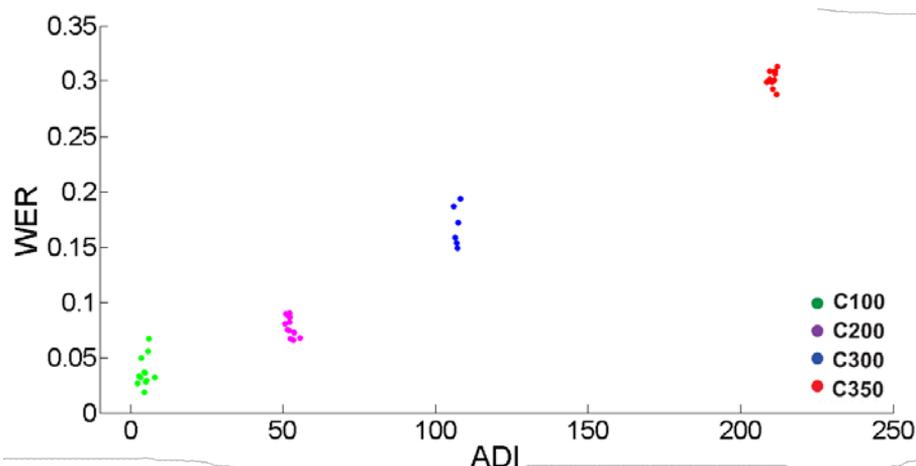


Figura 5.33. WER frente a ADI para la sección FD\_F0\_C12\_I1.

La Figura 5.34 muestra el resultado de la clasificación. Se marca con una cruz el punto a clasificar y con diferentes símbolos los tres vecinos más cercanos calculados según las tres distancias usadas. En la zona de detalle se puede observar que los tres vecinos considerados más cercanos por el algoritmo coinciden para las tres distancias consideradas pero no son realmente los más cercanos. Para solucionar el problema de la diferencia de magnitud entre los valores de los distintos índices y conseguir una clasificación apropiada se realizó una normalización de cada índice, con objeto de asignarles el mismo peso dentro del algoritmo.

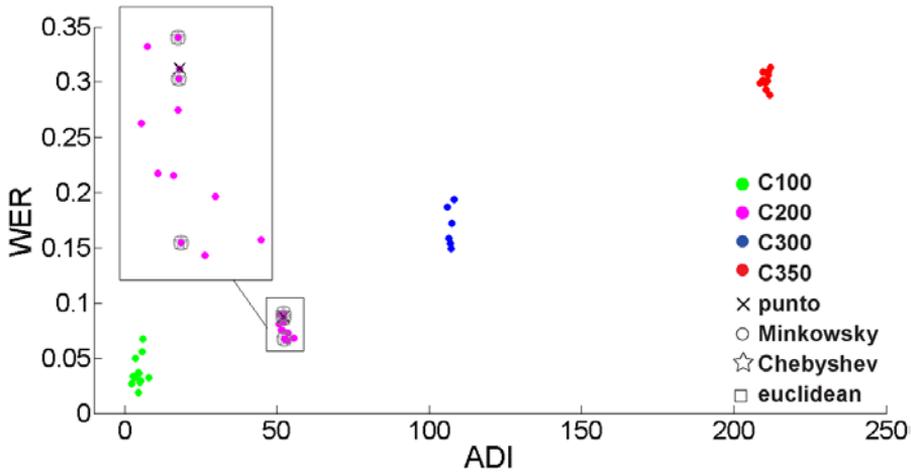


Figura 5.34. WER frente a ADI para la sección FD\_F0\_C12\_I1, mostrando el resultado de la clasificación sin normalización de índices.

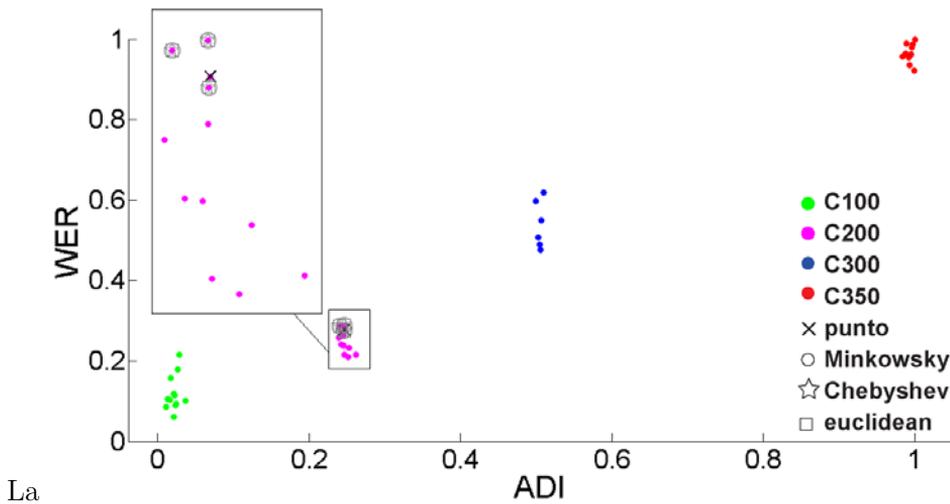


Figura 5.35 muestra el resultado de la clasificación aplicando la normalización de índices. Se comprueba como los tres vecinos más cercanos seleccionados por el algoritmo coinciden con los que se elegirían de manera visual. No obstante, aunque la clasificación se realiza con las bases de datos normalizadas, el resultado final se muestra con la escala real de los índices de daño (Figura 5.36).

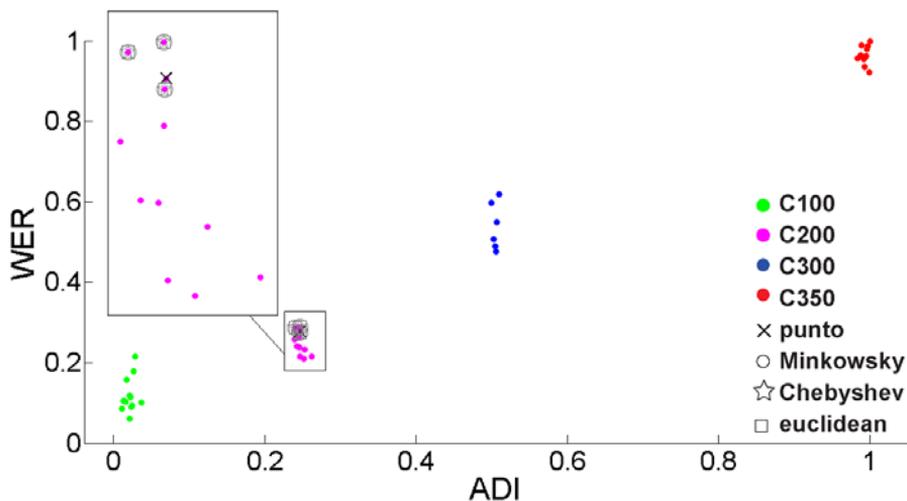


Figura 5.35. Valores normalizados de WER frente a ADI para la sección FD\_F0\_C12\_I1, mostrando el resultado de la clasificación.

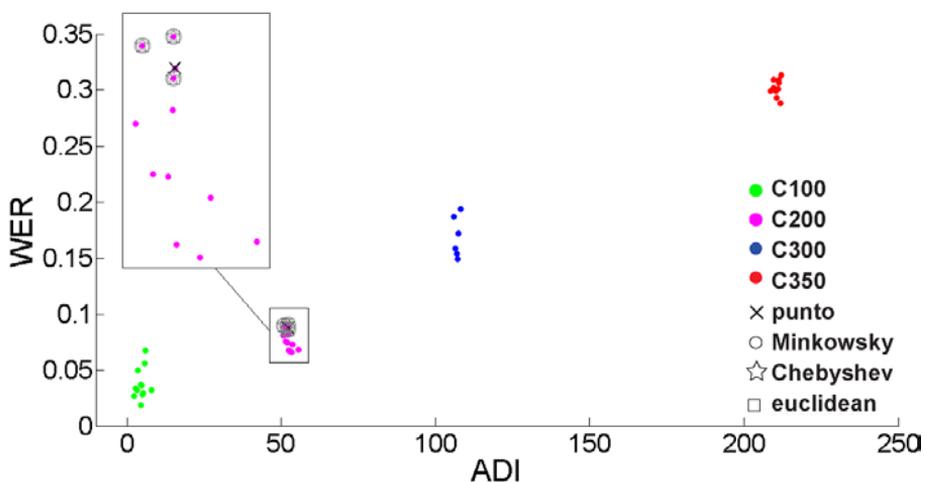


Figura 5.36. WER frente a ADI para la sección FD\_F0\_C12\_I1, mostrando el resultado de la clasificación normalizada.

#### 5.6.4. Clasificador 3D

Por último se ha creado un clasificador que considera simultáneamente los tres índices de daño calculados para una misma señal. Por tanto, la base de datos está formada por ternas (ADI, WER, RWEE). Se han considerado un número de vecinos de  $k=3$  y tres distancias diferentes: euclidiana, de Chebyshev y de Minkowski con un exponente  $q=\infty$ . En este caso también se ha aplicado el

algoritmo de clasificación sobre la base de datos normalizada aunque el resultado final se muestre con los valores reales de los índices.

La representación de la base de datos para la sección FD\_F0\_C12\_I1 y el resultado de la clasificación normalizada se muestran en la Figura 5.37. Se trata de una gráfica tridimensional donde se pueden distinguir los cuatro grupos asociados a los cuatro niveles de daño. Se observa que el punto a clasificar ha sido correctamente asignado a su nivel de daño.

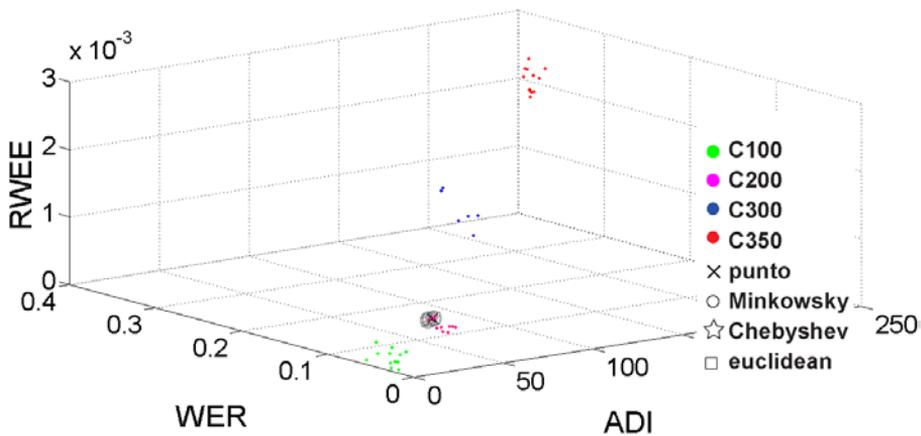


Figura 5.37. Representación de los tres índices ADI, WER y RWEE para la sección FD\_F0\_C12\_I1, con indicación del resultado de la clasificación para una de las muestras.

Para comprobar la validez de la clasificación se ha hecho la representación de los índices dos a dos. Las Figuras 5.38, 5.39 y 5.40 muestran los planos ADI-WER, ADI-RWEE y WER-RWEE, respectivamente. Se observa que el punto se clasifica en el nivel de daño correcto.

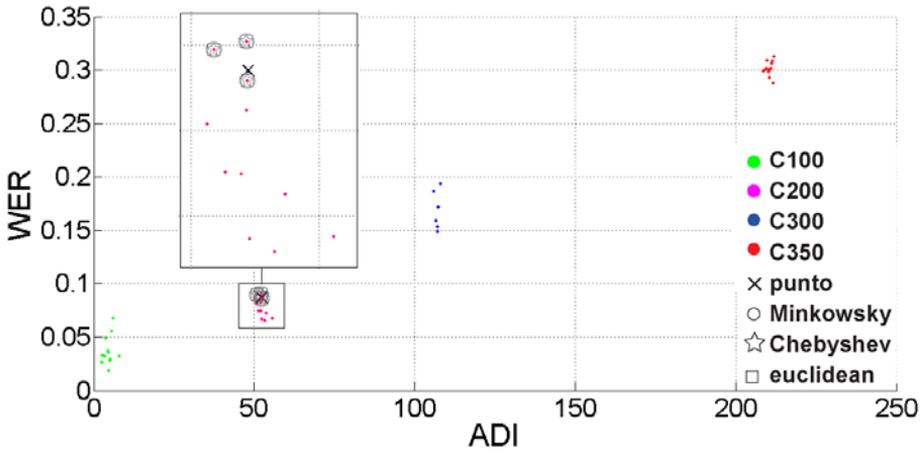


Figura 5.38. Plano ADI-WER de la clasificación conjunta 3D para la sección FD\_F0\_C12\_I1.

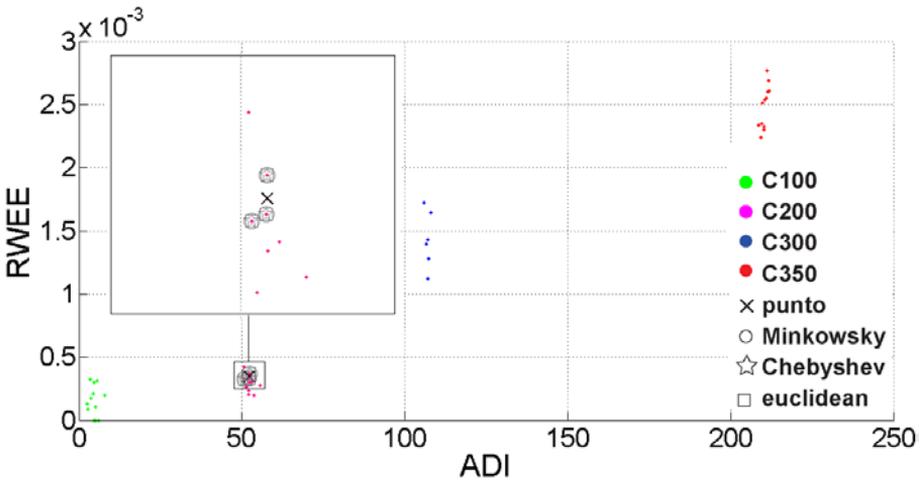


Figura 5.39. Plano ADI-RWEE de la clasificación conjunta 3D para la sección FD\_F0\_C12\_I1.

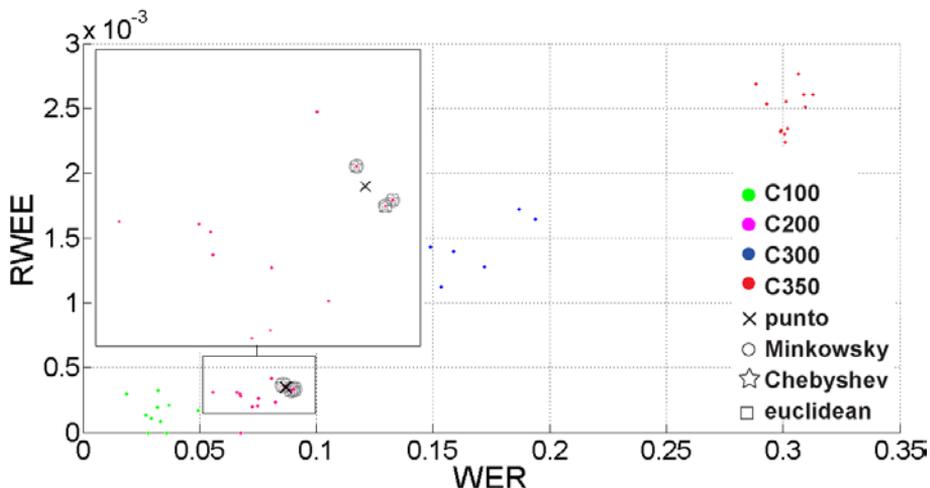


Figura 5.40. Plano WER-RWEE de la clasificación conjunta 3D para la sección FD\_F0\_C12\_I1.

Como resultado del clasificador se obtiene no solo la clase resultado de la clasificación, sino que también se conocen las distancias a los diferentes nodos de la base de datos y la clase asignada a cada uno de ellos. La Tabla 5.21 muestra las distancias euclidiana, de Chebyshev y de Minkowski del nodo a clasificar (nodo 20 perteneciente al nivel de daño 1) respecto de los tres nodos más cercanos. Según la distancia euclidiana, el nodo más cercano al nodo 20 es el nodo 21, seguido del 19 y del 18, los tres pertenecientes al nivel de daño 1. Considerando las distancias de Chebyshev y de Minkowski, se obtiene que los nodos más cercanos al nodo a clasificar son los nodos 21, 18 y 19, idéntico resultado que el obtenido para la distancia euclidiana pero en distinto orden. Por tanto, el resultado del clasificador para las tres distancias es que el nodo a clasificar pertenece al nivel de daño 1.

| Distancia euclidiana   |        |        |        |
|------------------------|--------|--------|--------|
| Distancia              | 0.0082 | 0.0122 | 0.0123 |
| Nodo                   | 21     | 19     | 18     |
| Nivel de daño          | 1      | 1      | 1      |
| Distancia de Chebyshev |        |        |        |
| Distancia              | 0.0074 | 0.0080 | 0.0112 |
| Nodo                   | 21     | 18     | 19     |
| Nivel de daño          | 1      | 1      | 1      |
| Distancia de Minkowski |        |        |        |
| Distancia              | 0.0074 | 0.0090 | 0.0112 |
| Nodo                   | 21     | 18     | 19     |
| Nivel de daño          | 1      | 1      | 1      |

Tabla 5.21. Resultado del clasificador conjunto para el nodo 20 de la sección FD\_F0\_C12\_I1: distancias, nodos y nivel de daño.

La tasa de acierto de este clasificador se muestra en la Tabla 5.22. Se observa el aumento de la tasa de acierto al considerar los tres índices de daño simultáneamente con respecto al clasificador que considera las tres índices de daño de manera individual (Tabla 5.19). Considerar los tres índices conjuntamente aporta una evidente mejora en la clasificación.

| ADI+WER+RWEE |              |      |
|--------------|--------------|------|
| FD_F0        | FD_F0_C12_I1 | 100% |
|              | FD_F0_C34_I1 | 100% |
|              | FD_F0_C34_I5 | 100% |
|              |              | 100% |
| FD_F1        | FD_F1_C12_I4 | 90%  |
|              | FD_F1_C34_I1 | 65%  |
|              | FD_F1_C34_I4 | 96%  |
|              |              | 83%  |
| FD           |              | 92%  |

Tabla 5.22. Tasas de acierto del clasificador 3D usando tres niveles de daño simultáneamente para el espécimen FD.

En el caso del espécimen SD (Tabla 5.23) las tasas de acierto al considerar simultáneamente los tres índices de daño vuelven a ser mayores que al considerar los índices individuales (Tabla 5.19).

|       |              | ADI+WER+RWEE |
|-------|--------------|--------------|
| SD_F0 | SD_F0_C1_I12 | 98%          |
|       | SD_F0_C1_I20 | 82%          |
|       |              | 90%          |
| SD_F1 | SD_F1_C1_I1  | 100%         |
|       | SD_F1_C1_I7  | 87%          |
|       |              | 94%          |
| SD    |              | 92%          |

**Tabla 5.23.** Tasas de acierto del clasificador 3D usando tres niveles de daño simultáneamente para el espécimen SD.

**PARTE B:**  
**EVALUACIÓN DE DAÑO EN**  
**MATERIAL COMPUESTO DE FIBRA**  
**DE CARBONO (CFRP)**



## **6.**

# **DISCRIMINACIÓN DE MECANISMOS DE DAÑO EN CFRP MEDIANTE ONDAS DE LAMB: ALGORITMO**

En este capítulo se detalla un algoritmo desarrollado para discriminar entre los diferentes mecanismos de daño que se producen en el CFRP mediante ondas de Lamb de emisión acústica. Se distinguen tres mecanismos de daño considerados principales en este material: delaminación, rotura de fibra y micro-rotura de matriz. Se explica la asociación de los mecanismos de daño a los modos de ondas de Lamb y los diferentes ensayos llevados a cabo para su verificación: ensayos utilizando fuentes H-N (rotura de mina) y ensayos de fuentes de daño controladas con el objetivo de simular mecanismos de daño individuales. Finalmente se explica el algoritmo de discriminación.

### **6.1. Hipótesis de partida: asociación de mecanismos de daño a los modos de ondas de Lamb**

La teoría de placas establece que las ondas de EA se propagan en placas en dos modos principales, el modo simétrico ( $S_0$ ) y el antisimétrico ( $A_0$ ) [68-73]. La separación de estos modos durante la adquisición o un análisis posterior adquiere

una especial relevancia puesto que permite extraer información sobre el mecanismo de daño.

Se establecen tres mecanismos de daño principales en el CFRP: delaminación, rotura de fibra y micro-rotura de matriz. La delaminación, normalmente debida a impactos, constituye un daño interno crítico en materiales compuestos laminados, no detectable mediante una inspección visual [43, 63-67, 74]. Su detección durante el servicio de las estructuras es un reto atractivo y aun sin resolver. Este fallo está ampliamente asociado con la producción de desplazamientos mecánicos de micro-pulsos fuera del plano (OP), es decir, movimientos perpendiculares al plano medio de la placa. Por otro lado, la micro-rotura de matriz y la rotura de fibra producen, en general, micro-pulsos fuera dentro del plano (IP), es decir, movimientos en el plano de la placa y simétricos respecto del plano medio [44, 60-79].

La hipótesis del algoritmo propuesto para clasificar las señales de EA en los tres mecanismos de daño predominantes en el CFRP se basa en la asociación del progreso de la delaminación al modo  $A_0$  y el de las micro-roturas de matriz y roturas de fibra al modo  $S_0$  de las señales de EA (véase la Figura 6.1). Sin embargo, en general, debido a la anisotropía microscópica del CFRP, ambos modos se presentan simultáneamente en cualquier señal de EA registrada. Por este motivo, la contribución clave de este nuevo algoritmo se basa en una eficiente separación hardware/software de ambos modos, evitando factores colaterales como reflexiones o cualquier influencia del umbral usado para la detección de EA.

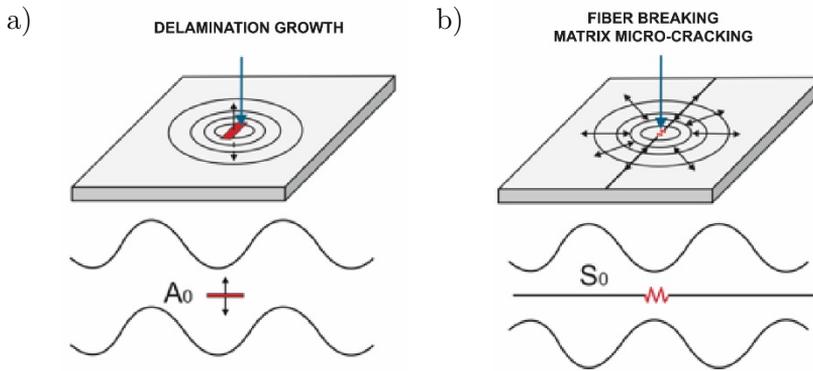


Figura 6.1. Representación esquemática de los micro-pulsos producidos por: a) Crecimiento de delaminación (Modo  $A_0$ ); b) Rotura de fibra o (Modo  $S_0$ ).

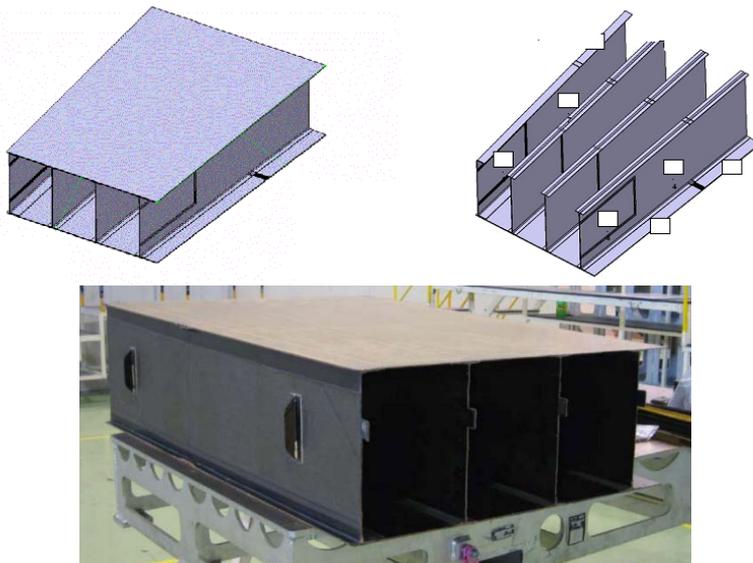
En resumen, en delaminaciones el modo  $A_0$  es el predominante mientras que en las roturas de fibra y micro-roturas de matriz predomina el modo  $S_0$ . Debido a que los modos de fractura no producen exclusivamente desplazamientos OP o IP, no se producen los modos puros  $A_0$  o  $S_0$ , respectivamente. Esta es la razón esencial por la que el algoritmo propuesto aplica ratios de amplitud  $A_0/S_0$  para clasificar los modos de fractura. Obviamente, un cambio significativo en las amplitudes podría afectar al resultado de la clasificación. Por ello, para estructuras de tamaño medio o grande en las que las distancias sensor-fuente de EA sean más grandes que las usadas en este trabajo, los efectos de la atenuación de la amplitud deben ser tenidos en cuenta. Para las distancias a lo largo de la dirección del espesor (aproximadamente unos milímetros), este efecto tiene una importancia despreciable. Por este motivo, el algoritmo propuesto no considera la localización de la fuente a lo largo del espesor.

## 6.2. Descripción de la placa estudiada (DAICA)

La placa estudiada forma parte de una iniciativa denominada DAICA impulsada por la empresa Airbus. Consiste en la fabricación de un ala multilarguero en fibra de carbono de última generación que se pretende utilizar en el futuro avión de transporte medio que la compañía proyecta desarrollar en los próximos años. En concreto, el objetivo es desarrollar un cajón de ala

multilarguero fabricado en fibra de carbono más ligero y económico, que mantenga su utilidad como tanque de combustible y mejore sus propiedades de apantallamiento electromagnético y protección frente al impacto de rayos.

El proyecto DAICA ha superado ya sus primeras fases de desarrollo, en las que se han hecho estudios sobre su implantación. En su segunda fase, se elaboró un demostrador tipo ala de aeronave de tamaño medio, previa a una última fase de elaboración de un prototipo de ala. En esa segunda fase, y con el objetivo de investigar aspectos de fabricabilidad y viabilidad de inspección, se identificó la necesidad de fabricación de un cajón representativo del demostrador (Figura 6.2). Está formado por dos revestimientos de 1000 x 1500 mm<sup>2</sup> aproximadamente (en cuerda creciente) y cuatro largueros rigidizadores. El material es preimpregnado de resina epoxi y cinta unidireccional y tejido de fibra de carbono, realizado en un único ciclo de curado en autoclave (cocurado).



**Figura 6.2.** Cajón representativo del tipo de ala a estudiar.

La empresa manifestó su enorme interés por hacer un estudio de viabilidad de implementación de técnicas SHM en alas integradas para inspección en servicio de zonas no accesibles de la estructura, con especial hincapié en la

compatibilidad de los sensores para su misión en zonas de tanque de combustible.

En esta tesis, el material objeto de estudio ha sido un tipo particular de material compuesto laminado industrial proporcionado por la empresa EADS-CASA del Puerto de Santa María, Cádiz. En particular por el Departamento de Ingeniería de Desarrollo de Materiales Compuestos, dentro del proyecto DAICA.

Para ello, la empresa proporcionó tres placas cuasi-ortótropas de dimensiones  $1000 \times 1500 \text{ mm}^2$  con dos espesores diferentes, que formaban parte de un mismo panel. Este panel fue fabricado usando el material preimpregnado de cinta unidireccional y tejido Z19.780 y un ciclo de curado 22, de seis horas y media. Sus propiedades se pueden ver en la Tabla 6.1. Las constantes ingenieriles  $\mathbf{E}_T$ ,  $\mathbf{E}_L$ ,  $\mathbf{v}$  y  $\mathbf{G}$  fueron proporcionadas por la empresa EADS-CASA.

| Parámetro  | Valor  |
|--|--|
| Longitud total del largo ( $\mathbf{a}_t$ )                  | 146.2 cm                                       |
| Longitud total de la parte 1 ( $\mathbf{a}_t^1$ )            | 51.1 cm  |
| Longitud total de la parte 2 ( $\mathbf{a}_t^2$ )            | 95.1 cm  |
| Longitud total del ancho ( $\mathbf{b}_t$ )                  | 92.1 cm  |
| Longitud de empotramiento del largo ( $\mathbf{a}$ )         | 143 cm   |
| Longitud de empotramiento de la parte 1 ( $\mathbf{a}^1$ )   | 49.5 cm  |
| Longitud de empotramiento de la parte 2 ( $\mathbf{a}^2$ )   | 93.5 cm  |
| Longitud de empotramiento del ancho ( $\mathbf{b}$ )         | 89 cm  |
| Módulo de Young longitudinal a las fibras ( $\mathbf{E}_L$ ) | $1.31 \times 10^{11}$ Pa                       |
| Módulo de Young transversal a las fibras ( $\mathbf{E}_T$ )  | $9.05 \times 10^9$ Pa                          |
| Módulo de Poisson ( $\mathbf{v}$ )                           | 0.3  |
| Módulo de cizalladura ( $\mathbf{G}$ )                       | $4.6 \times 10^9$ Pa                           |
| Masa (m)   | 9.800 Kg                                       |
| Densidad ( $\rho$ )  | $1663.4 \text{ Kg/m}^3$                        |
| Número de capas (Parte 1/ Parte 2)                           | 31/22  |
| Espesor total ( $\mathbf{h}_1/\mathbf{h}_2$ )                | 5.39 / 4.22 mm                                 |
| Orientación de las fibras parte 1                            | $[\pm 45/90/0/90/0_3/\pm 45/0_2/\pm 45/0/0]_s$ |
| Orientación de las fibras parte 2                            | $[\pm 45/90/0/90/0_3/\pm 45/0]_s$              |
| Coefficiente de amortiguamiento ( $\xi$ )                    | 0.0050   |

Tabla 6.1. Especificaciones técnicas de la placa DAICA.

La placa presenta dos zonas con diferente espesor en la dirección de su lado más largo. Para conseguir que tuviera dos espesores, se eliminaron ciertas capas de la parte delgada antes del ciclo de curado. En la Figura 6.3 se muestra un esquema de la zona de cambio de espesor y en la Figura 6.4 una imagen C-SCAN de ultrasonidos de la placa sin delaminaciones, con la indicación del cambio de espesor.

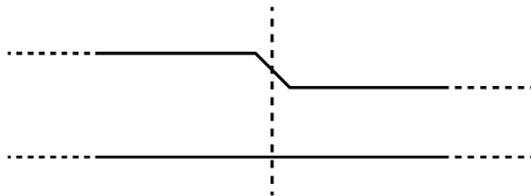


Figura 6.3. Perfil de la zona de cambio de grosor.

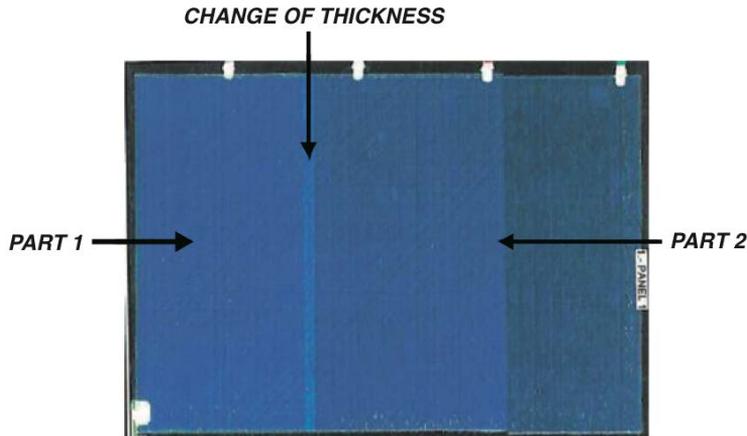


Figura 6.4. Imagen C-SCAN de ultrasonidos de la placa DAICA sin delaminación.

Esta placa fue fabricada en un mismo panel junto a otras dos que contenían delaminaciones inducidas. Las delaminaciones inducidas se crearon mediante la colocación de una lámina de teflón entre dos capas consecutivas durante el proceso de fabricación. Las dos placas con delaminaciones contenían dieciocho delaminaciones inducidas cada una con tres medidas diferentes:  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ ,  $25 \times 25 \text{ mm}^2$  y  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ . En la Figura 6.5 se puede ver una imagen C-SCAN de ultrasonidos que se realizó a una de las placas con delaminaciones una vez elaborada. En ella puede verse el cambio de espesor y la presencia de las delaminaciones de diferentes dimensiones.

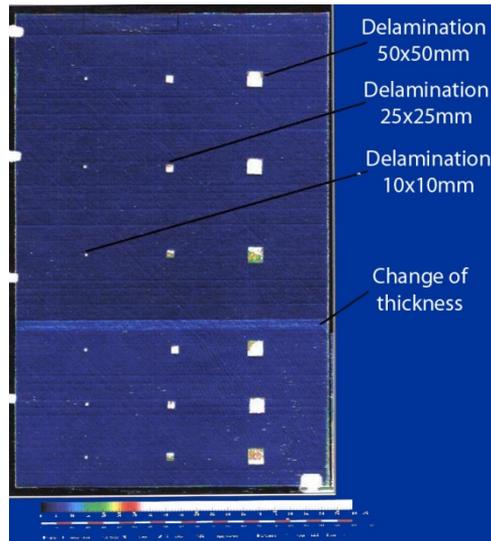


Figura 6.5. Imagen C-SCAN de ultrasonidos de la placa DAICA con delaminaciones.

Para la realización de los experimentos propuestos en este trabajo se extrajeron de la zona de menor espesor de la placa una probeta de 281 x 279 mm<sup>2</sup> (Probeta 1) con delaminación inducida y cinco probetas de dimensiones 260 x 40 mm<sup>2</sup>, tres sin delaminación (Probetas 9\_3, 9\_4 y 7\_1) y dos con delaminación (Probetas 3\_D y 9\_D). Las características de cada probeta se detallan en la Tabla 6.2. En la Figura 6.6 se muestra la localización de las probetas extraídas sobre la placa DAICA.

| Probeta | Tamaño (mm <sup>2</sup> ) | Espesor (mm) | Delaminación                                |
|---------|---------------------------|--------------|---|
| 1       | 281 x 279                 | 4.22         | 50 x 50 mm <sup>2</sup> entre las capas 2-3 |
| 9_3     | 260 x 40                  | 4.22         | No  |
| 9_4     | 260 x 40                  | 4.22         | No  |
| 3_D     | 260 x 40                  | 4.22         | 40 x 50 mm <sup>2</sup> entre las capas 2-3 |
| 9_D     | 260 x 40                  | 4.22         | 25 x 25 mm <sup>2</sup> entre las capas 2-3 |
| 7_1     | 260 x 40                  | 4.22         | No  |

Tabla 6.2. Características de cada probeta.

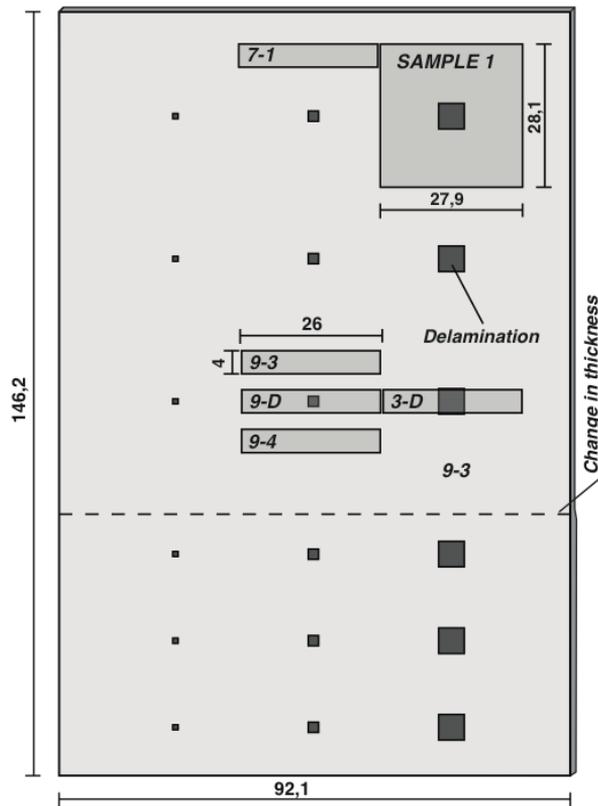


Figura 6.6. Localización de las probetas extraídas sobre la placa DAICA. Cotas en cm.

### 6.3. Detección de modos sobre la placa de estudio

La primera parte del estudio fue la comprobación de la existencia de ondas de Lamb y verificar así las hipótesis expuestas en el Apartado 6.1, en las que se asocia la excitación de los modos de ondas de Lamb  $A_0$  y  $S_0$  con microdesplazamientos OP e IP, respectivamente.

Para ello se realizaron ensayos con rotura de mina (fuente H-N). El primero de los ensayos se realizó sobre la Probeta 1 registrando las señales con un osciloscopio. El segundo de ellos se realizó sobre una placa DAICA completa utilizando el equipo de emisión acústica.

### 6.3.1. Ensayos con fuentes H-N sobre la Probeta 1 con sensores enfrentados

Con la realización de este ensayo se pretendió, además de comprobar la existencia de modos de ondas de Lamb, verificar que según el filtro que se aplique prevalece el modo  $A_0$  o el modo  $S_0$ .

#### 6.3.1.1. Descripción del experimento

Este ensayo se realizó sobre la Probeta 1 de dimensiones 281 x 279 mm<sup>2</sup>. En la Figura 6.7 se muestra dicha probeta. Aunque la delaminación no es perceptible a simple vista, se ha marcado en color claro y marco discontinuo.

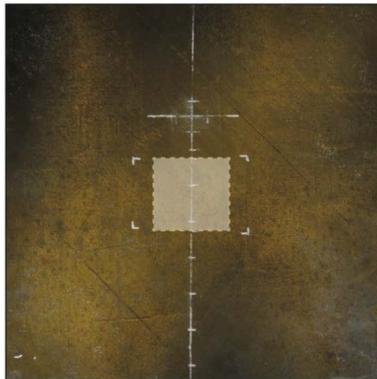


Figura 6.7. Probeta 1 con delaminación de 50x50 mm<sup>2</sup>.

Se usaron sensores multiresonantes VS45-H de *Vallen Systeme* cuya curva de sensibilidad se muestra en la Figura 6.8. El sensor fue rigurosamente seleccionado por tener múltiples resonancias en todo el rango de frecuencias (200-500 kHz). Estas resonancias son esenciales para registrar de forma apropiada los modos  $A_0$  y  $S_0$  con suficiente energía para implementar el algoritmo para todos los tipos de mecanismos de daño. La elección de sensores con buena sensibilidad en bajas frecuencias es particularmente importante para captar el modo  $A_0$ . Es importante destacar que los sensores VS45-H tienen una buena resonancia en torno a 30-40 kHz, con suficiente sensibilidad para captar el modo  $A_0$ . Esta afirmación será corroborada en el experimento que se presenta en esta sección.

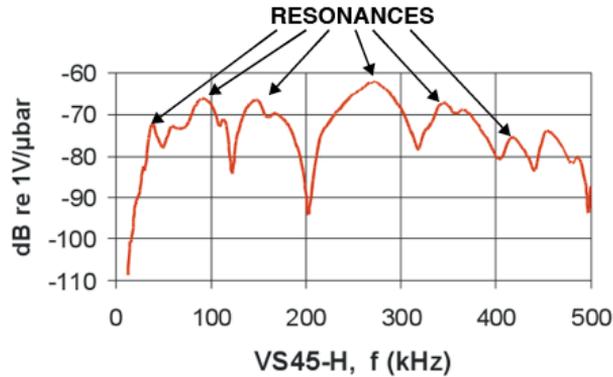


Figura 6.8. Curva de sensibilidad del sensor VS45-H.

El ensayo consistió en generar fuentes H-N, reguladas en la Norma UNE-EN 1330-9 (*Ensayos no destructivos. Terminología. Parte 9: Términos utilizados en ensayos de emisión acústica*. AENOR. Febrero 2010) [175]. Las especificaciones se muestran en la Figura 6.9. Consiste en un lápiz mecánico de mina 2H plomo de diámetro 0.3 mm, que pasa a través de un apoyo de teflón preparado para obtener una inclinación de  $30^\circ$  sobre la superficie. Al presionar el lápiz contra la superficie y producir la rotura de la mina, se crea una pequeña deformación que libera energía en forma de ondas de tensión, similares a las ondas de EA que produce una fisura.

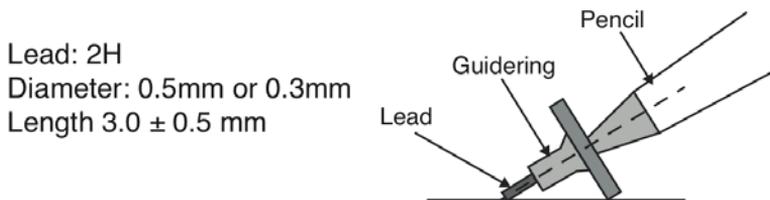


Figura 6.9. Fuente Hsu-Nielsen (H-N).

Las señales de EA fueron registradas directamente con un osciloscopio serie MSO4000B de la marca *Tektronix*, siguiendo el esquema de ensayo que aparece en las Figura 6.10. La Figura 6.11 muestra una vista del ensayo realizado. Los sensores se colocaron a una distancia de 90 mm respecto de la parte superior de la placa y en la misma posición (uno por cada cara), usando grasa de silicona como acoplante. Se realizaron dos tipos de excitaciones diferentes, una sobre la

cara de la superficie (fuente tipo OP) donde se ubicó el sensor S1 y a una distancia de 60 mm del sensor, y otra sobre el canto de la placa (fuente tipo IP).

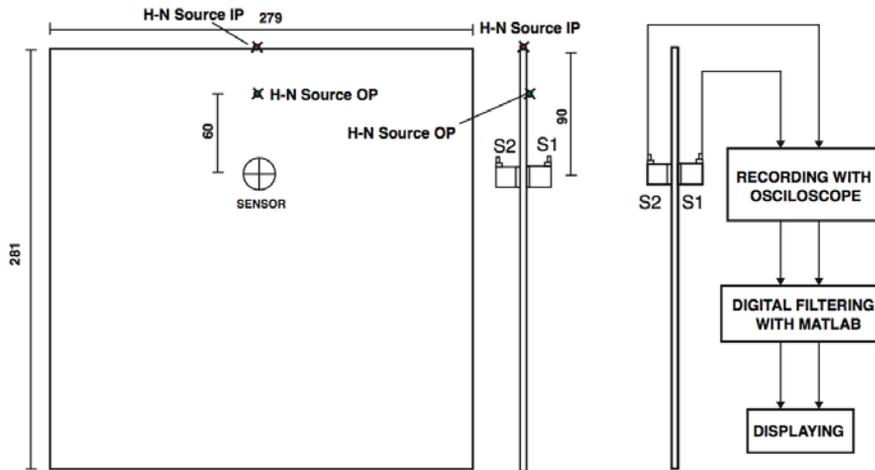


Figura 6.10. Esquema del ensayo de detección de ondas de Lamb sobre la Probeta 1.

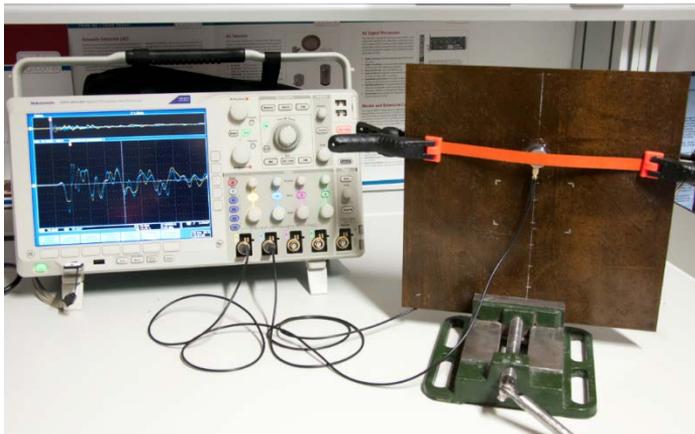


Figura 6.11. Vista del ensayo de detección de ondas de Lamb sobre la Probeta 1.

Las roturas de minas en superficie y canto ayudan a activar el desplazamiento mecánico de micro-pulsos en la dirección perpendicular a plano de la placa (OP- modo  $A_0$ ) y de micro-pulsos en ejes paralelos al plano (IP- modo  $S_0$ ), respectivamente. Además, al encontrarse los sensores S1 y S2 enfrentados, las roturas de mina en canto y superficie confirmarán de forma visual sobre las señales registradas la existencia de los modos simétrico  $S_0$  y

antisimétrico  $A_0$ , según ambas señales estén en fase u oposición de fase, respectivamente.

La Figura 6.12 muestra dos fotografías de la disposición del ensayo. En la rotura de mina en superficie, la probeta se apoyó sobre unos tacos de madera para facilitar el ensayo. Para la realización de la rotura de mina en canto la probeta se sujetó con la ayuda de una mordaza.



Figura 6.12. Disposición del ensayo para rotura de mina en la Probeta 1. Izq.: Rotura de mina en superficie (OP); Dcha.: Rotura de mina en canto (IP).

### 6.3.1.2. Análisis de resultados

La Figura 6.13-izquierda muestra las señales originales (sin ningún filtro aplicado) registradas para una rotura de mina en superficie (fuente OP) y en canto (fuente IP). Aunque los modos  $S_0$  y  $A_0$  son visualmente reconocibles (las señales de S1 y S2 están en fase para el modo  $S_0$  y en oposición de fase para el modo  $A_0$ ), conseguir una separación de ambos modos requiere un tratamiento adicional. Para ello se aplicó un filtrado considerando una banda de bajas frecuencias (LF=[20-55] kHz) y otra de altas frecuencias (HF=[125-660] kHz). Estos filtros proporcionan una separación muy efectiva de los dos modos como puede comprobarse en la Figura 6.13-derecha.

