



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

**MONITORIZACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS
VIBRO-ACÚSTICAS DE ESTRUCTURAS
SISMORRESISTENTES DE HORMIGÓN ARMADO
SOMETIDAS A CARGAS DINÁMICAS EN
MESA SÍSMICA**

TESIS DOCTORAL

CHIHAB ABARKANE

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

E.T.S. DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

UNIVERSIDAD DE GRANADA

Granada, España

Septiembre de 2019

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: Chihab Abarkane
ISBN: 978-84-1306-352-2
URI: <http://hdl.handle.net/10481/57768>

**Monitorización mediante técnicas vibro-acústicas de estructuras
sismorresistentes de hormigón armado sometidas a cargas dinámicas
en mesa sísmica**

Copyright©2019 por Chihab Abarkane



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

**MONITORIZACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS
VIBRO-ACÚSTICAS DE ESTRUCTURAS
SISMORRESISTENTES DE HORMIGÓN ARMADO
SOMETIDAS A CARGAS DINÁMICAS EN
MESA SÍSMICA**

TESIS DOCTORAL

CHIHAB ABARKANE

DIRIGIDA POR

Dr. Antolino Gallego Molina

Dr. Amadeo Benavent Climent

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL

E.T.S. DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

UNIVERSIDAD DE GRANADA

Granada, España

Septiembre de 2019

**Monitorización mediante técnicas vibro-acústicas de estructuras
sismorresistentes de hormigón armado sometidas a cargas dinámicas
en mesa sísmica**

Copyright©2019 por Chihab Abarkane



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

***VIBRO-ACOUSTIC TECHNIQUES FOR
MONITORING OF EARTHQUAKE-RESISTANT
REINFORCED CONCRETE STRUCTURES
SUBJECTED TO DYNAMIC LOADS ON
SHAKING TABLE***

DOCTORAL THESIS

CHIHAB ABARKANE

SUPERVISORS

Dr. Antolino Gallego Molina

Dr. Amadeo Benavent Climent

DOCTORAL PROGRAMME: INGENIERÍA CIVIL

TECHNICAL SCHOOL FOR BUILDING ENGINEERING

UNIVERSITY OF GRANADA

Granada, Spain

September of 2019

Vibro-acoustics techniques for monitoring of earthquake-resistant reinforced concrete structures subjected to dynamic loads on shaking table

Copyright©2019 by Chihab Abarkane

Esta Tesis Doctoral ha recibido apoyo económico del Programa de Formación de Profesorado Universitario (FPU 14/04840) y ha sido financiada por los proyectos:

- PE-12 TEP-02429. Proyectos de Excelencia de la Consejería de Innovación, Ciencia y Tecnología de la Junta de Andalucía. *Disipadores de energía histeréticos avanzados con propiedades de recentrado y memoria de forma: desarrollo, monitorización del daño y estrategias de implementación en el mercado*. Investigadores principales: Amadeo Benavent-Climent y Antolino Gallego Molina.
- BIA2017 88814 R. Proyectos del Plan Nacional I+D+i del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. *Estudio numérico y experimental de la respuesta sísmica de estructuras con disipadores de energía híbridos que combinan componentes viscosas y elastoplásticas*. Investigador principal: Amadeo Benavent-Climent

La estancia en la *Vrije Universiteit Brussel* (Bélgica) recibió financiación de la convocatoria de ayudas de movilidad para estancias breves del programa de Formación de Profesorado Universitario 2017.

A mis padres

A mi hermana

A mi esposa

Resumen

En zonas de sismicidad moderada o alta, como el sur de Europa, los terremotos causan la pérdida de vidas humanas y tienen un impacto económico importante. Las pérdidas humanas se han reducido notablemente en las construcciones proyectadas siguiendo normas modernas. Sin embargo, el control/reducción de los daños sigue siendo una asignatura pendiente. La ingeniería sísmica se orienta desde principios del siglo XXI a producir estructuras con daños controlados y costes de reparación cuantificables, dentro del denominado paradigma del Proyecto Sismorresistente Basado en Prestaciones (*Performance Based Seismic Design*, PBSO). Una forma de materializar los objetivos del PBSO es mediante estructuras equipadas con disipadores de energía. La cuantificación del daño en este tipo de estructuras es un aspecto crucial para decidir si es necesario repararlas tras un sismo severo y en qué extensión. Esta evaluación abarca las dos componentes del sistema (la estructura principal y los disipadores de energía). Para llevarla a cabo el diagnóstico de daño basado en los ensayos no destructivos (END) juega un papel muy importante (*Structural Health Monitoring*), tal y como se aborda en este trabajo de investigación.

En particular, en esta Tesis Doctoral se exponen los trabajos y resultados experimentales relacionados con el diagnóstico del daño en estructuras bidireccionales de hormigón armado (HA) y en disipadores histeréticos con propiedad de recentrado TTD-NiTi, sometidos a ensayos sísmicos (simulaciones biaxiales) y ensayos cuasi-estáticos, respectivamente. En concreto, se monitorizan las estructuras de HA con el método de emisión acústica (EA) para evaluar el daño en el hormigón, y se inspecciona la parte disipadora del TTD-NiTi con los métodos de ultrasonidos (UT) y memoria magnética del metal (MMM) para evaluar el grado de deformación plástica alcanzado y decidir sobre su eventual sustitución. En ambos casos se proponen nuevos índices de daño indirectos que se validan con índices de daño mecánicos bien establecidos en la bibliografía.

Summary

In areas of moderate or high seismicity, such as southern Europe, earthquakes cause the loss of human lives and have a significant economic impact. Human losses have been significantly reduced in the constructions designed following modern standards. However, damage control/reduction remains a pending issue. Seismic engineering has been oriented since the beginning of the 21st century to produce structures with controlled damage and quantifiable repair costs, within the so-called Performance Based Seismic Resistance Project (PBSD) paradigm. One way to achieve the objectives of the PBSD is through structures equipped with energy dampers. The quantification of the damage in this type of structures is a crucial aspect to decide if it is necessary to repair them after a severe earthquake. This evaluation covers the two components of the system (the main structure and the energy dampers). To perform this evaluation, the diagnosis of damage based on non-destructive tests (NDT) plays a very important role (Structural Health Monitoring) as discussed in this research work.

In particular, this Doctoral Thesis shows the experimental works and results related to the diagnosis of damage in bidirectional reinforced concrete (RC) structures and in TTD-NiTi hysteric dampers with recentering properties, subjected to seismic tests (biaxial simulations) and quasi-static trials, respectively. Specifically, the RC structures are monitored with the acoustic emission method (AE) to assess the level of damage of the concrete, while the dissipative part of the TTD-NiTi is inspected with the ultrasonic (UT) and magnetic memory metal (MMM) methods in order to evaluate the degree of plastic deformation achieved and then decide on its eventual replacement. In both cases, new indirect damage indices are proposed and validated with well established mechanical damage rates in the literature.

Colaboraciones

La presente Tesis Doctoral se ha desarrollado gracias al apoyo de varios expertos en diferentes ámbitos de trabajo. La elaboración de este trabajo no habría culminado sin su colaboración:

El Dr. **Dimitrios Aggelis**, docente e investigador de la *Vrije Universiteit Brussel* en Bélgica, quien me dio la oportunidad para realizar una estancia de investigación que me permitió aprender y aplicar estrategias de clasificación de señales de emisión acústica.

La Dra. **Eleni Tsangouri**, docente e investigadora de la *Vrije Universiteit Brussel* en Bélgica, quien me ayudó con el diseño y realización de los experimentos relativos a las vigas de hormigón armado, concretamente en la monitorización con el método de emisión acústica.

La Dra. **Elisabet Suárez Vargas**, integrante del grupo de investigación TEP 232, por su contribución en el análisis de datos obtenidos de la inspección de disipadores con el método de MMM y en la monitorización con el método de emisión acústica para los ensayos sísmicos.

El Ingeniero **David Galé-Lamuela**, investigador en formación del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica de Madrid por su aportación en el cálculo del índice de daño mecánico (ID) en disipadores.

El Dr. **Jesús Donaire-Ávila**, investigador y docente del departamento de Ingeniería Mecánica y Minería de la Universidad de Jaén, quien calculó la energía plástica disipada por el hormigón en los ensayos sísmicos.

El Dr. **Anatoly Dubov**, investigador y fundador de la empresa ENERGO DIAGNOSTIKA Co. Ltd., con quien he podido aprender los principios físicos del método de MMM y su aplicación para el diagnóstico del daño, durante mi estancia formativa en Praga (República Checa).

El Dr. **Václav Svoboda** y la ingeniera **Eva Svobodová**, de la empresa PREDITEST s.r.o., por su inestimable ayuda con la inspección de los

disipadores con el método de MMM, las discusiones científicas acerca de los resultados y permitirme usar el equipo de medición.

El Dr. **Andrés Roldán Aranda**, docente e investigador del Departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores, por su asesoramiento en los sistemas de adquisición de datos utilizados en las investigaciones.

El Dr. **Francisco Rescalvo**, integrante del grupo de investigación TEP 232, por su ayuda en la monitorización de los especímenes de ensayo para los ensayos sísmicos con sensores de emisión acústica y la realización de los ensayos.

El Arquitecto Técnico **Antonio Aguilar Aguilera**, investigador en formación en el Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Granada, por su ayuda en la inspección de disipadores con el método de ultrasonidos en los disipadores durante los ensayos sísmicos.

El Arquitecto Técnico **José Gil** por su labor en la elaboración e instrumentación de especímenes BS1 y BS2, así como el manejo de la mesa sísmica para la realización de los ensayos sísmicos.

Los Técnicos **David Jiménez**, **Miguel Ángel Guerrero** y **Santiago Díaz**, a quienes se agradece su labor en la elaboración de especímenes BS1 y BS2, y el Técnico **Marino Risueño**, a quien se agradece su ayuda para materializar los ensayos cuasi-estáticos de los disipadores.

Agradecimientos

Para que esta Tesis Doctoral se hiciera realidad, ha sido necesario el respaldo de numerosas personas e instituciones que, directa o indirectamente, han impulsado su elaboración. Quiero expresar mi más sincera gratitud a todos ellos.

Mi primer agradecimiento hacia mis directores de tesis, Dr. Antolino Gallego Molina y Dr. Amadeo Benavent Climent, por permitirme iniciar ésta experiencia bajo vuestra tutela, confiando en mí para formar parte de vuestro equipo y para desarrollar investigaciones en ámbitos relevantes de la ingeniería civil. Por vuestra inestimable dedicación y motivación para mejorar en mi desempeño cada día y por transmitirme vuestros vastos conocimientos. Ningún reconocimiento sería suficiente para agradeceros vuestra labor didáctica y vuestro liderazgo en la dirección de esta Tesis Doctoral.

Al grupo de investigación ADIME, con todos los integrantes que me han acompañado durante esta experiencia, gracias por la disposición permanente para ayudarme en lo profesional y lo personal.

A nivel personal, mi agradecimiento eterno a mi familia por sus sacrificios para procurarme un futuro mejor y por respaldarme en cada nueva experiencia que emprendo. A mis padres, Abdelkader y Boutaina, por los valores que me han transmitido, y a mi hermana Milad, por su apoyo incondicional.

Índice General

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación y estado del arte	1
1.2. Objetivos.....	7
1.3. Marco de la investigación	8
1.4. Estructura de la tesis.....	8
2. SISTEMAS PASIVOS DE PROTECCIÓN SÍSMICA	11
2.1. Sistemas de protección sísmica	11
2.1.1. Reseña histórica.....	12
2.1.2. Clasificación de los sistemas de protección sísmica	14
<i>Sistemas de control activo o híbrido</i>	14
<i>Sistemas de control pasivo</i>	15
2.1.3. Disipadores hysteréticos.....	16
Disipador “ <i>Buckling-Restrained Brace</i> ” (<i>BRB</i>).....	16
Disipador “ <i>Added Damping and Stiffness System</i> ” (<i>ADAS</i>).....	17
Disipador “ <i>Honeycomb Damper System</i> ” (<i>HDS</i>).....	17
Disipador “ <i>Web Plastifying Damper</i> ” (<i>WPD</i>).....	18
Disipador “ <i>Tub-in-Tube</i> ” (<i>TTD</i>).....	19
2.2. Disipadores hysteréticos avanzados con propiedades de recentrado y memoria de forma	19
2.2.1. Instalación del disipador en la estructura.....	20
3. MÉTODOS DE INSPECCIÓN DE DISIPADORES Y ESTRUCTURAS	23
3.1. Ensayos no destructivos.....	23
3.2. El método de ultrasonidos (UT)	24
3.2.1. Ultrasonidos: Principios físicos.....	25
<i>Generación de ondas acústicas. Piezoelectricidad inversa</i>	25
<i>Propagación de las ondas elásticas</i>	26
<i>Incidencia normal</i>	28
<i>Incidencia oblicua</i>	28

<i>Atenuación</i>	31
<i>Frecuencia, longitud de onda y tamaño de discontinuidad</i>	32
3.2.2. Inspección UT: Pulso-Eco y Transmisión.....	34
<i>Técnica de Pulso-Eco</i>	37
<i>Técnica de Transmisión</i>	40
3.2.3. Sistema de medida.....	42
<i>Equipo de Ultrasonidos</i>	43
<i>Transductores piezoeléctricos</i>	43
3.3. El método de emisión acústica (EA)	45
3.3.1. Definición y principios físicos.....	45
<i>Monitorización con el método de EA</i>	48
3.3.2. Señales de EA. Características.....	51
<i>Características de señales transitorias</i>	51
<i>Características a lo largo del tiempo</i>	53
3.3.3. Localización.....	54
3.4. El método de memoria magnética del metal (MMM)	55
3.4.1. Definiciones y principios físicos.....	56
<i>Fundamentos físicos del método de MMM</i>	57
<i>Método de MMM</i>	59
<i>Instrumentación</i>	61
4. DISIPADORES: DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE INSPECCIÓN	65
4.1. Ensayos cíclicos de la parte TTD del disipador TTD-NiTi.....	66
4.1.1. Descripción de las probetas ensayadas	67
4.1.2. Descripción de los ensayos cíclicos	67
<i>Configuración de los ensayos</i>	67
<i>Patrones de carga cíclica</i>	69
4.1.3. Inspección UT y MMM de los testigos TTD-NiTi.....	72
<i>Inspección de UT por transmisión</i>	72
<i>Inspección de UT por pulso-eco</i>	78
<i>Inspección por método de MMM</i>	80

4.2. Ensayos sísmicos con disipadores TTD-NiTi.....	84
4.2.1. Descripción de los disipadores TTD-NiTi.....	84
4.2.2. Descripción de los ensayos sísmicos.....	86
<i>Configuración de disipadores TTD-NiTi en la</i>	
<i>estructura de HA.....</i>	86
<i>Historias de carga.....</i>	90
4.2.3. Inspección UT de los disipadores TTD-NiTi.....	91
5. RESULTADOS I: DISIPADORES.....	95
5.1. Índice de daño mecánico (ID).....	95
5.2. Índice de daño UT (ΔE).....	96
5.2.1. Procesamiento de señales UT.....	99
<i>Índice ΔE obtenido en los ensayos cíclicos.....</i>	104
<i>Índice ΔE obtenido en los ensayos sísmicos.....</i>	106
5.2.2. Análisis de ruido.....	108
5.3. Índice de daño MMM (E_M).....	111
5.3.1. Gradiente magnético dH_L/dx	113
<i>Índice E_M obtenido en los ensayos cíclicos.....</i>	115
5.4. Resultados y Discusión.....	116
5.4.1. Correlación de índices ID y ΔE en ensayos cíclicos.....	116
5.4.2. Correlación de índices ID y E_M en ensayos cíclicos.....	120
6. ESTRUCTURA: ENSAYOS.....	123
6.1. Quasi-static tests. RC beams.....	123
6.1.1. Description of specimens.....	124
<i>Materials: Concrete and steel.....</i>	125
<i>Specimen preparation.....</i>	126
6.1.2. Four-point bending tests.....	128
<i>Test set-up.....</i>	128
<i>Loading history.....</i>	129
6.1.3. Instrumentation.....	131
6.2. Ensayos sísmicos. Forjado reticular de HA.....	134
6.2.1. Descripción de los especímenes BS1 y BS2.....	134

<i>Materiales: Hormigón y Acero</i>	135
<i>Elaboración del espécimen</i>	137
6.2.2. Descripción de los ensayos sísmicos	139
<i>Configuración de los ensayos</i>	139
<i>Historia de carga</i>	140
6.2.3. Instrumentación	141
<i>Instrumentación de emisión acústica</i>	142
<i>Otra instrumentación</i>	145
7. RESULTADOS II: ESTRUCTURA	147
7.1. Quasi-static test. AE signals analysis.....	147
7.1.1. AE signal filtering	148
<i>RMS filtering</i>	148
7.1.2. Localization of AE events.....	149
7.1.3. Discrimination of sources (flexure or shear) of concrete cracking .	153
<i>AF-RA Classification</i>	153
<i>RT Classification</i>	155
7.1.4. Results and Discussion	158
<i>Localization of AE events</i>	158
<i>AE Energy</i>	160
7.2. Ensayos sísmicos. Análisis de señales EA	162
7.2.1. Filtrado de señales de EA.....	162
<i>Sensores guarda y sensores de monitorización</i>	163
<i>Filtrado RMS</i>	164
<i>Filtrado Amplitud-Duración</i>	168
7.2.2. Energía de EA	170
<i>Localización de eventos de EA</i>	174
<i>Clasificación RT</i>	175
7.2.3. Energía de deformación plástica del hormigón	178
7.2.4. Resultados. Índice de daño temporal (TDI).....	178
<i>Índice de daño temporal (TDI)</i>	184
8. CONCLUSIONES	187

8. CONCLUSIONS	195
Bibliografía	201

Índice de Figuras

Figura 2.1. Clasificación de los sistemas de protección sísmica. Fuente: [55].	15
Figura 2.2. Esquema descriptivo del disipador BRB. Fuente: [59].	17
Figura 2.3. Disipador tipo ADAS.	17
Figura 2.4. Disipador tipo HDS de la empresa <i>Kajima Corporation</i> instalado en muro de hormigón. Fuente: http://www.kobori-takken.co.jp	18
Figura 2.5. Disipadores tipo WPD. Izq.: Instalación del disipador en una estructura. Der.: Anclaje del disipador al nudo inferior.	18
Figura 2.6. Disipadores tipo TTD.	19
Figura 2.7. Configuración general del disipador y sección perpendicular.	20
Figura 2.8. Disipador BRAD de la casa comercial <i>FIP Industriale</i> instalado en la fachada de un edificio de estructura porticada. Fuente: https://www.archiproducts.com/es	21
Figura 3.1. Propagación de ondas P y S, y movimiento de las partículas.	27
Figura 3.2. Conversiones de modo de una onda P incidente.	29
Figura 3.3. Reflexión de la componente normal de la onda S incidente.	30
Figura 3.4. Reflexión de la componente paralela de la onda S incidente.	30
Figura 3.5. Atenuación de una onda, con decrecimiento de amplitud y dilatación en el tiempo. a) Onda emitida. b) Onda atenuada.	31
Figura 3.6. Relación entre longitud de onda y tamaño de abertura en el fenómeno de la difracción.	32
Figura 3.7. Técnica de la Difracción del Tiempo de Vuelo (TOF).	35
Figura 3.8. Técnica de Transductores en Tándem (izq.) y Técnica de <i>Phased Array</i> (der.).	36
Figura 3.9. Señal registrada en la técnica de Pulso-Eco. Izq.: La onda se refleja en una discontinuidad. Der.: La onda se refleja en la cara opuesta.	38
Figura 3.10. Técnica de Geometría del Haz. Izq.: Punto de máxima amplitud del eco. Der.: Borde de la discontinuidad.	40

Figura 3.11. Configuración de la técnica de Transmisión con transductores enfrentados. Izq.: Zona libre de discontinuidades. Der.: Zona con discontinuidad.	41
Figura 3.12. Configuración de Tándem de Transductores, en la técnica de Transmisión.	42
Figura 3.13. Composición interna de un transductor piezoeléctrico.....	44
Figura 3.14. Esquema de generación de ondas elásticas durante la formación y crecimiento de una fisura.....	46
Figura 3.15. Fuente y evento EA.....	46
Figura 3.16. a) Señal de EA transitoria procedente de un evento primario de EA en el hormigón. b) Señal de EA continua procedente de un evento secundario de EA en el hormigón.....	47
Figura 3.17. Tasa de eventos de EA (en línea continua) y diagrama de presión (en línea discontinua) en un ensayo de presurización de una vasija de aluminio. Se cumple el efecto Kaiser [19].	49
Figura 3.18. Actividad de EA en función de la carga aplicada en un ensayo por ciclos, con cumplimiento de efecto Kaiser en el tramo BCB, y cumplimiento del efecto Felicity en el tramo DEF [66].	50
Figura 3.19. Características básicas de una señal transitoria.	52
Figura 3.20. Constructor de eventos. Criterios de FHCDT, DT1X-Max y DTNX-Max.	55
Figura 3.21. Fuga de campo magnético propio (SMLF) en una grieta superficial.	57
Figura 3.22. Magnetostricción inversa por esfuerzos de tracción y compresión.....	57
Figura 3.23. Diagrama de magnetostricción inversa.	58
Figura 3.24. Zona de deformación plástica (plano de falla) y vector de magnetización.	58
Figura 3.25. Detección y cuantificación de una SCZ en un diagrama de intensidad y gradiente de SMLF.	59
Figura 3.26. Escaneo de una superficie con el método MMM. a) Detección de una SCL. b) Detección de un defecto de mancha.	61

Figura 3.27. Dispositivo de rodamiento con magnetómetro de flujo de tres componentes (X, Y, Z).	62
Figura 4.1. Testigo del disipador TTD-NiTi. a) Dimensiones en milímetros. b) Patrón de deformación en la unión tira-ala.	67
Figura 4.2. a) Disposición del actuador y el sistema de “tubo en tubo”. b) Disposición de las placas. c) Esquema general del ensayo cíclico.	68
Figura 4.3. Fijación de la placa sobre la cara del sistema “tubo en tubo”.	68
Figura 4.4. Transductor LVDT utilizado en el ensayo. a) Imagen del transductor LVDT. b) Colocación durante el ensayo cíclico.	69
Figura 4.5. Patrones teóricos de carga cíclica para testigos T1-T5 (a) y testigos T6-T10 (b).	71
Figura 4.6. Diagramas desplazamiento-tiempo de las cargas cíclicas aplicadas a testigos T1-T5 (amplitud creciente) y testigos T6-T10 (amplitud constante).	72
Figura 4.7. Colocación de transductores en la inspección por transmisión.	73
Figura 4.8. Sistema de medida para la inspección por transmisión.	73
Figura 4.9. Generador de pulsos OLYMPUS 5072PR.	74
Figura 4.10. Pulso emitido por el generador. Izq.: Señal en el dominio temporal. Der.: Espectro de frecuencias de la señal.	74
Figura 4.11. Transductor piezoeléctrico OLYMPUS V1091. Izq.: Imagen del transductor. Der.: Curva de sensibilidad del transductor.	75
Figura 4.12. Onda transmitida por el transductor a la superficie. Izq.: Señal en el dominio temporal. Der.: Espectro de frecuencias de la señal.	76
Figura 4.13. Señal que llega al transductor receptor. Izq.: Señal en el dominio temporal. Der.: Espectro de frecuencias de la señal.	76
Figura 4.14. Señal de salida y llegada (azul), y señal de sincronización (amarilla) en la pantalla del osciloscopio digital TEKTRONIX. Izq.: Técnica de transmisión. Der.: Técnica de pulso-eco.	77
Figura 4.15. Puntos de inspección. Distancias en mm.	78
Figura 4.16. Colocación del transductor en la inspección por pulso-eco.	79

Figura 4.17. Izq.: Pulso emitido por el generador; Cntr.: Onda transmitida por el transductor a la superficie; Der.: Eco que llega al transductor.....	80
Figura 4.18. Instrumentación para la inspección por MMM. Izq.: Dispositivo de escaneo rodante con magnetómetro de flujo tipo 2M. Der.: Equipo de medida tipo TSC-3M-12.	82
Figura 4.19. Distribución de la intensidad del SMLF (arriba) y del gradiente del SMLF (abajo) representadas en el <i>MMM System 3.0</i>	82
Figura 4.20. Trayectorias de escaneo durante la inspección por MMM.....	83
Figura 4.21. Montaje del disipador TTD-NiTi en su puesta en obra.....	85
Figura 4.22. Imagen del disipador TTD-NiTi C5 (abajo) y su esquema con los elementos que lo componen (arriba).	86
Figura 4.23. Estructura principal de hormigón armado con forjado reticular de los ensayos sísmicos de los disipadores.	87
Figura 4.24. Disposición espacial de disipadores en la estructura principal. ...	88
Figura 4.25. Anclaje de disipadores a la estructura. Izq.: Disipador C1 anclado a la base de P1. Der.: Disipador C3 anclado al ábaco de P2.	88
Figura 4.26. Configuración general del ensayo sísmico: Mesa sísmica de la Universidad de Granada, estructura principal de hormigón armado y disipadores TTD-NiTi instalados.	89
Figura 4.27. Acelerograma de la componente norte-sur del terremoto Campano-Lucano registrado en la estación sísmica de Calitri.	91
Figura 4.28. Posibles posiciones de inspección UT.....	92
Figura 4.29. Puntos inspeccionados durante los ensayos sísmicos.	93
Figura 5.1. a) Señal de UT, medida por transmisión en el testigo T1. b) Primera ondulación de la señal recibida.....	97
Figura 5.2. a) Señal de UT, medida por pulso-eco en el testigo T1. b) Primera ondulación de la señal recibida.	98
Figura 5.3. OPs extraídas de la inspección de UT: a) Transmisión en punto 2, testigos T6-T10. b) Pulso-eco en punto 3, testigos T1-T5.	98
Figura 5.4. Obtención del espectro de frecuencias de una señal de UT mediante la DFT, calculada con el algoritmo FFT.	101

Figura 5.5. Espectro de frecuencias de OPs extraídas: a) Transmisión en punto 2, testigos T6-T10. b) Pulso-eco en punto 3, testigos T1-T5.	102
Figura 5.6. Media y desviación típica de E_S de las 3 repeticiones, por punto. Testigos T6-T10 inspeccionados por transmisión.	103
Figura 5.7. Media y desviación típica de E_S de los 4 puntos, por testigo. a) T1-T5, transmisión; b) T1-T5, pulso-eco; c) T6-T10, transmisión; y d) T6-T10, pulso-eco.	103
Figura 5.8. a) Testigo T7 con deformación fuera de plano y b) Distintos ángulos de reflexión del eco dependiendo de posición de curvatura.	104
Figura 5.9. Media y desviación típica de ΔE de los 4 puntos, por testigo. a) T1-T5, transmisión; b) T1-T5, pulso-eco; c) T6-T10, transmisión; y d) T6-T10, pulso-eco.	105
Figura 5.10. Media y desviación típica de ΔE . Disipador C1, cara superior.	106
Figura 5.11. Media y desviación típica de ΔE . Disipador C1, cara lateral.	106
Figura 5.12. Media y desviación típica de ΔE . Disipador C2, cara superior.	107
Figura 5.13. Media y desviación típica de ΔE . Disipador C3, cara superior.	107
Figura 5.14. Media y desviación típica de ΔE . Disipador C4, cara superior.	107
Figura 5.15. OP afectada por varios niveles de ruido blanco gaussiano junto a la OP original. a) T1-T5, transmisión; b) T1-T5, pulso-eco; c) T6-T10, transmisión; y d) T6-T10, pulso-eco.	108
Figura 5.16. Espectro de OPs en T1-T5 inspeccionados por transmisión. a) OPs originales D ₀ -D ₅ y OPs afectadas por ruido en b) D ₀ c) D ₂ y d) D ₅	109
Figura 5.17. Espectro de OPs en T1-T5 inspeccionados por pulso-eco. a) OPs originales D ₀ -D ₅ y OPs afectadas por ruido en b) D ₀ c) D ₂ y d) D ₄	110
Figura 5.18. Espectro de OPs en T6-T10 inspeccionados por transmisión. a) OPs originales D ₀ -D ₅ y OPs afectadas por ruido en b) D ₀ c) D ₂ y d) D ₅	110

Figura 5.19. Espectro de OPs en T6-T10 inspeccionados por pulso-eco. a) Ops originales D₀-D₅ y Ops afectadas por ruido en b) D₀ c) D₂ y d) D₄. 111

Figura 5.20. Magnetograma de las trayectorias V1 y V2 en el testigo T3. 112

Figura 5.21. Magnetograma de las trayectorias H1 y H2 en el testigo T5. 113

Figura 5.22. Magnetogramas de las trayectorias H1 y H2 en los testigos a) T1, b) T2, c) T4 y d) T5. 114

Figura 5.23. Media y desviación típica del índice E_M en los testigos T1-T5.
a) Trayectorias verticales V1 y V2. b) Trayectorias horizontales H1 y H2. 115

Figura 5.24. Correlación $\Delta E-ID$. a) T1-T5, transmisión; b) T1-T5, pulso-eco; c) T6-T10, transmisión; y d) T6-T10, pulso-eco. 117

Figura 5.25. Comparativa de la correlación $\Delta E-ID$ en las técnicas de transmisión y pulso-eco. Izq.: Ensayos cíclicos de amplitud creciente. Der.: Ensayos cíclicos de amplitud constante. 118

Figura 5.26. Comparativa de la correlación $\Delta E-ID$ en patrones CR y CO. Izq.: Medidas de UT por transmisión. Der.: Medidas de UT por pulso-eco. 119

Figura 5.27. Correlación E_M-ID. a) Trayectorias verticales V1 y V2 y b) Trayectorias horizontales H1 y H2. 120

Figura 5.28. Correlación E_M-ID en trayectorias horizontales H1 y H2 para el rango de valores ID [0-0,8]. 121

Figure 6.1. Steel reinforcement on prototypes BD and SH. 126

Figure 6.2. Left: Strain gauge attached to the longitudinal reinforcement. Center: Beam reinforcement of V3 and V4. Right: Steel handle for lifting. 127

Figure 6.3. Left: Spread pea gravel for natural ventilation. Right: Fine sand dried in the furnace. 127

Figure 6.4. From left to right: Electric concrete mixer, steel reinforcement embedded on formwork, concrete vibrating, and plastic sheet for curing. 128

Figure 6.5. Four-point bending test, dimensions in mm. 128

Figure 6.6. Configuration of the four-point bending test. 129

Figure 6.7. Left: General test setup. Right: Spreader beam with two load points.....	129
Figure 6.8. Load-deflection diagrams on the beams V1-V5.	130
Figure 6.9. Layouts of AE sensors on prototypes BD and SH.	131
Figure 6.10. Attachment of the sensor R15 α and its sensitivity curve.....	132
Figure 6.11. Instrumentation to measure beam deflection and deformation of longitudinal reinforcement during the test.....	133
Figura 6.12. Planta y sección del forjado reticular del espécimen.....	135
Figura 6.13. Encofrado de los ábacos en el forjado. Izq.: Pilar exterior P1. Der.: Pilar interior P2.	138
Figura 6.14. Hormigonado del forjado del espécimen. Izq.: Vertido del hormigón. Der.: Estado previo y posterior al vertido del hormigón.....	138
Figura 6.15. Alzados del espécimen instalado sobre la mesa sísmica.	139
Figura 6.16. Configuración general del ensayo sísmico: Mesa sísmica de la Universidad de Granada (actuadores X e Y), estructura principal de HA con sobrecarga de uso, y estructura metálica auxiliar.....	140
Figura 6.17. Acelerograma original del terremoto registrado en la estación sísmica. Izq.: Calitri. Der.: Bar-Skupstina Opstine.	140
Figura 6.18. Distribución de los sensores de EA en el espécimen.....	142
Figura 6.19. Posición exacta de los sensores en el espécimen, cotas en mm.....	143
Figura 6.20. Fijación del sensor VS30-V y su curva de sensibilidad.	144
Figura 6.21. Equipo de adquisición AMSY-5 de señales de EA.	144
Figura 6.22. Instrumentación para medir la aceleración, el desplazamiento y la fuerza en el espécimen. De Izq. a Der.: Acelerómetro sísmico y piezoeléctrico <i>Brüel&Kjaer</i> , y sensor láser <i>KEYENCE</i> ; sensor LVDT <i>HBM</i> , y células de carga <i>HBM</i> ; equipo de adquisición <i>MGC-Plus</i> (<i>HBM</i>).	146
Figure 7.1. Windowing on signals C ₁ (left) and C ₂ (right).....	147
Figure 7.2. Visible cracks in beams V1-V5 after the mechanical test.	149
Figure 7.3. Scheme of cracks on beams V1-V5.	150

Figure 7.4. Linear localization on beams BD. 151

Figure 7.5. Planar localization, beams SH. 152

Figure 7.6. Discrimination criterion between tensile (flexural) and shear cracking modes. Source: [42]. 154

Figure 7.7. AF-RA correlation graph to discriminate flexure mode (FL) and shear or mixed mode (SH-MX). 154

Figure 7.8. Events FL and SH-MX in the RT-Time correlation graph. 156

Figure 7.9. RT classification on AF-RA correlation graph. 157

Figure 7.10. Planar localization of events in beams SH. Flexure mode ($RT \leq 500 \mu s$) and shear or mixed mode ($RT > 500 \mu s$). 158

Figure 7.11. Linear localization of events in beams BD. Flexure mode ($RT \leq 500 \mu s$) and shear or mixed mode ($RT > 500 \mu s$). 159

Figure 7.12. Forces and stresses on shear cracks of beams SH. 159

Figure 7.13. Accumulated AE energy curve of flexure and shear (or mixed) modes. 160

Figure 7.14. The derivative of the accumulated AE energy with respect to time, flexure mode. 161

Figure 7.15. The derivative of the accumulated AE energy with respect to time, shear (or mixed) mode. 161

Figura 7.16. Distribución de los sensores guarda en el espécimen. 163

Figura 7.17. Detección de señales anómalas en las gráficas de amplitud-duración en el espécimen BS1. a) ABE. b) ABI. c) BPE. d) BPI. 166

Figura 7.18. Detección de señales anómalas en las gráficas de amplitud-duración en el espécimen BS2. a) ABE. b) ABI. c) BPE. d) BPI. 166

Figura 7.19. Clústeres C_1 y C_2 para el espécimen BS1 en cada zona del mismo. a) ABE. b) ABI. c) BPE. d) BPI. 167

Figura 7.20. Clústeres C_1 y C_2 para el espécimen BS2 en cada zona del mismo. a) ABE. b) ABI. c) BPE. d) BPI. 167

Figura 7.21. Filtro Swansong aplicado en señales de la zona ABE. Especímenes BS1 (arriba) y BS2 (abajo). 169

Figura 7.22. Energía de EA acumulada a partir de señales obtenidas por filtrado RMS (línea continua) y por filtrado Swansong (línea discontinua) en zona BPE del BS1 (izq.) y la zona BPI del BS2 (der.).	170
Figura 7.23. Señal de EA del clúster C_1 asociada a la fisuración de hormigón.	171
Figura 7.24. Energía de EA acumulada en las zonas ABE y ABI de los especímenes BS1 (arriba) y BS2 (abajo).	173
Figura 7.25. Daño observado en las zonas ABE y ABI del espécimen BS1.	174
Figura 7.26. Localización planar en los ábacos exterior e interior.	175
Figura 7.27. Clasificación RT en la gráfica AF-RA en BS1, zonas a) ABE, b) ABI, c) BPE y d) BPI.	176
Figura 7.28. Clasificación RT en la gráfica AF-RA en BS2, zonas a) ABE, b) ABI, c) BPE y d) BPI.	177
Figura 7.29. Energía E_{EA} y energía plástica $W_{C,p}$. BPE, espécimen BS1.	179
Figura 7.30. Energía E_{EA} y energía plástica $W_{C,p}$. BPI, espécimen BS1.	179
Figura 7.31. Energía E_{EA} y energía plástica $W_{C,p}$. BPE, espécimen BS2.	180
Figura 7.32. Energía E_{EA} y energía plástica $W_{C,p}$. BPI, espécimen BS2.	180
Figura 7.33. EA_{SIGN} durante la simulación C200b. BPE, espécimen BS1.	182
Figura 7.34. Energía de EA acumulada en cada simulación sísmica, con inicio de actividad acústica significativa, EA_{SIGN} . BPE, espécimen BS1.	182
Figura 7.35. Energía de EA acumulada en cada simulación sísmica, con inicio de actividad acústica significativa, EA_{SIGN} . BPI, espécimen BS1.	183
Figura 7.36. Energía de EA acumulada en cada simulación sísmica, con inicio de actividad acústica significativa, EA_{SIGN} . BPE, espécimen BS2.	183
Figura 7.37. Energía de EA acumulada en cada simulación sísmica, con inicio de actividad acústica significativa, EA_{SIGN} . BPI, espécimen BS2.	184
Figura 7.38. Correlación de energía plástica $W_{C,p}$ acumulada con el índice TDI, en especímenes BS1 y BS2.	185

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Media de muertos al año por cada desastre natural durante el periodo 2000-2017.....	2
Tabla 4.1. Número de ciclos y desplazamiento máximo alcanzado en los testigos T1-T5.....	70
Tabla 4.2. Número de ciclos y desplazamiento máximo alcanzado en los testigos T6-T10.....	71
Tabla 4.3. Parámetros del generador de pulsos y del osciloscopio para la inspección por transmisión.....	77
Tabla 4.4. Parámetros del generador de pulsos y del osciloscopio para la inspección por pulso-eco.....	79
Tabla 4.5. Aceleración máxima en las simulaciones de los ensayos sísmicos.....	90
Tabla 4.6. Matriz de inspecciones UT en los disipadores C1, C2, C3 y C4 antes y durante los ensayos sísmicos.....	94
Tabla 5.1. Valores del índice de daño <i>ID</i> para testigos T1-T10.....	96
Table 6.1. Matrix of quasi-static tests of BD and SH beams.....	125
Table 6.2. Dosage of concrete HA-25/2/4/IIa for beams V1-V3.....	125
Table 6.3. Dosage of concrete HA-25/2/4/IIa for beams V4 and V5.....	125
Table 6.4. Spatial location of AE sensors on prototypes BD and SH.....	131
Table 6.5. Parameters set in the acquisition system Micro-II-Express.....	132
Tabla 6.6. Dosificación del Hormigón HAC-40/AC-E3/4/IIa.....	136
Tabla 6.7. Valores obtenidos del ensayo de escurrimiento.....	136
Tabla 6.8. Resistencia a compresión en MPa.....	136
Tabla 6.9. Aceleración máxima en las simulaciones sísmicas.....	141
Tabla 6.10. Parámetros configurados en el equipo de adquisición AMSY-5.....	145
Table 7.1. RMS filter for beams V1-V5.....	149
Table 7.2. Elastic wave velocity measured on beams V1-V5 after testing.....	153

Tabla 7.3. Sensores usados en cada zona monitorizada.....	164
Tabla 7.4. Filtrado RMS en los especímenes BS1 y BS2.....	168
Tabla 7.5. Límites de duración en el filtrado Swansong para excluir señales indeseadas en estructuras de HA. Fuente [78].....	169
Tabla 7.6. Simulación sísmica de inicio de plastificación en las barras de acero.....	18

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación y estado del arte

El proceso industrial que implica el proyecto y la construcción de edificios y obras civiles está sujeto a un elevado número de variables (acciones, resistencias, etc.) que derivan de las condiciones físico-ambientales del entorno donde se ubica la obra, de los procedimientos de ingeniería civil, de los materiales que se emplean, etc. Entre los diferentes tipos de acciones a considerar en el proyecto de una estructura, las de origen sísmico son con diferencia las de mayor complejidad, por su fuerte variabilidad y los elevados niveles de intensidad que pueden alcanzar.

Los terremotos tienen un gran impacto tanto a nivel humano como económico. Según los datos [1] de la *United States Geological Survey*, se estiman unos 800.000 muertos en todo el mundo en lo que llevamos del siglo XXI (2000-2016). Por su parte, los últimos datos [2] del *International Disaster Database* (EM-DAT) apuntan a los terremotos como el desastre natural que más muertes causa, como se puede apreciar en la Tabla 1.1.

Death Toll by Disaster Type (average 21st Century)	
Event	Average (2000-2017)
Drought	1,361
Earthquake	46,173
Extreme temperature	10,414
Flood	5,424
Landslide	929
Mass movement (dry)	20
Storm	12,722
Volcanic activity	31
Wildfire	71
Total	77,144

Tabla 1.1. Media de muertos al año por cada desastre natural durante el periodo 2000-2017.

A nivel europeo, el impacto humano y económico de los terremotos se resume en los 700 fallecidos, los 255.000 afectados y los 30.000 millones de dólares de pérdidas materiales [3] en el mismo periodo (2000-2017). De estos datos, la totalidad de los fallecidos se han censado en la región sur (Italia, Grecia, España y Serbia), donde también se concentra más del 95% de afectados y pérdidas materiales computadas en el continente.

Por lo tanto, la intervención activa para reducir el riesgo sísmico con soluciones y estrategias que disminuyan la vulnerabilidad de las construcciones, se considera actualmente un objetivo de primer orden. Se trata de, principalmente, garantizar la vida de las personas y reducir las pérdidas económicas. Conceptualmente, se puede considerar el riesgo sísmico como una combinación de dos factores: 1) la peligrosidad sísmica, relacionada con la severidad (magnitud o intensidad) del evento, y 2) la vulnerabilidad de las construcciones, que tiene que ver con los daños que experimentan para un determinado nivel de la peligrosidad sísmica. Resulta evidente que la única opción de reducir el riesgo pasa por actuar sobre el segundo factor.

Atendiendo al impacto humano y económico de los terremotos, conviene señalar que las obras civiles más comunes y que concentran a la mayor parte de la población en zonas urbanas son los edificios de varias plantas. Así pues, parece lógico priorizar las mejoras tecnológicas y procedimentales en este

tipo de obras civiles para aumentar su capacidad resistente frente a los eventos sísmicos.

El reto que suponen los terremotos para la ingeniería civil y la necesidad de reducir las pérdidas ha impulsado en las últimas décadas al desarrollo de distintos sistemas innovadores de protección sísmica. Más concretamente, los sistemas de control pasivo basados en la absorción de energía sísmica en dispositivos especiales denominados disipadores de energía. Este tipo de dispositivos ha tenido un desarrollo importante durante este tiempo, demostrando su eficacia para reducir o eliminar los daños en la estructura principal encargada de soportar las cargas gravitatorias, y concentrarlos en elementos fácilmente sustituibles (los disipadores). Si bien, su uso sigue siendo limitado en regiones como el sur de Europa, su empleo es creciente y debe ser impulsado con el desarrollo de sistemas de control pasivo económicamente viables y de fácil instalación.

En este sentido, los trabajos [4-10] llevados a cabo en la Universidad de Granada por el equipo de investigadores liderados por el Prof. Amadeo Benavent-Climent han culminado con patentes de nuevos disipadores histeréticos tipo WPD (*Web Plastifying Damper*) [11], cuya eficacia se ha validado a través de ensayos estáticos [4, 5, 7] y dinámicos con mesa sísmica [6, 8, 9], en diferentes tipos de estructuras (porticadas, de forjados reticulares) de hormigón armado. En los últimos años, las investigaciones de este equipo han evolucionado a nuevos disipadores con propiedades de recentrado empleando materiales con memoria de forma, concretamente barras de Niquel-Titanio (NiTi) [12]. Este último tipo de disipadores se ha instalado en estructuras de hormigón armado que han sido sometidas a simulaciones sísmicas biaxiales. La idea de utilizar materiales con memoria de forma para sistemas de protección sísmica tiene cierto recorrido [13-18], aunque presentan el inconveniente de un alto precio y adolecen de una limitada capacidad para disipar la energía sísmica. Frente a estas limitaciones, la idea innovadora del nuevo disipador TTD-NiTi desarrollado recientemente por el equipo del Prof. Amadeo Benavent-Climent es combinar un material convencional, en este caso el acero inoxidable, con

materiales especiales con memoria de forma, como las aleaciones de metales, de tal forma que el coste del disipador se mantenga competitivo, su capacidad de disipación de energía sea elevada y aporte propiedades de recentrado.

Dentro de las investigaciones sobre el nuevo disipador TTD-NiTi y su implementación en estructuras de HA, esta Tesis Doctoral se articula en torno a dos ejes principales: la evaluación del estado de salud (*Structural Health Monitoring*, SHM) de la estructura principal donde se instala el nuevo disipador, y de la monitorización del nivel de daño del nuevo disipador.

El daño que un terremoto produce en una estructura de HA se materializa principalmente a través de la fisuración del hormigón y de la plastificación del acero. Dependiendo del grado de fisuración del hormigón y de su alcance, se pueden originar otros mecanismos de deterioro fatales para la estructura, como por ejemplo el fallo de adherencia entre el hormigón y el acero de refuerzo. Cuantificar la energía de deformación plástica disipada por el hormigón en estructuras de HA sometidas a terremotos resulta útil para conocer de forma fiable su grado de fisuración, y con ello conocer el daño acumulado en la estructura. Sin embargo, medir la cantidad de energía de deformación plástica disipada por el hormigón es difícil y especialmente costoso por la cantidad de instrumentación que se necesitaría instalar en la estructura (principalmente galgas extensométricas en las barras de refuerzo).

Como alternativa económica, la aplicación del método de **emisión acústica (EA)** [19-22] ha demostrado ser muy práctica para la **monitorización de estructuras** [23-25]. El método se basa en el principio físico (emisión acústica) por el cual toda variación en el campo de las deformaciones del material libera una energía que se propaga en forma de onda elástica y que puede ser captada en la superficie. Se trata pues de un método pasivo, que puede ser aplicado en tiempo real mientras la estructura está en servicio, y su dominio de acción alcanza todo el volumen del elemento.

Recientemente se ha probado con éxito en estructuras sometidas a terremotos uniaxiales reproducidos por la mesa sísmica de la Universidad de Granada [26-35], y en particular, la correlación entre la energía plástica disipada por el hormigón y la energía de EA ha resultado ser una buena estrategia para confirmar la fiabilidad del método de EA a la hora de evaluar el daño acumulado en el hormigón [28, 29, 32, 34]. Actualmente, el reto que se plantea es corroborar estos buenos resultados en simulaciones sísmicas más realistas, esto es, en ensayos sísmicos biaxiales.

El éxito del método de EA depende en gran medida del análisis de las señales y sus parámetros para determinar su origen. De forma general, se han desarrollado numerosos trabajos sobre la clasificación de señales según el mecanismo que las origina [36-39], de los cuales unos pocos se han focalizado en diferenciar aquellas señales genuinas propias de la fisuración del hormigón de las señales procedentes de ruido indeseado y fricciones entre las caras de las grietas [29, 32, 33]. Además de aislar la EA relacionada directamente con el daño en el hormigón (apertura y propagación de fisuras), de la producida por las fuentes indeseadas anteriores, es importante distinguir a través de la EA el tipo de mecanismo que ha generado la fisura; concretamente si son fisuras producidas por esfuerzos flectores o por esfuerzos cortantes. Esta información puede ser clave para distinguir entre fallos a flexión y fallos a cortante en los elementos estructurales, lo cual es vital para anticipar un fallo dúctil (fallo a flexión) o un fallo súbito (fallo a cortante) de la estructura. La clasificación basada en el código japonés sobre grietas en el hormigón [40] ha sido continuamente utilizada en distintos experimentos [23, 36-39, 41, 42], aunque no ofrece una separación concluyente entre los modos de fisuración a flexión y a cortante. En este trabajo se propone una forma alternativa para lograr una separación clara y objetiva entre ambos mecanismos, la cual se valida con ensayos estáticos a flexión y ensayos dinámicos con mesa sísmica. El abordar el problema anterior con estructuras sometidas a cargas dinámicas de tipo sísmico es ya de por sí un reto, pero si se le añade el que las acciones sísmicas sean biaxiales, el reto se convierte en un desafío mucho más importante. Esta Tesis se enfrenta a este desafío con

el ánimo, no de resolver el problema en su totalidad, sino de aportar alguna luz.

Por otra parte, el refuerzo de estructuras en zonas de sismicidad moderada mediante el uso de disipadores hysteréticos exige de igual modo un seguimiento del estado de éstos, referente a su “salud” y a la necesidad de sustituirlos tras un terremoto moderado o severo. De hecho, la viabilidad económica de estos dispositivos depende en gran medida de la evaluación de su estado después de un terremoto, para así decidir su sustitución o no en función de si han agotado toda su capacidad o si el potencial de disipación remanente es suficiente para afrontar un nuevo evento. Investigaciones anteriores [4] propusieron un índice de daño mecánico (*ID*) basado en la descomposición de las curvas hysteréticas en las partes del esqueleto y de Bauschinger, cuya fiabilidad ha sido validada en diferentes ensayos estáticos y dinámicos [5-7, 9]. Este índice *ID* se puede emplear para la estimación del nivel de daño del disipador y su capacidad remanente frente a eventos futuros. No obstante, su aplicación en la práctica se ve lastrada por el alto coste que implica la instrumentación necesaria para medir la información que requiere el cálculo del índice *ID* (los desplazamientos y las fuerzas en el disipador durante el sismo).

Los ensayos no destructivos (END) pueden ser un recurso económico y de fácil aplicación para obtener el nivel de daño alcanzado en el disipador. Así por ejemplo, los ensayos de vibraciones que se llevaron a cabo en investigaciones previas sobre el disipador tipo WPD [5, 9, 10], concluyeron que existe una alteración en la respuesta vibracional del disipador por el cambio físico que supone la plastificación del acero. En esta Tesis se abordan otras dos técnicas empleadas en END y se aplican al nuevo disipador TTD-NiTi: (1) los **ultrasonidos (UT)**, y (2) la **memoria magnética del metal (MMM)**. Respecto a la primera, se parte de la premisa de que la amplitud de la señal ultrasónica es sensible a los efectos no lineales que se producen en el material cuando se encuentra en el rango inelástico [43]. En efecto, la atenuación de la señal por efecto de la plastificación o la dislocación cristalina ha sido constatada en estudios experimentales en metales [44, 45],

aunque nunca fue directamente comparada con el daño real producido en el material. En relación al segundo método, el principio físico en el que se fundamenta es la magnetoestricción de los materiales ferromagnéticos [46, 47], observado en diferentes elementos metálicos [48-51] al inspeccionarlos con el método MMM, aunque sin validar una relación directa con el daño producido en dichos materiales. El índice de daño mecánico (ID) es, en este caso, un indicador ampliamente validado, que sirve de referencia para determinar la eficacia o no de los ultrasonidos en la estimación del daño acumulado en el disipador.

1.2. Objetivos

El presente trabajo forma parte de las investigaciones del grupo ADIME (Acústica y Diagnóstico de Materiales y Estructuras) sobre nuevas técnicas vibro-acústicas para la monitorización y evaluación del daño en materiales y estructuras. En particular, el objetivo de la Tesis Doctoral consiste en el uso de ensayos no destructivos (END) para evaluar el daño en estructuras bidireccionales de hormigón armado sometidas a simulaciones sísmicas biaxiales y en disipadores histeréticos con propiedades de recentrado que emplean materiales con memoria de forma. De forma específica, se plantean los siguientes objetivos parciales:

- Uso de los métodos de ultrasonidos (UT) y la memoria magnética del metal (MMM) para inspeccionar la parte TTD (acero inoxidable) de los disipadores TTD-NiTi y desarrollo de nuevos índices de daño ΔE y E_M , respectivamente.
- Aplicación de los nuevos índices de daño en los disipadores TTD-NiTi durante ensayos cuasi-estáticos (cíclicos) y dinámicos (simulaciones sísmicas), y comparación con el índice de daño mecánico ID previamente validado.
- Uso del método de emisión acústica (EA) para la monitorización de la fisuración del hormigón durante ensayos cuasi-estáticos (vigas) y dinámicos (forjado bidireccional).

- Propuesta de mejora para la clasificación de las señales de EA procedentes de los modos de fisuración a flexión y a cortante.
- Desarrollo de un nuevo índice de daño temporal TDI (*Temporal Damage Index*) basado en la energía de EA y su correlación con el daño estimado por la energía de deformación plástica disipada por el hormigón.

1.3. Marco de la investigación

Los trabajos de esta Tesis Doctoral han sido desarrollados dentro de los grupos de investigación ADIME (TEP232) y Mecánica de Suelos y Estructuras (TEP-167) de la Junta de Andalucía, bajo el Proyecto de Excelencia PA12-TEP-2429 denominado “Disipadores de energía histéricos avanzados con propiedades de recentrado y memoria de forma: desarrollo, monitorización del daño y estrategias de implementación en el mercado (DIMFO)” [12], cuyo investigador principal es el Dr. Antolino Gallego Molina, y en el que participa también el Dr. Amadeo Benavent-Climent. Asimismo, la Tesis Doctoral también ha sido financiada por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España a través del Programa de Formación del Profesorado Universitario (FPU014/04840) durante el periodo 20015-2019.

1.4. Estructura de la tesis

La Tesis Doctoral se compone de 8 capítulos que se estructuran en 4 partes diferenciadas: la introducción (Capítulo 1), el marco teórico (Capítulos 2 y 3), la parte experimental (Capítulos 4-7) y las conclusiones (Capítulo 8).

El **Capítulo 1** incluye la motivación de la Tesis Doctoral, el estado del arte del que parte, el marco de investigación en la que se desarrolla, los objetivos que se plantea cumplir y su estructura.

El **Capítulo 2** presenta los sistemas de protección sísmica y su clasificación, focalizando sobre los disipadores histeréticos, y en especial, el nuevo disipador TTD-NiTi con propiedades de recentrado.

El **Capítulo 3** se dedica a los ensayos no destructivos (END) utilizados en los trabajos experimentales de la Tesis, y en el que se describe el principio físico y las particularidades del método de ultrasonidos (UT), del método de emisión acústica (EA), y del método de la memoria magnética del metal (MMM).

En el **Capítulo 4** se describen los ensayos cíclicos y sísmicos aplicados en los disipadores TTD-NiTi: configuración del ensayo, especímenes ensayados, instrumentación, y monitorización con UT y MMM.

El **Capítulo 5** recoge los resultados relativos a los ensayos cíclicos y sísmicos descritos en el capítulo anterior. Se introduce el índice de daño mecánico ID , previamente validado, con el que se comparan los índices de daño nuevos que se proponen.

En el **Capítulo 6** se explican en detalle los ensayos cuasi-estáticos aplicados en vigas de HA y los ensayos sísmicos aplicados a estructuras bidireccionales de HA. Se describe la configuración del ensayo, la elaboración de especímenes ensayados, la instrumentación, y la monitorización con EA.

En el **Capítulo 7** se exponen los resultados de los ensayos previamente descritos, explicando el procedimiento seguido para el filtrado de señales de EA. En los ensayos cuasi-estáticos se propone una forma de separar los modos de fisuración del hormigón. En los ensayos sísmicos se trabaja con la energía de EA, y se propone un nuevo índice de daño temporal (TDI) comparándolo con la energía de deformación plástica disipada por el hormigón.

El **Capítulo 8** incluye las conclusiones que se extraen en esta Tesis Doctoral, y futuras líneas de investigación.

Por último, se relacionan las referencias bibliográficas que se citan en este trabajo.

2. SISTEMAS PASIVOS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

2.1. Sistemas de protección sísmica

Las estructuras de ingeniería pueden verse expuestas a cargas accidentales extremas que provocan daños importantes y llegan a comprometer su funcionalidad e incluso su seguridad. El origen de estas cargas puede ser muy variado, aunque atendiendo a su naturaleza, podemos clasificarlas en dos clases: estáticas o dinámicas. En el caso particular de las estructuras de edificación, las cargas estáticas pueden ser caracterizadas con relativa facilidad, y sus valores varían en rangos bastante acotados. En cambio, existen cargas dinámicas como las provocadas por los terremotos, que tienen una naturaleza fuertemente aleatoria, no se pueden predecir y con un potencial de daño muy superior al de las cargas de origen gravitatorio.

Desde hace varias décadas se han ido implementando distintas estrategias para mejorar la respuesta de las estructuras frente a las cargas sísmicas, incidiendo en parámetros dinámicos como la masa, la rigidez, el amortiguamiento y la capacidad de disipación de energía mediante deformaciones plástica. La filosofía de proyecto sismorresistente actual implementada en las normativas está orientada principalmente a evitar el

colapso de la estructura durante un terremoto y la pérdida de vidas humanas. Afortunadamente, en estos momentos el número de víctimas provocadas por sismos severos en estructuras proyectadas según las normativas modernas es muy reducido. Sin embargo los daños siguen siendo muy elevados e inaceptables en las sociedades modernas. Actualmente la ingeniería sísmica está experimentando un cambio de paradigma que al objetivo de protección de la vida añade un nuevo objetivo: el de control/reducción/eliminación del daño. Para la consecución de este nuevo objetivo se están desarrollando nuevas estrategias de proyecto y sistemas innovativos entre los que se encuentran las estructuras con disipadores de energía. Actualmente existe una gran variedad de dispositivos de protección sísmica.

En el siguiente apartado se describe brevemente la evolución de las estrategias de control de daño en estructuras sometidas a terremotos.

2.1.1. Reseña histórica

El concepto de control estructural, tal como lo entendemos en la actualidad, tiene su origen en los trabajos empíricos que se iniciaron a finales del siglo XIX y que inauguraron la noción de aislamiento sísmico [52, 53]. El profesor John Milne, de la Universidad de Tokio, demostró que una estructura podía aislarse del movimiento sísmico del terreno ensayando una casa de madera sobre cojinetes de bolas. De forma paralela, en Estados Unidos, Jules Touaillon patentó una idea similar, donde las superficies de contacto entre el edificio y el suelo contaban con concavidades esféricas enfrentadas, y entre las cuales se interponían bolas que permitían los desplazamientos laterales del edificio. En Japón, justo después del gran terremoto de Nobi de 1891, Kozo Kawai ideó un sistema en el que el edificio se asentaba sobre troncos de madera dispuestos en direcciones perpendiculares. Después, a principios del siglo XX, vendrían más sistemas patentados, similares a los ya mencionados. Sobre estas ideas se desarrollaron los sistemas de aislamiento de base que es actualmente una solución de uso creciente y efectividad demostrada para controlar el daño.

El siguiente hito no tendría lugar hasta después de la Segunda Guerra Mundial, cuando la carrera aeroespacial y armamentística impulsan un avance en la aplicación de la teoría de sistemas lineales al campo de las vibraciones, desarrollando conceptos claves en el control estructural como el aislamiento, la absorción y el amortiguamiento de vibraciones [52]. Como consecuencia, el control estructural en la ingeniería civil dio un salto cualitativo notable durante la década de los sesenta, gracias a la adaptación de los nuevos conocimientos al diseño sismorresistente de estructuras civiles. Cabe mencionar el trabajo de James T.P. Yao que en 1972 [54] recopiló aplicaciones pioneras del control estructural en la ingeniería civil.

En relación a la normativa en materia de protección sísmica, Japón y Estados Unidos fueron pioneros en implementar en su normativa un marco regulador para los sistemas con aislamiento de base, que se incorporaron al poco tiempo en Europa a través del Eurocódigo 8 (EN 1998). En Estados Unidos el primer código se publicó en 1989, bajo el título de *General Requirements for the design of seismic isolated structures*, que vino a completar el libro azul de la Asociación de Ingenieros Estructurales de California (SEAOC), publicado 3 años antes.

También cabe destacar que el 10^o Congreso Internacional de Ingeniería Sísmica (Madrid, 1992) fue un evento de especial relevancia, donde se trataron varios aspectos relacionados con el control estructural, lo que propició al año siguiente la creación de la Asociación Internacional de Control Estructural (IASC).

Hoy en día, los códigos sismorresistentes de países que se encuentran en regiones con una actividad sísmica intensa, incluyen las bases para la protección sísmica, con especial atención a los sistemas de aislamiento sísmico y los sistemas pasivos de disipación de energía. Actualmente se está redactando la segunda generación del Eurocódigo 8, que incluirá un capítulo específico para el proyecto de estructuras con disipadores de energía.

2.1.2. Clasificación de los sistemas de protección sísmica

Los sistemas de protección sísmica se pueden clasificar siguiendo dos criterios; atendiendo a su localización, podemos hablar de sistemas internos, los cuales son básicamente los disipadores de energía, o sistemas externos, que por lo general, suelen ubicarse entre la cimentación y la superestructura; atendiendo al principio de funcionamiento, los sistemas de protección sísmica se dividen en activos, pasivos e híbridos [53]. La edición reciente de la norma ISO 3010:2017 [55], rigiéndose por el segundo criterio, recoge una exhaustiva clasificación, que se muestra en la Figura 2.1 y que se resume a continuación.

Sistemas de control activo o híbrido

El principio de funcionamiento de los sistemas activos se basa en la aportación externa de energía a la estructura para disipar o contrarrestar la energía sísmica. La instalación de estos sistemas es costosa, pues se componen de un equipo de control, sensores, actuadores y motores de arranque. Dentro de este grupo podemos destacar 3 sistemas: el amortiguador de masa activa, el control de rigidez y el amortiguador de masa sintonizada (híbrido).

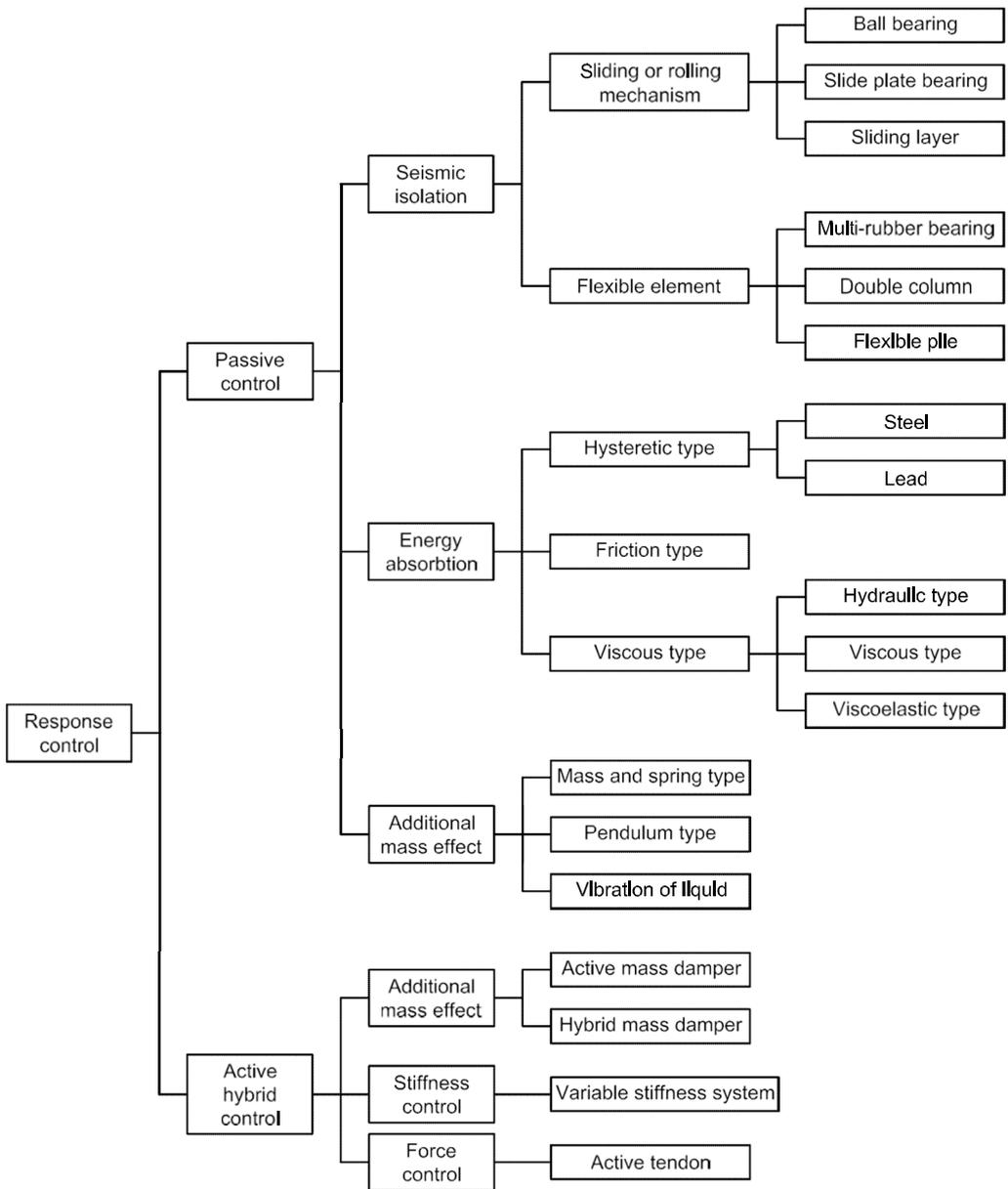


Figura 2.1. Clasificación de los sistemas de protección sísmica. Fuente: [55].

Sistemas de control pasivo

Los sistemas pasivos se basan en el empleo de dispositivos que absorben y disipan energía sísmica, y que funcionan sin necesidad de fluido eléctrico. Estos sistemas se componen de disipadores, aisladores y otros dispositivos, todos ellos disponibles y de menor coste que los anteriores [56].

Los **aisladores de base** son elementos que, debido a su baja rigidez lateral, alargan el periodo fundamental de la estructura a zonas del espectro en las cuales la cantidad de energía introducida por el sismo es muy baja [52].

Los sistemas pasivos de **masa adicional**, por su parte, combinan masas elevadas (en relación con el peso de la construcción) con disipadores de energía para mitigar las vibraciones transmitidas por el sismo.

Finalmente, los **disipadores de energía**, disponibles en una amplia gama de materiales, aumentan el amortiguamiento equivalente de la estructura gracias a su capacidad de disipación de energía. Con ello se limitan los desplazamientos horizontales aumentando la rigidez de la estructura [57]. Podemos distinguir tres sistemas de disipación de energía: histeréticos, de fricción y viscosos.

2.1.3. Disipadores histeréticos

Los disipadores de energía de tipo histerético destacan por su capacidad para absorber una gran cantidad de energía sísmica, especialmente los fabricados en acero, aprovechando la fluencia que se produce en este material cuando se alcanza el rango plástico. La energía puede disiparse movilizand o esfuerzos de torsión, flexión o axiales [58]. El uso de los disipadores histeréticos se ha extendido gracias a las diferentes ventajas que presenta, de las cuales podemos resaltar tres: i) la elevada capacidad de disipación de energía; ii) la estabilidad a lo largo del tiempo y la no dependencia de factores como la temperatura; iii) su coste.

Las primeras investigaciones sobre el desarrollo de estos disipadores se iniciaron en 1970 y vinculados a la industria nuclear. Se empezaron a implantar en países como Nueva Zelanda, Japón, Estados Unidos, Italia, Chile o México. A continuación se enumeran los disipadores histeréticos más utilizados a día de hoy.

Disipador “*Buckling-Restrained Brace*” (BRB)

La idea del arriostramiento con barras de pandeo restringido nace con el propósito de impedir el pandeo del acero, a fin de aprovechar su capacidad

frente a los esfuerzos axiales. El núcleo de acero queda embebido en un material de confinamiento y una camisa tubular de acero exterior [59, 60].



Figura 2.2. Esquema descriptivo del disipador BRB. Fuente: [59].

Disipador “*Added Damping and Stiffness System*” (ADAS)

El disipador consiste básicamente en varias chapas de acero en forma de X colocadas en paralelo y unidas entre sí para trabajar solidariamente. La geometría particular del dispositivo permite una plastificación uniforme en toda la sección, de forma que se optimiza su capacidad de disipación de energía [61].

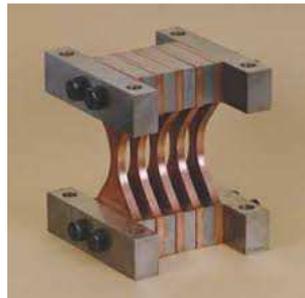


Figura 2.3. Disipador tipo ADAS.

Disipador “*Honeycomb Damper System*” (HDS)

El principio de disipación de este elemento es similar al anterior, solo que en este caso el esfuerzo cortante actúa en el plano de la chapa de acero.



Figura 2.4. Disipador tipo HDS de la empresa *Kajima Corporation* instalado en muro de hormigón. Fuente: <http://www.kobori-takken.co.jp>

Disipador “*Web Plastifying Damper*” (WPD)

En los disipadores tipo WPD, los elementos de disipación son segmentos de sección I dispuestos paralelamente, y en dirección perpendicular al eje del disipador. Los brazos auxiliares, que consisten en secciones U o similar, se encargan de transmitir los esfuerzos axiales a las secciones I a través de fijaciones con tornillos de alta resistencia. El desplazamiento relativo entre las alas superior e inferior de las secciones I produce plastificación en las uniones ala-alma. La Figura 2.5 muestra la configuración del disipador WPD, así como el patrón de disipación de las secciones I.



Figura 2.5. Disipadores tipo WPD. Izq.: Instalación del disipador en una estructura. Der.: Anclaje del disipador al nudo inferior.

Los disipadores WPD han sido ideados y desarrollados por el profesor Benavent-Climent [7], y patentados por la Universidad de Granada (Patente número ES2357591-B2).

Disipador “*Tub-in-Tube*” (TTD)

Se trata de un disipador de energía sísmica para una estructura resistente primaria de una construcción que se puede instalar en una estructura como una barra diagonal convencional. Bajo solicitaciones axiales disipa energía de forma estable sin pandear. El disipador está formado por dos tubos dispuestos de forma telescópica, y conectados en varios puntos de unión mediante soldaduras o tornillos. En las zonas próximas a los puntos de unión de las paredes del tubo exterior se practican perforaciones cuyo número, geometría y separación determina el volumen de acero plastificado y la resistencia y rigidez axial del disipador. La Figura 2.6 muestra la configuración del disipador TTD.

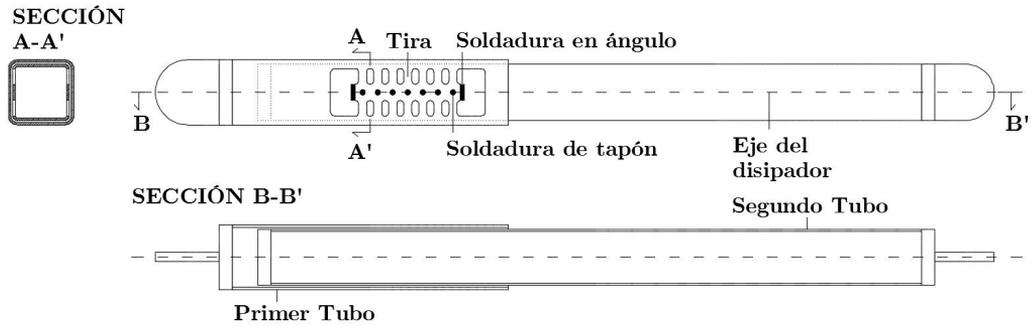


Figura 2.6. Disipadores tipo TTD.

Los disipadores TTD han sido ideados y desarrollados por el profesor Benavent-Climent [62], y patentados por la Universidad de Granada (Patente número ES2350217-B2).

2.2. Disipadores histeréticos avanzados con propiedades de recentrado y memoria de forma

En el apartado anterior se enumeraron algunos de los sistemas histeréticos más representativos, destacando las grandes ventajas de este tipo de disipadores frente a otros. Sin embargo, todos ellos adolecen de un inconveniente común: la dificultad de eliminar las deformaciones laterales remanentes en la estructura después de un seísmo. Para superar esta limitación, se han planteado recientemente soluciones basadas en el uso de

materiales con memoria de forma (*shape memory alloys*) de los cuales se aprovechan sus propiedades de superelasticidad para eliminar o reducir deformaciones plásticas remanentes en la estructura tras el sismo. Una solución que se está actualmente investigando consiste en combinar el disipador TTD descrito en el apartado anterior fabricado con un tipo de acero muy dúctil (acero inoxidable), con barras de materiales con memoria de forma (aleaciones de Níquel-Titanio, NiTi). El disipador se ilustra en la Figura 2.7. La barra de Níquel y Titanio (NiTi) tipo A-0.50000-SE, se encuentra alojada en el interior de los tubos y anclada a cada uno de sus extremos. Una de las partes de esta Tesis se centra en la monitorización del daño del disipador TTD fabricado con acero inoxidable.

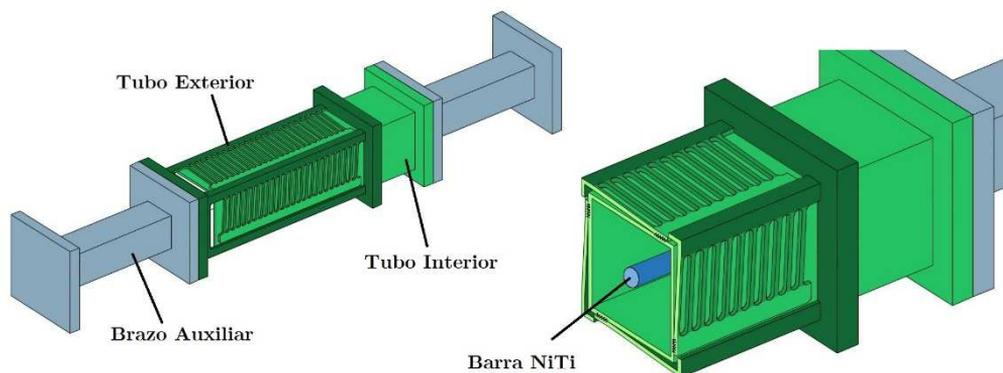


Figura 2.7. Configuración general del disipador y sección perpendicular.

Estos disipadores, que actualmente se encuentran en proceso de desarrollo, ya han sido ensayados bajo cargas cíclicas para su caracterización histerética. Así mismo, los disipadores han sido instalados en estructuras de hormigón armado y ensayados con cargas dinámicas, con la mesa sísmica de la Universidad de Granada.

2.2.1. Instalación del disipador en la estructura

Los disipadores de energía en general, y los histeréticos en particular, se utilizan principalmente como dispositivos integrados dentro de la estructura principal. Mientras ésta se encarga de soportar los efectos de las cargas gravitatorias, los disipadores absorben la mayor parte de las fuerzas sísmicas horizontales y disipan casi toda la energía introducida por el terremoto.

Una configuración eficaz para la puesta en obra del disipador es instalarlo como una barra diagonal convencional, esto es, conectando en los nudos opuestos de un mismo vano y vigas contiguas de un pórtico. El disipador puede emplearse en estructuras de nueva planta o existentes, es decir, en actuaciones de rehabilitación o acondicionamiento sísmico. Su integración desde la fase de concepción del proyecto cuenta con la ventaja de poder optimizar el diseño de la estructura principal.



Figura 2.8. Disipador BRAD de la casa comercial *FIP Industriale* instalado en la fachada de un edificio de estructura porticada. Fuente: <https://www.archiproducts.com/es>

3. MÉTODOS DE INSPECCIÓN DE DISIPADORES Y ESTRUCTURAS

3.1. Ensayos no destructivos

Una estructura de ingeniería debe satisfacer adecuadamente los fines para la que se construyó durante el periodo de vida útil asociado. Ello implica que la estructura con el paso del tiempo siga cumpliendo unas exigencias mínimas de funcionalidad aspecto y seguridad. De los tres, el criterio de seguridad es el de mayor importancia, y por ende, el que puede determinar el final de la vida útil de la estructura.

El envejecimiento de los materiales y la actuación repetida de las cargas, ya sean ordinarias como las generadas por el tráfico, o extraordinarias como las provocadas por sismos, provocan procesos de fatiga (de alto o bajo ciclaje) que pueden acabar comprometiendo la funcionalidad o seguridad de la estructura. Por lo tanto, se hace necesario llevar a cabo una evaluación de la salud estructural (*Structural Health Monitoring*, SHM) para diagnosticar posibles anomalías.

El primer paso para realizar una evaluación de la salud estructural es la inspección del material, puesto que ayuda a recopilar información útil acerca de él. En este sentido, los ensayos no destructivos (END) son técnicas

especialmente adecuadas para esta finalidad, ya que proporcionan información sobre el objeto inspeccionado sin que éste sufra deterioro alguno. Se basan en el uso o medición de propiedades físicas para detectar anomalías puntuales o locales. Algunos de los END son aplicables mientras el objeto se encuentra en servicio, lo que permite su aplicación en sistemas de monitorización continua o periódica durante la vida útil de los materiales.

Existe una gran variedad de métodos y técnicas de ensayos no destructivos, de los cuales describiremos 3 en este capítulo: Emisión acústica (EA), ultrasonidos (UT), y memoria magnética del metal (MMM), los cuales se han usado en esta Tesis Doctoral.

3.2. El método de ultrasonidos (UT)

Los ultrasonidos son ondas acústicas, que como su propio nombre indica, son de igual naturaleza que el sonido, pero cuya frecuencia está por encima de los 20 kHz. Fue el multifacético Francis Galton quien, en 1883, quien descubrió que la propagación de ondas acústicas inaudibles por el ser humano era similar a la de las ondas sonoras. Sin embargo, los primeros estudios en este campo se interesaron por la generación de ultrasonidos, para así poder estudiar su propagación en los materiales. El primer cimiento lo puso James P. Joule con su descubrimiento del efecto magnetoestrictivo en 1847, y posteriormente, en 1880, los hermanos Curie descubrieron la piezoelectricidad. Fue durante la década de los 80 del siglo XIX cuando realmente se pudo materializar la generación de ultrasonidos, gracias a los experimentos exitosos de Gabriel Lippmann y Woldemar Voigt en los que utilizaron el efecto de la piezoelectricidad inversa. La primera aplicación de los ultrasonidos consistió en un método ideado por Reginald Fessenden y Lewis F. Richardson en 1912 para detectar icebergs, a raíz del trágico hundimiento del transatlántico Titanic. Años más tarde, durante la Primera Guerra Mundial, Paul Lavengin utilizaría los ultrasonidos para la detección de submarinos.

Pero el desarrollo del método de ultrasonidos para su aplicación industrial no se vio acelerado hasta bien entrada la década de los 20 [63]. En concreto, su uso para la inspección de materiales fue propuesto por primera vez por Sergei Y. Sokolov en 1928. Pocos años después, Mulhauser patentó el método de transmisión para la inspección de materiales y detección de defectos, y posteriormente, Floyd Firestone haría lo propio con el método de pulso-eco. A partir de ese momento, se experimentó un auge tecnológico durante y después de la Segunda Guerra Mundial que posibilitó la diversificación de la aplicación del método a más sectores, gracias en parte a la creación de dispositivos de escaneo cada vez más completos, y con mejor resolución. La tecnología había alcanzado el grado de sofisticación necesario para hacer realidad la idea primigenia de Sokolov, que fue el uso de las ondas acústicas como un nuevo microscopio basado en el principio de reflexión, capaz de igualar la resolución de un microscopio óptico si se usan ondas con muy altas frecuencias. Más innovaciones se fueron incorporando a la inspección por ultrasonidos, sobre todo a partir de los 80, pues la computación ha permitido crear equipos más robustos a la par que prácticos, facilitando de forma notable la tarea del operario.

3.2.1. Ultrasonidos: Principios físicos

El método de ultrasonidos (UT), a grandes rasgos, consiste en introducir una onda elástica que se propaga en el material, y en recibir sus ecos después de haber incidido en una cara del sólido o una discontinuidad interna. Del análisis de los ecos se puede deducir la localización y el tamaño de la discontinuidad.

Generación de ondas acústicas. Piezoelectricidad inversa

La conversión de impulsos eléctricos en vibraciones mecánicas, y viceversa, es crucial en el método de ultrasonidos, que como ya se explicó, se basa en generar una onda acústica, y después de su propagación por material, captar el eco.

La generación de ondas acústicas es posible gracias al uso de materiales polarizados, es decir, aquellos en los que una parte de la molécula está

cargada positivamente y la otra parte cargada negativamente. Cuando se aplica una tensión eléctrica, se produce una polarización del material, cuyas moléculas se alinean con el campo eléctrico creando dipolos en la estructura cristalina del material, y por consiguiente, cambiando sus dimensiones. Este proceso se conoce como **electrostricción**. La piezoelectricidad, en cambio, se da en materiales que están permanentemente polarizados, como el cuarzo, de forma que cuando el material es sometido a una deformación mecánica, se crea un campo eléctrico. Estos materiales también presentan la capacidad de experimentar el proceso inverso, gracias a la **piezoelectricidad inversa**, pues también se deforman cuando se les aplica una tensión eléctrica [64].

Propagación de las ondas elásticas

La propagación de la onda elástica se materializa en forma de vibración de las partículas del material, que oscilan alrededor de su posición de equilibrio. Esta oscilación, con el material en rango elástico, se produce por la inercia de la partícula cuando la energía elástica atraviesa la zona, y por las fuerzas restauradoras internas entre las partículas. Estas fuerzas están relacionadas con la impedancia acústica, que es la resistencia que opone el medio a la propagación de la onda.

Estudiando el estado de oscilación de una partícula al paso de la energía elástica por un medio homogéneo e isótropo, se pueden definir algunas nociones básicas sobre las ondas elásticas:

- **Amplitud de onda:** Es el rango máximo de desplazamiento de una partícula.
- **Longitud de onda (λ):** Es la distancia entre dos partículas que se encuentran en el mismo estado de oscilación. Se mide en metros.
- **Velocidad de la onda (c):** El tiempo que tarda una partícula en llegar al estado de oscilación de la partícula inmediatamente anterior, dividido por la distancia que separa ambas. Es la velocidad a la que se propaga la onda en el medio y se mide en metros por segundo. Por su definición se hace evidente la relación estrecha entre la velocidad de la onda y las propiedades elásticas del material.

- **Frecuencia (f):** Es el número de oscilaciones completas que realiza una partícula durante un segundo. Se mide en ciclos por segundo (Hz).

En el caso de las ondas armónicas planas, la longitud de onda, la velocidad y la frecuencia se relacionan a través de la siguiente fórmula:

$$c = f\lambda; \quad (3.1)$$

En situaciones prácticas, los medios materiales suelen ser heterogéneos y las ondas elásticas suelen estar compuestas por multitud de ondas armónicas que se superponen, teniendo como resultado ondas más complejas.

Se pueden dar cuatro modos de propagación dependiendo de la forma de oscilación de las partículas:

- Onda longitudinal: La oscilación se produce en la dirección de propagación de la onda. También se conoce como onda P u onda de compresión. Transporta la mayor parte de energía y se puede transmitir en sólidos y en líquidos.
- Onda transversal: La oscilación es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. También se conoce como onda S y onda de corte. Es una onda más débil que la longitudinal y sólo se puede transmitir en sólidos.

La propagación de ondas P y S, conocidas también como ondas de volumen, se muestra en la Figura 3.1.

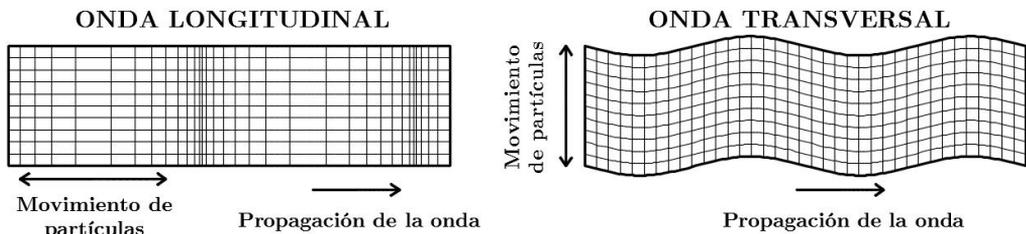


Figura 3.1. Propagación de ondas P y S, y movimiento de las partículas.

- Onda de superficie: También llamada onda de Rayleigh, existe cuando el sólido tiene alguna superficie libre.

- **Onda guiada superficial**: También conocida como onda de Lamb, es una onda estacionaria que se genera cuando las ondas superficiales se propagan en sólidos de poco espesor, esto es, en placas y chapas.

Las ondas elásticas que se propagan en medios sólidos, usualmente se encuentran con superficies límites o interfases entre medios, donde la diferencia de impedancias acústicas de los dos medios da lugar a una transformación en las características de la onda. Parte de la onda que incide sobre una superficie límite se reflejará, y parte se transmitirá al otro medio. Además, en el caso de una incidencia oblicua, se da el fenómeno de la conversión de modos que produce por separado ondas reflejadas y refractadas tipo P y S.

Incidencia normal

El caso en el que la onda elástica incide perpendicularmente a la superficie límite es el más sencillo, pues los ángulos de la onda reflejada y transmitida son iguales y perpendiculares a la superficie límite. Toda la energía asociada a la onda incidente se distribuye únicamente entre la onda reflejada y la transmitida, y dicha distribución depende de la impedancia acústica de los dos medios, según la relación siguiente:

$$\frac{P_r}{P_i} = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}, \quad \frac{P_t}{P_i} = \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}, \quad (3.2)$$

P_i , P_r y P_t son las potencias de la onda incidente, reflejada y transmitida; Z_1 , Z_2 son las impedancias acústicas de los medios 1 y 2. Nótese que la onda reflejada sólo desaparece si las impedancias acústicas de los dos medios son iguales.

Incidencia oblicua

Con el fin de reducir la casuística que se puede dar cuando el ángulo de incidencia es oblicuo, sólo se estudiará en detalle la onda reflejada.

Tal como se ha mencionado anteriormente, en este caso se da una conversión de modos cuando la onda incidente alcanza la superficie límite. Así, una onda, sea P o S, puede reflejarse en parte como onda P y en parte como

onda S. El grado de esta conversión depende de la impedancia acústica de los medios y el ángulo de incidencia [19]. Por otra parte, el ángulo θ_r de las ondas reflejadas P y S, según la ley de Snell, viene determinado por la velocidad de propagación de la onda en ambos modos C_1 , C_2 y el ángulo de incidencia θ_i .

$$\frac{\sin \theta_r}{C_2} = \frac{\sin \theta_i}{C_1}, \quad (3.3)$$

Dado que la velocidad de propagación en ondas P es mayor que en ondas S, el ángulo de la onda reflejada será mayor o menor que el de incidencia dependiendo de si la conversión de modos es de S a P o viceversa.

Cuando la onda incidente es longitudinal (onda P), la reflexión genera una onda S y una onda P. La onda reflejada S, por la ley de Snell, se refleja con un ángulo θ_{rS} menor que el de incidencia θ_{iP} :

$$\frac{\sin \theta_{rS}}{C_S} = \frac{\sin \theta_{iP}}{C_P}, \quad (3.4)$$

C_P y C_S son las velocidades de propagación de la onda P y S, respectivamente.

La onda P, por su parte, se refleja con un ángulo $\theta_{rP} = \theta_{iP}$.

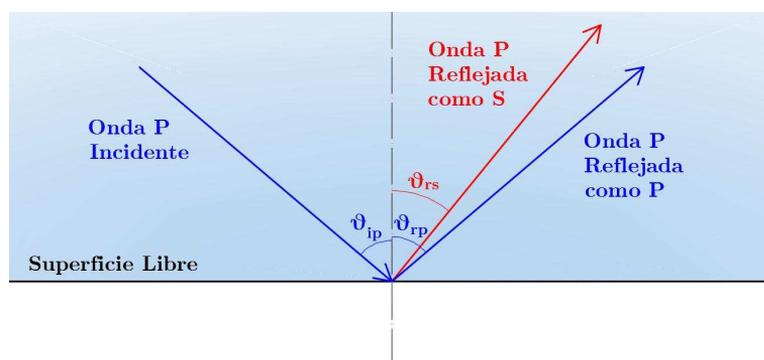


Figura 3.2. Conversiones de modo de una onda P incidente.

La incidencia de una onda transversal es un poco más compleja, por lo que convendría distinguir entre la componente normal SH y la componente paralela SV a la superficie límite.

En el primer caso, sólo se refleja la onda S, con un ángulo igual al de incidencia, y con la misma amplitud pero de signo opuesto.

La incidencia de la onda SV, en cambio, se refleja como onda S y como onda P. La onda S se refleja con el mismo ángulo que el de incidencia $\theta_{rS}=\theta_{iS}$, pero la onda P se refleja con un ángulo θ_{rP} mayor que el de incidencia θ_{iS} :

$$\frac{\sin \theta_{rP}}{c_P} = \frac{\sin \theta_{iS}}{c_S}, \quad (3.5)$$

Se puede dar el caso de que $\theta_{rP}=90^\circ$, esto es, que la onda reflejada P se propague paralelamente a la superficie. Esto se produce cuando el ángulo de incidencia alcanza el valor crítico, $\theta_i=\theta_c$.

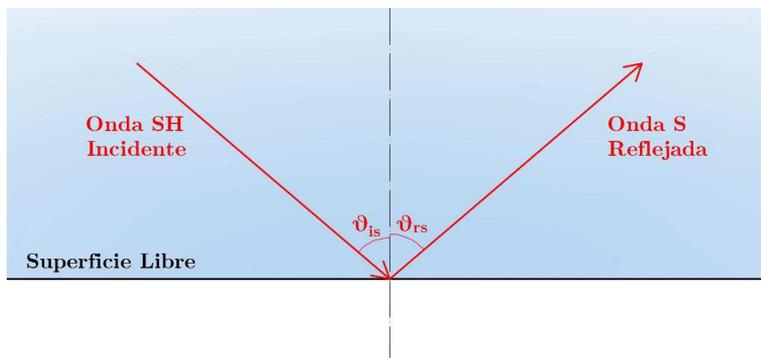


Figura 3.3. Reflexión de la componente normal de la onda S incidente.

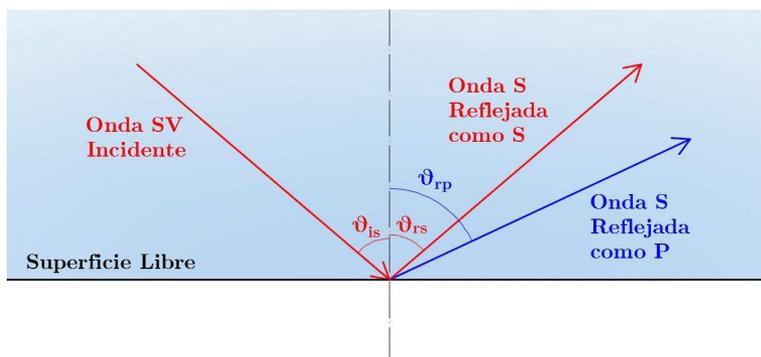


Figura 3.4. Reflexión de la componente paralela de la onda S incidente.

La conversión de modos que se produce con la onda transmitida se rige igualmente por la ley de Snell, pues depende de la velocidad de propagación de la onda. Sin embargo, es preciso señalar que en este caso, cuando una

onda P incide sobre una superficie límite, la onda P no se transmite con el mismo ángulo, pues los medios son de distinta naturaleza (impedancia acústica), y por tanto, la velocidad de propagación es diferente. Este fenómeno se conoce como refracción.

Atenuación

Otro de los aspectos importantes a tener en cuenta en relación a la propagación de una onda elástica es la atenuación que sufre a medida que se va alejando de la fuente. La atenuación de una onda es su pérdida progresiva de energía y el consiguiente decrecimiento de su amplitud, además de una dilatación de la onda en el dominio temporal, como se puede observar en la Figura 3.5.

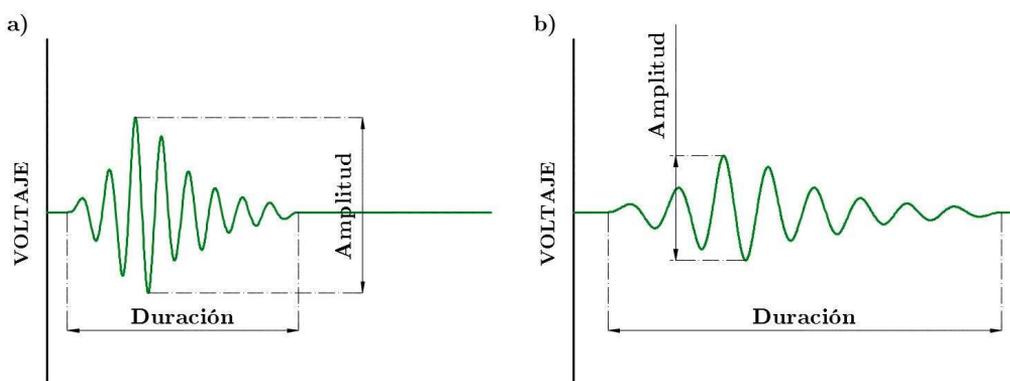


Figura 3.5. Atenuación de una onda, con decrecimiento de amplitud y dilatación en el tiempo. a) Onda emitida. b) Onda atenuada.

La atenuación se puede producir por la conjunción de varios factores, de los cuales los que más peso tienen son la absorción y la dispersión. La **absorción** hace referencia a la conversión de energía mecánica en calor debido a mecanismos diversos como la fricción interna entre superficies o el comportamiento viscoelástico del material. Por lo general, suele haber más absorción a mayores frecuencias. La **dispersión**, en inglés *scattering*, se produce básicamente por la heterogeneidad y las discontinuidades del material, que se traduce en múltiples ondas reflejadas secundarias que desvían el flujo de energía mecánica asociada a la onda. Otro factor atenuante es el fenómeno de la **difracción**, un mecanismo por el cual una

onda, al atravesar una abertura (ranura o agujero), se desvía hacia la zona de sombra creando un nuevo frente de onda. La difracción depende mucho de la relación entre la longitud de onda y el tamaño de la abertura, tal como se aprecia en la Figura 3.6. Por último, habría que mencionar la **atenuación geométrica**, que se produce debido al crecimiento del frente de onda a medida que esta avanza, lo que disminuye la cantidad de energía por superficie de frente.

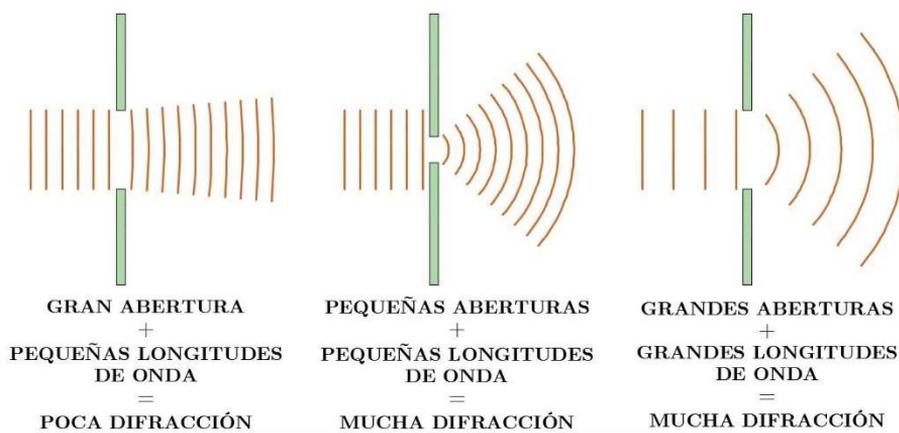


Figura 3.6. Relación entre longitud de onda y tamaño de abertura en el fenómeno de la difracción.

Frecuencia, longitud de onda y tamaño de discontinuidad

Una de las ventajas que ofrece el método de ultrasonidos es la posibilidad de elegir algunas características de la onda elástica que se genera. Por ejemplo, para contrarrestar los efectos de la atenuación, el operador puede emitir una onda de mayor amplitud, a fin de asegurar una amplitud suficiente en el eco que posteriormente será captado. Esta ventaja resulta especialmente importante cuando se trata de tres propiedades fundamentales para el método como son la longitud de onda, la frecuencia y la velocidad de onda. La velocidad de onda, lógicamente, es constante y no puede elegirse pues depende de la impedancia acústica del material. Sin embargo, y tal como se deduce de la ecuación 3.1, podemos actuar sobre la longitud de onda jugando con los valores de la frecuencia. Es decir, si

aumentamos la frecuencia, la longitud de onda será más pequeña, y viceversa.

En el método de ultrasonidos, en tanto que método para la inspección de materiales, la frecuencia y la longitud de onda juegan un papel clave, y por ello es preciso encontrar un compromiso entre las dos magnitudes dependiendo en cada caso del material inspeccionado y la finalidad del ensayo. Por una parte, si la finalidad de la inspección es encontrar defectos o discontinuidades en un material, el método debe ser capaz de detectar discontinuidades pequeñas (sensibilidad) y distinguirlas cuando están cerca de la superficie o de otras discontinuidades (resolución), lo cual se puede conseguir aumentando la frecuencia [64]. Por otra parte, en materiales más heterogéneos, con grano grueso, puede ser más adecuado el uso de bajas frecuencias, de forma que la longitud de onda sea lo suficientemente grande para mitigar la dispersión y sortear las reflexiones en las superficies intergranulares. El uso de altas frecuencias en estos casos reduciría el poder de penetración del método, esto es, la profundidad máxima a la que un defecto puede ser localizado. Además, en estos materiales los defectos suelen ser de mayor tamaño y por lo tanto no se requiere una gran sensibilidad ni gran resolución. También es preciso recordar que algunos procesos atenuantes, descritos anteriormente, dependen notablemente de la frecuencia y la longitud de onda. La absorción, por ejemplo, es más aguda en altas frecuencias, y la difracción, por su parte, depende mucho de la longitud de onda.

Llegados a este punto, debemos mencionar el amplio rango de frecuencias en el que se mueven los ultrasonidos, que va desde los 20 kHz (límite del rango audible) hasta ondas elásticas de más de 500 MHz que hoy en día se pueden generar. Si bien, el rango de frecuencias utilizadas en el método de ultrasonidos para la inspección de materiales suele acotarse entre los 0.5 MHz y los 20 MHz.

En resumen, la elección de una frecuencia adecuada para cada caso no es trivial, pero sí trascendental para el éxito de una inspección.

3.2.2. Inspección UT: Pulso-Eco y Transmisión

Desde finales del siglo XIX hasta nuestros días la inspección con ultrasonidos ha sido desarrollada y extendida a todo tipo de elementos, en diferentes ámbitos y sectores. Los objetivos de los ensayos también varían de un caso a otro, aunque podríamos agruparlos en 3 bloques:

Ensayos metrológicos: Medida de dimensiones, especialmente el espesor.

Caracterización de materiales: Tal como se dijo con anterioridad, existe una relación directa entre la velocidad y las propiedades elásticas del material.

Detección de discontinuidades: Ubicar y medir cualquier anomalía en el interior o la superficie del material.

Como consecuencia, han ido apareciendo distintas técnicas específicas para dar respuesta a esta extensa casuística de materiales, geometrías, y finalidades. De todas estas técnicas podemos resaltar las siguientes:

- **Técnica de Geometría del Haz**: Se trata de usar un único transductor, que se va moviendo a lo largo de la superficie, anotando en cada posición la respuesta obtenida. El objetivo es localizar los bordes de la discontinuidad, donde se produce una variación en la respuesta al pasar de un eco procedente del fondo a un eco procedente de la propia discontinuidad. La geometría del haz es clave, pues éste debe ser inferior al tamaño de la discontinuidad. Esta técnica es ideal para localizar y dimensionar laminaciones en chapa, aunque con otra variante, usando un transductor angular, se pueden estudiar también discontinuidades que no sean paralelas a la superficie de inspección.
- **Técnica de Transductores en Tándem**: Esta técnica se basa en el uso de 2 (o más) transductores angulares para detectar imperfecciones en zonas de difícil acceso como grietas en la base de soldaduras en V o en la raíz de soldadura en X. Se detecta la presencia de la discontinuidad gracias a la reflexión de la onda incidente (véase Figura 3.8). Sin embargo, esta técnica no es suficiente para medir ni localizar con precisión la discontinuidad.

- **Técnica de la Difracción del Tiempo de Vuelo (TOF):** Como su propio nombre indica, es una técnica que se basa en la difracción de la onda cuando ésta llega a los bordes de la discontinuidad. Se realiza con dos transductores angulares dispuestos en la misma cara, acotando el tramo de material donde se encuentra la discontinuidad. Como se puede apreciar en la Figura 3.7, las ondas que salen de un sensor llegan al otro por medio de tres trayectorias diferentes: 1) trayectoria directa paralela a la superficie; 2) trayectoria indirecta gracias a la difracción en los bordes de la discontinuidad; y 3) trayectoria indirecta gracias a la reflexión en la superficie opuesta. Es una técnica de alta precisión para medir la longitud de fisuras planas y perpendiculares a la superficie libre, así como de fisuras en base de soldadura; sin embargo, es poco fiable para discontinuidades superficiales y en materiales de grano grueso. Es recomendable separar los dos transductores una distancia de $2/3t$ a $1t$, siendo t el espesor del elemento inspeccionado.

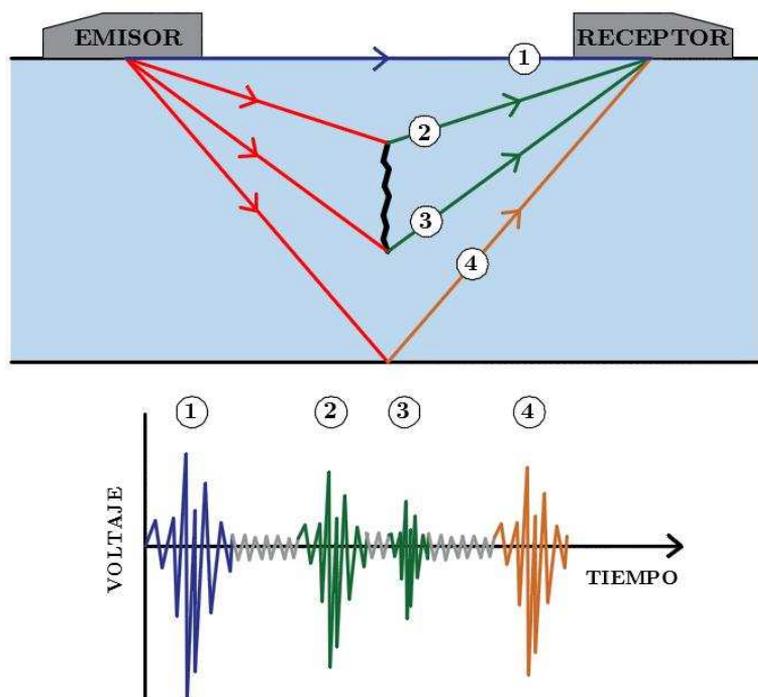


Figura 3.7. Técnica de la Difracción del Tiempo de Vuelo (TOF).

- **Técnica de *Phased Array*:** Esta técnica se apoya en los transductores multielemento, cuyas ondas emitidas interfieren entre sí focalizando el haz ultrasónico en una dirección determinada. Controlando el desfase de tiempo entre la activación de un elemento y otro, el haz va variando el ángulo y barriando toda la sección del material, como se puede observar en la Figura 3.8. Por consiguiente, la técnica elimina la necesidad de exploración mecánica, es decir, el movimiento del transductor, lo que redundaría en una mayor fiabilidad. Así mismo, reduce bastante los puntos de inspección necesarios para tener información sobre el volumen completo, incluso en cuerpos de geometría compleja. Finalmente, resaltar que el hecho de poder focalizar el haz en la dirección que necesitamos contrarresta algunos procesos de atenuación en materiales de grano grueso como la dispersión.

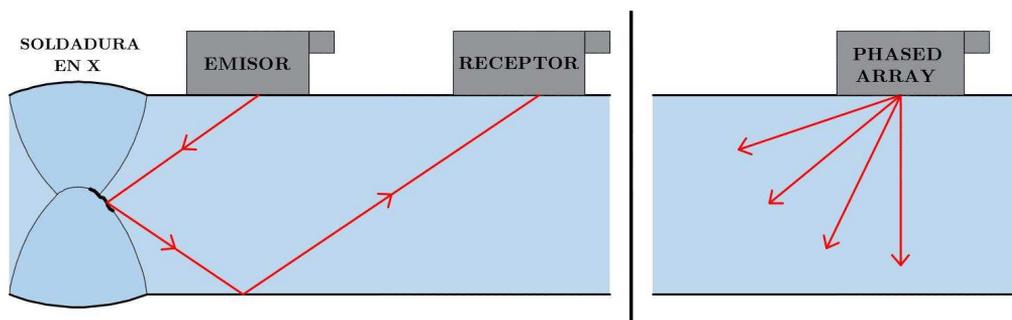


Figura 3.8. Técnica de Transductores en Tándem (izq.) y Técnica de *Phased Array* (der.).

- **Técnica de Inmersión:** Aunque en el resto de técnicas se usan acoplantes entre el transductor y superficie, eventualmente la delgada capa de acoplante puede sufrir pérdidas y dificultar la transmisión de ondas, sobre todo cuando la exploración implica mover el transductor. Mediante la técnica de inmersión, el acople transductor-superficie está asegurado por el agua y es constante. Esto conduce a bajar los límites de detección, ya que por ejemplo, en materiales finos llegan a detectarse discontinuidades del orden de 0,1 a 0,2 mm con la técnica de inmersión, mientras que con las técnicas convencionales el límite de detección habitual es del orden de 1 mm [43].

Como se ha podido comprobar, las técnicas se basan en diferentes respuestas procedentes de una discontinuidad al incidir sobre ella la onda emitida. Así pues, tenemos técnicas que estudian la onda reflejada por la discontinuidad; otras se centran en la onda transmitida a través de una discontinuidad; y finalmente las que se basan en captar la onda difractada en el borde de una discontinuidad. A continuación estudiaremos con mayor detalle los dos primeros casos que corresponden a la técnica de pulso-eco y de transmisión, respectivamente.

Técnica de Pulso-Eco

La técnica de pulso-eco se define por su propio nombre, pues consiste en generar un pulso que excite una onda elástica en el material, y posteriormente recoger la onda reflejada, conocida como eco.

La generación del pulso se puede hacer de dos formas:

Generación Mecánica: Se basa en el impacto mecánico entre dos cuerpos sólidos. Los primeros trabajos de inspección con esta técnica se llevaron a cabo impactando un cuerpo sólido contra la superficie inspeccionada, usualmente, una esfera de acero de 3 a 15 mm de diámetro. Las características de la onda elástica generada dependen directamente del impacto, y por tanto, éste debe ser cuidadosamente estudiado. De entre todos los parámetros relativos al impacto, los más determinantes son: el tiempo de contacto, el diámetro de la esfera, y la energía cinética de la esfera al impactar. Concretamente, la distribución de frecuencias y amplitudes de la onda elástica generada depende del diámetro [65].

Generación Piezoeléctrica (o Magnetostrictiva): Los transductores piezoeléctricos (o magnetostrictivos) permiten transformar una tensión eléctrica (o magnética) en deformación mecánica, que se transmite al material inspeccionado generando una onda elástica. La gran ventaja de estos transductores reside en la capacidad que nos ofrecen para controlar la distribución de frecuencias y amplitudes de forma mucho más precisa. Gracias a la ventaja de control que ofrecen, se ha extendido el uso de los transductores desde que la tecnología ha facilitado el acceso a ellos.

Gracias a la versatilidad y variedad de los transductores (véase Subapartado 3.2.3), la aplicación de la técnica de pulso-eco es muy extendida e interviene en varias técnicas de inspección de materiales.

La técnica de pulso-eco precisa de un único transductor, que hace de emisor y receptor. La doble función del transductor implica que una vez emitida la señal, deja de transmitir durante unos instantes para recibir el eco, que proviene o bien de una discontinuidad o bien de alguna cara del cuerpo inspeccionado. En la representación de las señales, aparecerá primero una señal en forma de pico que corresponde a la interfase entre sensor y superficie, y que supondrá el inicio de los tiempos. Más adelante aparecerá la señal reflejada que, dependiendo de si se intercepta o no una discontinuidad, llegará antes o después. La Figura 3.9 muestra las señales captadas por un transductor emisor-receptor.

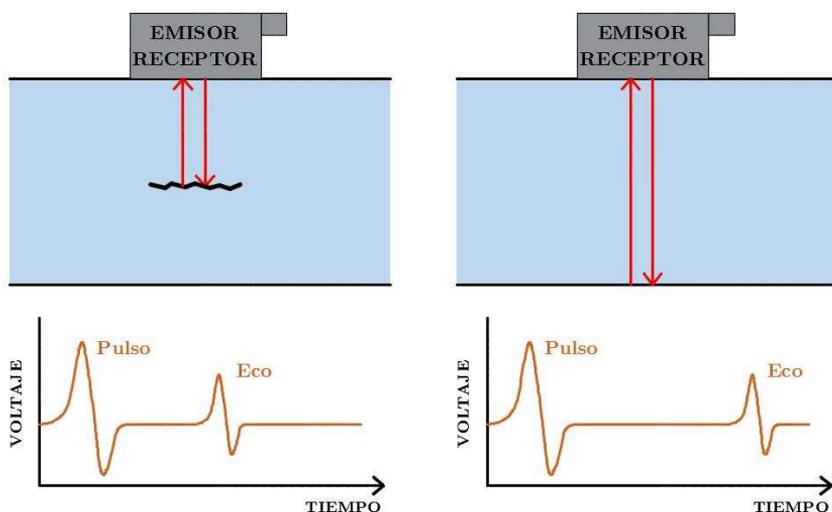


Figura 3.9. Señal registrada en la técnica de Pulso-Eco. Izq.: La onda se refleja en una discontinuidad. Der.: La onda se refleja en la cara opuesta.

La técnica de pulso-eco se basa netamente en consideraciones geométricas de la onda y el cuerpo inspeccionado. El hecho de conocer de forma más o menos precisa la velocidad de propagación y la trayectoria de las ondas emitida y reflejada, hace que se pueda adivinar con cierta facilidad si un eco proviene de la pared de fondo, por ejemplo en una placa, o de una

discontinuidad alojada dentro del material, simplemente observando el desfase de tiempo entre las llegadas de onda emitida y reflejada. En virtud de esta cualidad, la técnica tiene dos aplicaciones principales: Detección de discontinuidades y medida de espesores.

Detección de discontinuidades. La presencia de una discontinuidad en el interior de un cuerpo, sea ésta una fisura, una impureza o una cavidad, puede ser detectada por la técnica de pulso-eco simplemente haciendo incidir una onda en la discontinuidad. Como esto no es nada trivial, ya que a priori se desconoce su localización, la inspección debe cubrir toda la zona de interés.

En este sentido, la técnica de geometría del haz, haciendo uso de una exploración mecánica, puede localizar de una forma precisa la discontinuidad, siempre que ésta sea mayor que el haz ultrasónico. Se trata de ir moviendo el sensor a lo largo y ancho de la zona de interés, observando la amplitud del eco. Cuando en un punto el haz ultrasónico se encuentra completamente sobre la discontinuidad, la amplitud del eco es máxima, y éste será el punto a partir del cual se irá moviendo el transductor en todas las direcciones para delimitar la discontinuidad. Se detecta el borde de la discontinuidad cuando la amplitud del eco baja a la mitad de la amplitud máxima, aproximadamente. En la Figura 3.10 se puede observar el eco de máxima amplitud y el eco recibido del borde de la discontinuidad. Para las discontinuidades que no sean paralelas a la superficie de inspección, el procedimiento es similar pero usando transductores angulares y tomando otros ratios respecto de la amplitud máxima para localizar el borde de la discontinuidad.

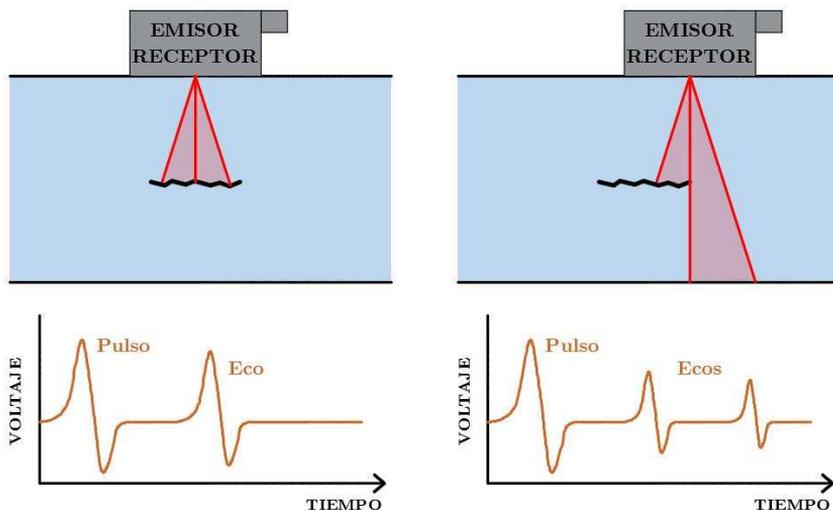


Figura 3.10. Técnica de Geometría del Haz. Izq.: Punto de máxima amplitud del eco. Der.: Borde de la discontinuidad.

En cuanto a la profundidad de la discontinuidad, su deducción es sencilla a partir de los tiempos de llegada del eco, siempre que la trayectoria de las ondas emitida y reflejada sea conocida.

Medida de espesores: Los elementos en la ingeniería suelen diseñarse con una geometría determinada para que puedan resistir unas determinadas sollicitaciones, o simplemente para que cumplan una función concreta. Por eso, es importante hacer medidas para evaluar las dimensiones de dichos elementos. La técnica de pulso-eco es especialmente útil para medir el espesor de distintos elementos cuando no hay discontinuidades que interfieran, de forma que la onda emitida alcanza la cara opuesta y se refleja haciendo el trayecto de vuelta.

La técnica de pulso-eco también puede servir para otras aplicaciones, como la caracterización del material (medición de la velocidad) o el estudio de la atenuación de la señal en deformaciones zonales.

Técnica de Transmisión

Esta técnica consiste en emitir una onda a través de un transductor, el emisor, que atraviesa el material para llegar a un segundo transductor, el receptor.

La generación del pulso, a diferencia de la técnica de pulso-eco, suele hacerse únicamente por medio de un transductor.

La técnica utiliza sobre todo las ondas transmitidas que cruzan una discontinuidad, y la configuración más usual es la de situar un transductor a cada lado del elemento, enfrentándolos. La forma habitual de proceder con la técnica es, en un primer momento, emitir una señal que cruza una zona libre de discontinuidades, tomando como referencia la señal que se registra en el segundo transductor. A continuación, se lleva a cabo el mismo procedimiento en una zona con discontinuidad o anomalía. Comparando las amplitudes de la señal registrada y de la señal de referencia, se mide la atenuación que sufre la onda transmitida, lo que nos da una idea de la magnitud de la discontinuidad (ver Figura 3.11). El inconveniente de esta técnica es que no ayuda a determinar la profundidad de la discontinuidad, pero sí a localizar las zonas con discontinuidades.

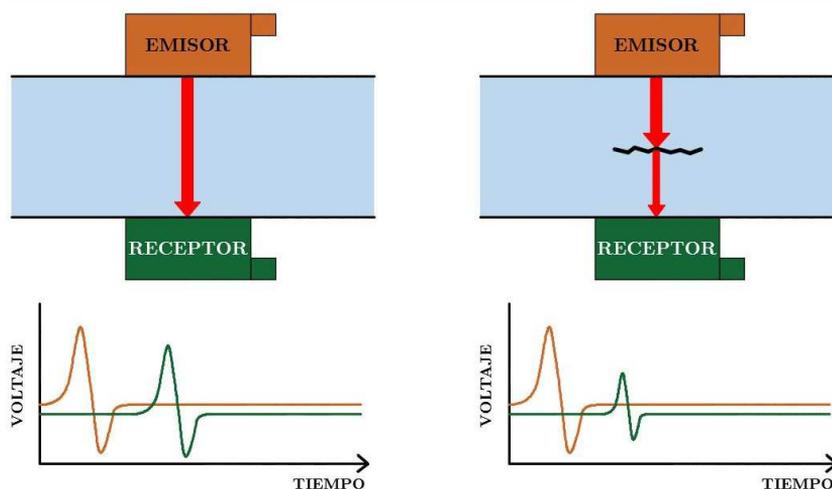


Figura 3.11. Configuración de la técnica de Transmisión con transductores enfrentados. Izq.: Zona libre de discontinuidades. Der.: Zona con discontinuidad.

Existen casos donde el uso de transductores enfrentados no es posible, ya sea por una imposibilidad de acceso a una de las caras, o por tener una discontinuidad escondida en alguna zona de sombra, etc. Una de las variantes que se pueden aplicar en este caso es el tándem de transductores,

donde uno permanece fijo en una ubicación mientras que el otro, mediante una exploración mecánica, va recorriendo varios puntos. Cuando la onda no intercepta ninguna discontinuidad, la amplitud de señal registrada en el receptor es más o menos constante, y se toma como amplitud de referencia. Si la amplitud registrada disminuye, la discontinuidad está siendo interceptada y su magnitud puede ser medida. El uso de transductores en tándem, dependiendo de cada caso, puede implicar que la onda registrada es reflejada y luego transmitida, o viceversa.

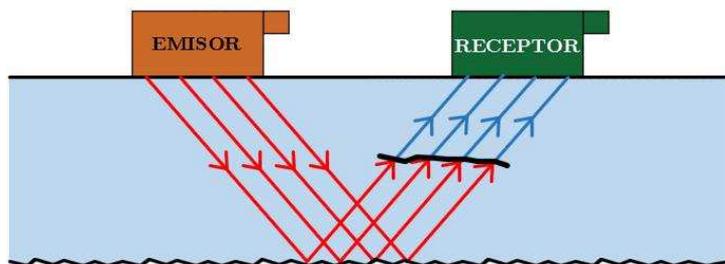


Figura 3.12. Configuración de Tándem de Transductores, en la técnica de Transmisión.