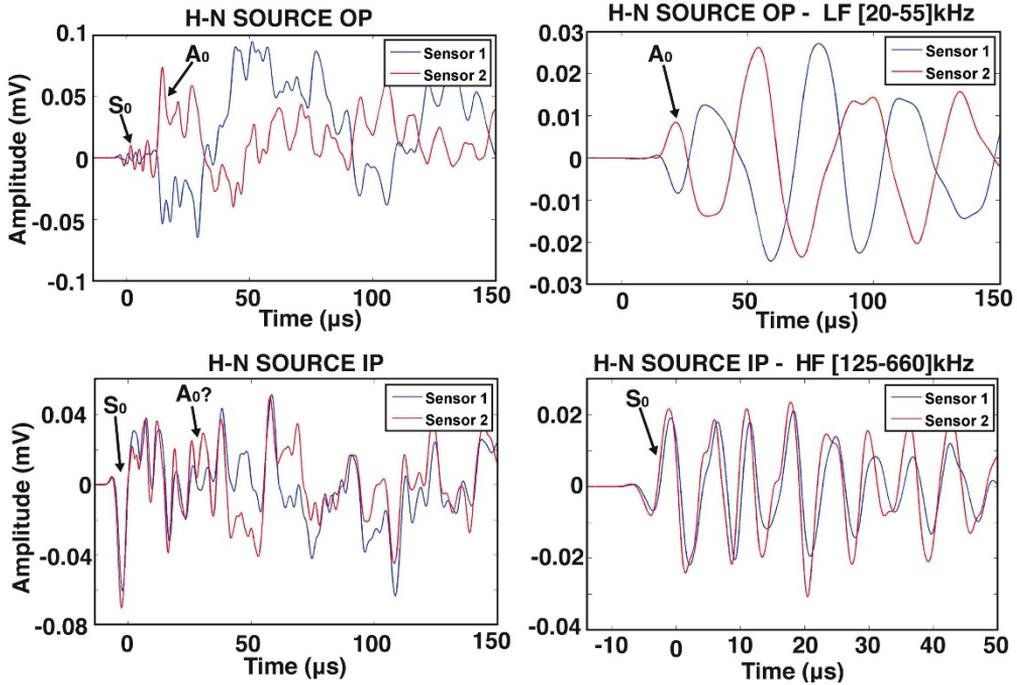


Figura 6.13. Señales registradas en el experimento para detectar los modos de Lamb en la Probeta 1. Izq.: Señales originales; Dcha.: Señales filtradas.

Se probaron distintos filtros de baja y alta frecuencia y la decisión final se tomó según criterios de prueba y error, observando la señal en el dominio del tiempo y la Transformada Wavelet (TW) de la señal. La Figura 6.14 muestra la TW de las señales representadas en la Figura 6.13, señales no filtradas y filtradas registradas en el ensayo para excitaciones OP e IP. La existencia de los modos  $S_0$  y  $A_0$  se observa claramente en ambos casos. El modo  $A_0$  tiene más energía que el modo  $S_0$  cuando se produce una fuente OP.

Hay que destacar que el filtro de baja frecuencia usado para captar principalmente el modo  $A_0$  corresponde con la primera resonancia del sensor, mientras que el filtro de alta frecuencia usado para captar principalmente el modo  $S_0$  corresponde con la tercera resonancia y las siguientes. La segunda resonancia del sensor, en torno a 100 kHz, se ha evitado porque en dicha banda los modos  $A_0$  y  $S_0$  se propagan simultáneamente con amplitudes destacables.

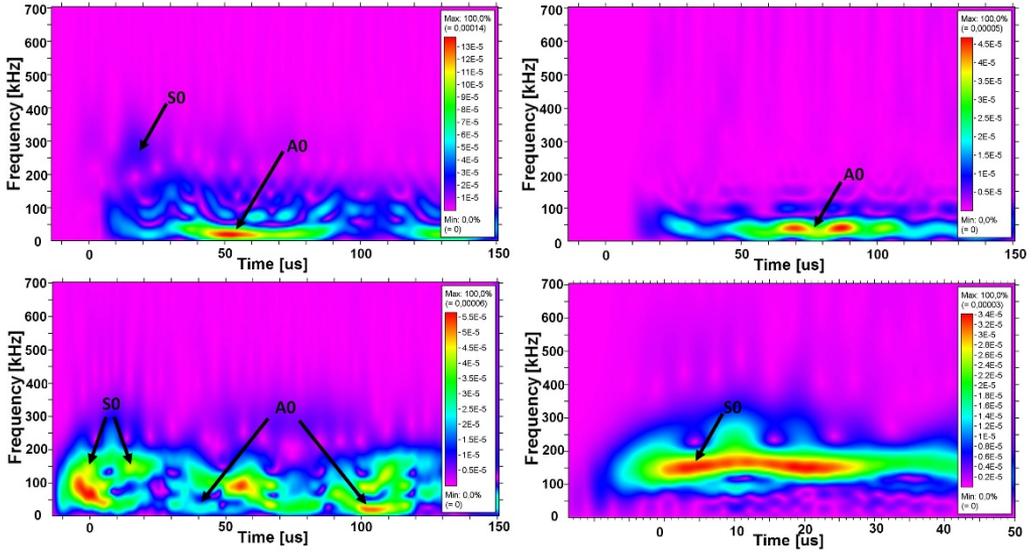


Figura 6.14. Transformada Wavelet de las señales representadas en la Figura 6.13. Izq-arriba: Señal sin filtrar de fuente OP; Dcha-arriba: Señal filtrada de fuente OP; Izq-abajo: Señal sin filtrar de fuente IP; Dcha-abajo: Señal filtrada de fuente IP.

En la Figura 6.15 se muestra el resultado de la aplicación del filtro de alta frecuencia [125-660] kHz para una fuente OP y del filtro de baja frecuencia [20-55] kHz para una fuente IP. Como puede apreciarse, en alta frecuencia y rotura OP (Figura 6.15-Izq) la discriminación de modos no se hace tan visible debido a que los filtros no son los adecuados para la obtención del modo  $A_0$  con la fuente OP. Se observa también que el modo activado es el  $A_0$  (oposición de fase) aunque ligeramente mezclado con el modo  $S_0$  al principio, pues el filtrado en alta frecuencia no consigue eliminarlo completamente. Sin embargo, en baja frecuencia y rotura IP (Figura 6.15-Dcha), se observa claramente que se obtiene el  $S_0$ .

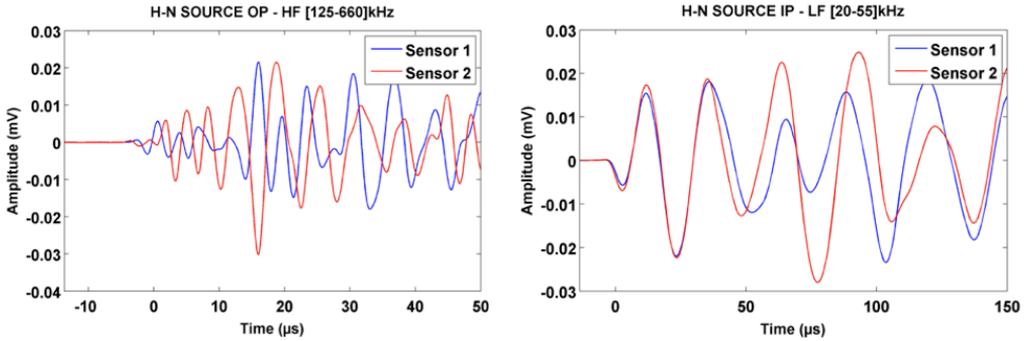


Figura 6.15. Izq.: Filtrado en alta frecuencia de la señal registrada por los sensores S1 y S2 tras la rotura de mina en superficie (OP); Dcha.: Filtrado en baja frecuencia de la señal registrada por los sensores S1 y S2 tras la rotura de mina en canto (IP).

En conclusión, los resultados más importantes de este ensayo son los siguientes:

1. Las roturas de mina IP excitan fundamentalmente el modo  $S_0$ .
2. Las roturas de mina OP excitan fundamentalmente el modo  $A_0$ .
3. Si no se realiza un adecuado filtrado de las señales, los modos  $A_0$  y  $S_0$  aparecen mezclados, haciendo imposible cualquier discriminación de mecanismos de daño basada en la discriminación de los modos  $A_0$  y  $S_0$ .
4. Con el filtrado de baja frecuencia en la banda [20-55] kHz (primera resonancia del sensor) se consigue capturar de forma clara el modo  $A_0$  para roturas OP.
5. Con el filtrado de alta frecuencia en la banda [125-660] kHz (altas resonancias del sensor) se consigue captar de forma clara el modo  $S_0$  para roturas IP.

### 6.3.2. Ensayo de rotura de minas sobre la placa DAICA con sensores enfrentados

Este ensayo se realiza bajo las mismas indicaciones del ensayo llevado a cabo en la Probeta 1 pero en la placa DAICA completa, para verificar que se cumplen las mismas observaciones al aumentar el tamaño de la placa de estudio.

#### 6.3.2.1. Descripción del experimento y configuración de EA

En este caso el ensayo consistió en la realización de roturas de mina (fuentes H-N) sobre la placa DAICA, siguiendo el esquema que aparece en la Figura 6.16. Los sensores se colocaron en el centro de la zona de menor espesor de la placa y en la misma posición (uno por cada cara) a una distancia de 47.5 cm respecto de un borde de la placa y a 46.35 cm del otro borde. Se realizaron dos tipos de excitaciones diferentes, una sobre la cara de la superficie donde se ubicó el sensor S1 (fuente tipo OP) y a una distancia de 28 cm del sensor, y otra sobre el canto de la placa (fuente tipo IP) (Figura 6.17).

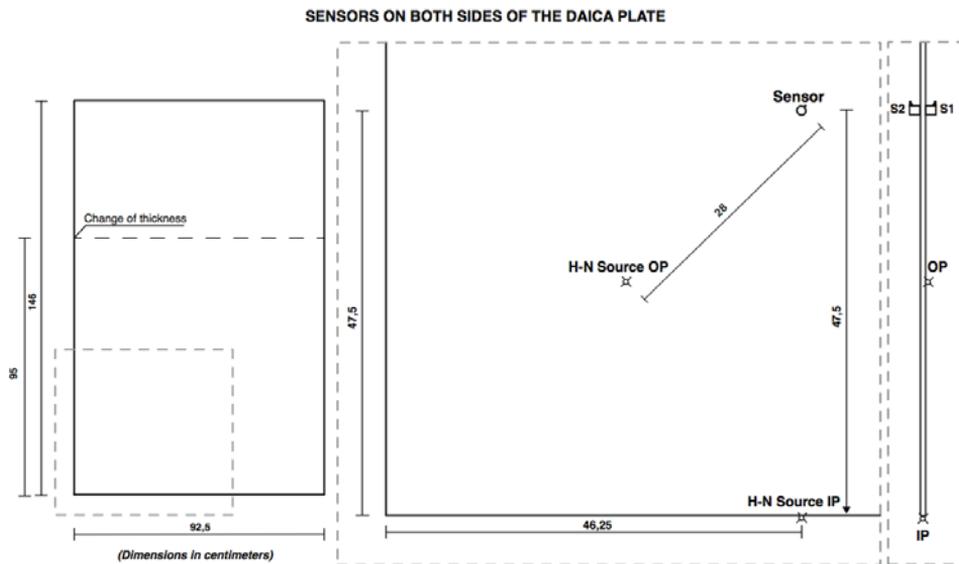


Figura 6.16. Esquema de ensayo de detección de ondas de Lamb sobre la placa DAICA.

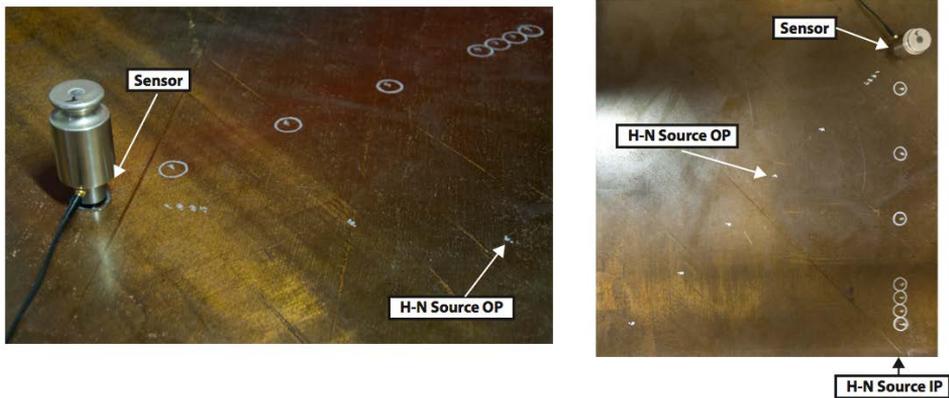


Figura 6.17. Disposición de ensayo de roturas de mina sobre la placa DAICA con los sensores enfrentados.

Al igual que en el ensayo realizado sobre la Probeta 1 y descrito en el Apartado 6.3.1, las roturas de minas en superficie y canto ayudan a activar el desplazamiento mecánico de micro-pulsos en la dirección perpendicular al plano de la placa (OP) y de micro-pulsos en ejes paralelos al plano (IP), respectivamente. De la misma manera, al encontrarse los sensores S1 y S2 enfrentados, las roturas de mina en canto y superficie deberían confirmar una vez más sobre las señales la existencia de los modos simétrico  $S_0$  (ambas señales en fase) y antisimétrico  $A_0$  (ambas señales en oposición de fase), respectivamente.

En este caso, el registro de las señales de EA se realizó con el equipo de emisión acústica AMSY-5 de *Vallen Systeme* (Figura 6.18).



Figura 6.18. Equipo AMSY-5 de *Vallen Systeme*.

Se colocaron dos sensores multiresonantes VS45-H. Las señales, después de ser amplificadas 34 dB, fueron registradas por dos canales al mismo tiempo, siguiendo tres configuraciones de adquisición diferentes con distintos filtros, como se detalla en la Tabla 6.3 y la Figura 6.19.

| Adquisición 1 |       |          |              |             |
|---------------|-------|----------|--------------|-------------|
| Sensor        | Canal | Tipo     | Filtro (kHz) | Umbral (dB) |
| 1             | 1     | AEP 34dB | [25-850]     | 30          |
| 2             | 2     | AEP 34dB | [25-850]     | 30          |

| Adquisición 2 |       |          |              |             |
|---------------|-------|----------|--------------|-------------|
| Sensor        | Canal | Tipo     | Filtro (kHz) | Umbral (dB) |
| 1             | 1     | AEP 34dB | [20-55]      | 30          |
| 2             | 2     | AEP 34dB | [20-55]      | 30          |

| Adquisición 3 |       |          |              |             |
|---------------|-------|----------|--------------|-------------|
| Sensor        | Canal | Tipo     | Filtro (kHz) | Umbral (dB) |
| 1             | 1     | AEP 34dB | [125-660]    | 30          |
| 2             | 2     | AEP 34dB | [125-660]    | 30          |

Tabla 6.3. Configuración de canales, filtros y umbrales del ensayo de rotura de minas con sensores enfrentados en la placa DAICA.

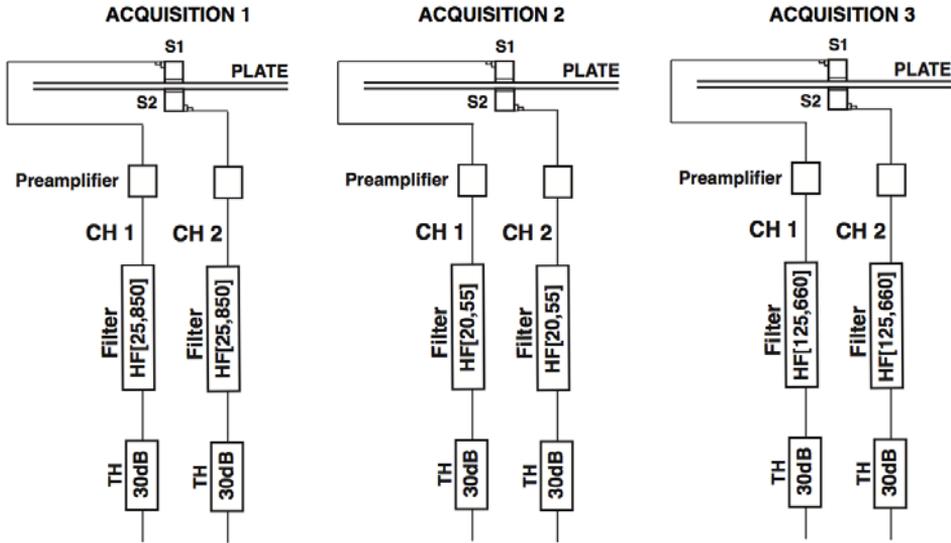


Figura 6.19. Esquema de configuración de canales, filtros y umbrales del ensayo de rotura de minas con sensores enfrentados en la placa DAICA.

Como puede verse, se realizó una adquisición considerando el espectro completo [25-850] kHz, otra adquisición en baja frecuencia [20-55] kHz y la última en alta frecuencia [125-660] kHz. Las señales fueron registradas con una frecuencia de muestreo de 10 MHz usando una longitud de grabación de 8192 datos con 500 muestras de *pretrigger* (5  $\mu$ s).

### 6.3.2.2. Análisis de los resultados obtenidos

Los resultados obtenidos tras la realización del ensayo de roturas de minas sobre la placa DAICA con los sensores enfrentados se pueden ver en la Figura 6.20. En ella se muestran las señales registradas para los sensores S1 y S2 durante la excitación OP (Figura 6.20-Izq) y la excitación IP (Figura 6.20-Dcha) para cada una de las tres adquisiciones realizadas (con filtros diferentes).

En el caso de las señales registradas durante la excitación OP se puede observar que el modo  $S_0$  aparece claramente definido en los primeros ciclos (las señales S1 y S2 están en fase). Sin embargo, posteriormente éstas dejan de estar en fase, lo que indica la llegada del modo  $A_0$ , que se propaga a menor velocidad, mucho más energético que el modo  $S_0$ , pues se trata de una rotura OP. Puede

verse que en las señales registradas en baja frecuencia [20-55] kHz, el modo  $S_0$  no llega a anularse completamente, aunque si es mucho menos enérgico que el modo  $A_0$ . Este hecho, el cual hay que tener muy en cuenta, se debe a que la mina genera un pulso de mucha amplitud, excitando incluso al modo  $S_0$  en rotura OP. Igualmente, al estar el sensor y la fuente muy separados, se produce una clara separación entre los modos  $A_0$  y  $S_0$ . Por otro lado, en las señales registradas en la banda de frecuencias de [125-660] kHz, como era de esperar, el modo  $S_0$  tiene bastante energía, casi comparable al modo  $A_0$ .

En las señales registradas durante la excitación IP en las distintas configuraciones, se observa que se consigue eliminar los restos del modo  $A_0$ , apareciendo únicamente el modo  $S_0$ . Incluso en baja frecuencia [20-55] kHz para una fuente IP se eliminan también los restos del modo  $A_0$ . No obstante, como se puede ver, el modo  $S_0$  en las señales registradas en baja frecuencia tiene mucha menos amplitud que el modo  $S_0$  registrado con el filtro de alta frecuencia.

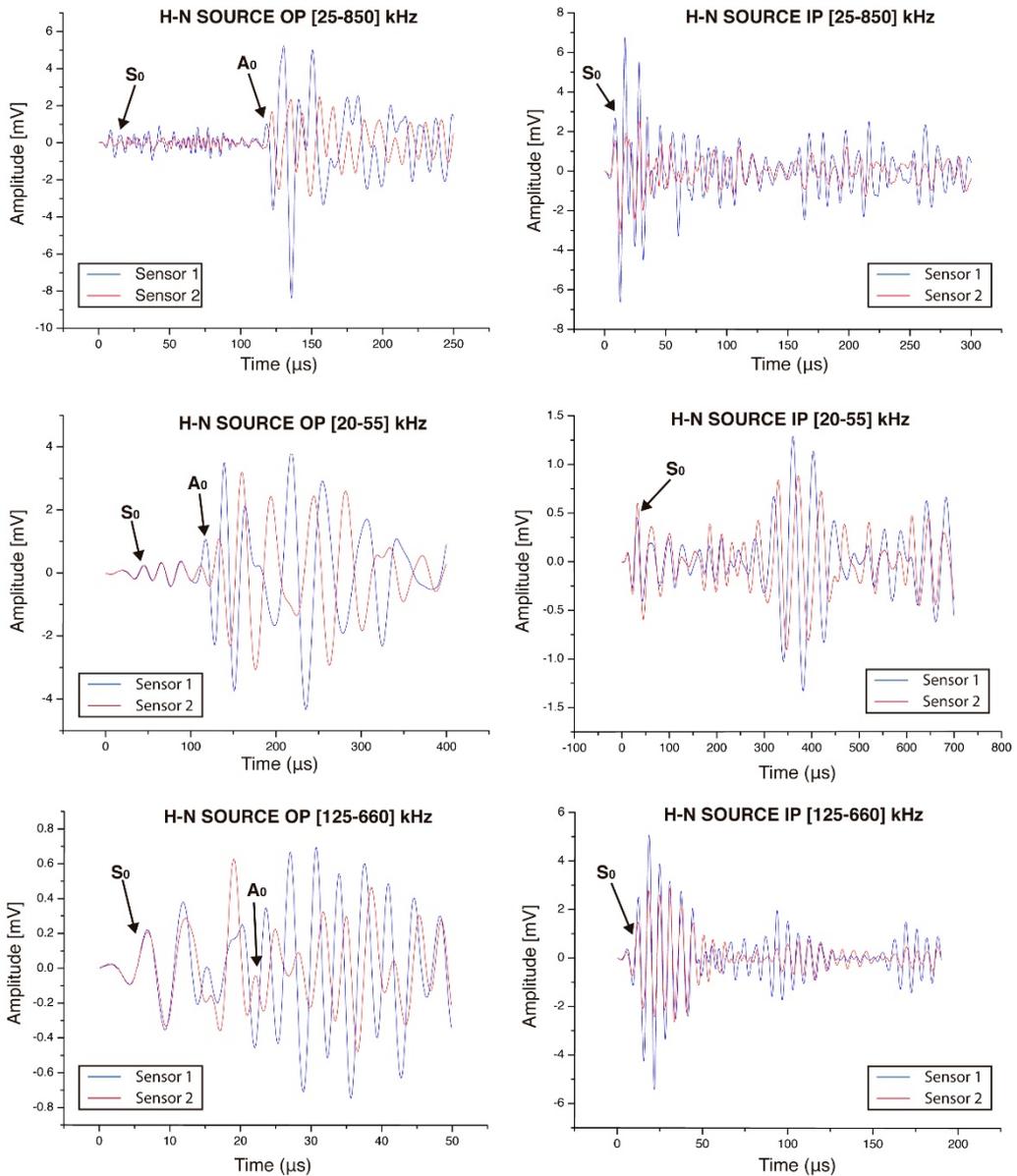


Figura 6.20. Señales registradas por los sensores S1 y S2 con filtros de [25-850] kHz, [20-55] kHz y [125-660] kHz según la configuración usada. Izq.: Durante la rotura de mina en superficie (OP); Dcha.: Durante la rotura de mina en canto (IP).

Los resultados del ensayo de rotura de minas en la placa DAICA con sensores enfrentados ofrecen conclusiones similares a las del ensayo de rotura de minas realizado sobre la Probeta 1 utilizando el osciloscopio. A saber:

1. Las roturas de mina IP excitan únicamente el modo  $S_0$ .
2. Las roturas de mina OP excitan fundamentalmente el modo  $A_0$ , aunque aparece primero el modo  $S_0$ , mucho más débil que el modo  $A_0$ .
3. Con el filtrado de baja frecuencia en la banda [20-55] kHz (1ª resonancia del sensor) se consigue capturar con gran amplitud el modo  $A_0$  para roturas OP, aunque pueden quedar restos del modo  $S_0$ .
4. Con el filtrado de alta frecuencia en la banda [125-660] kHz (altas resonancias del sensor) se consigue captar de forma clara el modo  $S_0$  para roturas IP.
5. La gran distancia existente entre el sensor y la fuente y la alta energía de la fuente H-N provocan que en el filtrado de baja frecuencia en la banda [20-55] kHz para roturas OP aparezca el modo  $S_0$ , aunque con mucha menor amplitud que el modo  $A_0$ .
6. Las roturas OP excitan el modo  $A_0$  en la banda [20-55] kHz. En la banda [125-660] kHz este modo casi no aparece.
7. Las roturas IP excitan el modo  $S_0$  en las bandas [20-55] kHz y [125-660] kHz, pero con mucha más amplitud en la segunda de ellas.
8. Las conclusiones 6 y 7 avalan el desarrollo de un algoritmo basado en la comparación del RMS de los primeros ciclos de las señales en las bandas [20-55] kHz y [125-660] kHz para la discriminación entre roturas OP e IP.

## 6.4. Algoritmo propuesto de discriminación de eventos OP e IP. Pruebas previas de fuentes de daño controladas

### 6.4.1. Esquema de discriminación de eventos OP e IP

Como se ha comprobado, los filtros LF [20-55] kHz y HF [125-660] kHz permiten una separación razonable entre los modos  $A_0$  y  $S_0$ , la cual puede servir de base para la separación entre eventos tipo OP e IP, respectivamente.

Un evento de EA, en general, producirá una señal de HF y una señal de LF. Para asociar este evento a un evento tipo OP o IP, y en base a los ensayos de fuentes H-N, parece razonable evaluar la energía de sus señales HF y LF, y establecer una comparación entre ellas como base de decisión. En particular se propone evaluar dicha energía mediante el RMS en estrechas ventanas al comienzo de las señales, las cuales no contengan efectos secundarios como reflexiones en los bordes, mezcla de modos, conversiones de modos, ondas estacionarias, dispersión, etc.

En particular, la diferencia de los valores del RMS de las señales en baja frecuencia ( $RMS_{LF}$ ) y en alta frecuencia ( $RMS_{HF}$ ) se propone como base de comparación. En la Figura 6.21 se muestra el esquema general, en el que el parámetro CD tiene un valor a determinar. El parámetro de discriminación Rd se define como la diferencia del RMS medio de las señales de baja y alta frecuencia calculado en sus respectivas ventanas, esto es

$$Rd = R_{LF-HF} = RMS_{LF} - RMS_{HF} \quad (6.1)$$

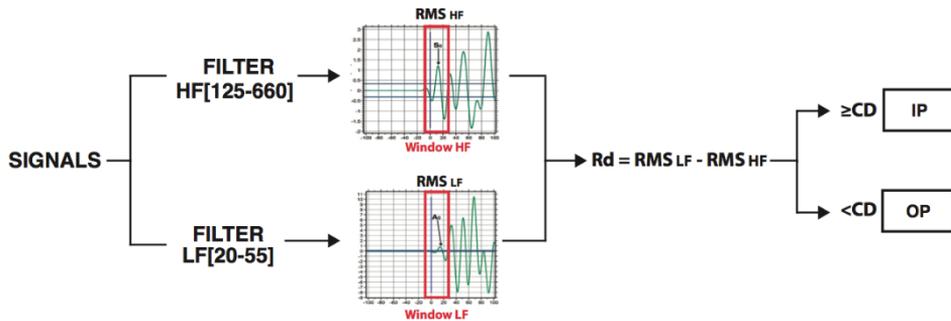


Figura 6.21. Esquema de descripción de eventos OP e IP.

### 6.4.2. Configuración de EA

Para la medición de las señales de EA durante estos ensayos se usó el mismo equipo de EA AMSY-5 y se utilizó un único sensor multiresonante VS45-H. Las señales, después de ser amplificadas 34 dB, fueron grabadas por cuatro canales al mismo tiempo, usando diferentes configuraciones de filtros en cada canal, siguiendo el esquema de adquisición que se muestra en la Tabla 6.4 y la Figura 6.21. Para reforzar la separación de baja y alta frecuencia durante la adquisición, se aplicaron filtros tipo *notch* de cuarto orden (filtros de aniquilación) en 100 kHz y 63 kHz.

Como puede verse, para registrar la señal de alta frecuencia se usó solo un umbral (CH4, TH=30 dB), mientras que para registrar la señal de baja frecuencia se usaron tres umbrales diferentes (CH1, TH=30 dB; CH2, TH=40 dB; CH3, TH=40 dB) con objeto de ver la influencia del umbral en la elección de la ventana temporal de baja frecuencia. El motivo de la elección de varios umbrales en baja frecuencia es la posible existencia de restos del modo  $S_0$  en esta banda de frecuencias, tal y como se comentó en el apartado anterior.

| Sensor | Canal | Tipo          | Filtro (kHz) | Umbral (dB) | Filtro <i>notch</i> (kHz) |
|--------|-------|---------------|--------------|-------------|---------------------------|
| 1      | 1     | AEP 34dB      | [20-55]      | 30          | 110/110/110/110           |
|        | 2     | AC Input 100k | [20-55]      | 40          | 110/110/110/110           |
|        | 3     | AC Input 100k | [20-55]      | 50          | 110/110/110/110           |
|        | 4     | AC Input 100k | [125-660]    | 30          | 63/63/63/63               |

Tabla 6.4. Configuración de canales, filtros y umbrales del ensayo de rotura de minas sobre la probeta 7\_1.

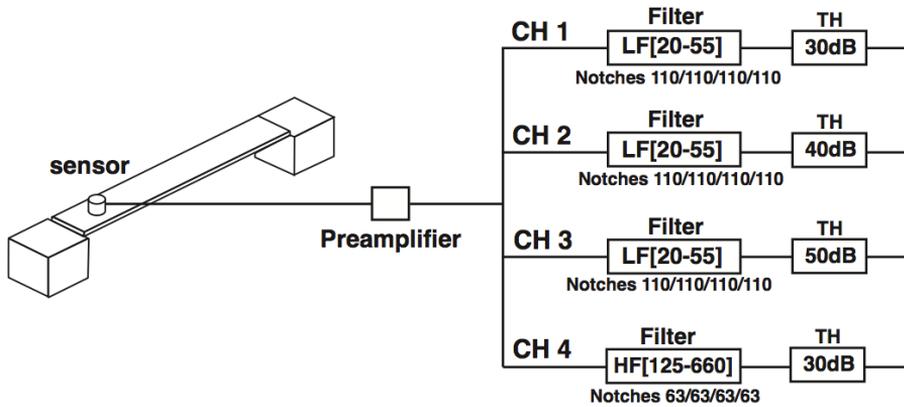


Figura 6.22. Esquema de configuración de canales, filtros y umbrales del ensayo de rotura de minas sobre la probeta 7\_1.

Las señales fueron registradas con una frecuencia de muestreo de 10 MHz usando una longitud de grabación de 8192 datos con 4000 muestras de *pretrigger* (40  $\mu$ s).

### 6.4.3. Ensayo de fuente H-N sobre una probeta. Elección de ventanas temporales

Como primer ensayo tras establecer la configuración de EA a usar en el resto de ensayos, se comprobó su funcionamiento en un ensayo de fuentes H-N. Este ensayo a su vez tiene como objetivo la elección de las ventanas temporales para el cálculo del RMS. Se debe tener en cuenta que la amplitud de estas fuentes de EA es muy alta (>80 dB), por lo que no resultan del todo significativas para la simulación de mecanismos de daño. No obstante, resulta de

interés para validar la configuración y la posibilidad de discriminar entre roturas de mina en canto y superficie mediante el parámetro  $R_d$ .

Como en el Apartado 6.3, las roturas de minas en superficie y canto ayudan a activar de forma controlada el desplazamiento mecánico de micro-pulsos en la dirección perpendicular al plano de la placa (OP) y los micro-pulsos en ejes paralelos al plano (IP), respectivamente.

Este ensayo se realizó sobre la probeta 7\_1, de dimensiones idénticas a las usadas en los ensayos de flexión ( $260 \times 40 \text{ mm}^2$ ). En la Figura 6.23 se muestra un esquema con la disposición del sensor en la probeta y la elección de los puntos de rotura en superficie (OP) y en canto (IP). El ensayo consistió en efectuar tres roturas de mina en cada uno de los 12 puntos dispuestos en la superficie de la probeta (OP1 a OP12) para activar el modo  $A_0$ , y tres roturas de mina en cada uno de los 5 puntos del canto (IP1 a IP5) para activar el modo  $S_0$ .

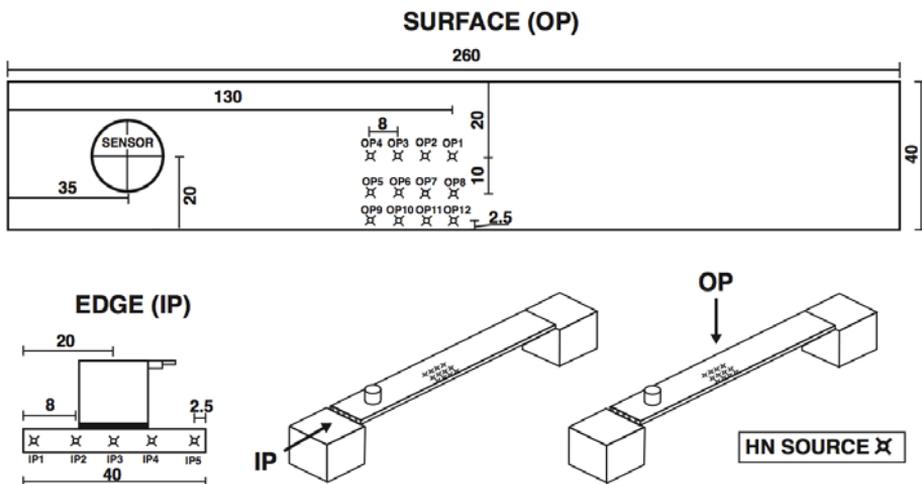
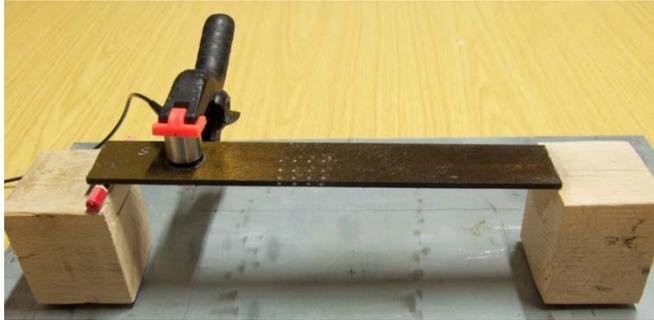


Figura 6.23. Esquema experimental del ensayo de rotura de minas en superficie (OP) y canto (IP) sobre la probeta 7\_1.

La Figura 6.24 muestra una fotografía general de la probeta dispuesta para este ensayo. La probeta se colocó sobre unos tacos de madera para elevarla y

éstos a su vez están unidos por un imán a una placa metálica para dar estabilidad al ensayo.



**Figura 6.24. Probeta 7\_1 dispuesta para ensayo de rotura de minas.**

Los resultados de las amplitudes de las señales registradas tras la realización de las roturas de minas en canto y superficie se muestran en la Figura 6.25. Como se observa, las amplitudes de las señales generadas por las roturas en superficie (OP) y roturas en canto (IP) tanto en bajas como en altas frecuencias se encuentran en torno a los 80 dB independientemente de si son OP o IP. En definitiva, la discriminación de dichas señales entre aquellas que provienen de roturas OP y aquellas que vienen de roturas IP mediante el uso de amplitudes es una tarea imposible.

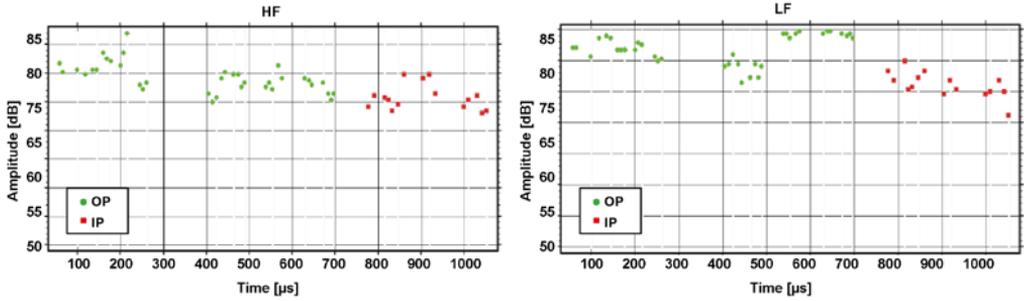


Figura 6.25. Amplitud frente a tiempo de las señales registradas. Izq.: canales de baja frecuencia; Dcha.: canal de alta frecuencia.

La elección de las ventanas temporales para calcular el RMS medio en baja y alta frecuencia se realizó en base a un exhaustivo estudio de todas las señales registradas. Para las señales registradas en los canales de baja frecuencia (CH1, CH2 y CH3) se consideró la ventana temporal  $[-10, 30]$   $\mu\text{s}$ , observándose que es posible captar adecuadamente dos ciclos del modo  $A_0$ , sin incluir reflexiones ni restos del modo  $S_0$  (que llega antes que el modo  $A_0$ ). Para el canal de alta frecuencia (CH4) se eligió la ventana  $[1, 8]$   $\mu\text{s}$ , observándose que es posible captar dos ciclos del modo  $S_0$  sin incluir reflexiones o el modo  $A_0$  (que llega después).

En la Figura 6.26 se muestra un ejemplo de señal registrada en cada canal en las roturas de mina realizadas en el punto OP2 de la superficie. Otros ejemplos de señales registradas con las distintas configuraciones de adquisición en el punto OP7 se muestran en la Figura 6.27. En ambas figuras se puede ver como la ventana de baja frecuencia  $[-10, 30]$   $\mu\text{s}$  capta mejor el inicio del modo para las señales registradas por el CH3 que los CH1 y CH2, debido a la diferencia de umbrales entre canales.

En el caso de la señal de alta frecuencia grabada por el CH4 se puede observar que tanto la elección del umbral como la ventana  $[1, 8]$   $\mu\text{s}$  son adecuados para captar el modo  $A_0$ . También se puede ver como en altas frecuencias aparece ligeramente el modo  $S_0$ , aunque con muy baja amplitud, pero fuera de la ventana elegida. También se observa cómo el pico del espectro de la señal de baja frecuencia en la ventana elegida se sitúa centrado en unos 55 kHz,

mientras que para la señal de alta frecuencia este pico se sitúa en torno a 220 kHz. En la Figura 6.26 se observa que el modo  $A_0$  es mucho más energético en LF que en HF, ya que la rotura de mina se realizó en superficie (tipo OP).

La Figura 6.28 muestra las señales registradas por rotura de mina en el punto IP4 del canto. Igualmente la señal registrada por el CH3 presenta mejores resultados que los CH1 y CH2 para la captación del modo  $A_0$  en este caso, pues recoge mejor su inicio. En dicha figura se observa además como la ventana escogida para el CH4 de alta frecuencia es óptima para captar el modo  $S_0$  en la rotura en canto.

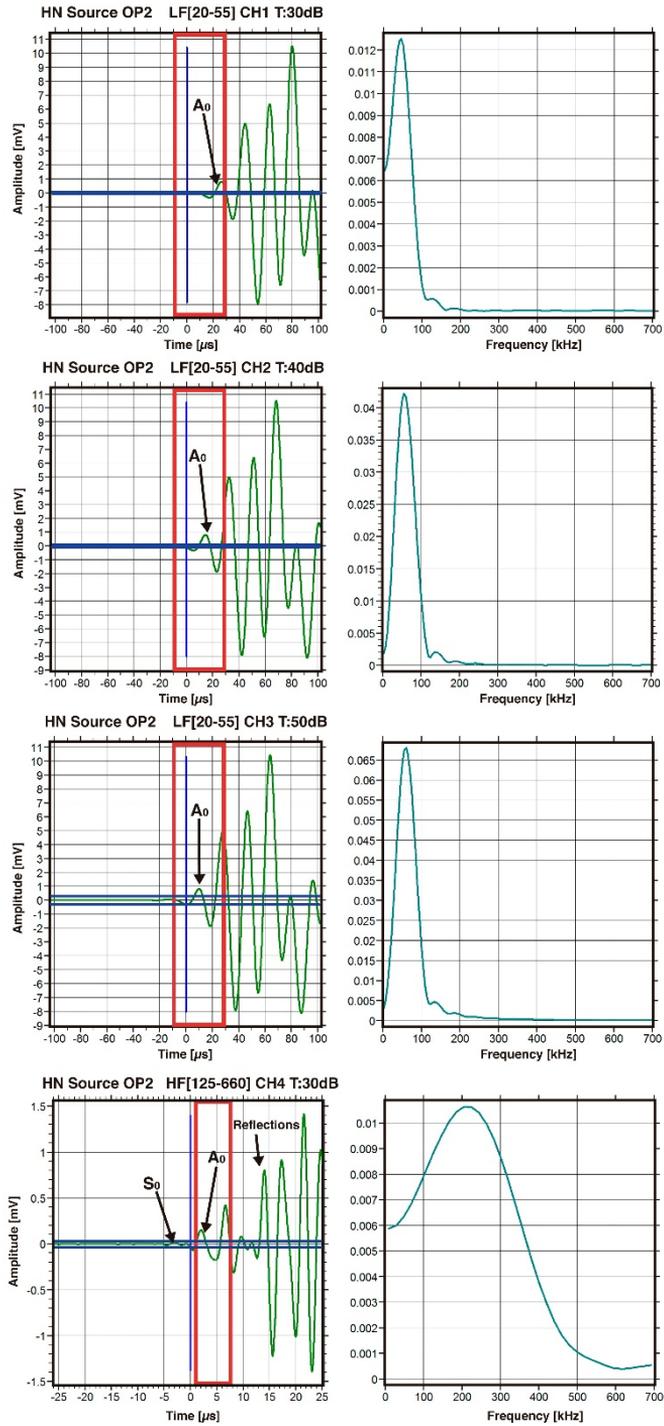


Figura 6.26. Señales registradas en la rotura de mina en el punto OP2 de la probeta 7\_1. Izq.: Señal temporal; Dcha.: Respuesta espectral.

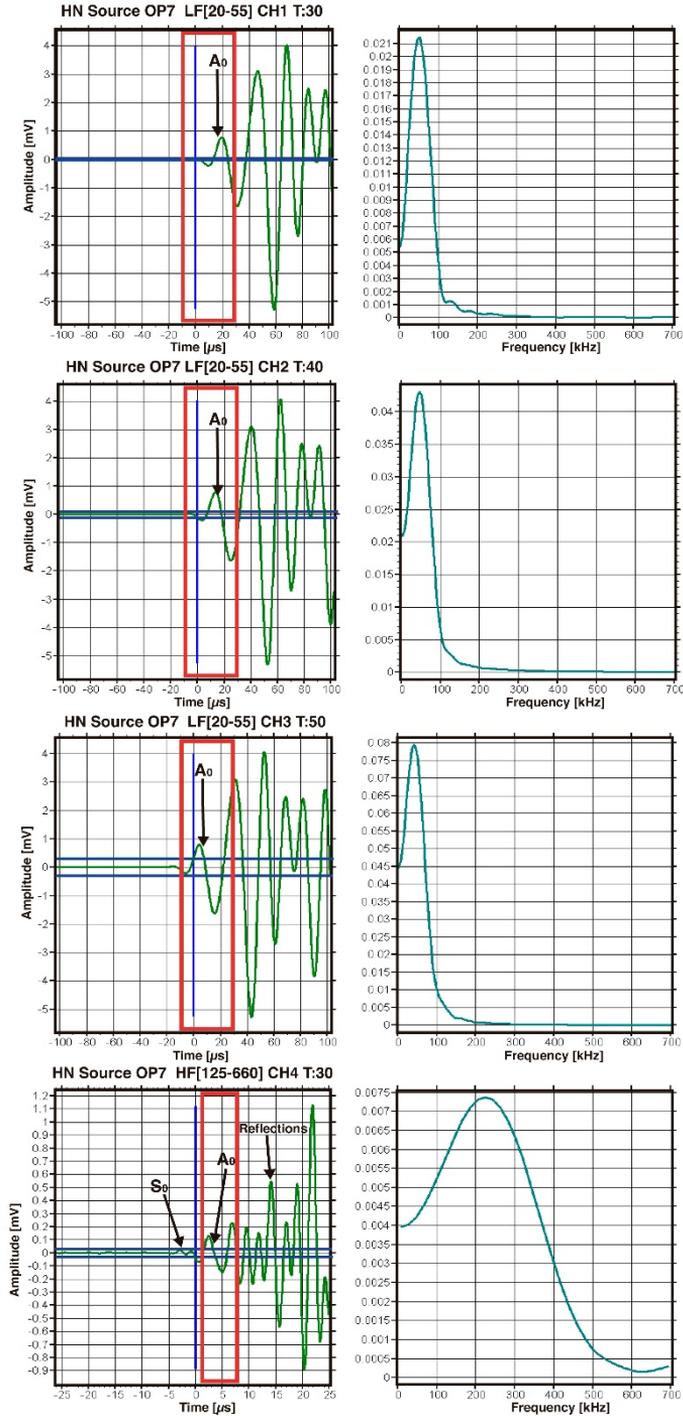


Figura 6.27. Señales registradas en la rotura de mina en el punto OP7 de la probeta 7\_1. Izq.: Señal temporal; Dcha.: Respuesta espectral.