Cuando la anomalía no es puntual sino que alcanza a una región dentro del cuerpo sin tener un límite o borde claro, como por ejemplo la martensita inducida en metales por la deformación, la evaluación de la atenuación por la técnica de transmisión resulta muy útil para localizar la zona afectada y estimar la magnitud del daño. Para esta finalidad, la técnica de pulso-eco también puede resultar útil, aunque en este caso la onda al hacer un viaje de doble recorrido, puede duplicarse el efecto de atenuación, y según sea el espesor de la pieza, puede haber dificultades para captar el eco.

3.2.3. Sistema de medida

En la actualidad, los sistemas de medida usados para la inspección de ultrasonidos son más prácticos, pues constan únicamente de un equipo portátil que realiza varias funciones y transductores de ultrasonidos para emitir las ondas y captar los ecos. A continuación se describen someramente las dos partes del sistema de medida de ultrasonidos.

Equipo de Ultrasonidos

Los osciloscopios son equipos compactos que integran fundamentalmente cuatro funciones: Generación de impulsos, generación de la base de tiempos, amplificación del eco recibido por el receptor, y visualización de los ecos.

Es precisamente la representación en pantalla la principal diferencia entre equipos analógicos y digitales. Mientras que los primeros despliegan los datos sobre un tubo de rayos catódicos (TRC), los digitales usan una pantalla de cristal líquido (PCL). En ambos casos, las señales eléctricas se muestran en gráficos 2D donde el eje X representa la base de tiempos y el eje Y representa el voltaje de la señal.

La función generador cuenta con varios controladores para la configuración de señales de salida. De esta forma, se puede generar una señal periódica o un impulso aislado; se puede elegir el tipo de señal, ya sea cuadrada, sinusoidal, triangular, etc.; y también se puede controlar la frecuencia y la amplitud.

Transductores piezoeléctricos

Hoy en día todos los transductores utilizan material piezoeléctrico, tanto para generar ondas elásticas como para captarlas. Existen muchos tipos de transductores dependiendo del material piezoeléctrico que llevan, el número de osciladores, o la dirección del haz que generan.

Dentro de la variedad de materiales piezoeléctricos, podemos distinguir dos grandes clases:

- Los **cristales puros**, como el cuarzo, surgen espontáneamente en la naturaleza y son más estables a lo largo del tiempo.
- Los **cerámicos piezoeléctricos**, como el titanato de bario, son producidos a través de procesos de sintetización y son más sensibles que los cristales puros, aunque su sensibilidad se ve degradada al cabo del tiempo.

En cuanto a transductores, se pueden distinguir tres tipos atendiendo al ángulo de incidencia del haz ultrasónico:

Transductores de haz normal: El haz que emiten (y captan) es normal a la superficie del cuerpo a inspeccionar, y la mayoría están diseñados para emitir ondas longitudinales. Dentro de este grupo existen dos clases: i) transductores monocristal, con un único cristal que actúa de emisor y receptor; ii) transductores bicristal, con un cristal emisor y otro receptor. Los segundos deben llevar aislante acústico entre sus cristales. En la Figura 3.13 se puede observar esquemáticamente la composición típica de un transductor monocristal de haz normal.

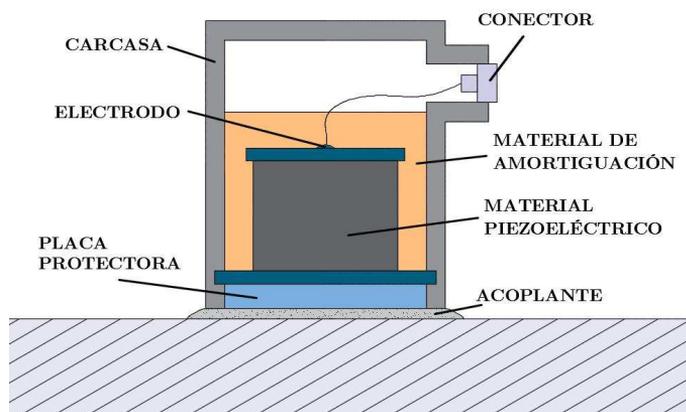


Figura 3.13. Composición interna de un transductor piezoeléctrico.

Transductores angulares: Tienen la misma composición que los anteriores, pero con la singularidad de incluir una cuña de plástico, generalmente vidrio acrílico (*perspex*), para incidir oblicuamente sobre la superficie. El ángulo de la cuña suele superar el ángulo crítico, de forma que se anulan las ondas longitudinales transmitidas, y sólo se trabaja con ondas transversales.

Transductores multielemento: Son transductores que ofrecen la posibilidad de que cada elemento pueda ser activado independientemente (véase Subapartado 3.2.2). Este transductor, en consecuencia, permite examinar la totalidad del cuerpo desde una sola posición.

Los transductores descritos hasta aquí son los llamados transductores de contacto. Por otra parte, existen unos transductores de inmersión, que como su nombre indica, se utilizan sumergidos dentro del agua. Todos sus componentes son estancos y suelen equiparse con lentes acústicas que

concentran la energía elástica en una pequeña región, para así potenciar la respuesta del eco.

3.3. El método de emisión acústica (EA)

3.3.1. Definición y principios físicos

El ser humano ha hecho uso del proceso físico de la emisión acústica (EA) desde hace siglos, cuando los artesanos y forjadores aprendían a interpretar los sonidos que emitían los materiales, por ejemplo al enfriarse, para adivinar si el objeto sería o no resistente. El caso del “grito del estaño” es paradigmático, al ser reflejado por varios autores de la época, que describieron los ruidos que emitía este metal al ser deformado o durante su enfriamiento.

En efecto, las ondas elásticas que se producen de forma espontánea en el material cuando éste experimenta transformaciones, pueden proporcionar una información precisa sobre el proceso y origen de aquellas transformaciones.

Ya en la época moderna, diversos experimentos se plantearon para estudiar de una forma más rigurosa las ondas elásticas en materiales. Gracias a la instrumentación y la técnica existentes entonces en el campo de la sismología, se pudieron captar, amplificar y registrar ondas elásticas que no entraban en el rango audible. La sucesión de experimentos en diferentes materiales fue aclarando el proceso físico que había detrás de aquellos “gritos” escuchados en el pasado, llegando a la definición que conocemos hoy en día: la EA es la liberación espontánea de energía en forma de ondas elásticas dentro del material cuando éste es sometido a deformaciones [19]. Cuando una fuerza externa actúa sobre un material sólido, éste se deforma almacenando lo que se conoce como energía de deformación elástica, que no es más que la fuerza de reacción que ejerce la estructura interna para volver a su estado inicial. Si la energía de deformación supera la capacidad de almacenamiento del material, se convierte en energía de deformación plástica

que se libera formando grietas, y en menor medida, en energía elástica (ondas) y energía calorífica.

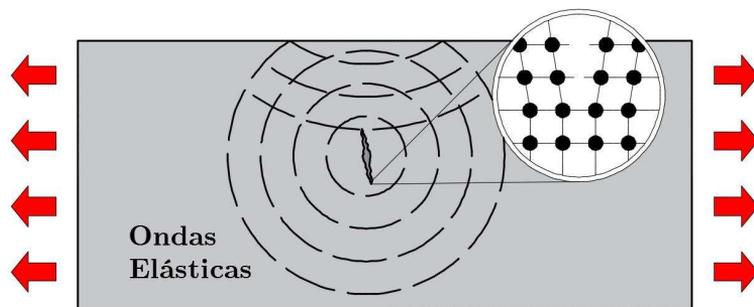


Figura 3.14. Esquema de generación de ondas elásticas durante la formación y crecimiento de una fisura.

En general, cualquier mecanismo que transforme algún tipo de energía en energía elástica, genera EA que se propagará en forma de onda elástica, también llamada onda de EA [19]. Esta liberación de energía se produce de manera estocástica y en un proceso que se denomina genéricamente como evento de EA.

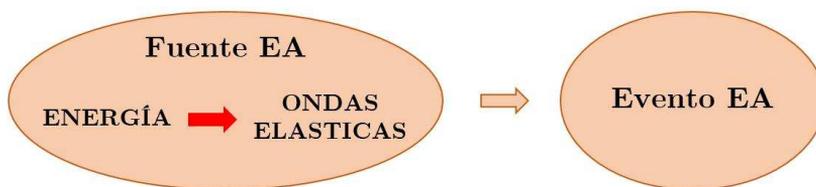


Figura 3.15. Fuente y evento EA.

Los mecanismos que pueden desencadenar una fuente de evento de EA son múltiples, que se clasifican en dos grandes grupos:

- Eventos primarios de EA: Son los llamados mecanismos irreversibles, como el crecimiento de grietas, deformaciones, corrosión, etc.
- Eventos secundarios de EA: Son los mecanismos reversibles, entre los cuales podemos citar las fricciones entre superficies, fugas de líquidos, procesos de soldadura, etc.

Una vez generado un evento de EA, la onda elástica que se libera cambia considerablemente durante su propagación a través del medio, de tal forma que la señal recogida por el sensor tiene una forma de onda muy diferente a la original. Esta transformación es el resultado de varios procesos como la atenuación, las reflexiones, las discontinuidades de interfase, etc. (véase Subapartado 3.2.1); y está íntimamente ligada a la naturaleza del material y a su estado de salud, y por tanto, es una fuente de información interesante a utilizar durante una inspección con el método de emisión acústica.

Una vez que la onda elástica llega al sensor, éste la transforma directamente en tensión eléctrica, medida en voltios, que se denomina señal de EA. A partir de este punto, entra en juego el sistema de EA, que es una sucesión o cadena formada por un preamplificador, un sistema de adquisición, y un ordenador para el análisis y visualización de las señales de EA.

Las señales de EA pueden ser transitorias o continuas. Las primeras (Figura 3.16.a) están relacionadas normalmente con eventos primarios de EA, y tienen un inicio y un final claramente definidos respecto del ruido de fondo. También se caracterizan por acumular la mayor parte de energía al inicio de la señal. En cambio, las señales continuas (Figura 3.16.b), relacionadas con eventos secundarios de EA, carecen de inicio y final definidos, y duran en el tiempo mientras siga activo el proceso que las generó. En muchos casos no es trivial separar los dos tipos de señales, pues aparecen mezclados, lo cual dificulta bastante su análisis.

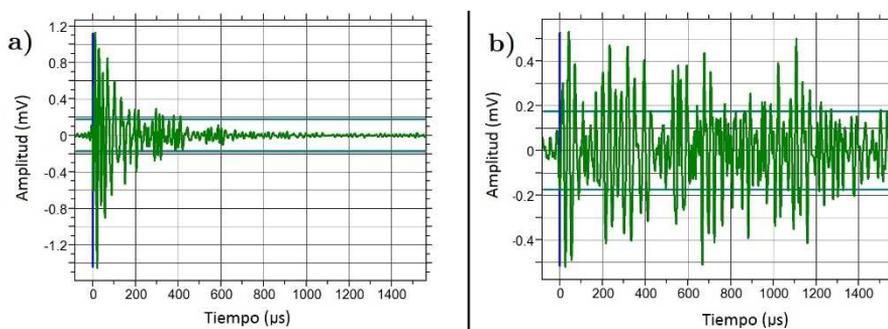


Figura 3.16. a) Señal de EA transitoria procedente de un evento primario de EA en el hormigón. b) Señal de EA continua procedente de un evento secundario de EA en el hormigón.

En el dominio de las frecuencias, el rango en el que pueden moverse las señales de EA es muy amplio, aunque para las aplicaciones industriales se suele establecer un límite inferior de 20 kHz, es decir, por encima de la zona audible, para evitar ruidos de vibraciones o rodamientos, y un límite superior de 1 MHz, para evitar ruidos eléctricos o electrónicos. El contenido en frecuencias de una señal de EA también nos proporciona una valiosa información sobre la naturaleza de la fuente de EA, gracias al hecho de que las frecuencias predominantes en el espectro de las señales EA difieren para cada mecanismo o material. En los materiales de construcción, por ejemplo, las grietas en el hormigón generan señales con un predominio en las bajas frecuencias, mientras que en los metales, las frecuencias de las señales son mayores. No en vano, existe en el mercado una variedad de sensores específicos para diferentes rangos de frecuencia, en los que exhiben mayor sensibilidad.

Monitorización con el método de EA

A la vez que se fueron consolidando los conocimientos teóricos acerca del proceso físico de EA, el método de EA iba revelando su enorme potencial para la monitorización estructural a tiempo real, gracias a tres aspectos exclusivos de este método que generan ventajas respecto a otros [19]:

- Es un método pasivo, donde la onda se genera en el material al someterse a esfuerzos y solo hay que recibirla;
- Las ondas de EA se reciben de forma instantánea, haciendo posible el seguimiento a tiempo real de procesos dinámicos como la formación o crecimiento de grietas.
- En el proceso de EA, la energía elástica se libera en todas las direcciones, lo que permite ampliar las posibilidades para la colocación del sensor sin dejar de detectar la onda EA. También permite detectar y evaluar las discontinuidades de toda la estructura en un único ensayo.

Siguiendo con las singularidades del método de EA, quizás convendría hacer una breve referencia a las palabras de Josef Kaiser, fundador de la EA moderna: “*Los ensayos sobre varios materiales (metales, maderas o*

materiales minerales) muestran que la baja emisión comienza incluso a bajos niveles de tensión. Ésta es detectable durante todo el proceso de carga, pero solo si el material no ha experimentado una carga previa⁷. Estaba enunciando **el efecto Kaiser**, que básicamente se puede definir como la ausencia de EA detectable hasta que no se exceden los niveles de presión previamente aplicados [19]. En la Figura 3.17 se muestran resultados de EA relativos a una vasija de aluminio, donde se puede observar que en la segunda escalada de presión, solo se empiezan a detectar eventos de EA una vez superado el nivel de presión alcanzado en el ciclo anterior.

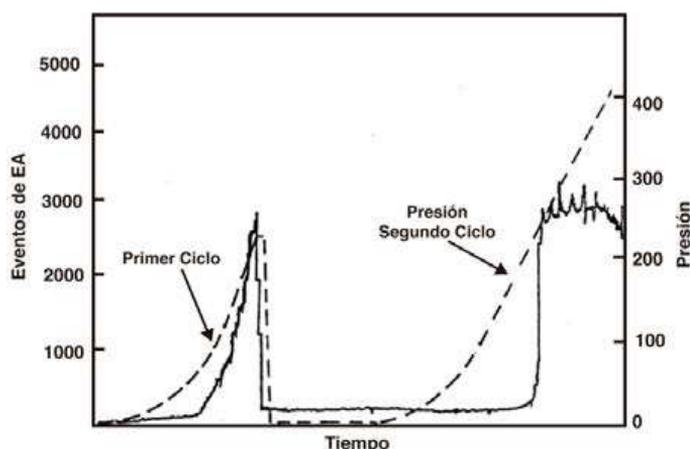


Figura 3.17. Tasa de eventos de EA (en línea continua) y diagrama de presión (en línea discontinua) en un ensayo de presurización de una vasija de aluminio. Se cumple el efecto Kaiser [19].

Cabe señalar que el efecto Kaiser, en tanto que refleja la respuesta irreversible del material frente a una tensión aplicada sobre él, se cumple en materiales plásticos, como la mayoría de metales. Sin embargo, tanto el cumplimiento como el incumplimiento del efecto Kaiser son valiosas consecuencias de las que el método de EA puede aprovecharse. La aplicación práctica del primer caso, conocida como *Corolario de Dunegan*, puede ser útil para conocer el daño acumulado previamente en el material. El segundo caso, el efecto Felicity, se pone de manifiesto en procesos de deformación que se rigen por mecanismos dependientes del tiempo, como por ejemplo la relajación de la matriz en materiales compuestos, que transfiere tensiones a las fibras del material, generando EA, aun cuando las cargas aplicadas no

alcanzan las cargas máximas previas. Normalmente, el efecto Felicity se produce cuando el material empieza a sufrir cierto deterioro, y por tanto, puede ser útil para predecir el fallo en materiales que están sometidos a cargas cuasi-estáticas o de fatiga. En la Figura 3.18 se puede observar la manifestación de ambos casos [66]: Después del primer ciclo de carga (AB), no se genera EA hasta que otra vez, en el segundo ciclo, se alcanza el punto B, de máxima carga en el primer ciclo, cumpliéndose así el efecto Kaiser; sin embargo, una vez acabado el segundo ciclo, la EA en el tercer ciclo se inicia en el punto F, antes de llegar al punto D, de máxima carga en el segundo ciclo, debido al efecto Felicity.

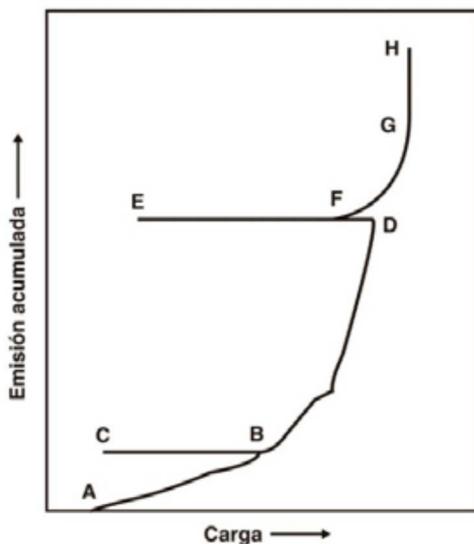


Figura 3.18. Actividad de EA en función de la carga aplicada en un ensayo por ciclos, con cumplimiento de efecto Kaiser en el tramo BCB, y cumplimiento del efecto Felicity en el tramo DEF [66].

En definitiva, se hace evidente el gran potencial del método de EA como ensayo no destructivo, y hoy en día sus aplicaciones en el ámbito industrial son variopintas, relacionadas sobre todo con detección de defectos, monitorización de elementos o estructuras, caracterización de materiales, y control de calidad durante procesos industriales.

3.3.2. Señales de EA. Características

El procesamiento del contenido de las señales de EA es de gran importancia para poder describirlas, distinguirlas unas de otras, agruparlas y establecer criterios para filtrar aquellas que no nos sirven para una determinada finalidad. La señal de EA, que no es más que una perturbación de la tensión eléctrica en el dominio temporal, se define por su forma de onda, de la cual se puede extraer todo el contenido en forma de parámetros o características. Trabajar con estas características tiene una doble finalidad: Por una parte, establecer criterios basados en el contenido de la señal para relacionarla con un mecanismo u otro (identificación de fuente de EA); por otra parte, hacer más fácil, rápido y práctico el manejo de los datos relativos a la señal de EA, puesto que la cantidad de datos de las características es ínfima si la comparamos con los datos de la forma de onda.

Características de señales transitorias

En la práctica, es crucial poder trabajar con *hits*, es decir, señales bien definidas. En este punto, la configuración de ciertos parámetros del sistema de EA puede jugar un papel importante, ya que nos ayuda a separar unos *hits* de otros y a evitar el ruido de fondo.

El primer parámetro a tener en cuenta es el **umbral de detección**, que determina el tiempo en el que la señal lo cruza por primera vez (*First Threshold Crossing*, FTC). Un umbral demasiado elevado, hará que el FTC sea muy diferente del tiempo de llegada de la señal (*Time of Arrival*, TOA), y por tanto no sería válido para usarlo en una localización. Si es demasiado bajo, el sistema de EA recogerá señales de EA falsas, generalmente procedentes de ruido de fondo.

El *Hit Definition Time* (HDT) o *Duration Discrimination Time* (DDT) es el tiempo que debe transcurrir sin cruces del umbral para dar por finalizado el *hit*. El *Hit Lockout Time* (HLT) o *Rearm Time* (RT) hace referencia al tiempo que debe transcurrir después de haber detectado un *hit* antes de que se pueda detectar uno nuevo. Nuevamente la elección del valor de estos parámetros es trascendental y ha de hacerse buscando un término medio.

Una vez aislada la forma de onda del *hit*, ya podemos extraer sus parámetros básicos. Uno de los más relevantes es la **amplitud (A)**, que es el voltaje pico en valor absoluto de la forma de onda, y nos da una idea de la magnitud de la fuente de EA. La **duración (D)**, que es el intervalo temporal entre el primer y último cruce del umbral de detección por parte de la señal, nos sirve para filtrar ruido indeseado o para distinguir algunas fuentes de EA como las delaminaciones en materiales compuestos. Otra forma de medir la extensión temporal de una señal son las **cuentas (Cnts)**, o número de veces que la señal cruza el umbral de detección en una polaridad. Tanto la amplitud como las cuentas tienen sus variantes, que son el **tiempo de subida o rise time (RT)**, y las **cuentas hasta el pico (CtP)**, respectivamente, y que sólo describen la señal hasta el punto de amplitud pico.

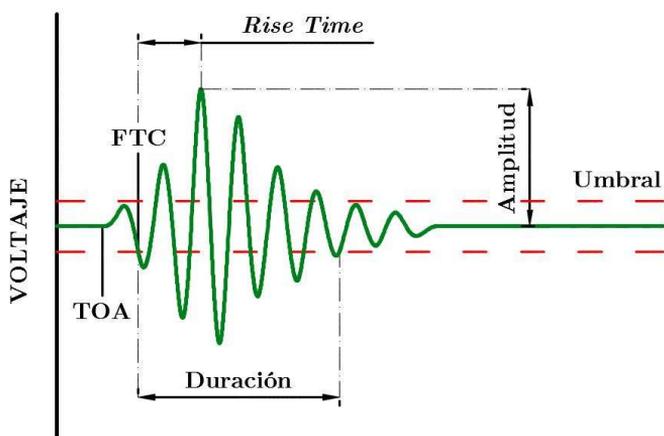


Figura 3.19. Características básicas de una señal transitoria.

Uno de los aspectos más interesantes del método de EA es su capacidad para cuantificar la actividad de EA, y seguramente sea la **energía (E)** el mejor indicador para reflejar la magnitud de la fuente de EA. De las múltiples formas que existen para obtener la energía de un *hit* destacamos las 2 más utilizadas:

Energía MARSE (*Measured Area under Rectified Signal Envelope*): Es la integral de la curva envolvente de la tensión rectificadora, a lo largo de la duración del *hit*. Se define con la siguiente fórmula:

$$MARSE = \int V^r(t)dt; \quad (3.6)$$

donde $V^r(t)$ es la envolvente de la señal rectificadora. Hay que señalar que en esta forma de calcular la energía, el umbral no afecta.

Energía verdadera (*true energy*): Es la integral de la envolvente de la tensión al cuadrado, a lo largo de la duración del *hit*:

$$E = \frac{1}{R} \int |V(t)|^2 dt; \quad (3.7)$$

siendo $V(t)$ el voltaje de salida del sensor y R la resistencia de referencia.

Características a lo largo del tiempo

En las señales continuas, como el ruido de fondo, al no tener un inicio y final definidos, carece de sentido analizar la forma de onda. Este tipo de señales provienen de procesos que se mantienen durante el tiempo, y por ello, puede ser más interesante estudiar la variación o el promediado de algunas características a lo largo de un intervalo temporal. Tres de las características más usadas para este fin son:

Error cuadrático medio (RMS, del inglés).

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [V(t)]^2 dt}; \quad (3.8)$$

Nivel medio de señal (ASL, del inglés).

$$ASL = \frac{1}{T} \int_0^T |V(t)| dt; \quad (3.9)$$

Energía absoluta (ABE, del inglés).

$$ABE = \int_0^T |E(t)| dt; \quad (3.10)$$

donde $V(t)$ es el voltaje de salida del sensor, $E(t)$ la energía de la señal, y T el intervalo de tiempo de medida.

3.3.3. Localización

En relación al método de EA y su uso en la monitorización de elementos y/o estructuras, aparte de las fortalezas enumeradas previamente, se han de mencionar las posibilidades que ofrece para ubicar espacialmente las posibles discontinuidades o defectos activos que hay en el material, por medio de un proceso de localización de la fuente de EA.

La localización propiamente dicha, consiste en un algoritmo matemático que infiere la posición de un cuerpo, con mayor o menor precisión, usando las observaciones físicas procedentes de dicho cuerpo. En el caso de la localización de EA, las observaciones físicas son aquellas relativas a las ondas elásticas que llegan al sensor o sensores en la superficie, como la velocidad o el tiempo de llegada (TOA). El proceso de localización de EA es una secuencia de tres pasos:

1) **Determinación del tiempo de llegada (TOA):** La técnica más usada es la de considerar que el tiempo de llegada de la señal de EA es el primer cruce de la señal con el umbral (FTC). Por tanto, depende mucho de la elección del umbral de detección, la cual debe hacerse adecuadamente.

2) **Construcción del evento.** El constructor de eventos es un algoritmo que nos permite transformar la secuencia de *hits* individuales registrados en agrupamientos de *hits*, llamados eventos y asociados a fuentes de EA (véase Figura 3.15). En sentido estricto, este algoritmo nos proporciona una localización zonal, puesto que conocemos qué sensores detectaron los *hits* del evento y en qué orden.

La agrupación de los *hits* en un mismo evento se cimienta sobre tres criterios:

Tiempo de discriminación del canal de primera llegada (FHCDT): Tiempo mínimo que debe transcurrir entre el primer *hit* del evento y el *hit* previo.

Diferencia de tiempo máxima entre el *hit* de primera llegada y el último *hit* de un evento (DT1X-Max).

Diferencia de tiempo máxima entre dos *hits* consecutivos de un evento (DTNX-Max).

Esto significa que un evento se inicia cuando se sobrepasa el FHCDT y se cierra cuando se sobrepasa el DT1X-Max o el DTNX-Max.

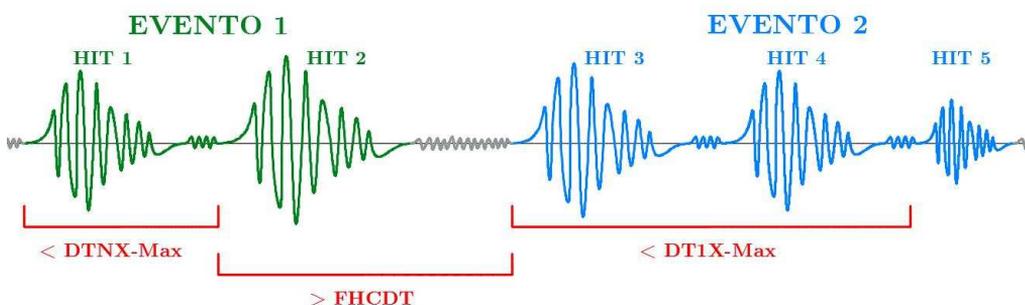


Figura 3.20. Constructor de eventos. Criterios de FHCDT, DT1X-Max y DTNX-Max.

3) **Algoritmo de localización.** Existen muchos algoritmos de localización específicos para la geometría de cada tipo de muestra a inspeccionar. Los más comunes entre los *softwares* comerciales son: Localización lineal (1D), planar (2D), de fondo de tanque, espacial (3D), y esférica.

En todos ellos se requiere conocer la posición de los sensores, los eventos y los tiempos de llegada de los *hits*, la velocidad de propagación, y el número mínimo de *hits* del evento necesarios para la localización. A partir de esa información, y asumiendo que el material es homogéneo e isótropo y que la onda no sufre perturbaciones durante el trayecto, el algoritmo calcula la posición de la discontinuidad o defecto.

3.4. El método de memoria magnética del metal (MMM)

El método de memoria magnética del metal (MMM) es un método relativamente reciente, y su inicio data de finales de los años 60, con las primeras observaciones acerca de la magnetización de metales, incluso cuando no estaban sometidos a un campo magnético externo. El verdadero interés en las investigaciones residía en la variación de la magnetización de los metales y sus causas. Especialmente prolíficos fueron las investigaciones

del profesor Anatolii A. Dubov, en Rusia, que en 1994 introdujo el término de memoria magnética del metal para referirse a la aplicación de la magnetización a la inspección de materiales, cuando las investigaciones ya demostraban claramente la relación entre su variación y los esfuerzos mecánicos aplicados al material. En el año 2007, se armoniza el método con los estándares internacionales dando lugar a la norma ISO 24497:2007. *Non-destructive testing. Metal Magnetic Memory*, y tres años más tarde, se reconoce como END en Rusia.

3.4.1. Definiciones y principios físicos

De acuerdo a la norma ISO 24497:2007, podemos definir la memoria magnética del metal como un efecto que se manifiesta de dos formas:

- Como una **magnetización residual**, que se forma en productos de metal y soldaduras, generada durante su fabricación y enfriamiento en un campo magnético externo.
- Como una **variación irreversible de la magnetización** del material en zonas de concentración de tensiones (*Stress Concentration Zone*, SCZ) y daño debido a cargas mecánicas.

A efectos prácticos, la memoria magnética del metal se caracteriza con la fuga del campo magnético propio (*Self-Magnetic Leakage Field*, SMLF), que se produce en la superficie del elemento, en aquellas zonas con planos de fallas o dislocaciones, en zonas bajo tensiones aplicadas, o en zonas de cierta heterogeneidad en la estructura del material. Por lo tanto, podemos definir el método de memoria magnética del metal como un ensayo no destructivo basado en el análisis de la distribución de la SMLF sobre la superficie del elemento para determinar las zonas de concentración de tensiones, imperfecciones, y heterogeneidades en la microestructura del material [67]. Es importante recalcar la capacidad del método para detectar zonas de concentración de tensiones, es decir, de detectar zonas donde es probable que se produzca el daño, pero que todavía no se ha producido. Esto es clave porque significa que el método permite anticiparse al daño, lo cual implica tener la posibilidad de tomar medidas para evitarlo.

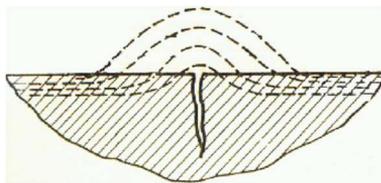


Figura 3.21. Fuga de campo magnético propio (SMLF) en una grieta superficial.

Fundamentos físicos del método de MMM

El método de MMM se sustenta sobre tres principios físicos y sus efectos, los cuales se describen seguidamente de forma breve.

Magnetoestricción inversa. Es una propiedad de los materiales ferromagnéticos que hace variar su magnetización al estar sometidos a esfuerzos mecánicos. El fenómeno es similar a la piezoelectricidad inversa (véase Apartado 3.2). La estructura de un material ferromagnético, a nivel mesoscópico, está compuesta por pequeños dominios magnéticos, en las que cada dominio está polarizado en una dirección diferente. Cuando el material se encuentra bajo esfuerzos mecánicos, los polos se alinean, haciendo que varíe la magnetización del material y que aumente la intensidad del SMLF. En la Figura 3.22 se muestra el proceso de magnetoestricción inversa.

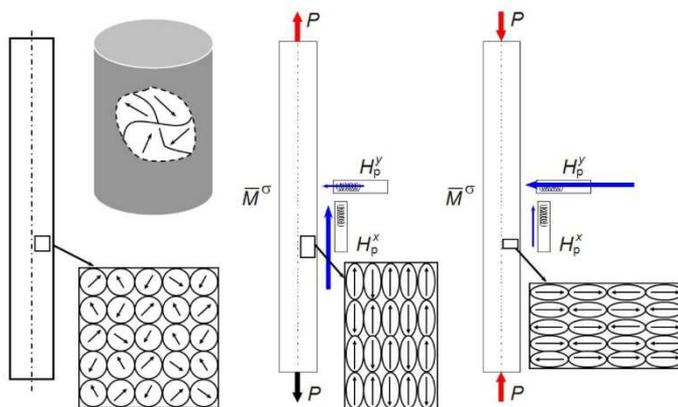


Figura 3.22. Magnetoestricción inversa por esfuerzos de tracción y compresión.

Magnetoelasticidad. Es el efecto por el cual se mantiene una variación magnética remanente en el material ferromagnético después de retirar los

esfuerzos, y es lo que hace que el material tenga “memoria” acerca de las tensiones sufridas durante su vida útil. En la Figura 3.23 se observa el diagrama de la magnetoestricción inversa, donde ΔM_{σ}^H es la variación de magnetización bajo carga, y ΔM_{σ} es la variación de magnetización después de la descarga.

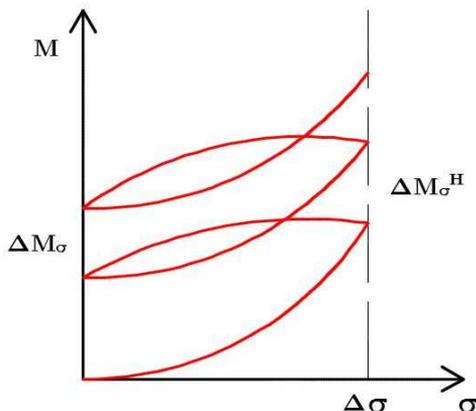


Figura 3.23. Diagrama de magnetoestricción inversa.

Magnetoplasticidad. En zonas con deformación plástica, la magnetización del material aumenta notablemente. En concreto, la magnetización de los dominios en dichas zonas se alinea con los planos de falla que se producen. Este efecto es relevante en tanto que es el responsable de generar la fuga del campo magnético propio del elemento justo en la zona de daño.

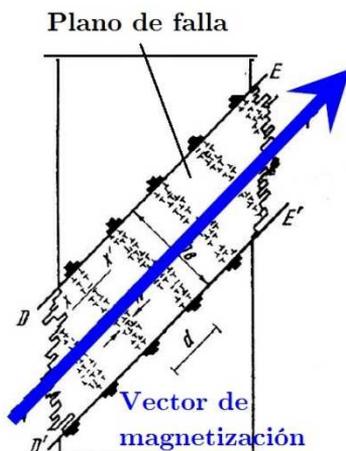


Figura 3.24. Zona de deformación plástica (plano de falla) y vector de magnetización.

Método de MMM

La fuga del campo magnético propio (SMLF), como se ha mencionado ya, caracteriza la memoria magnética del metal, y se puede definir como la distribución de la intensidad del campo magnético propio. Por lo tanto, la SMLF se puede evaluar midiendo la intensidad en cada punto, detectando así zonas de concentración de tensiones o daños (SCZ). Sin embargo, para cuantificar la concentración de tensiones o daño, la magnitud que se usa es el gradiente, longitudinal o transversal, de la SMLF. El gradiente de la SMLF es la variación de la intensidad de la SMLF entre dos puntos de escaneo adyacentes.

$$\text{Gradiente longitudinal} = \frac{dH_L}{dx}; \quad \text{Gradiente transversal} = \frac{dH_L}{dz};$$

Siendo H_L la intensidad de la SMLF medida en A/m; y donde x es la distancia en la dirección del escaneo, y z la distancia en la dirección transversal, ambos medidos en mm.

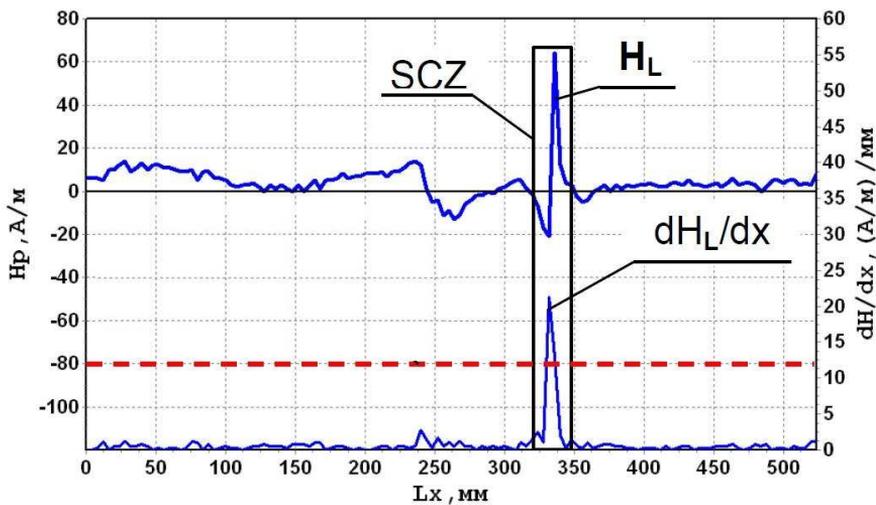


Figura 3.25. Detección y cuantificación de una SCZ en un diagrama de intensidad y gradiente de SMLF.

En la Figura 3.25 se presenta un diagrama típico de inspección con MMM, donde se ve que la intensidad, la curva superior, detecta una SCZ debido a una distribución anómala en la coordenada $x=340$ mm. Por su parte, el

gradiente, en la curva inferior, permite valorar el grado de tensión en la SCZ en relación a un umbral límite, que hay que elegir en cada caso, para valorar si hay daño (en este caso sí) o no.

El procedimiento de la inspección con MMM sigue una secuencia de pasos habitual que, para casos muy puntuales, puede cambiar ligeramente:

1) Como en cualquier otro tipo de END, la dinámica de inspección con MMM se inicia con una **inspección visual**, para concretar la zona a inspeccionar.

2) Se trazan **trayectorias de escaneo** paralelas, cubriendo toda la zona a inspeccionar. En este paso es importante elegir bien la dirección de las trayectorias, así como la separación entre ellas, que dependerá del defecto que se espera encontrar en esa zona, y para ello, la experiencia y conocimientos del operario son cruciales. A continuación se escanea a lo largo de cada una de las trayectorias. El escaneo debe realizarse a velocidad constante, para evitar imprecisiones en las medidas de los sensores.

3) Se **analizan las curvas de intensidad** de cada trayectoria, marcando aquellos puntos donde la distribución es anómala. Se puede dar el caso de que los puntos formen una o varias líneas, que serán líneas de concentración de tensiones o daño (*Stress Concentration Line*, SCL). Otra posibilidad es que los puntos marcados formen una línea cerrada, lo que implica la existencia de un defecto de mancha perfectamente delimitado. En la Figura 2.26 se muestran esquemáticamente los dos casos.

4) En el caso de detectar un defecto de mancha, se vuelve a escanear en trayectorias más acordes al tamaño del defecto; en caso de detectar una SCL, el escaneo se hará a lo largo de ésta.

5) Se **analizan los gradientes del SMLF** del segundo escaneo, para establecer las SCZ que existen y evaluar su magnitud. Aquí la selección del umbral es importante, y dependerá de cada material o elemento, aunque, como regla general, se tiende a coger como el doble del nivel de ruido, cuando éste es constante, o cuatro veces la media del ruido en caso contrario. Una

vez elegido el umbral, se puede valorar la magnitud de las tensiones o el nivel de daño producido.

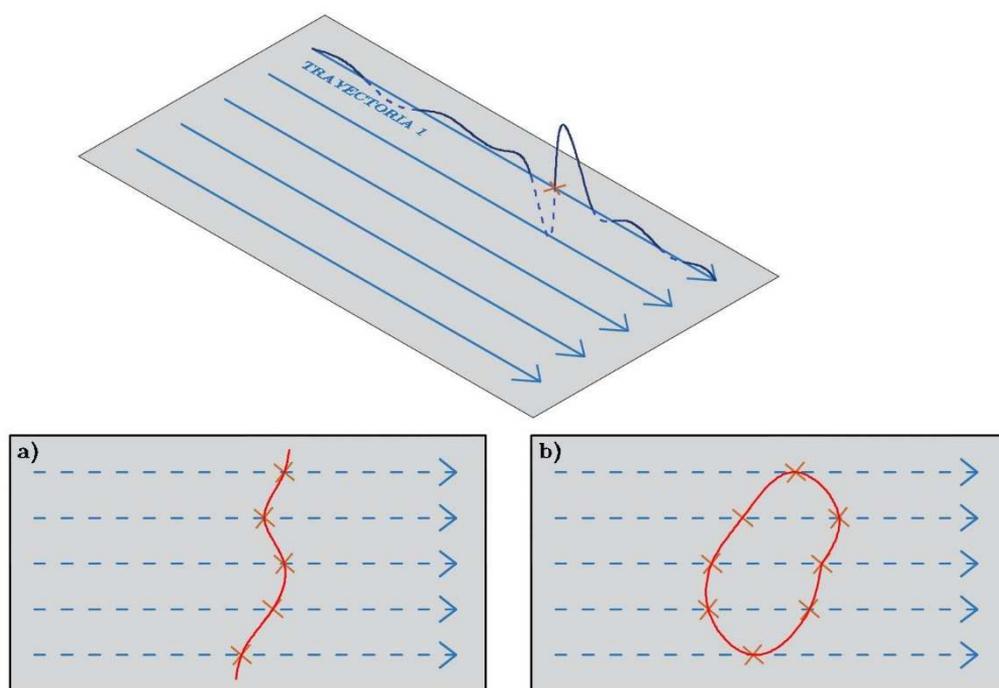


Figura 3.26. Escaneo de una superficie con el método MMM. a) Detección de una SCL. b) Detección de un defecto de mancha.

El método de MMM es aplicable a todos los materiales ferromagnéticos, que incluyen al hierro y todas sus aleaciones con otros metales como el cobalto o el níquel, y son usados para la fabricación de diferentes tipos de elementos con distintas prestaciones y geometrías. Por lo tanto, la dinámica de inspección puede diferir en algunos casos dependiendo de la geometría o aplicación del elemento inspeccionado.

Instrumentación

Una de las grandes ventajas de la inspección con el método de MMM reside en la sencilla y manejable instrumentación que se necesita, y que consta de:

- Un **dispositivo rodante de escaneo** que integra uno o varios sensores que miden la intensidad del campo magnético propio. Estos sensores son magnetómetros de flujo, que pueden ser de 1 componente (Y), de dos

componentes (X, Y) o de tres componente (X, Y, Z). En la Figura 3.27 se muestra un magnetómetro de flujo de tres componentes, integrado en un dispositivo de rodamiento; la componente X se encuentra en la dirección del escaneo, la componente Y es normal a la superficie inspeccionada, y la componente Z es transversal a la dirección de escaneo.

- Un **equipo de medida electrónico**, denominado *Tester of Stress Concentration* (TSC), que registra las medidas para su posterior procesamiento y previsualización. Existen varios tipos de dispositivos, dependiendo del número de canales que tienen y el número de componentes que pueden procesar.

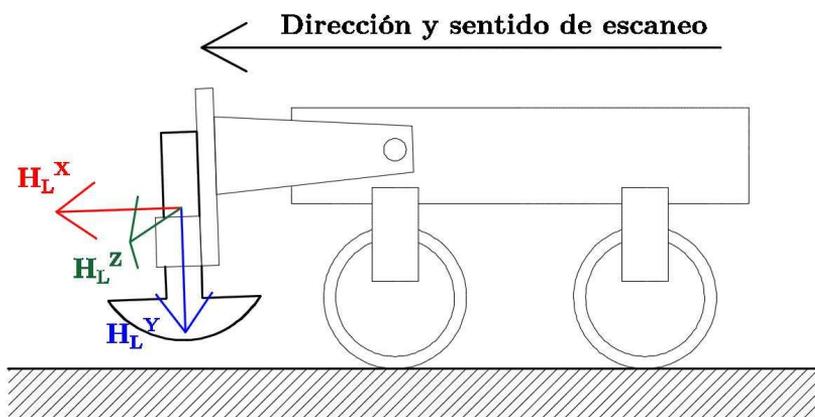


Figura 3.27. Dispositivo de rodamiento con magnetómetro de flujo de tres componentes (X, Y, Z).

Un aspecto importante antes de comenzar la inspección es la calibración de la instrumentación. La primera, la calibración L, consiste en asegurar que el dispositivo de rodamiento mide bien la longitud recorrida durante el trayecto. La segunda, calibración H, es para ajustar el valor de la intensidad del campo magnético terrestre que el dispositivo electrónico toma como referencia.

A modo de resumen, se pueden resaltar las siguientes ventajas del método de MMM:

- Puede detectar zonas con concentraciones de tensiones, incluso antes de que se materialice el daño, y por tanto es un método que permite un diagnóstico prematuro.
- Gracias al efecto de la magnetoplasticidad, el método puede localizar con gran precisión los defectos o zonas de tensiones.
- Se puede realizar sobre elementos en funcionamiento.
- La instrumentación para llevar a cabo la inspección es de fácil manejo.
- No requiere ninguna preparación de la superficie a inspeccionar, e incluso, se puede utilizar para inspeccionar tuberías enterradas con gran éxito.

Como inconveniente del método cabe señalar que sólo puede detectar daños superficiales o a poca profundidad, o en elementos de poco espesor.

4. DISIPADORES: DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE INSPECCIÓN

La función principal de un disipador de energía es absorber energía del sistema cuando se somete a un terremoto. Esta energía se absorbe fundamentalmente o bien deformando plásticamente elementos metálicos (disipadores dependientes del desplazamiento, también llamados disipadores histeréticos) o aumentando la temperatura de fluidos viscosos o sólidos viscoelásticos (disipadores dependientes de la temperatura).

Centrándonos en el caso de los disipadores histeréticos, las deformaciones plásticas provocan daño (deformaciones plásticas acumuladas) que conducen al su agotamiento. La pregunta que cabe hacerse después de un evento sísmico es si el disipador ha agotado su capacidad última de disipación de energía y precisa ser sustituido. La energía absorbida por un disipador histerético tras un sismo concreto se puede calcular si se conoce la historia de deformaciones y fuerzas a las que ha estado sometido. Comparándola con la por capacidad límite última se puede determinar cuantitativamente el nivel de daño mecánico y predecir la proximidad a la rotura. Sin embargo, para medir la historia de deformaciones y fuerzas durante un sismo sería necesario tener instrumentada la estructura de forma continua, lo cual es caro y poco defendible al ser los terremotos severos acciones con una

probabilidad de ocurrencia muy baja. El presente trabajo propone dos métodos de inspección para evaluar el daño producido en los disipadores histeréticos que no requieren un registro de datos durante el sismo, sino realizar ensayos no destructivos al disipador tras el terremoto. El primer método se basa en las técnicas de transmisión y pulso-eco con ultrasonidos (UT), gracias a su aptitud para medir la atenuación de la señal cuando se produce una plastificación del elemento. El segundo método se basa en la memoria magnética del metal (MMM), para medir la magnetización del campo propio del elemento, directamente afectada por la plastificación. Concretamente, en esta Tesis se investigan experimentalmente ambos métodos para predecir el daño en la parte del disipador TTD-NiTi construida con acero inoxidable (que llamaremos en adelante parte TTD) y que es donde se concentra el daño.

A continuación se explica en detalle la parte experimental y se describen los ensayos realizados y el procedimiento para su inspección. Como se verá más adelante, de los dos métodos se extraen parámetros o índices de daño, que nos permiten obtener de forma indirecta el nivel de daño mecánico producido en la parte TTD del disipador TTD-NiTi.

4.1. Ensayos cíclicos de la parte TTD del disipador TTD-NiTi

Los ensayos realizados consistieron en someter a la parte TTD del disipador a cargas cíclicas cuasi-estáticas.

Un aspecto importante en este tipo de ensayos es el patrón de los ciclos de carga a imponer, ya que influye en la capacidad límite última de disipación de energía (CLUDE) del disipador. La caracterización de la CLUDE de un disipador exige la aplicación de diferentes patrones y su descomposición en lo que se denomina la parte de Bauschinger y la parte del esqueleto. En este trabajo se aplicaron dos tipos de historias de carga: ciclos de amplitud creciente y ciclos de amplitud constante, que se describen en el Subapartado 4.1.2.

4.1.1. Descripción de las probetas ensayadas

Se fabricaron varios especímenes que representan a la parte TTD del disipador. Cada espécimen tiene la geometría mostrada en la Figura 4.1.a y que consiste en una chapa de acero inoxidable a la que se le han practicado una serie de ranuras. Estas ranuras dejan entre sí unas bandas de acero de dimensiones $120 \times 120 \times 4 \text{ mm}^3$. Estas bandas son de acero inoxidable laminado en caliente, de grado 304-AISI. Esta bandas de acero (también denominadas “struts” en esta Tesis) son la parte disipadora propiamente dicha, y se deforman en su plano según se observa en la Figura 4.1.b cuando el “ala” interior (ver figura 4.1.b) se deforma en dirección contraria al “ala” exterior.

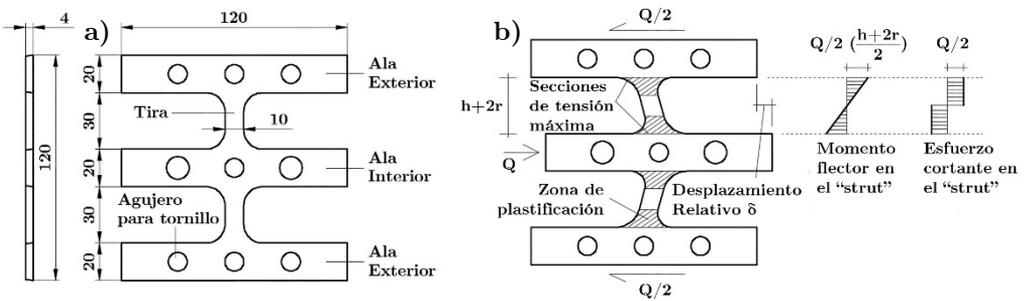


Figura 4.1. Testigo del disipador TTD-NiTi. a) Dimensiones en milímetros. b) Patrón de deformación en la unión tira-ala.

4.1.2. Descripción de los ensayos cíclicos

Configuración de los ensayos

El sistema de montaje del ensayo consiste básicamente en dos tubos de acero de sección cuadrada, uno alojado dentro del otro de forma telescópica, donde el tubo exterior está fijado a la parte superior de la máquina de ensayos y el tubo interior fijado a la parte inferior. En la Figura 4.2.a se puede apreciar el sistema de montaje general del ensayo.

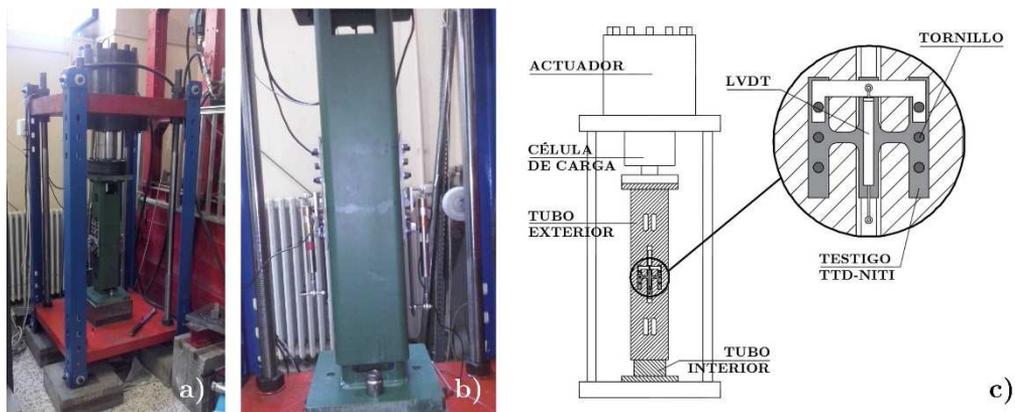


Figura 4.2. a) Disposición del actuador y el sistema de “tubo en tubo”. b) Disposición de las placas. c) Esquema general del ensayo cíclico.

En cada ensayo se colocan dos placas, una en la cara A y otra en la cara B, ambas enfrentadas, como muestra la Figura 4.2.b, de forma que el desplazamiento de los tubos sea uniforme en las 4 caras. El tubo exterior tiene una abertura vertical que permite atornillar el ala central al tubo interior, mientras que las alas laterales se atornillan al tubo exterior (ver Figura 4.3). Con esta configuración se consigue que, al aplicar el actuador una carga, los tubos deslicen entre sí de forma telescópica, provocando un desplazamiento diferencial entre el ala central y las alas laterales. Para la fijación de las placas a los tubos, se han usado tornillos de alta resistencia de acero al carbono DIN-912 con un par de apriete de 138 Nm, y arandelas elásticas tipo Grower, impidiendo cualquier deslizamiento en la fijación.



Figura 4.3. Fijación de la placa sobre la cara del sistema “tubo en tubo”.

La máquina de ensayos es una máquina estática, con un cilindro actuador de doble efecto, de la marca MOOG, situado en la parte superior y cuya capacidad de carga llega hasta los 1000 kN en compresión y los 720 kN en tracción. El actuador está equipado con una célula de carga SAXEWAY de modelo T1000, con capacidad de 1000 kN. La servoválvula, también de la marca MOOG, recibe el desplazamiento y carga medidos por la célula de carga.

Así mismo, se han instrumentado los desplazamientos relativos entre las alas con transductores de desplazamiento, llamados transformadores diferenciales de variación lineal (*Linear Variable Differential Transformer*, LVDT), y que basan su funcionamiento en la variación de la tensión eléctrica cuando el núcleo ferromagnético se desplaza en su interior. La Figura 4.4.a muestra el transductor LVDT de marca RDP, y de tipo ACT1000C, utilizado en estos ensayos. En la Figura 4.4.b se observa su colocación durante el ensayo.



Figura 4.4. Transductor LVDT utilizado en el ensayo. a) Imagen del transductor LVDT. b) Colocación durante el ensayo cíclico.

Patrones de carga cíclica

Diez chapas de acero inoxidable, de ahora en adelante llamados testigos, que forman la parte disipadora del TTD dentro del disipador TTD-NiTi, fueron

sometidas a un ensayo cíclico cada una. Cada testigo fue cargado hasta un determinado nivel de daño. Los diez ensayos, controlados por el desplazamiento medido por el transductor LVDT, se agruparon en dos grupos de cinco que corresponden a cada uno de los siguientes patrones de carga cíclica:

Patrón de carga con amplitud creciente: En este ensayo el primer ciclo tiene una amplitud máxima de 0.4 mm, y en cada ciclo la amplitud máxima aumenta 0.4 mm respecto del anterior. Los 5 testigos sometidos a este patrón, nombrados como T1 a T5, se ensayaron hasta los ciclos 2 (0,8 mm), 6 (2,4 mm), 8 (3,2 mm), 10 (4 mm) y 13 (5,2 mm), respectivamente, como se refleja en la Tabla 4.1, y por tanto, alcanzaron distintos niveles de daño. El daño en los ensayos de amplitud creciente se produce por el aumento gradual en el desplazamiento máximo, haciendo que la deformación sea cada vez mayor.

Número de ciclos	2	6	8	10	13
Desplazamiento Máximo	0,8	2,4	3,2	4,0	5,2
T1	X				
T2	X	X			
T3	X	X	X		
T4	X	X	X	X	
T5	X	X	X	X	X

Tabla 4.1. Número de ciclos y desplazamiento máximo alcanzado en los testigos T1-T5.

Patrón de carga con amplitud constante: En este ensayo todos los ciclos tienen una amplitud máxima de 0,8 mm. Los 5 testigos T6 a T10 sometidos a este patrón, se ensayaron hasta los ciclos 30, 60, 90, 120 y 150, respectivamente, como se refleja en la Tabla 4.2, y alcanzaron distintos niveles de daño. Este tipo de ensayos, con varios ciclos de amplitud constante, se conoce como ensayo de fatiga, dado que el daño va creciendo por acumulación de ciclos.

Número de ciclos	30	60	90	120	150
Desplazamiento Máximo	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
T1	X				
T2	X	X			
T3	X	X	X		
T4	X	X	X	X	
T5	X	X	X	X	X

Tabla 4.2. Número de ciclos y desplazamiento máximo alcanzado en los testigos T6-T10.

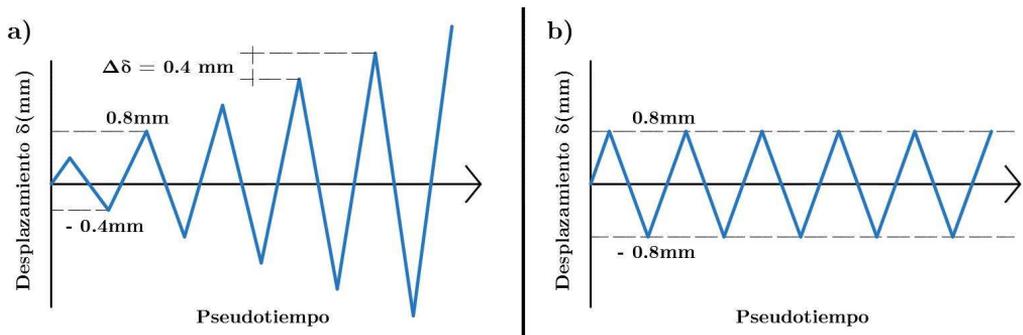
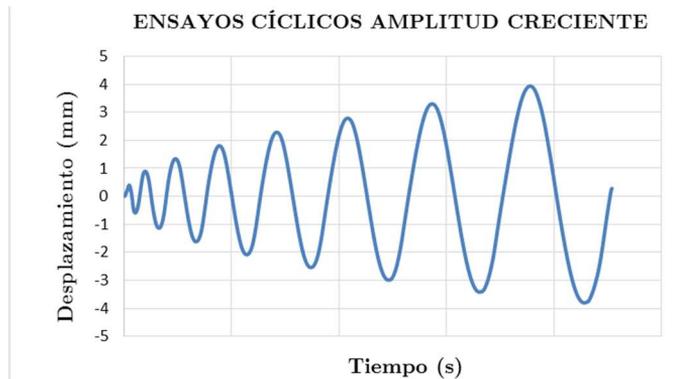


Figura 4.5. Patrones teóricos de carga cíclica para testigos T1-T5 (a) y testigos T6-T10 (b).

La Figura 4.5 muestra los dos patrones teóricos de carga cíclica para cada grupo de testigos. Sin embargo, los patrones realmente aplicados durante los ensayos son ligeramente diferentes, de aspecto más sinusoidal, y que están representados en la Figura 4.6.



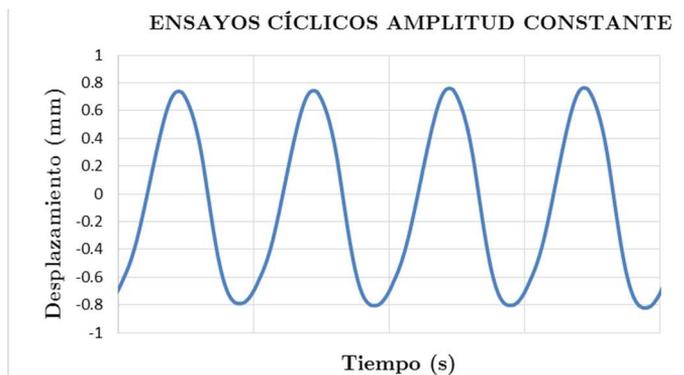


Figura 4.6. Diagramas desplazamiento-tiempo de las cargas cíclicas aplicadas a testigos T1-T5 (amplitud creciente) y testigos T6-T10 (amplitud constante).

4.1.3. Inspección UT y MMM de los testigos TTD-NiTi

Como se apuntó previamente, la placa de acero o testigo está diseñada y unida a los dos tubos de acero de tal forma que cuando se produce un movimiento relativo entre ambos tubos, las placas se somete a deformaciones cortantes que provocan deformaciones plásticas en cuatro zonas de la chapa (véase Figura 4.1.b). Estas zonas son, por tanto, las cuatro regiones de interés a inspeccionar. La inspección de las 10 placas se hizo en el Laboratorio de Ensayos para Diagnóstico Estructural (LEDE), antes de los ensayos cíclicos, para obtener medidas con ausencia de daño, y una vez concluidos.

Inspección de UT por transmisión

La técnica de transmisión, como se explicó en el Capítulo 3, implica el uso de dos transductores, uno para emitir la señal, y el otro, para recibirla. En este caso, los transductores se han dispuesto enfrentados, a ambos lados de la placa, pues ambas caras son planas, paralelas y accesibles. La posición de los transductores durante la inspección se aprecia en la Figura 4.7. El ensayo se llevó a cabo siguiendo las indicaciones de la norma UNE EN ISO 16823 [68].

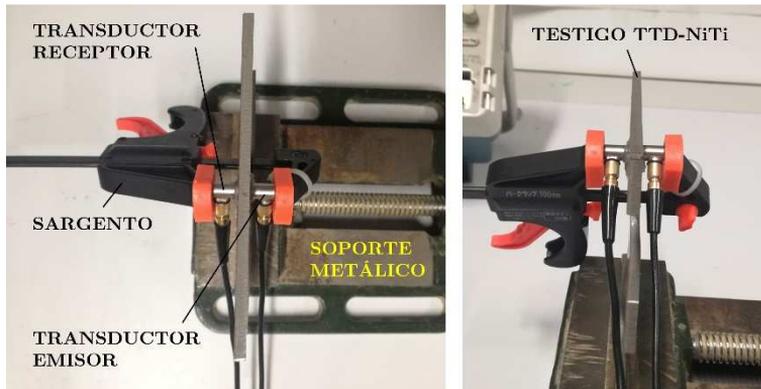


Figura 4.7. Colocación de transductores en la inspección por transmisión.

El sistema de medida instalado para la inspección es bastante sencillo, dadas las pequeñas dimensiones del objeto a inspeccionar, y el fácil manejo de los equipos que conforman dicho sistema. La Figura 4.8 expone el sistema de medida, compuesto por un generador de pulsos con sistema de acondicionamiento de señales, un osciloscopio digital, dos transductores de contacto, cableado, y elementos auxiliares de soporte y fijación.



Figura 4.8. Sistema de medida para la inspección por transmisión.

El proceso de medida se inicia con el **generador de señales**, que excita la onda que se propagará a través del material. En este sentido, es importante tener en cuenta que la finalidad de la inspección es estudiar la atenuación de la señal por el efecto de la deformación plástica que se produce en las placas. Esto implica una exigencia mayor a la hora de evitar otros factores

atenuantes, principalmente la dispersión (*scattering*) y la absorción. El acero inoxidable de la placa es un material de grano fino, bastante homogéneo, donde la dispersión es muy baja. Sin embargo, sí puede haber una importante absorción si se usan frecuencias muy altas, las cuales se han evitado en esta inspección. La excitación de la onda se ha realizado con el generador de pulsos OLYMPUS, modelo 5072PR, que incluye un acondicionador de señales para amplificar o atenuar señales. El generador está habilitado para controlar varios parámetros relacionados con la señal:

- Frecuencias de pulsos (PRF)
- Energía: Varía el ancho y amplitud de la señal.
- Amortiguación: Varía la resistencia presentada por el transductor. Altos valores de amortiguación aumentan el voltaje y el ancho de señal.
- Modo: Selecciona la técnica de pulso-eco (1) o de transmisión (2).
- Ganancia: Para amplificar o atenuar la señal recibida (+/- 59 dB).
- Filtros de paso alto (HPF) o de paso bajo (LPF), si procede.



Figura 4.9. Generador de pulsos OLYMPUS 5072PR.

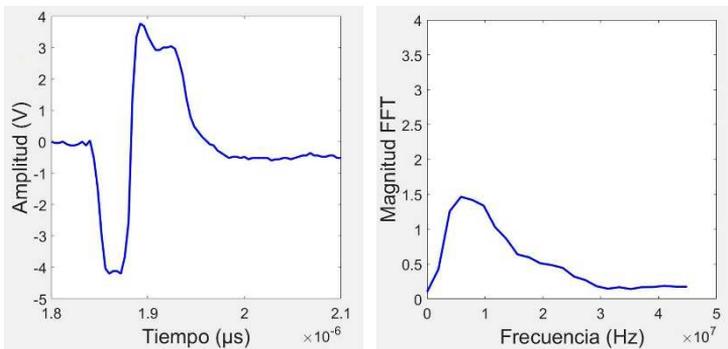


Figura 4.10. Pulso emitido por el generador. Izq.: Señal en el dominio temporal. Der.: Espectro de frecuencias de la señal.

La señal generada, que se puede observar en la Figura 4.10, llega al transductor emisor. Se trata de un pulso de 4 V de amplitud con un predominio de frecuencias por debajo de los 15 MHz.

En la elección del **transductor** para la inspección influyen algunos factores. Por una parte, el tamaño del transductor está limitado por el área a inspeccionar, de aproximadamente $1 \times 1,5 \text{ cm}^2$. Una vez conocida dicha limitación, se elige un transductor con una curva de sensibilidad adecuada al rango de frecuencias con las que se va a trabajar. El transductor OLYMPUS, modelo V1091, tiene un diámetro nominal de 6 mm y una curva de sensibilidad con una frecuencia central de 5 MHz, por lo que cumple ambas exigencias.

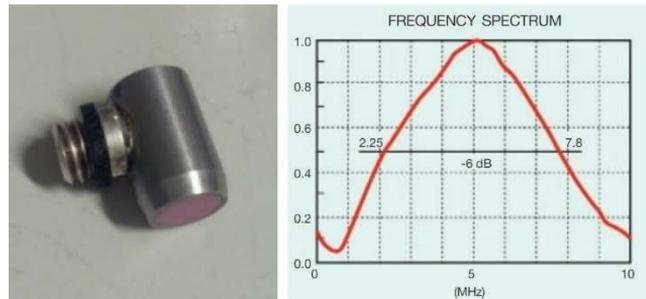


Figura 4.11. Transductor piezoeléctrico OLYMPUS V1091. Izq.: Imagen del transductor. Der.: Curva de sensibilidad del transductor.

Cabe señalar que el transductor emisor también afecta a la señal generada. La interfase entre el transductor y la superficie hace que la señal emitida real sea diferente a la señal generada por el equipo, como se ve en la Figura 4.12. En efecto, la oscilación que la señal eléctrica del generador transmite al piezoeléctrico del transductor se transforma al chocar contra la superficie del material. El choque provoca una oscilación de alta frecuencia que enmascara totalmente la señal original emitida por el generador. De hecho, la distribución de frecuencias original concentrada por debajo de los 15 MHz se desplaza hacia el rango 15-30 MHz. Si bien, cabe señalar que el efecto oscilante del choque desaparece antes de llegar la onda al transductor receptor, como se puede ver en la señal de llegada al transductor receptor, en la Figura 4.13.

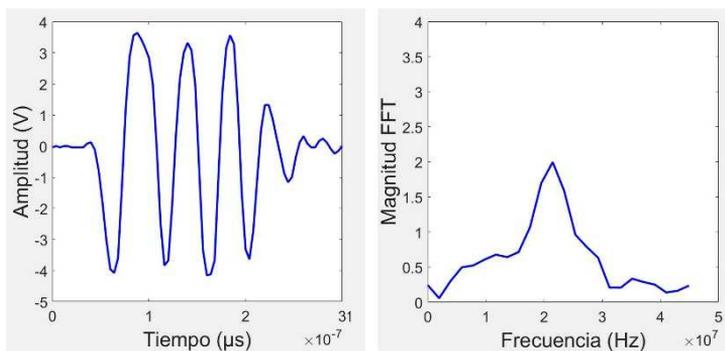


Figura 4.12. Onda transmitida por el transductor a la superficie. Izq.: Señal en el dominio temporal. Der.: Espectro de frecuencias de la señal.

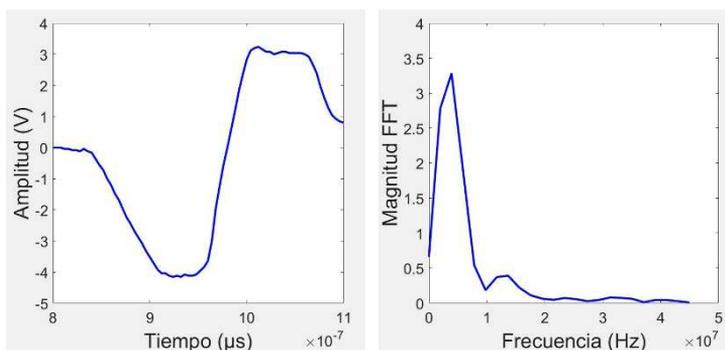


Figura 4.13. Señal que llega al transductor receptor. Izq.: Señal en el dominio temporal. Der.: Espectro de frecuencias de la señal.

La onda transmitida al material, después de recorrer el espesor de la placa, llega al transductor receptor, y éste la convierte en señal eléctrica. Es preciso aclarar que en este caso no se produce una alteración de la señal en la interfase superficie-transductor, debido a la baja amplitud de la onda que llega al otro lado de la placa. Al generador de pulsos llega la señal eléctrica recibida, donde se amplifica en 40 dB. Tanto la señal emitida como la señal recibida amplificada se transfieren al **osciloscopio digital** TEKTORNIX, modelo DPO 4034B, que representa ambas señales en el dominio temporal, como se puede apreciar en la Figura 4.14. El osciloscopio, tiene varias funciones:

- Generar una base de tiempos que, junto a la señal de sincronización del generador de pulsos, nos permite situar los tiempos de salida y llegada de la señal.

- Representar la señal en el dominio temporal, con la base de tiempos en el eje horizontal y el voltaje en el eje vertical. El osciloscopio cuenta con comandos relacionados con la visualización de la señal, como el control de los ejes, el tamaño de ventana, o la función de disparo (*trigger*) para captar una señal.
- Permite controlar la frecuencia de muestreo y extraer los datos de la señal, para el posterior procesamiento de la señal.



Figura 4.14. Señal de salida y llegada (azul), y señal de sincronización (amarilla) en la pantalla del osciloscopio digital TEKTRONIX. Izq.: Técnica de transmisión. Der.: Técnica de pulso-eco.

La dinámica de la inspección ha consistido en seguir los siguientes pasos:

1) Configurar los parámetros del generador de pulsos y el osciloscopio. En la Tabla 4.3 se reflejan los valores escogidos.

Generador de Pulsos	Modo	2
	Frecuencia de Pulsos (PRF)	1 kHz
	Energía	104 μ J
	Amortiguación	17 Ω
	Ganancia de salida	+ 40 dB
	HPF	-
	LPF	-
Osciloscopio	Frecuencia de muestreo	250 MHz

Tabla 4.3. Parámetros del generador de pulsos y del osciloscopio para la inspección por transmisión.

2) Limpiar la superficie de posible suciedad con disolvente, marcar los puntos de inspección en el testigo y aplicar acoplante sobre la superficie del material para impedir que haya aire entre ésta y el transductor.

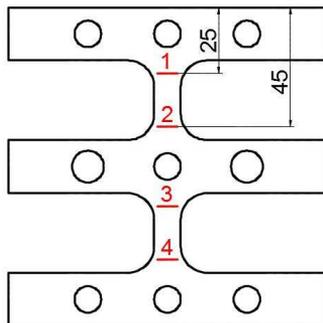


Figura 4.15. Puntos de inspección. Distancias en mm.

3) Montar el testigo sobre un soporte metálico, y fijar los transductores a ambas caras del testigo, con la ayuda de un sargento, que aprieta a los transductores contra la superficie. El uso del sargento es esencial en este tipo de inspección, pues es preciso mantener el mismo apriete en todas y cada una de las medidas.

4) Con los transductores fijados sobre la superficie, esperar unos segundos hasta que la señal se estabilice en su posición y amplitud final.

5) Con la ayuda del osciloscopio, congelar la señal en la pantalla y guardar sus datos.

Para cada punto, se realizaron 3 medidas, ejecutando los cinco pasos para cada una de las medidas, con el fin de garantizar medidas totalmente independientes entre sí.

Inspección de UT por pulso-eco

Los testigos del disipador TTD-NiTi también han sido inspeccionados con la técnica de pulso-eco, ya que también es fiable para el estudio de la atenuación de la señal, y es aplicable en condiciones reales, donde la mayoría de las veces sólo una de las caras es accesible y la disposición de transductores enfrentados no es aplicable.

El procedimiento para la inspección por la técnica de pulso-eco ha sido similar al descrito anteriormente, con la salvedad de usar un único transductor con doble función de emisor y receptor (ver Figura 4.16). En la Tabla 4.4 vienen los parámetros para la inspección UT por pulso-eco.



Figura 4.16. Colocación del transductor en la inspección por pulso-eco.

Generador de Pulsos	Modo	1
	Frecuencia de Pulsos (PRF)	1 kHz
	Energía	104 μ J
	Amortiguación	17 Ω
	Ganancia de salida	+ 40 dB
	HPF	-
	LPF	-
Osciloscopio	Frecuencia de muestreo	250 MHz

Tabla 4.4. Parámetros del generador de pulsos y del osciloscopio para la inspección por pulso-eco.

La señal emitida por el generador de pulsos es de 4 V, similar al caso anterior (Figura 4.17.a). Sin embargo, la distribución de frecuencias se concentra por debajo de los 8 MHz, frente a los 15 MHz en la técnica de transmisión. Esto se debe a que el generador optimiza la distribución de energía, dado que en este caso el recorrido es doble, y por tanto, las frecuencias predominantes deben ser más bajas para mitigar aún más los factores atenuantes como la absorción.

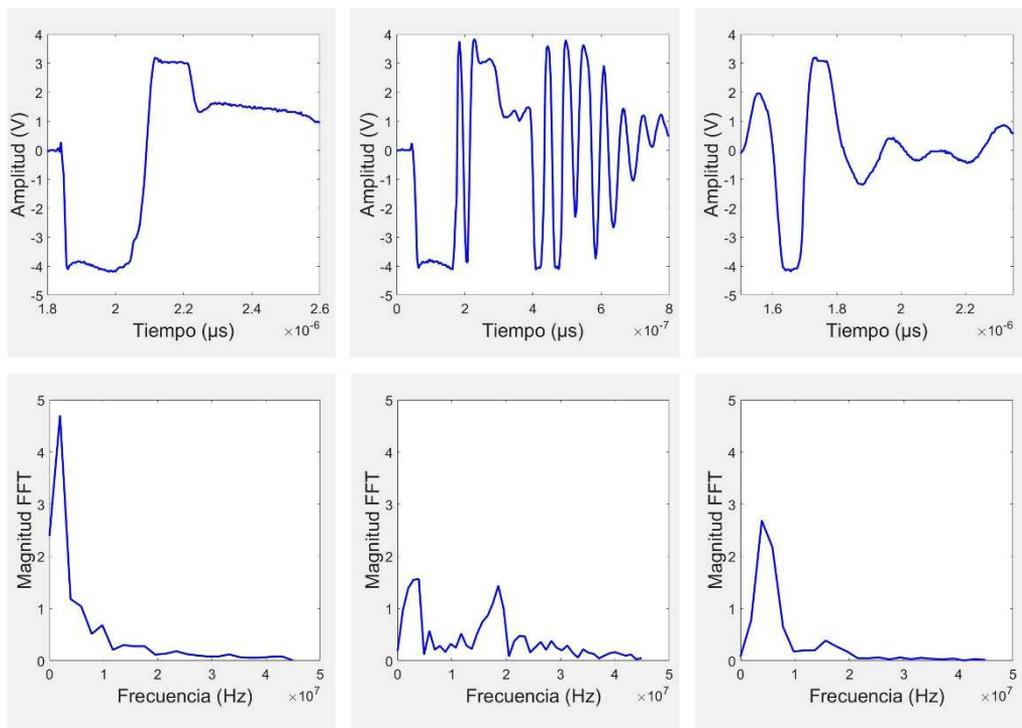


Figura 4.17. Izq.: Pulso emitido por el generador; Cntr.: Onda transmitida por el transductor a la superficie; Der.: Eco que llega al transductor.

Por su parte, la señal real emitida también es diferente de la señal emitida por el generador, debido al fenómeno producido en la interfase transductor-superficie descrito en la inspección por transmisión. Aquí, la oscilación del choque entre transductor y superficie no llega a enmascarar completamente la señal emitida por el generador, haciendo que el espectro presente dos rangos de frecuencias predominantes, de 0-5 MHz relativo a la señal emitida por el generador, y de 13-20 MHz de la oscilación del choque (Figura 4.17.b). Una vez más, el efecto del choque desaparece completamente en el eco recibido (Figura 4.17.c).

La secuencia de pasos para realizar la inspección por pulso-eco ha sido exactamente igual que para la inspección por transmisión.

Inspección por método de MMM

La inspección de los testigos T1-T5 se llevó a cabo después de finalizar los ensayos cíclicos, en los laboratorios de la empresa checa PREDITEST Ltd.,

especializada en realizar ensayos no destructivos, y más concretamente, en la técnica de inspección por el método de MMM.

Tal como se mencionó en el Capítulo 3, la instrumentación necesaria para este tipo de inspección se compone de un dispositivo rodante de escaneo equipado con sensores, un equipo de medida electrónico, cableado, y algún elemento auxiliar. Para el caso particular de la inspección de los testigos T1-T5, se ha utilizado un **dispositivo de escaneo** que integra un sensor de la marca ENERGODIAGNOSTIKA, de tipo 2M, lo cual significa que puede medir en dos direcciones, X e Y (véase Apartado 3.4.1). El dispositivo cuenta con una rueda que transmite al equipo el desplazamiento que está realizando durante el escaneo. El **equipo de medida** es también de la marca ENERGODIAGNOSTIKA, de tipo TSC-3M-12, habilitado con 12 canales para procesar la información de las tres componentes en 4 sensores. El equipo de medida tiene varias funciones:

- Calibración propia respecto de la intensidad local del campo magnético terrestre, y calibración del dispositivo rodante para ajustar la medición del desplazamiento.
- Medir el desplazamiento realizado por el dispositivo rodante. Este aspecto es de especial importancia, porque ayuda bastante a ubicar de forma exacta el daño detectado. El equipo, así mismo, permite controlar la frecuencia de muestreo expresada en distancia recorrida en cada paso, en milímetros.
- El equipo muestra de forma instantánea la distribución de la intensidad de la fuga del campo magnético propio (SMLF), recibida por el sensor, en función de la coordenada a lo largo del trayecto.
- Proporcionar los datos de la medición para su posterior visualización y procesamiento en el programa informático *MMM System*.

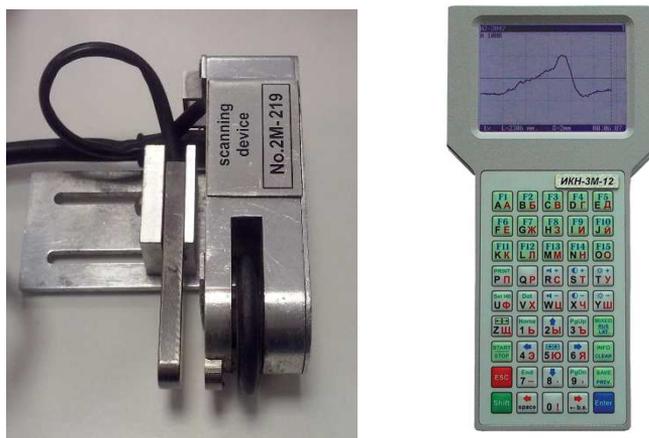


Figura 4.18. Instrumentación para la inspección por MMM. Izq.: Dispositivo de escaneo rodante con magnetómetro de flujo tipo 2M. Der.: Equipo de medida tipo TSC-3M-12.

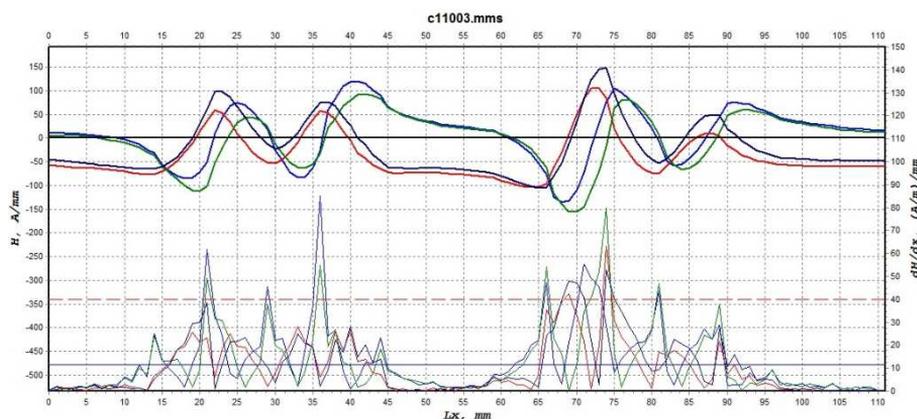


Figura 4.19. Distribución de la intensidad del SMLF (arriba) y del gradiente del SMLF (abajo) representadas en el *MMM System 3.0*.

Las trayectorias de medida se han trazado pasándolas por las zonas de deformación plástica en la placa (véase Figura 4.1.b). Dada la geometría de los testigos, se han trazado cuatro trayectorias por cada una de las caras: dos horizontales, que recorren el ala central por sus bordes; y dos verticales, que recorren las tiras también por sus bordes. En la Figura 4.20 se ven las trayectorias de escaneo.

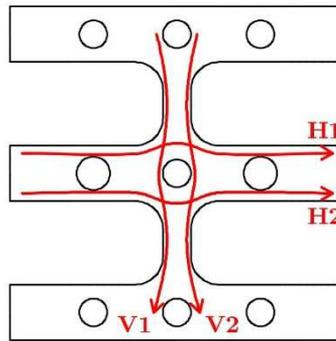


Figura 4.20. Trayectorias de escaneo durante la inspección por MMM.

La inspección realizada, a diferencia de lo habitual, no ha necesitado un escaneo previo, debido a que el daño ya está perfectamente localizado. El procedimiento ha seguido los siguientes pasos:

- 1) Se selecciona el paso del escaneo en el equipo. Para obtener una resolución adecuada, se establece un paso de 1 mm, es decir, cada milímetro se obtiene un dato. También se establece el umbral de evaluación en 10 (A/m)/mm , útil para delimitar la zona de concentración de tensiones.
- 2) Se fija el sensor en el dispositivo de escaneo, procurando que la separación entre sensor y superficie sea lo más pequeña posible. Dado que la superficie es plana, se fija el sensor con una separación de 1 mm de la superficie.
- 3) Se realiza la calibración H, gracias a la cual se pone la intensidad en cero. Se trata básicamente de colocar los sensores, durante la calibración, en su posición normal (posición hacia abajo), y después boca abajo (posición hacia arriba). El equipo deduce el valor de la intensidad local del campo magnético terrestre, que se toma como valor cero o referencia. Por otra parte, se realiza la calibración L, con la cual el equipo calibra su medición del recorrido hecho por el dispositivo rodante de escaneo. La calibración L se hace a lo largo de una distancia de 50 cm, que es una longitud habitual en esta calibración.
- 4) Se procede al escaneo de la superficie siguiendo el trayecto trazado previamente. El escaneo se debe hacer a una velocidad similar a la de la calibración L, y lo más constante posible, para evitar errores de medición en el equipo.

Para cada trayectoria, se realizaron 3 escaneos, ejecutando los cuatro pasos en cada una de las medidas.

4.2. Ensayos sísmicos con disipadores TTD-NiTi

Si los ensayos cíclicos pretenden estimar la capacidad última de disipación de energía en los disipadores a partir del uso de distintos patrones de carga, los ensayos sísmicos suponen una vía directa y más realista para estudiar su respuesta ante las cargas dinámicas provocadas por un seísmo, que no deja de ser un suceso aleatorio que no responde a ningún patrón determinado. El análisis del comportamiento del disipador ante cargas sísmicas resulta revelador, puesto que el carácter aleatorio de los seísmos introduce variables que en los ensayos cíclicos no se dan, como por ejemplo el efecto de la velocidad de deformación (*strain rate*) que afecta a las propiedades mecánicas de los materiales.

En este apartado se describen los ensayos sísmicos realizados sobre una estructura de hormigón armado reforzada con disipadores histeréticos TTD-NiTi, a la que se aplicaron una serie de simulaciones del terremoto de Campano-Lucano (Italia, 1980), mediante la mesa sísmica de la Universidad de Granada. También se explica el procedimiento de inspección de los disipadores por ultrasonidos usando la técnica de pulso-eco.

4.2.1. Descripción de los disipadores TTD-NiTi

El disipador TTD-NiTi, tal como se ha explicado en el Capítulo 2, es un disipador de tipo “tubo en tubo” provisto de una barra interior con memoria de forma capaz de recobrar la dimensión original del disipador, y por consiguiente, recuperar los desplazamientos laterales de la estructura principal.

El disipador es de acero inoxidable laminado en caliente, de grado 304-AISI, y como su nombre indica, consta de dos tubos ensamblados uno dentro del otro de forma telescópica. El tubo interior, de sección cuadrada de 140x140 mm², de 580 mm de longitud y 4 mm de pared, se atornilla a un brazo

auxiliar de acero dulce S235 y sección cuadrada de 80x80 mm² cuya longitud es variable dependiendo de la distancia entre los nudos conectados por el disipador. El tubo exterior, de sección cuadrada de 150x150 mm², de 500 mm de longitud y 4 mm de pared, se atornilla a una cartela de geometría variable dependiendo de la inclinación del disipador. En la Figura 4.21 se puede observar el montaje completo del disipador TTD-NiTi y sus elementos auxiliares.

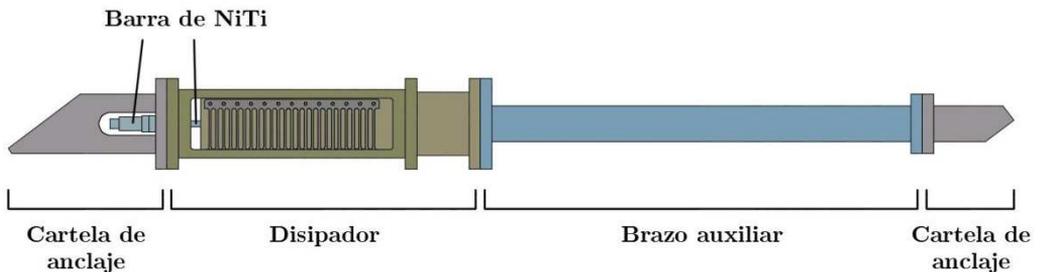


Figura 4.21. Montaje del disipador TTD-NiTi en su puesta en obra.

El tubo exterior, en cada una de sus 4 caras, tiene una abertura rectangular de 445x112 mm², donde en uno de los lados largos nacen 25 tiras de 5 mm de ancho, que van a parar a un ala lateral de 385x20 mm² conectada al tubo interior con soldaduras de tapón cada 30 mm (Figura 4.22, arriba). Nuevamente, las deformaciones se localizan en los dos extremos de cada tira cuando hay deslizamiento entre los dos tubos fruto de esfuerzos axiales. En relación a estos esfuerzos, el tubo cuenta con un angular de 20x20x4 mm soldado en cada esquina para reforzarlo frente al posible pandeo.

Por su parte, la barra con memoria de forma, de diámetro 13 mm, es una aleación de Níquel y Titanio de tipo A-0.50000-SE, anclada en un extremo al tubo interior y en otro al tubo exterior mediante casquillos de perfil interior tronco-cónico y grapas de acero de perfil exterior tronco-cónico que se fijan a la barra. Una vez anclado el disipador en los dos nudos, uno de los anclajes de la barra tiene acceso libre para poder realizar el postesado de la misma. En la Figura 4.22 (abajo) se puede observar el disipador C5 antes de su instalación para los ensayos sísmicos.

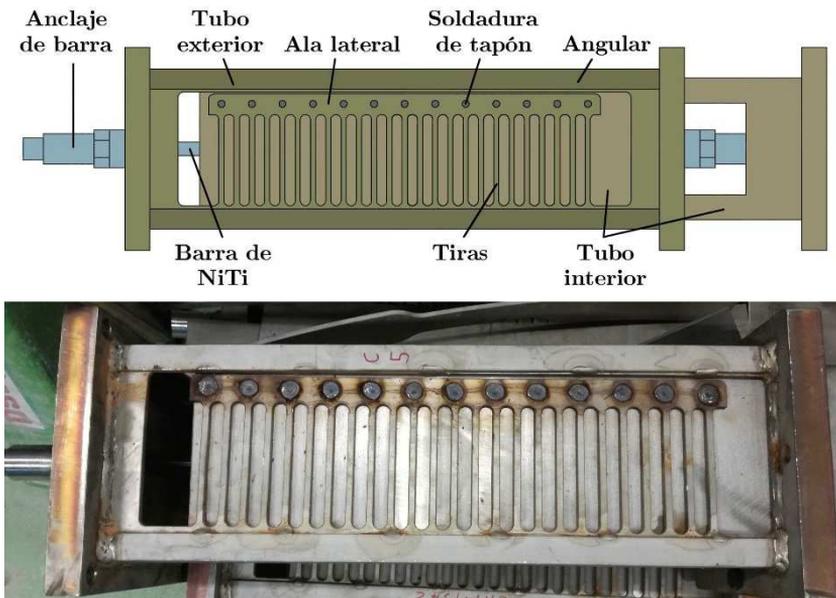


Figura 4.22. Imagen del disipador TTD-NiTi C5 (abajo) y su esquema con los elementos que lo componen (arriba).

4.2.2. Descripción de los ensayos sísmicos

Configuración de disipadores TTD-NiTi en la estructura de HA

El ensayo sísmico se ha concebido para que fuera una simulación lo más realista posible de una estructura de hormigón armado reforzada con disipadores TTD-NiTi y sometida a seísmos reales reproducidos por la mesa sísmica.

La estructura de hormigón armado, de nombre SD1, representa una parte de una estructura sismorresistente, y consiste en un forjado reticular de $3,65 \times 3,02 \text{ m}^2$, apoyado en una columna exterior P1 conectada a un ábaco de $1,02 \times 0,66 \text{ m}^2$, y dos columnas interiores, P2 y P3, que conectan a ábacos de $1,02 \times 1,02 \text{ m}^2$, como se puede ver en la Figura 4.23. Las zapatas de los pilares se atornillan a la mesa sísmica para que los desplazamientos de ésta se transmitan directamente a la estructura principal. La estructura SD1 es idéntica a las estructuras BS1 y BS2 que se describen más detalladamente en el Capítulo 6.

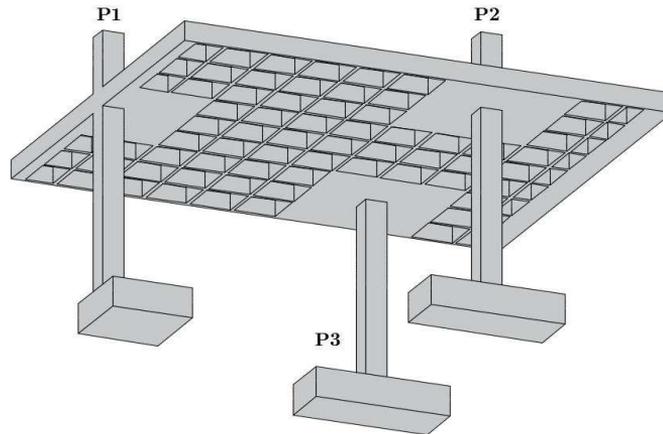


Figura 4.23. Estructura principal de hormigón armado con forjado reticular de los ensayos sísmicos de los disipadores.

En la estructura principal se instalaron seis disipadores TTD-NiTi, tres en la planta baja y tres en la planta primera. Los disipadores C1 y C2 se anclan en la base del pilar P1 y en los ábacos de los pilares P2 y P3, respectivamente. El disipador C3 va de la base del pilar P3 al ábaco del pilar P2. Los disipadores C4, C5 y C6 de la planta primera tienen una disposición similar a los disipadores C1, C2 y C3, pero anclando arriba en la estructura metálica auxiliar. La disposición de los seis disipadores dentro de la estructura principal se muestra en los alzados de la Figura 4.24, donde también se puede apreciar que los disipadores se instalan de forma que sus ejes se sitúen justo en la diagonal que une ambos nudos, a fin de transmitir a los disipadores únicamente esfuerzos axiales.

Los disipadores cuentan con cartelas de acero soldadas en ambos extremos y con una geometría determinada para encajar en los nudos de la estructura. Las cartelas, a su vez, se sueldan a placas con anclaje mecánico embebido en los ábacos y las zapatas. En la Figura 4.25 se ven los anclajes a la estructura principal de dos disipadores de la planta baja.

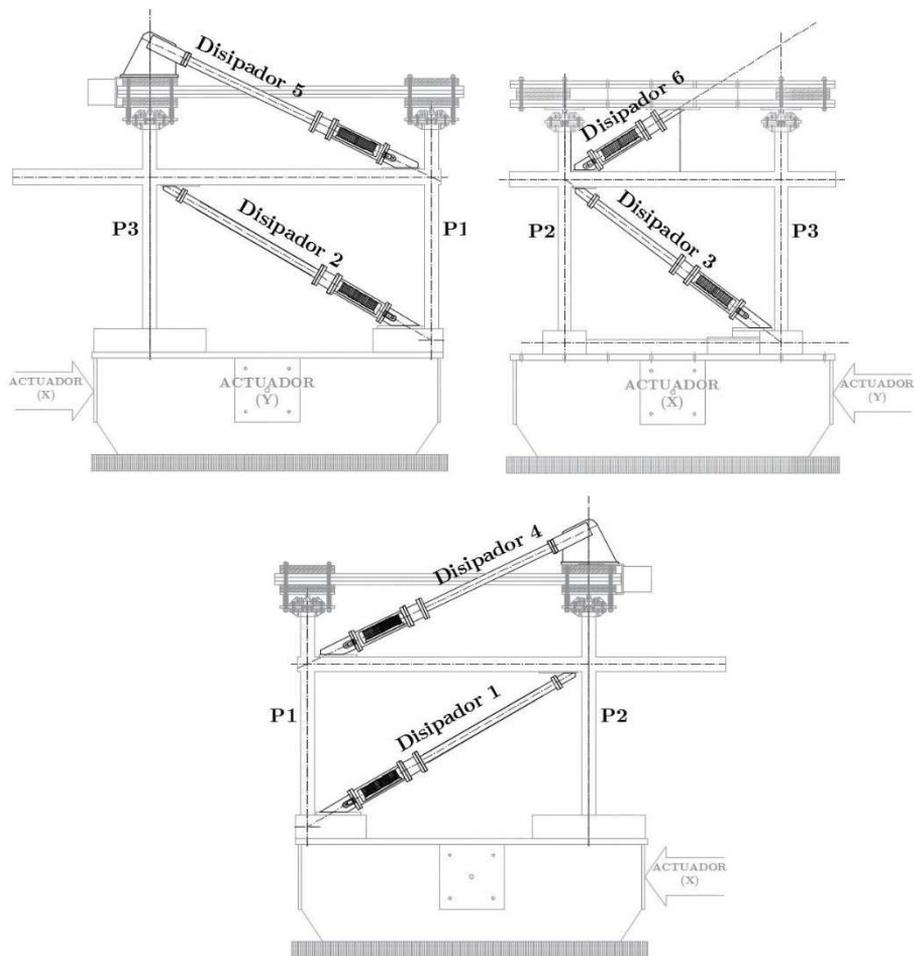


Figura 4.24. Disposición espacial de disipadores en la estructura principal.



Figura 4.25. Anclaje de disipadores a la estructura. Izq.: Disipador C1 anclado a la base de P1. Der.: Disipador C3 anclado al ábaco de P2.

Los disipadores fueron instrumentados durante los ensayos con transductores de desplazamiento tipo LVDT (véase Subapartado 4.1.2) para

medir el desplazamiento relativo entre los tubos exterior e interior. Así mismo, se han adherido galgas extensiométricas en cada cara de los brazos auxiliares para medir la deformación y obtener la tensión transmitida a los disipadores.

A parte del estudio del comportamiento de los disipadores, los ensayos sísmicos también tienen la finalidad de estudiar el efecto positivo que éstos tienen sobre la estructura principal, principalmente la reducción de daños producidos en ésta gracias a la limitación de desplazamientos horizontales. Por ello, también han sido instrumentados los aceros de refuerzo de la estructura con galgas extensiométricas, acelerómetros y con medidores de desplazamiento láser. En la Figura 4.26 se ilustra la configuración general del ensayo formada por la mesa sísmica, la estructura principal de hormigón armado y los disipadores TTD-NiTi instalados. Tanto el desarrollo del nuevo disipador TTD-NiTi, su caracterización o diseño, así como el estudio del comportamiento sísmico de las estructuras equipadas con este tipo de dispositivos esta fuera del ámbito de esta Tesis Doctoral. Esta Tesis se centra únicamente en la cuantificación del daño experimentado por los disipadores mediante UT.

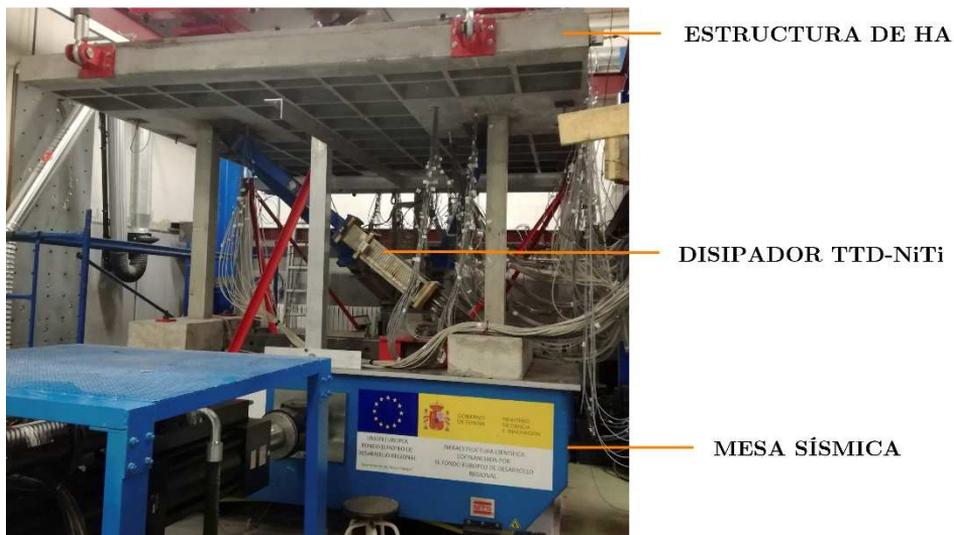


Figura 4.26. Configuración general del ensayo sísmico: Mesa sísmica de la Universidad de Granada, estructura principal de hormigón armado y disipadores TTD-NiTi instalados.

Historias de carga

Los ensayos sísmicos han consistido en reproducciones a diferentes escalas de las componentes norte-sur y este-oeste del terremoto que tuvo lugar en 1980 en Campano-Lucano (Italia), y que fueron registradas en la estación sísmica de Calitri.

Las simulaciones fueron reproducidas por la mesa sísmica de la Universidad de Granada, fabricada por la casa comercial MTS, que tiene unas dimensiones de 3,00x3,00 m² y una capacidad de carga vertical de 100 kN. La mesa está equipada con dos actuadores hidráulicos también de la marca MTS, modelo 244.40S, con capacidad de carga dinámica de hasta 242 kN. El actuador X, que actúa en la dirección norte-sur, y el actuador Y, en la dirección este-oeste (véase Figuras 4.24 y 4.26), desplazan la mesa sísmica lateralmente en direcciones perpendiculares y de forma simultánea.

Las simulaciones ejecutadas durante los ensayos sísmicos se escalaron respecto de la amplitud pico del terremoto original, dando lugar a la siguiente secuencia: C100%, C200%, C300%, C400%, C500% (5 veces), C600%, C700% y C800% (4 veces). De esta forma, el C200% es una simulación cuya aceleración pico es el doble que la del terremoto original. Todas las simulaciones tuvieron la misma duración, 53 s. La aceleración pico nominal de cada simulación se detalla a continuación en la Tabla 4.5.

	C100	C200	C300	C400	C500	C600	C700	C800
Aceleración de Pico (g)	0,16g	0,32g	0,48g	0,64g	0,8g	0,96g	1,12g	1,28g

Tabla 4.5. Aceleración máxima en las simulaciones de los ensayos sísmicos.

A modo de ejemplo, en la Figura 4.27 se representa el acelerograma de la componente norte-sur del terremoto Calitri con su magnitud original (100%), con una aceleración pico de 0,16g.

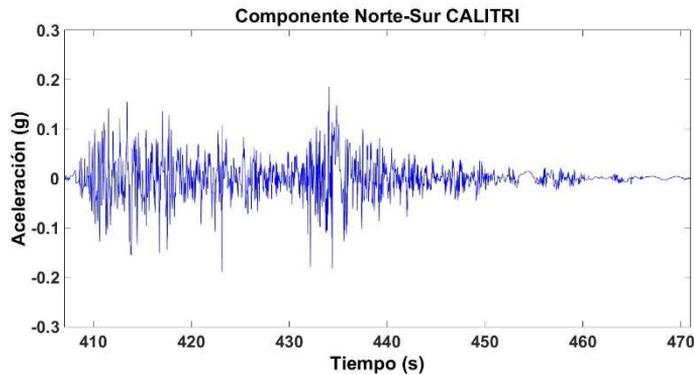


Figura 4.27. Acelerograma de la componente norte-sur del terremoto Campano-Lucano registrado en la estación sísmica de Calitri.

4.2.3. Inspección UT de los disipadores TTD-NiTi

El objetivo de la inspección de los disipadores con ultrasonidos es el de evaluar el daño que se ha ido acumulando en éstos a medida que iban sucediéndose las simulaciones. Por este motivo, se programaron inspecciones en los disipadores antes de empezar los ensayos sísmicos, en ausencia de daño, y después de cada simulación. Además, la inaccesibilidad de la cara interior del disipador hizo necesario recurrir a la técnica de pulso-eco.

Para la inspección, se seleccionaron los disipadores C1, C2 y C3 de la planta baja, donde la instalación de los disipadores es la habitual en aplicaciones reales, esto es, anclados de nudo a nudo. Igualmente, se inspeccionó el disipador C4 de la planta superior para llevar a cabo una comparativa entre disipadores de ambas plantas.

Como se dijo anteriormente, los disipadores TTD-NiTi fueron diseñados para concentrar el daño en los dos extremos de cada tira. Teniendo en cuenta que son 25 tiras en cada cara, y 4 caras por cada uno de los 4 disipadores, hacen un total de 800 puntos a inspeccionar después de cada simulación, lo cual resulta imposible de realizar, dado que, por motivos logísticos y de dinámica de ensayos, el tiempo entre las simulaciones es muy limitado, y la duración de la inspección ha de acotarse. Como alternativa, se optó por una inspección no exhaustiva de los disipadores, bajo dos suposiciones realistas:

- El deslizamiento del tubo exterior del disipador respecto del tubo interior es bastante uniforme en las cuatro caras, de manera que los tubos siguen compartiendo el mismo eje. La probabilidad de que esto sea cierto es muy alta, ya que el espacio entre los dos tubos es menos de 1 mm, sin posibilidad de desviación de los tubos de su eje. Así pues, se seleccionó la cara superior, más accesible para la inspección, excepto en el disipador C1 donde fueron inspeccionadas la cara superior y la cara lateral externa, a fin de comprobar que esta suposición se ajusta a la realidad.
- El daño producido en los dos extremos de todas las tiras de una misma cara es similar, puesto que la deformación es la misma. Es decir, el daño es igual de una tira a otra, y es igual en los dos extremos de cada tira.

Los puntos de inspección en los distintos disipadores fueron seleccionados a partir de cuatro posibles posiciones que se han establecido según el esquema de la Figura 4.28. Las cuatro posiciones corresponden a los extremos de dos tiras situadas justo entre las tiras de borde y la tira central.

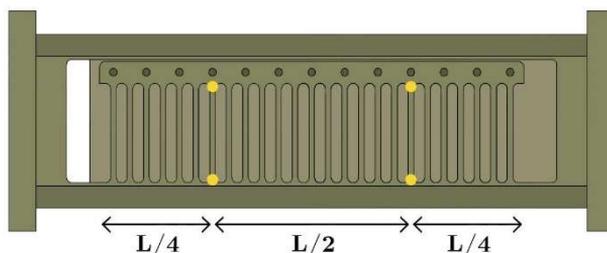


Figura 4.28. Posibles posiciones de inspección UT.

Es interesante que la elección del punto a inspeccionar se haga con cierta aleatoriedad, para que el punto seleccionado sea más representativo. Así, las cuatro posiciones se han fijado para cubrir las dos mitades del disipador y los dos extremos de cada tira, pero la asignación de cada punto a cada una de las caras a inspeccionar en la planta baja (2 en C1, y una en C2 y C3) ha sido totalmente aleatoria. Así mismo, la elección de una de las cuatro posiciones también ha sido aleatoria en el caso del disipador C4. En la Figura 4.29 se representan los puntos de inspección en los disipadores C1, C2, C3 y C4.

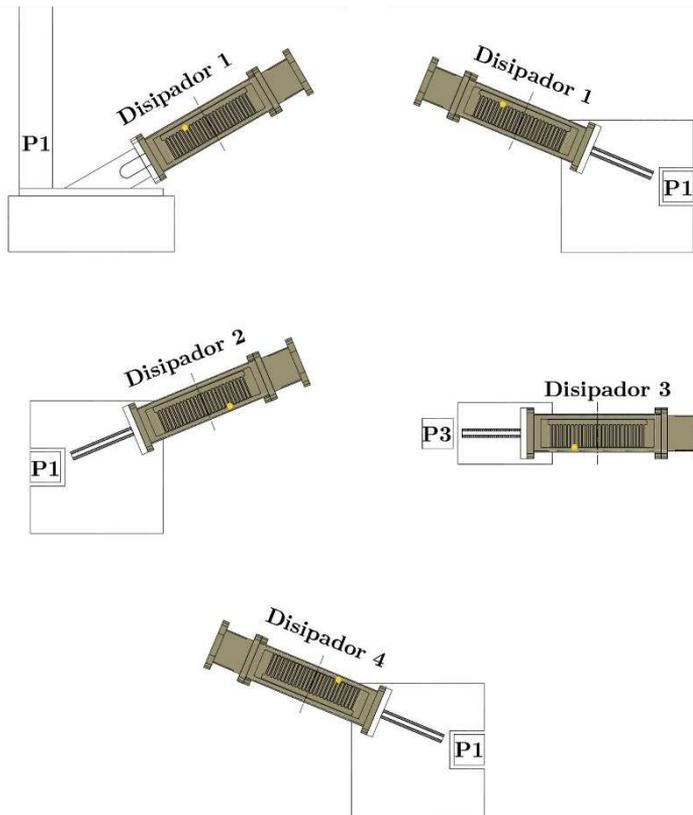


Figura 4.29. Puntos inspeccionados durante los ensayos sísmicos.

En la matriz de inspección de la Tabla 4.6, se especifican las caras de disipador inspeccionadas antes del ensayo y después de cada simulación sísmica. El disipador C4 se quedó sin inspeccionar en tres ocasiones, cuando no era estrictamente necesario hacerlo, debido a la especial dificultad que suponía acceder a él y tomar medidas.

Simulación	C1 (superior)	C1 (lateral)	C2 (superior)	C3 (superior)	C4 (superior)
<i>Previo</i>					
<i>Simulaciones</i>	X	X	X	X	X
C100	X	X	X	X	
C200	X	X	X	X	
C300	X	X	X	X	X
C400	X	X	X	X	X
C500_1	X	X	X	X	X
C500_2	X	X	X	X	X
C500_3	X	X	X	X	X
C500_4	X	X	X	X	
C500_5	X	X	X	X	X
C600	X	X	X	X	X
C700	X	X	X	X	X
C800_1	X	X	X	X	X
C800_2	X	X	X	X	X
C800_3	X	X	X	X	X
C800_4	X	X	X	X	X

Tabla 4.6. Matriz de inspecciones UT en los disipadores C1, C2, C3 y C4 antes y durante los ensayos sísmicos.

El procedimiento de inspección por pulso-eco es el mismo que se llevó a cabo tras los ensayos cíclicos (véase Subapartado 4.1.3), usando la misma configuración del sistema de medida en general, y del generador de pulsos en particular, al tratarse del mismo material y del mismo espesor (véase Tabla 4.4). No obstante, en este caso la inspección se realiza *in situ*, lejos de las condiciones favorables del laboratorio, lo cual implica organizar el proceso acorde a la disposición espacial de los disipadores dentro de la configuración general de los ensayos sísmicos, y también acorde a la planificación temporal de éstos. Así por ejemplo, la inspección se hizo con la ayuda de dos operarios trabajando de forma coordinada, en vez de uno solo: el primer operario desplazándose al disipador portando el generador de pulsos y el sensor para tomar las medidas, y el segundo operario trabajando con el osciloscopio para visualizar las señales y registrarlas.

5. RESULTADOS I: DISIPADORES

El presente capítulo expone los resultados del análisis de los datos recogidos en el trabajo experimental descrito en el Capítulo 4, relativo a los ensayos cíclicos y sísmicos de los disipadores histeréticos TTD-NiTi y su inspección mediante los métodos de UT y de MMM.

5.1. Índice de daño mecánico (ID)

El índice de daño mecánico (*Index of Damage*, ID) ha sido propuesto en investigaciones previas [4] y caracteriza el daño en función de dos parámetros: (i) la energía total disipada y (ii) la porción de energía consumida en la parte esqueleto de la respuesta carga-desplazamiento, también conocida como curva de histéresis. El modelo permite determinar el nivel de daño producido en elementos estructurales de acero cuando son sometidos a cargas arbitrarias como las inducidas por los terremotos, teniendo en cuenta la influencia de la historia de carga a la que se somete el elemento y que afecta significativamente su capacidad última de disipación de energía. $ID=0$ corresponde a un elemento sin daño e $ID\geq 1$ significa la rotura del elemento. Los detalles de cómo se calcula el índice ID se explican en la referencia [4]. Su aplicación a los resultados de los ensayos cíclicos realizados con los testigos T1-T10 del disipador TTD-NiTi se muestran en

la Tabla 5.1, donde se indican también los desplazamientos y número de ciclos aplicados.

Ensayo Cíclico de Amplitud Creciente					
Testigo	T1	T2	T3	T4	T5
Desplaz. Máximo	0,8	2,4	3,2	4,0	5,2
Nº de Ciclos	2	6	8	10	13
Nivel de Daño	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
Índice <i>ID</i>	0,016	0,166	0,352	0,646	1,034
Ensayo Cíclico de Amplitud Constante					
Testigo	T6	T7	T8	T9	T10
Desplaz. Máximo	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Nº de Ciclos	30	60	90	120	150
Nivel de Daño	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
Índice <i>ID</i>	0,34	0,64	0,85	0,99	1,00

Tabla 5.1. Valores del índice de daño *ID* para testigos T1-T10.

Cabe señalar que los testigos T5 y T10 han alcanzado el estado último ($ID=1$), y el testigo T9 estuvo muy cerca de alcanzar el estado último.

5.2. Índice de daño UT (ΔE)

Las señales que facilita el osciloscopio después de tomar la medida son pequeñas perturbaciones de voltaje en función del tiempo, pero resultan útiles en la medida en que puedan manejarse en forma de parámetros medibles, es decir, cuando están procesadas. El procesamiento de señales, si se realiza adecuadamente, supone una herramienta potente para extraer información acerca de la señal que se ha medido, e interpretar el significado de dicha información.

En este sentido, las señales de UT que se han medido durante la inspección por transmisión y por pulso-eco de los testigos T1-T10 fueron procesadas para poder analizar y medir la atenuación de la señal por deformación plástica. Adicionalmente, se llevó a cabo un pre-procesamiento de la señal que ha consistido básicamente en dos pasos:

- Detección del tiempo de llegada de la señal recibida. Se establece un umbral de 700 mV para detectar el inicio de la señal de sincronización, que es una señal emitida por el generador de pulsos y cuyo inicio coincide con el inicio de la señal generada, t_0 . Una vez marcado el inicio de la señal generada, y dado que se conoce el recorrido de la señal, se puede calcular el inicio de la señal recibida, sabiendo que la velocidad de la onda P en el acero inoxidable es aproximadamente de 5600 m/s. Así, el tiempo de inicio obtenido para la técnica de transmisión es $t_r \approx 0,72 \mu\text{s}$ (4 mm de recorrido), y en el caso de la técnica pulso-eco (8 mm de recorrido) es $t_e \approx 1,44 \mu\text{s}$. Si bien, se puede apreciar en las Figuras 5.1.a y 5.2.a que existe una pequeña diferencia con la llegada real de la señal recibida, que es de $t_r \approx 0,8 \mu\text{s}$ y $t_e \approx 1,5 \mu\text{s}$. Esta diferencia puede deberse a pequeños factores como la atenuación de la onda en la grasa de silicona usada como acoplante, o a la velocidad real de la onda P en el material, la cual puede ser ligeramente diferente a la considerada.

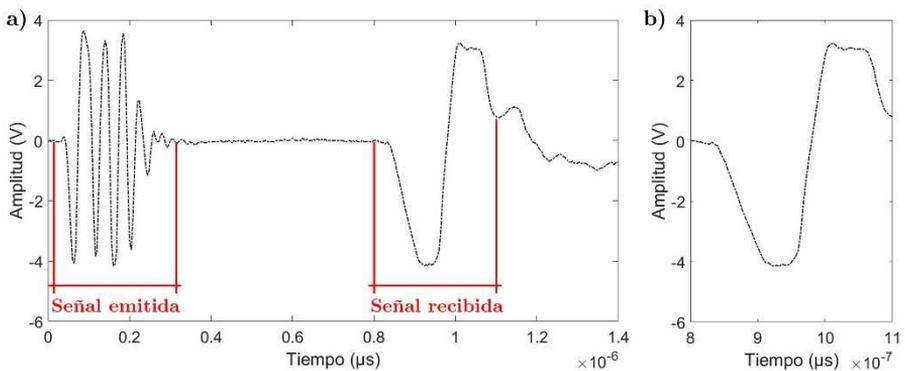


Figura 5.1. a) Señal de UT, medida por transmisión en el testigo T1. b) Primera ondulación de la señal recibida.

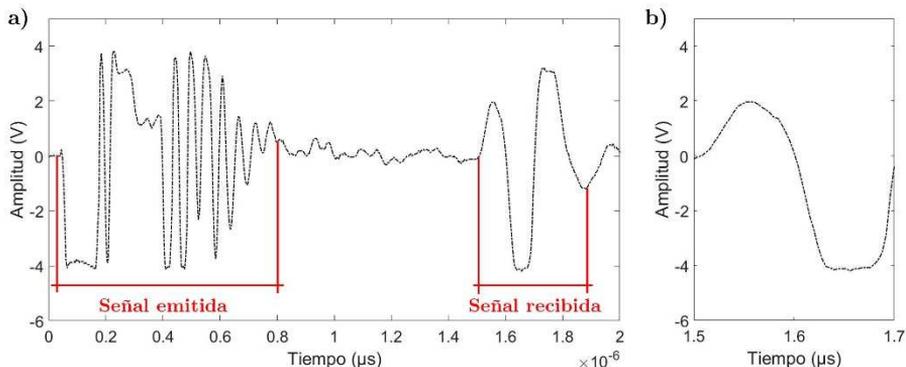


Figura 5.2. a) Señal de UT, medida por pulso-eco en el testigo T1. b) Primera ondulación de la señal recibida.

- Extracción de la primera ondulación. Se trata de extraer de la señal de UT la primera ondulación de la señal recibida, a la que se ha llamado **onda principal (OP)**, y que se considera libre de efectos secundarios de la propagación como las reflexiones, el *scattering* o la difracción. Para las señales de la técnica de transmisión, se ha trabajado con el intervalo 0,8-1,1 μs , y para la técnica de pulso-eco, con el intervalo 1,5-1,7 μs , como se puede ver en las Figuras 5.1.b y 5.2.b, respectivamente. Es preciso aclarar que la polaridad de la OP en la técnica de transmisión es igual a la de la señal generada (véase Apartado 4.1.3). Sin embargo, en la técnica de pulso-eco, la polaridad de la señal generada se invierte, debido a la conversión de modos que se produce en la señal al reflejarse en la pared opuesta.

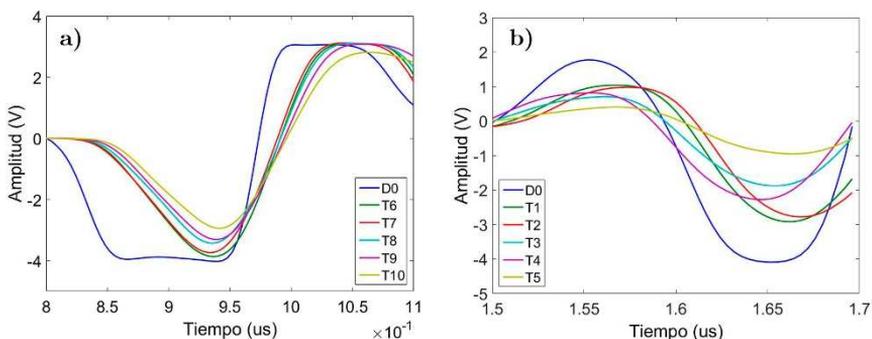


Figura 5.3. OPs extraídas de la inspección de UT: a) Transmisión en punto 2, testigos T6-T10. b) Pulso-eco en punto 3, testigos T1-T5.

En la Figura 5.3 se muestran las ondas principales extraídas de las medidas tomadas por transmisión en el punto 2 de los testigos T6-T10, y por pulsoeco en el punto 3 en los testigos T1-T5, y donde la curva D_0 hace referencia a la medida tomada antes de los ensayos cíclicos. Se observa como la amplitud de la onda, de pico a pico, decrece a lo largo de los 5 testigos, ordenados de menor daño (T6/T1) a mayor daño (T10/T5), según la historia de carga aplicada en cada uno de ellos.