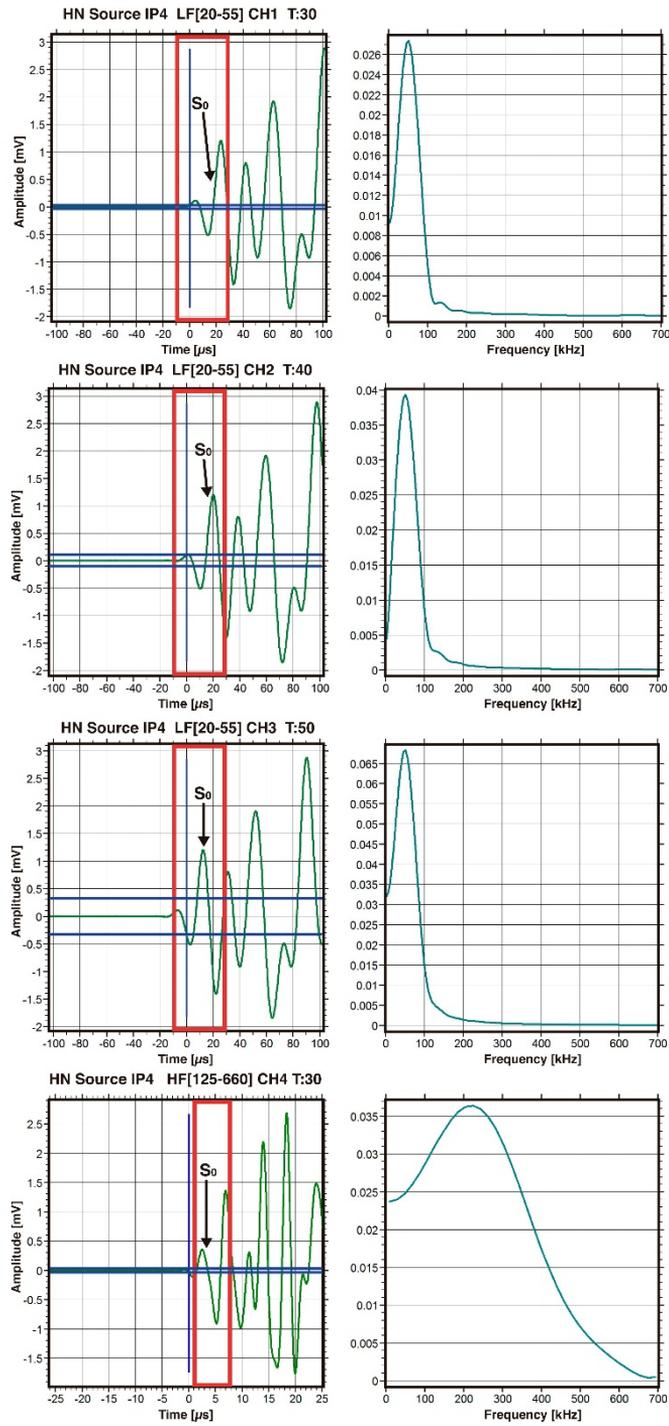


Figura 6.28. Señales registradas en la rotura de mina en el punto IP4 de la probeta 7\_1. Izq.: Señal temporal; Dcha.: Respuesta espectral.

La Tabla 6.5 muestra los valores del RMS medio para las señales registradas en el CH3 de baja frecuencia ( $RMS_{LF}$ ) y CH4 de alta frecuencia ( $RMS_{HF}$ ) correspondientes a las roturas de mina en los puntos OP2, OP7 e IP4. Se puede ver que la diferencia de RMS entre LF y HF ( $RMS_{LF} - RMS_{HF}$ ) en las roturas en superficie OP2 y OP7 es mucho mayor que para la rotura de mina en canto (punto IP4).

| Fuente de EA | Canal | RMS (dB) |
|--------------|-------|----------|
| OP2          | CH3   | 60.0     |
|              | CH4   | 39.6     |
| OP7          | CH3   | 55.5     |
|              | CH4   | 36.4     |
| IP4          | CH3   | 53.4     |
|              | CH4   | 50.9     |

**Tabla 6.5. Valores del RMS en las ventanas de los canales CH3 y CH4 para las fuentes OP2, OP7 e IP4.**

La Figura 6.29 muestra las gráficas correspondientes a los resultados del cálculo de RMS usando la ventana temporal  $[-10, 30]$   $\mu s$  para bajas frecuencias (CH1, CH2 y CH3) y  $[1, 8]$   $\mu s$  para las altas frecuencias (CH4), así como el valor de Rd. Se puede ver como la elección del canal en baja frecuencia influye de manera muy significativa en el valor de Rd y por tanto en la eficacia del esquema de discriminación. Sería muy difícil determinar un valor de Rd que permitiera diferenciar entre roturas en superficie (OP) y en canto (IP) con el uso de los canales CH1 y CH2 en baja frecuencia. En cambio, si se elige el canal CH3 la diferencia de RMS se hace mucho más clara, pudiéndose tomar un valor límite de  $Rd=10$  dB que permite distinguir correctamente entre roturas OP e IP, es decir

si  $R_d \geq 10$  dB  $\rightarrow$  Rotura OP

si  $R_d < 10$  dB  $\rightarrow$  Rotura IP.

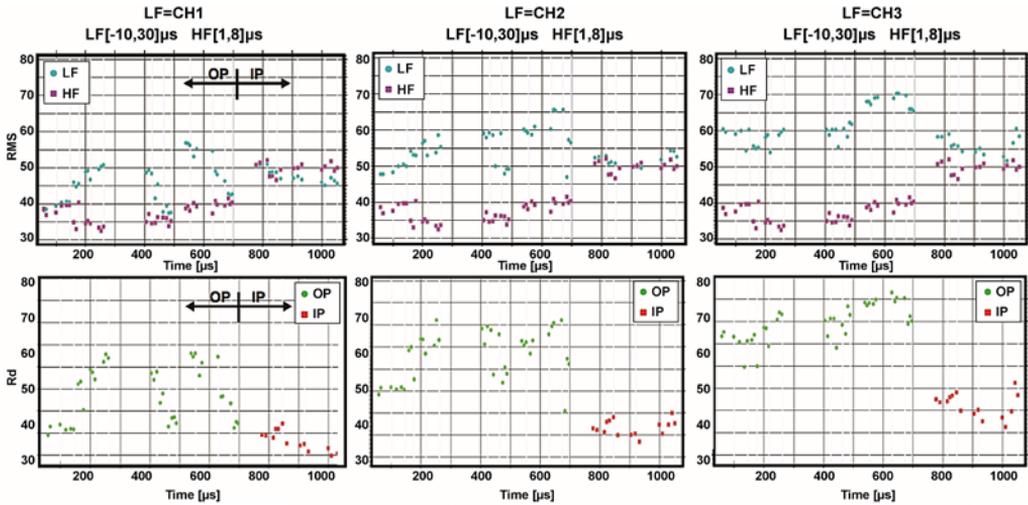


Figura 6.29. RMS (arriba) y  $R_d$  (abajo) para las roturas realizadas en la probeta 7\_1. Tiempo  $< 700$   $\mu$ s (roturas OP). Tiempo  $> 700$   $\mu$ s (roturas IP). Valores en dB.

La razón de este resultado está en que, como las señales de rotura de mina son de alta amplitud ( $A \approx 80$  dB), el umbral del CH3 ( $TH = 50$  dB) es capaz de captar mejor el inicio del modo  $A_0$  en baja frecuencia. Es decir, la elección del umbral en baja frecuencia puede supeditarse a la amplitud de la señal.

La influencia de la relación entre el umbral y la ventana en baja frecuencia elegida se pone de manifiesto en la Figura 6.30. Si se adelantara el comienzo de la ventana temporal de baja frecuencia en 20  $\mu$ s para el canal CH1 (ventana [10, 50]  $\mu$ s) y 10  $\mu$ s para el canal CH2 (ventana [0, 40]  $\mu$ s), se consiguen resultados muy parecidos a los obtenidos para el canal CH3 con el uso de la ventana [-10, 30]  $\mu$ s. Véase que en los tres casos la discriminación entre roturas OP y IP es posible considerando valores de  $R_d \geq 10$  dB y  $R_d < 10$  dB, respectivamente.

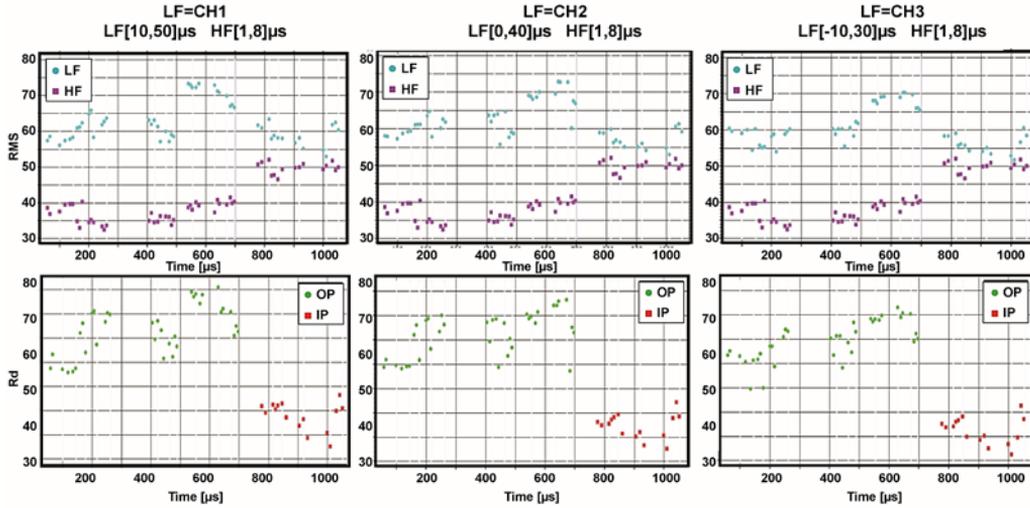


Figura 6.30. Valores de RMS y Rd en función de la ventana temporal para los canales de baja frecuencia.

#### 6.4.4. Ensayos de mecanismos de daño individuales

Aunque las roturas de mina en canto y superficie sirven para hacer una primera validación del algoritmo de discriminación entre eventos OP e IP, no se trata de fuentes de EA realistas en las que basar un algoritmo final de discriminación entre mecanismos de daño (delaminaciones, micro-roturas de matriz y roturas de fibra). Básicamente, por dos razones: i) las roturas de mina no son exactamente ninguno de estos mecanismos; ii) las amplitudes mayores de 80 dB que se obtienen en roturas de mina, son superiores a las amplitudes de los eventos de EA generados en materiales compuestos sometidos a carga.

Por esta razón se realizaron tres ensayos base para generar eventos de EA correspondientes a:

-Delaminaciones: Ensayo de delaminación pura en una probeta predelaminada.

-Roturas de fibra: Ensayo de roturas de fibra introducidas y pegadas en una probeta predelaminada.

-Micro-roturas de matriz: Ensayo de degradación química de una probeta de resina epoxi.

#### 6.4.4.1. Ensayo de delaminación pura

El objetivo principal de este ensayo es generar básicamente delaminaciones en una probeta extraída de la placa DAICA para conseguir activar únicamente micro-pulsos en la dirección perpendicular al plano de la probeta (OP), generando eventos de EA reales.

Este ensayo se realizó sobre una probeta de dimensiones 129 x 40 mm<sup>2</sup> extraída de la probeta 7\_1 previamente ensayada a flexión, como puede verse en la Figura 6.31.



**Figura 6.31.** Mitad de la probeta 7\_1 previamente ensayada a flexión y pre-delaminada.

El ensayo de flexión previo realizado sobre dicha probeta provocó en uno de sus extremos la aparición de una pre-delaminación en la cual dos de las capas de tejido se encontraban separadas. Esta delaminación previa facilitó su instalación y disposición sobre un dispositivo diseñado para generar más delaminaciones controladas (Figura 6.32). El sensor se dispuso a 93 mm del extremo de la probeta donde se encuentra la delaminación y a 50 mm del comienzo de la pre-delaminación. El ensayo consistió en realizar la apertura de forma mecánica de las capas del tejido de la probeta, con objeto de conseguir una extensión de la pre-delaminación ya existente.

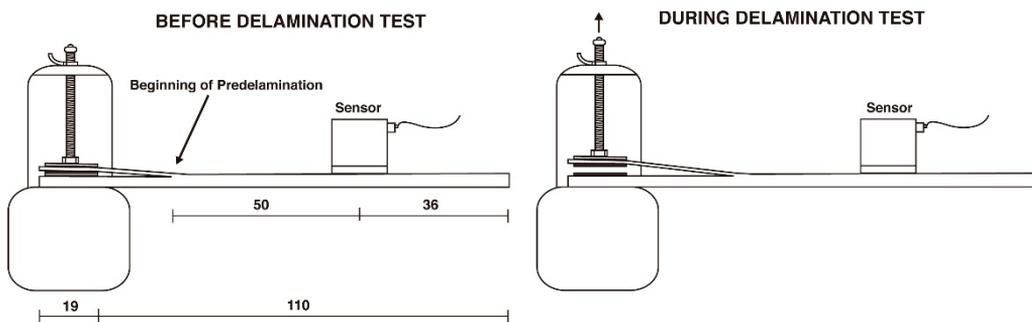


Figura 6.32. Izq.: Esquema de disposición del comienzo del ensayo de delaminación pura; Dcha.: Esquema del desarrollo del ensayo de delaminación pura.

Para realizar la medición se utilizó la misma configuración de EA explicada en el apartado 6.4.2. Es decir, para el filtro de baja frecuencia [20-55] kHz se usaron tres umbrales (CH1, TH=30 dB; CH2, TH=40 dB; CH3, TH=50 dB) y para el filtro de alta frecuencia [125-660] kHz se usó un único umbral (CH4, TH=30 dB).

La Figura 6.33 muestra una vista general y un detalle del dispositivo para la realización del ensayo. Se utilizó una pinza sargento para evitar cualquier tipo de desplazamiento del sensor durante el ensayo.



Figura 6.33. Vista del ensayo de delaminación pura.

El ensayo consistió en la realización de dos periodos de carga seguidos por sendos periodos de fluencia, concluyendo con la descarga total de la probeta. La Figura 6.34 muestra los tiempos de duración de cada una de las cinco fases del ensayo.

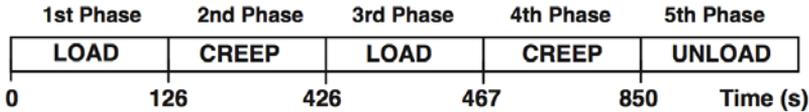


Figura 6.34. Fases de carga, fluencia y descarga realizadas durante el ensayo de delaminación pura.

Los resultados de las amplitudes de las señales registradas durante la realización del ensayo de delaminación se muestran en la Figura 6.35-Izq. Como se observa, las amplitudes de las señales generadas tanto en bajas como en altas frecuencias se encuentran entre los 30 dB y los 65 dB, es decir, amplitudes mucho menores que las generadas en ensayos anteriores con fuentes H-N. Como era de esperar, en las fases de carga existe una mayor concentración de señales registradas, las cuales disminuyen progresivamente cuando comienza la fase de fluencia, donde se deja de aumentar la carga. En la fase de descarga (última fase) se puede apreciar también un aumento en la concentración de las señales de EA, a pesar de ser menores en número y amplitud que las señales originadas en las fases de carga. La Figura 6.35-Dcha muestra los eventos acumulados de las señales de EA durante el ensayo. Se puede ver cómo en las fases de carga (color rojo) y descarga (color azul) hay mayor pendiente que en las fases de fluencia (color verde), lo cual guarda total relación con las concentraciones de eventos de EA comentadas anteriormente y que aparecen en la Figura 6.35-Izq.

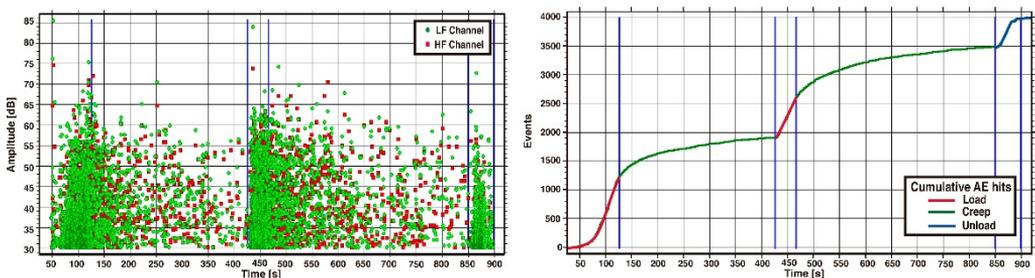


Figura 6.35. Izq.: Amplitud de las señales de EA registradas en los canales de baja y alta frecuencia del ensayo de delaminación; Dcha.: Eventos de señales de EA acumulados durante el ensayo de delaminación.

La Figura 6.36 muestra dos señales de EA procedentes del mismo evento de EA. A la izquierda se muestra una señal registrada por el canal CH2 tras el

filtrado en la banda de baja frecuencia [20-55] kHz. En ella se observa que el modo  $S_0$  (que llega antes por ser más rápido) no llega a anularse por completo, pero es mucho menos energético que el modo  $A_0$ , lo que confirma que son señales producidas por desplazamientos perpendiculares al plano (OP), asociados a las delaminaciones producidas en el material. No obstante, con el umbral de 40 dB del canal CH2, es posible desechar el modo  $S_0$  y captar adecuadamente el modo  $A_0$  en las etapas *posttrigger*.

La señal registrada por el CH4 de alta frecuencia [125-660] kHz se muestra en la Figura 6.36-Dcha. En ella se puede ver como se eliminan los restos del modo  $S_0$ , apareciendo únicamente el modo  $A_0$ . Véase que el modo  $A_0$  en la señal registrada con este filtro tiene mucha menos amplitud que el modo  $A_0$  registrado con la configuración de baja frecuencia, confirmando una vez más que son señales producidas por los desplazamientos OP asociados al modo  $A_0$  y que no se producen desplazamientos IP significativos asociados al modo  $S_0$ , es decir, se trata de eventos generados por delaminaciones, como corresponde a este ensayo.

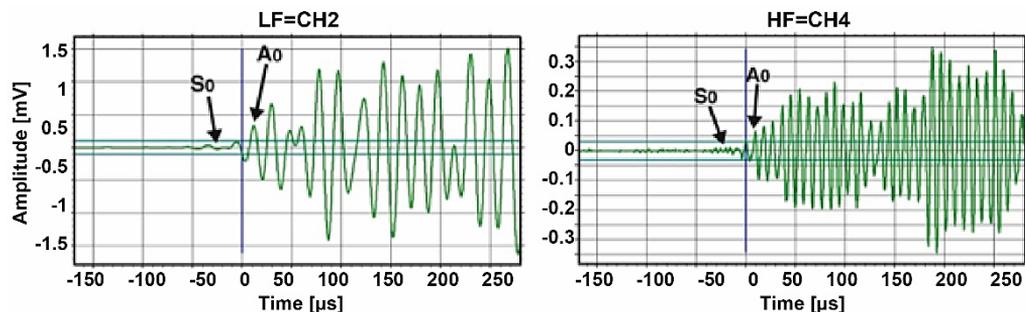


Figura 6.36. Izq.: Señal de EA registrada con el CH2 de baja frecuencia [20-55] kHz durante el ensayo de delaminación pura. Dcha.: Señal de EA registrada con el CH4 de alta frecuencia [125-660] kHz durante el ensayo de delaminación pura.

#### 6.4.4.2. Ensayo de rotura de fibra

Como segundo ensayo de mecanismo de daño único, se realizaron roturas de fibra de forma controlada con objeto de activar únicamente micro-pulsos en el plano de la probeta (IP).

Este ensayo de control se realizó sobre una probeta predelaminada de dimensiones  $130 \times 40 \text{ mm}^2$ , de las mismas características que la utilizada para el ensayo de delaminación (la otra parte de la probeta 7\_1). Como se puede ver en la Figura 6.37, el ensayo consistió en introducir y pegar con cianocrilato los haces de fibra entre la separación de capas de tejido en uno de los extremos de la probeta. Una vez que los haces de fibra quedaron pegados entre las capas de tejido, se procedió a la realización del ensayo tirando de las fibras con la ayuda de unas pinzas en la dirección opuesta a la probeta. Dicho mecanismo simula las micro-roturas y tensiones que se producen durante la rotura de fibra, directamente relacionadas con micro-pulsos que se generan en los ejes paralelos al plano (IP), activándose de esta forma el modo  $S_0$ . Obviamente, las condiciones de contorno son diferentes en el caso de que las fibras se encuentren confinadas en la matriz de resina epoxi, pero es una aproximación aceptable.

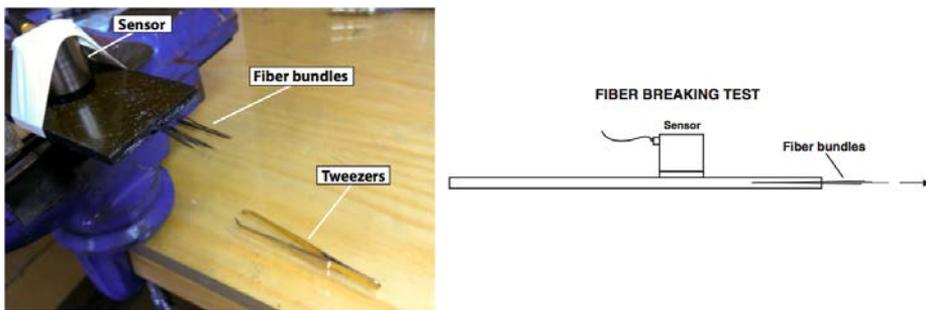


Figura 6.37. Disposición y esquema del ensayo de rotura de fibra.

Se utilizó la misma configuración de EA explicada en el apartado 6.4.2. La Figura 6.38 muestra las amplitudes de las señales registradas en este ensayo de rotura de fibra. Durante la realización del ensayo se detectó únicamente EA en el canal de alta frecuencia, es decir, eventos de EA con un único *hit* en el canal CH4, confirmando que este mecanismo produce principalmente energía de alta frecuencia. Como se puede ver, las amplitudes de las señales no son muy altas, alcanzando valores que se encuentran entre los 40 dB y 50 dB.

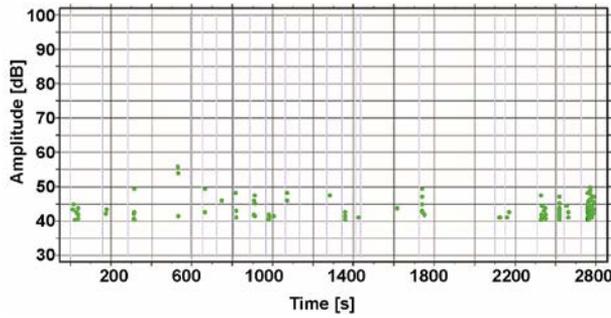


Figura 6.38. Amplitudes de las señales de EA registradas durante el ensayo de rotura de fibra.

En general las señales fueron de corta duración y muy repetitivas en su forma. La Figura 6.39 muestra un ejemplo de una de las señales registradas. Se observa una señal de corta duración y un espectro en frecuencia, con picos muy significativos en las resonancias de 280 kHz a 300 kHz del sensor VS45-H. En cambio, la amplitud de los picos en las resonancias de 100 kHz y de 140 kHz a 160 kHz, resulta menor. Este aspecto resulta clave para la caracterización de este mecanismo.

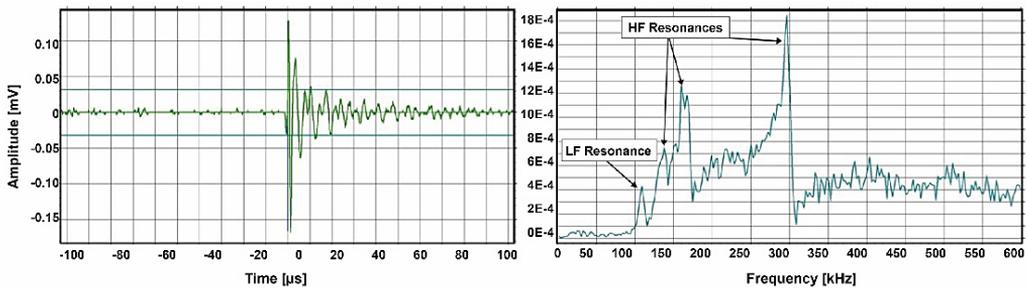


Figura 6.39. Señal de EA registrada por el canal de alta frecuencia durante el ensayo de rotura de fibra. Izq.: Señal temporal; Dcha.: Respuesta espectral.

En esta ocasión, para la realización del análisis de las señales registradas por el canal de alta frecuencia se consideró la ventana temporal  $[-2, 4] \mu\text{s}$ , observándose que con esta ventana es posible captar adecuadamente dos ciclos del modo  $S_0$ , sin incluir rebotes o restos del modo  $A_0$ , que en su caso llegarían mucho después (Figura 6.40). También se observa que el pico del espectro de la

señal de alta frecuencia en la ventana elegida se sitúa entre 300 y 400 kHz, coincidiendo con una resonancia del sensor VS45-H.

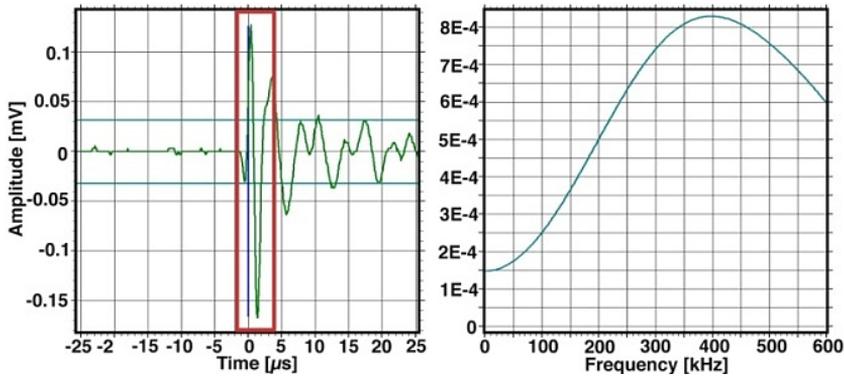


Figura 6.40. Elección de la ventana temporal  $[-2, 4]$   $\mu\text{s}$  de la señal de EA registrada por el canal de alta frecuencia durante el ensayo de rotura de fibra. Izq.: Señal temporal; Dcha.: Respuesta espectral.

#### 6.4.4.3. Ensayo de micro-rotura de matriz

Este ensayo de control se realizó para caracterizar la micro-rotura de matriz. Para ello se fabricó una muestra de resina epoxi con las mismas dimensiones que las muestras de CFRP sometidas a ensayos de flexión. El ensayo consistió en generar actividad de EA degradando químicamente con acetona la muestra de resina epoxi sometida a fuerza. Esto causa micro-roturas de superficie en la resina. En este caso, las amplitudes de las señales de EA registradas no superaron los 50 dB. Además, las señales registradas en el canal de alta frecuencia (CH4) tuvieron mayor amplitud que las señales registradas en los canales de baja frecuencia, confirmando, una vez más, que este mecanismo produce principalmente energía de alta frecuencia. La Figura 6.41 muestra una señal registrada en el canal CH4 de alta frecuencia y su espectro en frecuencia en la ventana temporal  $[-2,4]$   $\mu\text{s}$  y revela que este mecanismo genera energía de alta frecuencia en torno a 250 kHz, cerca de la cuarta resonancia del sensor.

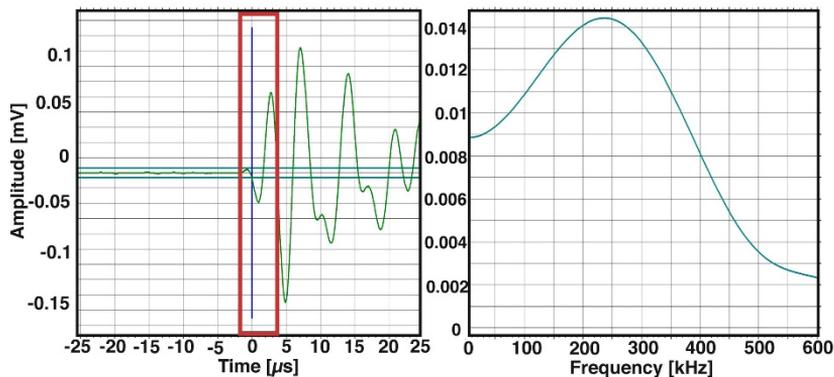


Figura 6.41. Ensayo de micro-rotura de matriz. Izquierda: Señal temporal registrada. Derecha: Respuesta espectral en la ventana temporal  $[-2,4]$   $\mu\text{s}$ .

## 6.5. Descripción del algoritmo de discriminación de mecanismos de daño

Se describe en esta sección el algoritmo final de discriminación de mecanismos de daño desarrollado, y que ha sido implementado en su totalidad en el software VISUAL AE de *Vallen Systeme*, usando el código ECP de programación (lenguaje de programación Lua). Este algoritmo se ha conseguido tras un exhaustivo y razonado análisis de las señales de los ensayos de delaminación pura, roturas de fibra, micro-rotura de matriz y ensayos previos de flexión a tres puntos. La Tabla 6.6 muestra la configuración de EA utilizada para el desarrollo del algoritmo de discriminación de mecanismos de daño.

| Sensor | Canal | Tipo          | Filtro (kHz) | Umbral (dB) | Filtro <i>notch</i> (kHz) |
|--------|-------|---------------|--------------|-------------|---------------------------|
|        | 1     | AEP 34dB      | [20-55]      | 30          | 110/110/110/110           |
|        | 2     | AC Input 100k | [20-55]      | 40          | 110/110/110/110           |
| 1      | 3     | AC Input 100k | [20-55]      | 50          | 110/110/110/110           |
|        | 4     | AC Input 100k | [20-55]      | 60          | 110/110/110/110           |
|        | 5     | AC Input 100k | [125-660]    | 30          | 63/63/63/63               |

Tabla 6.6. Configuración de EA utilizada para el desarrollo del algoritmo de discriminación de mecanismos de daño.

En la Tabla 6.7 se resumen los criterios básicos, que como hipótesis de partida, permiten la clasificación de señales de EA en cada uno de los 3 mecanismos de daño. En la última columna se indica la nomenclatura usada para denominar a cada mecanismo de daño.

| Daño                   | Micro-pulsos | Modo predominante | Banda de frecuencia (kHz) | Nomenclatura |
|------------------------|--------------|-------------------|---------------------------|--------------|
| Delaminación           | OP           | A <sub>0</sub>    | [20-55]                   | DELA 1       |
| Micro-rotura de matriz | IP           | S <sub>0</sub>    | [100-220]                 | DELA 0       |
| Rotura de fibra        | IP           | S <sub>0</sub>    | [220-450]                 | DELA 2       |

**Tabla 6.7. Hipótesis de partida: asociación de mecanismos de daño a modos de propagación.**

### 6.5.1. Parte A: Filtros previos

Se introdujeron los siguientes filtros previos generales:

**-Filtro  $A \geq 45$  dB:** No se consideraron las señales con amplitudes inferiores a 45 dB, ya que el análisis de señales con  $A < 45$  dB resultó complicado y confuso, quizás porque incluso muchas de ellas provengan de rozamientos internos en el material.

**-Filtro  $TRAI \geq 1$ :** Este filtro se introdujo para eliminar los *hits* que se registraron sin la grabación de su señal correspondiente, debido a la avalancha de eventos emitidos por el material y a la falta de memoria de las tarjetas de adquisición de datos.

**-Filtro  $CNTS \geq 1$ :** Se limitó el análisis a los *hits* con al menos dos cuentas. Es decir, se eliminaron los *hits* con una sola cuenta por considerarlos muy débiles, posiblemente provenientes de ruidos impulsivos ajenos al experimento, o bien, *hits* artificiales debidos a cruces puntuales de umbral por parte del ruido de fondo. Esta es una práctica habitual en los ensayos de EA.

**-Filtro de *hits* no computados  $\text{RMS}_{\text{PW}} \geq 11$  dB:** Se introdujo este filtro para eliminar los *hits* de baja amplitud en alta frecuencia. Se eliminaron los *hits* que tienen demasiada energía en una determinada ventana anterior al cruce del umbral THC (*Threshold crossing; ventana pretrigger*), puesto que hace imposible realizar su correcto análisis basado en el RMS en ventanas temporales tras el cruce del umbral. Estos *hits* podrían estar originados por mecanismos de fricción. Obviamente, este filtro solo afectó a las señales registradas en el canal de alta frecuencia.

Para establecer este filtro se definió la ventana  $W_P = [-16, -4]$   $\mu\text{s}$  (es decir, antes del THC), y se calculó el RMS medio de las señales registradas en el canal de alta frecuencia dentro de esta ventana, al que llamamos  $\text{RMS}_{\text{PW}}$ . Se observó que en los casos en los que  $\text{RMS}_{\text{PW}}$  superó los 11 dB resultaba imposible captar el modo  $S_0$  adecuadamente, por lo que dichos *hits* no fueron computados. La Figura 6.42 muestra tres ejemplos de señales de alta frecuencia con bajas amplitudes y cuyo  $\text{RMS}_{\text{PW}}$  supera los 11 dB. Este tipo de *hits* se consideraron por tanto como no computados debido a que el tiempo de llegada de la señal se producía mucho antes que el primer cruce del umbral de alta frecuencia ( $\text{TH} = 30$  dB).

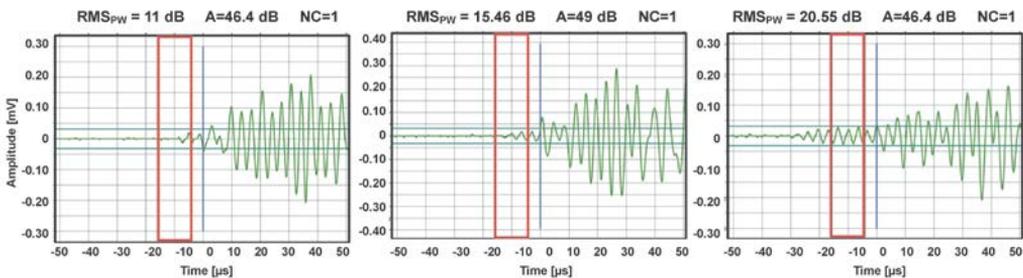


Figura 6.42. Ejemplos de señales no computadas donde el  $\text{RMS}_{\text{PW}} \geq 11$  dB.

Por el contrario se observó que para las señales de alta frecuencia cuyo  $\text{RMS}_{\text{PW}}$  era inferior a 11 dB, el tiempo de llegada de la señal ocurría correctamente en el momento en el que se producía el primer cruce del umbral, pudiéndose captar adecuadamente el modo  $S_0$  (Figura 6.43). Véase que estas

señales no muestran energía significativa dentro de la ventana  $W_P = [-16, -4]$   $\mu\text{s}$ . Estas señales se consideraron válidas para el posterior análisis.

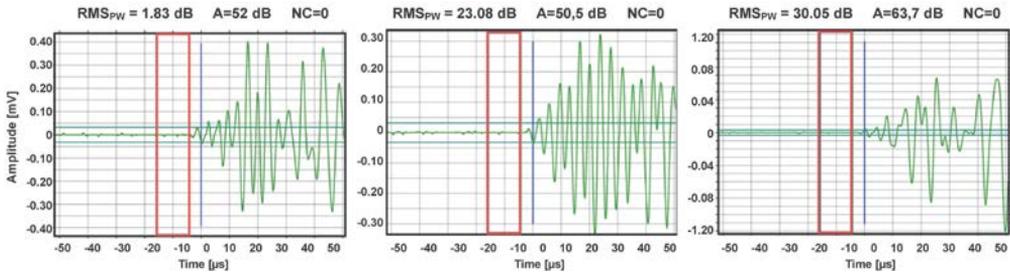


Figura 6.43. Ejemplos de señales computadas donde el  $\text{RMS}_{PW} < 11$  dB.

### 6.5.2. Parte B: Constructor de eventos

Se introdujo un constructor de eventos configurando los 5 canales utilizados en el ensayo de flexión como normales, usando los siguientes valores para los criterios de construcción de los eventos:  $\text{FHCDT} = 10$  ms;  $\text{DT1X-Max} = 1$  ms;  $\text{DTNX-Max} = 1$  ms. De esta forma se observó la existencia de cuatro tipos de eventos:

-**Eventos Tipo H1:** Eventos con un único *hit* correspondiente al canal HF (CH5).

-**Eventos Tipo L1:** Eventos con un único *hit* correspondiente a un canal LF. En este caso, es obvio que dicho canal correspondió al de menor umbral, es decir, el canal CH1. En ellos, el canal de primera llegada (y única en este caso) es el CH1. No es posible tener eventos únicos con el *hit* correspondiente a los canales CH2, CH3 o CH4, ya que al ser sus umbrales mayores que los del CH1 y ser la misma señal, de haber sido registrado por estos canales también debería haberse registrado por el canal CH1.

-**Eventos Tipo HS:** Eventos con más de un *hit* (eventos con *hits* subsiguientes) en los que el canal de primera llegada es el canal HF (canal CH5).

**-Eventos Tipo LS:** Eventos con más de un *hit* (eventos con *hits* subsiguientes) en los que el canal de primera llegada es un canal de LF (obligatoriamente el CH1, por ser el de menor umbral). Este tipo de eventos son pocos, ya que habitualmente la señal en alta frecuencia es más rápida que en baja frecuencia, por lo que llegaría antes al canal CH5. Dentro de este tipo de eventos se pueden distinguir de dos subtipos: i) **Eventos Tipo LS-1:** Eventos en los que entre los *hits* subsiguientes al de primera llegada, existe un *hit* correspondiente al canal de HF (CH5); ii) **Eventos Tipo LS-2:** Eventos en los que entre los *hits* subsiguientes al de primera llegada, no existe un *hit* correspondiente al canal de HF (CH5).

### 6.5.3. Parte C: Definición y elección de las ventanas temporales de alta frecuencia

Tras una exhaustiva visualización de las formas de onda, las ventanas temporales de HF elegidas en el análisis fueron las siguientes:

$$W_{HF1} = [-2, 4] \mu s$$

$$W_{HF2} = [-7, -1] \mu s.$$

Como puede verse,  $W_{HF1}$  es una ventana situada principalmente tras el THC (ventana *posttrigger*), mientras que  $W_{HF2}$  está situada antes del THC (ventana *pretrigger*). Se usaron estas dos ventanas para analizar de manera separada los *hits* cuyo tiempo de llegada (TOA: *Time Of Arrival*) está situado antes de THC o bien está cercano al THC.

Sobre estas dos ventanas se calculó el RMS,  $RMS_{HF1}$  y  $RMS_{HF2}$  respectivamente, y se realizó la diferencia entre ambos valores, es decir:

$$W_{\text{HF1}} \rightarrow \text{RMS}_{\text{HF1}}$$

$$W_{\text{HF2}} \rightarrow \text{RMS}_{\text{HF2}}$$

$$\text{RMS}_{\text{HF1-2}} = \text{RMS}_{\text{HF1}} - \text{RMS}_{\text{HF2}}$$

Comparando los valores de  $\text{RMS}_{\text{HF1}}$  y  $\text{RMS}_{\text{HF2}}$  se implementó una decisión automática en el algoritmo para seleccionar la ventana ( $W_{\text{HF1}}$  o  $W_{\text{HF2}}$ ) que mejor capta el modo  $S_0$  en cada evento sin que las reflexiones influyan de manera significativa.

Si la diferencia de RMS entre las dos ventanas ( $\text{RMS}_{\text{HF1-2}}$ ) es inferior a un cierto umbral  $T_{\text{HF1-2}}$  o el RMS de la ventana  $W_{\text{HF2}}$ ,  $\text{RMS}_{\text{HF2}}$ , es mayor que un cierto umbral  $T_{\text{HF2}}$ , entonces la ventana elegida para el análisis de la señal de HF es la ventana  $W_{\text{HF2}}$ , es decir:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Si } \text{RMS}_{\text{HF1-2}} < T_{\text{HF1-2}} \\ \text{o} \\ \text{RMS}_{\text{HF2}} > T_{\text{HF2}} \end{array} \right| \text{Ventana elegida } W_{\text{HF2}} \rightarrow \text{RMS}_{\text{HF2}}$$

En cambio, si la diferencia de RMS entre las ventanas ( $\text{RMS}_{\text{HF1-2}}$ ) es mayor o igual al umbral  $T_{\text{HF1-2}}$  y el RMS de la ventana  $W_{\text{HF2}}$ ,  $\text{RMS}_{\text{HF2}}$ , es menor o igual que el umbral  $T_{\text{HF2}}$ , entonces la ventana elegida para el análisis de la señal de HF es la  $W_{\text{HF1}}$ , es decir:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Si } \text{RMS}_{\text{HF1-2}} \geq T_{\text{HF1-2}} \\ \text{y} \\ \text{RMS}_{\text{HF2}} \leq T_{\text{HF2}} \end{array} \right| \text{Ventana elegida } W_{\text{HF1}} \rightarrow \text{RMS}_{\text{HF1}}$$

Tras un exhaustivo análisis de las formas de onda de alta frecuencia que pasaron el filtro  $\text{RMS}_{\text{PW}} \geq 11$  dB indicado en el apartado 6.5.1, se eligieron los umbrales  $T_{\text{HF1-2}} = 10$  dB y  $T_{\text{HF2}} = 18$  dB para elegir la ventana HF. Con estos umbrales, se observó que la ventana elegida era la adecuada, en función de que el tiempo de llegada de las señales (TOA) se produzca mucho antes del cruce de umbral (THC), en cuyo caso se debe elegir la ventana pretrigger  $W_{\text{HF2}}$ , o que el

TOA se produzca próximo al THC, en cuyo caso se debe elegir la ventana *posttrigger*  $W_{HF1}$ .

La Figura 6.44 muestra tres ejemplos de señales en las cuales se cumplen las condiciones mostradas anteriormente para la elección de la ventana pretrigger  $W_{HF2}$ . Se observa como de esta manera se puede captar de forma clara el modo  $S_0$  que llega antes del THC.

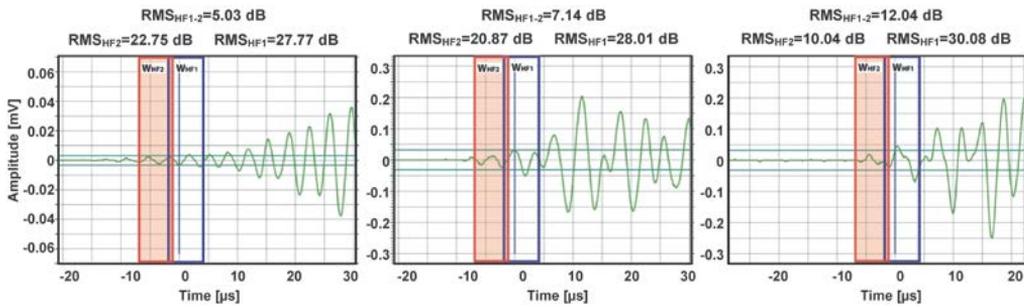


Figura 6.44. Elección de la ventana temporal de alta frecuencia  $W_{HF2}$  en diferentes señales.

Por el contrario, en la Figura 6.45 se puede ver una selección de señales que cumplen las condiciones para la elección de ventana *posttrigger*  $W_{HF1}$ . Se aprecia que la energía de las señales en la ventana  $W_{HF1}$  es mayor que en la ventana  $W_{HF2}$ . Se observa también como la elección de la ventana  $W_{HF1}$  en este tipo de señales es la adecuada para captar el modo  $S_0$ , el cual llega muy cercano al THC.

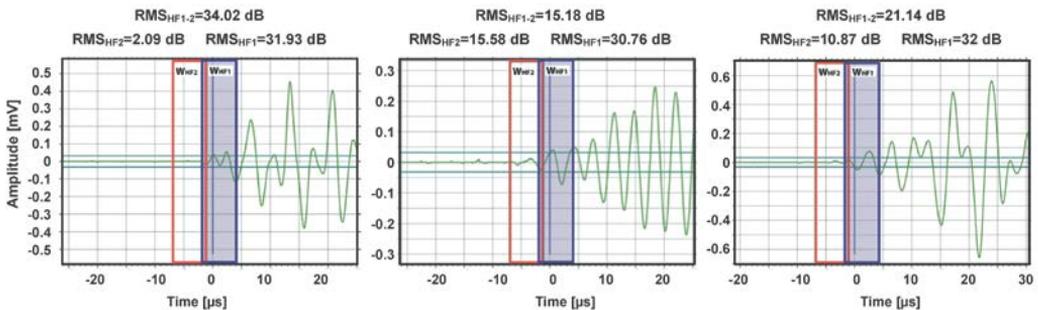


Figura 6.45. Elección de la ventana temporal de alta frecuencia  $W_{HF1}$  en diferentes señales.

#### 6.5.4. Parte D: Elección de la ventana temporal y el canal de baja frecuencia

La elección del canal de baja frecuencia, LF, entre los cuatro canales usados (CH1 a CH4) se realizó en función de las amplitudes de las señales registradas en baja frecuencia. El criterio elegido para la elección de dicho canal fue el resultado de rigurosos análisis visuales de las señales, tratando de observar una correcta captación del inicio del modo  $A_0$ . Finalmente el criterio de amplitudes que se eligió para la elección del canal LF fue el siguiente:

$$\text{Si } A < 45 \text{ dB} \rightarrow \text{CH 1}$$

$$\text{Si } 45 \leq A < 60 \text{ dB} \rightarrow \text{CH 2}$$

$$\text{Si } 60 \leq A < 80 \text{ dB} \rightarrow \text{CH 3}$$

$$\text{Si } 80 \leq A \text{ dB} \rightarrow \text{CH 4.}$$

Debido a que no se consideraron los *hits* con amplitudes inferiores a 45 dB gracias al filtro  $A \geq 45$  dB descrito en el apartado 6.5.1, el CH1 no sería elegido en ninguno de los casos.

Gracias al uso de cuatro umbrales distintos en LF, y al criterio de elección mediante amplitudes, a diferencia de las señales de HF, fue suficiente la utilización de una única ventana temporal para calcular el RMS:

$$W_{LF}=[0, 22] \mu\text{s} \rightarrow \text{RMS}_{LF}.$$

A continuación se muestra un ejemplo de una señal de 58.4 dB de amplitud en LF (Figura 6.46). Se puede observar como con la elección del canal CH2 que corresponde a la amplitud de 58.4 dB según el criterio previamente indicado, se pudo captar correctamente el inicio del modo  $A_0$  dejando pasar el modo  $S_0$  (erróneamente captado por la ventana  $W_{LF}$  en el canal CH1).

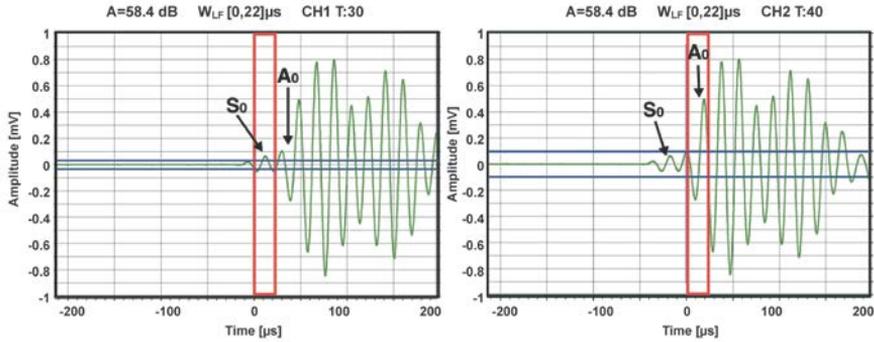


Figura 6.46. Elección de la ventana temporal de baja frecuencia  $W_{LF}$  en una señal de 58.4 dB de amplitud.

La Figura 6.47 muestra otro ejemplo, aunque en esta ocasión se trata de una señal de 76.1 dB de amplitud en LF que fue grabada por los canales CH1, CH2 y CH3 de baja frecuencia. En ella se puede observar como con la elección del canal CH3 que corresponde a la amplitud de 76.1 dB según el criterio indicado, se pudo captar correctamente el inicio del modo  $A_0$ , dejando pasar por completo los restos del modo  $S_0$  (erróneamente captado por la ventana  $W_{LF}$  en los canales CH1 y CH2).

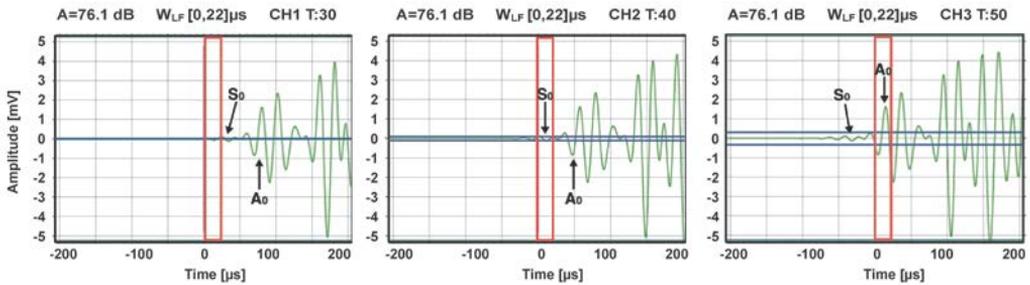


Figura 6.47. Elección de la ventana temporal de baja frecuencia  $W_{LF}$  en una señal de 76.1 dB de amplitud.

### 6.5.5. Parte E: Descripción de decisiones del algoritmo

Una vez que se han establecido los filtros generales utilizados y las ventanas de HF y LF a considerar en el análisis, se describe finalmente el algoritmo de decisión entre mecanismos (**Dela=1**, delaminación; **Dela=2**, rotura de fibra;

**Dela=0**, micro-rotura de la matriz). El algoritmo es diferente según el tipo de evento y se resume en el diagrama de bloques de la Figura 6.48.

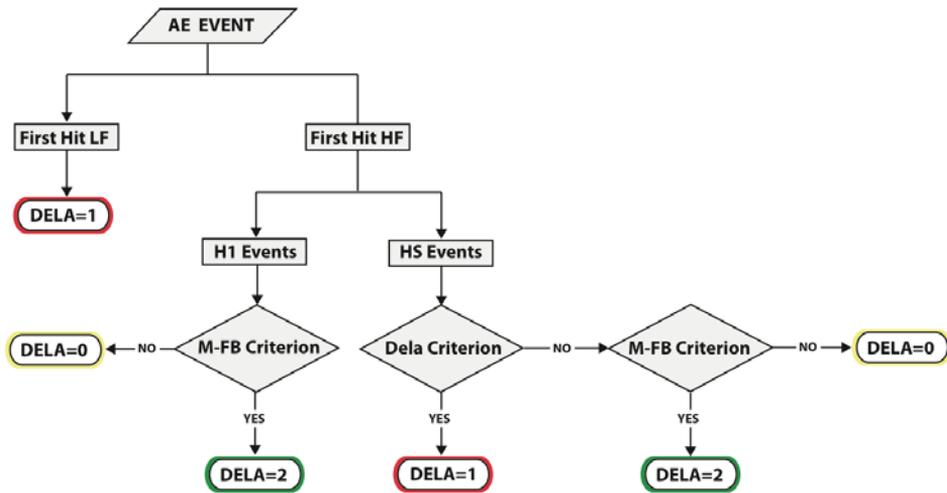


Figura 6.48. Diagrama de bloques del algoritmo de discriminación de mecanismos de daño propuesto.

#### 6.5.5.1. Eventos en los que el primer *hit* corresponde a un canal de baja frecuencia LF (eventos tipo L1 y LS)

Para eventos tipo L1, al no recibirse señal de alta frecuencia, el modo  $A_0$  debe corresponder a microdesplazamientos OP, por lo que se les asigna el mecanismo de delaminación (**Dela=1**).

Para eventos tipo LS, aunque se reciba señal en el canal de HF, debido a que ésta llega más tarde que la señal de LF, indica que el modo  $S_0$  es más débil que el  $A_0$ , y por tanto, deben asociarse igualmente a microdesplazamientos OP, y por tanto, al mecanismo de delaminación (**Dela=1**).

#### 6.5.5.2. Eventos en los que el primer *hit* corresponde al canal HF

Se distinguen en este caso dos tipos de eventos, los eventos tipo H1 y eventos tipo HS, que se resuelven de una manera diferente.

**Eventos únicos (tipo H1).** Debido a que no se recibe señal de baja frecuencia, estos eventos deben asociarse a los microdesplazamientos IP, y por tanto, a los mecanismos de rotura de fibra (**Dela=0**) o micro-roturas de matriz (**Dela=2**).

Para asociar a estos eventos el mecanismo **Dela=0** o el mecanismo **Dela=2**, se propone el siguiente esquema de decisión:

1) En primer lugar, se eligió la ventana temporal de alta frecuencia,  $W_{HF1}$  o  $W_{HF2}$  según lo comentado en el apartado 6.5.3.

2) Se aplicó el siguiente criterio, que denominamos **Criterio M-FB**, para determinar si el evento se asocia a **Dela=0** o **Dela=2**. Para ello, se eligieron tres bandas espectrales  $BW_1$ ,  $BW_2$  y  $BW_3$ :

$$BW_1=[125-250] \text{ kHz}$$

$$BW_2=[250-350] \text{ kHz}$$

$$BW_3=[350-550] \text{ kHz}.$$

Estas bandas se localizan en tres zonas de picos resonantes del sensor VS45-H. La primera de ellas,  $BW_1$ , abarca la zona de más bajas frecuencias de HF coincidente con la tercera resonancia del sensor,  $BW_2$  incluye la cuarta resonancia y  $BW_3$  las resonancias de orden superior.

En estas ventanas frecuenciales se calcularon los valores del RMS espectral (*Spectral Ratio*) correspondientes a la ventana temporal de alta frecuencia ( $W_{HF1}$  o  $W_{HF2}$ ), a las que denominamos como:

$$\text{Ventana temporal } W_{HF1} \left\{ \begin{array}{l} \textit{Spectral Ratio: } SR_{HF1\_BW1} \\ \textit{Spectral Ratio: } SR_{HF1\_BW2} \\ \textit{Spectral Ratio: } SR_{HF1\_BW3} \end{array} \right.$$

$$\text{Ventana temporal } W_{HF2} \left\{ \begin{array}{l} \textit{Spectral Ratio: } SR_{HF2\_BW1} \\ \textit{Spectral Ratio: } SR_{HF2\_BW2} \\ \textit{Spectral Ratio: } SR_{HF2\_BW3} \end{array} \right.$$

A continuación se obtuvo el valor de una variable  $R\_SR_{HF1}$  (en el caso de que la ventana elegida es  $W_{HF1}$ ) o  $R\_SR_{HF2}$  (en el caso de que la ventana elegida es  $W_{HF2}$ ), definida como la diferencia de RMS espectrales entre el rango de alta y baja frecuencia del ancho de banda de HF, es decir,

$$R\_SR_{HF1} = 20 \log \left[ 10^{\frac{SR_{HF1\_BW2}}{20}} + 10^{\frac{SR_{HF1\_BW3}}{20}} \right] - SR_{HF1\_BW1} \quad (6.2)$$

$$R\_SR_{HF2} = 20 \log \left[ 10^{\frac{SR_{HF2\_BW2}}{20}} + 10^{\frac{SR_{HF2\_BW3}}{20}} \right] - SR_{HF2\_BW1} \quad (6.3)$$

Por la experiencia y documentación sobre materiales compuestos reforzados con fibra y por los resultados del ensayo de rotura de fibras realizado en este proyecto, es bien conocido que las roturas de fibra producen señales de EA con frecuencias mayores a 250-500 kHz, mientras que las micro-roturas de matriz están asociadas a frecuencias inferiores a este rango. Por esta razón, y teniendo en cuenta la definición de  $R\_SR_{HF}$ , el **Criterio M-FB** de decisión propuesto es el siguiente:

$$\begin{array}{l} \text{Si la ventana elegida es } W_{HF1} \\ \text{Si la ventana elegida es } W_{HF2} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{Si } R\_SR_{HF1} \geq T_{R\_SRHF1} \rightarrow \text{Dela}=2 \\ \text{En cualquier otro caso } \rightarrow \text{Dela}=0 \\ \text{Si } R\_SR_{HF2} \geq T_{R\_SRHF2} \rightarrow \text{Dela}=2 \\ \text{En cualquier otro caso } \rightarrow \text{Dela}=0 \end{array} \right.$$

siendo  $T_{R\_SRHF1}$  y  $T_{R\_SRHF2}$  dos umbrales cuyo valor se discutirá en el Capítulo 7.

**Eventos con *hits* subsiguientes de baja frecuencia (tipo HS).** Estos eventos pueden estar asociados a los microdesplazamientos OP o a los microdesplazamientos IP. Para decidir asociarlos a un tipo o a otro, se propone

usar el siguiente criterio, al que hemos denominado **Criterio Dela**, basado en el cálculo de la diferencia de RMS de las señales de LF y HF, es decir,

$$\text{Si la ventana elegida es } W_{HF1} \rightarrow R_{LF-HF} = \text{RMS}_{LF} - \text{RMS}_{HF1}$$

$$\text{Si la ventana elegida es } W_{HF2} \rightarrow R_{LF-HF} = \text{RMS}_{LF} - \text{RMS}_{HF2}$$

De esta forma, si el valor obtenido  $R_{LF-HF}$  es mayor que un cierto umbral (CD), lo que indica que  $\text{RMS}_{LF}$  es mayor que  $\text{RMS}_{HF}$ , el evento se asocia con un microdesplazamiento OP, y por tanto, con el mecanismo **Dela=1**.

En cambio, si  $R_{LF-HF}$  es menor que CD, lo que indica que  $\text{RMS}_{HF} > \text{RMS}_{LF}$ , el evento se asocia con un microdesplazamiento IP, y por tanto, con los mecanismos **Dela=0** o **Dela=2**. En este caso, para la decisión final entre ambos mecanismos, se aplica el **criterio M-FD** descrito anteriormente. Es decir,

$$\text{Si } R_{LF-HF} \geq \text{CD} \rightarrow \text{Dela}=1$$

$$\text{Si } R_{LF-HF} < \text{CD} \rightarrow \text{Dela}=0 \text{ o } \text{Dela}=2 \rightarrow \text{Criterio M-FB.}$$

El valor del umbral CD finalmente utilizado se discute en el Capítulo 7, en base a los resultados obtenidos. Nótese que la variable  $R_{LF-HF}$  es idéntica a la variable Rd definida en el apartado 6.4 y que en aquella ocasión, para roturas de mina en canto y superficie, el valor del umbral usado para su discriminación fue  $\text{CD}=10$ . No obstante, las fuentes H-N no son fuentes de mecanismos reales por lo que cabe esperar que el valor  $\text{CD}=10$ , no sea totalmente adecuado en situaciones reales.

## 7.

# RESULTADOS DEL ALGORITMO PROPUESTO PARA LA DISCRIMINACIÓN DE MECANISMOS DE DAÑO EN CFRP

Se muestran en este capítulo los resultados de aplicación del algoritmo de discriminación de mecanismos de daño en CFRP. Los resultados se discuten en función de valores de las variables seleccionadas, a la vez que se cotejan con las observaciones de fractura sufrida por el material en cada uno de los casos.

### 7.1. Resultados de mecanismos de daño individuales

En este apartado se muestran los resultados de los ensayos de mecanismos de daño individuales explicados en el apartado 6.4.4.

#### 7.1.1. Ensayo de delaminación pura

En la Figura 7.1 se muestran las gráficas del número de eventos acumulados a lo largo del ensayo, agrupados en cada uno de los tres mecanismos de daño (delaminación, micro-rotura de matriz y rotura de fibra) usando distintos valores del umbral CD para el Criterio Dela con objeto de decidir la clasificación de eventos del tipo HS (eventos con primera llegada al sensor de alta frecuencia y los *hits* subsiguientes de baja frecuencia). Véase que existen muy pocas

diferencias entre las gráficas, indicando que valores de CD entre 0 y 10 dB, son aceptables sin modificar sustancialmente el resultado. Lógicamente, al aumentar el valor de CD, aumenta el número de micro-roturas de matriz y roturas de fibra, a costa de disminuir el número de delaminaciones. Los parámetros  $T_{R\_SRHF1}$  y  $T_{R\_SRHF2}$  utilizados en el Criterio M-FB para distinguir entre Dela=2 y Dela=0 se han establecido en 6 dB en este caso.

Para justificar este comportamiento, en la Figura 7.2 se muestra el valor de la variable  $R_{LF-HF}$  (diferencia de RMS de las señales de baja y alta frecuencia) para los eventos tipo HS. En ella se observa como los eventos para los que  $R_{LF-HF}$  es menor de 10 dB no constituyen más del 5% del total, justificando que valores de CD inferiores a 10 dB no alteran significativamente el resultado.

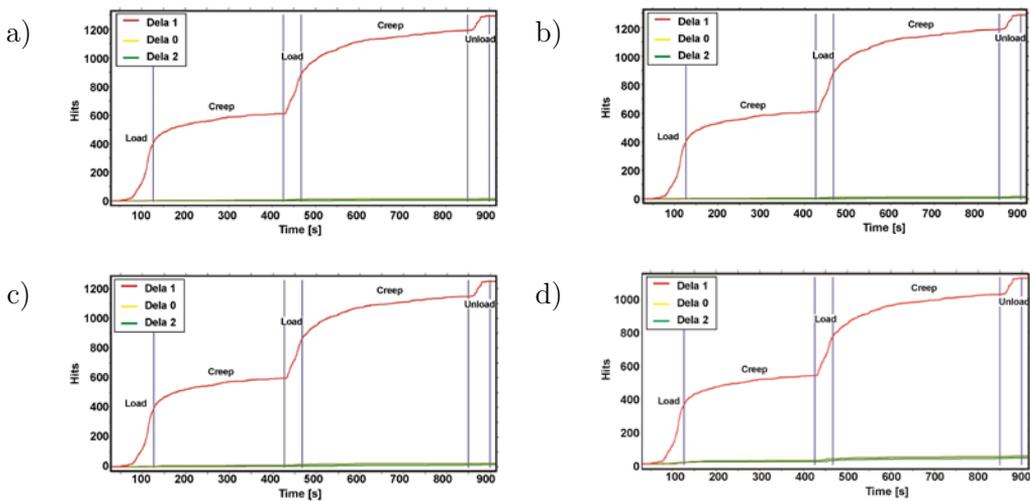


Figura 7.1. Clasificación de eventos en el ensayo de delaminación pura. a) CD=0 dB; b) CD= 5 dB; c) CD=10 dB; d) CD=15 dB.  $T_{R\_SRHF1}$ = 6 dB y  $T_{R\_SRHF2}$ = 6 dB.

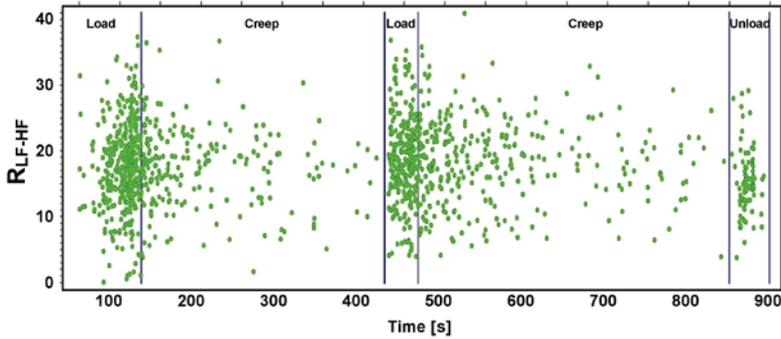


Figura 7.2.  $R_{LF-HF}$  para los eventos tipo HS del ensayo de delaminación pura.

Estos resultados verifican claramente como en este ensayo de delaminación pura el algoritmo propuesto clasifica correctamente prácticamente todos los eventos de EA como delaminaciones, existiendo muy pocos de ellos clasificados como micro-roturas de matriz y roturas de fibra, lo cual es lógico dada la naturaleza del ensayo.

Igualmente se comprobó que la elección de la ventana  $W_{HF1}$  o  $W_{HF2}$ , y la elección del límite admitido para la preventana para las señales de alta frecuencia (límite admitido de  $RMS_{PW}$ ), no son críticos, lo cual avala la estabilidad del algoritmo en este caso. A modo de ejemplo, la Figura 7.3 muestra los eventos acumulados para cada mecanismo, para diferentes valores del límite de  $RMS_{PW}$ , con los parámetros  $CD=0$ ,  $T_{R\_SRHF1}=6$  dB y  $T_{R\_SRHF2}=6$  dB. Se observa claramente que los resultados no varían sustancialmente.

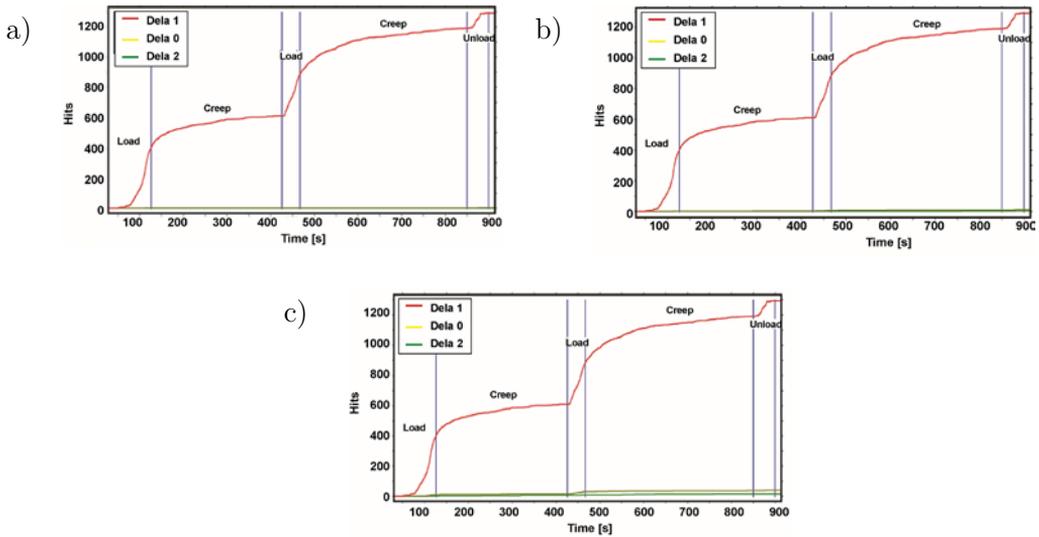


Figura 7.3. Clasificación de eventos en el ensayo de delaminación pura.  $CD=0$ .  $T_{R\_SRHF1}=6$  dB y  $T_{R\_SRHF2}=6$  dB. *Hits* no computados si: a)  $RMS_{PW} \geq 0$  dB; b)  $RMS_{PW} \geq 10$  dB; c)  $RMS_{PW} \geq 20$  dB.

### 7.1.2. Ensayo de rotura de fibra

La validación del algoritmo fue claramente confirmada por el ensayo de rotura de fibra, en el que el 100% de los eventos fue clasificado con  $Dela=2$  como puede verse en la Figura 7.4. En esta clasificación se usó  $T_{R\_SRHF1}=6$  dB y  $T_{R\_SRHF2}=6$  dB. En este caso, la variable  $R_{SRHF}$  mostrada en la Figura 7.5 (usada para discernir entre  $Dela=0$  y  $Dela=2$ ) fue consistentemente mayor que 11 dB, demostrando que la mayoría de la energía emitida por este mecanismo se encuentra en la banda de frecuencia  $BW2-BW3=[250-550]$  kHz. Por lo tanto, la elección de valores de  $T_{R\_SRHF1}$  por debajo de los 11 dB, no debe producir cambios significativos en los resultados.

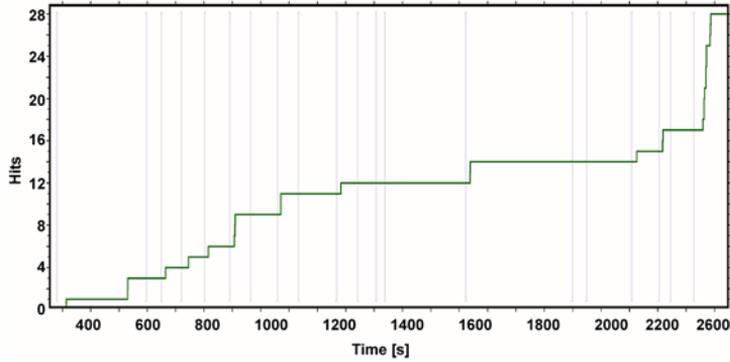


Figura 7.4. Clasificación de eventos en el ensayo de roturas de fibra.  $CD=0$ .  
 $T_{R\_SRHF1}= 6$  dB y  $T_{R\_SRHF2}= 6$  dB.

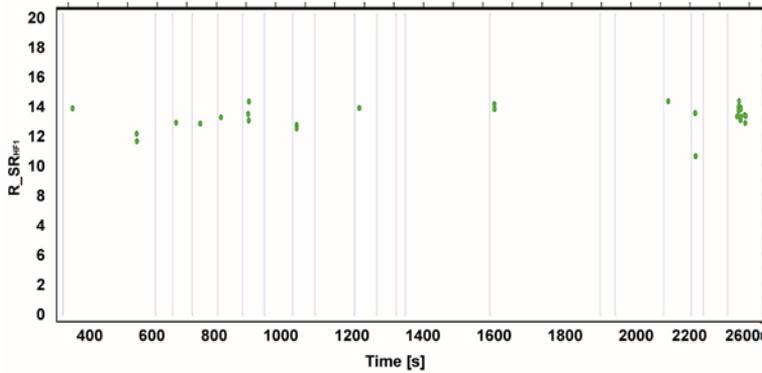


Figura 7.5.  $R_{SRHF1}$  para los eventos de las roturas de fibra.

### 7.1.3. Ensayo de micro-rotura de matriz

Para el ensayo de micro-rotura de matriz la mayoría de los eventos fueron clasificados como  $Dela=0$  (Figura 7.6) significando que la mayoría de la energía emitida por este mecanismo permanece en la banda de frecuencia  $BW1=[125-250]$  kHz. En este caso, la variable  $R_{SRHF}$  presentó valores siempre menores de 9 dB.

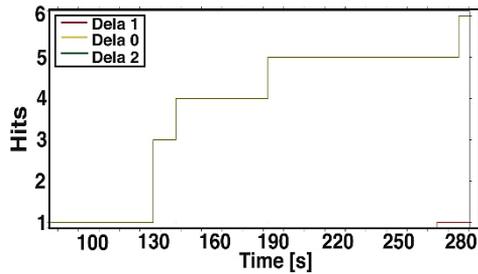


Figura 7.6. Clasificación de eventos en el ensayo de micro-rotura de matriz.

#### 7.1.4. Ajustes del algoritmo

Estos ensayos de control permiten determinar el valor del umbral  $T_{SR}$  necesario para el Criterio M-FB. Teniendo en cuenta que  $T_{R\_SRHF}$  fue siempre mayor a 11 dB en el ensayo de rotura de fibra y menor a 9 dB en el ensayo de micro-rotura de matriz, para la correcta clasificación de eventos en ambos casos se estableció un valor de  $T_{R\_SR}=9$  dB para las ventanas  $W_{HF1}$  y  $W_{HF2}$ .

## 7.2. Ensayos a flexión a tres puntos

### 7.2.1. Descripción de la probeta

Para la realización de los ensayos a flexión se usaron cuatro probetas (9\_3, 9\_4, 9\_D y 3\_D), dos de ellas delaminadas, descritas en el Capítulo 2.

En la Figura 7.7-a y b se muestran las probetas 9\_3 y 9\_4, sin delaminación, con anotaciones marcadas para la ubicación de los sensores de EA. Las Figuras 7.7-c y d muestran las probetas 9\_D y 3\_D con delaminaciones de  $25 \times 25 \text{ mm}^2$  y  $40 \times 50 \text{ mm}^2$ , respectivamente. La delaminación no es perceptible a simple vista, simplemente se ha remarcado en color claro y marco discontinuo.

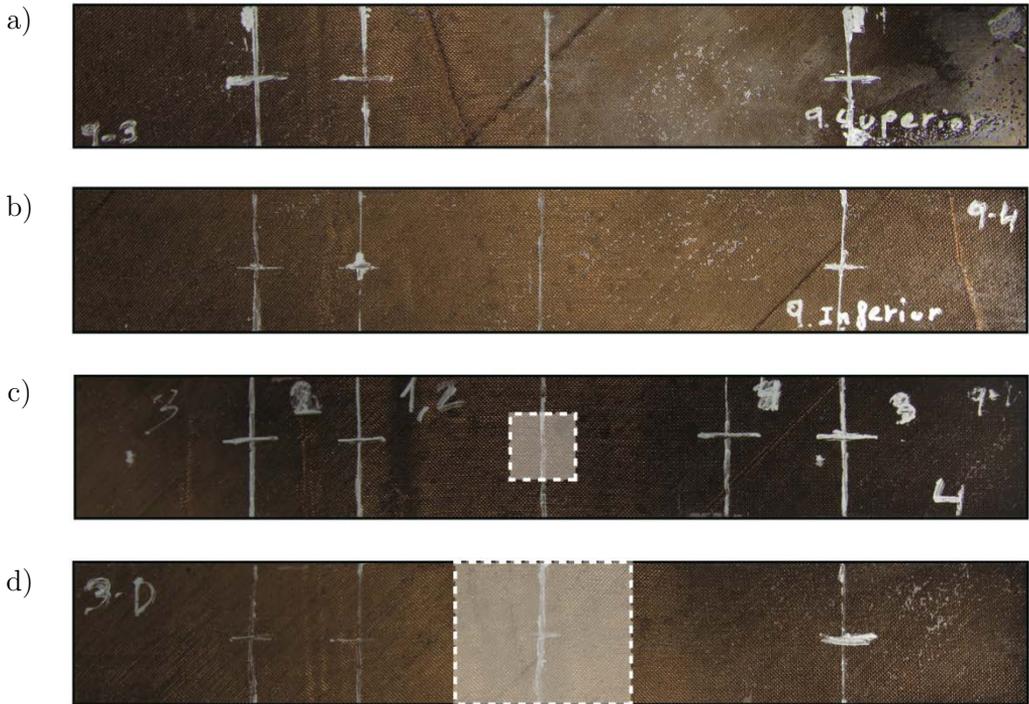


Figura 7.7. a) Probeta 9\_3 sin delaminación; b) Probeta 9\_4 sin delaminación; c) Probeta 9\_D con delaminación de 25 x 25 mm<sup>2</sup>; d) Probeta 3\_D con delaminación de 40 x 50 mm<sup>2</sup>.

### 7.2.2. Descripción del ensayo y configuración de EA

El esquema experimental del ensayo, la disposición de los sensores en la probeta, los puntos de apoyo y el punto de aplicación de la carga en el centro de la probeta se pueden ver en la Figura 7.8. Este tipo de ensayos son típicos para llevar a cabo la medición del comportamiento esfuerzo-deformación y la resistencia a flexión de los materiales.

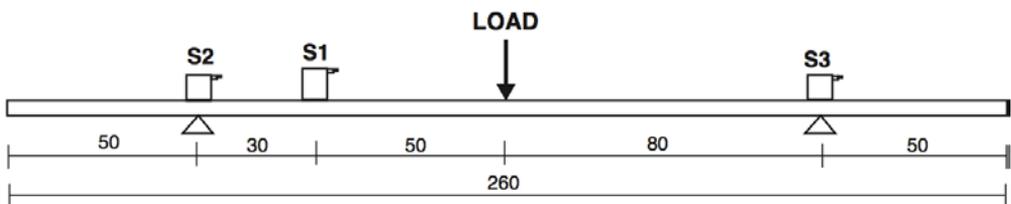


Figura 7.8. Esquema del ensayo a flexión a tres puntos. Distancias en mm.

Los experimentos se llevaron a cabo con una máquina universal de ensayos IBERTEST manteniendo una velocidad de desplazamiento constante de 0.5 mm/min (Figura 7.9).

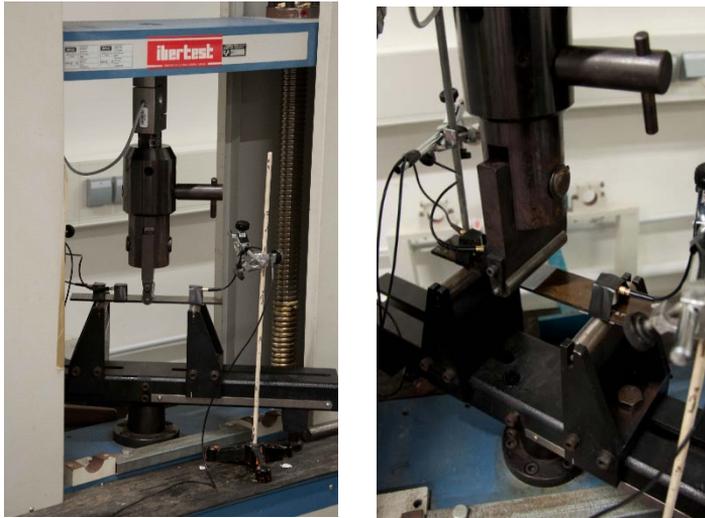


Figura 7.9. Probetas sobre la máquina de ensayos.

Para estos ensayos a flexión se usaron tres sensores multiresonantes VS45-H; el sensor S1 actúa como sensor normal y los sensores S2 y S3 como sensores guardas. Los sensores S2 y S3 se colocaron por prevención, pues aunque se colocó teflón en los apoyos, no se sabía si existiría ruido en dichos puntos. Tras la realización de los ensayos se comprobó que este ruido no existió, y que los sensores guarda no eran necesarios, razón por la cual no se consideraron en el análisis.

Para la medición de las señales de EA durante el ensayo se usó el equipo de emisión acústica AMSY-5 de *Vallen Systeme*. Las señales, después de ser amplificadas 34 dB, fueron grabadas por diez canales al mismo tiempo, usando diferentes configuraciones de filtros en cada canal, siguiendo un esquema de adquisición como el que se muestra en la Tabla 7.1 y Figura 7.10.

Igualmente, los canales CH5 y CH6 se introdujeron para probar otra banda de altas frecuencias, que posteriormente resultó ser inadecuada. El canal CH8

tampoco mejoró los resultados así que no fue considerado en el análisis. Es decir, en alta frecuencia solo se usó el CH7 con la misma configuración usada en los ensayos de mecanismos de daño individuales.

| Sensor | Canal | Tipo          | Filtro (kHz) | Umbral (dB) | Filtro <i>notch</i> (kHz) |
|--------|-------|---------------|--------------|-------------|---------------------------|
| 1 (N)  | 1     | AEP 34dB      | [20-55]      | 30          | 110/110/110/110           |
|        | 2     | AC Input 100k | [20-55]      | 40          | 110/110/110/110           |
|        | 3     | AC Input 100k | [20-55]      | 50          | 110/110/110/110           |
|        | 4     | AC Input 100k | [20-55]      | 60          | 110/110/110/110           |
|        | 5     | AC Input 100k | [125-400]    | 30          | 63/63/63/63               |
|        | 6     | AC Input 100k | [125-400]    | 40          | 63/63/63/63               |
|        | 7     | AC Input 100k | [125-660]    | 30          | 63/63/63/63               |
|        | 8     | AC Input 100k | [125-660]    | 40          | 63/63/63/63               |
| 2 (G)  | 9     | AEP 34dB      | [25-850]     | 30          | ---                       |
| 3 (G)  | 10    | AEP 34dB      | [25-850]     | 30          | ---                       |

Tabla 7.1. Configuración de canales, filtros y umbrales usados en el ensayo a flexión a tres puntos.

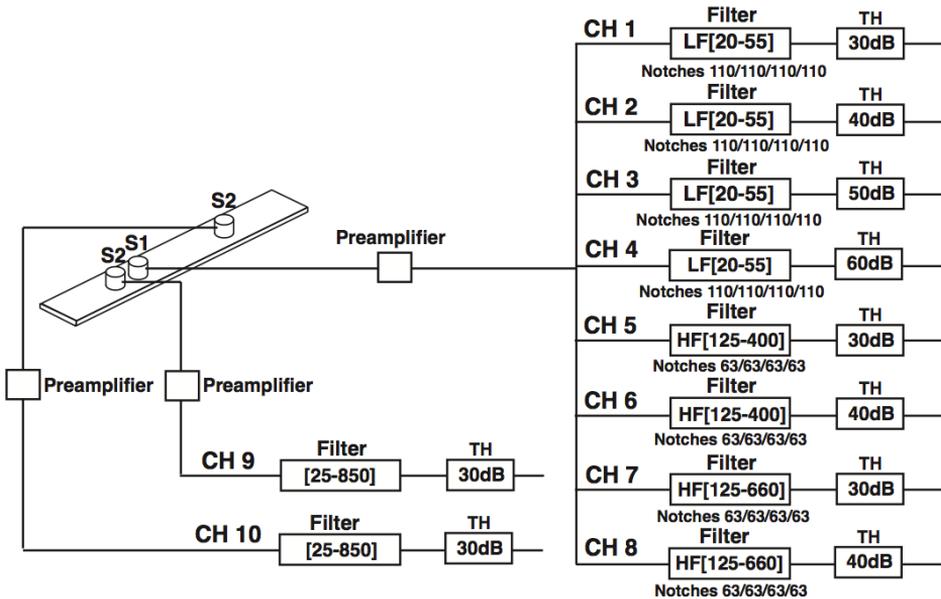


Figura 7.10. Esquema de configuración de canales, filtros y umbrales usados en el ensayo a flexión a tres puntos.

Las señales fueron registradas con una frecuencia de muestreo de 10 MHz usando una longitud de grabación de 8192 datos con 4000 muestras de *pretrigger* (40  $\mu$ s).

Antes de cada medición se realizaron comprobaciones del correcto funcionamiento del equipo de adquisición y la existencia de un buen acoplamiento acústico por la grasa de silicona que se usó como acoplante entre el sensor y la probeta. Dichas comprobaciones se realizaron mediante una fuente H-N.

Tras las comprobaciones, se procedió a la realización del ensayo. La primera probeta ensayada fue la 9\_3 (sin delaminación). La Figura 7.11 muestra una imagen de la misma durante el transcurso del ensayo a flexión.

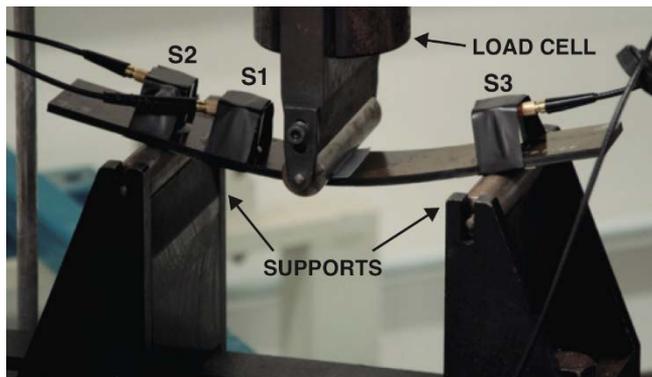


Figura 7.11. Ensayo a flexión sobre la probeta 9\_3

### 7.2.3. Resultados mecánicos

Los resultados mecánicos referentes a la carga de rotura, desplazamiento máximo y duración del ensayo para las cuatro probetas ensayadas se muestran en la Tabla 7.2. La Figura 7.12 muestra la carga en función del tiempo registrada en los ensayos de las probetas sin predelaminar (probetas 9\_3 y 9\_4). La Figura 7.13 muestra las mismas gráficas para las probetas con predelaminación inducida (probetas 9\_D y 3\_D). Se puede observar que la presencia de la delaminación en todo el ancho de la probeta (probeta 3\_D) hizo que la rotura se produjera a una carga más baja.

| Probeta | Carga de rotura (kg) | Desplazamiento máximo (mm) | Duración (s) |
|---------|----------------------|----------------------------|--------------|
| 9_3     | 237.70               | 20.39                      | 2337         |
| 9_4     | 260.24               | 22.74                      | 2729         |
| 9_D     | 233.50               | 21.32                      | 2559         |
| 3_D     | 192.35               | 16.90                      | 2028         |

Tabla 7.2. Resultados mecánicos de los ensayos a flexión para las probetas ensayadas: carga de rotura, desplazamiento máximo y duración del ensayo.

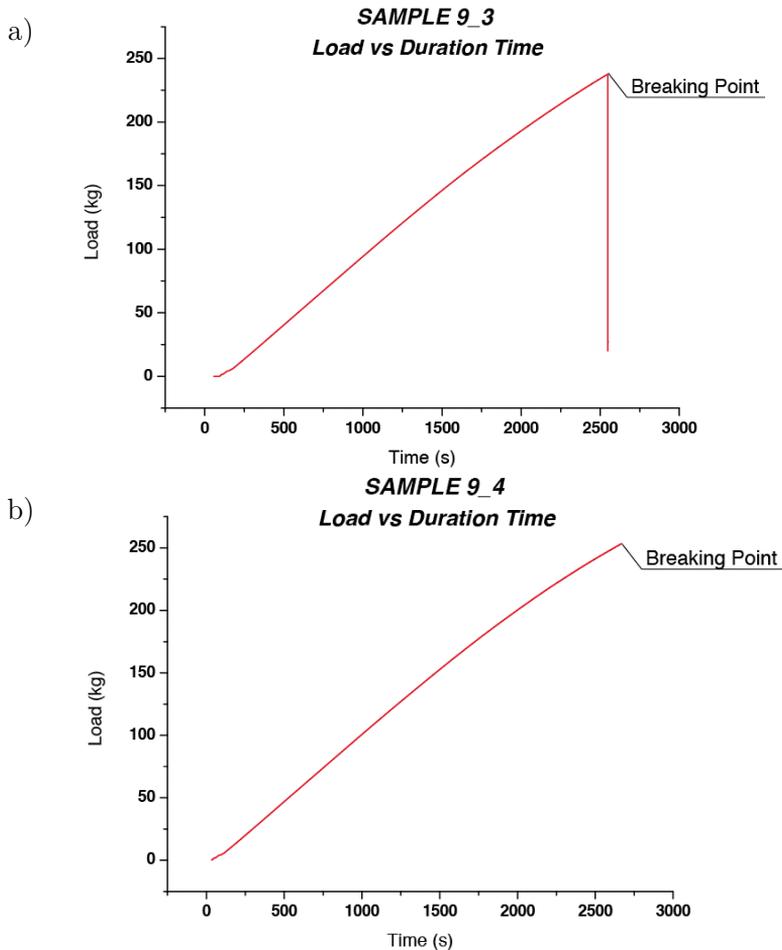


Figura 7.12. Variación de la carga en función del tiempo obtenida en el ensayo a flexión para probetas sin predelaminación. a) Probeta 9\_3; b) Probeta 9\_4.

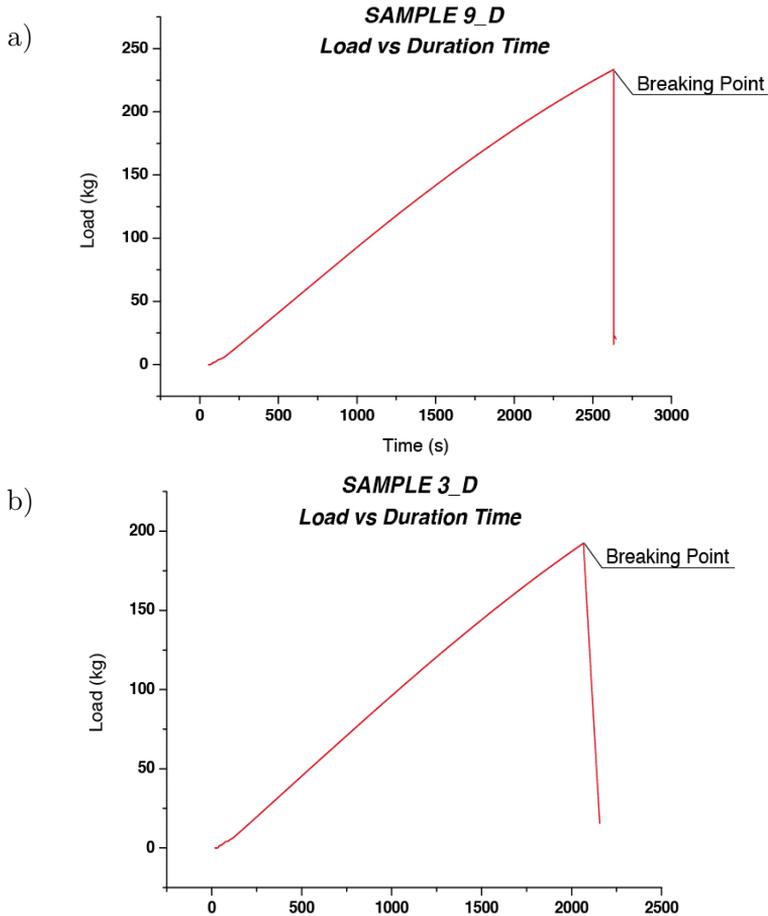


Figura 7.13. Variación de la carga en función del tiempo obtenida en el ensayo a flexión para probetas predelaminadas. a) Probeta 9\_D; b) Probeta 3\_D.

## 7.2.4. Resultados y discusión

### 7.2.4.1. Probeta 3\_D

La Figura 7.14 muestra las gráficas de eventos acumulados a lo largo del ensayo a flexión de la probeta 3\_D en función del tanto por ciento de carga de rotura, agrupados en cada uno de los tres mecanismos de daño, para tres valores diferentes del umbral CD (0, 5 y 10 dB). Se observa que entre ellas no existen cambios sustanciales cualitativamente, lo cual concuerda con los resultados obtenidos para el ensayo de delaminación pura (valores de CD entre 0 y 10 dB,

no cambian sustancialmente los resultados). Como es lógico, al aumentar el umbral CD, aumentan los eventos asociados a micro-roturas de la matriz, a costa de una disminución de los eventos asociados a delaminaciones. No obstante, entre los umbrales  $CD=0$  y  $CD=10$  dB cuantitativamente estos cambios no son mayores del 5%.