5.2.1. Procesamiento de señales UT

Tal como se expuso en el Capítulo 4, durante la inspección de UT, la onda que atraviesa el material es recibida por un transductor que la transforma de onda mecánica a señal eléctrica. Esta señal eléctrica es una función continua en el tiempo en la que a cada instante le corresponde un valor real de voltaje. Al llegar al osciloscopio, éste la convierte en una señal digital, resultado de tomar valores de la señal eléctrica en determinados instantes (muestreo) y aproximarlos a valores finitos dentro del dominio (cuantización), para finalmente transformarlos en sucesiones de ceros y unos (codificación). Estas tres etapas conforman el proceso de la conversión analógico-digital (*analog-to-digital converter*, ADC).

El **muestreo** sirve para determinar los instantes en los cuales tomar valores de amplitud de la señal eléctrica (voltaje). Estos valores o muestras, usualmente, se toman de forma periódica, es decir, se fija un periodo temporal constante entre muestras, siendo la frecuencia muestral el número total de valores tomados durante un segundo. Para la inspección de UT en los testigos TTD-NiTi, la frecuencia de muestreo configurada en el osciloscopio fue de 250 MHz (véase Tabla 4.3), que supone la recogida de 250 millones de datos durante un segundo, o lo que es lo mismo, se recoge un valor cada 4 nanosegundos (10^{-9} s). La **cuantización** de la señal es la discretización de los valores de amplitud de la señal. Consiste en dividir el dominio de la amplitud en un número finito de niveles y asignar cada uno de los valores tomados de la señal eléctrica, por aproximación, a uno de estos niveles. La etapa final es la **codificación** de la señal, que simplemente

traduce los valores ponderados durante la cuantización a un tren de impulsos binarios de ceros y unos, con la ayuda de un código (códec). De ésta forma, se obtiene una señal digital más fácil de procesar al quedar reducida a un sistema binario con muchos menos datos. Sin embargo, la optimización de datos no significa la pérdida de información sobre la señal, siempre que el proceso de conversión se haga siguiendo unas reglas determinadas. Por ejemplo, el teorema de Nyquist establece que la frecuencia muestral mínima debe ser el doble de la frecuencia máxima contenida en la señal analógica, para que ésta pueda describirse completamente a partir de la serie total de muestras que resulten del muestreo.

Una vez se tiene la señal digital, existen diferentes herramientas matemáticas orientadas al procesado de señales digitales para trabajar con su información. La aplicación de la transformada de Fourier para descomponer la señal en ondas de diferentes frecuencias es, quizás, de los procesados más comúnmente realizados, ya que permite conocer el contenido en frecuencias, también llamado espectro de la señal. En el caso de las señales digitales, se utiliza una variante de la anterior, llamada transformada discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform*, DFT), que aproxima la transformada de Fourier en señales discretas:

$$X(k) = \sum_{n=1}^N x(n) \cdot e^{-\frac{j2\pi(k-1)(n-1)}{N}}; \quad (5.1)$$

siendo N el número total de muestras del vector de la señal discreta x , y donde $1 \leq n \leq N$ y $1 \leq k \leq N$.

El cálculo directo de la DFT implica una gran carga computacional debido a numerosas y complejas multiplicaciones, mientras que el cálculo indirecto mediante algoritmos, como por ejemplo la transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT), resulta mucho más eficiente y práctico. El algoritmo FFT se basa en la subdivisión de un gran problema computacional en un gran número de sub-problemas que pueden resolverse más fácilmente [69], y así, se puede pasar de un problema que requiere N^2 operaciones aritméticas, a un problema que requiere $N \cdot \log_2(N)$ operaciones.

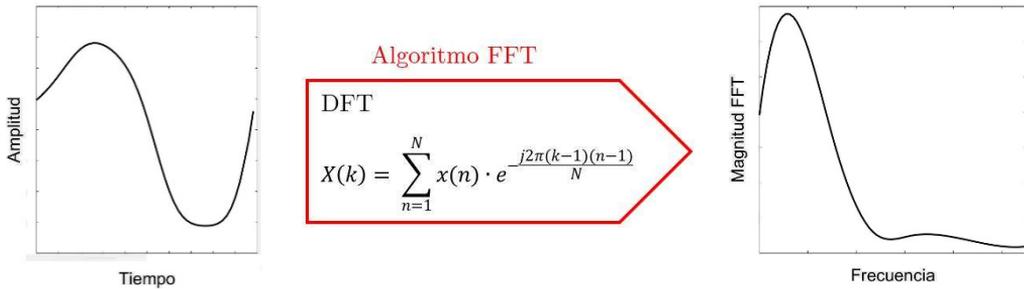


Figura 5.4. Obtención del espectro de frecuencias de una señal de UT mediante la DFT, calculada con el algoritmo FFT.

Por lo tanto, aplicando el algoritmo FFT a las ondas principales que se han extraído de la inspección de UT, se puede averiguar su contenido en frecuencias y la amplitud asociada a cada frecuencia (magnitud FFT), lo que se conoce como la distribución de energía en el dominio de las frecuencias. El análisis de dicha distribución resulta muy valioso dada la sensibilidad que la energía muestra al producirse efectos no lineales en el material cuando su comportamiento entra en el rango inelástico [43]. Concretamente, para el caso del acero inoxidable austenítico, material del que están hechos los disipadores TTD-NiTi, se ha demostrado que el porcentaje de martensita formada en el material depende del nivel de deformación plástica alcanzado [70], y que la transformación de austenita a martensita provoca una atenuación en la señal [71], principalmente por el *scattering* que se produce cuando la señal atraviesa las agujas de martensita formadas en el material.

En la Figura 5.5 se presentan los espectros de frecuencia de las ondas principales extraídas de la inspección de UT en los testigos T1-T10 de los ensayos cíclicos, donde se puede ver que la amplitud de la respuesta en el pulso-eco es más baja que en la transmisión, como es lógico, y también se aprecia mucho más la atenuación gradual desde las señales de los testigos con menor daño a las de testigos con mayor daño.

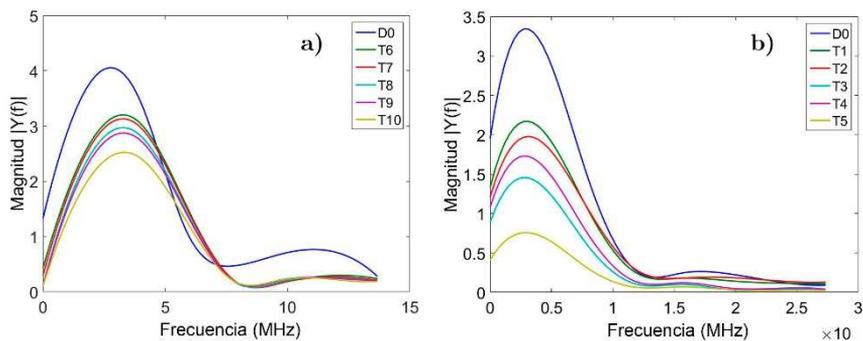


Figura 5.5. Espectro de frecuencias de OPs extraídas: a) Transmisión en punto 2, testigos T6-T10. b) Pulso-eco en punto 3, testigos T1-T5.

En cuanto a la distribución de energía, las frecuencias predominantes se concentran en el intervalo 0-7 MHz con la técnica de transmisión, y en el intervalo 0-11 MHz con el pulso-eco. El área bajo la curva de distribución de energía en esos intervalos se ha tomado como parámetro E_S , y se ha calculado en cada uno de los 4 puntos (véase Figura 4.15) de los 10 testigos. De cada punto se ha sacado la media y la desviación típica de las tres repeticiones, como se puede observar en la Figura 5.6, relativa a los cuatro puntos de los testigos T6-T10 inspeccionados por transmisión. La dispersión entre las tres repeticiones es más pequeña que la atenuación existente entre testigos sometidos a diferentes niveles de daño, lo cual indica un alto grado de fiabilidad del parámetro E_S para la medición de la atenuación.

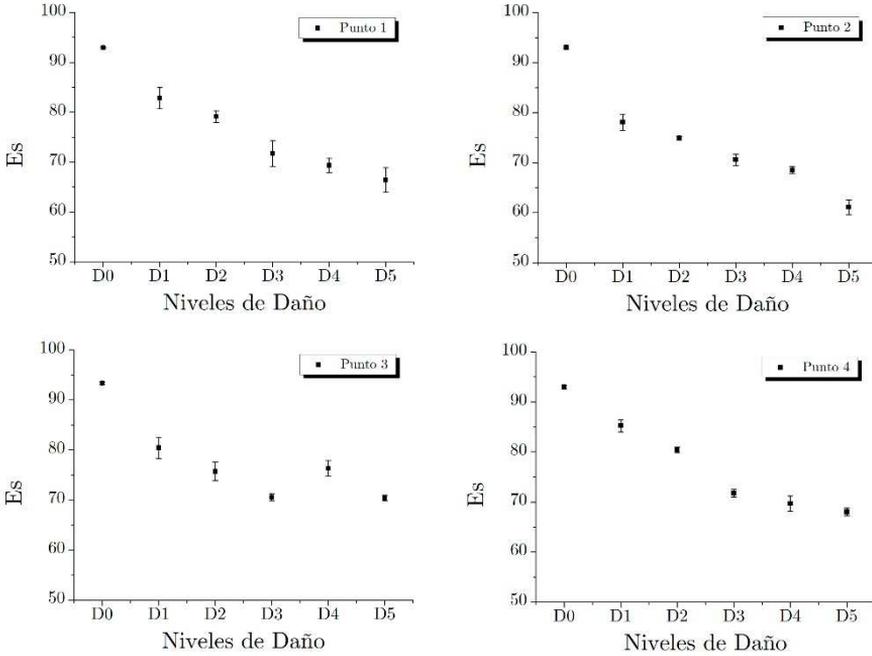


Figura 5.6. Media y desviación típica de E_s de las 3 repeticiones, por punto. Testigos T6-T10 inspeccionados por transmisión.

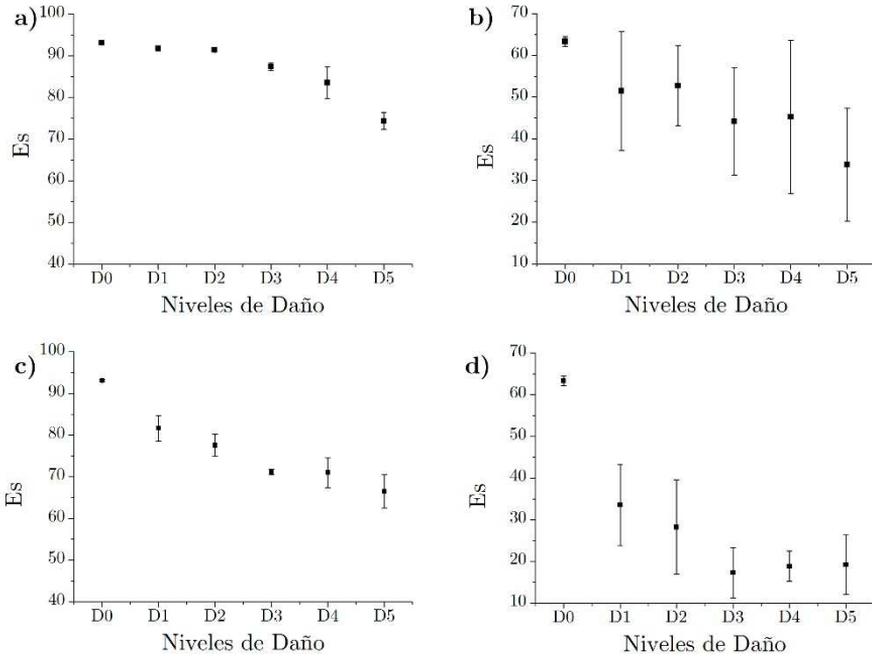


Figura 5.7. Media y desviación típica de E_s de los 4 puntos, por testigo. a) T1-T5, transmisión; b) T1-T5, pulso-eco; c) T6-T10, transmisión; y d) T6-T10, pulso-eco.

A partir de las medias en cada punto, se ha obtenido la media y desviación típica en los cuatro puntos para cada testigo. En la Figura 5.7 se representan las gráficas relativas a los testigos T1-T10 inspeccionados por transmisión y por pulso-eco. Se puede comprobar que la media del valor E_s tiene una tendencia descendente a medida que aumenta el nivel de daño, lo cual concuerda con investigaciones previas sobre la atenuación de ondas de UT cuando se produce una deformación plástica en el material. También se puede ver cómo en el caso de las medidas con pulso-eco, la dispersión entre las medidas de los distintos puntos es importante. Esto se debe a pequeñas deformaciones de la placa fuera de su plano, producidas por ligeras desviaciones en el eje de los tubos utilizados para los ensayos cíclicos. La técnica de pulso-eco, por su configuración, precisa de dos caras totalmente planas y paralelas, ya que si el eco no sigue el mismo trayecto que el pulso, el transductor no recibe toda la respuesta. Por lo tanto, el porcentaje de respuesta recibido por el transductor en un punto es variable, y depende de la curvatura que tiene la placa en dicho punto (Figura 5.8), incluso cuando la curvatura es mínima.

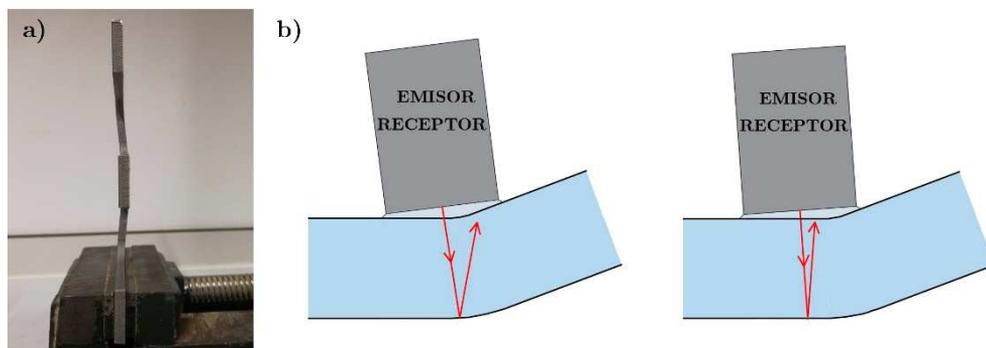


Figura 5.8. a) Testigo T7 con deformación fuera de plano y b) Distintos ángulos de reflexión del eco dependiendo de posición de curvatura.

Índice ΔE obtenido en los ensayos cíclicos

En esta Tesis se propone un índice de daño, ΔE , que se fundamenta en la pérdida de energía espectral (atenuación) entre la señal medida en un espécimen sin daño (D_0 , $E_{S,o}$) y la señal medida en un espécimen dañado a un nivel determinado (D_i , $E_{S,i}$):

$$\Delta E_i = E_{S,o} - E_{S,i}; \quad (5.2)$$

El índice ΔE , por su definición, simplemente expresa la tasa de atenuación de la energía en la misma magnitud que el parámetro E_S pero en sentido creciente, tomando como valor de referencia la energía en las medidas de testigos sin daño.

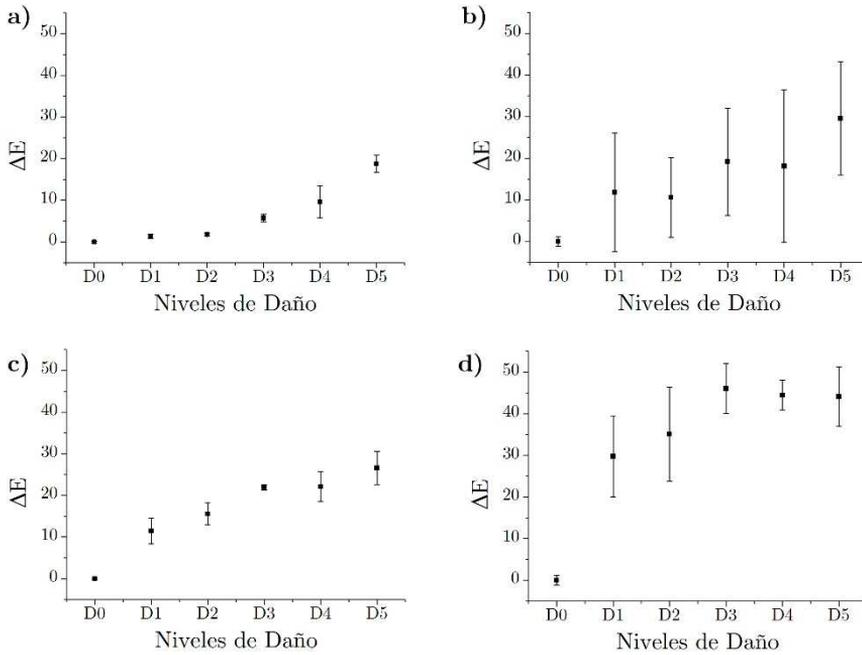


Figura 5.9. Media y desviación típica de ΔE de los 4 puntos, por testigo. a) T1-T5, transmisión; b) T1-T5, pulso-eco; c) T6-T10, transmisión; y d) T6-T10, pulso-eco.

En la Figura 5.9 se representa el índice ΔE de los diez testigos para las dos técnicas de inspección de UT utilizados. Si se analiza numéricamente la atenuación producida en el testigo T5, correspondiente al nivel de daño D5, se observan unos valores de $\Delta E_{T5,transmisión}=19$ y $\Delta E_{T5,pulso-eco}=30$; y de forma análoga, en el testigo T10, se obtienen valores de $\Delta E_{T10,transmisión}=27$ y $\Delta E_{T10,pulso-eco}=44$. Esto significa que la atenuación en la técnica de pulso-eco se incrementa en un 60% más respecto de la atenuación producida en la técnica de transmisión (T5, 58%; T10, 63%). Este hecho resulta coherente dado que la onda en la técnica de pulso-eco recorre dos veces el espesor.

Índice ΔE obtenido en los ensayos sísmicos

Por su parte, las señales tomadas en las inspecciones de los disipadores TTD-NiTi durante los ensayos sísmicos fueron también sometidas al mismo procesado. En las Figuras 5.10-14 se pueden ver las medias y desviaciones típicas del índice ΔE en las tres repeticiones, tomadas antes de comenzar las simulaciones (C0) y después de cada simulación. En líneas generales, se ve que la tendencia del índice ΔE es creciente a medida que se van sucediendo las distintas simulaciones sísmicas que, lógicamente, van acumulando el daño en los disipadores. Focalizando en las últimas simulaciones, el índice alcanza valores cercanos a 25. Si bien, en el caso del disipador C4 el índice se queda por debajo de 20, debido a que los disipadores de la planta superior, de acuerdo a lo pronosticado, se han dañado menos.

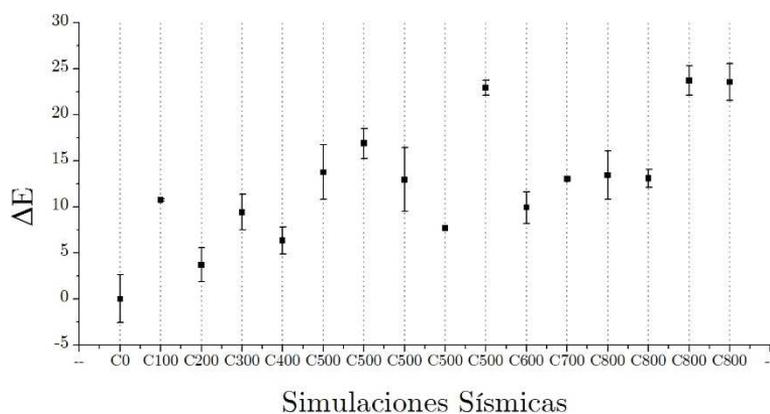


Figura 5.10. Media y desviación típica de ΔE . Disipador C1, cara superior.

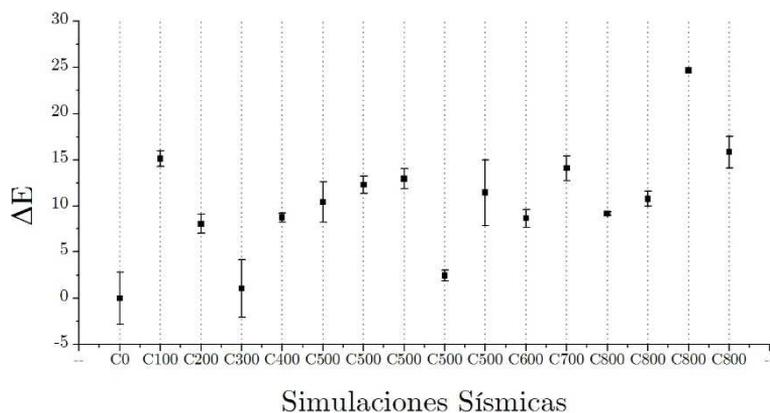


Figura 5.11. Media y desviación típica de ΔE . Disipador C1, cara lateral.

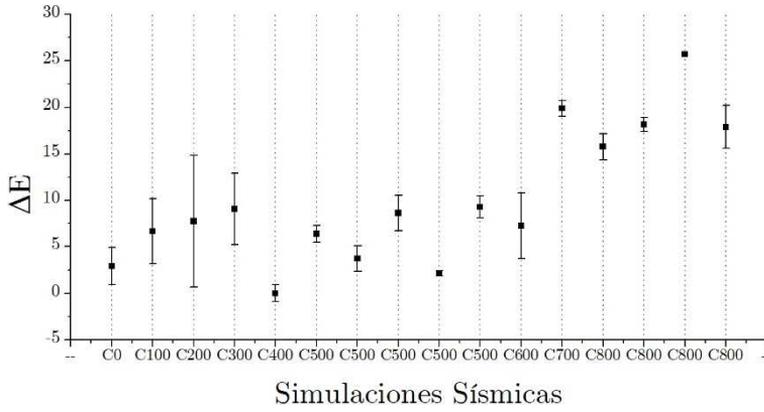


Figura 5.12. Media y desviación típica de ΔE . Disipador C2, cara superior.

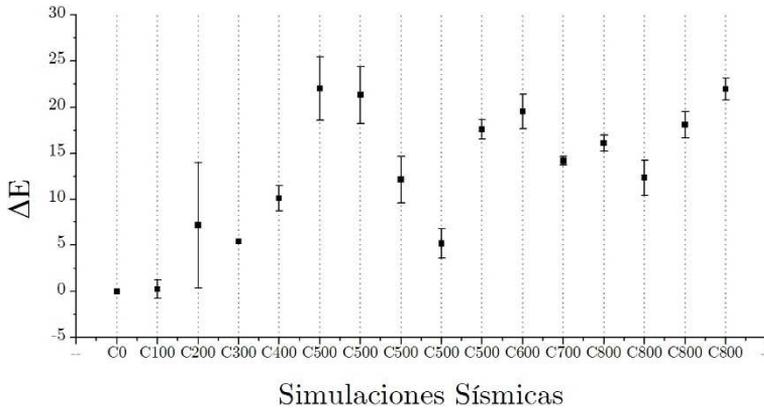


Figura 5.13. Media y desviación típica de ΔE . Disipador C3, cara superior.

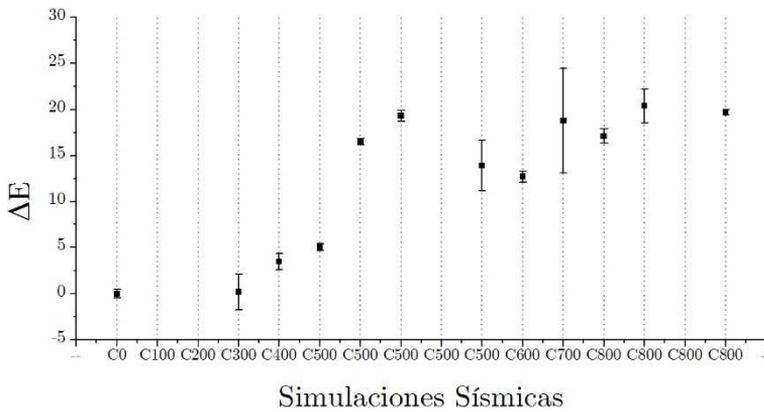


Figura 5.14. Media y desviación típica de ΔE . Disipador C4, cara superior.

5.2.2. Análisis de ruido

Resulta inevitable que una señal se encuentre afectada por una o varias perturbaciones de distinto origen, como puede ser el ruido electromagnético, de carácter impredecible, ligado a los picos de tensión en el suministro eléctrico, el ruido térmico, debido al movimiento aleatorio de los electrones por oscilaciones térmicas del medio, o el ruido de cuantización, resultado de escalonar los valores de la señal para adaptarlos a unos niveles determinados.

De esta forma, la información contenida en la señal podría verse alterada, sobre todo cuando el espectro del ruido coincide con el ancho de banda de la señal original. Por este motivo se precisa comprobar el grado de alteración que el ruido puede ocasionar en la información de las señales de UT tomadas en los testigos y disipadores TTD-NiTi, a fin de examinar la robustez del índice frente a eventuales perturbaciones.

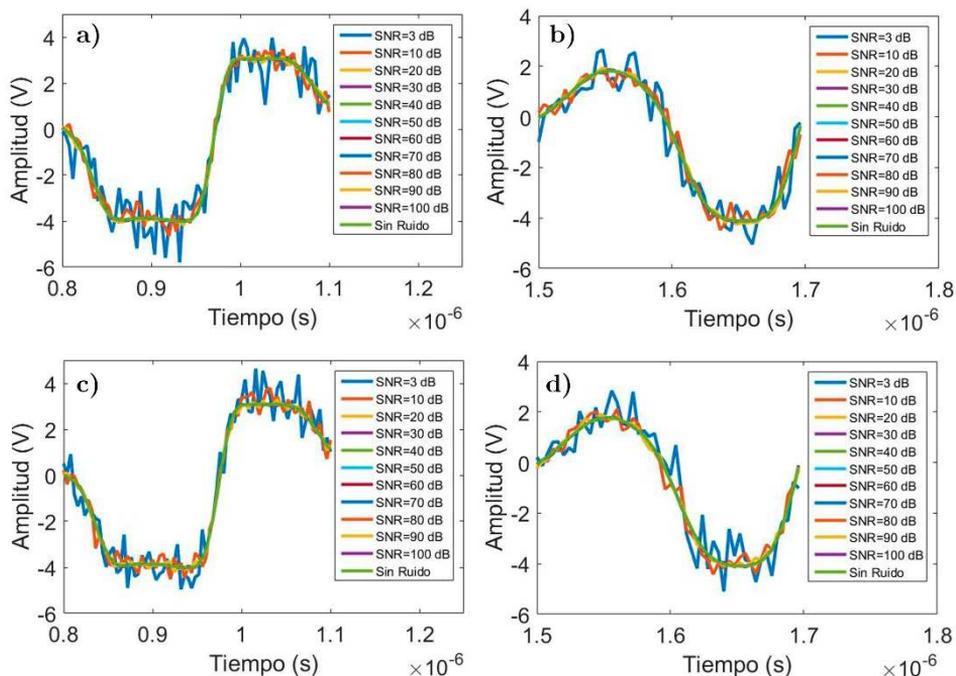


Figura 5.15. OP afectada por varios niveles de ruido blanco gaussiano junto a la OP original. a) T1-T5, transmisión; b) T1-T5, pulso-eco; c) T6-T10, transmisión; y d) T6-T10, pulso-eco.

El análisis ha consistido en afectar las ondas principales extraídas añadiéndoles diferentes niveles de ruido blanco gaussiano aleatorio, referido al nivel de la señal original mediante la relación señal/ruido (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR), tomando valores SNR de 3, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 dB.

$$SNR = 20 \cdot \log \frac{V_{Señal}}{RMS_{Ruido}}; \quad (5.3)$$

siendo $V_{Señal}$ el voltaje de la onda principal y RMS_{Ruido} el valor cuadrático medio del ruido blanco, es decir, su nivel promedio en el tiempo. En la Figura 5.15 se ilustran las ondas principales en el dominio temporal, notablemente afectadas por el ruido cuando el valor SNR es de 3 o 10 dB. Sin embargo, se debe analizar cómo afecta el ruido a la distribución de energía, concretamente, en el intervalo de frecuencias predominantes (0-7 MHz, transmisión; 0-11 MHz; pulso-eco), debido a que es la información clave para la obtención del índice ΔE .

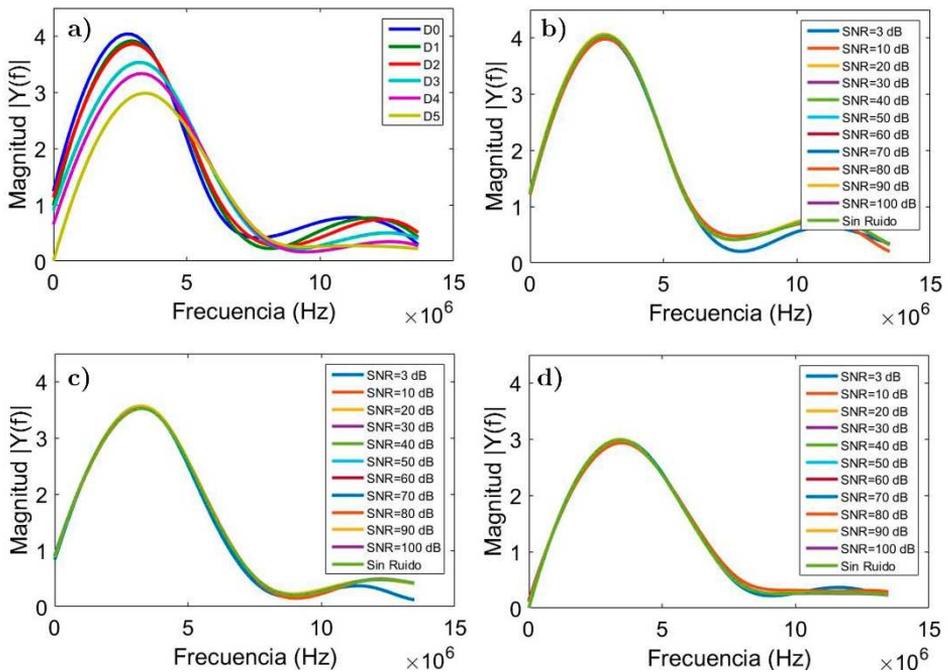


Figura 5.16. Espectro de OPs en T1-T5 inspeccionados por transmisión. a) OPs originales D₀-D₅ y OPs afectadas por ruido en b) D₀ c) D₂ y d) D₅.

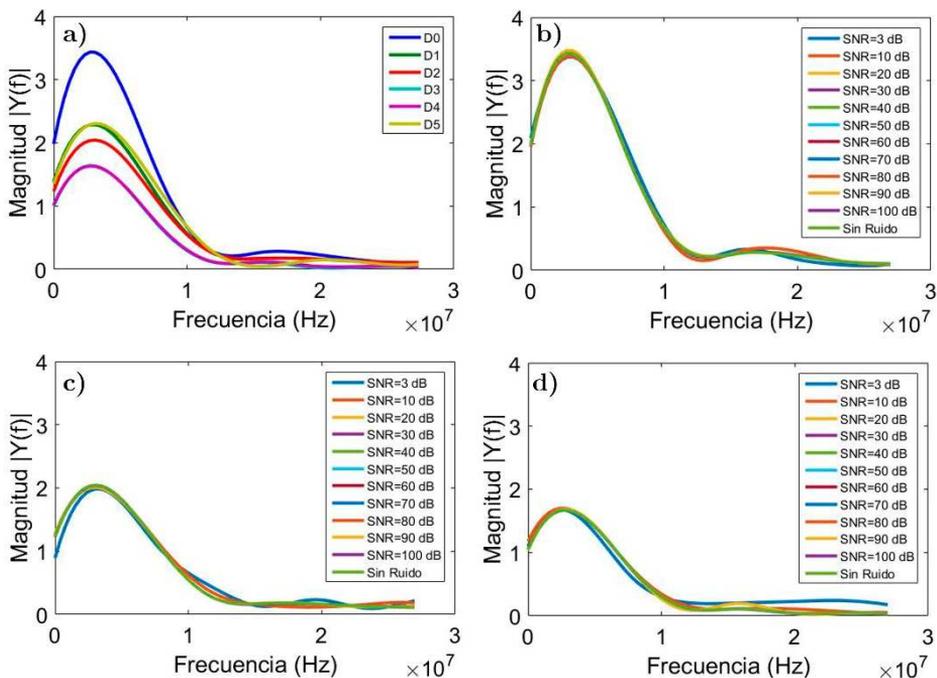


Figura 5.17. Espectro de OPs en T1-T5 inspeccionados por pulso-eco. a) OPs originales D₀-D₅ y OPs afectadas por ruido en b) D₀ c) D₂ y d) D₄.

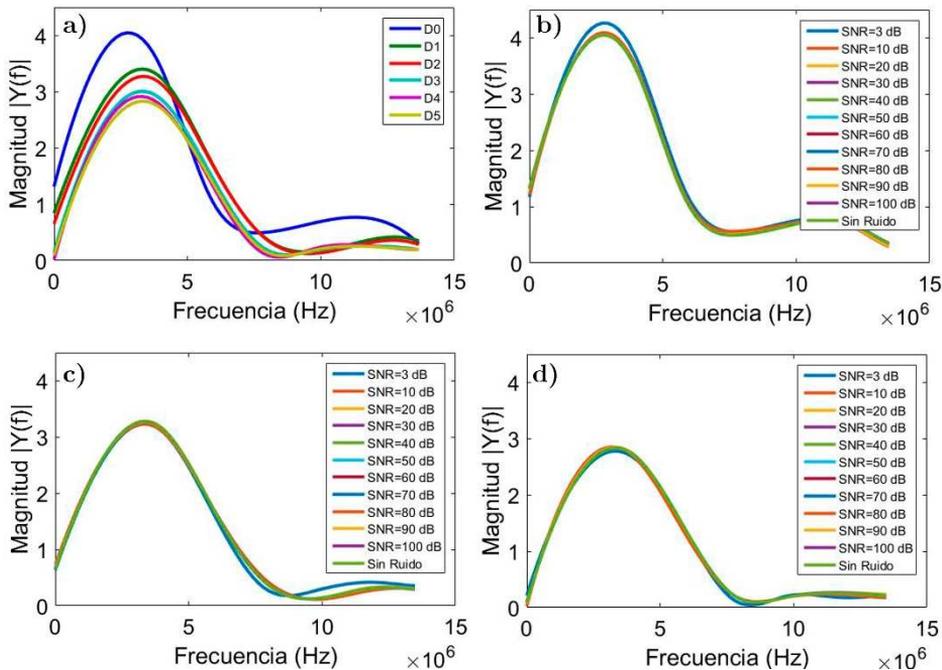


Figura 5.18. Espectro de OPs en T6-T10 inspeccionados por transmisión. a) OPs originales D₀-D₅ y OPs afectadas por ruido en b) D₀ c) D₂ y d) D₅.

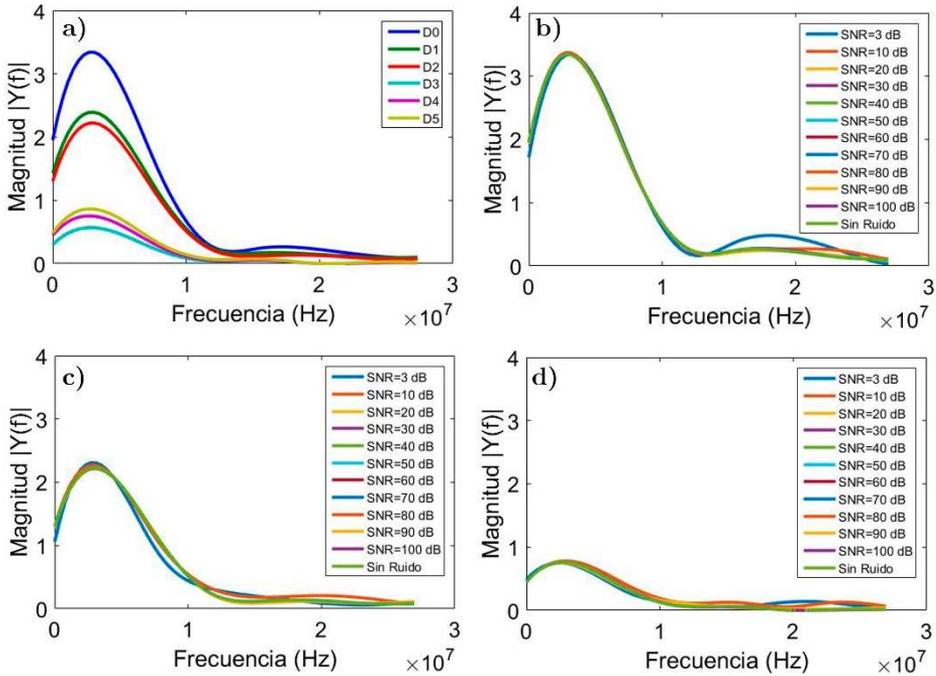


Figura 5.19. Espectro de OPs en T6-T10 inspeccionados por pulso-eco. a) Ops originales D₀-D₅ y Ops afectadas por ruido en b) D₀ c) D₂ y d) D₄.

En las Figuras 5.16-19 se muestran los espectros de las ondas principales sin ruido para los 6 niveles de daño D₀-D₅, así como los casos con ruido añadido para tres niveles: Sin daño (D₀), nivel intermedio (D₂) y daño máximo (D₄/D₅). Se constata que la variación de la distribución de energía en las frecuencias dominantes al introducir el ruido es despreciable frente a la atenuación de la energía entre diferentes niveles de daño por la deformación plástica. Este hecho demuestra que el parámetro de la energía espectral E_s es bastante estable y su variación no está afectada por la presencia de ruido.

5.3. Índice de daño MMM (E_M)

De la inspección de MMM llevada a cabo en los testigos T1-T5, gracias al programa informático *MMM System 3.0*, se han extraído cuatro curvas por cada medida:

- La distribución de intensidad de la fuga del campo magnético propio (SMLF) en componente X, $H_{L,X}$.
- La distribución de intensidad de la SMLF en componente Y, $H_{L,Y}$.
- Gradiente de la componente X de intensidad en la dirección X, $dH_{L,X}/dx$.
- Gradiente de la componente Y de intensidad en la dirección X, $dH_{L,Y}/dx$.

En la Figura 5.20 se representa el magnetograma de las medidas correspondientes a las trayectorias verticales V1 y V2 (véase Figura 4.20), con la distribución de la intensidad en la parte inferior y el gradiente en la parte superior. Cuatro curvas de V1, líneas azul ($H_{L,X}$, $dH_{L,X}/dx$) y rojo ($H_{L,Y}$, $dH_{L,Y}/dx$), y cuatro de V2, líneas verde ($H_{L,X}$, $dH_{L,X}/dx$) y azul oscuro ($H_{L,Y}$, $dH_{L,Y}/dx$). En las cuatro uniones tira-ala, que son las zonas dañadas, se produce una perturbación en la distribución de la intensidad de la SMLF, dando lugar a valores elevados en el gradiente.

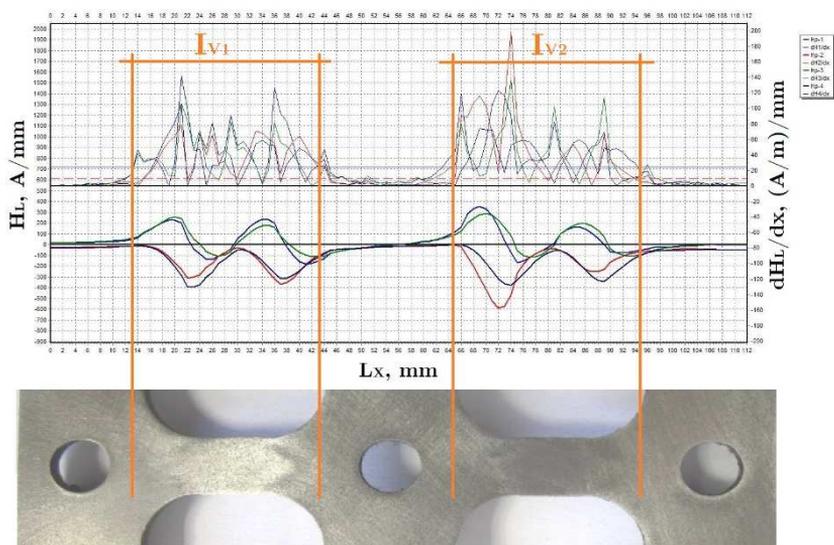


Figura 5.20. Magnetograma de las trayectorias V1 y V2 en el testigo T3.

De forma análoga, la Figura 5.21 representa el magnetograma de las trayectorias horizontales H1 y H2 (véase Figura 4.20), donde también

queda claro que la distribución de la intensidad y el gradiente detectan los daños producidos en la unión tira-ala situada a la mitad del trayecto.

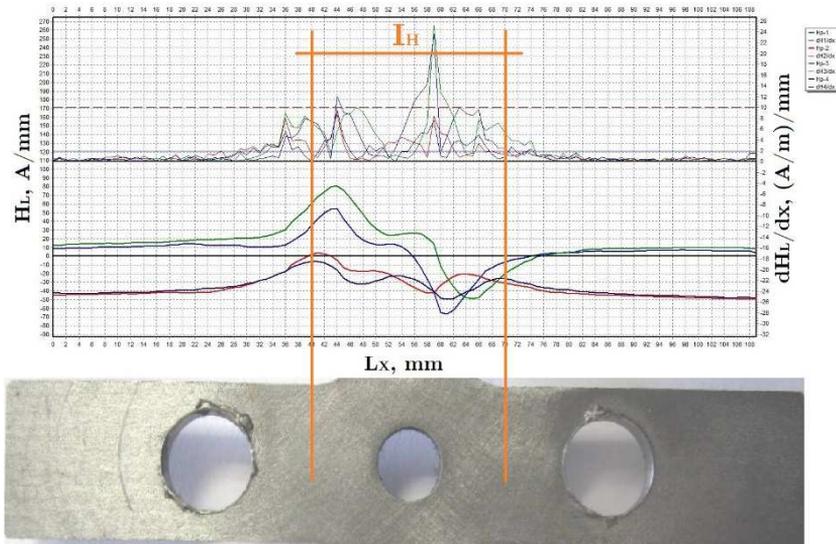


Figura 5.21. Magnetograma de las trayectorias H1 y H2 en el testigo T5.

5.3.1. Gradiente magnético dH_L/dx

Si se analiza el gradiente de la SMLF, se puede comprobar que su distribución a lo largo de la trayectoria no sólo ayuda a localizar el daño o las zonas de concentración de tensiones, sino que también puede ser útil para determinar la cantidad de daño producido, o dicho de otro modo, expresar la severidad del daño. Los magnetogramas de la Figura 5.22 corresponden a las medidas tomadas en las trayectorias horizontales H1 y H2 en testigos TTD-NiTi con distintos niveles de daño, y se puede apreciar claramente cómo la distribución del gradiente va aumentando conforme el nivel de daño en el testigo es mayor. En el testigo T1 (nivel de daño D_1), el nivel del gradiente es, en general, bajo y uniforme. En los testigos T2 (D_2) y T4 (D_4), la distribución del gradiente ya se concentra en el centro, en la unión tira-ala, y el pico máximo alcanza valores de 5 y 10 (A/m)/mm, respectivamente. Para el testigo T5 (D_5), la concentración de la distribución del gradiente en el centro se acentúa y se alcanza un valor máximo de 31 (A/m)/mm.

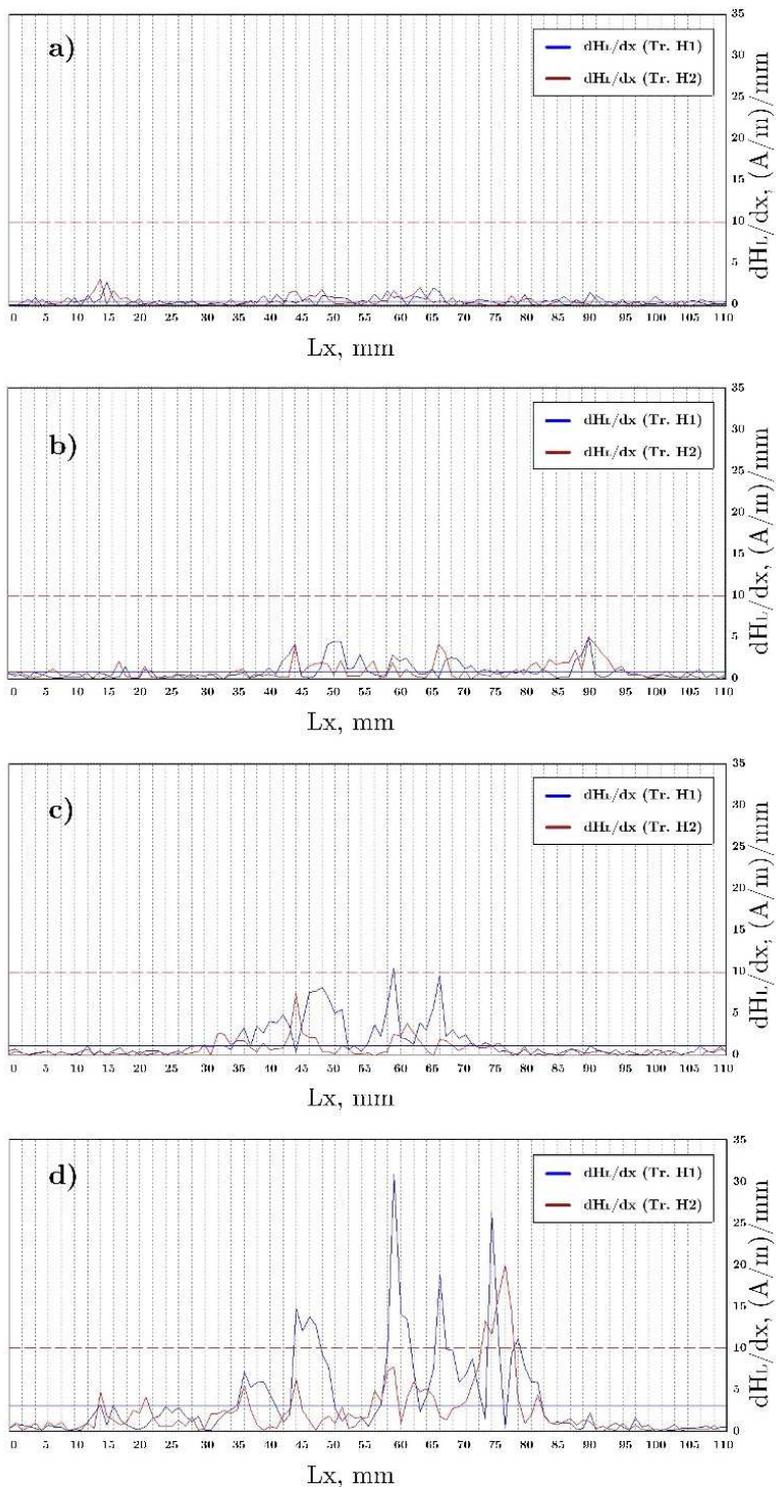


Figura 5.22. Magnetogramas de las trayectorias H1 y H2 en los testigos a) T1, b) T2, c) T4 y d) T5.

Por lo tanto, el área bajo la distribución del gradiente de la SMLF, E_{dHL} , puede ser un buen parámetro para cuantificar el daño. El parámetro E_{dHL} se ha calculado para intervalos de $I_{V1} = [20-50]$ mm y $I_{V2} = [70-100]$ mm en las trayectorias verticales, e $I_H = [45-75]$ mm en las trayectorias horizontales, tal como se muestra en las Figuras 5.20 y 5.21.

En este sentido, el presente trabajo propone un índice E_M , definido como la diferencia entre el parámetro E_{dHL} medido en un espécimen dañado a un nivel de daño determinado ($D_i, E_{dHL,i}$) y el medido en un espécimen sin daño ($D_0, E_{dHL,o}$).

$$E_{M,i} = E_{dHL,i} - E_{dHL,o}; \quad (5.4)$$

Índice E_M obtenido en los ensayos cíclicos

El índice E_M se ha calculado para los testigos TTD-NiTi T1-T5, observándose en líneas generales una tendencia creciente a lo largo de los distintos niveles de daño que presentan los cinco testigos, a excepción del índice obtenido en las trayectorias V1 y V2 del testigo T3, cuyo valor es cercano al del testigo T5 (Figura 5.23). En las trayectorias verticales, la tendencia es lineal, con una tasa de crecimiento del índice relativamente constante; en cambio, en las trayectorias horizontales, la tendencia es más bien exponencial. Por otra parte, cabe señalar que el método de MMM ha resultado ser muy estable teniendo en cuenta que la dispersión entre las 3 repeticiones es mínima.

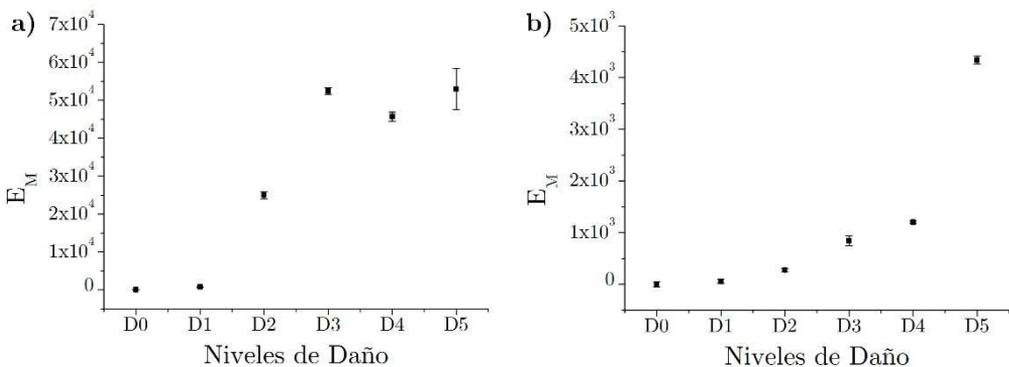


Figura 5.23. Media y desviación típica del índice E_M en los testigos T1-T5. a) Trayectorias verticales V1 y V2. b) Trayectorias horizontales H1 y H2.

5.4. Resultados y Discusión

La fiabilidad del índice de daño mecánico ID ha sido corroborada a lo largo de numerosos trabajos experimentales previos [5, 7, 72] en perfiles de ala ancha, como las secciones I de los disipadores tipo WPD, sometidos a cargas cíclicas controladas o a cargas sísmicas aleatorias. Sin embargo, la obtención del índice necesita de una instrumentación costosa para medir la fuerza y el desplazamiento de los disipadores, lo cual implica una inversión difícil de justificar en regiones de muy baja probabilidad de ocurrencia de terremotos como es el sur de Europa. Para superar este inconveniente, en esta Tesis se propone una estrategia que consiste en estudiar la correlación existente entre el índice mecánico y los índices obtenidos a partir de las inspecciones con técnicas de ensayo no destructivo, como el método de UT o el método de MMM, de forma que el índice mecánico ID pueda deducirse indirectamente, sin necesidad de utilizar instrumentación de alto coste. El valor de esta alternativa reside en el uso de equipos sencillos y de coste asequible, así como la posibilidad de implementar sistemas de monitorización continua sin interrupción del uso de la estructura. Los resultados previamente presentados, relativos a las inspecciones de UT y de MMM, se exponen a continuación correlacionándolos con el índice ID obtenido para testigos ensayados con ambos patrones de carga: T1-T5 sometidos a cargas cíclicas de amplitud creciente (CR) y T6-T10 sometidos a cargas cíclicas de amplitud constante (CO).

5.4.1. Correlación de índices ID y ΔE en ensayos cíclicos

Si representamos los valores del índice ΔE frente a los valores del índice ID recogidos en la Tabla 5.1, se observa, a grandes rasgos, una clara correlación de ambos índices.

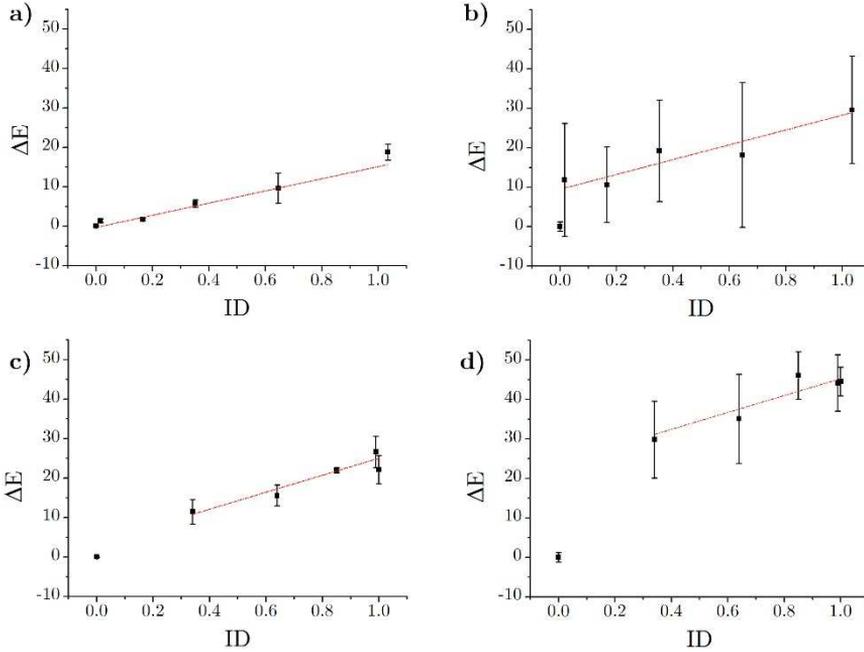


Figura 5.24. Correlación ΔE - ID . a) T1-T5, transmisión; b) T1-T5, pulso-eco; c) T6-T10, transmisión; y d) T6-T10, pulso-eco.

Si bien, una revisión más detallada revela dos partes a distinguir en la gráfica:

- Una primera parte con valores de ID muy cercanos a 0, donde el índice ΔE es muy sensible y aumenta abruptamente con ligeros incrementos en el daño.
- Una segunda parte con valores de $ID > 0.02$ donde la relación entre ambos índices es aproximadamente lineal. Las líneas de ajuste de los valores experimentales relativos a la inspección por transmisión y por pulso-eco vienen definidas por las Ecuaciones 5.5 y 5.6 para los testigos CR, y por las Ecuaciones 5.7 y 5.8 para los testigos CO:

$$\Delta E_{Tr,CR} = 17,413 \cdot ID - 0,281; \quad (5.5)$$

$$\Delta E_{PE,CR} = 17,370 \cdot ID + 10,170; \quad (5.6)$$

$$\Delta E_{Tr,CO} = 20,933 \cdot ID + 3,491; \quad (5.7)$$

$$\Delta E_{PE,CO} = 24,429 \cdot ID + 21,201; \quad (5.8)$$

Los coeficientes de correlación de estas líneas de ajuste son $r_{Tr,CR}=0,96395$, $r_{PE,CR}=0,82900$, $r_{Tr,CO}=0,89061$ y $r_{PE,CO}=0,84996$. Por lo tanto, se puede concluir que la correlación $\Delta E-ID$ es excelente, dado que el valor de todos los coeficientes es cercano a uno.

La existencia de estas dos partes está bien documentada en la bibliografía [73], y se basa en la fuerte dependencia entre la microestructura del material y la atenuación en los ultrasonidos. Cuando el material sobrepasa el límite elástico y entra en el rango plástico, su rigidez, hasta entonces intacta, comienza a decrecer. Esto se produce porque la transición del estado elástico al estado plástico implica unos cambios importantes a nivel microestructural que se dan justo en ese punto, y que producen una acusada atenuación de la onda. A partir de ese inicio, la deformación plástica en el material va creciendo paulatinamente, así como la atenuación de los ultrasonidos.

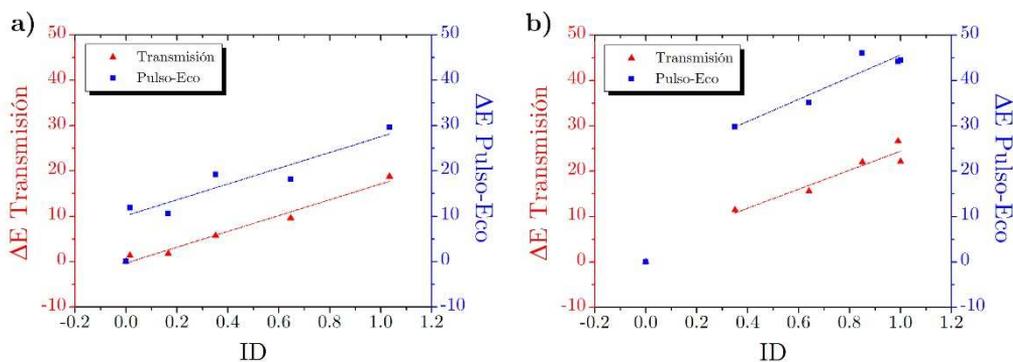


Figura 5.25. Comparativa de la correlación $\Delta E-ID$ en las técnicas de transmisión y pulso-eco. Izq.: Ensayos cíclicos de amplitud creciente. Der.: Ensayos cíclicos de amplitud constante.

Comparando los resultados de las técnicas de transmisión y de pulso-eco en cada uno de los patrones de carga (CR y CO), cabe destacar que en ambos casos la tasa de crecimiento es similar, como se aprecia en la Figura 5.25 y se puede comprobar con el valor de las pendientes de las Ecuaciones 5.5-8.

De igual manera, se pueden comparar los valores en ambos patrones de carga (CR y CO), representados en la Figura 5.26, para cada una de las técnicas de inspección de UT. De la técnica de transmisión se obtienen valores

similares en ambos patrones de carga (Figura 5.26), y con una tasa de crecimiento similar con pendientes de $a_{Tr,CR}=17,41$ y $a_{Tr,CO}=20,93$. Sin embargo, en la técnica de pulso-eco la diferencia de valores entre ambos patrones de carga es importante, y las tasas de crecimiento son más dispares, con pendientes de $a_{PE,CR}=17,37$ y $a_{PE,CO}=24,43$. Esta diferencia de resultados entre las dos técnicas de inspección es importante en tanto que afecta al cálculo indirecto del índice mecánico ID a partir del índice propuesto ΔE . Así, si se realiza una inspección de UT por transmisión, se podría calcular el índice ID con un error máximo de $e \leq 0,2$, mientras que si la inspección se hace por pulso-eco, el índice ID se calcularía con un error de $e \geq 0,4$. En concreto, el uso de la técnica de pulso-eco para los testigos sometidos al patrón de carga CO ha proporcionado valores excesivamente altos de atenuación debido a las deformaciones fuera del plano que se produjeron en las placas y que han ido aumentando a lo largo del ensayo, y por ello la pendiente de la recta de ajuste es mayor que en otros casos. En cambio, para los testigos sometidos al patrón de carga CR, donde no se han observado deformaciones fuera de plano, los valores de atenuación obtenidos con dicha técnica son moderadamente superiores pero la pendiente es similar a la obtenida con la técnica de transmisión.