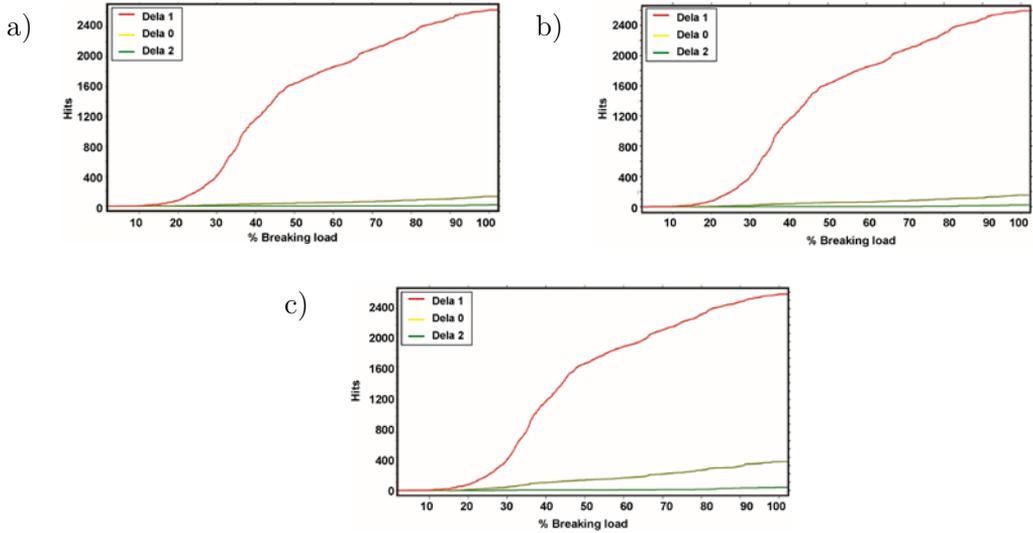
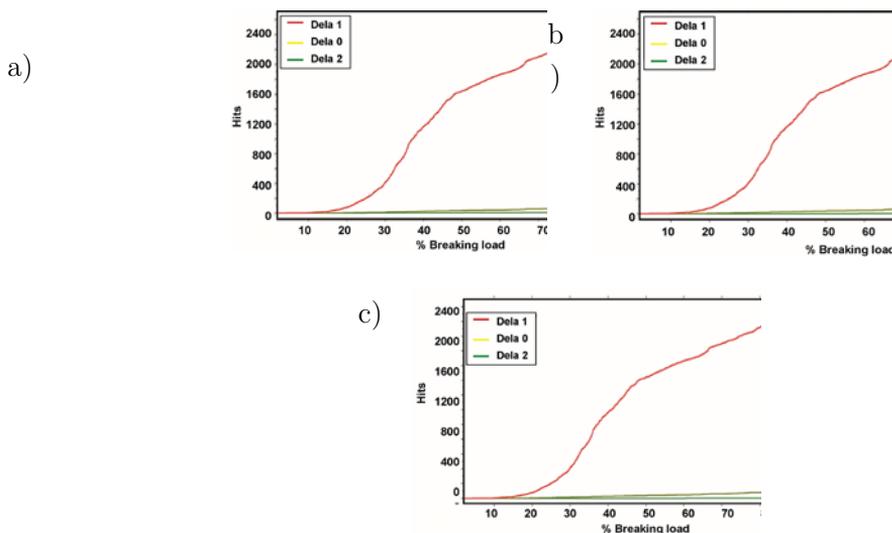


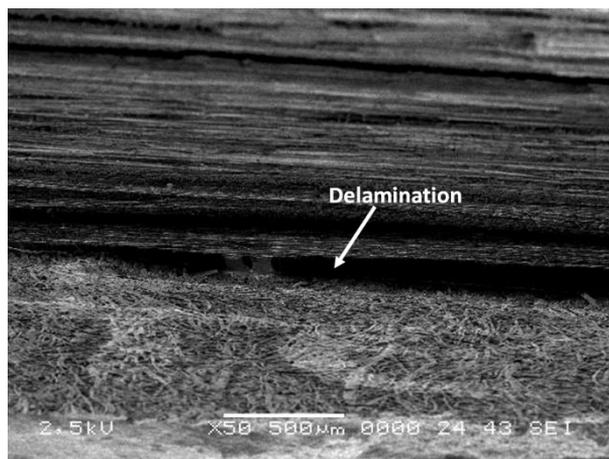
Figura 7.14. Eventos acumulados en el ensayo a flexión de la probeta 3\_D clasificados en los tres mecanismos de daño. a)  $CD=0$  dB; b)  $CD=5$  dB; c)  $CD=10$  dB.  $T_{R\_SRHF1}=6$  dB y  $T_{R\_SRHF2}=6$  dB.

La Figura 7.15 muestra el número de eventos acumulados en este ensayo para tres valores de  $T_{R\_SRHF1}$  y  $T_{R\_SRHF2}$ , 3 dB, 6 dB y 9 dB. Este último valor ha sido seleccionado en el algoritmo de discriminación. Se confirma la poca variación cualitativa y cuantitativa de los resultados.



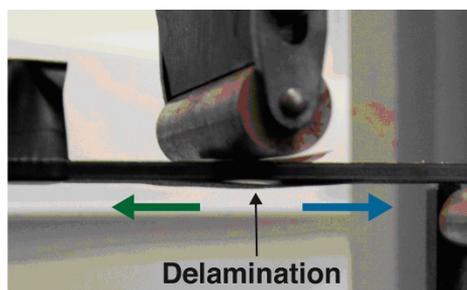
**Figura 7.15.** Eventos acumulados en el ensayo a flexión de la probeta 3\_D clasificados en los tres mecanismos de daño. CD=0 dB. a)  $T_{R\_SRHF1} = 3$  dB y  $T_{R\_SRHF2} = 3$  dB; b)  $T_{R\_SRHF1} = 6$  dB y  $T_{R\_SRHF2} = 6$  dB; c)  $T_{R\_SRHF1} = 9$  dB y  $T_{R\_SRHF2} = 9$  dB.

Respecto a la actividad de emisión acústica registrada, los eventos comenzaron en el 10% de la carga de rotura, produciéndose un aumento del número de eventos, lo que indicaría un mecanismo de delaminación continuado hasta un cierto valor de la carga, y que lógicamente se debe al avance de la delaminación ya existente. A partir del 50% de la carga de rotura, se reduce la pendiente de los eventos acumulados, la delaminación parece progresar más lentamente. Es evidente que esta probeta rompió exclusivamente por la delaminación puesto que la predelaminación ocupaba todo el ancho de la probeta. En consecuencia, más del 90% de los eventos fueron clasificados como delaminación. Además, no se produjo rotura de la misma en dos partes, lo que justifica la baja aparición de eventos asociados a micro-rotura de matriz y rotura de fibra. A modo de ejemplo la Figura 7.16 muestra una imagen microscópica de una delaminación generada durante el ensayo a flexión.



**Figura 7.16.** Imagen de microscopía SEM realizada tras el ensayo a flexión en la que se muestra una delaminación.

Comparando con el proceso de rotura observado en esta probeta (véase las Figura 7.17 en la que se aprecia visualmente la delaminación), parece lógico el resultado obtenido. Como se observa en dicha figura, debido a que la delaminación inicial se extendía hasta todo el ancho de la probeta, el mecanismo prevalente debe ser casi exclusivamente la extensión de la delaminación longitudinal ya existente, hacia ambos lados de la probeta, con poca aparición de micro-roturas de matriz y roturas de fibra.



**Figura 7.17.** Fotografía del daño producido en la probeta 3\_D.

La Figura 7.18 muestra un interesante resultado. La representación de los eventos clasificados como delaminaciones en función del RMS de la señal de baja frecuencia ( $RMS_{LF}$ ) presenta dos claras distribuciones centradas en torno a 41 y 52 dB, las cuales podrían indicar la existencia de dos delaminaciones, con

amplitudes diferentes. Debido a que el sensor se colocó en un solo lado de la probeta, parece razonable pensar que la distribución de los 52 dB correspondería con el avance de la delaminación situada más cerca del sensor (hacia el sensor), mientras que la distribución de los 41 dB correspondería con el avance de la delaminación situada en el lado contrario al que se colocó el sensor (propagación en sentido contrario al sensor). Esta última delaminación generaría eventos más lejanos al sensor, con lo que el modo A0 llegaría más atenuado debido a la mayor distancia, generando señales de menor RMS.

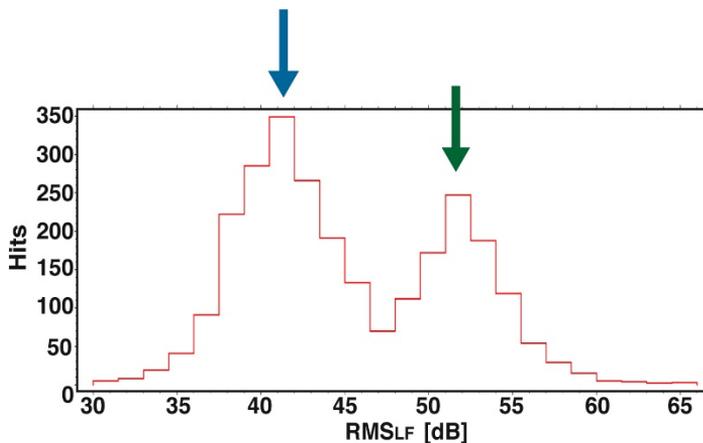


Figura 7.18. Distribución de los eventos de delaminación en el ensayo a flexión de la probeta 3\_D, en función de RMS<sub>LF</sub>. CD=0 dB. T<sub>R\_SRF1</sub>= 6 dB y T<sub>R\_SRF2</sub>= 6 dB.

#### 7.2.4.2. Probeta 9\_D

La Figura 7.19 muestra las gráficas de eventos acumulados a lo largo del ensayo a flexión de la probeta 9\_D en función del tanto por ciento de carga de rotura, para tres valores diferentes del umbral CD (0, 5 y 10 dB). Igualmente se observa que entre ellas no existen cambios sustanciales cualitativamente.

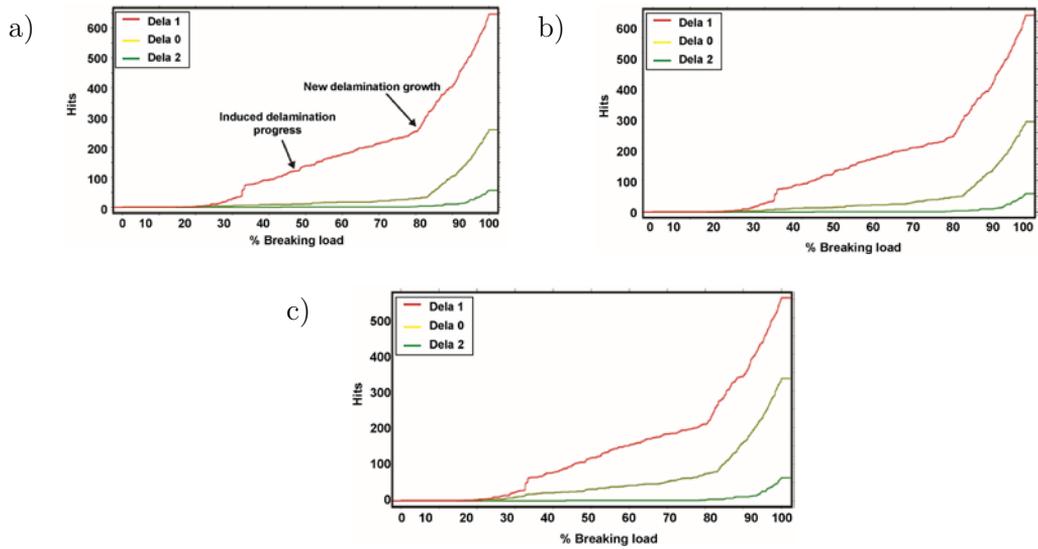


Figura 7.19. Eventos acumulados en el ensayo a flexión de la probeta 9\_D clasificados en los tres mecanismos de daño. a) CD=0 dB; b) CD= 5 dB; c) CD=10 dB.  $T_{R\_SRHF1}= 6$  dB y  $T_{R\_SRHF2}= 6$  dB.

La actividad de emisión acústica comienza en torno al 20% de la carga de rotura (recuérdese que para la probeta 3\_D esto ocurre antes, en el 10% de la carga de rotura). Desde el inicio de la actividad hay un aumento constante de los eventos asociados a delaminación hasta el 32% de la carga de rotura. La Figura 7.20 muestra la zona del escalón ampliada. Realmente se observan dos escalones, los cuales podrían atribuirse a los dos avances laterales de la delaminación ya existente, uno hacia cada lado. No se observa ningún escalón en los otros mecanismos de daño, lo cual es una garantía de que el algoritmo discrimina adecuadamente entre mecanismos de daño, y por otro lado, es lógico puesto que ese escalón se debe al avance de una delaminación ya existente y no a la generación de ninguna nueva delaminación.

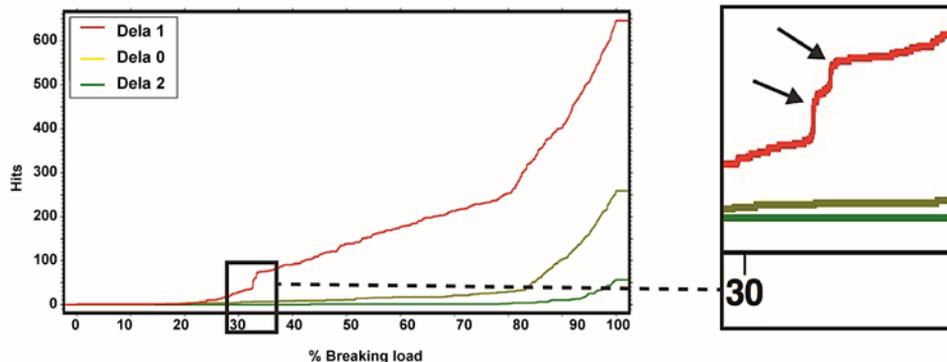


Figura 7.20. Detalle de los eventos acumulados en el ensayo a flexión de la probeta 9\_D. CD=0 dB.  $T_{R\_SRHF1}= 6$  dB y  $T_{R\_SRHF2}= 6$  dB.

Alcanzado un valor aproximado del 80% de la carga de rotura se produce un aumento muy significativo de los eventos asociados a la delaminación, que se mantiene hasta el final del ensayo. Por su parte, el número de eventos asociados a micro-roturas de matriz comienza a crecer de manera significativa ligeramente más tarde, a partir del 84% de la carga de rotura, lo cual parece coherente. Por su parte, los eventos asociados a rotura de fibras, aunque aumentan paulatinamente desde el 80%, el aumento significativo se produce desde 93% de la carga de rotura, casi al final de la rotura catastrófica de la probeta. Su aumento sin embargo es ligeramente más lento que el de las delaminaciones y las micro-roturas de matriz.

Este comportamiento de la probeta a partir del 80% sugiere de manera lógica la aparición de una segunda delaminación, independiente a la delaminación inducida por teflón, y que lógicamente conlleva un aumento significativo de los eventos asociados a los tres mecanismos. Este hecho quedó totalmente corroborado en las observaciones del proceso de fractura de la probeta, que se pueden ver en la Figura 7.21, tras la realización del ensayo. En ellas se observa cómo, además del avance de la delaminación inducida, se generó otra segunda delaminación, hecho que no ocurrió en la probeta 3\_D. Igualmente, se observa, que a diferencia de la probeta 3\_D, la probeta 9\_D rompe catastróficamente, existiendo importantes roturas de fibra y micro-roturas

de matriz, resultado que concuerda con la clasificación de los eventos de EA en los tres mecanismos. La Figura 7.22 muestra una imagen C-SCAN de ultrasonidos de la parte central de la probeta 9\_D tras el ensayo donde se muestra claramente en color blanco la extensión del área delaminada durante el ensayo, ampliamente mayor que la predelaminación inducida artificialmente por la capa de teflón.

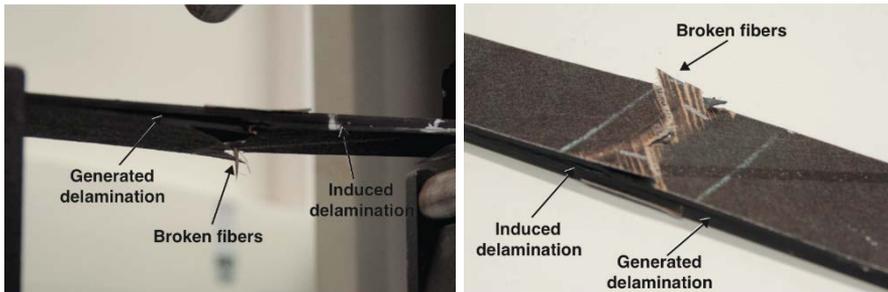


Figura 7.21. Fotografías de los daños producidos en la probeta 9\_D.

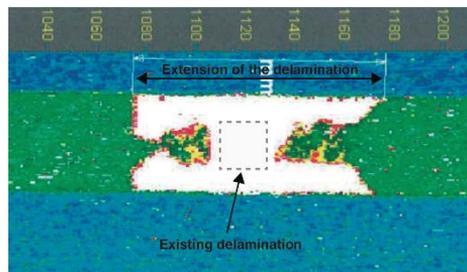


Figura 7.22. C-SCAN de ultrasonidos de la delaminación en la probeta 9\_D.

Finalmente, la Figura 7.23 muestra la distribución de los eventos clasificados como delaminaciones en función de  $RMS_{LF}$ . Igualmente se observan dos distribuciones centradas aproximadamente en torno a los 41 y 52 dB, que al igual que en la probeta 3\_D corresponderían a los dos sentidos de avance de la delaminación (en sentido contrario al sensor y hacia el lado del sensor, respectivamente). Sin embargo, a diferencia de la probeta 3\_D, estas distribuciones pierden gaussianidad, debido probablemente al acoplamiento entre el avance de la delaminación inducida y la delaminación generada al 80% de la carga de rotura. Por ejemplo, la distribución de menor amplitud, parece ser

realmente el acoplamiento de dos distribuciones, una centrada en 41 dB (la inducida) y otra de menor amplitud, en torno a los 38 dB (la generada).

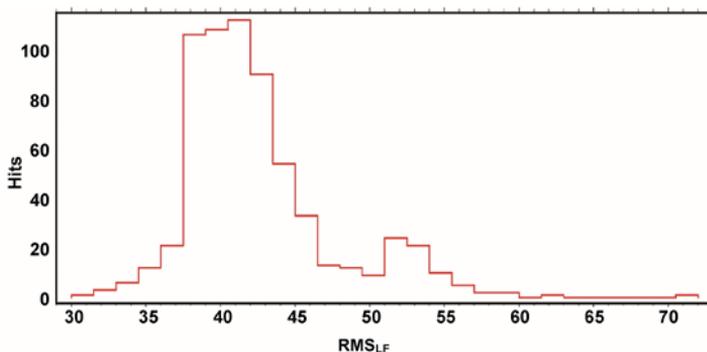


Figura 7.23. Distribución de los eventos de delaminación en el ensayo a flexión de la probeta 9\_D, en función de RMS<sub>LF</sub>. CD=0 dB. T<sub>R\_SRF1</sub>= 6 dB y T<sub>R\_SRF2</sub>= 6 dB.

#### 7.2.4.3. Probeta 9\_3

La Figura 7.24 muestra las gráficas del número de eventos acumulados a lo largo del ensayo de flexión de la probeta 9\_3 en función del tanto por ciento de carga de rotura, para tres valores diferentes del umbral CD (0, 5 y 10 dB). Se vuelve a observar que no existen cambios sustanciales entre ellas, aunque si se detectan, especialmente para CD=10, diferencias en los valores absolutos de los eventos clasificados en cada mecanismo. En general, y como es lógico, a diferencia de lo ocurrido en las probetas 3\_D y 9\_D, en este caso los mecanismos de micro-rotura de matriz y rotura de fibra generan muchos más eventos que el mecanismo de delaminación. Esto avala una vez más la técnica y el algoritmo de clasificación de mecanismos propuesto.

Se aprecia que hasta un valor elevado del porcentaje de carga de rotura (57% aproximadamente) ninguno de los tres mecanismos presenta crecimiento, es decir, no hay delaminación, ni rotura de fibras, ni micro-roturas de matriz. Este comportamiento es una gran diferencia con las probetas predelaminadas 3\_D y 9\_D, en las que los eventos de EA comenzaban a porcentajes de cargas de rotura mucho más bajos. A partir del 57% de carga de rotura comienzan a

aparecer lentamente los eventos asociados a micro-roturas de matriz y rotura de fibra, pero no los eventos de delaminación, lo cual resulta lógico.

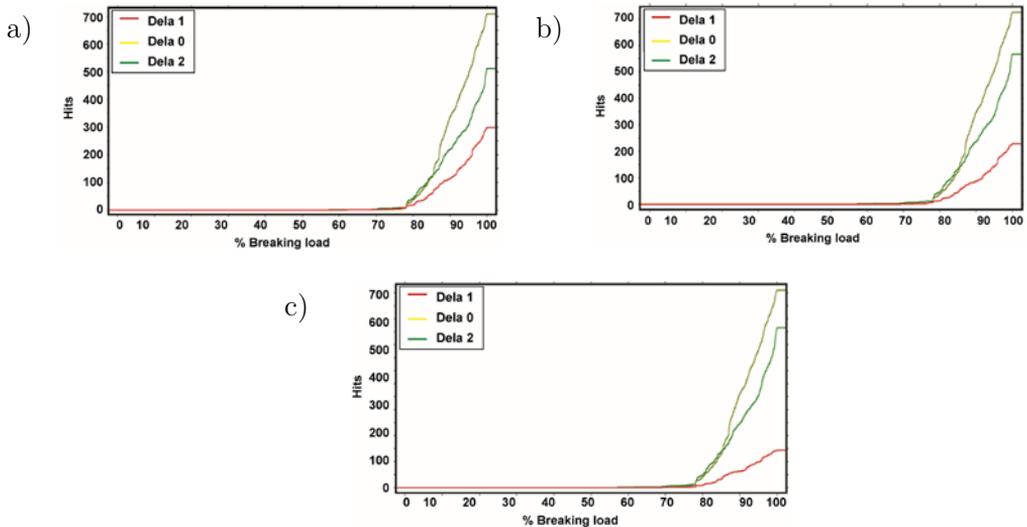


Figura 7.24. Eventos acumulados en el ensayo de flexión de la probeta 9\_3 clasificados en los tres mecanismos de daño. a) CD=0 dB; b) CD= 5 dB; c) CD=10 dB.  $T_{R\_SRHF1} = 6$  dB y  $T_{R\_SRHF2} = 6$  dB.

En torno al 78% de carga de rotura se produce un significativo aumento de micro-roturas de matriz y roturas de fibra, el cual induce una delaminación, reflejada en la aparición de eventos asociados a delaminaciones. Desde ahí, el elevado crecimiento de las micro-roturas de matriz y las roturas de fibra se mantiene hasta el final del ensayo, observándose que entorno al 96% de la carga de rotura, se produce un aumento brusco de las roturas de fibra, justo antes de la rotura destructiva. Sin embargo, los eventos de delaminación crecen de manera más lenta, lo cual parece en concordancia con los avances de delaminación observados en las probetas 3\_D y 9\_D, y en el ensayo de delaminación pura.

En torno al 86% de la carga de rotura se puede observar un claro cambio de pendiente de las micro-roturas de matriz, y más levemente y ligeramente retrasado, un salto en las roturas de fibra. Un poco más tarde, en torno al 92% de la carga de rotura, se observa un leve salto de las delaminaciones,

posiblemente reflejando la generación de una segunda delaminación, de menor importancia.

La Figura 7.25 muestra dos fotografías del patrón de rotura de la probeta 9\_3, observándose la existencia de dos delaminaciones. Una de ellas (la principal y generada en primer lugar), corresponde a la generada en el 78% de la carga de rotura (véase la Figura 7.27). La otra, secundaria y generada en segundo lugar, podría corresponder a la que se produjo en torno al 92% de la carga de rotura. La Figura 7.26 muestra imágenes de microscopía SEM realizadas tras el ensayo a flexión en la que se muestra una rotura de fibra y una micro-rotura de matriz.

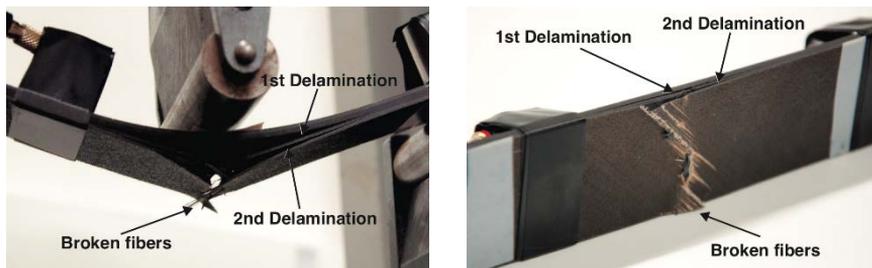


Figura 7.25. Fotografías de los daños producidos en la probeta 9\_3.

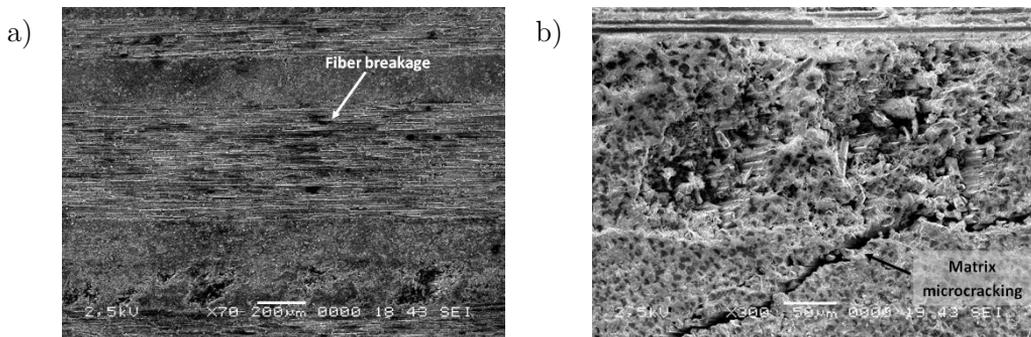


Figura 7.26. Imagen de microscopía SEM realizada tras el ensayo a flexión. a) Rotura de fibra; b) Micro-rotura de matriz.

La Figura 7.27, por su parte, muestra la distribución de los eventos clasificados como delaminaciones en función de  $RMS_{LF}$ . En este caso, el número de eventos asociados a la delaminación es obviamente menor que para las probetas 3\_D y 9\_D. Igualmente se observan dos distribuciones centradas aproximadamente en torno a los 41 y 52 dB, que corresponderían a los dos

sentidos de avance de las delaminaciones (en sentido contrario al sensor y hacia el lado del sensor, respectivamente). Al igual que en la probeta 9\_D, estas distribuciones son más anchas y faltas de gaussianidad, debido probablemente al acoplamiento entre el avance de las dos delaminaciones observadas (la principal y la secundaria).

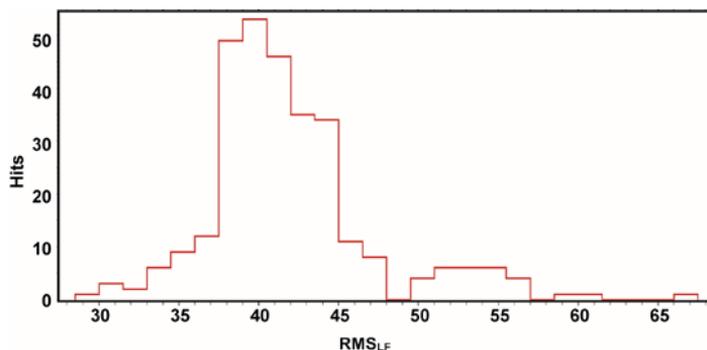


Figura 7.27. Distribución de los eventos de delaminación en el ensayo de flexión de la probeta 9\_3, en función de  $RMS_{LF}$ .  $CD=0$  dB.  $T_{R\_SRHF1}=6$  dB y  $T_{R\_SRHF2}=6$  dB.

#### 7.2.4.4. Probeta 9\_4

La Figura 7.28 muestra los eventos acumulados en la probeta 9\_4 en función del porcentaje de carga de rotura. En este caso, los eventos de EA, micro-roturas de matriz principalmente) comienzan en torno al 62% de la carga de rotura, valor similar al registrado para la probeta 9\_3. Igualmente, los eventos de delaminación comienzan en torno al 77% de la carga de rotura, valor muy similar al 78% de la probeta 9\_3. A partir de ese momento, se producen dos aumentos significativos en la tasa de crecimiento de los eventos de delaminaciones, en torno al 82% y al 88% de la carga de rotura. Especialmente importante es el aumento que ocurre en el 82% y que va acompañado por un significativo aumento de las micro-roturas de matriz y las roturas de fibra. Esta delaminación se observa claramente en la Figura 7.30, y fue la precursora principal del fallo catastrófico de la probeta. Por su parte, a partir del 94%, y especialmente a partir del 99%, se producen claros aumentos de las roturas de fibra, que anuncian el fallo inminente de la probeta. En la Figura 7.30, sin embargo, no se observa la aparición de delaminaciones secundarias significativas,

como ocurre en la probeta 9\_3, lo que nos llevaría a pensar que los aumentos de delaminación al 82% y al 88% se podrían deber a avances súbitos de la delaminación primaria generada al 77%.

La Figura 7.29 muestra la distribución de eventos clasificados como delaminación en función del valor del  $RMS_{LF}$ . Se observa un resultado muy similar al obtenido en la probeta 9\_3, aunque como se ha comentado no existen evidencias de que en este caso se produjera una segunda delaminación.

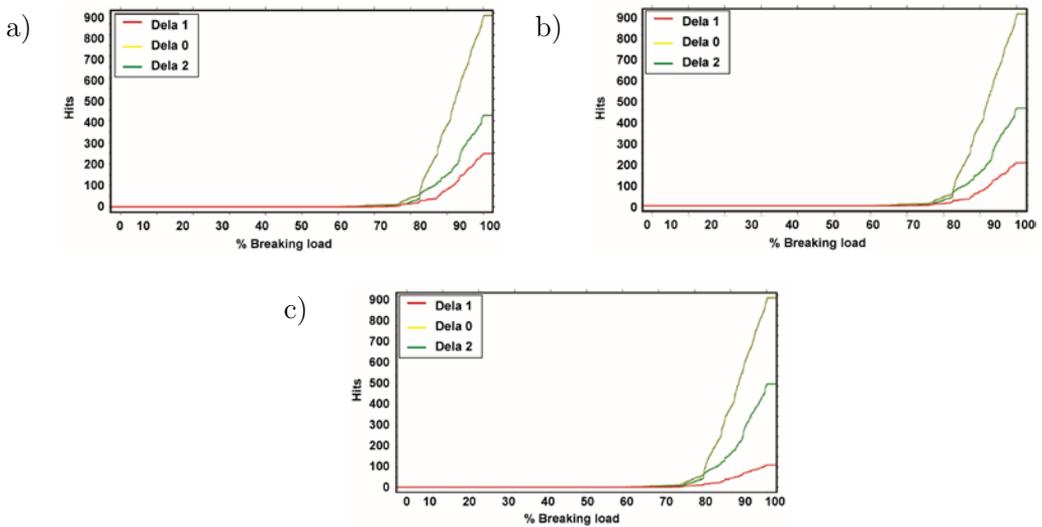


Figura 7.28. Eventos acumulados en el ensayo de flexión de la probeta 9\_4 clasificados en los tres mecanismos de daño. a) CD=0 dB; b) CD= 5 dB; c) CD=10 dB.  $T_{R\_SRHF1}= 6$  dB y  $T_{R\_SRHF2}= 6$  dB.

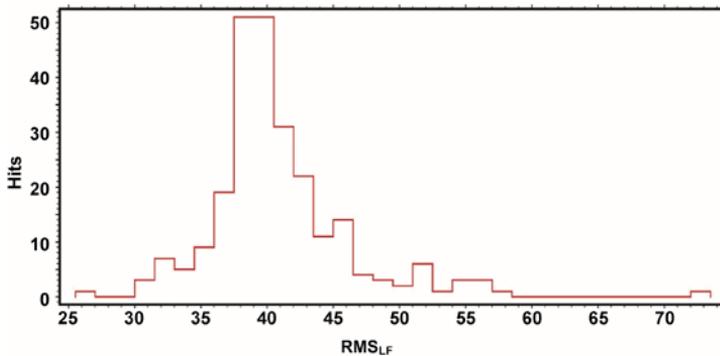


Figura 7.29. Distribución de los eventos de delaminación en el ensayo de flexión de la probeta 9\_4, en función de  $RMS_{LF}$ . CD=0 dB.  $T_{R\_SRHF1}= 6$  dB y  $T_{R\_SRHF2}= 6$  dB.



Figura 7.30. Fotografías de los daños producidos en la probeta 9\_4.

A partir de ese momento, se producen dos aumentos significativos en la tasa de crecimiento de los eventos de delaminaciones, en torno al 82% y al 88% de la carga de rotura. Especialmente importante es el que ocurre en el 82% y que va acompañado por un significativo aumento de las micro-roturas de matriz y las roturas de fibra. En la Figura 7.30, sin embargo, no se observa la aparición de delaminaciones secundarias significativas, como ocurre en la probeta 9\_3, lo que nos llevaría a pensar que los aumentos de delaminación al 82% y al 88% se podrían deber a avances súbitos de la delaminación primaria generada al 77%.

Por su parte, a partir del 94%, y especialmente a partir del 99%, se producen claros aumentos de las roturas de fibra, precursores del fallo catastrófico de la probeta.



## 8.

# INFLUENCE OF AN OPTICAL FIBER EMBEDDED IN UNIDIRECTIONAL CFRP LAMINATES

This chapter investigates the influence of an embedded optical fiber in unidirectional CFRP composites on its mechanical properties, during monotonic tensile tests. Experiments were conducted by monitoring the samples with the Acoustic Emission (AE) and the 3D Digital Image Correlation (DIC) methods. During the loading of the laminate, the strain concentrations measured with DIC were compared with the AE activity in order to track the evolution of failure. Experiments were carried out on unidirectional CFRP samples with and without embedded acrylate optical fiber, just for comparison reasons. Three different orientations ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $90^\circ$ ) of the fiber were considered.

### 8.1. Samples and experimental setup

Eight samples of 6-layers unidirectional CFRP, sized  $15 \times 250 \times 1.25 \text{ mm}^3$ , were tested. Two of them for each different acrylate fiber configuration (see Figure 8.1): NF (no embedded OF), F0, F45, F90 (embedded OF at  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  and  $90^\circ$  respect to the carbon fiber orientation). The OF was located between the 3<sup>rd</sup> and 4<sup>th</sup> layer, in the middle of the thickness. Table 8.1 shows the tested samples dimensions.

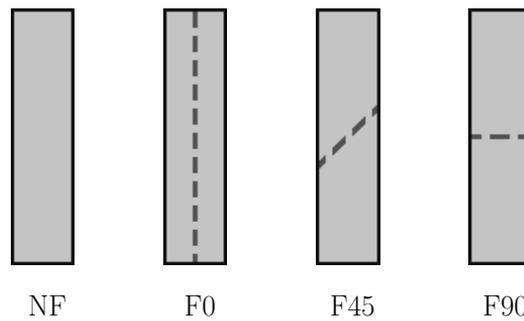


Figure 8.1. Types of tested samples with indication of the embedded optical fiber (dashed line).

| Sample     | Dimensions (mm <sup>3</sup> ) |
|------------|-------------------------------|
| UT0-NF-3   | 15.05 x 250 x 1.248           |
| UT0-NF-4   | 14.98 x 250 x 1.224           |
| UT0-F0a-3  | 14.94 x 250 x 1.247           |
| UT0-F0a-4  | 15.00 x 250 x 1.267           |
| UT0-F45a-3 | 14.95 x 250 x 1.249           |
| UT0-F45a-4 | 14.97 x 250 x 1.258           |
| UT0-F90a-3 | 14.99 x 250 x 1.249           |
| UT0-F90a-4 | 14.99 x 250 x 1.262           |

Table 8.1. Dimensions of the samples (width x length x thickness).

Figure 8.2 shows a general view of the test carried out at the University of Augsburg (Germany). Monotonic tensile tests were conducted following the ASTM D3039/D3039M Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Material [176], applying a displacement speed of 2 mm/min, until final failure.

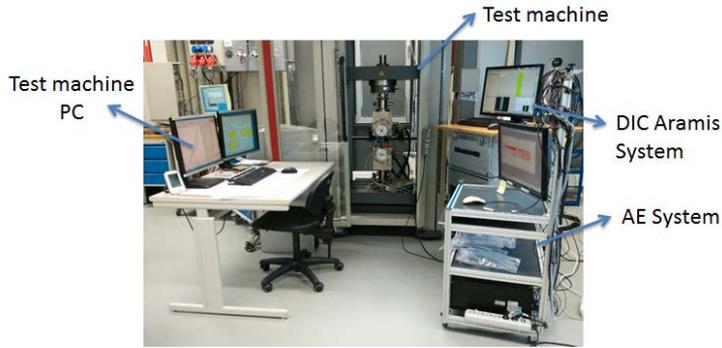


Figure 8.2. General view of the test.

Figure 8.3-a shows the AE and DIC experimental setup. AE monitoring was conducted using two multiresonant MISTRAS WD-sensors. Frequency response of the WD-sensors is shown in Figure 8.3-b (multiresonant from 0.1 to 1 MHz). Note that the sensitivity curve will change if the sensors are mounted on different materials moreover, the curve is different for several WD sensors. AE signals were acquired with a Physical Acoustic equipment and the AE analysis was done using the AEVisual from Vallen Systeme, after converting AE data recorded with Mistras system. AE acquisition parameters are shown in Table 8.2. After acquisition, only located AE events were taken into account for the evaluation.

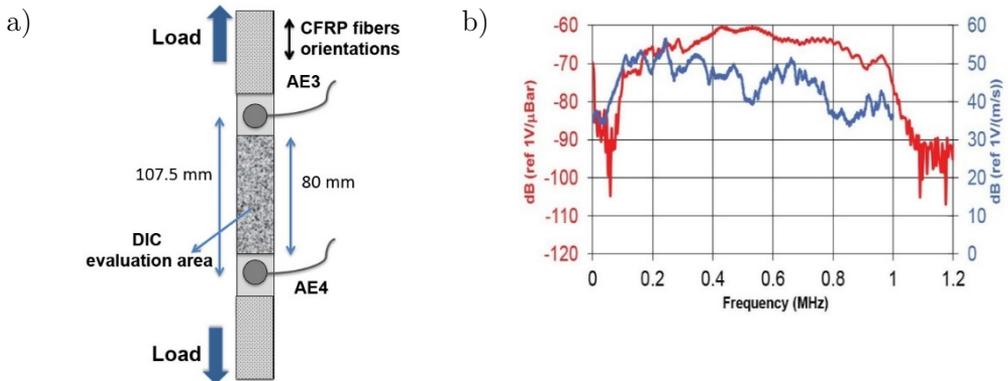


Figure 8.3. a) AE and DIC experimental setup; b) Frequency response of WD sensors.

| <b>AE Parameter</b>   | <b>Value</b>                  |
|-----------------------|-------------------------------|
| Equipment             | Physical Acoustic 16 channels |
| Sensors               | 2 WD                          |
| Sample rate           | 10 MHz                        |
| Threshold             | 35 dB <sub>AE</sub>           |
| PDT                   | 10 $\mu$ s                    |
| HDT                   | 80 $\mu$ s                    |
| HLT                   | 300 $\mu$ s                   |
| Pretrigger            | 2560 samples                  |
| Preamplifier gain     | 20 dB <sub>AE</sub>           |
| Event Definition Time | 12 $\mu$ s                    |
| Propagation velocity  | 6323.5 m/s                    |
| Sensor distance       | 107.5 mm                      |

**Table 8.2. AE acquisition parameters.**

Figure 8.3-a shows the area monitored by the 3-D digital image correlation (DIC). This area was the same where sensors were attached. A speckle pattern was sprayed on the specimen surface defined as DIC evaluation area used to obtain mean strain values.

Figure 8.4 shows a view of the sample and the DIC equipment during the test. Images were captured with two cameras using a resolution of 4096x3072 pixels, a camera lens with a focal length of 100 mm and a lens speed of f/5.6, with a frequency rate of 2 Hz using a digital image correlation system (Aramis 12M GOM). DIC configuration parameters are shown in Table 8.3.



**Figure 8.4. View of the sample and DIC equipment.**

| DIC parameter      | Value  |
|--------------------|--|
| Camera             | Toshiba CMOS camera CSC12M25BMP19-01B<br>with 4096x3072 pixels |
| Lenses             | Titanar, focal length 5,6/100 mm                               |
| Lighting           | KSP 0495-0001A LED 20W/24V white 30°                           |
| Filter             | Polarization-filter Schneider-Kreuznach                        |
| Field of view      | 76.8x57.3 mm <sup>2</sup>                                      |
| Scale factor       | 0.0188 x 0.0187 mm/px  |
| Subset size        | 25 x 25 pixels   |
| Overlap            | 48 x 48%   |
| Acquisition rate   | 2 Hz   |
| Software           | ARAMIS   |
| Configuration      | 3D   |
| Calibration object | CP20/175   |

**Table 8.3. DIC configuration parameters.**

## 8.2. Mechanical results

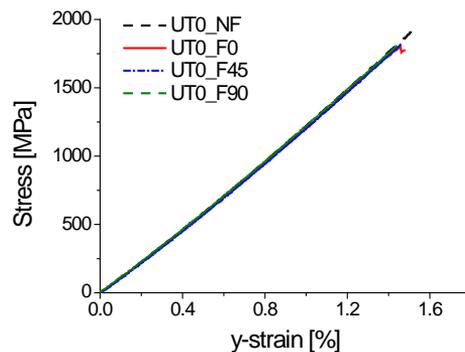
Table 8.4 shows the maximum stress and displacement obtained for each sample, and the mean stress calculated for each kind of samples and the  $\Delta$ -stress comparing the maximum stress of the samples with OF ( $\sigma$ ) to the samples without OF ( $\sigma_{NF}$ ), calculated as

$$\Delta\text{-stress} = \Delta\text{-}\sigma = 100 \frac{\sigma - \sigma_{NF}}{\sigma_{NF}} \quad (8.1)$$

| Sample     | Stress<br>[MPa] | Displacement<br>[mm] | Mean stress<br>[MPa] | $\Delta$ -stress<br>[%] |
|------------|-----------------|----------------------|----------------------|-------------------------|
| UT0_NF_3   | 1837.23         | 3.6                  | 1878.98              | 0                       |
| UT0_NF_4   | 1920.72         | 3.7                  |                      |                         |
| UT0_F0a_3  | 1803.53         | 3.4                  | 1854.36              | -1.31                   |
| UT0_F0a_4  | 1905.19         | 3.6                  |                      |                         |
| UT0_F45a_3 | 1864.20         | 3.6                  | 1877.75              | -0.066                  |
| UT0_F45a_4 | 1891.30         | 3.7                  |                      |                         |
| UT0_F90a_3 | 1816.88         | 3.5                  | 1859.49              | -1.037                  |
| UT0_F90a_4 | 1902.09         | 3.6                  |                      |                         |

**Table 8.4.** Maximum stress and displacement for each sample, mean stress for each kind of sample and % of variation compared to the UT0\_NF maximum stress.

Figure 8.5 shows the stress as function of the y-strain. A very small reduction (around 1%) of the maximum stress related with the presence of the embedded OF was observed.



**Figure 8.5.** Stress versus y-strain.

### 8.3. AE results

For briefly reasons, only the results of one of the two samples with the same configuration are shown. Results for the other samples are similar. The AE location settings were selected to avoid the signals coming from friction at the clamps.

### 8.3.1. Sample with no embedded OF (UT0\_NF)

Figure 8.6-a shows the peak amplitude of the signals versus its duration. Two groups can be observed; first group composed by signals with durations approximately lower than 100  $\mu\text{s}$  and the second group with durations from 100 to 600  $\mu\text{s}$  and lower amplitudes. Figure 8.6-b shows the hits distribution as function of the peak amplitude (Pollock's distribution). Three different distribution peaks can be distinguished in this case; the first one with more signals and amplitudes between 42 and 48  $\text{dB}_{\text{AE}}$ , the second one including signals with amplitudes between 48 and 52  $\text{dB}_{\text{AE}}$  and the third one with amplitudes from 53 to 63  $\text{dB}_{\text{AE}}$ . Both figures suggest the existence of several damage mechanisms.

Figure 8.6-c shows the location result as function of the stress, including different symbols according to the energy of the events. Figure 8.6-d shows the distribution of the energy and located events as function of the X-location. The most and more energetic events were located at the upper part of the evaluation area (around +3 cm) although a cluster can be also observed at the symmetric position (around -3 cm).

The AE cumulated energy, energy of the hits and cumulated located events versus stress are shown in Figure 8.6-e. Three periods can be observed according to the AE activity:

-T1: from the beginning of the test to the first important increase of the cumulated energy, happening around 128 MPa, when a hit with a high energy was located at  $y=3.40$  cm.

-T2, from 128 MPa to 680 (35.4% of the maximum stress) when a high number of events and a permanent increase of the cumulated energy was observed.

-T3, from 680 MPa to the end, when AE activity decreased significantly.

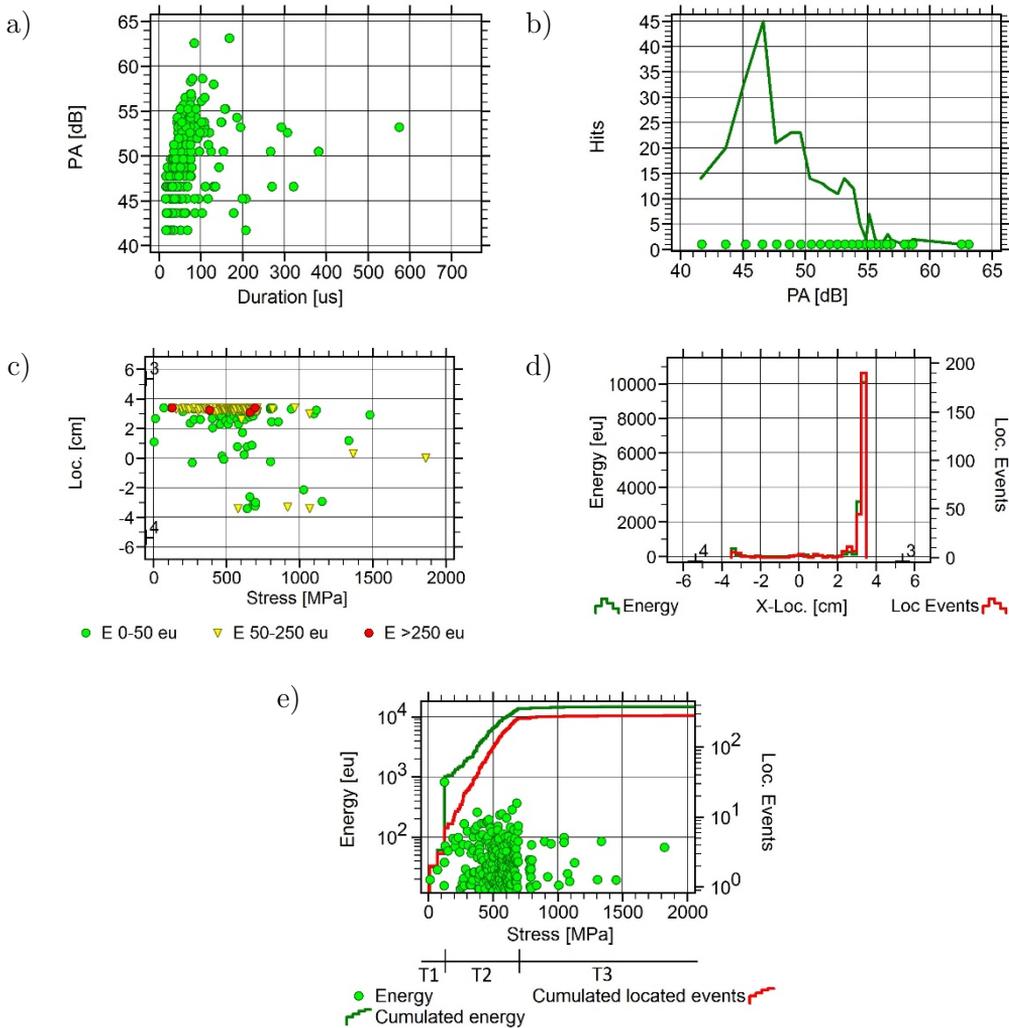


Figure 8.6. AE results of the sample UT0\_NF. a) Amplitude vs duration; b) Hits distribution vs amplitude; c) AE location results vs stress; d) Distribution of the energy and located events vs X-location; e) AE cumulated energy, energy of the hits and cumulated located events vs stress.

### 8.3.2. Sample with embedded OF at 0° (UT0\_F0)

Figure 8.7-a shows the amplitude of the signals as function of its duration. Fewer located events were obtained in this case, compared to the sample without OF. However, regarding the general behavior, the AE results are pretty similar between both samples. Similarly, two AE located events clusters are

observed at positions around +3cm and -3 cm, although some AE events of high energy around the center of the sample were obtained in this case.

According to the cumulated energy and cumulated events (Figure 8.7-e), the beginning of the period T2 was observed a little bit delayed with respect to the sample without OF, at around 316 MPa. The beginning of the low AE activity period (T3) was observed in this case at around 33% of the final stress, very similar to the sample without OF.

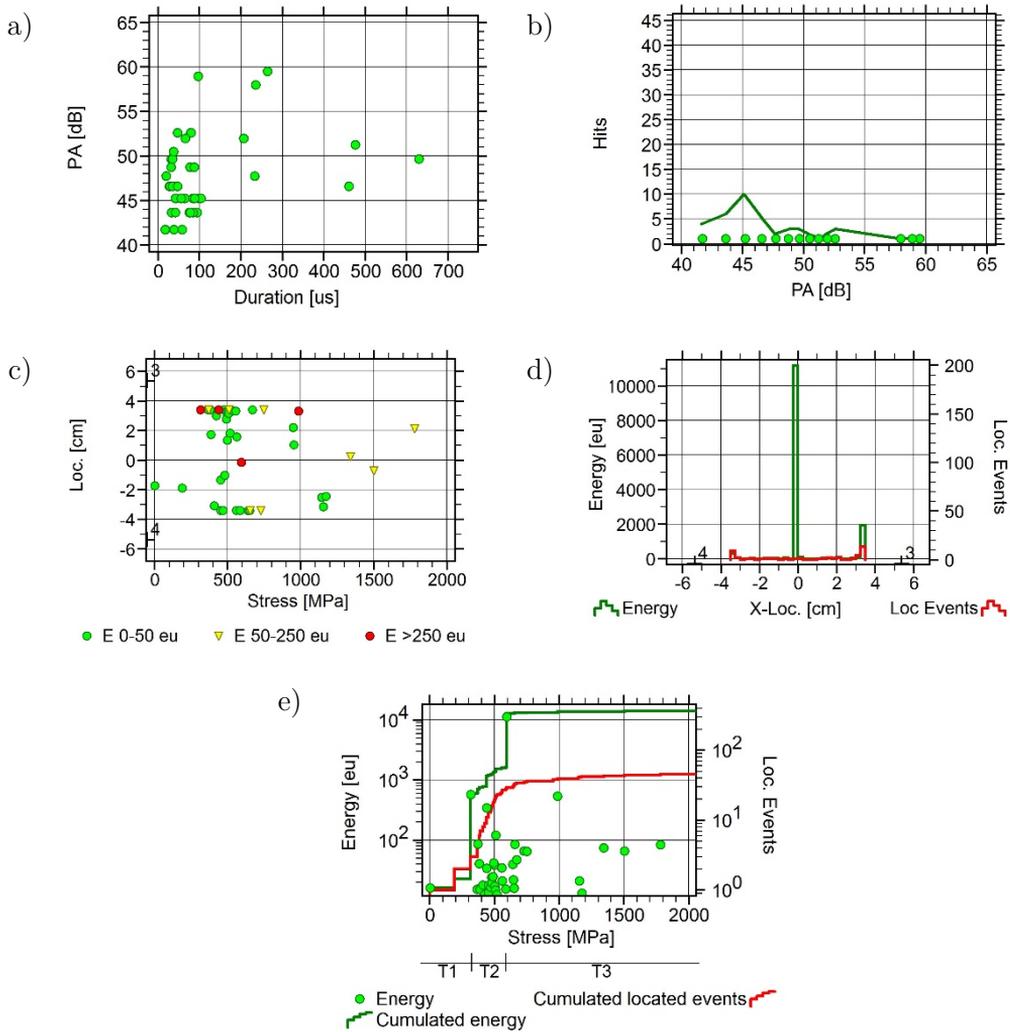


Figure 8.7. AE results of the sample UT0\_F0. a) Amplitude vs duration; b) Hits distribution vs amplitude; c) AE location results vs stress; d) Distribution of the energy and located events vs X-location; e) AE cumulated energy, energy of the hits and cumulated located events vs stress.

### 8.3.3. Sample with embedded OF at 45° (UT0\_F45)

Regarding the location results as function of the stress (Figure 8.8-c), although two clusters of AE events are located around +3 and -3 cm, more AE events were located all along the inspection area. Even the events with higher energy were concentrated around  $y=-2$  cm. This is an important difference with

the no OF and  $0^\circ$  OF samples, which seems to be logical because the presence of the OF to  $45^\circ$  produces a clear strain concentration, as the y-strain observed with the DIC results confirmed.

According to the AE activity (Figure 8.8-e) three periods were distinguished. At the beginning of the period T1, an increase of the cumulated AE energy was registered at 100 MPa and located at  $y=3.40$  cm. From this stress value, no more events were registered until 453 MPa (beginning of the period T2). At this point, an event with high energy was registered at  $y=2.93$  cm. At 750 MPa, another event with high energy was registered and located at  $y=-2.05$  cm. From this stress value (40% of the final stress) the period T3 started and the AE activity became lower. In general, clear differences of the AE pattern exist for the no OF and  $0^\circ$  OF samples, i.e. the influence of the OF seems to be evident. This behavior is also confirmed by the DIC observations.

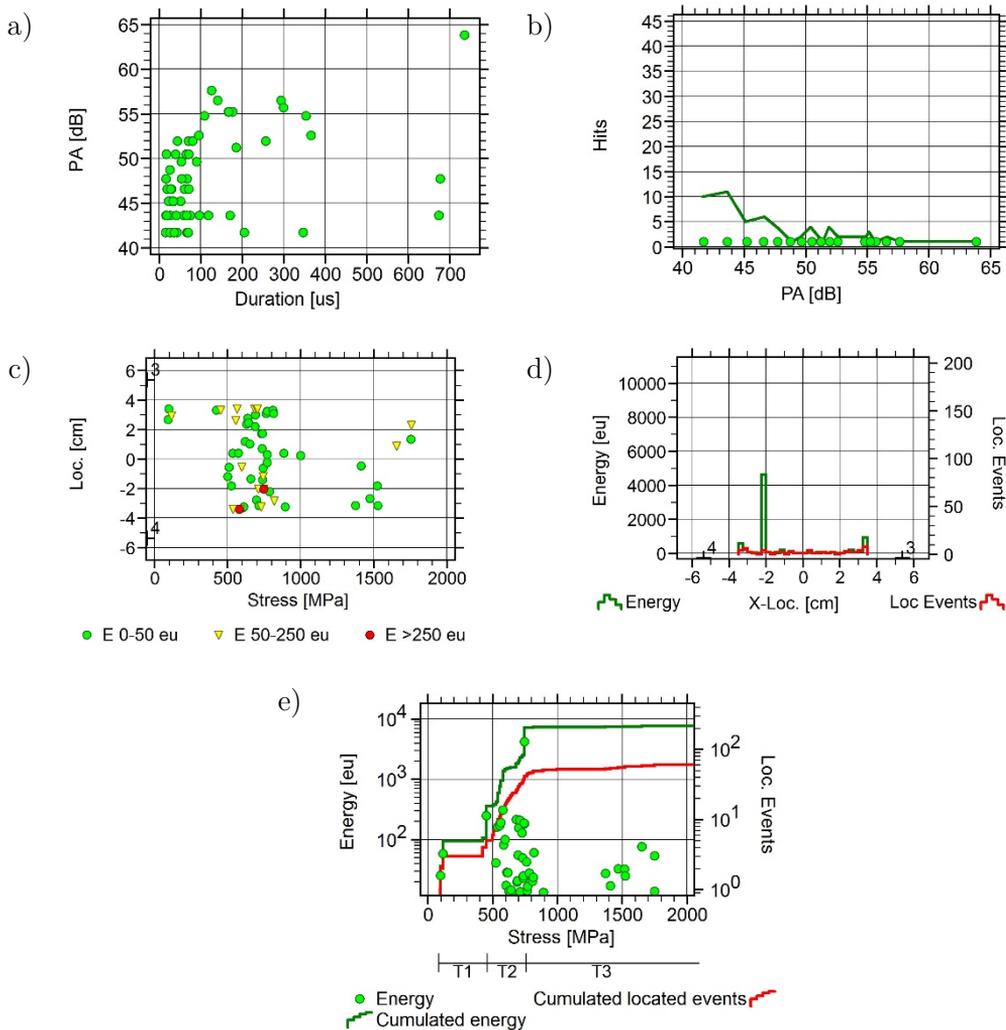


Figure 8.8. AE results of the sample UT0\_F45. a) Amplitude vs duration; b) Hits distribution vs amplitude; c) AE location results vs stress; d) Distribution of the energy and located events vs X-location; e) AE cumulated energy, energy of the hits and cumulated located events vs stress.

### 8.3.4. Sample with embedded OF at 90° (UT0\_F90)

For the UT0\_F90, some events (Figure 8.9-c) were located close to the limits of the location area (like for no OF and 0° OF samples) and also at the center of the sample, just at the position of the OF, which seems to be logical, demonstrating the influence of the 90° OF. Moreover, the event with higher

energy were located at the center of the sample, confirming again the influence of the OF.

According to the AE activity, the beginning of period T1 is similar to 45° OF sample at around 100 MPa. The period T2 is characterized by a constant slope in the cumulated number of events. The most important increase of the cumulated energy was registered at 700 MPa. The period T3 began at this stress value (38.5% of the final stress) when the AE activity became lower. This value is similar to the 45° OF and a bit higher than for no OF and 0° OF, demonstrating the major influence of the OF to 45° and 90° respect to the 0° direction.

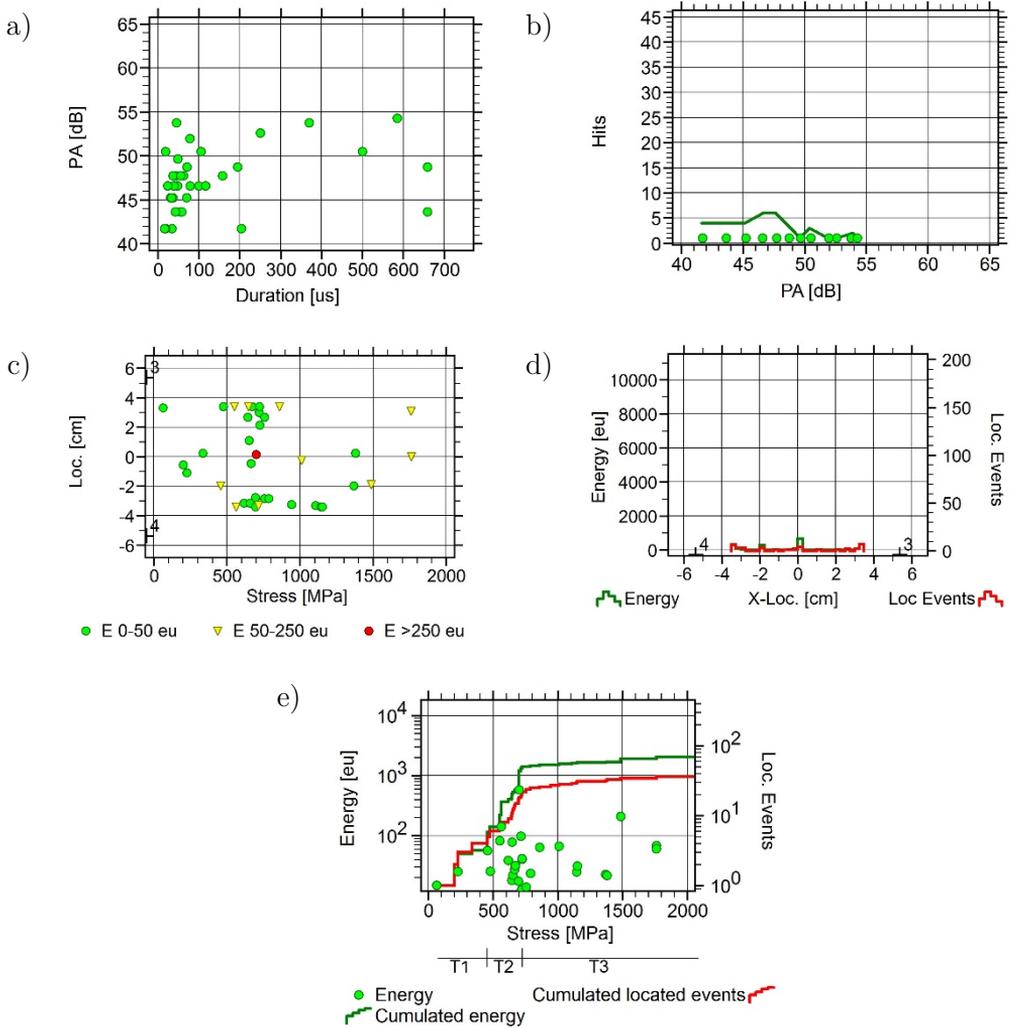


Figure 8.9. AE results of the sample UT0\_F90. a) Amplitude vs duration; b) Hits distribution vs amplitude; c) AE location results vs stress; d) Distribution of the energy and located events vs X-location; e) AE cumulated energy, energy of the hits and cumulated located events vs stress.

## 8.4. DIC results

### 8.4.1. Sample with no embedded OF (UT0\_NF)

The analysis of the strain during the tensile tests was carried out using the Aramis system software. Figure 8.10 shows a detail of the evaluation area (see Figure 8.3).

After the analysis of the full y-strain concentration field, the areas of the strain concentration were selected. For this sample, two areas of the strain concentration can be seen for the y-strain field. These areas correspond very well with the zones of high concentration of AE events shown in Figure 8.10-b (area of strain concentration 1 located at the upper position and area of strain concentration 2 located at the lower position).

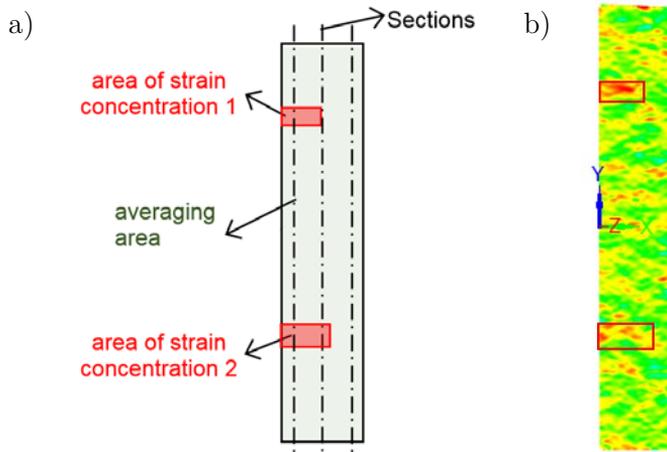


Figure 8.10. a) Detail of the evaluation area of the sample UT0\_NF, including the concentration strain areas (1 and 2), the averaging area and the longitudinal sections shown in Figure 8.12; b) DIC image taken at 725 MPa.

Figure 8.11 shows the full y-strain field (axial strain direction) at different stress stages related to the transition between T1 and T2 periods (Figure 8.6-d), around 128 MPa. The marked area corresponds with the first great increase of the AE energy, located at  $y=3.40$  cm. An increase in the y-strain field could be observed in whole sample, although a slight strain concentration is observed

around 3.40 cm. Figure 8.12 shows the major strain along the three longitudinal sections indicated in Figure 8.10 at 80 MPa and 156 MPa. No differences between the sections are observed, although a clear increasing of the global stress of the sample can be seen from 80 to 156 MPa.

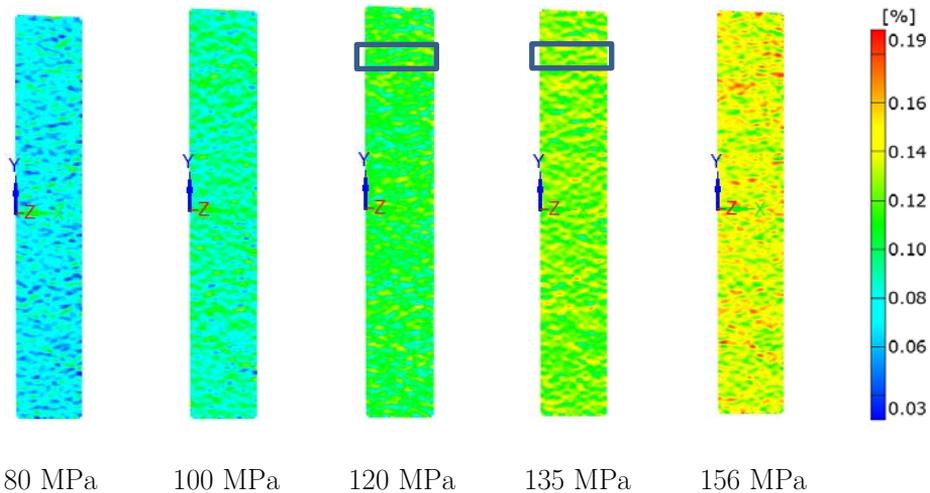


Figure 8.11. y-strain field of the sample UT0\_NF during the transition between periods T1 and T2 (from 80 MPa to 156 MPa).

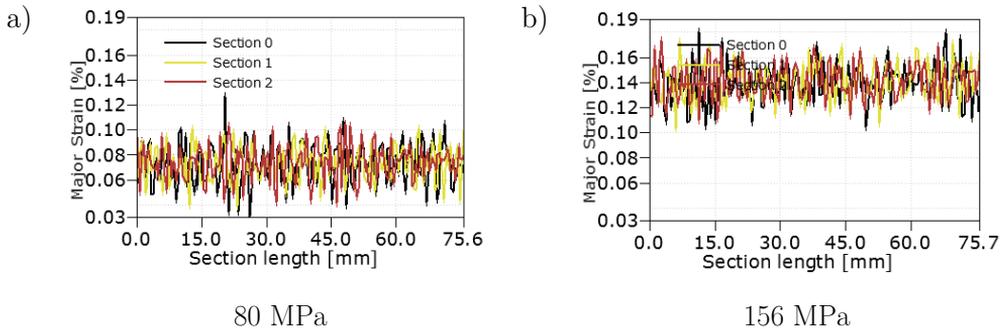


Figure 8.12. Major strain at the longitudinal sections marked along the length of the sample UT0\_NF at a) 80; b) 156 MPa.

Figure 8.13 shows the evolution of the y-strain field from 646 to 725 MPa, corresponding with the transition between T2 and T3 periods. The areas of the strain concentration 1 and 2 can be seen in all images. These areas correspond very well with the zones of high concentration of AE events (Figure 8.6-c). Moreover, area of strain concentration 1 shows higher strains than area 2, in

good agreement with the higher AE energy of the events located at the upper part of the sample (Figure 8.6-d).

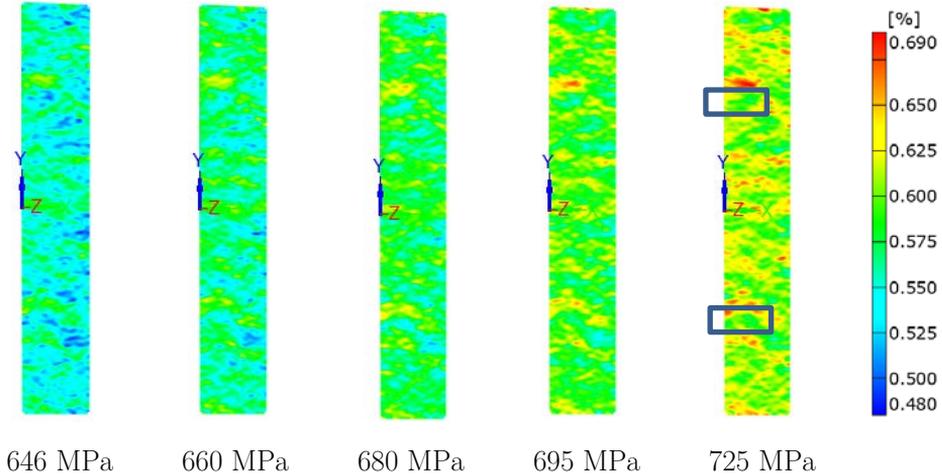


Figure 8.13. y-strain field of the sample UT0\_NF from 646 to 725 MPa.

For a representative subset of the images as function of the applied stress value, different measurements were made. First, the average tensile  $\langle \varepsilon \rangle_{avg}$  was evaluated by calculating the arithmetic average of all subset values excluding the region of the strain concentration. Second, at the areas of strain concentration 1 and 2 where a strain concentration was observed, the strain concentration value  $\langle \varepsilon \rangle_{conc}$  was evaluated for each one separately. The y-strain exceedance is a measure of the strain concentration relative to the whole area. It was calculated for each stress value as

$$\Delta \varepsilon = \left| \langle \varepsilon \rangle_{avg} - \langle \varepsilon \rangle_{conc} \right| \quad (8.2)$$

Figure 8.14-a shows the evolution of the strain concentration at areas 1 and 2 and the strain average as function of the stress. Slight differences can be observed. For that, Figure 8.14-b shows the quantification of the strain exceedance,  $\Delta \varepsilon$ , at areas as function of stress. This figure shows clearly that the  $\Delta \varepsilon$  at the strain concentration 1 is higher than  $\Delta \varepsilon$  at strain concentration 2, according to AE results.

Figure 8.14-c shows the quantification of the y-strain exceedance normalized by the applied stress as function of stress. In this case, a clear dispersion of the values was seen up to 680 MPa approximately, stress level at which dispersion becomes very low. It is noticeable that this clear behavior change happens at the same stress of transition between T2 and T3 of the AE activity, i.e. when AE activity decreases substantially. A possible explanation is likely owed to the way of evaluation. For low strain values, the relative measurement error in DIC is larger, thus more scatter is expected.

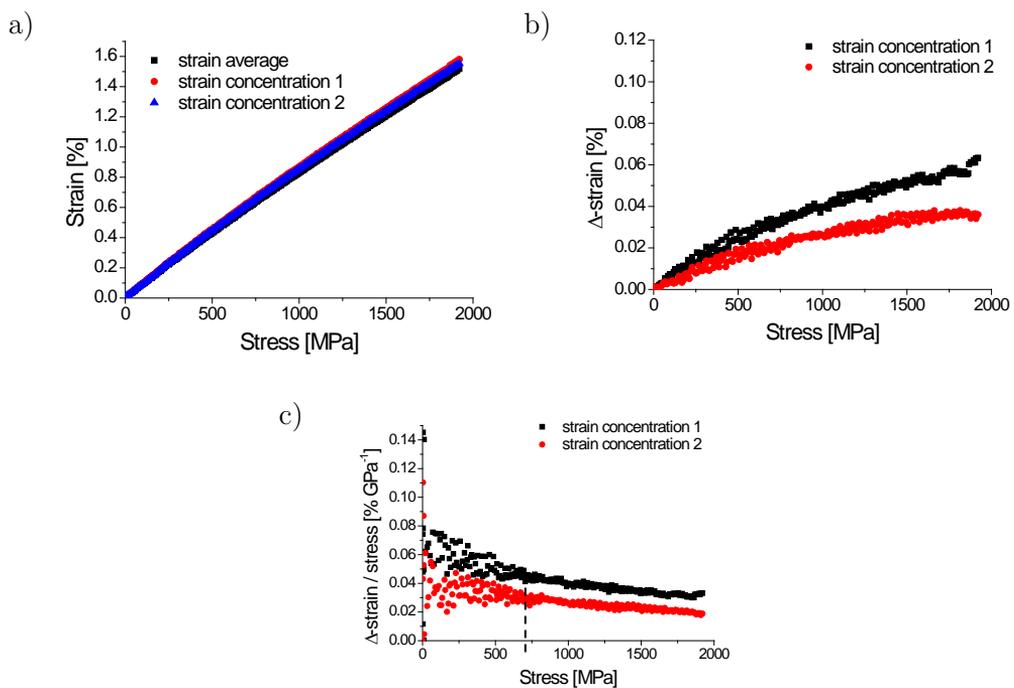
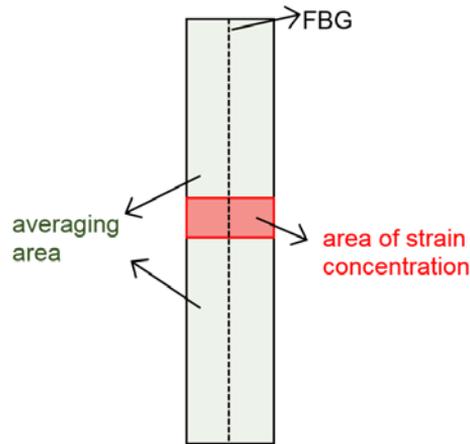


Figure 8.14. UT0\_NF. a) y-strain average and strain concentration as function of stress; b) Quantification of the strain exceedance as function of stress; c) Quantification of the strain exceedance normalized by the applied stress as function of stress.

#### 8.4.2. Sample with embedded OF at 0° (UT0\_F0)

For this sample, the central area was evaluated with more detail using DIC (Figure 8.15), since the most energetic AE events were located in this zone. This area was also chosen in order to compare with the samples with the embedded

optical fiber at  $90^\circ$  (UT0\_F90). An area of strain concentration due to the OF was not detected in this case.



**Figure 8.15. Detail of the evaluation area of the sample UT0\_F0, including the concentration strain area, the averaging area and the FBG direction.**

According to the AE results, Figure 8.16 shows the  $y$ -strain field of different stress stages related with the first great increase of the AE energy, i.e the transition between periods T1 and T2, occurred at around 316 MPa and located in  $y=3.40$  cm. Similar results were observed for the sample without OF.

Figure 8.17 shows the evolution of the  $y$ -strain field from 550 to 626 MPa, during the transition between periods T2 and T3, corresponding with the AE event with higher energy located in the center of the sample. However, no special strain concentrations can be located and correlated with the AE location. Stress seems to be homogeneously distributed along the specimen.

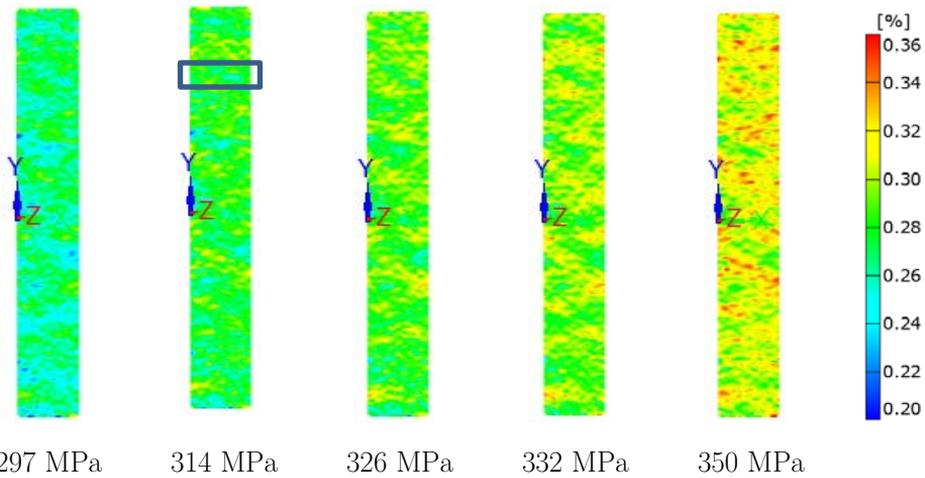


Figure 8.16. y-strain field of the sample UT0\_F0 from 297 to 350 MPa, during the transition between periods T1 and T2.

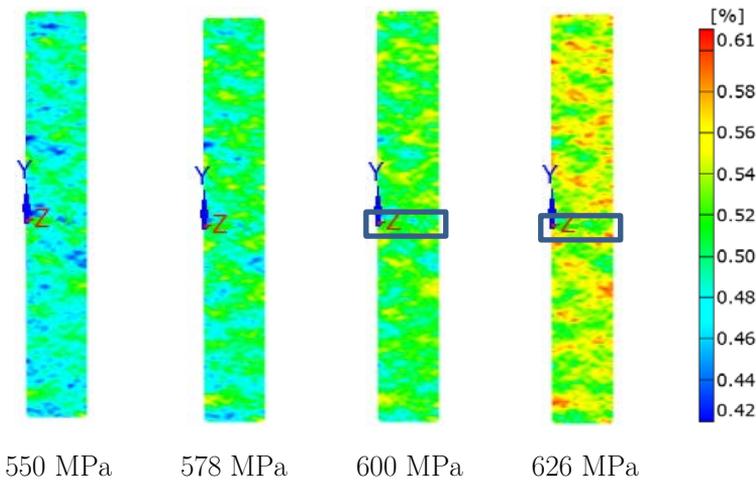


Figure 8.17. y-strain field of the sample UT0\_F0 from 550 to 626 MPa, during the transition between periods T2 and T3.

Figure 8.18 shows the evolution of the strain concentration at the center of the sample corresponding with the FBG location on the sample UT0\_F90, for comparison reasons. No exceedances with respect to the rest of the sample are observed. Strain exceedance normalized shows dispersion just until 580 MPa, at the transition of periods T2 and T3, when AE activity decreases noticeably. So, similar behavior is observed respect to the no OF sample.

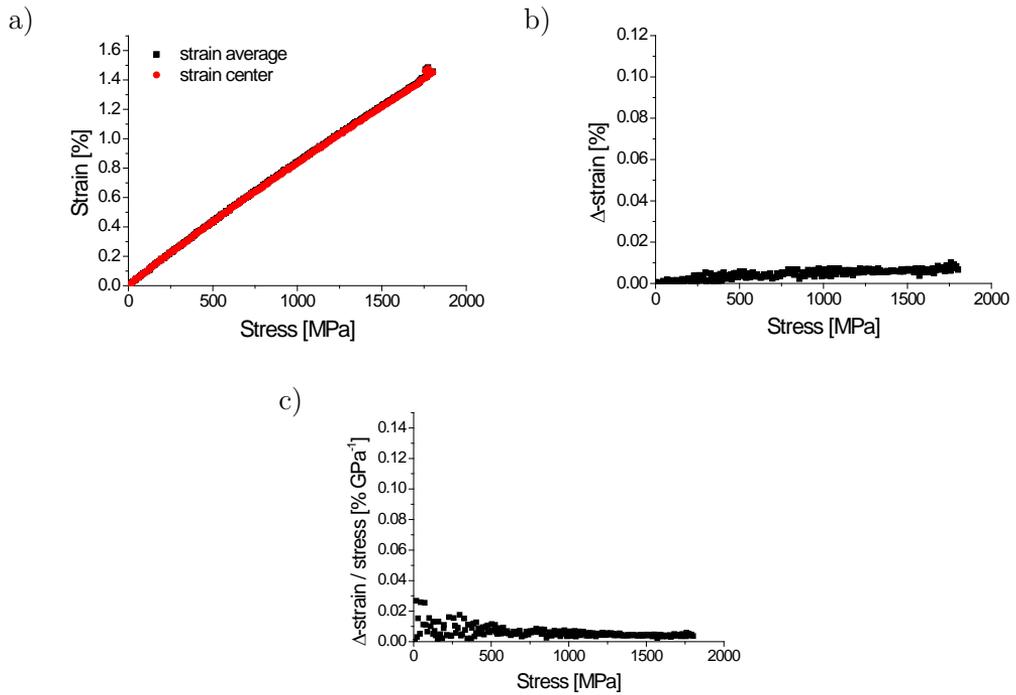


Figure 8.18. UT0\_F0. a) y-strain average and strain concentration as function of stress; b) Quantification of the strain exceedance as function of stress; c) Quantification of the strain exceedance normalized by the applied stress as function of stress.

#### 8.4.3. Sample with embedded OF at 45° (UT0\_F45)

Figure 8.19 shows a detail of the DIC evaluation area. The area of strain concentration was selected as the surrounding area of the OF location.

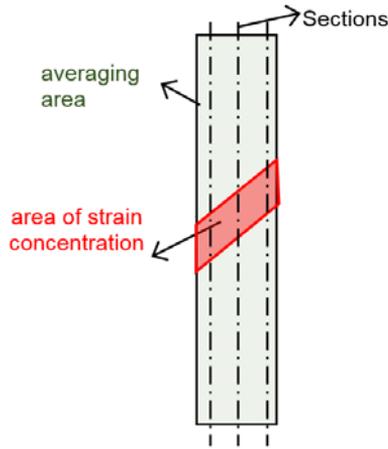


Figure 8.19. Detail of the evaluation area of the sample UT0\_F45, including the concentration strain area, the averaging area and the sections considered in Figure 8.22 and Figure 8.24.

Figure 8.20 shows the y-strain field of different stress stages around the beginning of the period T1. The position of the optical fiber is clearly detected at stresses higher than 90 MPa, which is in excellent agreement with the AE result, with some energetic AE events emitted around this stress and probably related with the strain concentration due to the OF.

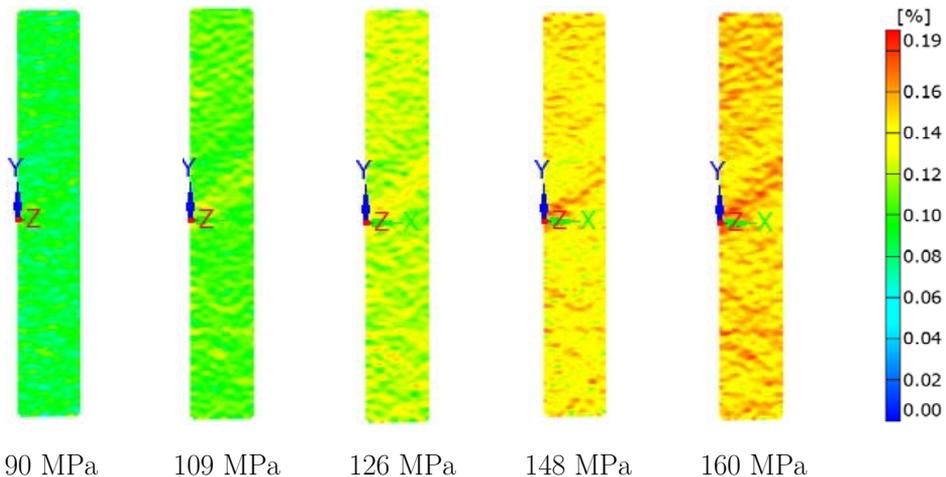


Figure 8.20. y-strain field of the sample UT0\_F45 from 90 to 160 MPa corresponding with the beginning of the period T1.

Figure 8.21 shows the evolution of the y-strain field from 405 to 475 MPa, corresponding with the second increase of the cumulated energy, the transition between periods T1 and T2. A clear evolution of the strain concentration at the OF area is observed, in good agreement with the AE result.

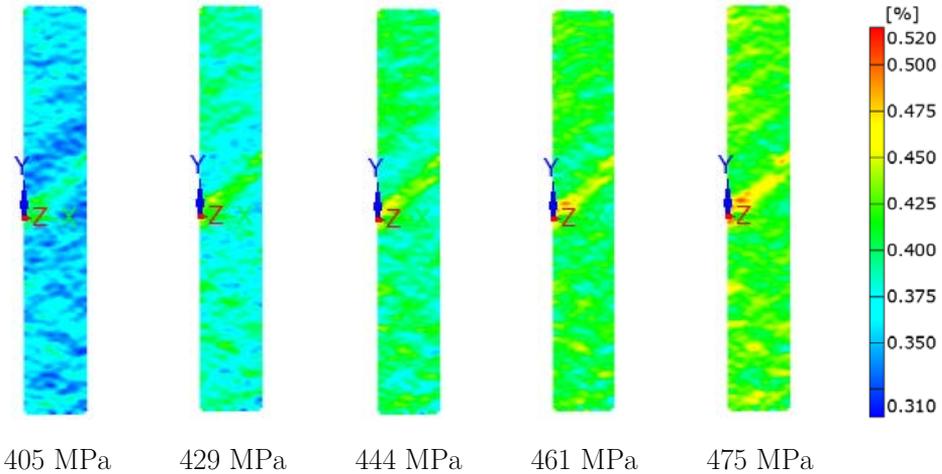


Figure 8.21. y- strain field of the sample UT0\_F45 from 405 to 475 MPa, the transition between periods T1 and T2.

Figure 8.22 shows the strain along the longitudinal sections indicated in Figure 8.19 at 405 MPa and 475 MPa. A local increasing of the strain is detected between 35 and 45 mm (from  $y=-0.35$  cm to  $y=0.65$  cm in the AE location), just at the position of the OF.

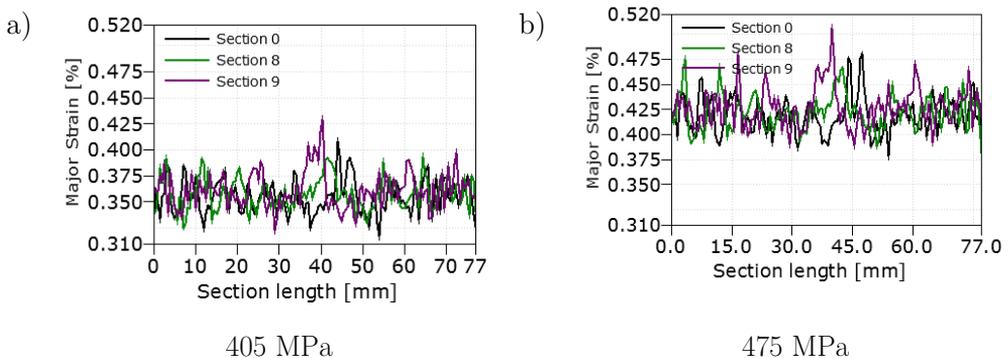


Figure 8.22. Major strain in sections along the length of the sample UT0\_F45 at 405 MPa and 475 MPa.

Figure 8.23 shows the y-strain field of different stress stages for the lasts part of period T2. The strain concentration due to the embedded optical fiber is very clear. Figure 8.24 shows the strain along the longitudinal sections indicated in Figure 8.19 in 684 MPa and 737 MPa. An increasing of the strain was detected in the same location than in Figure 8.22.

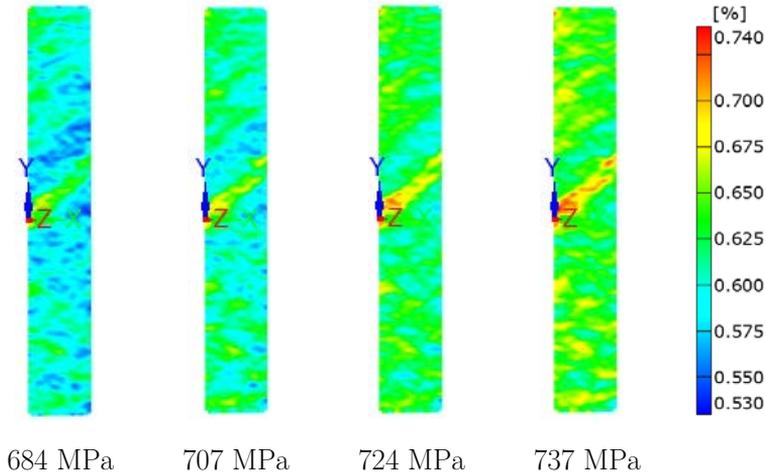


Figure 8.23. y-strain field of the sample UT0\_F45 from 684 MPa to 737 MPa, the transition between periods T2 and T3.

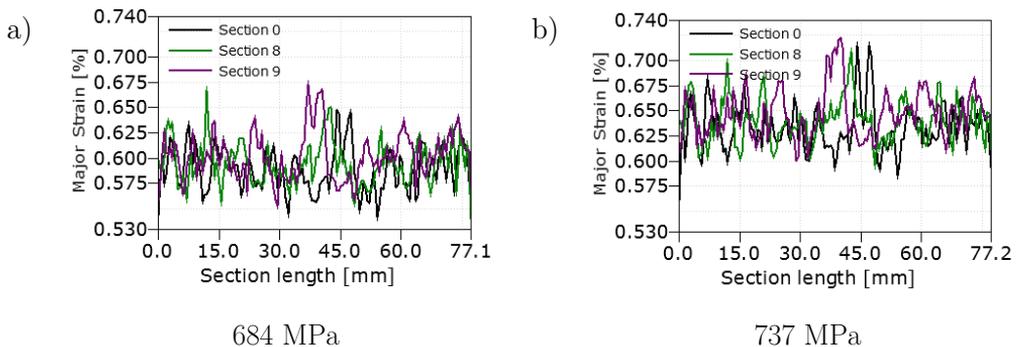


Figure 8.24. Major strain in sections along the length of the sample UT0\_F45 at 684 MPa and 737 MPa.

Figure 8.25-a shows the evolution of the strain concentration at the area of the embedded OF and the averaging area. The strain at the OF area is higher than at the averaging area. Figure 8.25-b confirms this result. Figure 8.25-c shows the quantification of the strain exceedance normalized by the applied

stress as function of stress. In this case, the end of the values dispersion occurred around 250 MPa approximately, not corresponding with the stress at which AE activity became lower (transition between T2 and T3 periods).

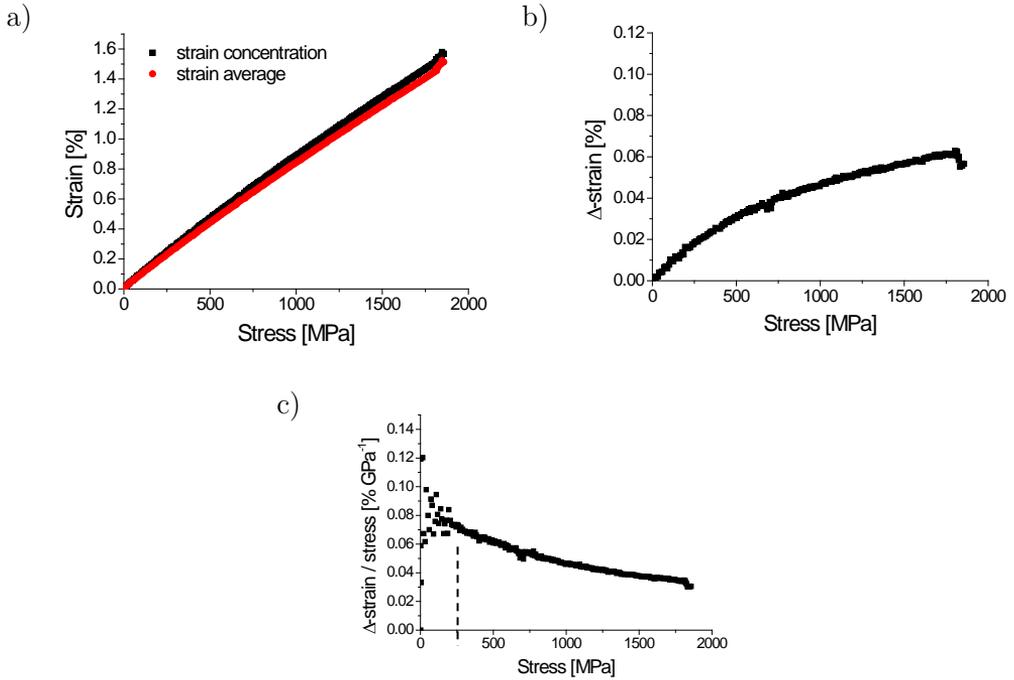


Figure 8.25. UT0\_F45. a) y-strain average and strain concentration as function of stress; b) Quantification of the strain exceedance as function of stress; c) Quantification of the strain exceedance normalized by the applied stress as function of stress.

#### 8.4.4. Sample with embedded OF at 90° (UT0\_F90)

Figure 8.26 shows a detail of the DIC evaluation area. The area of strain concentration corresponds with the OF location. The direction of the longitudinal section shown in Figure 8.29 is also indicated.

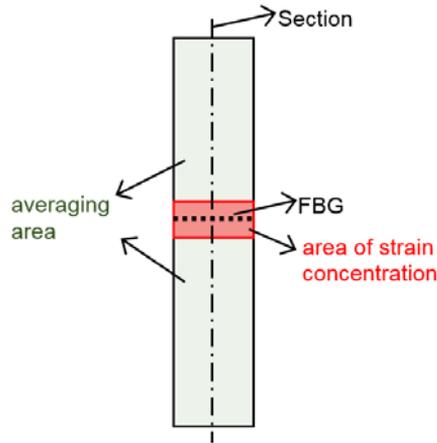


Figure 8.26. Detail of the evaluation area of the sample UT0\_F90, including the concentration strain area, the averaging area and the section considered in Figure 8.29.

Figure 8.27 shows the y-strain field of different stress stages around the transition between the periods T1 and T2. The OF at 90° produced a clearly visible y-strain concentration around the OF location.