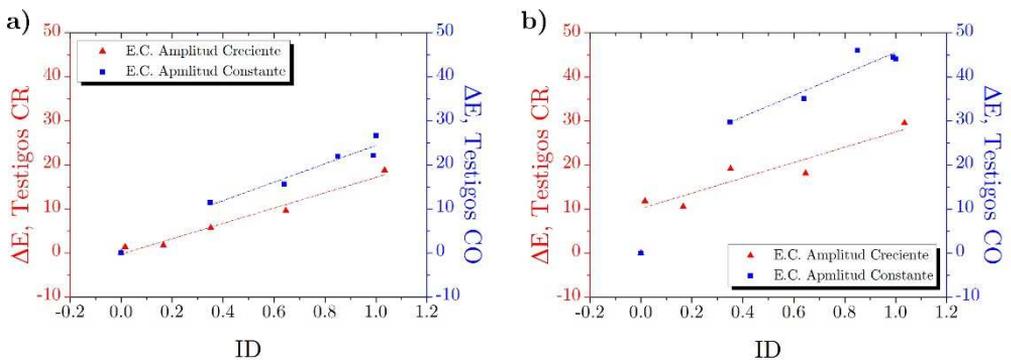


Figura 5.26. Comparativa de la correlación $\Delta E-ID$ en patrones CR y CO. Izq.: Medidas de UT por transmisión. Der.: Medidas de UT por pulso-eco.

5.4.2. Correlación de índices ID y E_M en ensayos cíclicos

Los resultados del índice E_M obtenidos en el Apartado 5.3 relativos a los testigos sometidos al patrón de carga CR se basan en las medidas tomadas en dos trayectorias: las verticales V1 y V2, que recorren las dos tiras de los testigos; y las horizontales H1 y H2, que recorren el ala central. El grado de correlación de ambas medidas con el índice de daño ID es desigual, como se puede apreciar en la Figura 5.27, con un coeficiente de correlación de $r_V=0,6142$ para las trayectorias verticales, y de $r_H=0,9232$ para las horizontales.

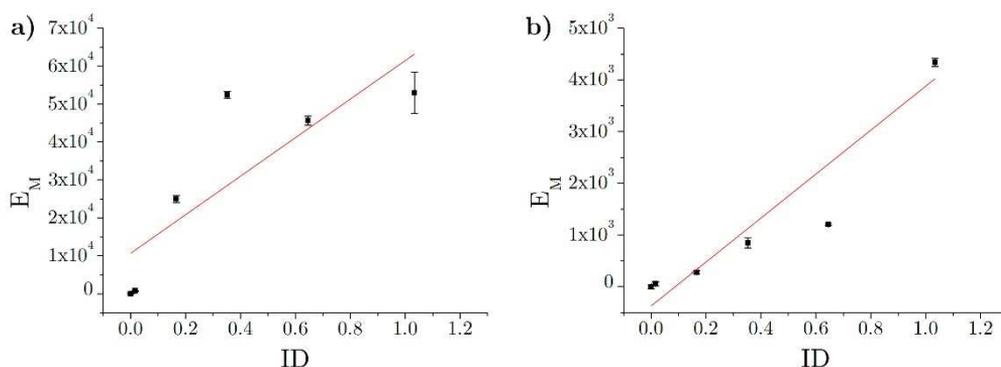


Figura 5.27. Correlación E_M-ID . a) Trayectorias verticales V1 y V2 y b) Trayectorias horizontales H1 y H2.

Más aún, si se considera un margen de seguridad razonable, resultaría aconsejable la sustitución de los disipadores para valores superiores a $ID=0,8$. Por lo tanto, evaluando la relación entre los índices E_M-ID para el rango de valores entre $ID=0$ e $ID=0,8$, como se muestra en la Figura 5.28, se puede observar un excelente ajuste lineal ($r_H=0,9942$) para las medidas realizadas en H1 y H2. En relación a éstos resultados, se puede concluir ciertamente que las medidas de las trayectorias horizontales, a lo largo del ala central, son las que permitirían obtener indirectamente y con una elevada fiabilidad el índice de daño mecánico ID a través de la siguiente ecuación:

$$E_M = 1863,00 \cdot ID + 0,74; \quad (5.9)$$

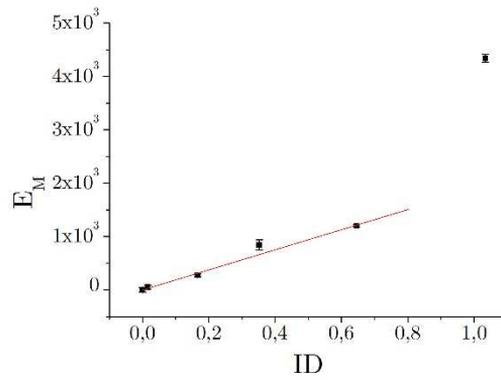


Figura 5.28. Correlación E_M-ID en trayectorias horizontales H1 y H2 para el rango de valores ID [0-0,8].

6. ESTRUCTURA: ENSAYOS

En este capítulo se describen los trabajos experimentales de monitorización de estructuras de hormigón armado con el método de emisión acústica, durante cuasi-estáticos y ensayos sísmicos.

6.1. Quasi-static tests. RC beams

Quasi-static tests on simple structural elements (beams, columns) constitute the first and simplest approach to study cracking in a structural element made of reinforced concrete (RC). In real structures, the structural elements are assembled forming complex systems with, sometimes, complex interactions. The problem becomes more cumbersome if the structure is subjected to dynamic loadings. This section 6.1 presents an experimental study focused on the first approach (quasi-static tests on simple structural elements). More precisely, the signals of AE related to the two main modes of failure of simple structural elements made of reinforced concrete (flexural failure and shear failure [74]) are studied. Next section 6.2 addresses the second approach, this is, subassemblages of different types of structural elements (columns, plates) under dynamic loading. The quasi-static tests were carried out at the Department of Mechanics of Materials and Constructions (MEMC), belonging to the Vrije Universiteit Brussel

(Belgium), within a collaboration between the two research groups, and during a short stay of the author of this Doctoral Thesis.

The specimens to be tested RC beams simply supported at both ends, with a constant rectangular section and a span close to the usual building dimensions. The dimensions were determined taking into consideration the constraints of the Laboratory (space, equipments, etc.). Two prototypes, BD and SH have been designed so that the failure mode is flexure and shear, respectively.

The calculation of the prototypes has been conducted using *Eurocode 2: Design of concrete structures -Part 1-1: General rules and rules for buildings / Section 5: Structural Analysis*. The concrete compressive strength is 25 MPa and the yield strength of steel 500 MPa. In the prototype BD, the transverse reinforcement was oversized and the lower longitudinal reinforcement was limited to the quantity strictly required by the calculation, so that the beam fails by flexure (i.e. yielding of the longitudinal reinforcement while the transverse steel and concrete struts that form the shear transfer mechanism remain elastic). In contrast, in the prototype SH, the lower longitudinal reinforcement was oversized, while the transverse reinforcement was drastically reduced, so that the failure mode is by shear (i.e. yielding of the transverse reinforcement or the concrete struts that form the shear transfer mechanism while the longitudinal steel remains elastic).

6.1.1. Description of specimens

Prototypes BD and SH have identical geometry, the same span 2.70 m and a rectangular section of 20x30 cm². In total, five beams have been built, V1-V5, three correspond to the prototype BD and two to the prototype SH. On the other hand, two histories of loading are considered: monotonic loading, and loading and unloading cycles. The matrix of quasi-static tests performed is shown in Table 6.1.

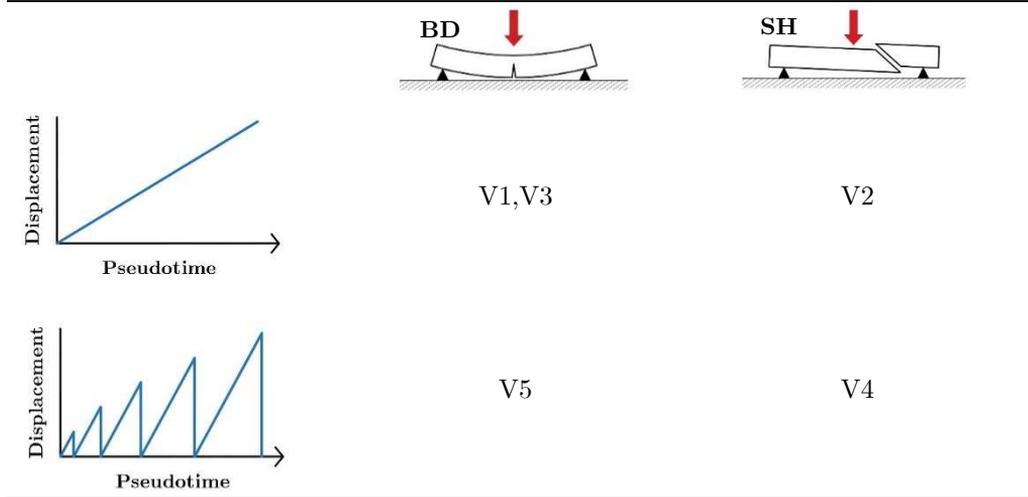


Table 6.1. Matrix of quasi-static tests of BD and SH beams.

Materials: Concrete and steel

The concrete used was named HA-25/2/14/IIa according to the Spanish code [75] nomenclature. Two different dosages were prepared, one for beams V1-V3, subjected to monotonic loading, and another, with a higher percentage of cement, for beams V4 and V5, tested with load-unload cycles.

Component	Weight (kg)
Sand (0/4 mm)	255
Pea gravel (4/7 mm)	260
Gravel (7/14 mm)	554
Cement CEM I 32.5 R	92
Water	86
Fly ash	23

Table 6.2. Dosage of concrete HA-25/2/4/IIa for beams V1-V3.

Component	Weight (kg)
Sand (0/4 mm)	168
Pea gravel (4/7 mm)	172
Gravel (7/14 mm)	360
Cement CEM I 32.5 R	80
Water	53
Fly ash	17

Table 6.3. Dosage of concrete HA-25/2/4/IIa for beams V4 and V5.

The longitudinal reinforcement of the beams consisted of 4 bars ($\phi 16$), one at each corner of the cross-section, which were welded to two $20 \times 30 \text{ cm}^2$ plates, 5 mm thick, placed on the lateral faces at both ends of the beam. In the prototype BD, stirrups ($\phi 8$) were placed every 15 cm for the transverse reinforcement in the two lateral thirds of the span, as can be seen in Figure 6.1. In contrast, in the prototype SH, stirrups were placed every 15 cm in only one third of the span, favoring the shear failure at the other side, and additionally, the lower longitudinal reinforcement was enhanced with a bar ($\phi 16$) of 1.00 m at the center of the span.

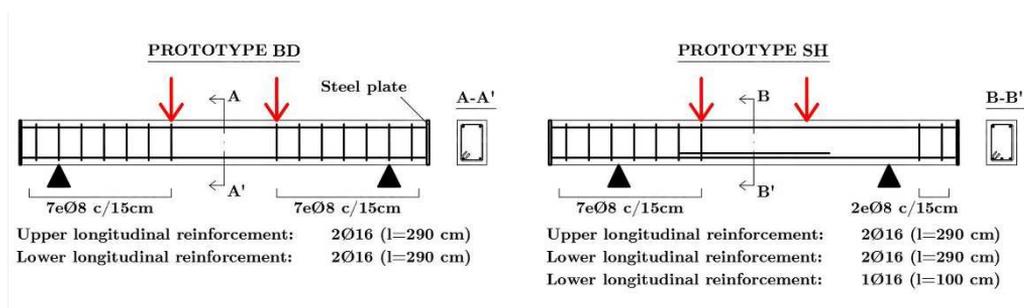


Figure 6.1. Steel reinforcement on prototypes BD and SH.

Specimen preparation

The beams were made in the Laboratory of Structures (MEMC), whereas CARODEC and FIEREMANS supplied the materials for the concrete and steel reinforcement, respectively. The preparation of the beams consisted of three tasks: preparation of the steel reinforcement, preparation of the concrete components, and concrete casting. The two first ones were executed simultaneously, before starting the last one.

The reinforcement preparation process was initiated by adhering strain gauges to the longitudinal reinforcements ($\phi 16$) using epoxy resin on a sanded and solvent-cleaned surface. After curing the resin, a 2-wire cable was welded to the gauge and covered with four more layers of resin to prevent the chemical attack from components of the cement. Next, the longitudinal reinforcement was welded to one of the side plates, then the stirrups were inserted and welded to the longitudinal reinforcement, and

finally the other plate was welded to the other end. Auxiliary bars were also welded for lifting the beams, as shown in Figure 6.2.c.



Figure 6.2. Left: Strain gauge attached to the longitudinal reinforcement. Center: Beam reinforcement of V3 and V4. Right: Steel handle for lifting.

The preparation of the concrete consisted basically of drying the aggregates that had caught enough humidity, so that the target water-cement would not be altered. The drying of the gravel was carried out by natural ventilation, while the fine sand was dried in a furnace for 24 hours at a temperature of 80 °C.



Figure 6.3. Left: Spread pea gravel for natural ventilation. Right: Fine sand dried in the furnace.

An electric concrete mixer with a capacity of 160 l mixed the concrete dosage. The fresh concrete was poured into the formwork made of phenolic plywood, the surfaces of which were covered with a release agent. Inside this formwork, the steel reinforcement had already been placed. The vibrator helped the concrete flow between the reinforcement bars, and once the whole formwork volume had been filled, plastic sheets were put in place to cure the concrete during its setting.

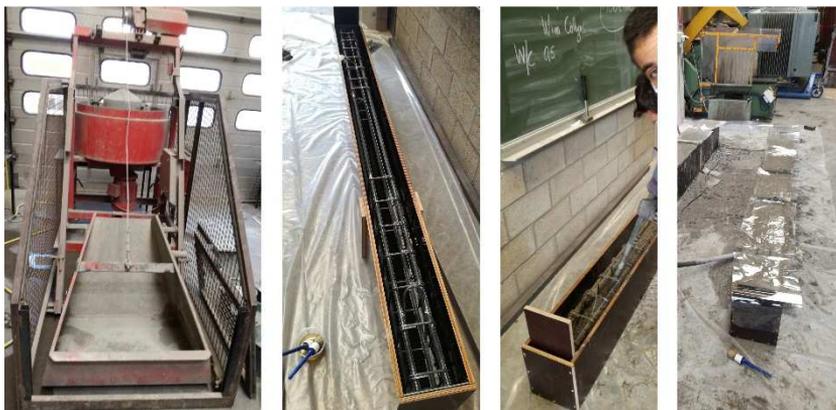


Figure 6.4. From left to right: Electric concrete mixer, steel reinforcement embedded on formwork, concrete vibrating, and plastic sheet for curing.

6.1.2. Four-point bending tests

Test set-up

The beams were tested at four-point bending, since this configuration is suitable for enhancing shear failure as well, simply by reducing the distance between the supports and the load application points. Thus, for beams BD the distance between supports was 2.20 m, and 1.80 m in the case of beams SH, i.e. the distance between supports and load points was 0.75 m and 0.55 m, respectively, as shown in Figure 6.5.

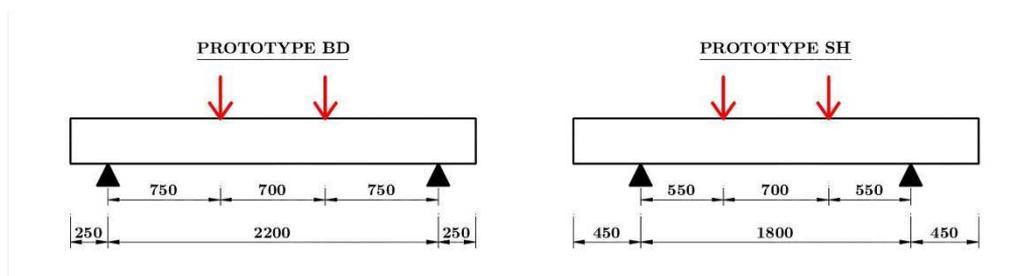


Figure 6.5. Four-point bending test, dimensions in mm.

The configuration of the test consists of an actuator that applies a vertical load downwards, which splits into two load points through a horizontal spreader beam connected solidly to the actuator. The RC beam is supported by two supports on steel cubic blocks screwed to two horizontal HEB beams fixed to the floor (Figure 6.6). The load points and the supports are both

cylindrical pieces that not contact directly the beam, since rectangular steel plates with plasticizer material were interposed to distribute the load and avoid the local crushing of the concrete.

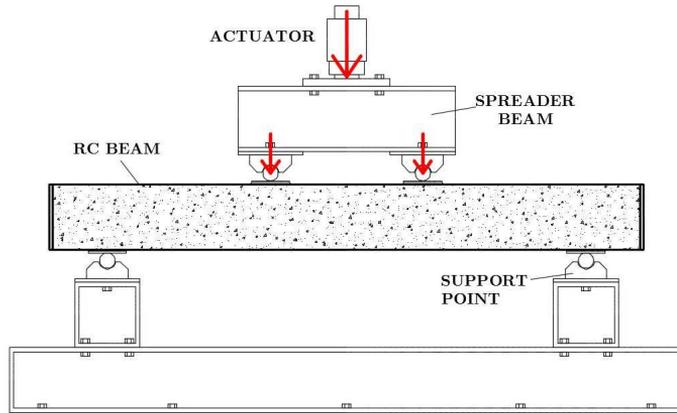


Figure 6.6. Configuration of the four-point bending test.

The actuator, in turn, was mounted on a frame build with HEB profiles. Figure 6.7 illustrates the general configuration of the four-point bending test.

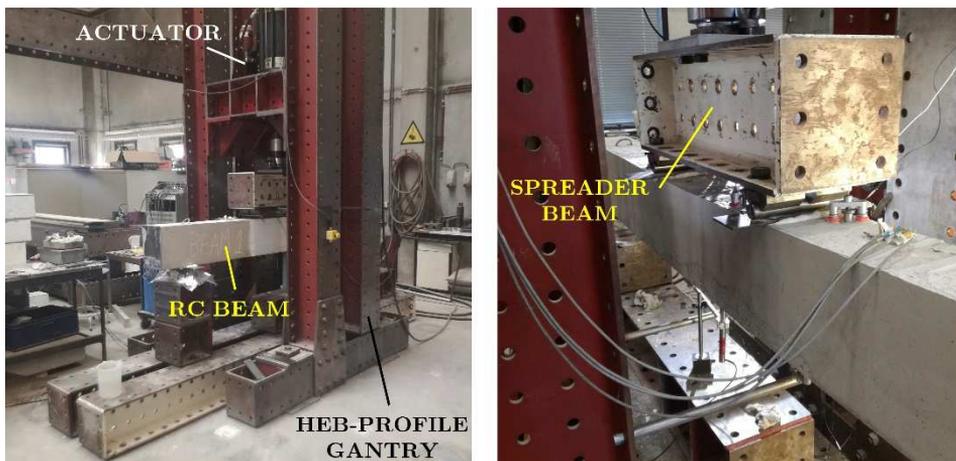


Figure 6.7. Left: General test setup. Right: Spreader beam with two load points.

Loading history

The tests were carried out by displacement control (i.e. controlling the actuator stroke), starting with a preload of 1.5 to 1.8 kN. The beams V1-V3 were tested with an increasing monotonic load, at 0.2 mm/min for V1 and

0.5 mm/min for V2 and V3. The beams V4 and V5 were subjected to loading cycles, at 0.5 mm/min, and unloading cycles, at 1 mm/min, performing a total of five cycles reaching 25 kN, 50 kN, 75 kN, 100 kN and the maximum load, which was 157 kN in V4 and 134 kN in V5. The load-deflection curves of the beams are shown in Figure 6.8, where it can be observed that the beams of the prototype BD exhibited a ductile flexural failure (i.e. there is no sudden drop of strength after yielding of the longitudinal steel), while the beams SH ended with an abrupt drop of the strength, typical of a shear failure.

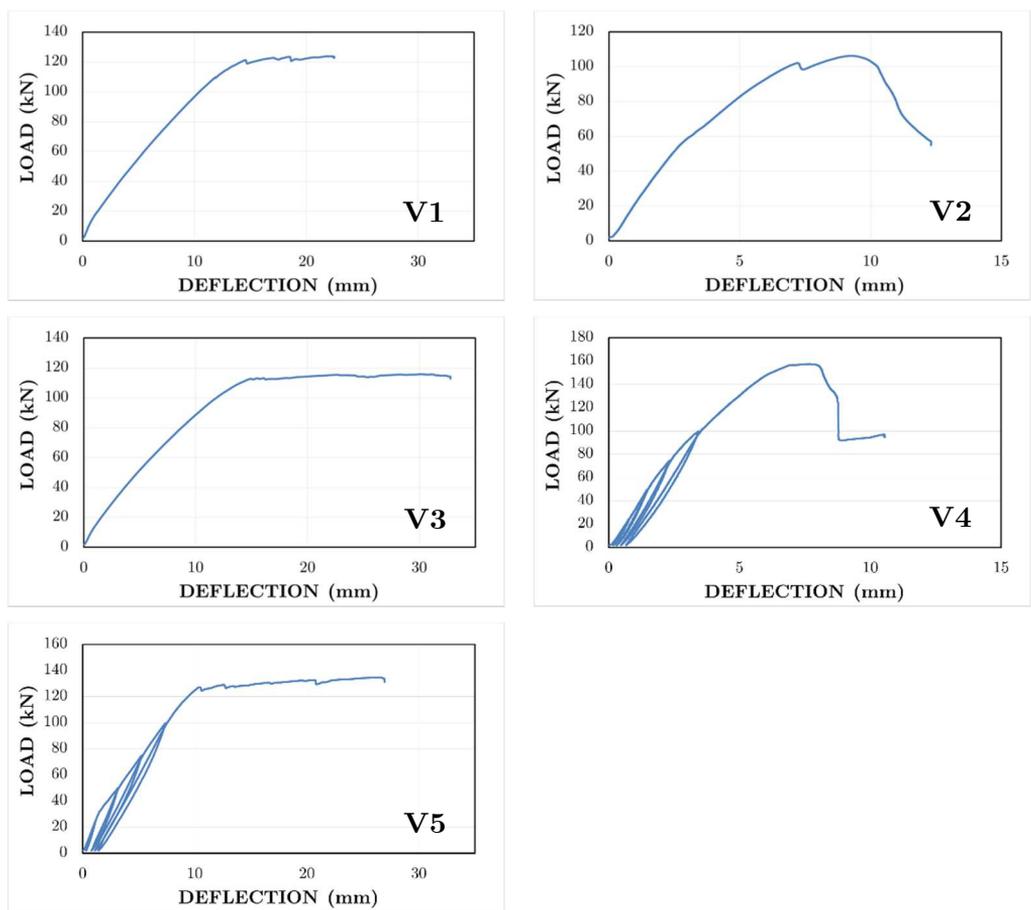


Figure 6.8. Load-deflection diagrams on the beams V1-V5.

6.1.3. Instrumentation

To record the AE signals produced during the tests, 8 AE sensors were used which have been distributed to cover the area where the damage was expected to happen. In the prototype BD, where vertical tensile cracks were expected, the sensors were distributed in the center of the span, 4 in the upper face and 4 in the lower face, with a zigzag layout. The same distribution of sensors was carried out in the prototype SH, but moving it towards the right side, where a shear crack was predicted between the support and the loading point. Figure 6.9 shows the two layouts, as well as the point of origin from which the coordinates of the sensors were taken, and listed in Table 6.4.

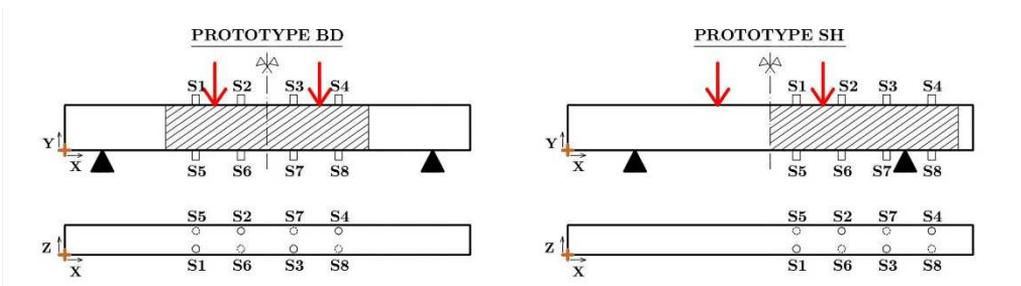


Figure 6.9. Layouts of AE sensors on prototypes BD and SH.

Coordinates (en cm)	Prototype BD			Prototype SH		
	X	Y	Z	X	Y	Z
S1	88	30	4	153	30	4
S2	118	30	16	183	30	16
S3	153	30	4	213	30	4
S4	183	30	16	243	30	16
S5	88	0	16	153	0	16
S6	118	0	4	183	0	4
S7	153	0	16	213	0	16
S8	183	0	4	243	0	4

Table 6.4. Spatial location of AE sensors on prototypes BD and SH.

The AE sensors used were of the brand MISTRAS, model R15 α , resonant at 150 kHz, though with sensitivity in the frequency range of 50-400 kHz.

The sensors have been installed on the surface of the beam by using magnetic supports that were hooked to metal washers previously glued to the concrete surface by means of a bicomponent adhesive. The magnetic support has a screw rod that presses the sensor against the concrete surface; the latter, along with the silicone grease, ensures a complete sensor-surface coupling.



Figure 6.10. Attachment of the sensor R15 α and its sensitivity curve.

The signals collected by AE sensors were amplified with a gain of 34 dB_{AE}, and stored in the Micro-II-Express acquisition system, from the commercial company MISTRAS, equipped with an 8-channel motherboard Express-8. The parameters configured in the acquisition system are shown in Table 6.5.

Parameter	Value
Treshold	35.2 dB _{AE}
Filter	-
Sampling frequency	1 MHz
Preamplifier gain	34 dB _{AE}
Number of the samples by signal	1024 samples
Signal length	1024 μ s
Pretrigger	256 samples
Trigger mode	Normal
Rearm time	2.0 ms
Duration discrimination time (DDT)	250.0 μ s
Input impedance	50 Ω

Table 6.5. Parameters set in the acquisition system Micro-II-Express.

The acquisition system has also 4 parametric inputs, two of which received data related to the vertical stroke of the actuator, and the load, provided by the INSTRON load cell, model 2518, with a maximum capacity of 500 kN for static load and 250 kN for dynamic load. The deflection occurring on the beam was measured with a LVDT transducer, which was installed under the beam, just in the center of the span.

In addition, strain gauges of the *Tokyo Sokki Kenkyujo* brand, type FLA-10-11, were adhered to two longitudinal reinforcement bars, one upper and one lower, and placed at opposite corners on the beam cross-section. On each of those bars, two gauges were placed, one on the top face and one on the bottom face of the bar, just at one of the load application points, as shown in Figure 6.11. Therefore, the deformation of the upper and lower longitudinal reinforcement was measured at the point where the bending moment and the shear force are maximum.

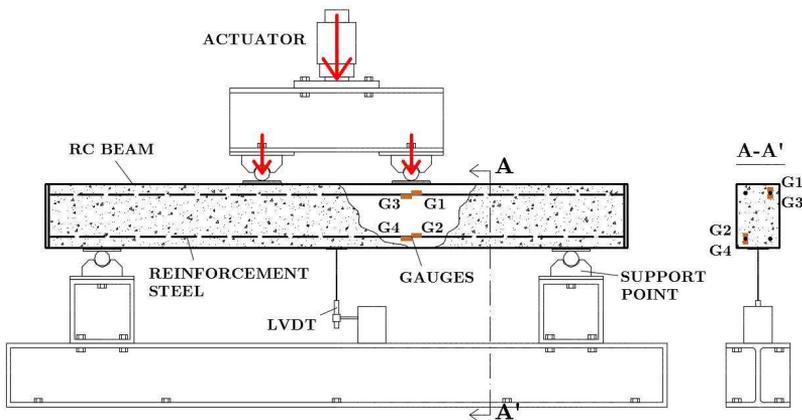


Figure 6.11. Instrumentation to measure beam deflection and deformation of longitudinal reinforcement during the test.

The data of load (load cell), displacement (LVDT) and strain in the steel reinforcement (gauges) were recorded with a sampling frequency of 5 Hz (2 Hz on Beam V1), due to the duration of the quasi-static tests, which lasted from 1 to 2 hours.

6.2. Ensayos sísmicos. Forjado reticular de HA

Dentro del Proyecto de Excelencia DIMFO (TEP-02429) se han llevado a cabo ensayos sísmicos en dos especímenes de hormigón armado BS1, BS2, SD1 y SD2, todos con las mismas luces y altura de pilares. Los dos últimos han sido equipados con disipadores hysteréticos TTD-NiTi. Esta Tesis Doctoral se centra en la monitorización del daño mediante la técnica de emisión acústica de los experimentos realizados con los especímenes BS1 y BS2. Queda fuera del ámbito de esta Tesis la investigación sobre la respuesta sísmica de estas estructuras desde el punto de vista mecánico y estructural. Los dos especímenes BS1 y BS2 son idénticos, pero se sometieron a terremotos diferentes. Los detalles sobre las características de estos especímenes, criterios de proyecto, escalado, instrumentación (distinta de la requerida para medir la EA) pueden consultarse en la referencia [76].

6.2.1. Descripción de los especímenes BS1 y BS2

Los especímenes BS1 y BS2 son idénticos. Consisten en un forjado reticular de $3,65 \times 3,02 \times 0,14 \text{ m}^3$ compuesto de dos ábacos interiores de $1,02 \times 1,02 \text{ m}^2$ y un ábaco exterior de $1,02 \times 0,66 \text{ m}^2$, distribuidos según la planta de la Figura 6.12. Entre los ábacos, el forjado es un continuo mallado de nervios de sección $28 \times 140 \text{ mm}^2$, dispuestos en dos direcciones con una separación de 332 mm (casetones de $304 \times 304 \text{ mm}^2$).

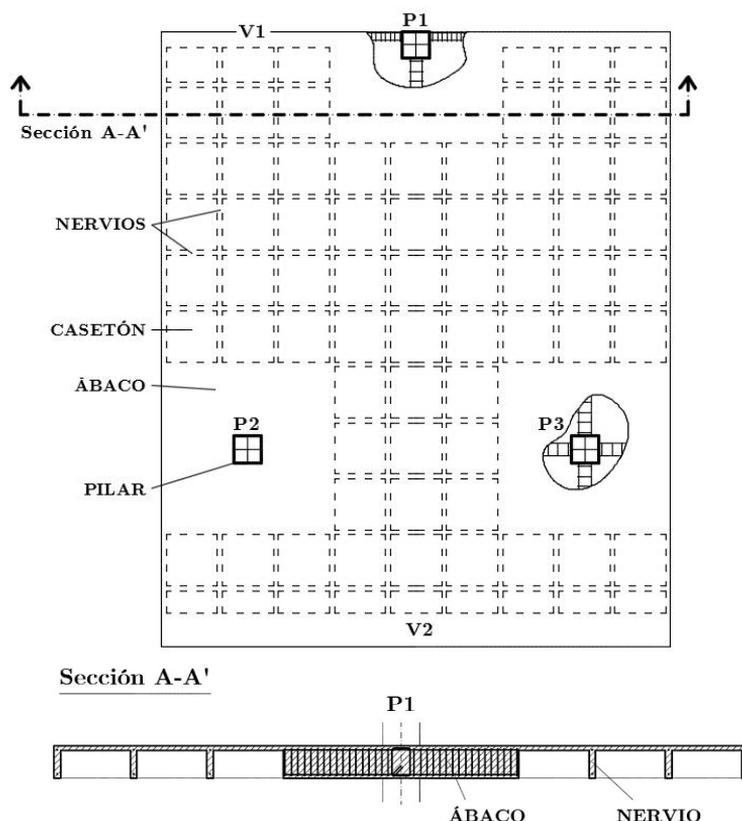


Figura 6.12. Planta y sección del forjado reticular del espécimen.

El forjado, cuya sección transversal se puede ver en la Figura 6.12, se apoya en 3 pilares de sección cuadrada $16 \times 16 \text{ mm}^2$, con una altura libre en la planta baja de 1,33 m, y de 0,43 m en planta superior. A su vez, los pilares descansan sobre dos zapatas centradas de $0,40 \times 1,00 \text{ m}^2$ y una zapata medianera de $0,60 \times 0,60 \text{ m}^2$.

Materiales: Hormigón y Acero

El hormigón que se ha empleado para los especímenes es un hormigón autocompactante HAC-40/AC-E3/4/IIa (según nomenclatura de la EHE-08), elaborado con la dosificación que se recoge en la Tabla 6.6, referida a 1 m^3 de hormigón. Se ha elegido una relación agua-cemento de 0,65 que, junto al uso de aditivo superplastificante, le confiere al hormigón una alta capacidad de fluidez para rellenar completamente el encofrado. Precisamente para comprobar dicha capacidad, se ha llevado a cabo el ensayo de

escurrimiento siguiendo la norma *UNE-EN 12350 Ensayos de hormigón fresco*, del que se han obtenido los valores de T_{50} , que es el tiempo que tarda el hormigón en alcanzar un diámetro de 500 mm cuando se sube el molde cónico hacia arriba y se escurre el hormigón, y de d_f , que es el diámetro final del hormigón vertido (Tabla 6.7).

Componente	Peso (kg)
Arena (0/4 mm)	1700
Cemento CEM I 42.5 R	275
Agua	178,75
Cenizas volantes	200
Aditivo superplastificante	50

Tabla 6.6. Dosificación del Hormigón HAC-40/AC-E3/4/IIa.

Valores a medir	Amasada 1	Amasada 2
T_{50} (s)	2,1	2,2
d_f (mm)	820	790

Tabla 6.7. Valores obtenidos del ensayo de escurrimiento.

Los valores de la resistencia a compresión del hormigón f_c en los distintos elementos se reflejan en la Tabla 6.8. Se han determinado aplicando los ensayos de compresión en probetas según marca la norma *UNE-EN 12390 Ensayos de hormigón endurecido*.

Edad	Pilar planta baja	Forjado	Pilar planta superior
28 días	41,96	43,28	42,34
Ensayo	43,65	44,82	44,07

Tabla 6.8. Resistencia a compresión en MPa.

La armadura de refuerzo de los especímenes se fabricó utilizando barras de acero corrugado B500S. El pilar P1 se reforzó con 16 redondos de 8 mm de diámetro (16 ϕ 8), colocando uno en cada esquina y tres en cada cara, y los pilares P2 y P3 se armaron con 12 ϕ 8, colocando uno en cada esquina y dos en cada cara. También se colocaron crucetas de punzonamiento de 8 ϕ 6 en los ábacos, con cuatro en cada dirección, y las vigas de borde V1 y V2 se armaron con 4 ϕ 6 y 4 ϕ 12, respectivamente. En cada nervio se han colocado

2 ϕ 6, uno inferior y otro superior. De forma general, se usaron redondos de 4 mm de diámetro para estribos en vigas, crucetas y pilares, y para armaduras de reparto.

Elaboración del espécimen

La elaboración de los especímenes se realizó en el Laboratorio de Mecánica de Estructuras de la Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Si bien, la fabricación de las armaduras de refuerzo de los especímenes se contrató con un taller externo.

El proceso de hormigonado se llevó a cabo en cuatro fases: Zapatas aisladas, pilares de planta baja, forjado, y pilares de planta superior. La dinámica del hormigonado fue una secuencia de los siguientes pasos:

- Preparación de la armadura: Una vez recibida la armadura, se pegaron las galgas extensiométricas en los puntos previamente seleccionados. En ocasiones fue preciso usar armaduras de montaje para suspender la armadura principal y asegurar el recubrimiento mínimo de ésta.
- Preparación del encofrado: Los encofrados se han preparado con tableros de contrachapado fenólico, y aplicando posteriormente antiadherente compuesto de silicona para facilitar el desencofrado. Se han practicado agujeros en el encofrado para sacar los manojos de cables soldados a las galgas extensiométricas.

Para el forjado, el encofrado se ha montado con tableros apoyados en durmientes que descansaban sobre puntales, y se usaron casetones de poliestireno de 304x304 mm² entre las armaduras de los nervios. En la Figura 6.13 se puede ver el encofrado en los ábacos de los pilares P1 y P2.



Figura 6.13. Encofrado de los ábacos en el forjado. Izq.: Pilar exterior P1. Der.: Pilar interior P2.

- Colocación de la armadura en el encofrado: Se han unido las armaduras a las esperas que sobresalían del hormigonado previo. Los cables de galgas se han colocado con especial cuidado para evitar su rotura durante el vertido del hormigón, sacando el manojos de cables por el agujero previamente realizado en el encofrado.
- Vertido del hormigón: Con ayuda de canastas se vertió el hormigón poco a poco dejando que fluya y rellene completamente el volumen del encofrado. En el forjado se utilizó la llana para repartir el hormigón homogéneamente en toda la superficie, como se puede ver en la Figura 6.14.

En cada fase del hormigonado se tomaron probetas para obtener la resistencia a compresión, cuyos valores se han recogido en la Tabla 6.8.



Figura 6.14. Hormigonado del forjado del espécimen. Izq.: Vertido del hormigón. Der.: Estado previo y posterior al vertido del hormigón.

Cabe señalar que las zapatas se han atado entre sí con perfiles tubulares metálicos, para evitar desplazamientos laterales durante el izado del espécimen.

6.2.2. Descripción de los ensayos sísmicos

Configuración de los ensayos

Para simular las condiciones de contorno de la sub-estructura dentro del prototipo, se instalaron barras biarticuladas de acero y uniones articuladas (rótulas) en las zonas donde se ha “seccionado” el prototipo, esto es, en los extremos libres de los pilares superiores y en el frente del forjado. Así mismo, se añadieron masas adicionales, a base de bloques de acero, para simular las sobrecargas y cumplir las leyes de semejanza entre prototipo y modelo de ensayo. La configuración general del ensayo se muestra en las Figuras 6.4 y 6.5, donde se ve el espécimen instalado sobre la mesa sísmica.

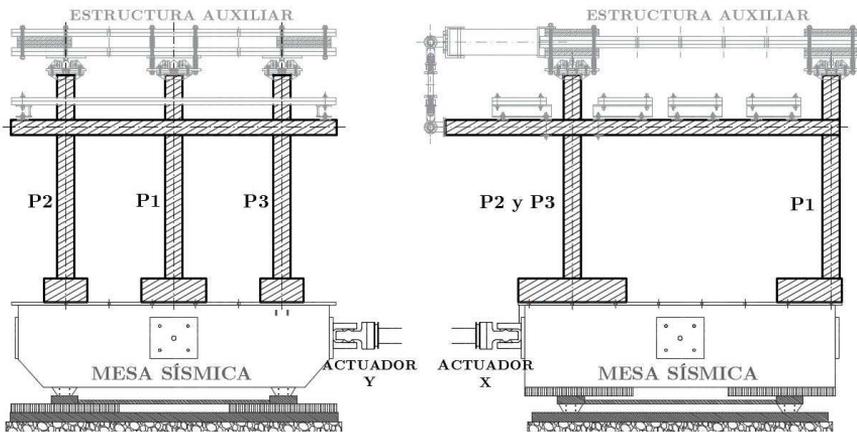


Figura 6.15. Alzados del espécimen instalado sobre la mesa sísmica.



Figura 6.16. Configuración general del ensayo sísmico: Mesa sísmica de la Universidad de Granada (actuadores X e Y), estructura principal de HA con sobrecarga de uso, y estructura metálica auxiliar.

Historia de carga

Los especímenes BS1 y BS2 se sometieron a simulaciones de dos terremotos con características espectrales marcadamente diferentes, el terremoto registrado en la estación de Calitri (Italia, 1980) y el registrado en la estación de Bar-Skupstina Opstine (Montenegro, 1979), respectivamente. En la Figura 6.17 se representan los acelerogramas originales registrados en ambos terremotos.

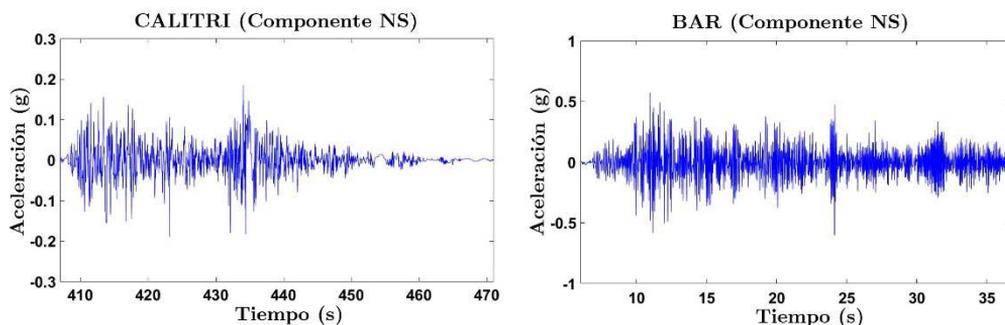


Figura 6.17. Acelerograma original del terremoto registrado en la estación sísmica. Izq.: Calitri. Der.: Bar-Skupstina Opstine.

Cada espécimen se sometió a varias simulaciones sísmicas. En cada una de las cuales se aplicaron las componentes X e Y del terremoto original escaladas en amplitud a valores crecientes hasta el colapso del espécimen.

		Simulaciones de Calitri en BS1					
		C35	C50	C100	C200	C200bis	C300
Aceleración de Pico (g)		0.07	0.10	0.20	1.00	0.42	0.59

		Simulaciones de Bar-Skupstina en BS2							
		B15	B25	B50	B100	B100b	B130	B130b	B160
Aceleración de Pico (g)		0.06	0.09	0.19	0.37	0.37	0.48	0.48	0.75

Tabla 6.9. Aceleración máxima en las simulaciones sísmicas.

La secuencia de simulaciones ejecutadas en el BS1 fueron: C35%, C50%, C100%, C200%, C200%bis y C300%. Por su parte, el espécimen BS2 fue sometido a la siguiente serie de simulaciones: B15%, B25%, B50%, B100%, B100%bis, B130%, B130%bis y B160%. El porcentaje hace referencia al pico alcanzado en el terremoto original, de forma que el C200% es una simulación cuyo pico es dos veces mayor que el original. Si bien, todas las simulaciones de Calitri tuvieron la misma duración, 65 s, excepto el C200% que se interrumpió a los 40,5 s. Las simulaciones de Bar-Skupstina duraron 41 s, excepto el BS15% (27 s) y el BS100% (13 s).

6.2.3. Instrumentación

La presente Tesis Doctoral se centra en la monitorización del daño que se produce principalmente en la base y la cabeza de los pilares de planta baja, debido al desplazamiento relativo del forjado reticular respecto de la cimentación. Estas zonas de interés se han monitorizado tal y como se describe a continuación. El resto de instrumentación empleada para monitorizar el comportamiento mecánico de la estructura y evaluar la

energía de deformación plástica disipadas en cada simulación se detalla en la referencia [76].

Instrumentación de emisión acústica

La ubicación de los sensores de emisión acústica depende principalmente de las zonas a monitorizar y de las fuentes de ruido indeseado que existen en un ensayo de estas características. En este caso, las zonas de interés son las bases de los pilares de planta baja y su unión superior con el ábaco, puesto que es donde se concentra el daño al desplazarse el forjado lateralmente respecto de la cimentación. Así pues, se ha monitorizado la base y el ábaco del pilar exterior P1, y del pilar interior P2, asumiendo un comportamiento similar en los dos pilares interiores. Además, teniendo en cuenta las fuentes de ruido que ya se determinaron en ensayos previos del mismo tipo [29, 31], se colocaron sensores cerca de las rótulas que unen el espécimen con la estructura metálica auxiliar. En total, fueron 18 sensores los que se utilizaron para captar la emisión acústica producida en el hormigón durante los ensayos sísmicos, 6 de ellos en el ábaco de P1, 7 en el ábaco de P2, 2 en las bases de dichos pilares y 3 cerca de las rótulas de la estructura auxiliar. La distribución de los sensores se puede apreciar en la Figura 6.18.

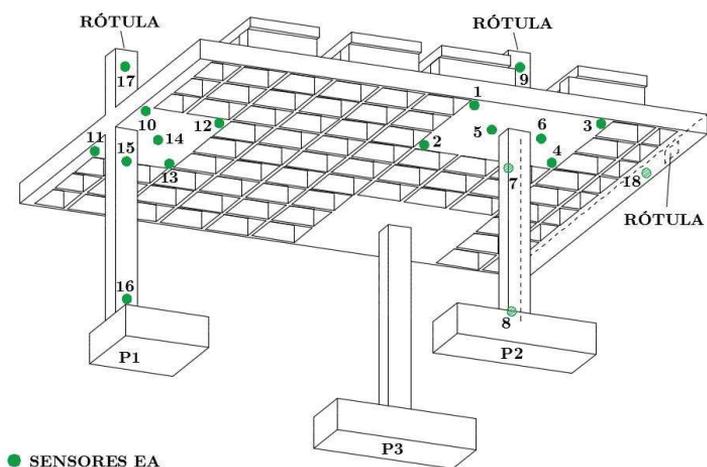


Figura 6.18. Distribución de los sensores de EA en el espécimen.

La distribución de los sensores en los ábacos se ha diseñado para cubrirlo en su totalidad, de forma que ningún punto quede a más de 40 cm del sensor

más cercano, dado que el ensayo de atenuación refleja una caída de la amplitud superior a los $10 \text{ dB}_{\text{AE}}$ a partir de dicha distancia. En las Figuras 6.19 aparecen acotadas las posiciones exactas de los sensores en el espécimen.

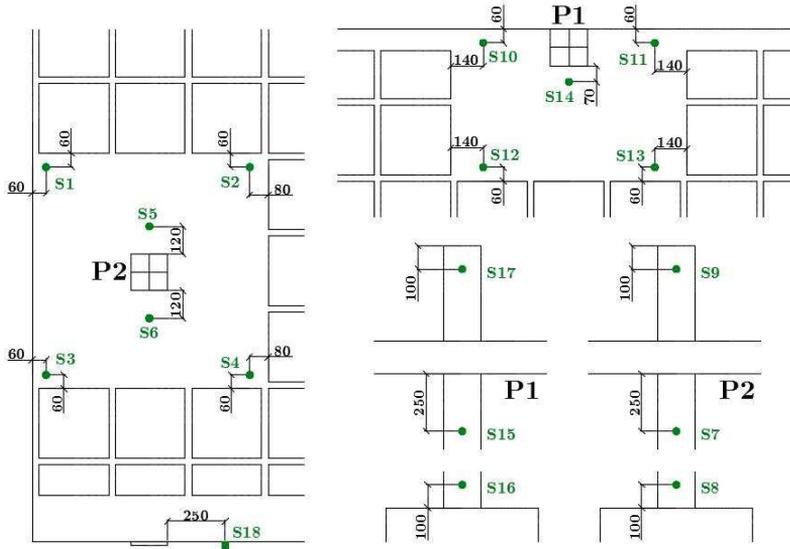


Figura 6.19. Posición exacta de los sensores en el espécimen, cotas en mm.

Se han utilizado sensores de la casa comercial *Vallen System*, modelo VS30-V, ilustrado en la Figura 6.20 junto a su curva de sensibilidad. Su uso en el hormigón se considera idóneo debido a su respuesta alta y uniforme en un intervalo de frecuencias bajas (25-80 kHz), donde la atenuación es menor. Es preciso apuntar que el hormigón presenta una atenuación acústica importante, sobre todo en altas frecuencias. Así mismo, se han usado preamplificadores de modelo AEP4 (*Vallen System*), con $34 \text{ dB}_{\text{AE}}$ de ganancia, para que la señal captada tenga una amplitud suficiente a su llegada al equipo de adquisición, y que no se pierda información.

La fijación de los sensores a la superficie del espécimen ha sido posible gracias al uso de dispositivos metálicos en forma de U que se atornillaron al hormigón. Estos dispositivos cuentan con una varilla roscada con una lámina de goma en su extremo que aprieta el sensor contra la superficie asegurando su fijación durante todo el ensayo. Además, la grasa de silicona asegura un acople sensor-superficie completo.



Figura 6.20. Fijación del sensor VS30-V y su curva de sensibilidad.

Las señales de EA captadas por los sensores se transmiten al equipo de adquisición AMSY-5, de la casa comercial *Vallen System*, equipado con 9 tarjetas de adquisición bicanales que hacen un total de 18 canales. El equipo cuenta con dos entradas paramétricas adicionales que se usaron para medir la aceleración en las direcciones X e Y de la mesa sísmica.



Figura 6.21. Equipo de adquisición AMSY-5 de señales de EA.

El umbral se estableció en 45 dB_{AE} en base a ensayos previos donde se observó que las señales por debajo de esta amplitud correspondían a ruido no deseado, teniendo en cuenta que la distribución de sensores está diseñada para evitar grandes distancias entre sensor y fuente de EA, y por consiguiente, evitar atenuaciones importantes de la señal de EA. También se han filtrado señales con frecuencias por debajo de 30 kHz, que corresponden a impactos y otros ruidos del rango audible, y por encima de 120 kHz, relacionados con fricciones mecánicas entre elementos o ruido eléctrico procedente de la mesa sísmica, y lejos del alcance del rango de frecuencias en las que el sensor tiene su zona de máxima sensibilidad. En la Tabla 6.10 se incluye el resto de parámetros configurados antes del ensayo.

Parámetro	Valor
Umbral	44,9 dB _{AE}
Filtros	30 kHz-120 kHz
Frecuencia de muestreo	1,25 MHz
Ganancia de preamplificador	34 dB _{AE}
Número de muestras por señal	2048 muestras
Longitud de señal	1634,4 μ s
<i>Pretrigger</i>	100 muestras
Modo de disparo	Normal
Tiempo de rearme	200,0 μ s
Duración del tiempo de discriminación (DDT)	2,0 ms
Impedancia de entrada	50 Ω

Tabla 6.10. Parámetros configurados en el equipo de adquisición AMSY-5.

Otra instrumentación

Durante el ensayo se han medido también las aceleraciones del forjado, los desplazamientos laterales de éste respecto de la mesa sísmica, y la deformación plástica de los refuerzos de acero. Para medir la aceleración, se han utilizado 8 acelerómetros sísmicos de la marca *Brüel&Kjaer* y modelo 8340, de los cuales 4 se distribuyeron en dos frentes perpendiculares del forjado, con un sensor en cada extremo, y lo mismo con los otros 4 para la estructura auxiliar. Junto a cada acelerómetro sísmico se colocó un acelerómetro piezoeléctrico de la misma marca y modelo 4507 B 002, que se caracteriza por una alta sensibilidad. Por su parte, los desplazamientos laterales entre forjado y espécimen se midieron en las dos direcciones con 8 sensores de tipo LVDT (véase Subapartado 4.1.2), 4 por planta, de la marca HBM (*Hottinger Baldwin Messtechnik*) y modelos WA/500MM y WA/200MM. Éstas medidas se acompañaron de otras obtenidas por 6 sensores láser de la marca *KEYENCE* y modelo IL-600, instalando 4 en la planta baja y 2 en planta superior. En cuanto a la deformación plástica, se utilizaron 472 galgas extensiométricas lineales de la casa comercial *Tokyo*

Sokki Kenkyujo, de tipo FLA-6-11, que se adhirieron a los refuerzos de acero del espécimen, concretamente: i) en el arranque de los pilares y su coronación bajo el ábaco, ii) en los nervios que cruzan los ábacos, y iii) en las crucetas de punzonamiento de los ábacos. Además, se colocaron 12 células de carga RTN0.05/10t de HBM en la cabeza de los tres pilares superiores, 4 por pilar y 1 por cada lado.

Los datos se recogieron a una frecuencia de muestreo de 600 Hz en los sensores de desplazamiento, fuerza y aceleración, y a 300 Hz en las galgas extensiométricas, y se almacenaron en un único equipo de adquisición, el *MGC-Plus* de la casa comercial HBM.



Figura 6.22. Instrumentación para medir la aceleración, el desplazamiento y la fuerza en el espécimen. De Izq. a Der.: Acelerómetro sísmico y piezoeléctrico *Brüel&Kjaer*, y sensor láser *KEYENCE*; sensor LVDT *HBM*, y células de carga *HBM*; equipo de adquisición *MGC-Plus* (*HBM*).

7. RESULTADOS II: ESTRUCTURA

A continuación se presentan los resultados del análisis de las señales de EA capturadas durante los experimentos descritos en el capítulo anterior, correspondientes a los ensayos cuasi-estáticos de vigas de HA y a los ensayos dinámicos biaxiales de estructuras de HA.

7.1. Quasi-static test. AE signals analysis

As previously explained, quasi-static tests were intended to study the AE parameters associated with the concrete cracking of RC structural elements under two different modes of failure (flexural failure and shear failure). In particular, the final goal is to establish a way of distinguishing between AE signals originated by concrete cracking caused by bending moments acting RC elements that fail in flexure, and those originated by concrete cracking caused by shear forces in RC elements failing in shear. This discrimination allows to assess the nature of the damage caused in concrete, thus complementing other types of analysis focused rather on quantifying the damage. In terms of structural safety, it is noteworthy the special incidence of shear cracks in structural collapse processes. The limitation of such cracks, therefore, is one of the main axes of action established by the seismic-

resistant standards. This section describes the process carried out to classify AE events.

7.1.1. AE signal filtering

The process of AE signal filtering consists of a succession of steps during which undesired signals (from secondary mechanisms, usually friction) are excluded from the analysis, to keep finally only the transient signals coming from the concrete cracking. In the current study, consisting of quasi-static bending beam tests, the purpose of filtering is removing the continuous signals from the friction of the crack faces and passing the transient AE signals associated with crack formation (Figure 3.16, Chapter 3), since no undesired noise source was detected during the experiment.

RMS filtering

The proposed process consists of two successive filters based on the difference (*DRMS*) and the ratio (*CRMS*) between the RMS values of two windows V_1 and V_2 of the AE signal waveform. The first threshold, $DRMS_{limit}$, is a prefilter set on 0, so all those signals that satisfy $DRMS < 0$ are clearly not transient as they accumulate their energy at the end of the signal, and serves to reduce considerably the size of data to manage in the next filtering step. The second threshold, $CRMS_{limit}$, is the filter that retains the clearly transient signals (C_1) satisfying $CRMS \geq CRMS_{limit}$ by accumulating most of the energy at the beginning, and discriminates the remaining AE signals (C_2). Figure 7.1 depicts two signals belonging to groups C_1 and C_2 .

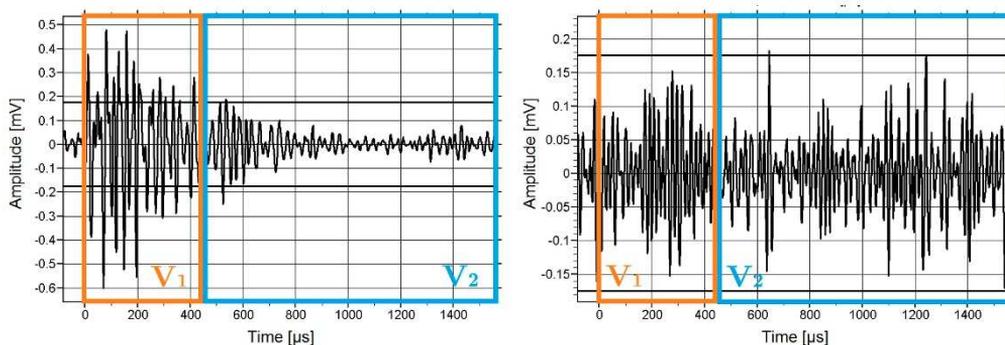


Figure 7.1. Windowing on signals C_1 (left) and C_2 (right).

Section 7.2 will detail in depth how windows V_1 and V_2 are defined, as well as the threshold $CRMS_{limit}$, to determine the signals inherent to concrete cracking. Table 7.1 lists the windows and thresholds defined for each beam.

	V_1 (μs)	V_2 (μs)	$DRMS_{limit}$	$CRMS_{limit}$
V1	0 – 160	160 - 768	0	1.47
V2	0 – 266	266 - 768	0	1.35
V3	0 – 174	174 - 768	0	1.42
V4	0 – 510	510 - 768	0	1.40
V5	0 – 314	314 - 768	0	1.54

Table 7.1. RMS filter for beams V1-V5.

7.1.2. Localization of AE events

During the experiments, the specimens developed concreted cracks due to bending moments and concrete cracks due to shear forces at the expected locations, as can be observed in Figure 7.2. It could be stated, therefore, that the first aim of the tests was satisfied.

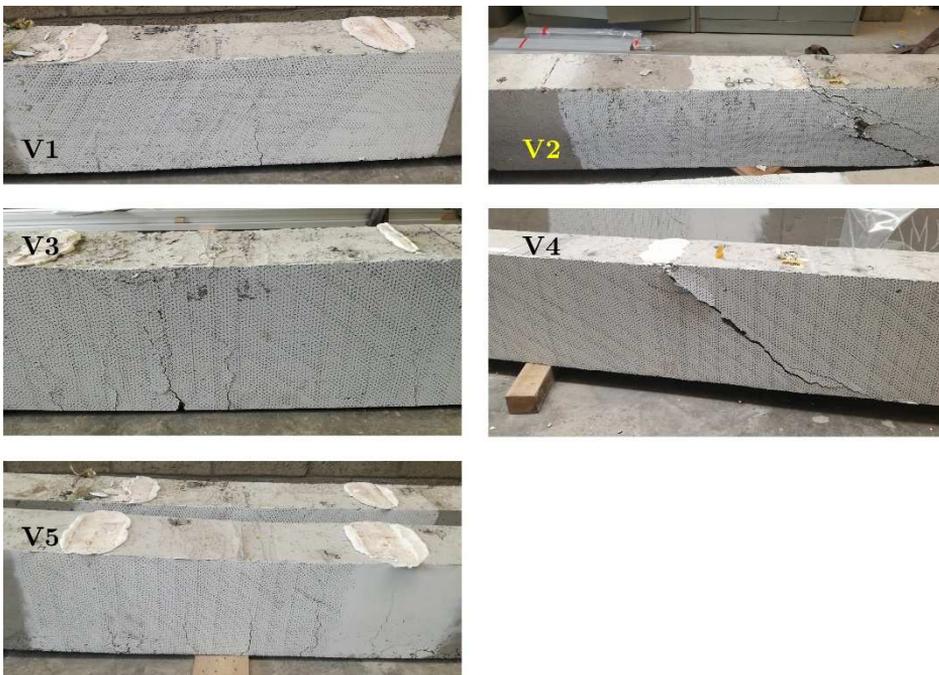


Figure 7.2. Visible cracks in beams V1-V5 after the mechanical test.

In the beams type BD (V1, V3 and V5) the observed cracks were caused by flexure. They developed vertically (i.e. perpendicularly to the axis of the beam), growing from the underside of the beam. Beams type SH (V2 and V4) exhibit concrete cracks caused by shear forces that traced from the supports to the load application points. Figure 7.3 represents schematically the layout of the most important cracks (≥ 2 mm) on the side faces (A and B) and the bottom face (C). Different damage patterns can be distinguished for the prototypes BD and SH.

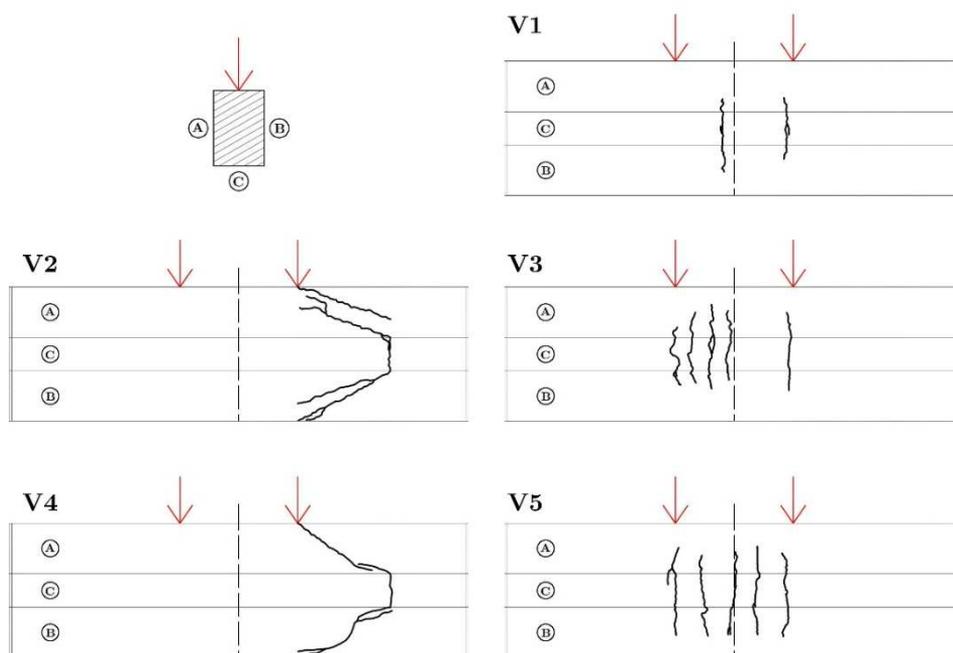


Figure 7.3. Scheme of cracks on beams V1-V5.

It was also a success that the cracks, as planned, formed exactly in the area covered by the AE sensors (see Subsection 6.1.3.), i.e. the localized damage was able to be monitored with the AE method.

Therefore, linear (1D) and planar (2D) localizations of the recorded AE events were carried out during the tests, confirming once again the reliability of the AE method to properly locate the AE sources corresponding to the formation and growth of the previous cracks (Figure 7.2). Figure 7.4 displays

the linear localizations of the beams BD, where the vertical axis expresses the amplitude of the event (the first hit) in decibels (dB_{AE}).

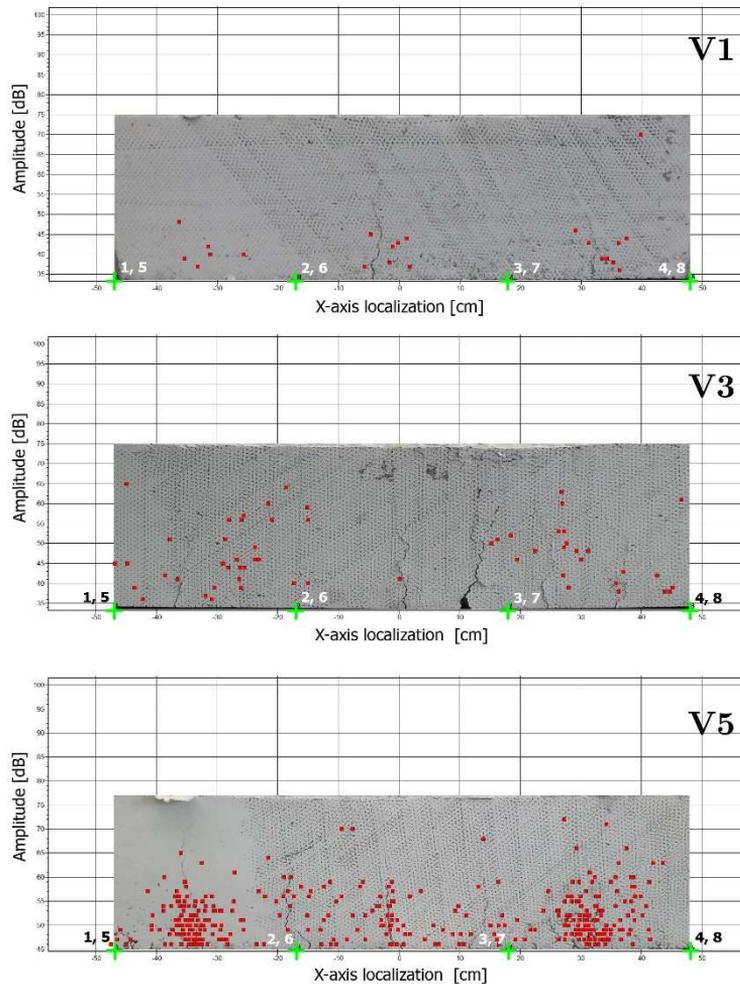


Figure 7.4. Linear localization on beams BD.

The localization of the events fit with the position of the cracks. However, in those cracks near a sensor, localized events are more dispersed, due to two factors:

- The crack acts as a barrier that obstructs the propagation of the wave, thus affecting the times of arrival.
- Increased uncertainty in the algorithm of calculation by moving far away from a second sensor needed for the linear localization.

For the beam V5, this fact can be clearly seen: the events associated with the central and extreme cracks are more concentrated around the crack, while the events of the cracks close to the sensors are more separated from each other.

For beams SH, the linear localization is inappropriate, since the cracks extend in diagonal along a large section of the beam. The events located in the beam V2 are scarce, although they are located around the crack. However, in the beam V4 the number of localized events exhibits an evident concentration around the crack, and even certain events in the center of the span, close to the S5 sensor, probably coming from internal cracks produced by the bending of the beam (Figure 7.5).

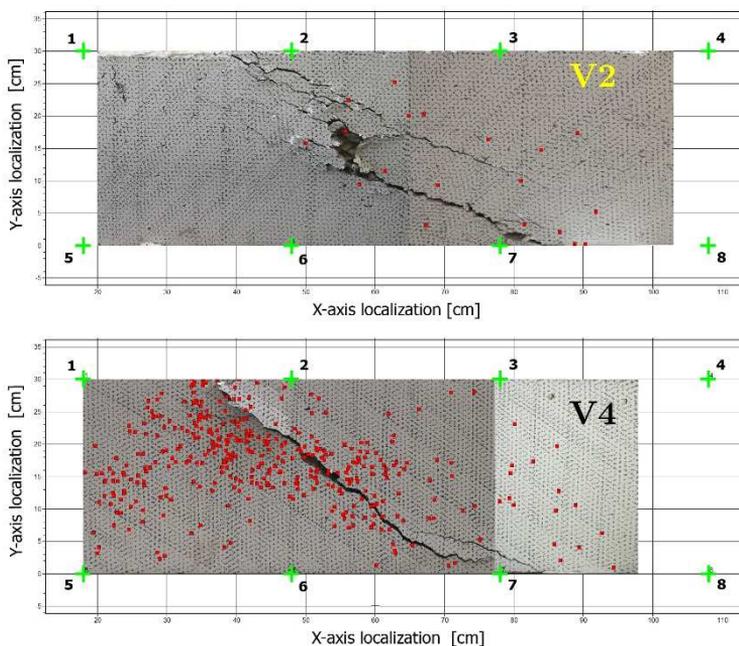


Figure 7.5. Planar localization, beams SH.

In both linear and planar localizations, all sensors were used (1-4 on top, and 5-8 on bottom). In addition, the velocity of the elastic wave in each beam was previously measured with pulses emitted between sensors, and was confirmed with ultrasonic transmission tests. The measured velocities,

shown in Table 7.2, along with the time of arrival of the signals, served as the basis for the acquisition system to calculate the localization of the events.

	V1	V2	V3	V4	V5
Pulse velocity (m/s)	2500	3400	2900	4100	4000
UT velocity (m/s)	3000	3300	3500	3300	3600

Table 7.2. Elastic wave velocity measured on beams V1-V5 after testing.

7.1.3. Discrimination of sources (flexure or shear) of concrete cracking

AF-RA Classification

In the last few years, analyses of AE parameters for discrimination between concrete cracking caused by bending moments (flexion) and those due to shear forces (shear) have been based exclusively on the classification method proposed in code JCMS-III B5706 (Monitoring method for active cracks in concrete by acoustic emission), 2003, by the Federation of Construction Materials Industries (Japan) [40]. The proposed discrimination method consists of studying the distribution of events in the correlation graph from two parameters:

- **Rise Angle (RA):** The quotient of the rise time and the peak amplitude of the signal, expressed in ms/V.
- **Average Frequency (AF):** The result of dividing the counts by the duration of the signal, expressed in kHz.

This way, events with a high AF value and low RA value are associated with flexion cracking mechanisms (referred to as “flexural cracks” hereafter), while those with a low AF value and high RA value are associated with shear cracking (called “shear cracks” hereafter). In order to simplify the analysis, events associated with cracks of mixed nature (third mode) are assumed as shear cracks.

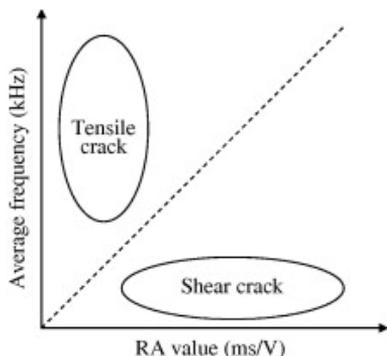


Figure 7.6. Discrimination criterion between tensile (flexural) and shear cracking modes. Source: [42].

Several experiments [23, 36-38, 41, 42] were carried out since the publication of the method in order to validate its reliability, using nevertheless different criteria of separation depending on the range of AF and RA values obtained in each experiment, and consequently, the slope of the line that separates both modes has taken different values: 0.1 Hz*s/V [40], 50 Hz*s/V [42] or 200 Hz*s/V [38].

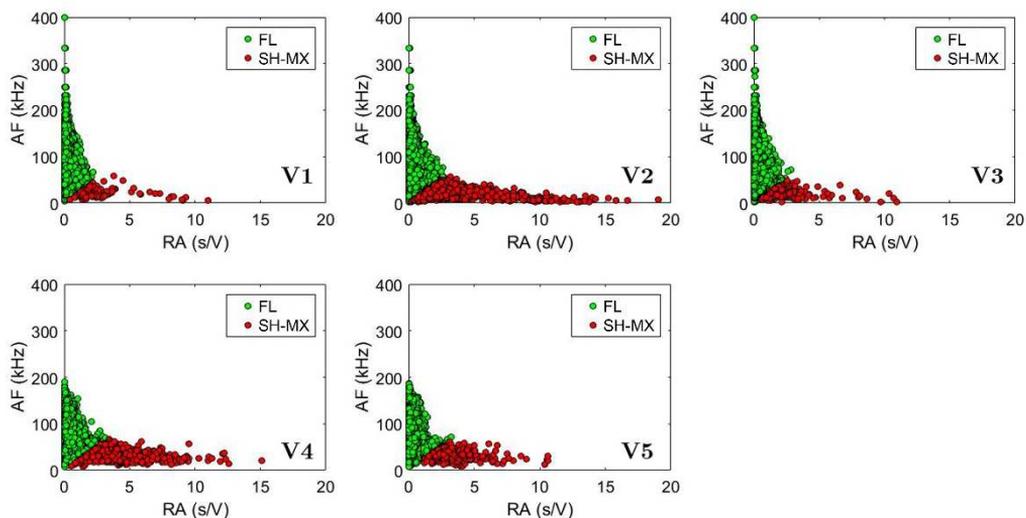


Figure 7.7. AF-RA correlation graph to discriminate flexure mode (FL) and shear or mixed mode (SH-MX).

In the present work, the application of the JCMS-III method is merely the starting point for developing a clear strategy to separate flexure and shear mechanisms. Based on the range of the AF values of [0, 400] kHz and RA

values of $[0, 20000]$ ms/V from the events recorded in the beams V1-V5, a slope of 0.02 Hz*s/V has been established to separate the FL events (flexure mode) and SH-MX events (shear mode or mixed mode), as shown in Figure 7.7.

The events classified as SH-MX reached percentages of 1.11% (V1), 4.66% (V2), 1.71% (V3), 2.37% (V4) and 0.65% (V5) of the total events. As expected, the percentages in V2 and V4 are higher than the percentages reached in V3 (or V1) and V5, respectively. In general, none exceeds 5%, and thus, in all cases SH-MX events are marginal. It should be noted that if higher slopes are chosen, e.g. 0.2 Hz*s/V , the percentage of SH-MX events, e.g. in V2, would increase by up to 42%. This fact proves that the method is subjective and arbitrary, which allows any interpretation to be adjusted to the results of the experiment performed.

RT Classification

Based on the above classification, an analysis of AE parameters free of arbitrariness in the separation criterion can be inferred. In this way, for example, by representing the rise time (RT) of the events previously classified as FL and SH-MX against time, we can observe how the events are separated into two well distinguished clusters: on the one hand, the events whose rise time is $RT \geq 700 \mu\text{s}$, classified previously mostly as SH-MX, are associated with the shear or mixed mode; on the other hand, the events whose rise time is $RT \leq 500 \mu\text{s}$, are almost in exclusive events classified previously as flexure mode FL. Figure 7.8 shows this analysis applied on beams V4 and V5, where the population of events is large enough to be considered representative.

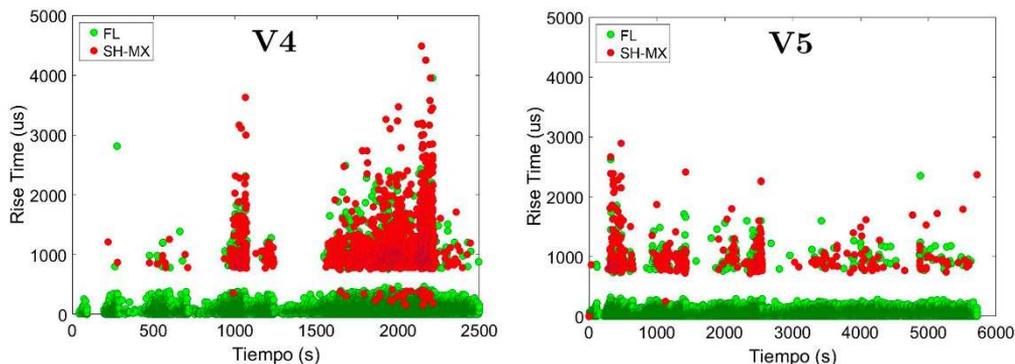


Figure 7.8. Events FL and SH-MX in the RT-Time correlation graph.

On this basis, a more objective separation criterion is proposed:

$RT \leq 500 \mu s \rightarrow$ Flexural cracks;

$RT > 500 \mu s \rightarrow$ Shear cracks or mixed cracks;

It should be underlined that some events, considered flexure mode events (FL) in the initial AF-RA classification, are associated, according to the RT classification, with the shear or mixed mode.

Using the previous AF-RA graphs and separating the events according to the proposed RT classification, two well-compacted clusters could be distinguished (Figure 7.9).

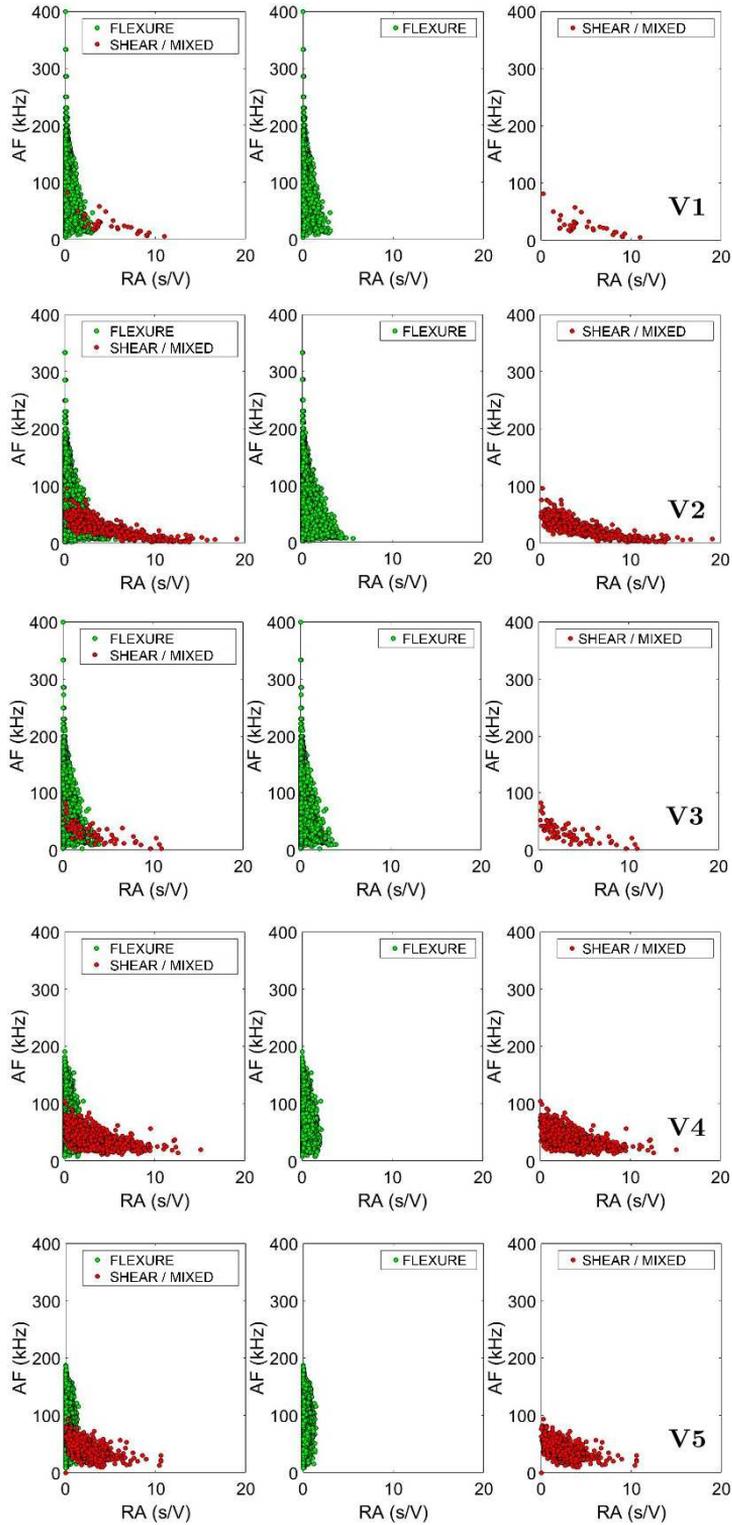


Figure 7.9. RT classification on AF-RA correlation graph.

The next section contains the results of the quasi-static tests obtained on the beam V2-V5, since the beam V1 test was initially envisaged as an exploratory test identical to that applied on the beam V3. These results are based on the RT classification proposed in this work.

7.1.4. Results and Discussion

Localization of AE events

The proportion of the events associated to the shear cracks or mixed cracks with the RT classification was 1.03% (V2), 0.22% (V3), 3.79% (V4) and 3.59% (V5) of the total events. The most noteworthy fact is that, once again, the percentages are below 5%, meaning a residual proportion of cracks from shear (or mixed) even in the tests of beams SH (V2 and V4). Moreover, if the analysis is focused on localized events, the events associated with the shear are practically inexistent, as can be seen in Figures 7.10 and 7.11.

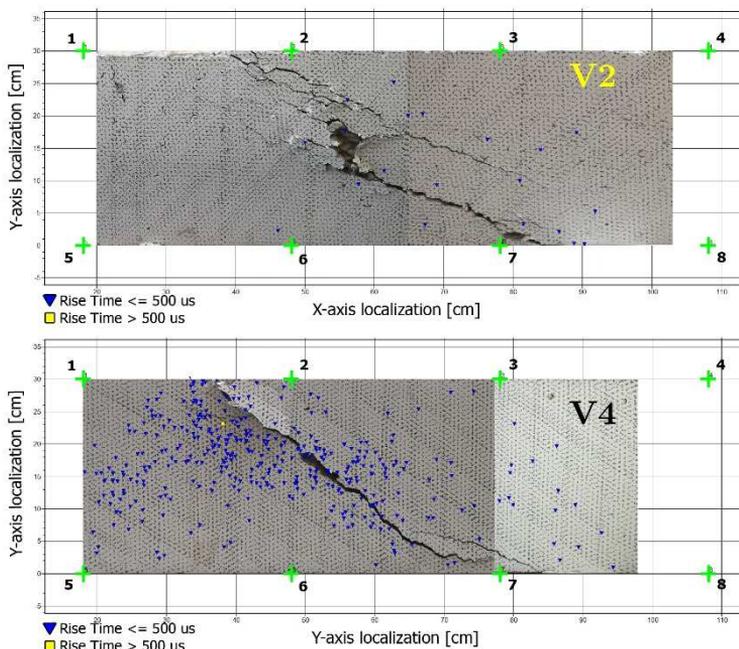


Figure 7.10. Planar localization of events in beams SH. Flexure mode ($RT \leq 500 \mu s$) and shear or mixed mode ($RT > 500 \mu s$).

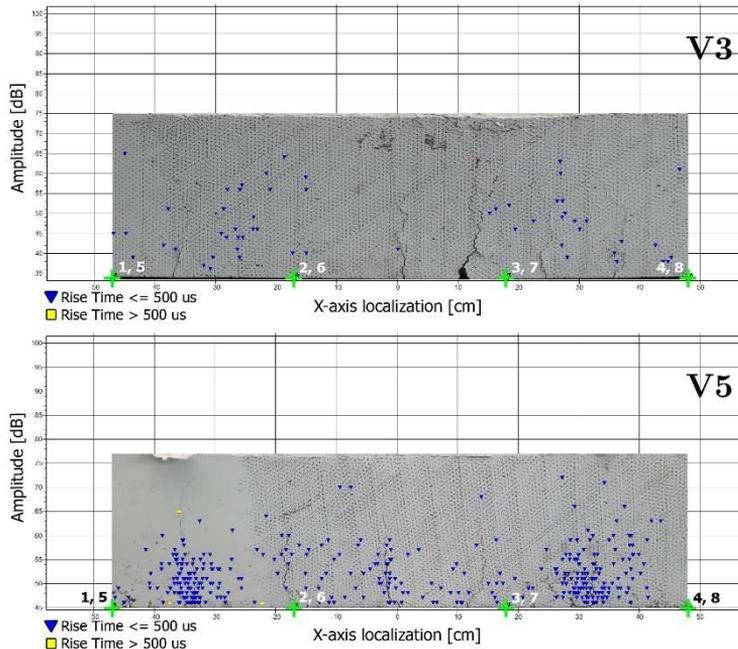


Figure 7.11. Linear localization of events in beams BD. Flexure mode ($RT \leq 500 \mu\text{s}$) and shear or mixed mode ($RT > 500 \mu\text{s}$).

The marginal shear mode in beams SH can be understood by studying the tracing of the main crack. It is assumed that the principal tension stresses caused by shear forces (shear mode) are much lower than the principal tension stresses due to bending moments (flexure mode). The AE signals associated with the shear mode appear, rather, when the blocks on both sides of the crack slide on each other in the direction of the crack.

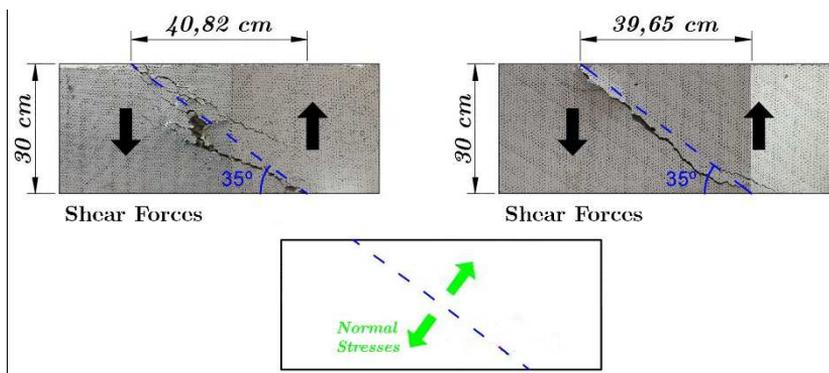


Figure 7.12. Forces and stresses on shear cracks of beams SH.

AE Energy

The AE energy is one of the AE parameters that best characterize the damage of a structure both quantitatively and qualitatively, and is usually used in the monitoring of elements under stress, since it reveals useful information related to the health condition of the structure.

Regarding the quasi-static tests, the accumulated AE energy curves of the classified events have been analyzed in order to extract information about each of the two types of cracks (i.e. caused by bending or by shear).

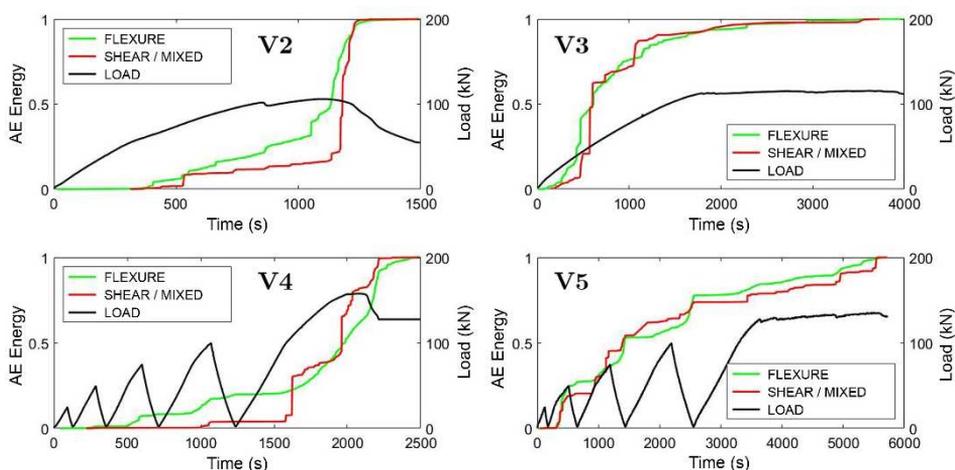


Figure 7.13. Accumulated AE energy curve of flexure and shear (or mixed) modes.

The AE energy curves, normalized in Figure 7.13 between 0 and 1, exhibit different behavior depending on whether the crack is caused by flexure or by shear, especially in beams SH. The cumulative curve associated with the flexure mode is progressively increasing, while the curve associated with the shear mode is characterized by sudden jumps. The magnitude of these leaps can be seen in Figures 7.14 and 7.15, which represents the derivative of the accumulated AE energy curves respect to time.

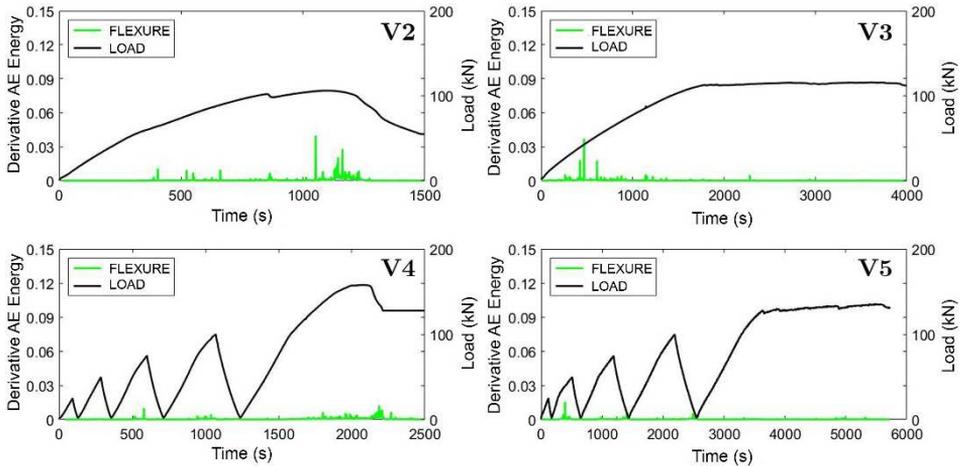


Figure 7.14. The derivative of the accumulated AE energy with respect to time, flexure mode.

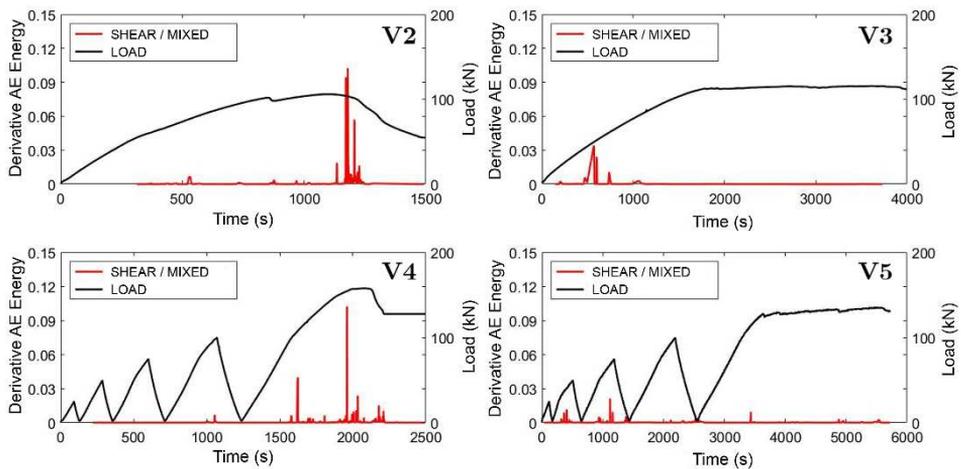


Figure 7.15. The derivative of the accumulated AE energy with respect to time, shear (or mixed) mode.

Indeed, from the peaks of the derivative one can obtain relevant information of the two failure modes, flexure and shear, in the two types of beam, BD and SH. Firstly, in the beams SH (V2 and V4) the jumps take place at the end, just at the breaking point, i.e. the point from which the load decreases even if the beam is still deforming. The most abrupt jumps, as mentioned above, occur in the curve associated with the shear mode where the derivative reaches values of 0.10, while the jumps in the flexure mode curve hardly reach 0.04. On the other side, the jumps in the beams BD (V3 and

V5), which in any case exceed 0.04, occur at the beginning, when the cracks start to open. In summary, studying the magnitude and instant in which the jumps of the accumulated energy take place, a clear difference in the behavior of the beams SH and the beams BD can be found. With the respect to the unequal behavior of the curves corresponding to the two modes, it seems evident that the RT classification proposed in this work, beyond being free of subjectivity, it is also an effective strategy to discriminate the sources (flexure or shear) of concrete cracking.

7.2. Ensayos sísmicos. Análisis de señales EA

Dado que el objetivo principal del experimento era estudiar la evolución de daño en el hormigón durante los ensayos sísmicos, se escogió el parámetro de energía para estimar el grado y el volumen de hormigón fisurado, ambos relacionados directamente con la severidad del daño. En efecto, parece bastante razonable asumir que la formación o crecimiento de grandes grietas va acompañado de una liberación importante de energía en forma de onda mecánica, mientras que los pequeños agrietamientos van asociados a pequeñas liberaciones de energía. Por lo tanto, los resultados del experimento realizado en los especímenes BS1 y BS2 se basan en el análisis de la energía de EA y de la energía de deformación plástica liberada por el hormigón fisurado.

7.2.1. Filtrado de señales de EA

Dada la complejidad del montaje general de los ensayos sísmicos y las numerosas fuentes de ruido, las señales de EA registradas tuvieron que pasar por sucesivos filtros de forma que sólo las señales transitorias propias de la fisuración del hormigón fueron retenidas. Hay que recordar que durante la adquisición de las señales, el sistema ya se configuró para que realizase un filtrado previo en función de la frecuencia y la amplitud (umbral), impidiendo que se registrase gran parte de las señales que no son de interés en este estudio. Así por ejemplo, las señales de emisión acústica que se producen durante la plastificación del acero, son de baja amplitud y quedan

filtradas por el umbral elegido, pues no son el objeto de estudio. El resto del proceso de filtrado se desgrana a continuación.

Sensores guarda y sensores de monitorización

Los sensores S17 y S9, dispuestos en la coronación de los pilares superiores, y el sensor S18, cerca de la rótula frontal, se configuraron como sensores guarda. Esto significa que cualquier evento cuyo primer *hit* sea detectado por estos sensores se excluye del análisis. De esta forma se consigue eliminar todas las señales que provienen de la fricción en las dos rótulas superiores y la frontal, al considerarlas fuentes de ruido indeseado.

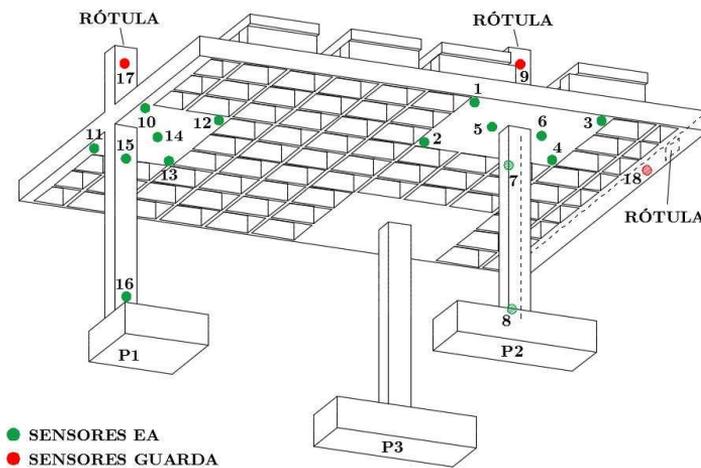


Figura 7.16. Distribución de los sensores guarda en el espécimen.

El resto de sensores se han destinado a monitorizar las cuatro zonas que se pretenden estudiar en estos ensayos. Cada una de estas zonas se analizó independientemente de las otras, aunque en todas se aplicó el mismo filtro de duración, al observar que en todos los casos las señales de duración superior a $8000 \mu\text{s}$ eran señales continuas asociadas a mecanismos de fuente secundarios, tipo fricción.

Zona	Descripción	Sensores
ABE	Unión Ábaco-Pilar Exterior (P1)	S16
ABI	Unión Ábaco-Pilar Interior (P2)	S8
BPE	Base de Pilar Exterior (P1)	S10, S11, S12, S13, S14 y S15
BPI	Base de Pilar Interior (P2)	S1, S2, S3, S4, S5, S6 y S7

Tabla 7.3. Sensores usados en cada zona monitorizada.

Una vez establecidos los sensores guarda y los sensores de monitorización para cada zona, se procedió a dos procesos independientes de filtrado para excluir señales continuas y dejar pasar las señales transitorias: uno basado en el error cuadrático medio (RMS) y otro basado en la gráfica amplitud-duración de las señales.

Filtrado RMS

Este filtrado se basa en el cálculo del RMS en dos ventanas de la señal, V_1 y V_2 , que se han determinado en función de la duración media de todas las señales que han pasado los filtros anteriores. Así pues, la primera ventana V_1 abarca desde que la señal cruza por primera vez el umbral hasta que alcanza la duración media (DM), es decir $[0, DM] \mu s$. A partir de este tiempo, se inicia la ventana V_2 , la cual se extiende hasta el final de la señal, es decir $[DM, 1558,4] \mu s$.

$$RMS_{V_1} = \sqrt{\frac{1}{dm} \sum_{i=0}^{dm} x_i^2}; \quad RMS_{V_2} = \sqrt{\frac{1}{1948-dm} \sum_{i=dm}^{1948} x_i^2}; \quad (7.1)$$

Nótese que dm es el número de datos que corresponde a la duración DM, y que los 1948 datos corresponden a los 1558,4 μs de duración de cada señal, según la frecuencia de muestreo elegida durante la adquisición.

Dos filtros RMS se aplicaron de forma consecutiva (en cascada):

Filtro *DRMS*: La diferencia entre los valores RMS_{V_1} y RMS_{V_2} es la que determina si se eliminan las señales o no:

$$DRMS = RMS_{V_1} - RMS_{V_2}; \quad (7.2)$$

siendo el valor $DRMS_{límite}=0$ el umbral elegido, de forma que se excluyen las señales para las que $DRMS<0$, es decir, aquellas que acumulan más energía en su parte final (en la ventana V_2).

Filtro $CRMS$: Es el cociente de los valores RMS_{V_1} y RMS_{V_2} el que determina si se eliminan las señales o no:

$$CRMS = \frac{RMS_{V_1}}{RMS_{V_2}}, \quad (7.3)$$

El umbral $CRMS_{límite}$ divide las señales en dos grupos, C_1 y C_2 . El grupo C_1 lo integran señales transitorias que cumplen $CRMS \geq CRMS_{límite}$, las cuales acumulan casi toda la energía al principio (en la ventana V_1), y que son ligadas a procesos de agrietamiento en el hormigón. El grupo C_2 , en cambio, está formado por señales continuas donde $CRMS < CRMS_{límite}$, y que se excluyen del análisis, por considerarse asociadas a procesos de fricción (véase Figure 7.1).

Con la ayuda de un algoritmo se ha calculado la intersección entre los dos clústeres de señales C_1 y C_2 en la gráfica de amplitud-duración, tomando valores del umbral entre 1,00 y 3,00 cada 0,01. El algoritmo no tuvo en cuenta algunas señales anómalas en la gráfica amplitud-duración, las cuales se detectaron con el algoritmo *Outliers in Multivariate Data* [77]. En las Figuras 7.17 y 7.18 se representan las señales cuya distribución en la gráfica se considera anómala en relación a la población total, según este algoritmo utilizado.

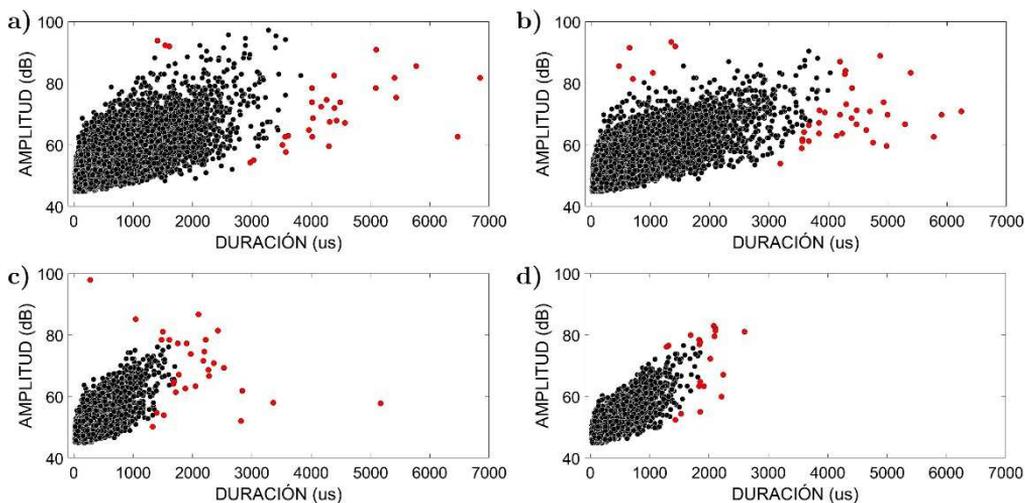


Figura 7.17. Detección de señales anómalas en las gráficas de amplitud-duración en el espécimen BS1. a) ABE. b) ABI. c) BPE. d) BPI.

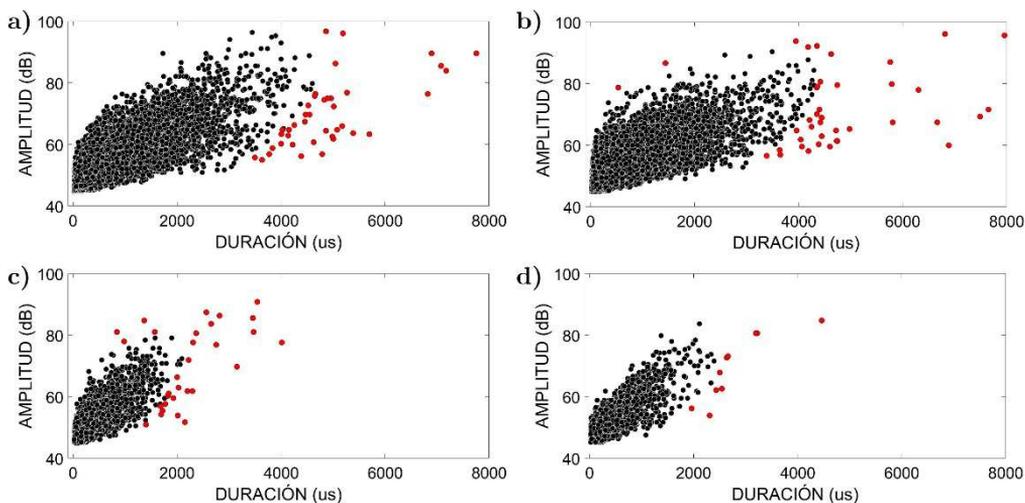


Figura 7.18. Detección de señales anómalas en las gráficas de amplitud-duración en el espécimen BS2. a) ABE. b) ABI. c) BPE. d) BPI.

Una vez realizados todos los cálculos, sólo se consideró el rango de valores $CRMS_{límite}$ en el que el área de intersección entre los dos clústeres es menor o igual al 80% del área de cada uno de ellos por separado. Finalmente, el valor $CRMS_{límite}$ escogido para el filtrado correspondió a la intersección mínima obtenida dentro del rango considerado.

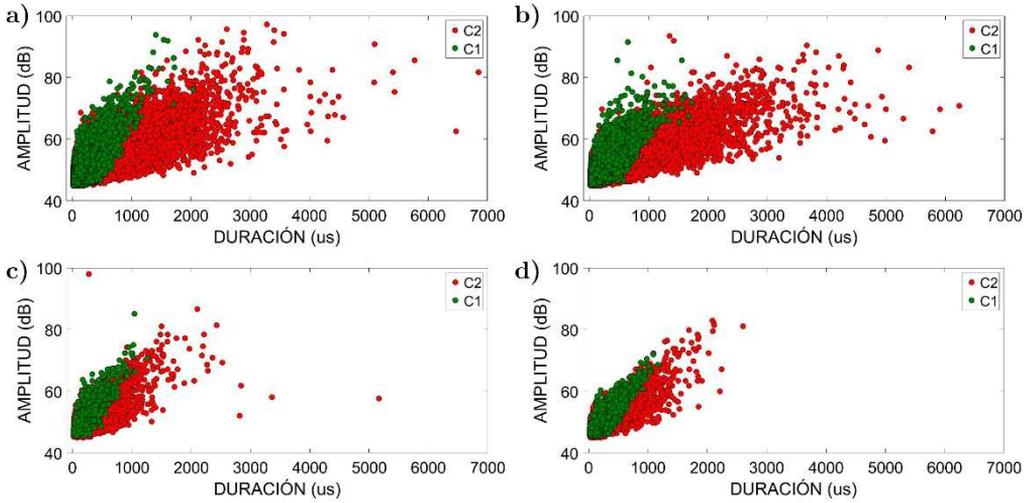


Figura 7.19. Clústeres C_1 y C_2 para el espécimen BS1 en cada zona del mismo. a) ABE. b) ABI. c) BPE. d) BPI.

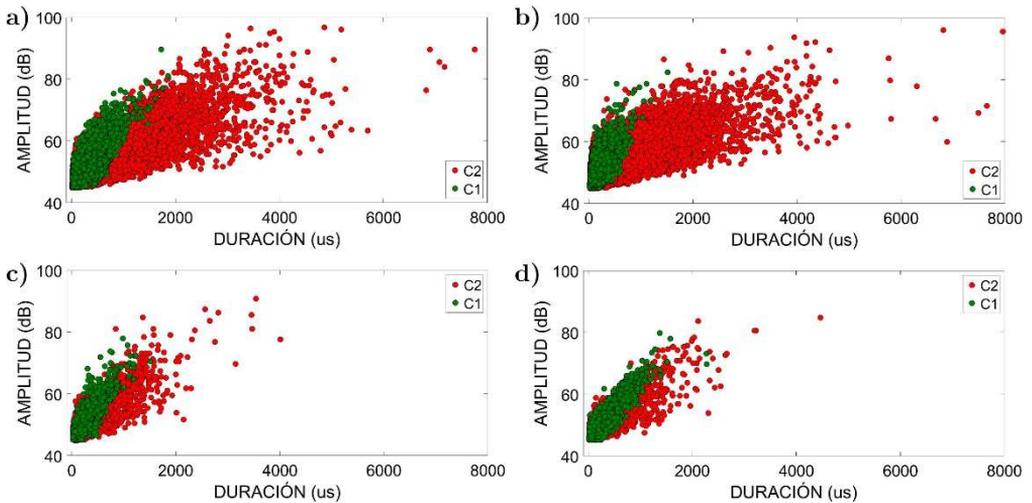


Figura 7.20. Clústeres C_1 y C_2 para el espécimen BS2 en cada zona del mismo. a) ABE. b) ABI. c) BPE. d) BPI.

El algoritmo de cálculo de la intersección de clústeres se aplicó por separado para cada una de las zonas. La separación de los grupos C_1 y C_2 para cada caso resultó tal y como se ve en las Figuras 7.19 y 7.20. Se puede apreciar que el clúster C_1 está inferiormente delimitado por una recta imaginaria diagonal, y que todas las señales que se encuentran debajo de ésta, de baja amplitud y larga duración, pertenecen al clúster C_2 .

A modo de resumen, se presentan los valores límites del filtrado RMS que se han obtenido para cada una de las zonas estudiadas (Tabla 7.4). Cabe destacar la similitud entre los valores de $CRMS_{límite}$ obtenidos en las distintas zonas, todos dentro del rango 1,42-1,52 para el BS1 y 1,40-1,52 para el BS2. Esto demuestra la robustez del algoritmo utilizado para elegir el umbral de filtrado.

Espécimen BS1					
	DM (μ s)	V ₁ (μ s)	V ₂ (μ s)	$DRMS_{límite}$	$CRMS_{límite}$
ABE	450	0 - 450	450 - 1558,5	0	1,49
ABI	430	0 - 430	430 - 1558,5	0	1,42
BPE	320	0 - 320	320 - 1558,5	0	1,52
BPI	350	0 - 350	350 - 1558,5	0	1,46

Espécimen BS2					
	DM (μ s)	V ₁ (μ s)	V ₂ (μ s)	$DRMS_{límite}$	$CRMS_{límite}$
ABE	520	0 - 520	520 - 1558,5	0	1,46
ABI	450	0 - 450	450 - 1558,5	0	1,52
BPE	330	0 - 330	330 - 1558,5	0	1,47
BPI	405	0 - 405	405 - 1558,5	0	1,40

Tabla 7.4. Filtrado RMS en los especímenes BS1 y BS2.

Filtrado Amplitud-Duración

Se aplicó así mismo una variante del filtro Swansong [78] propuesto por primera vez por la *Association of American Railroads* (AAR) en 1999, cuando se observó que algunos mecanismos secundarios como la fricción mecánica se caracterizan por una larga duración y una baja amplitud. Para los especímenes BS1 y BS2, se utilizaron valores límite propuestos previamente en la literatura [79] para estructuras de HA de la misma dimensión, puesto que concordaban con lo observado al examinar las formas de onda de las señales de EA. La Tabla 7.5 recoge estos valores límite para la duración y la amplitud.

Amplitud (dB _{AE})	Duración (μs)
41 – 43	>400
44 – 45	>500
46 – 47	>600
48 – 49	>650
50 – 53	>820
54 – 56	>940
57 – 65	>1080
66 – 100	>1400

Tabla 7.5. Límites de duración en el filtrado Swansong para excluir señales indeseadas en estructuras de HA. Fuente [78].

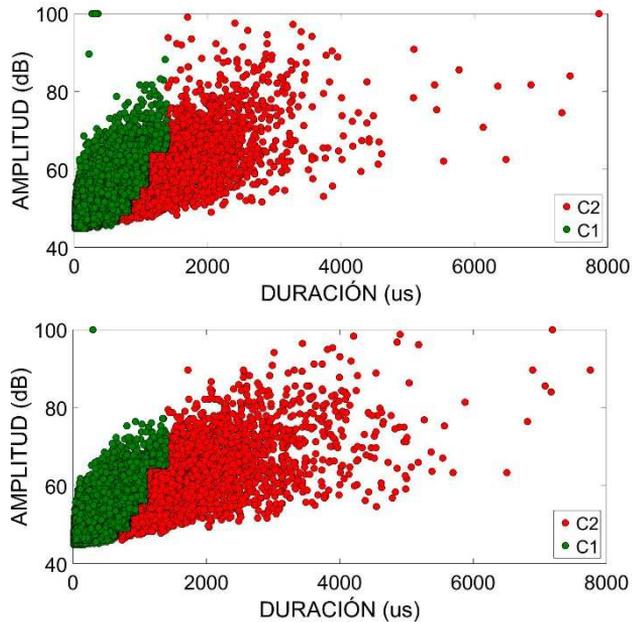


Figura 7.21. Filtro Swansong aplicado en señales de la zona ABE. Especímenes BS1 (arriba) y BS2 (abajo).

Se puede ver cómo los clústeres C_1 y C_2 se distribuyen en la gráfica igual que con el filtro RMS (Figuras 7.19 y 7.20), ya que las señales de baja amplitud y larga duración son excluidas en ambos casos. De hecho, en la Figura 7.22 se representa la energía de EA acumulada a lo largo de los ensayos sísmicos, utilizando las señales de EA que han pasado por los filtros

RMS y Swansong (SWS), en la cual se puede apreciar cómo ambas curvas tienen prácticamente el mismo trazado, lo cual significa que ambos filtrados son básicamente similares para el propósito de este estudio.

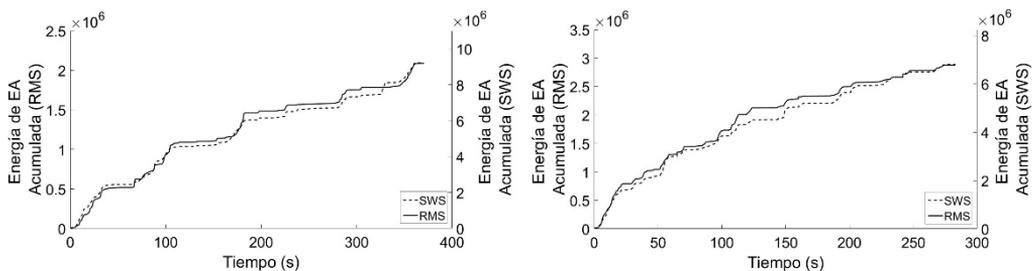


Figura 7.22. Energía de EA acumulada a partir de señales obtenidas por filtrado RMS (línea continua) y por filtrado Swansong (línea discontinua) en zona BPE del BS1 (izq.) y la zona BPI del BS2 (der.).

En lo que sigue, los resultados que se presentan corresponden a la utilización del filtrado RMS.

7.2.2. Energía de EA

Las señales transitorias que pasaron los filtros se consideraron procedentes de la fisuración del hormigón debido a las características de su forma de onda, principalmente:

- La mayor parte de energía de la señal está concentrada en su inicio.
- Las frecuencias dominantes se ubican en la banda 45-65 kHz, de acuerdo a los resultados obtenidos previamente en ensayos similares [35, 80], y con el tipo de sensores utilizados.

En la Figura 7.23 se muestra la forma de onda en el dominio temporal y el espectro de frecuencias de una señal de EA típica en los procesos de apertura y crecimiento de fisuras.

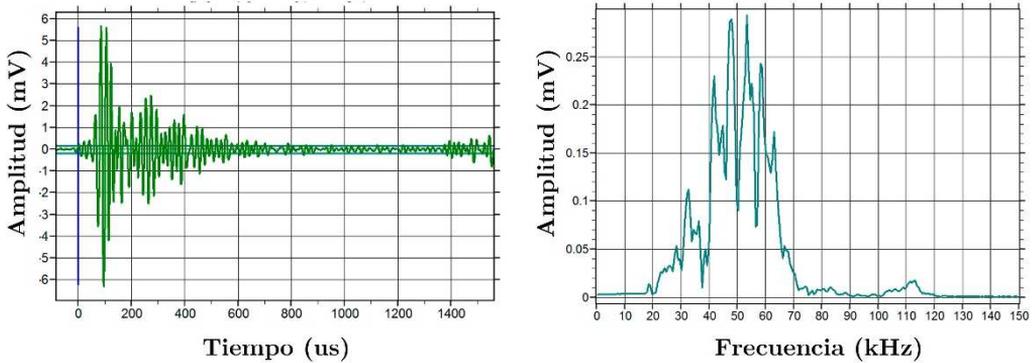


Figura 7.23. Señal de EA del clúster C_1 asociada a la fisuración de hormigón.

Para las señales C_1 se ha calculado la energía verdadera a través de la fórmula:

$$E_{EA} = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^N (|x_i|^2 \cdot s); \quad (7.4)$$

donde R es la resistencia de referencia de $10 \text{ k}\Omega$, x_i es el voltaje de la muestra i en voltios, N es el número total de muestras de la señal, y s es el intervalo de muestreo, de $0,8 \text{ }\mu\text{s}$ en nuestro caso. La energía verdadera de EA, E_{EA} , se obtiene en attojulios (10^{-18} julios).

La fisuración del hormigón es un proceso de degradación irreversible, es decir, el estado de salud del hormigón en un momento dado es el resultado de la acumulación de daño producido durante todo el proceso. Por lo tanto, es conveniente expresar la energía liberada durante la fisuración en términos acumulativos para estimar el nivel de daño en el material. En el caso de la energía de EA, se puede analizar la acumulación de daño de dos formas:

- **Temporalmente**, estudiando la evolución del daño a lo largo de las sucesivas simulaciones sísmicas. Este análisis permite relacionar en el tiempo el daño que se va acumulando en la estructura con la variación de factores externos que lo provocan. En los ensayos sísmicos, la aceleración que el forjado experimenta durante las simulaciones (aceleración de respuesta) es una variable crítica que gobierna el nivel

de daño estructural [81]. Esta aceleración de respuesta está relacionada con la aceleración del suelo.

- **Espacialmente**, localizando los eventos de EA asociados a la fisuración dentro de los elementos de HA. En el Capítulo 3 se ha mencionado la capacidad del método de EA para la localización de los eventos de EA, y su análisis resulta oportuno para obtener más información sobre la fuente de los mismos. Así, se cuenta con herramientas adicionales para decidir sobre la naturaleza del proceso que ha originado los eventos de EA. Este tipo de análisis permite asimismo realizar un mapeo en el que no sólo se refleja la distribución de los eventos dentro del elemento, sino también la intensidad de cada uno de ellos. Dicho de otra manera, se pueden localizar zonas con mayor o menor número de grietas en formación o crecimiento, pero también se puede determinar su magnitud.

La energía de EA acumulada en el tiempo se representa en la Figura 7.24 para los ábacos exterior (ABE) e interior (ABI) de los dos especímenes. En líneas generales, el ratio de crecimiento de la curva es uniforme, con un incremento brusco al inicio de la última simulación. También se puede observar que en el ábaco interior del espécimen BS2, el daño durante las simulaciones B15% y B25% es mínimo, produciéndose un gran salto durante la simulación B50%. Esto se debe probablemente a que durante las dos primeras simulaciones el ábaco interior se mantuvo prácticamente elástico (sin apenas fisuración en el hormigón), y la plastificación se inició en la tercera simulación.

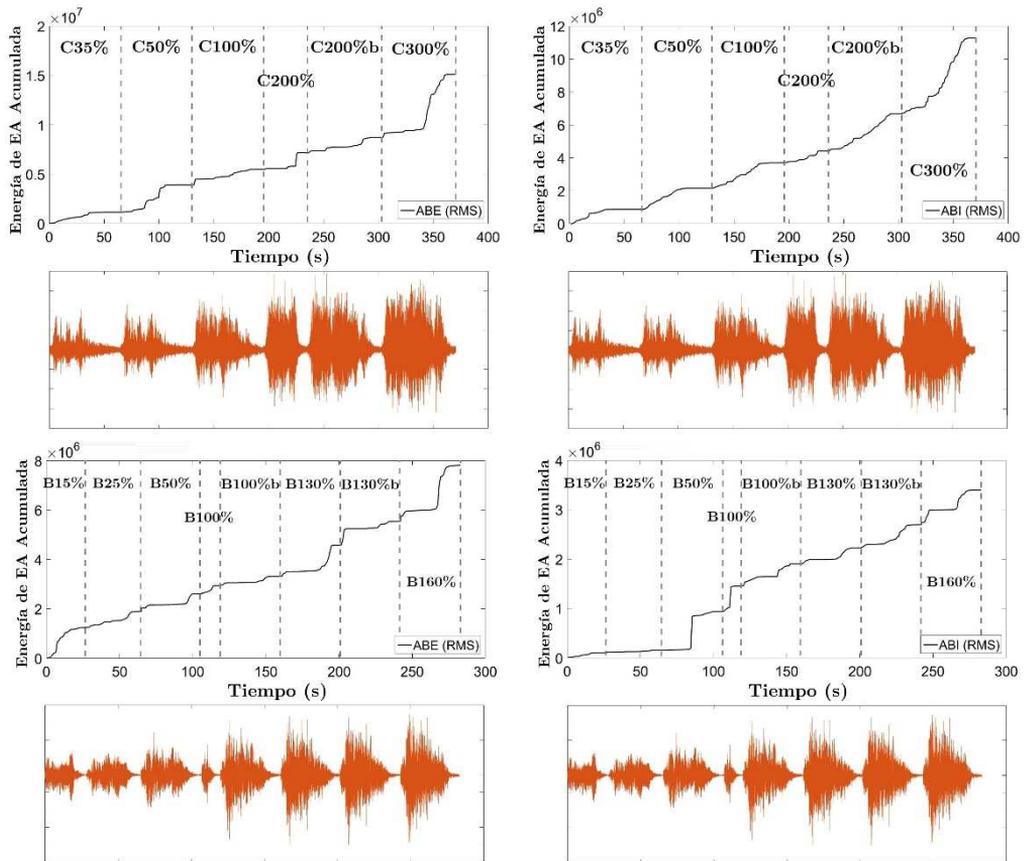


Figura 7.24. Energía de EA acumulada en las zonas ABE y ABI de los especímenes BS1 (arriba) y BS2 (abajo).