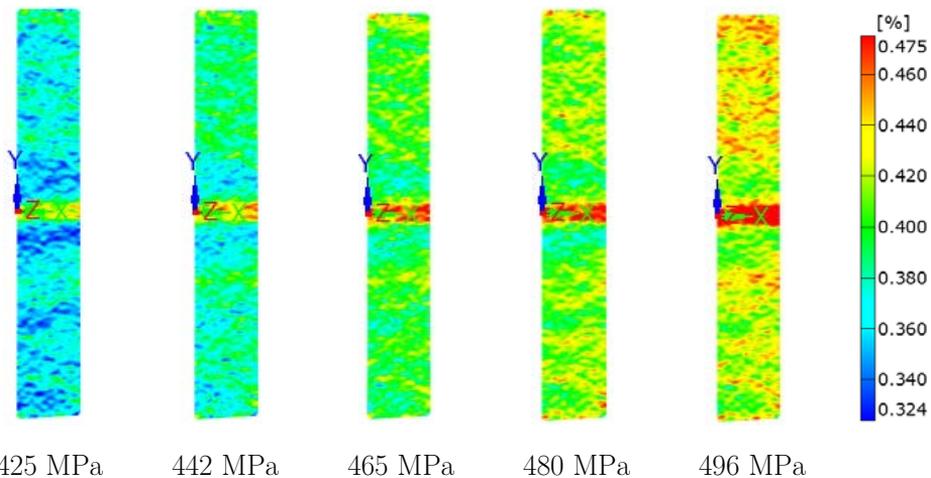


Figure 8.27. y-strain field of the sample UT0\_F90 from 425 MPa to 496 MPa, the transition between periods T1 and T2.

Figure 8.28 shows the y-strain field from 650 MPa to 757 MPa corresponding with the last increasing of the AE cumulated energy, around the

limit of periods T2 and T3. The strain concentration due to the embedded optical fiber is clearly observed in all cases.

The strain along the longitudinal section of the sample (Figure 8.29) shows a clear increasing of the strain around the area of the OF. Effect is very clear on the strain concentration.

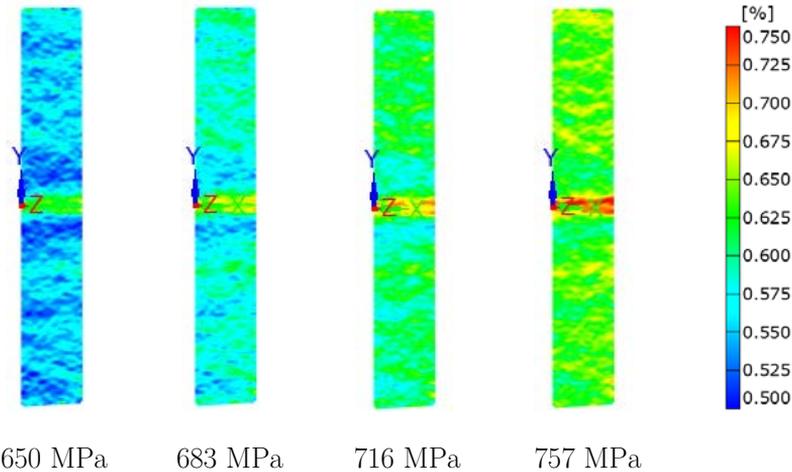


Figure 8.28. y-strain field of the sample UT0\_F90 from 650 MPa to 757 MPa, the transition between periods T2 and T3.

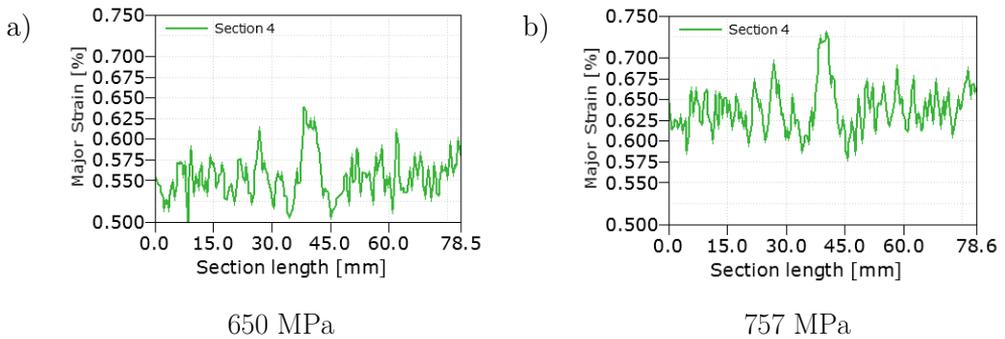


Figure 8.29. Mayor strain in a longitudinal section of the sample UT0\_F90 at 650 MPa and 757 MPa.

The dispersion of the values for the sample UT0\_F90 (Figure 8.30-c) finished around 650 MPa approximately, very close to the stress value where the period T3 started, like for the no OF and  $0^\circ$  OF samples.

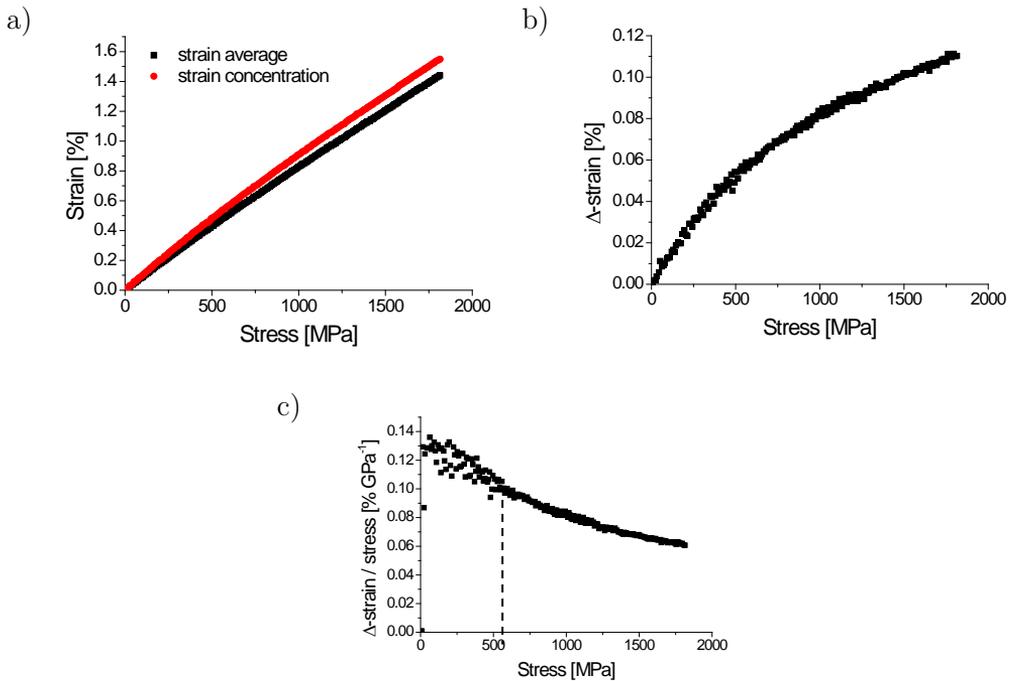


Figure 8.30. UT0\_F90. a)  $y$ -strain average and strain concentration as function of stress; b) Quantification of the strain exceedance as function of stress; c) Quantification of the strain exceedance normalized by the applied stress as function of stress.

## 8.5. Comparison between four types of specimens

Some results were summarized to compare the four types of samples. Table 8.5 shows the % of stress at the transitions between periods T1-T2 and T2-T3 according to the AE activity. It is observed that the % of stress at the transition between the periods T1 and T2 was higher in the samples with OF at 45° and 90° (pretty similar between them) than for the samples with no OF and OF at 0°. The % of stress where the beginning of the T3 occurred was more similar between samples without OF and with 0° OF, and a little bit bigger for the 45° and 90° OF (similar between them). A coincidence was detected between the percentages of stress where the dispersion of the strain exceedance normalized by the load became lower, with the exception of the sample with OF at 45°.

| <b>% stress</b>                                    | <b>UT0_NF</b> | <b>UT0_F0</b> | <b>UT0_F45</b> | <b>UT0_F90</b> |
|--|---------------|---------------|----------------|----------------|
| <b>T1-T2</b>                                       | 6.7           | 17.5          | 24.4           | 25.1           |
| <b>T2-T3</b>                                       | 35.4          | 33.0          | 40.2           | 38.5           |
| <b>Strain exceedance<br/>normalized dispersion</b> | 35.4          | 32.2          | 13.4           | 35.8           |

**Table 8.5.** % of stress at the transitions between periods T1-T2 and T2-T3 and the stress where the dispersion of the strain exceedance normalized became very low.

Figure 8.31 shows the strain concentration of the samples around 1800 MPa (between 95% to 99% of the maximum stress), close to the failure. The strain concentration due to the OF at 45 and 90° is clearly observed which is in good agreement with AE location. The strain in the samples with no OF and OF at 0° were more homogeneous, and similar between them, with a tendency to strain concentration around +3 and -3 cm, in good agreement with the AE observation. The marked area, including the OF at 45 and 90°, was evaluated as area of strain concentration.

For comparison reasons, the same rectangular area, including the OF at 45° and 90°, was evaluated as area of y-strain concentration. The stress exceedance is shown in Figure 8.32 and the stress exceedance normalized in Figure 8.33. The greatest difference between the central area and the averaging area was detected on the sample UT0\_F90, followed by the sample with OF at 45°. The sample with no OF and OF at 0° presented the lower difference, which seems to be logical. In summary, both the AE and DIC shows clearly the bigger influence of the OF placed at 45° and 90°, compared with OF placed at 0°, which shows similar result to the case UT0\_NF.

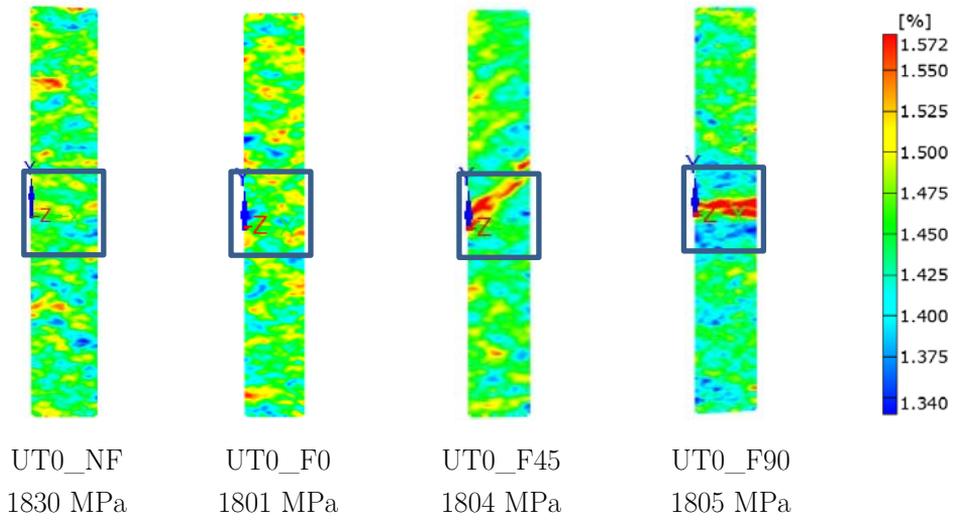


Figure 8.31. y-strain field of the samples close to the failure (1800 MPa).

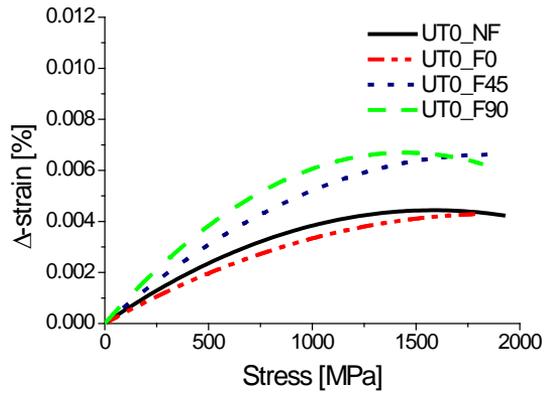


Figure 8.32. Quantification of the y-strain exceedance as function of stress for the samples.

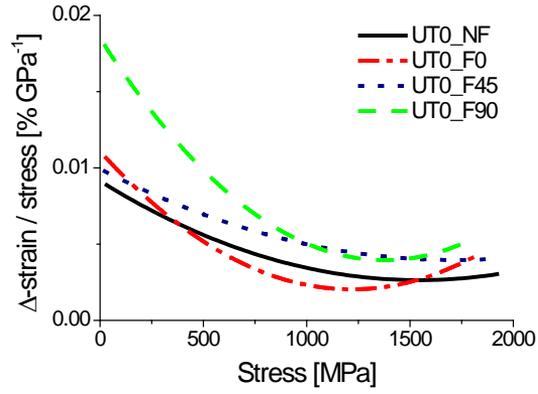


Figure 8.33. Quantification of the y-strain exceedance normalized by the applied stress as function of stress for the samples.



**PARTE C:**  
**EVALUACIÓN DE ADHERENCIA**  
**HORMIGÓN-ACERO GALVANIZADO**  
**EN ENSAYOS DE PULL-OUT**  
**MEDIANTE EL USO DE EMISIÓN**  
**ACÚSTICA**



# **9.**

## **CONCRETE-GALVANIZED STEEL BOND ASSESSED BY ACOUSTIC EMISSION**

This part of the thesis presents an experimental investigation aimed at clarifying the differences in the steel-to-concrete bond behavior between the two kinds of rebars: black steel and hot-dip galvanized steel, by means of the use of the AE method. The differences are identified in terms of the load-slip curves and the AE patterns measured during pull-out tests. A total of 100 pull-out tests were conducted: 50 tests for each type of steel, comprising 10 tests for each age of concrete (7, 14, 21, 28 and 90 days).

### **9.1. Steel-to-concrete bond**

Steel-to-concrete bond is the phenomenon which allows the transfer of longitudinal forces on the steel to the surrounding concrete in a reinforced concrete (RC) or precast-concrete structure. It has been investigated over the past 30 years [84-86], and the resistant mechanisms upon which the steel-to-concrete bond is based are well known. Nowadays, it is commonly accepted that the interaction between the concrete and rebars subjected to pull-out-force is characterized by four stages [87, 88] as shown in Figure 9.1.

In Stage I, the concrete is uncracked and corresponds to bond-stresses ( $\tau$ ) inferior to a limit value ( $\tau_l$ ) that is about 0.2-0.8 times the tensile strength of concrete ( $f_{ct}$ ). In this stage, no slip occurs, and bond efficiency is ensured mostly by chemical adhesion (i.e. capillaries and molecular forces developed in the interface). The end of Stage I coincides with the breakdown of the chemical adhesion that allows the bar to slip.

Stage II starts at bond stresses higher than  $\tau_l$ . This stage involves two transfer mechanisms. The first one is rib bearing, i.e. the wedging of the concrete in the steel ribs. The second one is the friction between the surface of the bar and the surrounding concrete, i.e. a mechanism of a mechanical nature that relies on the introduction of the cement paste into the irregularities of the surface of the steel bars. The contribution of the friction mechanism to bond stress diminishes with interface wear along the sliding surface. Stage II is characterized by the occurrence of microcracks that originate at the tips of the ribs, and which are associated with the rib bearing mechanism. In Stage II the wedging action remains limited —there is no concrete splitting and there are no macrocracks.

Stage III starts at bond-stresses higher than 1-3 times  $f_{ct}$ . In this stage, the maximum bond stress is reached. It is characterized by the formation of longitudinal macrocracks (splitting cracks) that spread radially owing to the wedging action. In the case of large concrete cover, splitting remains limited to a cracked core around the bar (inner ring of concrete), whereas an outer ring of concrete remains undamaged. In this stage, bond stress and stiffness are ensured mostly by interlocking among the steel bar, the concrete struts radiating from the bar, and the undamaged outer ring of concrete.

The final, Stage IV, in the case of large concrete cover, is the bar pull-out. In this stage the force transfer mechanism changes from rib bearing to concrete-concrete friction along the surface where the shear resistance of the concrete keys (i.e. the concrete between ribs) is exhausted. Under continued loading, this surface is smoothed, leading to a further decrease of bond stress.

It is worth noting that these four stages are present, to some extent, all along the bond length. However, the force transfer mechanisms involved act sequentially at a given fixed point of the bond length. The sequence is: first chemical adhesion; next rib bearing and steel-to-concrete friction; and finally concrete-to-concrete friction.

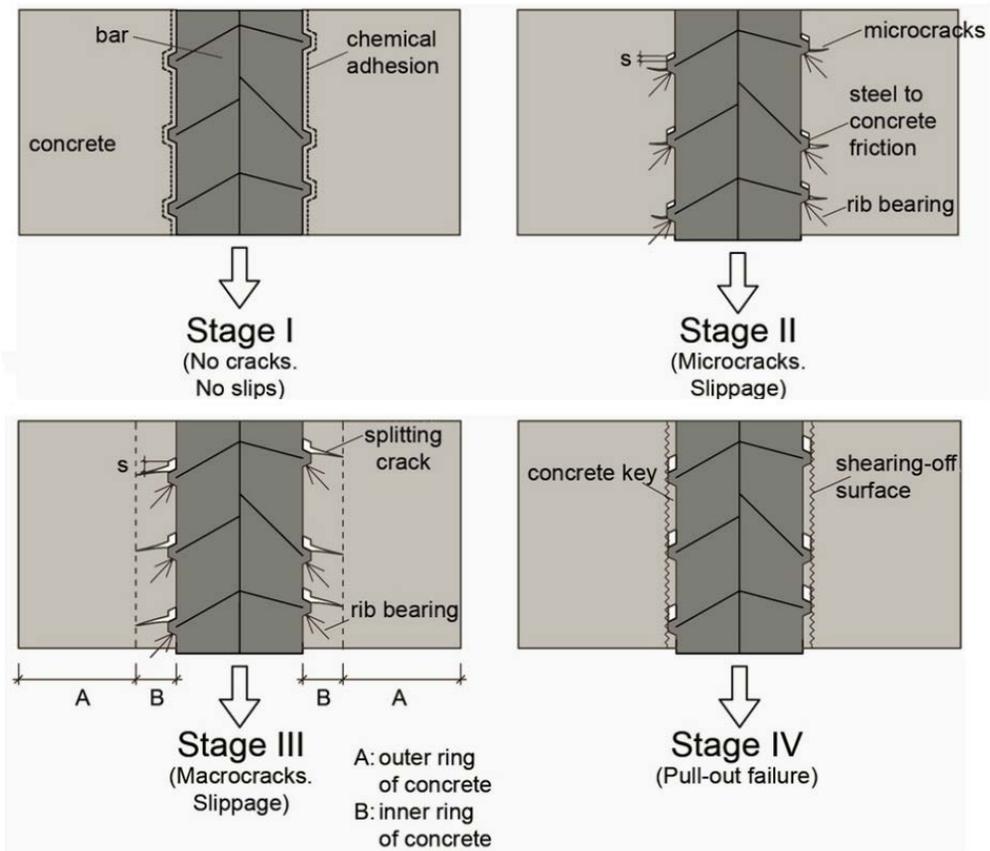


Figure 9.1. Stages of the concrete-steel interaction in pull-out tests.

Steel-to-concrete bond has also been carefully studied in aspects connected with corrosion [89, 90]. It is well known that galvanized steel, used as reinforcement, improves the durability of the reinforced concrete structures in aggressive environments [89-91, 177]. Yet even though bar roughness favors friction, lower pull-out loads are expected in galvanized steel than in black steel.

This does not necessarily mean, however, that bond between concrete and deformed bars made of galvanized steel does not fit valid standards [178, 179].

The acoustic emission (AE) technique has proven to be an effective method for monitoring and studying the behavior of different materials, including reinforced concrete [88, 91-95, 180]. In recent years a number of papers have addressed the suitability of this technique to shed light on the concrete-steel bond phenomenon in pull-out tests [88, 92, 93, 96]. Pull-out tests are not representative of real loading conditions, especially in beams, but they serve as a basis for comparison between bars of different sizes, rib geometry, variations in concrete type, or different kinds of steel bars [90]. Both traditional and quantitative processing can be applied to the AE signals recorded. In [92] and [93], mechanical and traditional AE results obtained in monotonic, cyclic and long-term tests are discussed in terms of bond between the two materials. In other studies [88, 96], the moment tensor inversion theory has been applied to AE signals. Arrival times of acoustic waves allow one to locate cracks in the concrete-steel interface, and to determine the fracture type and orientation of a fault, which is a type of crack. Especially important is the work performed by C.U. Grosse and collaborators from the University of Stuttgart and the Otto-Graf-Institute, related to test set-up and interpretation of both traditional and quantitative AE results.

## 9.2. Experimental set-up

The pull-out experiment with AE shown in Figure 9.2 was first applied at the University of Stuttgart and the Otto-Graf-Institute by Balázs, Grosse and collaborators [92, 93].

Basically, it consists of placing the specimen (a piece of concrete with an embedded bar) with some attached AE sensors into a steel cage, then subjecting the samples to a monotonic loading pull-out test. The cage-specimen system is put into an universal hydraulic machine to provide the proper tensile force to

the bar. The bar embedded in the specimen, crossing the cage via a small hole, is fixed to the machine with a clamp. When the machine is activated to work by tensile forces, the cage and the piece of concrete go up, thus producing a relative displacement ( $s$ ) between the bar and the concrete. During this loading process, an extensometer located at the inferior part of the cage measures the displacement ( $s$ ). At the same time, a pressure transducer located on the hydraulic circuit of the machine allows the load to be recorded. The displacement and load were recorded by the AE equipment as parametric inputs. An *AMSY-5* system from Vallen Systeme GmbH was used to record the AE signals. AE sensors *VS30-V* with flat sensitivity in the low frequency range (20-80 kHz) were used jointly with integrated 46 dB gain preamplifiers *AEP4H*. The sensors and preamplifiers used were provided by Vallen Systeme GmbH. In Figure 9.3, a sample with sensors placed in the test machine is shown. The AE detection threshold was set at 40 dB; 25 kHz high-pass and 180 kHz low-pass filters were used during AE acquisition to avoid mechanical (low frequency) and electromagnetic (high frequency) noise. For waveforms recording, a sampling frequency of  $5 \times 10^6$  samples/s was used and 2048 data were stored per each signal. Thus, as 200 samples were used as pretrigger, the final page length was 409.6  $\mu$ s for each recorded signal. Due to the small size of the concrete cubes, many reflections of AE waves were expected to be recorded along with the AE signals generated by the pull-out mechanism. To remove the effect of these reflections, a filter based on location was applied during the data analysis. More precisely, a four sensors location processor was created and only the events located inside the 90% of distance from the center of the sample were considered as generated by the pull-out mechanism.

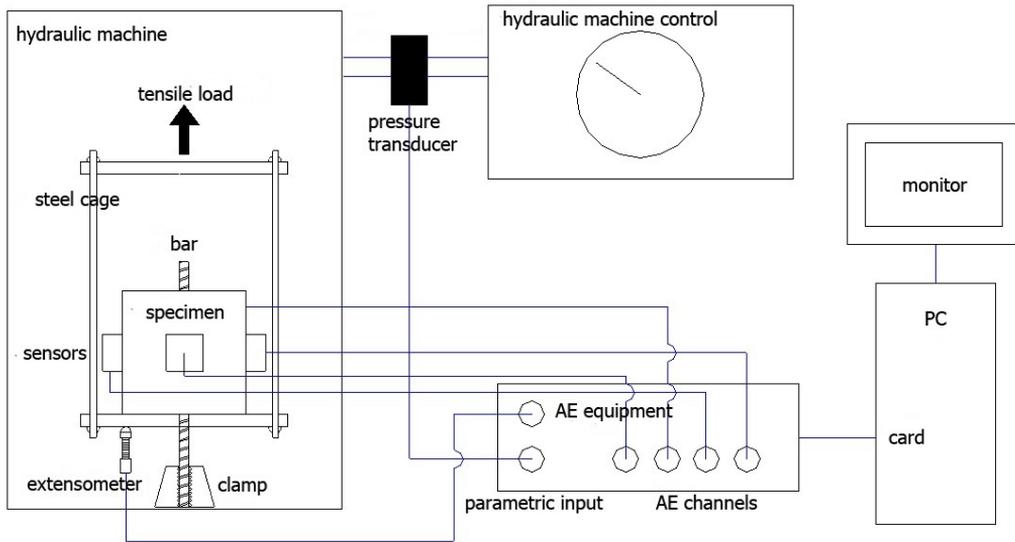


Figure 9.2. Diagram of the pull-out experiment monitored by AE.



Figure 9.3. Sample with AE sensors placed in the test machine.

### 9.3. Description of the test specimens

The test specimens consisted of concrete cubes sized  $200 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$  with a single central deformed bar. All bars had a nominal diameter ( $\phi$ ) of 12 mm and identical rib geometry. The bond length was limited to 50 mm (1/4 of the total cube side), and it was located in the middle of the concrete cube (see Figure 9.5-a). The bond between steel and concrete in the remaining 150 mm of bar was prevented by covering this length of the bar with a plastic tube (Figure

9.5-b). The nominal strength of the steel bar was  $500 \text{ N/mm}^2$ . The minimum height of the rib was  $0.85 \text{ mm}$  and the rib spacing was  $16.14 \text{ mm}$ . Two kinds of steel were used: black steel (i.e. steel without coating) and hot-dip galvanized steel (i.e. with a coating of Zn). The second kind of reinforcement was obtained by galvanizing the same black steel, in a process that included successive stages: degreasing bath at  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ , elimination of iron oxide by immersion in a water solution of 15% hydrochloric acid at  $35 \text{ }^\circ\text{C}$ , bath in water-diluted ammonium chloride at  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ , immersion in a Zn bath at  $450 \text{ }^\circ\text{C}$  and air cooling.

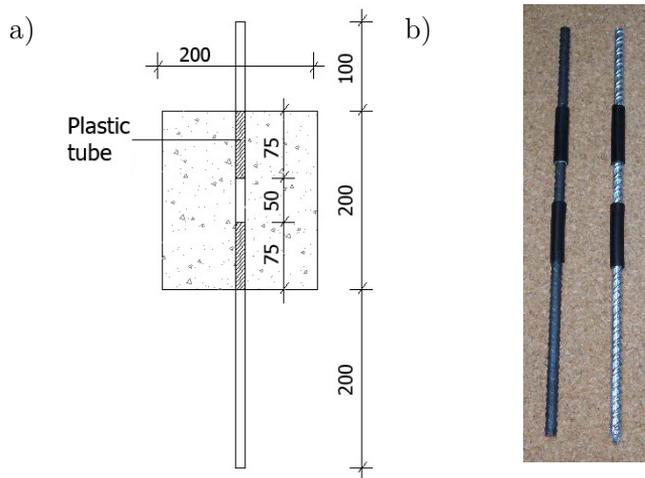


Figure 9.4. a) Scheme of the samples reinforced with the bar, distances in mm; b) Samples with a plastic tube to prevent the bond between steel and concrete, black steel (left) and galvanized steel (right).

Concrete was made by mixing together portland cement, fine aggregate ( $0/4 \text{ mm}$ ), coarse aggregate ( $4/12.5 \text{ mm}$ ) and the superplasticizer additive *CONPLAST SP-337* (FORSROC EUCO, Spain) in the following weight proportions:  $1:3.42:2.78:5.8 \cdot 10^{-3}$ . The water-cement ratio was 0.54. Specimens were prepared on a table specially built for this experiment, where concrete could easily be prepared and vibrated in a few seconds. Finally, specimens were fog cured at a constant temperature of  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  in a damp room. Five curing times (concrete ages) were considered for each kind of steel: 7, 14, 21, 28 and 90 days. For each age and kind of steel, 10 specimens were tested, meaning a total of 100

test specimens. Moreover, the compressive strength of the concrete was measured on cylindrical samples (150 mm diameter and 300 mm height). The evolution of the concrete compressive strength ( $f_c$ ) with the age is shown in Figure 9.5. The tensile strength ( $f_{ct}$ ) can be estimated from  $f_c$  by using empirical equations from the Building Code Requirements for Structural Concrete (American Concrete Institute) [181], giving 3.1, 3.3, 3.4, 3.5 and 3.8 MPa at respective concrete ages of 7, 14, 21, 28 and 90 days. For normal weight concrete, the average tensile strength  $f_{ct}$  is approximately:

$$f_{ct} = 0.56\sqrt{f_c} \tag{9.1}$$

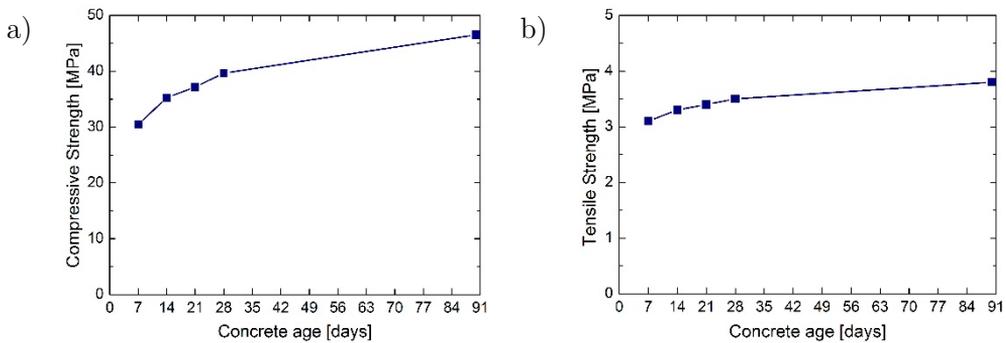


Figure 9.5. Strength versus age of concrete. a) Compressive strength; b) Tensile strength.

## 9.4. Results and discussion

### 9.4.1. Bond stress versus slip curves

Following is a discussion of the main features of the bond stress-slip curves at different ages of the concrete, for both kinds of deformed bars.

#### 9.4.1.1. Mechanical behavior at 28 days

Figure 9.6-a and b show the relationship between bond stress ( $\tau$ ) and the slip ( $s$ ) obtained, respectively, for the specimens with black steel and galvanized steel when the age of concrete was 28 days. The peak bond stress ( $\tau_{max}$ ) and

the corresponding slip ( $s_{\tau,max}$ ) were calculated for each curve; the mean values,  $\bar{\tau}_{max}$  and  $\bar{s}_{\tau,max}$ , and the corresponding standard deviations,  $\sigma_{\tau,max}$  and  $\sigma_{s,max}$ , are shown in Table 9.1. The slope ( $k$ ) of the tangent to each curve at  $\tau = 3f_{ct}$  was also determined, and the mean stiffness ( $\bar{k}$ ) and corresponding standard deviation ( $\sigma_k$ ) are shown in Table 9.1. The value  $\tau = 3f_{ct}$  is the upper bound of the range of  $\tau$  attributed in the literature to the boundary between Stages II and III. In calculating the aforementioned values, the two curves whose peak bond stress ( $\tau_{max}$ ) was clearly below that of the rest were disregarded. Comparing the results for black steel with those obtained for galvanized steel, it is seen that the mean peak bond stress ( $\bar{\tau}_{max}$ ) and the mean stiffness ( $\bar{k}$ ) are respectively 1.26 and 1.44 times greater for the black steel than for the galvanized steel. Meanwhile, the mean slip at maximum bond stress,  $\bar{s}_{\tau,max}$ , is approximately the same (i.e. only 1.05 times larger for galvanized steel than for black steel).

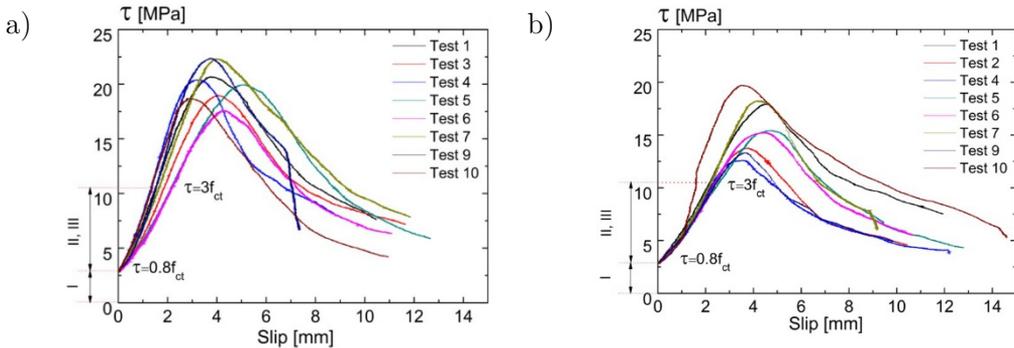


Figure 9.6. Bond stress vs. slip at 28 days. a) Specimen with black steel; b) Specimen with galvanized steel.

|                     |                           | Concrete age |       |       |       |       |
|---------------------|---------------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
|                     |                           | 7            | 14    | 21    | 28    | 90    |
| Black<br>steel      | $\bar{\tau}_{max}$ (MPa)  | 15.79        | 17.97 | 19.67 | 20.01 | 21.54 |
|                     | $\sigma_{\tau,max}$       | 1.65         | 1.90  | 1.57  | 1.45  | 3.07  |
|                     | $\bar{s}_{\tau,max}$ (mm) | 3.38         | 3.74  | 3.46  | 3.85  | 4.64  |
|                     | $\sigma_{s,max}$          | 0.42         | 0.23  | 0.40  | 0.64  | 0.81  |
|                     | $\bar{k}$ (MPa/mm)        | 5.05         | 5.58  | 5.91  | 5.84  | 5.73  |
|                     | $\sigma_k$                | 1.34         | 1.40  | 0.86  | 1.01  | 0.92  |
| Galvanized<br>steel | $\bar{\tau}_{max}$ (MPa)  | 12.91        | 15.76 | 16.64 | 15.82 | 18.29 |
|                     | $\sigma_{\tau,max}$       | 2.20         | 1.36  | 1.64  | 2.59  | 2.77  |
|                     | $\bar{s}_{\tau,max}$ (mm) | 4.01         | 4.23  | 4.31  | 4.05  | 5.92  |
|                     | $\sigma_{s,max}$          | 0.62         | 0.48  | 0.35  | 0.51  | 1.34  |
|                     | $\bar{k}$ (MPa/mm)        | 2.85         | 3.87  | 4.14  | 4.06  | 3.71  |
|                     | $\sigma_k$                | 0.80         | 0.46  | 0.36  | 1.05  | 0.80  |

Table 9.1. Mechanical properties of steel-to-concrete bond.

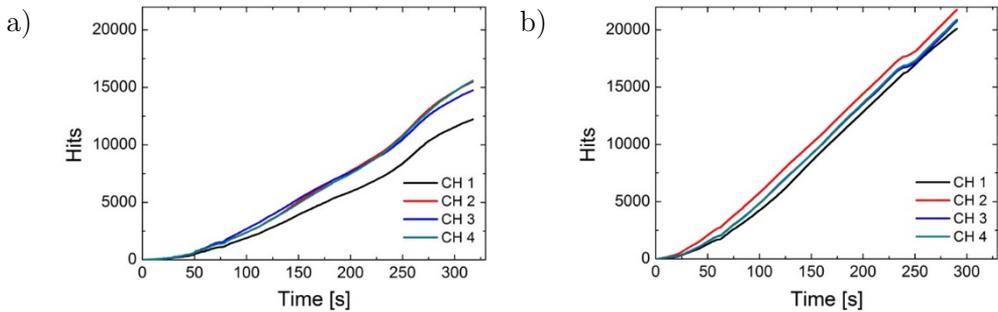
#### 9.4.1.2. Mechanical behavior at different ages

The ratio of mean maximum stress ( $\bar{\tau}_{max}$ ) for black and for galvanized steel reached its maximum value at 28 days (1.26), and fluctuated slightly (between 1.14 and 1.22) for other ages without a clear tendency to increase or decrease with concrete age. The ratio of the mean stiffness ( $\bar{k}$ ) for black and for galvanized steel reached its maximum value at 7 days, but thereafter remained almost constant, within the range of 1.42-1.54. As for the ratio of the mean slip ( $\bar{s}_{\tau,max}$ ) for galvanized and black steel, the minimum (1.05) is reached at 28 days, and for the other ages it ranges from 1.13 to 1.27. In sum, irrespective of the age of the concrete, the maximum stress ( $\bar{\tau}_{max}$ ) and stiffness ( $\bar{k}$ ) are always larger for black than for galvanized steel, whereas the opposite occurs for the slip ( $\bar{s}_{\tau,max}$ ). There is no clear tendency of enhancement or relaxation of the differences between black and galvanized steel with the age of the concrete.

## 9.4.2. Acoustic emission results

### 9.4.2.1. AE activity at 28 days

This subsection presents, in detail, the AE results of two test specimens having the same concrete age (28 days) and different types of steel (black and galvanized). The AE showed similar patterns in each group of test specimens with the same type of steel and concrete age. To discuss the influence of the concrete age, results of test specimens of 7 and 90 days are presented in the next subsection. Figure 9.7 shows the cumulative AE hits recorded by each of the four channels for a test specimen with black steel (a) and for a test specimen with galvanized steel (b). As seen, the behavior is similar for the four channels, and therefore the results registered in just one of the channels (channel 1) will be discussed.



**Figure 9.7.** Cumulative AE hits in each channel, for two specimens with 28 days concrete-age and different types of steel. a) Black Steel; b) Galvanized steel.

A preliminary study was carried out in order to select the most appropriate AE parameters. Finally, the AE hits were chosen as the deciding parameter because they permitted the different stages of the concrete-steel interaction to be distinguished. Figure 9.8 depicts the history of AE hits recorded by one of the channels in one test specimen with black steel and Figure 9.9 shows another one with galvanized steel. In both graphs, the history of bond stress is superimposed with a continuous line.

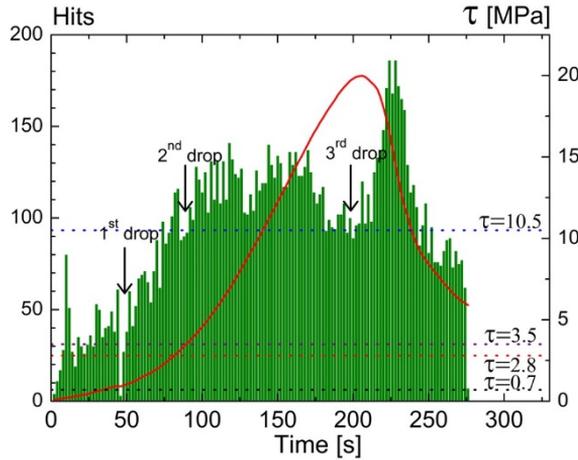


Figure 9.8. AE activity of one specimen with black steel and concrete age 28 days.

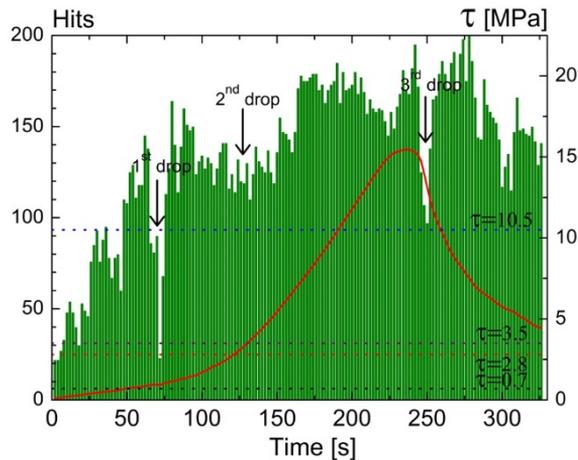


Figure 9.9. AE activity of one specimen with galvanized steel and concrete age 28 days.

As mentioned in the section 9.1, during Stage I, the only mechanism involved is chemical adhesion, which ends when the bond stress is between  $0.2f_{ct}$  and  $0.8f_{ct}$ , corresponding to bond stresses ( $\tau$ ) between 0.7 MPa and 2.8 MPa for the 28-day concrete. These values of  $\tau$  are represented in Figure 9.8 and Figure 9.9 with two horizontal dotted lines. As can be seen in these Figures, before  $\tau$  enters the range  $0.7 \text{ MPa} < \tau < 2.8 \text{ MPa}$  there is AE activity that can be attributed to the progressive degradation of the chemical adhesion. In the time interval when  $0.7 \text{ MPa} < \tau < 2.8 \text{ MPa}$ , (i.e. between  $t=35 \text{ s}$  and  $t=85 \text{ s}$  for black

steel, and between  $t=50$  s and  $t=125$  s for galvanized steel), there is a sudden drop of the AE activity (referred to as “first drop in AE activity” hereafter) that can be attributed to the complete breakdown of chemical adhesion. When the mechanism of chemical adhesion is exhausted, the bar starts to slip. During this short time span when the bar is slipping inside the concrete, the chemical mechanism finishes and the subsequent mechanisms have not yet begun to work; this most likely explains the short and almost complete “silence” observed in the AE activity. The drop in AE hits is clearly observed in both black and galvanized steel, but the number of hits up to this drop is markedly larger in the galvanized steel than in black steel. This can be attributed to the fact that the chemical adhesion between the zinc and cement paste is relatively stronger than that between the black steel and the paste. Thus, “breaking” this chemical adhesion generates more AE in the galvanized steel than in black steel.

Following this first sudden drop in AE activity, the hit rate increases suddenly, which can be associated with the onset of Stage II, when two mechanisms start to work to sustain the applied force: steel-to-concrete friction and rib bearing. Again, Stage II is characterized by the development of microcracks in the concrete (rib bearing) and steel to concrete friction, and both phenomena explain the high AE activity. However, the signature of each phenomenon is expected to be significantly different. Microcracks are expected to generate higher amplitude signals, whereas AE hits due to friction are expected to have longer duration. Past research has identified the end of Stage II with values of  $\tau$  in the range  $f_{ct} < \tau < 3f_{ct}$  that correspond in this study to  $3.5 \text{ MPa} < \tau < 10.5 \text{ MPa}$ . This range of  $\tau$  is also identified in Figure 9.8 and Figure 9.9 with horizontal dotted lines, and corresponds to a time interval of approximately 90-140 s for black steel (Figure 9.8) and 125-185 s for galvanized steel (Figure 9.9). During this time interval, there is another evident drop in the AE hits rate (referred to as “second drop in AE activity” hereafter) that occurs very close to the instant when  $\tau=3.5 \text{ MPa}$  in both black and galvanized steel. It is worth noting that the drops in AE activity are identified not by observing the history of hits alone, but in relation to the history of bond stress. However, a

clear difference is observed between the two types of steel—in the case of galvanized steel, the distribution of the AE hits between the first and second drops of AE activity is quite uniform and reaches maximum values at the beginning of Stage II, whereas in black steel, the number of AE hits increases progressively and the maximum is attained at the end of Stage II. A reasonable explanation for this behavior can be inferred by recalling two facts already mentioned in the Introduction: (1) the formation of microcracks is associated with the rib-bearing mechanism, and (2) the contribution of the friction mechanism to the bond stress diminishes with interface wear along the sliding surface. The contribution of the friction mechanism is much lower for the galvanized steel than for the black steel, because the surface of the bar is less irregular in the former. As a result, in the case of galvanized steel, the pull-out force must be sustained from the very beginning of Stage II basically by the rib-bearing mechanism, and this causes the early appearance of microcracks that manifests as numerous AE hits from the onset of Stage II. In the case of black steel, at the beginning of Stage II, the steel-concrete interface is still not deteriorated, and the contribution of the steel-to-concrete friction mechanism is thus much larger than in the case of galvanized steel; this reduces the forces to be mobilized through the rib-bearing mechanism and results in less microcracking. In turn, the progressive interface wear in the case of black steel reduces the contribution of the steel-to-concrete friction mechanism and increases the forces to be sustained by the rib-bearing mechanism, thereby gradually increasing the microcracking and the subsequent number of AE hits.

As previously expounded, the second drop in AE activity occurs in the range of  $\tau$  that the literature attributes to the transition between Stage II and Stage III. Stage III, containing the peak bond strength, is characterized by the formation of splitting cracks (macrocracks). The development and growth of these macrocracks would explain the large number of AE hits observed in Figure 9.8 and Figure 9.9 from the second drop in AE activity up to a new drop (referred to as “third drop in AE activity” hereafter) that takes place very close to the instant when the peak bond stress is reached (approximately at instant

200 s for black steel and at instant 240 s for galvanized steel). This third drop in AE activity is most likely due to a change in the load-bearing mechanism, which moves from rib bearing to concrete-concrete friction, a change identified in the literature as the end of Stage III. In this study, the third drop in AE activity is associated with the end of Stage III, and it can be more clearly seen in black steel (Figure 9.8) than in galvanized steel (Figure 9.9). In the latter, two AE drops occur almost simultaneously. A significant difference in the AE pattern observed in black steel in comparison with galvanized steel during Stage III is that the number of AE hits in the latter is substantially larger than in the former. This may also be attributed to the lesser contribution of the steel-to-concrete friction forces.

Finally, after the third drop in AE activity, there is a sudden increase in the number of AE hits that can be associated with the inception of the concrete-to-concrete friction mechanism. It is followed by a steady decline of AE activity, most likely due to the progressive smoothing of the concrete-concrete interface.

#### **9.4.2.2. AE activity at different ages**

The AE activity at 7 and at 90 days of one specimen of each type of steel is shown in Figure 9.10 and Figure 9.11, respectively. In both figures, the history of bond stress is also plotted with a solid line. The three drops in AE activity identified in the previous subsection for 28-day concrete, and associated with the transitions between Stages I, II, III and IV, can be more clearly identified at the age of 90 days than at 7 days. In fact, at 7 days the transition between Stages I and II is not clear. Yet in the concrete aged 90 days, the drops in AE activity are more pronounced than at 28 days. A likely explanation is that the mechanical properties of concrete (compressive and tensile strength, mainly) increase with age, whereas the resisting mechanisms (chemical adhesion, rib bearing, steel-to-concrete friction and concrete-to-concrete friction) involved in the steel-to-concrete bond phenomenon improve their capacity over time. As a result, breaking them generates larger AE activity with increasing concrete age, and subsequently more pronounced changes in AE activity between the short

intervals of time when one mechanism ceases to act and the following starts to sustain the pulling force.

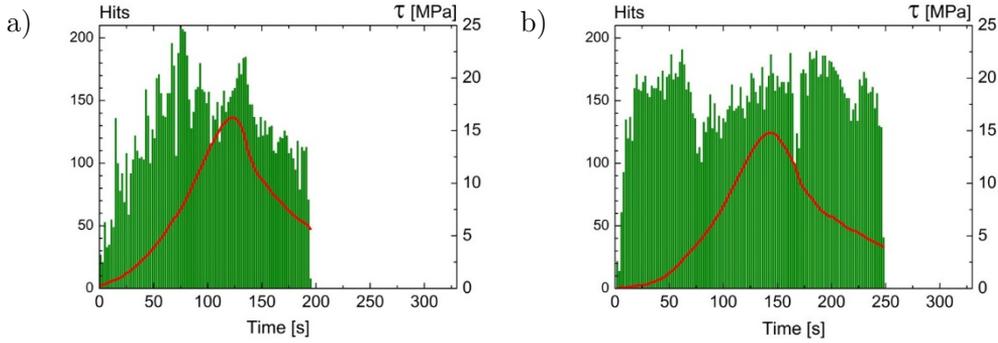


Figure 9.10. AE activity at 7 days. a) Specimen with black steel; b) Specimen with galvanized steel.

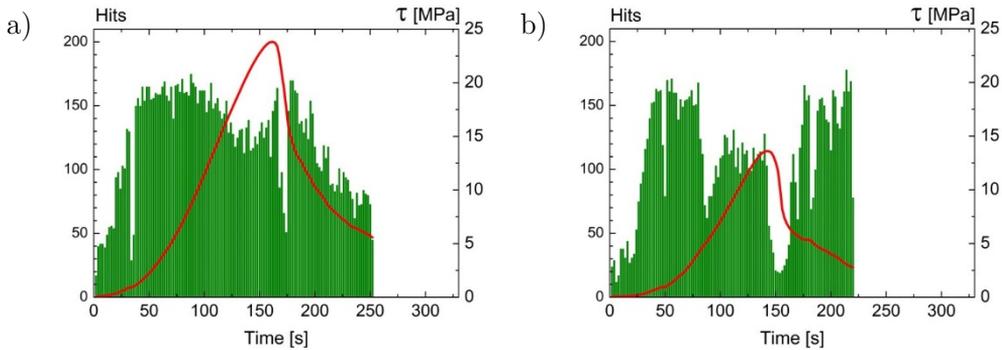


Figure 9.11. AE activity at 90 days. a) Specimen with black steel; b) Specimen with galvanized steel.

### 9.4.2.3. Amplitude versus duration of AE signals

Figure 9.12 shows the amplitude versus duration of the AE signals recorded in one of the channels for one specimen with black steel (Figure 9.12-a) and for another with galvanized steel (Figure 9.12-b), both tested at the age of 28 days. In these figures, different colours and symbols depict the separate stages discussed in previous sections. The points corresponding to Stage I are represented by triangles, the points corresponding to Stage II and III by circles, and those corresponding to Stage IV by squares. In general, it can be seen that

amplitude results are comparable for the two kinds of bars. However, it seems to be clear that duration is longer for galvanized steel, especially at lower values of amplitude. A possible explanation for this longer duration is the slipping of the galvanized bar and the consequent wearing of the surfaces. This result can be justified by the effect of slipping of the bar and the consequent wearing of the interface surfaces. Because galvanized bars experience more slipping than black ones, more wearing of the interface surfaces occurs. This phenomenon generates AE signals with longer durations and lower amplitudes; this fact can be observed and is confirmed by comparing Figure 9.12-a and b.

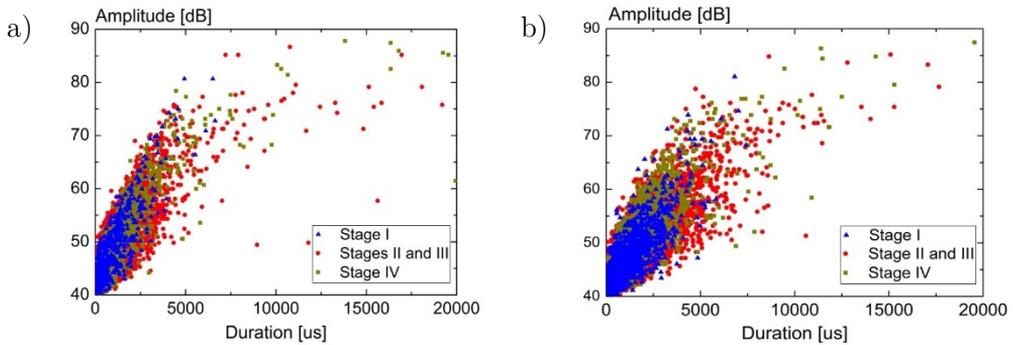


Figure 9.12. Amplitude versus duration of the AE signals recorded for a 28 day test specimen. a) Samples with black steel; b) Samples with galvanized steel.

## 9.5. Conclusions

An experimental investigation of the steel-to-concrete bond behavior of two types of deformed bars (black steel and hot-dip galvanized steel) at different concrete ages (7, 14, 21, 28 and 90 days) was conducted to identify possible differences. Altogether, 100 pull-out tests were conducted; for each one, the applied force, the slip of the bar and the acoustic emission due to concrete cracking were continuously measured. Analysis of the test results leads to the following conclusions:

1. At 28 days, the specimens with reinforcing bars made with black steel showed a maximum bond stress ( $\bar{\tau}_{max}$ ) and an initial tangent stiffness ( $\bar{k}$ )

that were 1.26 and 1.44 times higher, respectively, than those of the specimens with bars made of galvanized steel. The slip ( $\bar{s}_{\tau,max}$ ) corresponding to ( $\bar{\tau}_{max}$ ) was almost the same for the two types of steel. For concrete ages different than 28 days the same pattern was observed —that is, the maximum stress ( $\bar{\tau}_{max}$ ) and stiffness ( $\bar{k}$ ) were consistently larger for black than for galvanized steel, whereas the opposite occurred for the slip ( $\bar{s}_{\tau,max}$ ). However, there is no clear tendency of enhancement or relaxation of the differences between black and galvanized steel with increasing concrete age.

2. Past research characterized the interaction between the concrete and a bar subjected to pull-out force as comprising four different stages. This study shows that the transitions between stages coincide with sudden drops in the number of acoustic emission hits, and can be identified by measuring the AE activity. The drop in AE activity is more pronounced, and therefore more clearly identified, with increasing concrete age.

3. Clear differences can be observed in the pattern of AE activity measured in black steel and in galvanized steel. These differences can be attributed to the different contribution of the steel-to-concrete friction mechanism to sustain the pull-out force. Because the contribution of this mechanism is smaller in the case of galvanized steel than in black steel, the number of AE hits released in the galvanized steel is, in general, much larger.

# 10.

## CONCLUSIONS

The applicability of vibration and acoustic emission techniques to assess damage in different materials associated with three different scenarios in the construction and civil engineering has been investigated in this Doctoral Thesis. Main conclusions in each part of the Thesis are the following:

### **Part A.- Damage assessment on WPD dampers**

- A strategy to reduce the number of data required to implement a spectral algorithm to calculate the previously developed called Area Damage Index (ADI) of seismic dampers in a low-cost hardware platform, with much lower performance than the laboratory system, has been proposed and validate. Results demonstrate that is totally possible to extract reliable information for calculation of the damage index using only 90% less number of data that used with the lab equipment, thus reducing by 81.25% the computing time. This optimization allows the implementation of the algorithm in a low-cost hardware platform like *Picocom*. By using this platform, the system with expensive and specialized equipment now available in the lab, will become in the future a commercial application with use in real buildings with hysteretic dampers. This application will allow to carry out the vibration tests and

know the damage index of the dampers in real-time even by remote request. Strategy can be applied to other fields and SHM scenarios.

- Two new indices called Wavelet Energy Ratio (WER) and Relative Wavelet Energy Entropy (RWEE) have been proposed to quantify the damage on hysteretic dampers subjected to seismic-type dynamic loadings. The WER index is based on wavelet package decomposition of the signals obtained from simple vibration tests. It is an only-output algorithm calculated at the fifth resonance frequency of the specimen. The RWEE index is based on the use of the wavelet package decomposition of the vibration signals and entropy. It is calculated on the whole frequency range of the output signals. The validity of the WER and RWEE indices have been assessed experimentally by means the seismic tests. It was found that both proposed damage indices correlated very well with the extensively calibrated mechanical ID index, so this enables one to assess the damage of hysteretic dampers without resorting to the cumbersome and expensive instrumentation required for in-situ continuous monitoring of the dampers.
- A kNN classifier has been implemented to automatically decide the level of damage of the dampers using the signals obtained from the vibration tests. The data base is composed by the three damage indices (ADI, WER and RWEE), which can be used separately or jointly.

#### **Part B.- Damage assessment in carbon fiber reinforced polymer laminates (CFRP).**

- A new procedure to evaluate, in real-time, the progress of damage mechanisms in CFRP composite plates using the acoustic emission technique has been proposed. It entails an algorithm based on an appropriate separation between the S<sub>0</sub> and A<sub>0</sub> Lamb modes in the AE signals. Firstly, two hardware filters were used during acquisition: LF=[20-55] kHz to capture mainly the A<sub>0</sub> mode, and HF=[125-660] kHz

to capture mainly the S0 mode. Secondly, by comparing the strength of the AE signals in the two frequency bands in very narrow windows, it was possible to classify AE events as outside or inside the plane, and thus segregate the delamination mechanism from other ones. Thirdly, the Spectral Ratio made it possible to separate the AE events coming from matrix micro-cracking and the fiber breaking mechanisms. The use of very narrow temporal windows is an original contribution of this work, and allows for a comparative evaluation of the genuine strength of S0 and A0, significantly mitigating the influence of reflections and other secondary propagation effects. Sensors were also properly selected to ensure the necessary sensitivity in the HF and LF ranges used in this experimental work.

- The influence of an embedded optical fiber in unidirectional CFRP composites during monotonic tensile tests has been investigated using the AE and Digital Image Correlation methods. In general, good agreement of the observations carried out with both methods (AE and strain concentration) was obtained, showing clearly the bigger influence of the OF placed at 45° and 90°, compared with OF placed at 0°, which shows a similar behavior to the case with no OF inclusion.

### **Part C.- Concrete-galvanized steel pull-out bond assessed by acoustic emission**

An experimental investigation of the steel-to-concrete bond behavior of two types of deformed bars (black steel and hot-dip galvanized steel) at different concrete ages (7, 14, 21, 28 and 90 days) was conducted to identify possible differences. Analysis of the test results leads to the following conclusions:

- At 28 days, the specimens with reinforcing bars made with black steel showed a maximum bond stress  $\bar{\tau}_{\max}$  and an initial tangent stiffness  $\bar{k}$  that were 1.26 and 1.44 times higher, respectively, than those of the

specimens with bars made of galvanized steel. The slip  $\bar{s}_{\tau,\max}$  corresponding to  $\bar{\tau}_{\max}$  was almost the same for the two types of steel.

For concrete ages different than 28 days the same pattern was observed—that is, the maximum stress  $\bar{\tau}_{\max}$  and stiffness  $\bar{k}$  were consistently larger for black than for galvanized steel, while the opposite occurred for the slip  $\bar{s}_{\tau,\max}$ . However, there is no clear tendency of enhancement or relaxation of the differences between black and galvanized steel with increasing concrete age.

- Past research characterized the interaction between the concrete and a bar subjected to pull-out force as comprising four different stages. This study shows that the transitions between stages coincide with sudden drops in the number of acoustic emission hits, and can be identified by measuring the AE activity. The drop in AE activity is more pronounced, and therefore more clearly identified, with increasing concrete age.
- Clear differences can be observed in the pattern of AE activity measured in black steel and in galvanized steel. These differences can be attributed to the different contribution of the steel-to-concrete friction mechanism to sustain the pull-out force. Since the contribution of this mechanism is smaller in the case of galvanized steel than in black steel, the number of AE hits released in the former is, in general, much larger.

## Bibliografía

- [1] H. Sohn, C. Farrar, F. Hemez, D. Shunk, D. Stinematos, B. Nadler and J. Czarnecki, A review of structural health monitoring literature: 1996-2001, Technical report, Los Alamos National Laboratory, LA-13976-MS, 2004.
- [2] A. Benavent-Climent, “An energy-based damage model for seismic response of steel structures,” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 36(8), pp. 1049-1064, 2007.
- [3] A. Benavent-Climent, L. Morillas and J. Vico, “A study on using wide-flange section web under out-of-plane flexure for passive energy dissipation,” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 40, pp. 473-490, 2011.
- [4] L. Romo-Melo, A. Benavent-Climent, L. Morillas, D. Escolano-Margarit and A. Gallego, “Health monitoring of a new hysteretic damper subjected to earthquakes on a shaking table,” *Earthquakes and Structures*, vol. 8(3), pp. 485-509, 2015.
- [5] A. Benavent-Climent, E. Oliver-Saiz and J. Donaire-Avila, “New connection between reinforced concrete building frames and concentric braces: Shaking table tests,” *Engineering Structures*, vol. 8, pp. 485-509, 2015.
- [6] A. Benavent-Climent, A. Gallego, L. Romo-Melo and L. Morillas, “Health monitoring of web plastifying dampers subjected to cyclic loading through vibration tests,” *Structural Health Monitoring*, vol. 13(1), pp. 33-49, 2015.
- [7] A. Benavent-Climent, L. Morillas and D. Escolano-Margarit, “Seismic performance and damage evaluation of a reinforced concrete frame with hysteretic dampers through shake-table tests,” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 43, pp. 2399-2417, 2014.

- [8] V. Karbhari and F. Ansari, Eds., Structural Health Monitoring of civil infrastructure systems, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 2009.
- [9] K. Worden, C. Farrar, G. Manson and G. Park, “The fundamental axioms of structural health monitoring,” *Philosophical Transactions of the Royal Society: Mathematical, Physical & Engineering Sciences*, vol. 463(2082), pp. 1639-1664, 2007.
- [10] K. Worden and G. Manson, “Experimental validation of a structural health monitoring methodology. Part I. Novelty detection on a laboratory structure,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 259(2), pp. 323-343, 2003.
- [11] A. Gallego, A. Benavent-Climent and L. Romo-Melo, “Piezoelectric sensing and non-parametric statistical signal processing for health monitoring of hysteretic dampers used in seismic-resistant structures,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vols. 60-61, pp. 90-105, 2015.
- [12] L. Romo, Diagnóstico de daño en disipadores de energía histeréticos usados como sistema de control pasivo en estructuras sismorresistentes, mediante técnicas de procesamiento digital de señales de vibraciones, University of Granada (Spain): PhD Thesis, 2012.
- [13] S. Doebling, C. Farrar, M. Prime and D. Shevitz, Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A literature review, Los Alamos National Laboratory LA-13070-MS, 1996.
- [14] S. Doebling, C. Farrar, M. Prime and D. Shevitz, “A review of damage identification methods that examine changes in dynamic properties,” *The Shock and Vibration Digest*, vol. 30(2), pp. 91-105, 1998.

- [15] F. Kopsaftopoulos and S. Fassois, "Vibration based health monitoring for a lightweight truss structure: Experimental assessment of several statistical time series methods," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 24(7), pp. 1977-1997, 2010.
- [16] O. Salawu, "Detection of structural damage through changes in frequency: a review," *Engineering Structures*, vol. 19(9), pp. 718-723, 1997.
- [17] S. Fassois and J. Sakellariou, "Time series methods for fault detection and identification in vibrating structures," *The Royal Society-Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 365, pp. 411-448, 2007.
- [18] A. Raich and T. Liskai, "Multi-objective optimization of sensor and excitation layouts for frequency response function-based structural damage identification," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 27(2), pp. 95-117, 2012.
- [19] J. Bendat and A. Piersol, *Random data: analysis and measurement procedures*, New York (USA): Wiley-Interscience, 2000.
- [20] D. Feng and M. Feng, "Experimental validation of cost-effective vision-based structural health monitoring," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 88, pp. 199-211, 2017.
- [21] P. Rey-del-Castillo and J. Cardeñosa, "An exercise in exploring big data for producing reliable statistical information," *Big Data*, vol. 4(2), pp. 120-128, 2016.
- [22] G. Cai and S. Mahadevan, "Big data analytics in online Structural Health Monitoring," *International Journal of Prognostics and Health Management*, vol. 024, 2016.

- [23] B. He and Y. Li, "Big Data reduction and optimization in sensor monitoring network," *Journal of Applied Mathematics*, p. Article ID 294591, 2014.
- [24] P. Chiariotti, M. Martarelli and G. Revel, "Delamination detection by multi-level wavelet processing of continuous scanning laser doppler vibrometry data," *Opticas and Lasers in Engineering*, p. Article in press, 2017.
- [25] B. Asgarian, V. Aghaeidoost and H. Shokrgozar, "Damage detection of jacket type offshore platforms using rate of signal energy using wavelet packet transform," *Marine Structures*, vol. 45, pp. 1-21, 2016.
- [26] Y. Yan and L. Yam, "Detection of delamination damage in composite plates using energy spectrum of structural dynamic responses decomposed by wavelet analysis," *Computers & Structures*, Vols. 82(4-5), pp. 347-358, 2004.
- [27] Y. Yan, H. Hao and L. Yam, "Vibration-based construction and extraction of structural damage feature index," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 41, pp. 6661-6676, 2004.
- [28] N. Nikolaou, "Antoniadis rolling element bearing fault diagnosis using wavelet packets," *NDT&E International*, vol. 35, pp. 197-205, 2002.
- [29] H. Noh, K. Nair, D. Lignos and S. Kiremidian, "Use of wavelet-based damage-sensitive features for structural diagnosis using strong motion data," *American Society of Civil Engineers*, vol. 137, pp. 1215-1228, 2011.

- [30] S. Ekici, S. Yildirim and M. Poyraz, “Energy and entropy-based feature extraction for locating fault on transmission lines by using neural network and wavelet packet decomposition,” *Expert Systems with Applications*, vol. 34(4), pp. 2937-2944, 2008.
- [31] C. Junsheng, Y. Dejie and Y. Yu, “Time-energy analysis based on wavelet transform,” *NDT&E International*, vol. 38, pp. 569-572, 2005.
- [32] H. Jian-Gang, R. Wei-Xin and S. Zeng-Shou, “Wavelet packet based damage identification of beam structures,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 42(26), pp. 6610-6627, 2005.
- [33] S. Law, X. Li, X. Zhu and S. Chan, “Structural damage detection from wavelet packet sensitivity,” *Engineering Structures*, vol. 27(9), pp. 1339-1348, 2005.
- [34] J. Chen and G. Li, “Tsallis Wavelet Entropy and Its Application in Power Signal Analysis,” *Entropy*, vol. 16, pp. 3009-3025, 2014.
- [35] E. Castro, P. Moreno-García and A. Gallego, “Damage detection in CFRP plates using spectral entropy,” *Shock and vibration*, vol. Article ID 693593, p. 8 pages, 2014.
- [36] J. Morgaz, M. Granados, J. Domínguez, R. Navarrete, A. Fernández, A. Galán, P. Muñoz and R. Gómez-Villamandos, “Evaluation of spectral entropy to measure anesthetic depth and antinociception in sevoflurane-anaesthetised Beagle dogs,” *The Veterinary Journal*, vol. 188(3), pp. 352-355, 2011.
- [37] R. Quiroga, O. Rosso, E. Basar and M. Schürmann, “Wavelet entropy in event-related potentials: A new method shows ordering of EEG oscillations,” *Biological Cybernetics*, vol. 84, pp. 291-299, 2001.

- [38] H. AlNashash and N. Thakor, "Monitoring of global cerebral ischemia using wavelet entropy rate of change," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 52, pp. 2119-2122, 2005.
- [39] G. Powell and I. Percival, "A spectral entropy method for distinguishing regular and irregular motion of Hamiltonian systems," *The Journal of Physical Chemistry A*, vol. 12, pp. 2053-2071, 1979.
- [40] O. Rosso, S. Blanco, J. Yordanova, V. Kolev, A. Figliola, M. Schürmann and E. Basar, "Wavelet entropy: a new tool for analysis of short duration brain electrical signals," *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 105, pp. 65-75, 2001.
- [41] P. Beaumont, "The failure of fiber composites: an overview," *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 24, pp. 189-205, 1989.
- [42] Y. Dzenis and J. Qian, "Analysis of microdamage evolution histories in composites," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 38, pp. 1831-1854, 2001.
- [43] S. Sridharan, *Delamination behavior of composites*, Woodhead Publishing, 2008.
- [44] W. Prosser, "Advanced AE Techniques in composite materials research," *Journal of Acoustic Emission*, vol. 14, pp. 1-11, 1996.
- [45] M. Wevers, "Listening to the sound of materials: acoustic emission for the analysis of material behavior.," *NDT&E International*, vol. 30, pp. 99-106, 1997.

- [46] M. Giordano, A. Calabro, C. Exposito, A. D'Amore and L. Nicolais, "An acoustic-emission characterization of the failure modes in polymer composite materials," *Composites Science and Technology*, vol. 58, pp. 1923-1928, 1998.
- [47] E. Green, "Acoustic emission in composite laminates," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 17, pp. 117-127, 1998.
- [48] A. Bussiba, M. Kupiec, S. Ifergane, R. Piat and T. Bohlke, "Damage evolution and fracture events sequence in various composites by acoustic emission technique," *Composites Science and Technology*, vol. 68, pp. 1144-1155, 2008.
- [49] R. Unnthorsson, T. Runarson and M. Jonsson, "Acoustic emission based failure criterion for CFRP," *International Journal of Fatigue*, vol. 30, pp. 11-20, 2008.
- [50] M. Wevers and K. Lambrighs, Applications of acoustic emission for SHM: a review, John Wiley & Sons, 2009.
- [51] K. Ono and A. Gallego, "Research and application of AE on advanced composite," *Journal of Acoustic Emission*, vol. 30, pp. 180-229, 2012.
- [52] R. Unnthorsson, T. Runarsson and M. Jonsson, "NDT methods for evaluating carbon fiber composites," in *CompTest*, Bristol (UK), 2004.
- [53] J. Fabre and J. Laizet, "Amplitude and counts per event analysis of acoustic emission generated by transverse cracking of cross-ply CFRP," *Composites Science and Technology*, vol. 36, pp. 27-43, 1989.

- [54] C. Ramirez-Jimenez, N. Papadakis, N. Reynolds, T. Gan, P. Purnell and M. Pharaoh, "Identification of failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission event," *Composites Science and Technology*, vol. 64, pp. 1819-1927, 2004.
- [55] A. Marec, J. Thomas and R. Guerjouma, "Damage characterization of polymer-based composite materials: multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 22, pp. 1441-1464, 2006.
- [56] Q. Ni and M. IWamoto, "Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 60, pp. 717-728, 2002.
- [57] H. Suzuki, T. Kingo, Y. Hayashi, M. Takemoto and K. Ono, "Wavelet transform of acoustic emission signals," *Journal of Acoustic Emission*, vol. 14, pp. 14-69, 1996.
- [58] M. Sause, A. Gribov, A. Unwin and S. Horn, "Pattern recognition approach to identify natural clusters of acoustic emission signals," *Pattern Recognition Letters*, vol. 33, pp. 17-23, 2012.
- [59] N. Ativitavas, T. Pothisiri and T. Fowler, "Identification of fiber-reinforced plastic failure mechanisms from acoustic emission data using neural networks," *Journal of Composite Materials*, vol. 40, pp. 193-226, 2006.
- [60] M. Surgeon and M. Wevers, "Modal Analysis of acoustic emission signals from CFRP laminates," *NDT&E International*, vol. 32, pp. 311-322, 1999.

- [61] Y. Mizutani, K. Nagashima, M. Takemoto and K. Ono, "Fracture mechanism characterization of cross-ply carbon-fiber composites using acoustic emission analysis," *NDT&E International*, vol. 33, pp. 101-110, 2000.
- [62] J. Jiao, C. He, B. Wu, R. Fei and X. Wang, "Application of wavelet transform on modal acoustic emission source location in thin plates with one sensor," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 81, pp. 427-431, 2004.
- [63] H. Ip and W. Mai, "Delamination detection in smart composite beams using Lamb waves," *Journal of Smart Materials and Structures*, vol. 13, pp. 544-551, 2004.
- [64] Z. Su and L. Ye, "Lamb wave based quantitative identification of delamination in CF/EP composite structures using Artificial Neural Algorithm," *Composites Structures*, vol. 66, pp. 627-637, 2004.
- [65] N. Tomaya and J. Takatsubo, "Lamb wave method for quick inspection of impact-induced delamination in composite laminates," *Composite Science and Technology*, vol. 64, pp. 1293-1300, 2004.
- [66] M. Calomfirescu, *Lamb Waves for Structural Health Monitoring in Viscoelastic Composite Materials*, PhD Thesis, 2008.
- [67] C. Ramadas, M. Padivar, K. Balasibramaniam, M. Joshi and C. Krishnamurthy, "Delamination size detection using time of flight of anti-symmetric (A0) and mode converted A0 mode of guided lamb waves," *Journal of Intelligent Matrial Systems and Structures*, vol. 21, pp. 817-825, 2010.

- [68] M. Gorman, "Plate wave acoustic emission," *Acoustical Society of American Journal*, vol. 90, pp. 358-364, 1991.
- [69] D. Guo, A. Mal and K. Ono, "Wave theory of acoustic emission in composite laminates," *Journal of Acoustic Emission*, vol. 15, pp. 14-19, 1997.
- [70] W. Prosser, M. Hamstad, J. Gary and A. Gallagher, "Finite element and plate theory modeling of acoustic emission waveforms," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 18, pp. 83-90, 1999.
- [71] M. Sause and S. Horn, "Simulation of acoustic emission in planar carbon fiber reinforced plastic specimens," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 29, pp. 123-142, 2010.
- [72] K. Ono and A. Gallego, "Attenuation of Lamb waves in CFRP plates," *Journal of Acoustic Emission*, vol. 30, pp. 109-123, 2012.
- [73] M. Sause, M. Hamstad and S. Horn, "Finite element modeling of Lamb wave propagation in anisotropic hybrid materials," *Composites: Part B*, vol. 53, pp. 249-257, 2013.
- [74] D. Guo, Lamb waves from microfractures in composite plates, PhD Thesis. University of California, Los Angeles (USA), 1996.
- [75] K. Downs and M. Hamstad, "Wave propagation effects relative to AE source distinction of wideband AE signals from a composite pressure vessel," *Journal of Acoustic Emission*, vol. 14, pp. 61-73, 1996.
- [76] K. Downs and M. Hamstad, "Acoustic emission from depressurization to detect/evaluate the significance of impact damage to graphite/epoxy pressure vessels," *Journal of Composite Materials*, vol. 32, pp. 258-307, 1998.

- [77] J. Gary and M. Hamstad, "On the far-field structure of waves generated by a pencil lead break on a thin plate," *Journal of Acoustic Emission*, vol. 12, pp. 157-170, 1994.
- [78] W. Prosser, K. Jackson, S. Kellas, B. Smith, J. MacKaon and A. Friedman, "Advanced waveform based acoustic emission detection of matrix cracking in composites," *Materials Evaluation*, vol. 53, pp. 1052-1058, 1995.
- [79] M. Johnson and P. Gudmundson, "Experimental and theoretical characterization of acoustic emission transients in composites laminates," *Composites Science and Technology*, vol. 61, pp. 1367-1378, 2001.
- [80] K. Kuang, R. Kenny, M. Whelan, W. Cantwell and P. Chalker, "Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials," *Composites Science and Technology*, vol. 61(10), pp. 1379-1387, 2001.
- [81] S. Takeda, Y. Aoki and Y. Nagao, "Damage monitoring of CFRP stiffened panels under compressive load using FBG sensors," *Composite Structures*, vol. 94, pp. 813-819, 2012.
- [82] H. Tsuda, "Ultrasound and damage detection in CFRP using fiber Bragg grating sensors," *Composites Science and Technology*, vol. 66(5), pp. 676-683, 2006.
- [83] T. Fu, Y. Liu, Q. Li and J. Leng, "Fiber optic acoustic emission sensor and its applications in the structural health monitoring of CFRP materials," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 47(10), pp. 1056-1062, 2009.
- [84] P. Bartos, *Bond in concrete*, London (U.K.): Applied Science Publishers, 1982.

- [85] Comité Euro-International du Béton, “Bond action and bond behavior of reinforcement,” *State of the Art Rep. CEB Bulletin*, vol. 151, 1982.
- [86] T. Tassions, “Properties of bond between concrete and steel under load cycles idealizing seismic action,” in *Proc., AICAP-CEB Symp.: Structural concrete under seismic action*, Switzerland, 1979.
- [87] Federation International du Beton, “Bond of reinforcement in concrete,” *State of the Art Rep. FIB Bulletin*, vol. 10, 2000.
- [88] C. Grosse, H. Reinhardt and T. Dahm, “Localization and classification of fracture types in concrete with quantitative acoustic emission measurement techniques,” *NDT&E International*, vol. 30(4), pp. 223-230, 1997.
- [89] M. Kutz, *Handbook of environmental degradation of materials*, Oxford (U.K.): Elsevier, 2012.
- [90] O. Kayali, *Galvanized steel reinforcement in concrete*, Amsterdam (Netherlands): Elsevier, 2004.
- [91] Y. Kawasaki, T. Wakuda, T. Kobarai and M. Ohtsu, “Corrosion mechanisms in reinforced concrete by acoustic emission,” *Construction and Building Materials*, vol. 48, pp. 1240-1247, 2013.
- [92] G. Balázs, C. Grosse, R. Koch and H. Reinhardt, “Acoustic emission monitoring on steel-concrete interaction,” *Otto-Graf Journal*, vol. 4(1), pp. 56-90, 1993.
- [93] G. Balázs, C. Grosse, R. Koch and H. Reinhardt, “Damage accumulation on deformed steel bar to concrete interaction detected by acoustic emission technique,” *Magazine of Concrete Research*, vol. 48(177), pp. 311-320, 1996.

- [94] C. Grosse, Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures: Non-destructive testing methods, Cambridge (U.K.): Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 2010.
- [95] K. Ohno and M. Ohtsu, "Crack classification in concrete based on acoustic emission," *Construction and Building Materials*, vol. 24(12), pp. 2339-2346, 2010.
- [96] C. Grosse, B. Weiler and H. Reinhardt, "Relative moment tensor inversion applied to concrete fracture tests," *Journal of Acoustic Emission*, Vols. 14(3-4), pp. 74-87, 1996.
- [97] A. Gallego and E. Martínez, Emisión Acústica. Niveles 1 y 2, Madrid: Fundación Confemetal, 2015.
- [98] AENOR, Norma UNE-EN 13554:2011. Ensayos no destructivos. Emisión acústica. Principios generales, 2011.
- [99] A. International, ASTM E1316 - 10a, Standard Terminology for Nondestructive Examinations, West Conshohocken, PA (USA), 2010.
- [100] Y. Mizutani, Practical Acoustic Emission, Springer, 2016.
- [101] Z. Su and L. Ye, Identification of damage using Lamb waves, LNACM-48.
- [102] A. Pollock, "Classical wave theory in practical AE testing," in *Proceeding of the EJh international AE Symposium, Japanese Society for Nondestructive Testing*, 1986.
- [103] C. Farrar and S. Doebling, The state of the art in vibration-based structural damage identification, Los Alamos Dynamics. Structural Dynamics and Mechanical Vibration Consultants, 2000.

- [104] H. Wenzel and D. Pichler, Ambient vibration monitoring, England: John Wiley & Sons, 2005.
- [105] C. Farrar, T. Duffey, P. Cornwell and S. Doebling, "Excitation methods for bridge structures," in *Proceedings of IMAC-XVII, Applied Modal Analysis*, Orlando (EE.UU.), 1999.
- [106] J. Brownjohn, A. De Stefano, Y. Xu, H. Wenzel and A. Aktan, "Vibration-based monitoring of civil infrastructure: challenges and successes," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 1(3), pp. 79-95, 2011.
- [107] M. Sutton, J. Orteu and H. Schreier, Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications, Berlin: Springer, 2009.
- [108] G. Hobrough, "Automatic stereo plotting," *Photogrammetric Engineering*, vol. 25(5), pp. 763-769, 1959.
- [109] G. Hobrough, "Automatic stereo," *International Archives of Photogrammetry*, vol. 13(4), p. 15 pages, 1960.
- [110] W. Peters, "Digital imaging techniques in experimental stress analysis," *Optical Engineering*, vol. 21, 1982.
- [111] M. Fouinneteau and A. Pickett, "Failure characterisation of heavy tow braided composites using digital image correlation (DIC)," *Applied mechanics and materials*, Vols. 5-6, pp. 399-406, 2006.
- [112] K. Machida, M. Sato and S. Ogihara, "Application of stress analysis by digital image correlation and intelligent hybrid method to unidirectional CFRP laminate," *Key Engineering Materials*, Vols. 345-346, pp. 1121-1124, 2007.

- [113] G. Nicoletto, G. Anzelotti, E. Riva and R. Roncella, “Mesomechanics strain fields in woven composites: experiments vs. FEM modeling,” in *Proceedings of 3rd Workshop on Optical Measurement Techniques for Structures and Systems (OPTIMESS'2007)*, Leuven (Belgium), 2007.
- [114] D. McGowan, D. Ambur, T. Hanna and S. McNeill, “Evaluating the compressive response of notched composite panels using full-field displacements,” *Journal of Aircraft*, vol. 38, pp. 122-129, 2001.
- [115] J. Périé, S. Calloch, C. Cluzel and F. Hild, “Analysis of a multiaxial test on a C/C composite by using digital image correlation and a damage model,” *Experimental Mechanics*, vol. 42, pp. 318-328, 2002.
- [116] K. Ruggy and B. Cox, “Deformation mechanisms of dry textile preforms under mixed compressive and shear loading,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 23, pp. 1425-1442, 2004.
- [117] H. Koerber, M. Vogler, P. Kuhn and P. Camanho, “Experimental characterisation and modelling of non-linear stress-strain behaviour and strain rate effects for unidirectional carbon-epoxy,” in *16th European Conference on Composite Materials (ECCM16)*, Seville (Spain), 2014.
- [118] H. Koerber, J. Xavier and P. Camanho, “High strain rate characterisation of unidirectional carbon-epoxy IM7-8552 in transverse compression and in-plane shear using digital image correlation,” *Mechanics of Materials*, vol. 42, pp. 1004-1019, 2010.
- [119] M. Sause, *In situ monitoring of fiber-reinforced composites: Theory, basic concepts, methods, and applications*, Switzerland: Springer, 2016.

- [120] J. Dupré, M. Bornert, L. Robert and B. Watrisse, “Digital image correlation: displacement accuracy estimation,” in *14th International Conference on Experimental Mechanics (ICEM14)*, Poitiers (France), 2010.
- [121] Y. Wang, M. Sutton, H. Bruck and H. Schreier, “Quantitative error assessment in pattern matching: effects of intensity pattern noise, interpolation, strain and image contrast on motion measurements,” *Strain*, vol. 45, pp. 160-178, 2009.
- [122] T. Becker, K. Splitthof, T. Siebert and P. Kletting, “Technical note: T-Q-400-Accuracy-3DCORR-003-EN,” 2006.
- [123] G. Irwin, “Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate,” *Journal of Applied Mechanics*, vol. 24, pp. 361-364, 1957.
- [124] H. Tada, P. Paris and G. Irwin, *The stress analysis of cracks handbook*, 3rd edn. ed., New York (USA): ASME, 2000.
- [125] H. Yeh and C. Chern, “The Yeh-Stratton criterion for stress concentrations in fiber-reinforced composite materials,” *Journal of Composite Materials*, vol. 32, pp. 141-157, 1998.
- [126] R. O'Higgins, M. McCarthy and C. McCarthy, “Comparison of open hole tension characteristics of high strength glass and carbon fibre-reinforced composite materials,” *Composites Science and Technology*, vol. 68, pp. 2770-2778, 2008.

- [127] V. Kushch, I. Sevostianov and L. Mishnaevsky, “Stress concentration and effective stiffness of aligned fiber reinforced composite with anisotropic constituents,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 45, pp. 5103-5117, 2008.
- [128] K. Chang, S. Llu and F. Chang, “Damage tolerance of laminated composites containing an open hole and subjected to tensile loadings,” *Journal of Composite Materials*, vol. 25, pp. 274-301, 1991.
- [129] E. López-Alba, F. Díaz, R. Dorado and R. López-García, “Análisis de deformaciones en probetas planas mediante correlación digital de imágenes,” in *XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, Ciudad Real (Spain), 2010.
- [130] N. Schorer and M. Sause, “Identification of failure mechanisms in CFRP laminates using 3D digital image correlation,” in *20th International Conference on Composite Materials*, Copenhagen (Denmark), 2015.
- [131] A. Monden, M. Sause, A. Hartwig, C. Hammerl, H. Karl and S. Horn, “Evaluation of surface modified CFRP-metal hybrid laminates,” in *Euro Hybrid Materials and Structures*, Stade (Germany), 2014.
- [132] M. Thomson, D. Gómez and J. Marulanda, “Control systems for dynamic loading protection of civil structures,” *Revista de la Facultad de Minas DYNA. Universidad Nacional de Colombia*, vol. 155(75), pp. 77-89, 2008.
- [133] J. Oviedo and M. Duque, “Situación de las técnicas de control de respuesta sísmica,” *EIA*, vol. 12, pp. 113-124, 2010.

- [134] G. Housner, L. Bergman, T. Caughey, A. Chassiakos, R. Claus, S. Masri, R. Skelton, T. Soong and B. Spencer, "Structural control: Past, present, and future," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 9(123), pp. 897-958, 1997.
- [135] M. Nakashima, P. Pan, D. Zamfirescu and R. Weitzmann, "Post-kobe approach for design and construction of base-isolated buildings," *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, vol. 4, pp. 259-264, 2004.
- [136] International organization for standardization, ISO 3010. Basis for design of structures - Seismic actions on structures, 2001.
- [137] J. Oviedo and M. Duque, "Disipadores histeréticos metálicos como técnica de control de respuestas sísmica en edificaciones colombianas," *Revista EIA*, vol. 11, pp. 51-63, 2009.
- [138] R. Hanson and T. Soong, Seismic design with supplemental energy dissipation devices, Earthquake Engineering Research Institute, 2001.
- [139] T. Yoshino and Y. Karino, "Experimental study on shear wall with braces: Part 2," *Architectural Institute of Japan, Structural Engineering Section*, pp. 403-404, 1971.
- [140] Q. Xie, "State of the art of buckling-restrained braces in Asia," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 61, pp. 727-748, 2005.
- [141] I. Aiken, D. Nims, A. Whittaker and J. Kelly, "Testing of passive energy dissipation systems," *Earthquake Spectra*, vol. 9(3), 1993.
- [142] K. Tsai, H. Chen, C. Hong and Y. Su, "Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction," *Earthquake Spectra*, vol. 9(3), pp. 505-528, 1993.

- [143] R. Chan and F. Albermani, "Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation," *Engineering Structures*, vol. 30(4), pp. 1058-1066, 2008.
- [144] "APC Internation, Lpc.," [Online]. Available: <http://www.americanpiezo.com>.
- [145] R. Palma-Guerrero, Estudio numérico de cerámicas piezoeléctricas con defectos, Universidad de Granada (Spain): Trabajo de Investigación Tutelada, 2006.
- [146] PI-ceramic, Piezoceramic materials, 2009.
- [147] M. Durruthy-Rodriguez, A. Peláiz-Barranco and F. Calderón-Piñar, "Características estructurales y dieléctricas de las cerámicas pzt54/46 con dopajes donores en sitios a y b," in *IBEROMET - Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales*, La Habana (Cuba), 2006.
- [148] A. Alves, Cerámicas piezoeléctricas: funcionamiento y propiedades, Technical report, 2010.
- [149] Cristal Instruments, Coco-80 specifications, Technical Report, 2011.
- [150] Piezo Systems, [Online]. Available: <http://www.piezo.com/prodelect1epa104.html>.
- [151] A. Oppenheim, A. Willsky and S. Hamid, Señales y sistemas, vol. 2, Pearson Prentice Hall, 1997.
- [152] A. Ladrón de Guevara, Sistema de medida para detección de defectos en materiales compuestos avanzados mediante técnicas vibro-acústicas, Universidad de Granada: Proyecto Fin de Carrera, 2011.

- [153] A. Benavent-Climent, J. Donaire-Avila and E. Oliver-Saiz, “Shaking table tests of a reinforced concrete waffle-flat plate structure designed following modern codes: seismic performance and damage evaluation,” *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 45, pp. 315-336, 2016.
- [154] Ministerio de Vivienda, Código Técnico de la Edificación (CTE), 2006.
- [155] Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-94), 1994.
- [156] B. Kato, H. Akiyama and H. Ymanouchi, “Predictable properties of structural steels subjected to incremental cyclic loading,” in *IABSE Symposim*, Lisbon (Portugal), 1973.
- [157] L. Morillas, Performance based earthquake resistant design based on energy balance applied to frames with passive control systems, Doctoral Thesis. University of Granada, 2013.
- [158] S. Kay, Modern spectral estimation: theory and application, Englewood Cliffs, NJ (USA): Prentice Hall, 1988.
- [159] I. Daubechies, Ten lectures on wavelets, Philadelphia, PA (USA): Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992.
- [160] H. Kim and H. Melhelm, “Damage detection of structures by wavelet analysis,” *Engineering Structures*, vol. 26(3), pp. 347-362, 2004.
- [161] C. Torrence and G. Compo, “A practical guide to wavelet analysis,” vol. 79, pp. 61-78, Bulletin of the American Meteorological Society.

- [162] Z. Guosheng, L. Jiang and Z. Kui, "Structural safety criteria for blasting vibration based on wavelet packet energy spectra," *Mining Science and Technology*, vol. 21(1), pp. 35-40, 2011.
- [163] Y. Liu, Y. Ju, C. Duan and X. Zhao, "Structure damage diagnosis using neural network and feature fusion," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 24(1), pp. 87-92, 2011.
- [164] Y. Yan and L. Yam, "Online detection of crack damage in composite plates using embedded piezoelectric actuators/sensors and wavelet analysis," *Composite Structures*, vol. 58, pp. 29-38, 2002.
- [165] L. Han, C. Li, S. Guo and X. Su, "Online detection of crack damage in composite plates using embedded piezoelectric actuators/sensors and wavelet analysis," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vols. 62-63, pp. 91-99, 2015.
- [166] A. Goharrizi and N. Sepehri, "Application of fast Fourier and wavelet transforms towards actuator leakage diagnosis: A comparative study," *International Journal of Fluid Power*, vol. 14(2), pp. 39-51, 2014.
- [167] X. Peng, H. Hao and Z. Li, "Application of wavelet packet transform in subsea pipeline bedding condition assessment," *Engineering Structures*, vol. 39, pp. 50-65, 2012.
- [168] Y. Feng and F. Schlindwein, "Normalized wavelet packets quantifiers for condition monitoring," *Mechanical System and Signal Processing*, vol. 23(3), pp. 712-723, 2009.
- [169] X. Wu, V. Kumar, J. R. Quinlan and et al., "Top 10 algorithms in data mining," *Knowledge and Information Systems*, vol. 14, pp. 1-37, 2008.

- [170] R. Duda, P. Hart and D. Stork, *Pattern classification*, 2nd edition, John Wiley, 2000.
- [171] B. Silverman and M. Jones, “E. Fix and J.L. Hodges (1951): An important contribution to nonparametric discriminant analysis and density estimation,” *International Statistical Review*, vol. 57, no. 3, pp. 233-238, 1989.
- [172] P. Tan, M. Steinbach and V. Kumar, *Introduction to data mining*, Boston: Pearson Addison-Wesley, 2006.
- [173] C. M. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*, Springer, 2006.
- [174] J. Bezdek, S. Chuah and D. Leep, “Generalized k-nearest neighbor rules,” *Fuzzy sets and system*, vol. 18(3), pp. 237-256, 1986.
- [175] AENOR, Norma UNE-EN 1330-9. Ensayos no destructivos. Terminología, parte 9, Términos utilizados en ensayos de emisión acústica, 2010.
- [176] ASTM D3039/D3039M Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Material, West Conshohocken, PA, 2014.
- [177] I. Fayala, L. Dhouibi, X. Nóvoa and M. Ben Ouezdou, “Effect of inhibitors on the corrosion of galvanized steel and on mortar properties,” *Cement and concrete composites*, vol. 35(1), pp. 181-189, 2013.
- [178] O. Kayali and S. Yeomans, “Bond of ribbed galvanized reinforcing steel in concrete,” *Cement and concrete composites*, vol. 22(6), pp. 459-467, 2000.
- [179] W. Yeh, R. Huang, J. Chang and C. Yang, “A pull-out test for determining interface properties between rebar and concrete,” *Advanced Cement Based Materials*, vol. 5(2), pp. 57-65, 1997.

- [180] C. Grosse and M. Ohtsu, Eds., Acoustic emission testing, Berlin (Germany): Springer, 2008.
- [181] ACI (American Concrete Institute, Building code requirements for structural concrete and commentary, ACI 318-11<sup>o</sup>, Farmington Hills (MI), 2011.
- [182] D. Vázquez, L. Suarez and R. Lopez, “Identificación de daños en vigas de hormigón experimentales y analíticas utilizando metodologías modales,” *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, vol. 4(2), 2004.
- [183] R. O. Duda, P. E. Hart and D. G. Stork, Pattern Classification, 2nd edition, John Wiley, 2000.
- [184] H. Akiyama, Earthquake resistant limit-state design for buildings, University of Tokyo, 1985.