Comparando el ábaco exterior con el interior, en términos cuantitativos, se puede comprobar que la energía acumulada es mayor en el primero. Esto se explica por el hecho de que la unión ábaco-pilar exterior es la parte crítica de la estructura y en ella se concentró el daño. Además, la conexión exterior está sometida a deformaciones impuestas provenientes de la torsión de la estructura, que mayores son mayores que en la conexión interior. Conviene así mismo apuntar que el volumen de la zona monitorizada con EA es un factor relevante que influye en la cantidad de señales de EA detectadas. Teniendo en cuenta que el volumen del ábaco interior es un 50% mayor que el exterior, resulta fácil deducir que la diferencia de daño, a igual volumen, sería incluso mayor que la reflejada en las gráficas de energía de EA acumulada. De hecho, la inspección visual después del ensayo reveló una

importante diferencia de daño entre las dos zonas: mientras que en la zona ABE se aprecian unas grietas que atraviesan todo el ábaco, en la zona ABI el daño se reduce a un pequeño desprendimiento en una de las esquinas del pilar (BS1) o simplemente queda indemne (BS2).

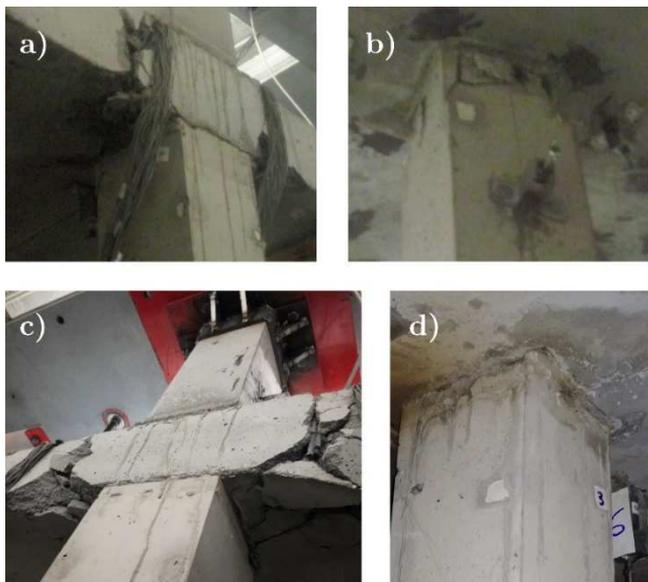


Figura 7.25. Daño observado en las zonas ABE y ABI del espécimen BS1.

Localización de eventos de EA

Por otra parte, la localización planar (2D) de eventos de emisión acústica llevada a cabo en los ábacos, expuesta en la Figura 7.26, confirma la concentración de eventos en la unión ábaco-pilar, en concordancia con lo esperado, así como lo observado en la inspección visual posterior a los ensayos. Los eventos localizados se clasificaron en 3 grupos dependiendo de su energía de EA: i) baja energía (cuadrado celeste), ii) energía moderada (triángulo azul) y iii) alta energía (cuadrado rojo). Una vez más, se pone de manifiesto el daño importante producido en el ábaco exterior, donde se han localizado algunos eventos de elevada energía procedentes de la formación o crecimiento de grandes grietas que cruzaron todo el espesor del ábaco. En el ábaco interior, en cambio, se registraron eventos más débiles. Es preciso señalar que el número de eventos localizados no refleja la cantidad de actividad de EA producida, dado que la localización del evento no siempre

es posible en materiales de grano grueso como el hormigón, y se ve afectada por factores como el trayecto seguido por la onda, que puede no ser directo, o la fuerte atenuación, entre otros.

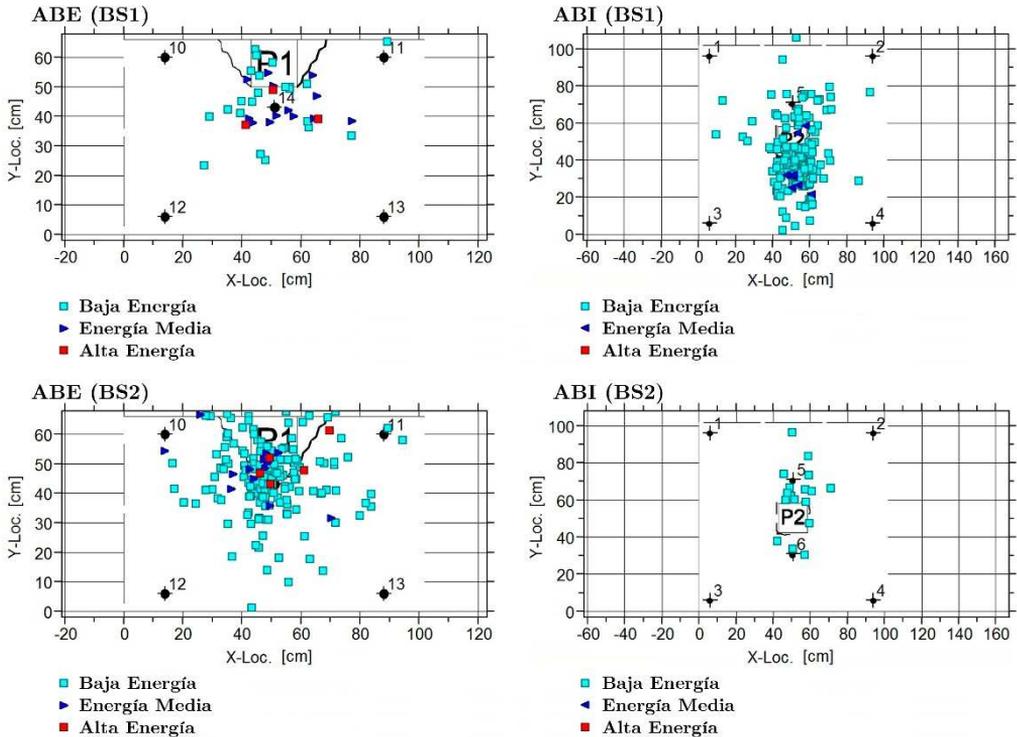


Figura 7.26. Localización planar en los ábacos exterior e interior

Clasificación RT

La estrategia de separación entre los modos de fisuración de flexión (apertura) y cortante (o mixto) propuesta anteriormente para los ensayos cuasi-estáticos en vigas de HA, se ha aplicado también en las estructuras bidireccionales BS1 y BS2 sometidas a ensayos sísmicos.

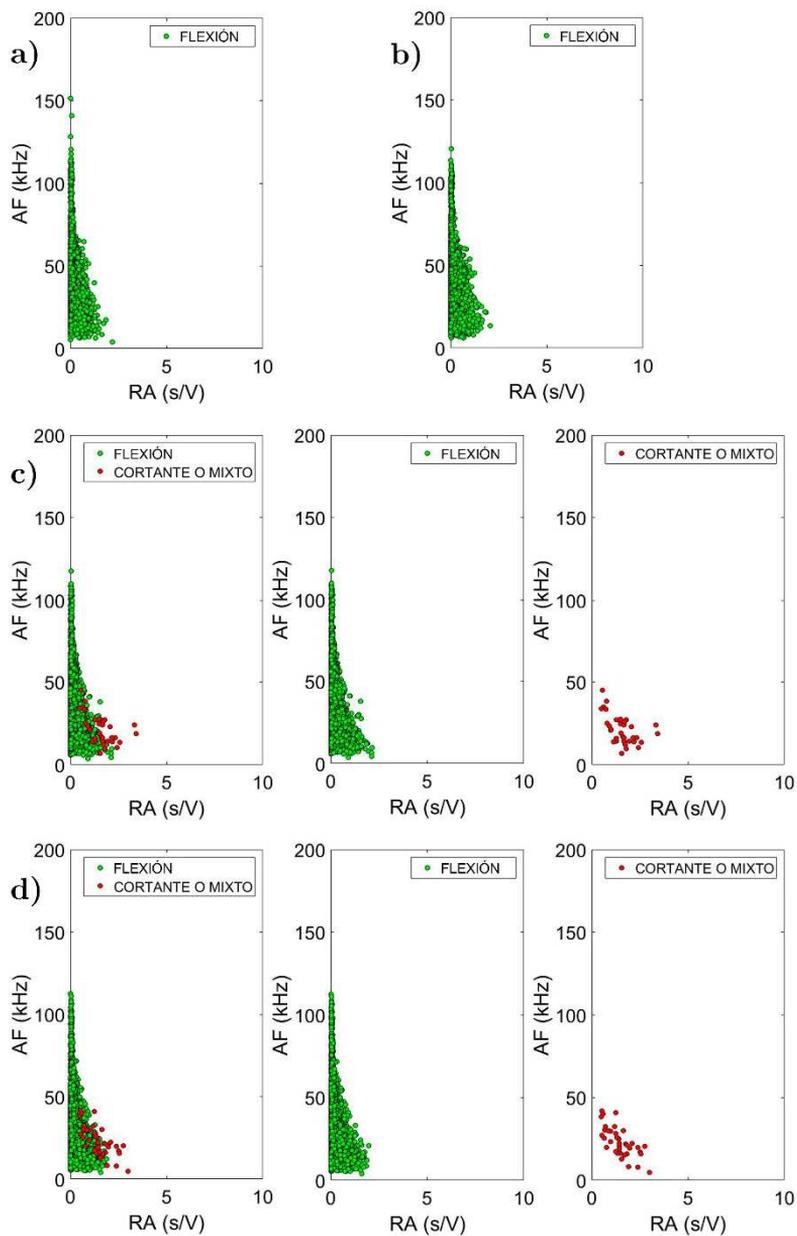


Figura 7.27. Clasificación RT en la gráfica AF-RA en BS1, zonas a) ABE, b) ABI, c) BPE y d) BPI.

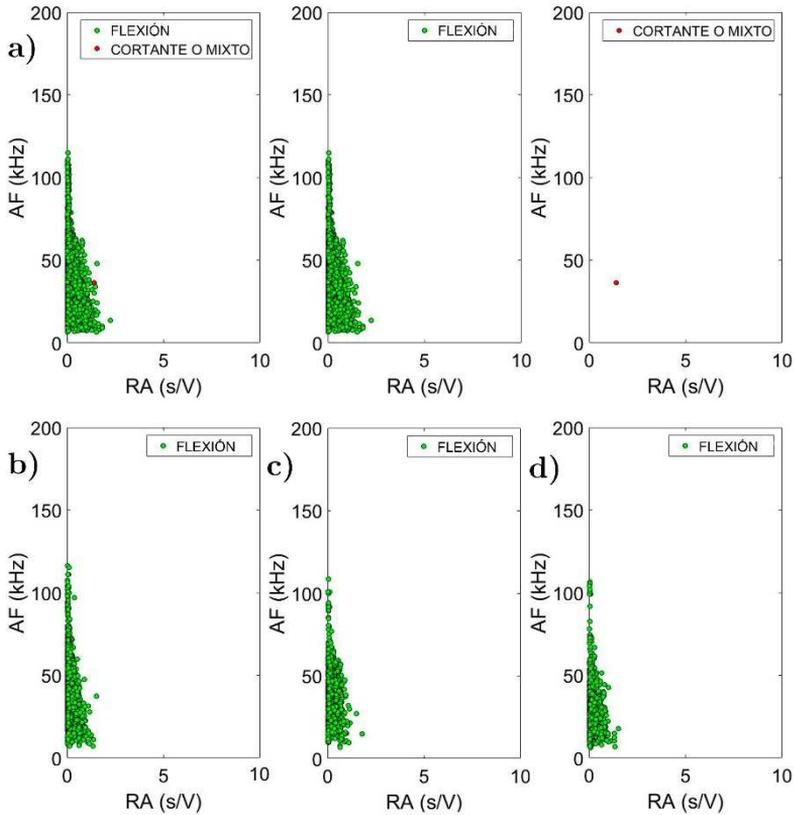


Figura 7.28. Clasificación RT en la gráfica AF-RA en BS2, zonas a) ABE, b) ABI, c) BPE y d) BPI.

En las Figuras 7.29 y 7.30 se muestran los gráficos AF-RA, clásicamente utilizados para la separación de los modos de fisuración, en los que se clasifican las señales de flexión y cortante siguiendo el criterio previamente establecido de $RT \leq 500 \mu s$ y $RT > 500 \mu s$, respectivamente. Las señales clasificadas en el segundo grupo son, como en el caso de las bases de pilar de BS1, prácticamente inexistentes ($< 1\%$), o como en el resto de casos, completamente inexistentes. Este hecho resulta del todo coherente, e incluso satisfactorio, teniendo en cuenta que con el dimensionamiento de la estructura se pretendió limitar la formación de grietas a cortante puesto que aceleran los procesos de colapso estructural en elementos de hormigón.

7.2.3. Energía de deformación plástica del hormigón

Como se ha indicado en capítulos anteriores, queda fuera del ámbito de esta Tesis la investigación sobre la respuesta sísmica de los especímenes BS1 Y BS2, desde el punto de vista mecánico y estructural, y concretamente el cálculo de la energía de deformación plástica disipada por el hormigón. El cálculo de la energía de deformación plástica en el hormigón puede consultarse en la referencia [76].

7.2.4. Resultados. Índice de daño temporal (TDI)

En el presente apartado se incluyen los resultados relativos a la evaluación de la fisuración del hormigón en zonas BPE y BPI (base del pilar exterior y de un pilar interior, respectivamente) durante las simulaciones C35-C200b (BS1) y B15-B130b (BS2). El daño en el hormigón se obtuvo y cuantificó de dos formas o con dos métodos distintos:

- A partir de la EA, cuantificando el daño en términos de energía de emisión acústica acumulada E_{EA} . Sólo se tuvieron en cuenta señales de EA transitorias que pasaron los filtros RMS.
- A partir de las medidas de desplazamiento, aceleración y deformaciones unitarias de las armaduras, cuantificando el daño en forma de energía de deformación plástica disipada acumulada $W_{C,p}$.

La comparación entre ambos métodos para los especímenes BS1 y BS2 se representa en las Figuras 7.29-7.32 en forma de curvas de energía acumulada, normalizadas entre 0 y 1. También se incluye la historia de aceleración de respuesta del forjado (línea naranja) durante cada una de las simulaciones sísmicas. Conviene hacer notar que C200 y B100 fueron simulaciones que tuvieron que ser interrumpidas por problemas en el control de la mesa sísmica.

Se observa que las tendencias en las zonas BPE y BPI son similares, aunque se vuelve a constatar que tanto la E_{EA} (línea discontinua) como la $W_{C,p}$ (línea continua) son mayores en el primero caso, como se observó anteriormente en el caso de los nudos pilar-ábaco (véase Subapartado 7.2.2).

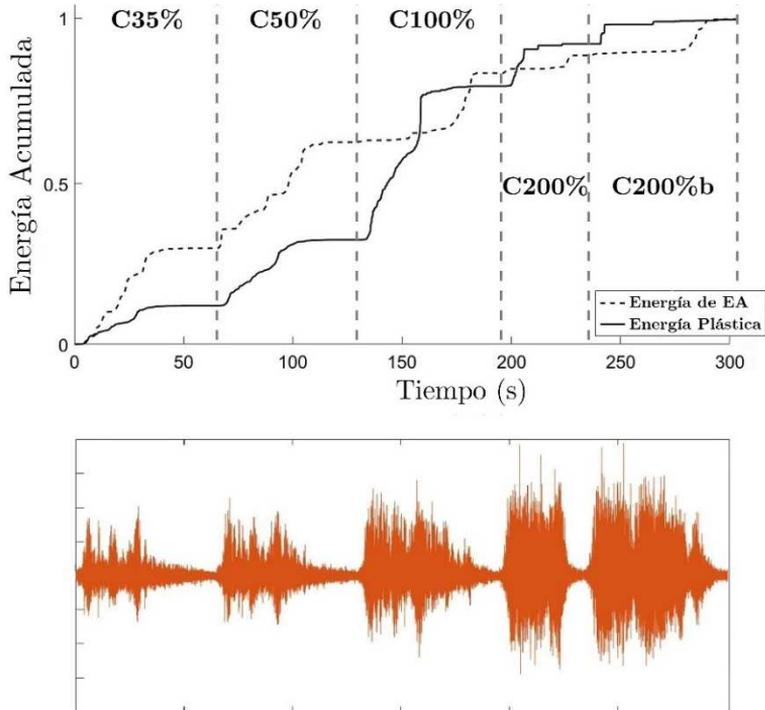


Figura 7.29. Energía E_{EA} y energía plástica $W_{C,p}$. BPE, espécimen BS1.

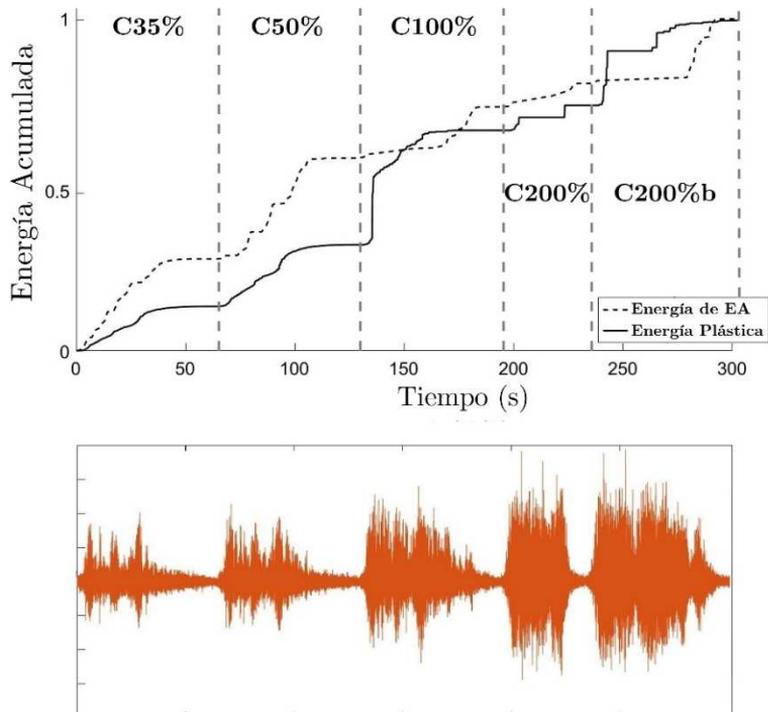


Figura 7.30. Energía E_{EA} y energía plástica $W_{C,p}$. BPI, espécimen BS1.

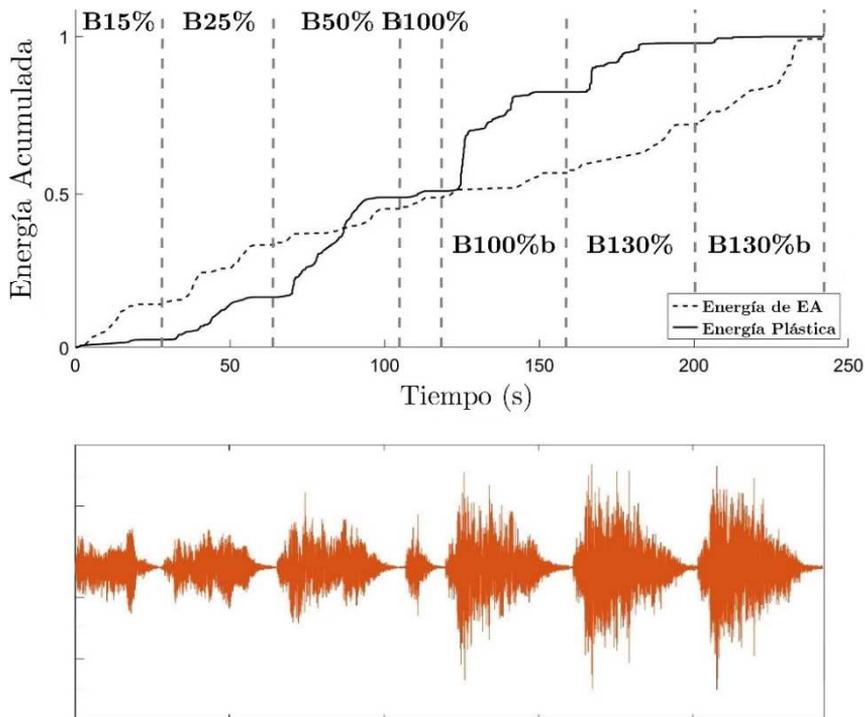


Figura 7.31. Energía E_{EA} y energía plástica $W_{C,p}$. BPE, espécimen BS2.

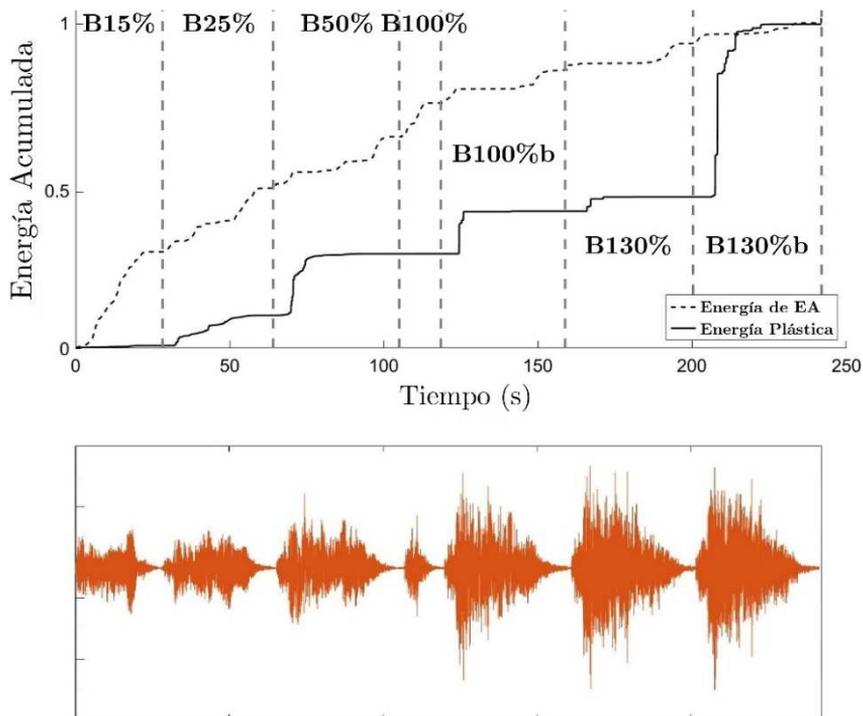


Figura 7.32. Energía E_{EA} y energía plástica $W_{C,p}$. BPI, espécimen BS2.

En líneas generales, para los dos especímenes, la energía plástica disipada por el hormigón sigue siempre el mismo patrón. En la fase inicial del ensayo, previa a la plastificación del acero, la energía crece de forma continua y uniforme mientras dura la simulación sísmica. Cuando se inicia la plastificación del acero, la energía experimenta el salto más importante del ensayo debido a la apertura/crecimiento importante de fisuras cuando la armadura se alarga a tensión constante; en la fase final, el crecimiento de la energía es limitado, debido a que las fisuras importantes ya están formadas y apenas crecen (la energía introducida en esta última fase la absorbe fundamentalmente el acero de las armaduras). El crecimiento a saltos que experimenta la energía a partir de la plastificación del acero puede estar relacionada con la degradación de las condiciones de adherencia acero-hormigón a medida que aumenta el número de ciclos aplicados. En la Tabla 7.6 se indican las simulaciones sísmicas a partir de las cuales la deformación unitaria del acero ε_s superó el valor de fluencia ε_y , es decir $\varepsilon_s > \varepsilon_y = \frac{f_{yk}}{E_s} \cdot 1 \cdot 10^6 = 2381 \mu m/m$, revelando así el inicio de plastificación.

	ABE	ABI	BPE	BPI
BS1	C200	C200	C100	C100
BS2	B100b	B100b	B100b	B50

Tabla 7.6. Simulación sísmica de inicio de plastificación en las barras de acero.

Si se analiza con más detalle la energía de EA, se puede apreciar cómo a grandes rasgos la actividad de EA va decreciendo a medida que avanza el ensayo y el espécimen se va dañando. Además de los motivos apuntados anteriormente (es decir, la menor apertura de nuevas grietas o el menor crecimiento de las ya existentes), este hecho está también asociado a la atenuación de las ondas en el hormigón, la cual es cada vez mayor por la formación y crecimiento de grietas. Éstas se producen en todas las direcciones, y dificultan la propagación de las ondas a causa de las reflexiones y refracciones en las interfases aire-hormigón de las fisuras existente, cuya transmisibilidad acústica es baja. Por consiguiente, sólo se captan aquellas

señales capaces de llegar al sensor de EA con la amplitud necesaria para cruzar el umbral.

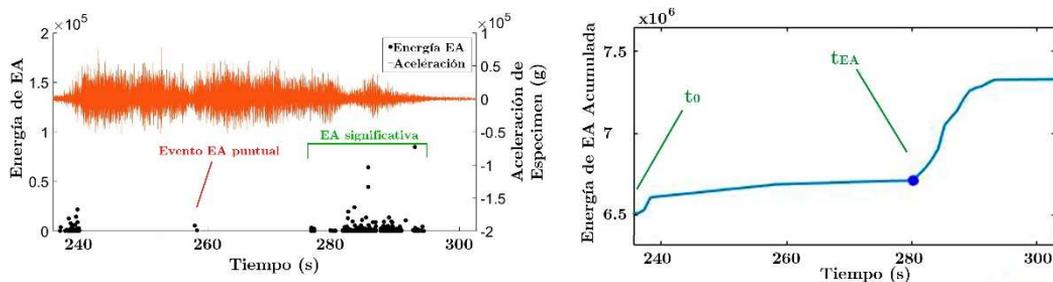


Figura 7.33. EA_{SIGN} durante la simulación C200b. BPE, espécimen BS1.

Analizando la curva de energía de EA en cada simulación sísmica por separado, como se muestra en las Figuras 7.34-7.37, se puede apreciar que la emisión acústica significativa (EA_{SIGN}) llega más tarde a medida que el espécimen se va dañando por las sucesivas simulaciones sísmicas. La EA_{SIGN} de una simulación se define aquí como una sucesión ininterrumpida de eventos de EA, sin considerar los eventos puntuales que se pueden producir de forma aislada (Figura 7.33).

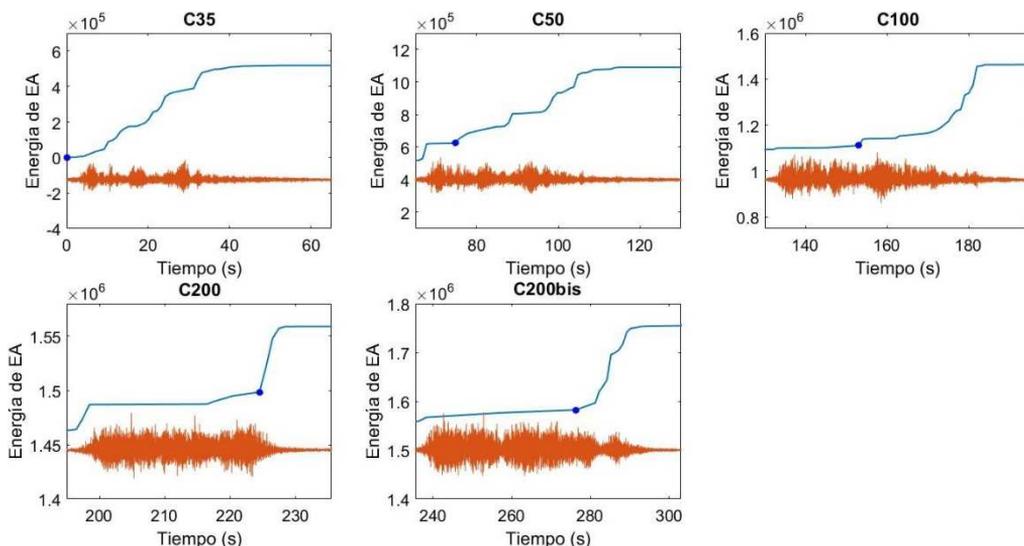


Figura 7.34. Energía de EA acumulada en cada simulación sísmica, con inicio de actividad acústica significativa, EA_{SIGN} . BPE, espécimen BS1.

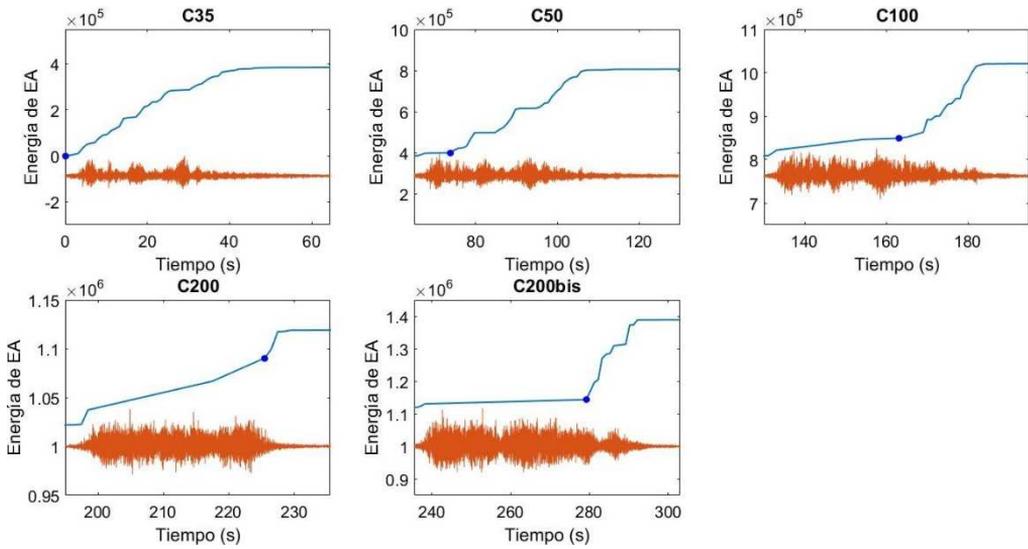


Figura 7.35. Energía de EA acumulada en cada simulación sísmica, con inicio de actividad acústica significativa, EA_{SIGN} . BPI, espécimen BS1.

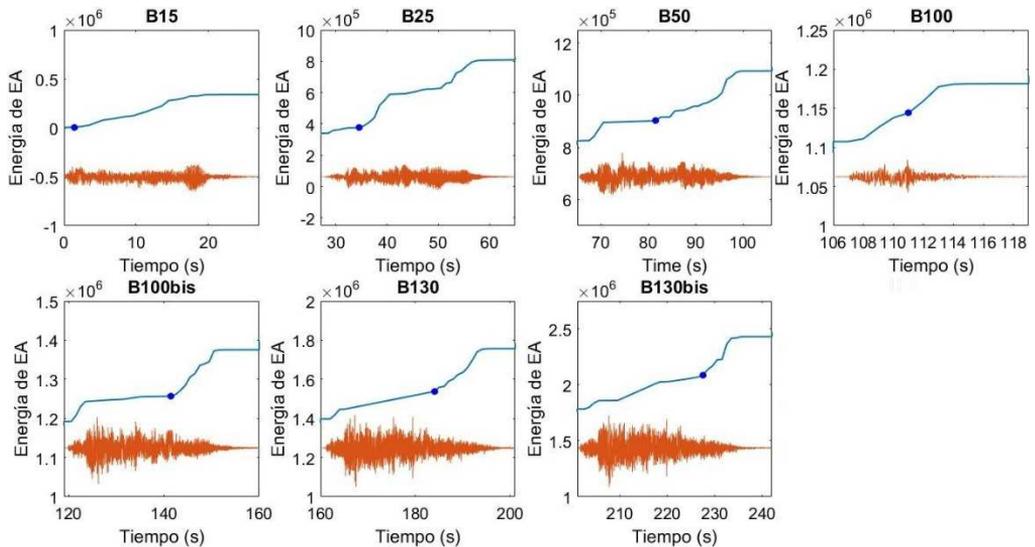


Figura 7.36. Energía de EA acumulada en cada simulación sísmica, con inicio de actividad acústica significativa, EA_{SIGN} . BPE, espécimen BS2.

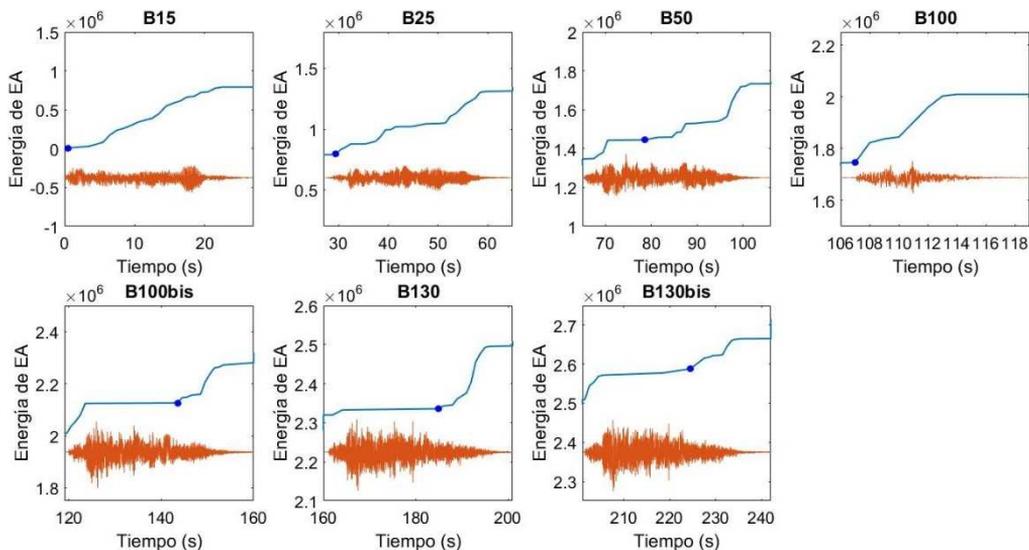


Figura 7.37. Energía de EA acumulada en cada simulación sísmica, con inicio de actividad acústica significativa, EA_{SIGN} . BPI, espécimen BS2.

Índice de daño temporal (TDI)

La llegada de la EA_{SIGN} se propone en esta Tesis como un indicador del daño. Concretamente, se propone evaluar cuantitativamente el daño con un índice temporal (*Temporal Damage Index*, TDI) que se define como la diferencia de tiempo entre el inicio de la simulación sísmica y el inicio de la EA_{SIGN} . El retardo en la llegada de la actividad significativa EA_{SIGN} que se produce a medida que avanza el ensayo se puede deber a múltiples causas, dado que se trata de un ensayo sísmico compuesto de cientos de ciclos de deformaciones aplicados a una estructura formada por diferentes elementos estructurales (columnas, ábacos, etc.). Una de las causas probables podría estar relacionada con la degradación de las condiciones de adherencia que se produce paulatinamente a lo largo del ensayo. En condiciones de adherencia perfecta, las tensiones son transferidas casi por completo al acero. Sin embargo, cuando las condiciones de adherencia empiezan a degradarse, una buena parte de las tensiones se generan directamente en el hormigón, formándose grietas en el mismo que originan una actividad de EA significativa. Por otra parte, a medida que avanza el ensayo, se precisa alcanzar más ciclos de deformación para que las tensiones en el hormigón desencadenen la formación y/o crecimiento de grietas.

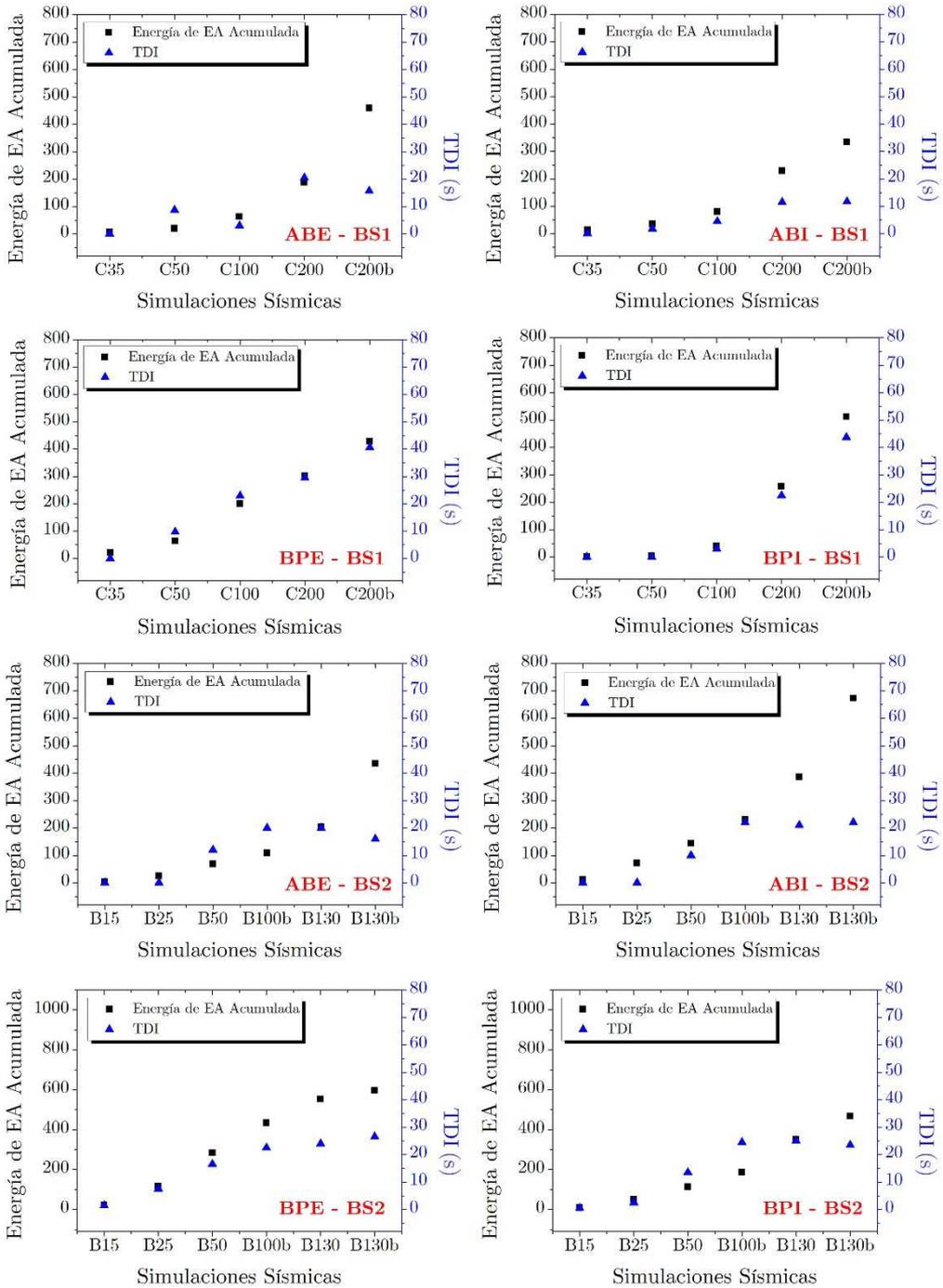


Figura 7.38. Correlación de energía plástica $W_{c,p}$ acumulada con el índice TDI, en especímenes BS1 y BS2.

Se comparó el índice TDI con el valor de la energía plástica acumulada $W_{c,p}$ disipada por el hormigón al final de cada simulación, con el propósito de confirmar la relación existente entre el retardo de la llegada de la EA_{SIGN} y la evolución del daño en el hormigón. En las gráficas de la Figura 7.38 se observa un crecimiento progresivo del índice TDI, y en general, un buen ajuste entre las dos magnitudes.

En el caso de las bases de las columnas, la tendencia creciente de las dos magnitudes es bastante similar, siendo idéntica en el caso del espécimen BS1. En cambio, para las uniones ábaco-pilar, las dos tendencias sólo coinciden hasta las simulaciones C200 (BS1) y B100b (BS2), momento en el cual se produce la plastificación del acero. A partir de las simulaciones C200 y B100b, el índice TDI apenas crece, lo que significa que en las siguientes simulaciones, el punto en el cual la tensión contenida en el hormigón es capaz de producir grietas será siempre el mismo (en el tiempo) sin que sea necesario alcanzar mayores niveles de deformación durante cada simulación. Es decir, el material parece haber llegado a un punto en el que no hace falta alcanzar más ciclos, esto es, acumular mayores tensiones, para iniciar procesos de formación y crecimiento de grietas. Mientras que la energía plástica acumulada, estimada sólo de forma aproximada en elementos complejos como las uniones ábaco-pilar, se dispara en la última fase del ensayo.

8. CONCLUSIONES

La presente Tesis Doctoral recoge los resultados de aplicación de técnicas vibro-acústicas para la monitorización del daño producido en disipadores de energía TTD-NiTi y en estructuras sometidas a cargas cuasi-estáticas y dinámicas de origen sísmico. De acuerdo a los objetivos planteados, a continuación se enumeran las principales conclusiones que se extraen de la investigación desarrollada.

- El disipador de energía TTD-NiTi consta de dos partes: (i) dos tubos de acero dispuestos de forma telescópica donde se disipa energía en chapas de acero inoxidable sometidas a flexión/cortante (“parte disipadora” en adelante), y (ii) una barra central de NiTi que proporciona propiedades de recentrado. Se ha inspeccionado **la parte disipadora** de los disipadores a través del método de **Ultrasonidos (UT)**, utilizando dos técnicas diferentes, transmisión y pulso-eco, observándose una atenuación en la onda cuando ésta se propaga por una zona dañada. La energía espectral de la onda se ha establecido como parámetro para medir dicha atenuación, por ser altamente sensible a la formación de martensita en el acero inoxidable cuando éste sufre deformaciones plásticas. Asimismo se ha demostrado mediante un análisis de ruido que el parámetro es estable frente a las posibles perturbaciones

electromagnéticas que afectan a la señal recibida, validando así la robustez del parámetro frente a escenarios realistas fuera de los equipos y condiciones del laboratorio. Basado en la energía espectral, se ha definido un nuevo índice de daño, ΔE , para expresar la atenuación de una señal propagada a lo largo de un espécimen dañado, tomando como base la señal recibida en un espécimen sin daño usado como espécimen de control.

- El índice de daño mecánico ID , ampliamente validado en estudios previos mediante diferentes tipos de ensayos y disipadores, se ha utilizado en este trabajo como un indicador altamente fiable para evaluar el daño mecánico en la parte disipadora. De este modo, el análisis se ha fundamentado en estudiar la relación existente entre la atenuación de la señal de ultrasonidos recibida del material (ΔE) y el daño producido en éste (ID), resultando una excelente correlación lineal ($r \approx 0,90$) entre ambas magnitudes, que permitiría predecir la segunda a partir de la primera con una muy buena precisión. Además, el hecho de utilizar dos técnicas de inspección diferentes en especímenes sometidos a dos historias de carga dispares hace que el índice propuesto pueda considerarse más fiable para aplicaciones reales de diagnóstico de daño en disipadores.

A nivel práctico, cabe señalar que el uso de la técnica de pulso-eco en elementos con deformaciones fuera de plano implica la aparición de una atenuación “extra” que es producida por las curvaturas en superficie que impiden captar toda la señal reflejada y siendo el valor de dicha atenuación dependiente de la geometría de la deformación y de su evolución en el tiempo. Dado que la técnica de pulso-eco es la más adecuada para una inspección UT real de disipadores, resulta conveniente diseñar éstos de forma que se deformen en el plano cuando absorben la energía del sismo. En este sentido, los disipadores TTD-NiTi, inspeccionados con la técnica de pulso-eco en este trabajo, fueron diseñados a tal efecto, presentando una tendencia creciente de la atenuación a medida que se acumula el daño (simulaciones sísmicas). En cualquier caso, se requieren más trabajos en el futuro relativos a ensayos

dinámicos para estudiar también la relación existente con el índice de daño mecánico ID en escenarios más realistas.

- La inspección de la **parte disipadora** con el método de **Memoria Magnética del Metal (MMM)**, por su parte, sirvió para evaluar la distribución anómala de la intensidad del campo magnético propio (SMLF) en un elemento cuando en éste se produce un daño o una concentración local de tensiones. Concretamente, se ha utilizado el gradiente longitudinal del SMLF como parámetro para cuantificar el daño acumulado en las placas, midiéndolo a través de dos tipos de escaneo, horizontal y vertical. Ha resultado más eficaz el primero pues su trayectoria atraviesa la unión de los “*struts*” con las alas, es decir, las zonas donde el momento flector es máximo y se desarrolla la plastificación (daño).
- Se ha definido el índice de daño E_M a partir del gradiente longitudinal del SMLF a fin de compararlo con el indicador de daño mecánico ID . La buena correlación observada entre ambos resulta excelente ($r \approx 0,99$) si se evalúa en el intervalo $ID = [0-0,8]$, considerado el intervalo en el cual el disipador trabaja en condiciones de seguridad. Sin embargo, estos resultados iniciales obtenidos en ensayos cíclicos de amplitud creciente deben considerarse un punto de partida, que deben continuar en el futuro bajo la aplicación de otras historias de carga para así validar el índice propuesto en diversos escenarios.
- Se han llevado a cabo ensayos mecánicos en elementos y estructuras de hormigón armado (HA) monitorizadas con el método de **Emisión Acústica (EA)** con el propósito de estudiar la fisuración del hormigón. Se ha realizado inicialmente ensayos de cargas cuasi-estáticas aplicadas en elementos estructurales simples, en este caso **vigas de HA simplemente biapoyadas**, como un primer enfoque sencillo que permita establecer un mecanismo de separación claro entre los modos de fallo de las secciones de hormigón armado (a flexión y a cortante). Se ha diseñado una matriz de cuatro ensayos para combinar dos historias de

carga creciente, monótona y cíclica, con dos modos de rotura, a flexión y a cortante.

- Del análisis de las señales de EA se ha establecido un criterio para separar las señales asociadas a los modos de fisuración de flexión y cortante (o mixto), basado en el tiempo de subida (RT). En la representación de este parámetro aparecen dos grupos de señales claramente separados: las señales con $RT < 450 \mu s$ procedentes del modo de flexión y las señales con valor $RT > 600 \mu s$ asociadas al modo cortante (o mixto). El primer grupo se caracteriza por un valor bajo del ángulo de subida (RA) y una alta frecuencia promedio (AF). El segundo grupo, por su parte, se distingue por un valor alto del RA y un valor bajo de AF, es decir, acorde a la clasificación clásica de uso extendido. No obstante, la clasificación propuesta en este trabajo, a diferencia de aquella, no adolece de arbitrariedad, y el criterio de separación responde a una división manifiesta entre los dos grupos observada al usar el parámetro RT.

La energía de EA obtenida a partir de las señales de cada uno de los grupos se ha evaluado en el tiempo, apreciando dos comportamientos diferenciados y previamente expuestos en la literatura: en las vigas que fallan a cortante, se produce una liberación de energía alta y repentina en el momento de la rotura, relacionada fundamentalmente con señales clasificadas como de modo cortante (o mixto); en las vigas que fallan a flexión, se han observado pequeños aumentos de energía únicamente al inicio del ensayo.

- La energía de EA también se ha empleado en **estructuras bidireccionales** (especímenes BS1 y BS2), de forjado reticular y pilares aislados, sometidos a cargas dinámicas con historias de deformación arbitrarias (ensayos sísmicos). El análisis de este parámetro ha permitido detectar la acumulación del daño espacialmente, localizando y examinando las fuentes de EA (formación de grietas) en función de su magnitud.

- La localización de eventos dentro de los ábacos ha revelado una acumulación de daño (fisuración) en la unión ábaco-pilar. Así mismo, se han localizado algunos eventos de alto contenido energético en la unión ábaco-pilar del pilar exterior, y no así en el pilar interior. La inspección visual tras los ensayos ha corroborado estos resultados.
- En la evolución temporal de la energía de EA se aprecia un retraso paulatino en la aparición de la actividad significativa de EA a medida que se suceden las simulaciones sísmicas. Conforme avanza el ensayo, en cada simulación el hormigón va necesitando más ciclos de deformación para que las tensiones producidas en él inicien procesos de formación y crecimiento de grietas. A este respecto, se ha propuesto un índice de daño, el TDI (*Temporal Damage Index*), que expresa el retraso en el inicio de la actividad significativa de EA, y que se ha comparado en cada simulación con la energía plástica disipada acumulada por una articulación plástica de hormigón $W_{c,p}$ (fisuración). La comparativa llevada a cabo en las bases de los pilares (BPE y BPI) muestra un ajuste óptimo entre las dos magnitudes. En las uniones ábaco-pilar (ABE y ABI), en cambio, el ajuste sólo se produce hasta un punto, coincidente con el inicio de plastificación del acero, a partir del cual el índice TDI se mantiene constante mientras que la energía plástica $W_{c,p}$ continua creciendo. Explicar esta disparidad que existe entre las dos magnitudes en la fase final del ensayo precisa de investigaciones más profundas debido a que:

- La unión ábaco-pilar es un elemento de geometría compleja, especialmente en su refuerzo, que no responde al concepto de “articulación plástica” utilizado en este trabajo para el cálculo de la energía plástica $W_{c,p}$. Por lo tanto, ésta sólo puede estimarse indirectamente y de manera aproximada a partir de la energía total absorbida por la estructura.

En relación al cálculo de la energía plástica $W_{c,p}$, conviene recordar que se ha efectuado bajo el supuesto de una adherencia

perfecta entre acero y hormigón, que presumiblemente no ha podido conservarse en todos los casos durante todo el ensayo.

- El retardo de la actividad significativa de EA presumiblemente será debido a múltiples factores. Uno de los que mayor complejidad incorpora al proceso tiene que ver con la historia de carga que se utiliza en el ensayo, consistente en cientos de ciclos de deformación aleatorios y variables que originan diferentes procesos de degradación. Muestra de esta singularidad es que este fenómeno contradice lo enunciado en el efecto Felicity (derivado del efecto Kaiser) para procesos de carga cuasi-estáticos, donde el indicio de daño es precisamente el inicio de actividad significativa de EA antes de alcanzar al nivel de carga máximo del ciclo anterior. Las observaciones en los ensayos sísmicos realizados en este trabajo indican justamente lo contrario, es decir, a medida que aumenta el daño, se necesitan alcanzar más ciclos de deformación para iniciarse los procesos de fisuración.

Por lo tanto, existe aún margen de investigación para mejorar el modelo de cálculo del indicador del daño ($W_{c,p}$) en elementos no lineales como los ábacos, y para entender exactamente el comportamiento del índice TDI en relación a la historia de carga aplicada desde un punto de vista físico.

A pesar de todo ello, el trabajo aporta la certeza de que existe una relación directa entre este fenómeno y el daño producido en el hormigón. Se abre pues una oportunidad para estudiar el fenómeno del retardo de la actividad de EA en ensayos dinámicos libres de la componente aleatoria, de forma que la relación causa-efecto sea conceptualmente más simple de explicar.

- Para el cálculo de la energía de EA, se ha realizado un filtrado de las señales procedentes de mecanismos de ruido electromagnético o mecánico, así como procesos de fricción en el hormigón. Para ello, se han usado dos filtrados diferentes: i) filtrado RMS, basado en el valor RMS

de las ventanas inicial y final de la señal de EA, ii) filtrado Swanson, que establece límites de duración dependiendo de la amplitud de la señal. Ambos filtrados eliminan las señales de duración larga y amplitud baja. Las curvas de energía acumulada de EA resultantes de cada filtrado tienen el mismo trazado a lo largo del tiempo, por lo que se puede concluir que el proceso de filtrado no condiciona los resultados obtenidos en la comparativa TDI- $W_{c,p}$.

- Se ha aplicado la estrategia de clasificación RT para separar los modos de fisuración por flexión y por cortante (o mixto) en los especímenes BS1 y BS2. Las señales ligadas a fisuras asociadas a fallos por cortante fueron inexistentes, excepto en las bases de columna de BS1, donde la tasa fue mínima. La escasa presencia de fisuración por cortante era esperable ya que los especímenes se dimensionaron “por capacidad”, es decir reforzándolos notablemente a cortante para que el fallo sea de flexión.

8. CONCLUSIONS

This Doctoral Thesis collects the results of the application of vibro-acoustics techniques for monitoring of damage produced in TTD-NiTi dampers and reinforced concrete (RC) structures subjected to quasi-static and seismic loadings. According with the objectives , the main conclusions are listed below:

- The TTD-NiTi damper is composed of two parts: (i) two telescopically placed steel tubes where energy is dissipated by stainless steel sheets (dissipative part), and (ii) a central NiTi bar which provides recentring properties. **The dissipating part** of the dissipaters has been inspected using the **Ultrasonic (UT)** method, using two different techniques, transmission and pulse-echo. A strong attenuation in the wave when it propagates through a damaged area has been observed experimentally. The spectral energy of the wave has been proposed as a parameter to measure this attenuation, as it is highly sensitive to the formation of martensite in stainless steel when it undergoes plastic deformations. It has also been demonstrated that this parameter is stable against possible electromagnetic interferences affecting the received signal, thus validating the robustness of the parameter in realistic scenarios beyond the equipment and conditions of the laboratory. Based on spectral

energy, a new damage index has been defined, ΔE . This index evaluates the attenuation of a signal when it propagates along a damaged specimen, using the signal received in an undamaged specimen as a control specimen.

- The mechanical damage index ID , widely validated in previous studies for different types of tests and dampers, has been used in this work as a reliable feature to evaluate the mechanical damage in the dissipating part. The analysis has been based on studying the relationship between the attenuation of the ultrasound signal received from the material (ΔE) and the damage produced (ID). An excellent linear correlation ($r \approx 0.90$) between both parameters has been demonstrated, which allows to indirectly the damage with a high precision. In addition, the use of two different inspection techniques on specimens subjected to two different load histories makes the proposed index more reliable for realistic applications of damage diagnosis on dampers.

The use of the pulse-echo technique in elements with out-of-plane deformations implies the appearance of an "extra" attenuation that is produced by surface curvatures that obstruct the capture of the whole reflected signal, being this attenuation dependent on the geometry of the deformation and its evolution over time. Keeping in mind that the pulse-echo technique is the most suitable for a real UT inspection of dampers, it is appropriate to design them in such a way that they undergo in-plane deformations when they absorb the energy of the earthquake. The TTD-NiTi dampers, inspected with the pulse-echo technique in this work, were designed for this purpose, showing an increasing trend of attenuation as the damage increases (seismic simulations). Anyhow, more work is required in the future regarding dynamic tests in order to study also the existing relationship with the mechanical damage index ID in more realistic scenarios.

- The inspection of the **dissipating part** with the **Metal Magnetic Memory (MMM)** method served to evaluate the anomalous

distribution of the intensity of the self-magnetic field (SMLF) in an element when damage or a local concentration of stresses occurs. Specifically, the longitudinal gradient of the SMLF has been used as a feature to quantify the damage accumulated in the plates, measuring it through two types of scanning, horizontal and vertical. The first one has been more effective because its trajectory crosses the union of the "struts" with the flanges, i. e. the zones where the bending moment is maximum and plastification is developed (damage).

- The damage index E_M has been defined from the longitudinal gradient of the SMLF in order to compare it with the mechanical damage indicator ID . A good correlation between both indexes has been observed ($r \approx 0.99$) if evaluated in the interval $ID = [0-0.8]$, considered as the interval in which the damper works under safe conditions. However, these initial results obtained for cyclic tests of increasing amplitude should be considered only as a good starting point, which should progress in the future for other load patterns in order to validate the proposed index in real scenarios.
- Mechanical tests have been carried out on reinforced concrete (RC) elements and structures monitored with the **Acoustic Emission (AE)** method in order to evaluate the concrete damage. Initially, tests of quasi-static loads applied to simple structural elements, **simply-supported RC beams**, have been carried out as a first simple approach to establish a clear separation mechanism between the failure modes of the reinforced concrete cross-sections (flexural and shear). A set of four tests has been conducted in order to combine two stories of increasing load, monotonous and cyclic, with two failure modes, flexural and shear.
- From AE signals analysis, a criterion has been established to separate the signals associated with the bending and shear (or mixed) failure modes, based on the rise time (RT) parameter. Two groups of signals are clearly separated : the signals with $RT < 450 \mu s$ coming from the bending mode and the signals with value $RT > 600 \mu s$ associated with the

shear (or mixed) mode. The first group is characterized by a low rise angle (RA) value and a high average frequency (AF). The second group is characterized by a high RA value and a low AF value, i.e. according to the classical classification of extended use. The classification proposed in this work, does not suffer from arbitrariness, and the separation criterion responds to a clear division between the two groups observed when using the parameter RT.

The AE energy obtained from the signals of each group has been evaluated over time, identifying two differentiated behaviors previously exposed in the literature: for the beams that fail to shear, there is a release of high and sudden energy at the moment of rupture, mainly related to signals classified as shear mode (or mixed); for the beams that fail to bending, small increases of the energy has been observed at the beginning of the test.

- AE energy has also been used in **bidirectional structures** (BS1 and BS2 specimens), of waffle slabs and isolated columns, subjected to dynamic loads with arbitrary deformation patterns (seismic tests). The analysis of this parameter has allowed to detect the accumulation of damage spatially, localizing and examining the sources of AE (crack formation).
- The localization of events within the solid heads has revealed an accumulation of damage (cracking) in the slab-column connection. Similarly, some high-energy events have been localized at the external slab-column connection, but not at the internal one. The visual inspection after the tests has confirmed these results.
- The temporal evolution of AE energy shows a gradual delay in the appearance of the AE significant activity as seismic simulations are successively performed. As the test progresses, in each simulation the concrete needs more deformation cycles so that the stresses produced in it start processes of cracking. As a result, a damage index named TDI (Temporal Damage Index), has been proposed to evaluate the delay of

the AE significant activity. This index has been compared with the dissipated plastic energy accumulated by a plastic hinge of concrete $W_{c,p}$ (cracking). The comparison carried out at the base of the columns (external ECB, and internal ICB) shows an optimal fit between the two magnitudes. However, at the slab-column connections (external and internal), the adjustment only takes place up to a point, coinciding with the beginning of plastification of the steel. From this point, the TDI index remains constant while the plastic energy $W_{c,p}$ continues to grow. The understanding of this disparity between the two magnitudes in the final phase of the test requires further investigation because:

- The slab-column connection is an element of complex geometry, especially at its reinforcement, which does not match the concept of "plastic hinge" used in this work for the calculation of plastic energy $W_{c,p}$. Therefore, this can only be estimated indirectly and roughly from the total energy absorbed by the structure.

With regard to the calculation of plastic energy $W_{c,p}$, it is worth noting that it was conducted under the assumption of a perfect bonding between steel and concrete, which probably could not be preserved in all cases during the whole test.

- The delay in the AE significant activity will presumably be due to multiple factors. One of the most complex factors incorporated into the process concerns the load history used in the test, consisting of hundreds of random and variable deformation cycles that originate different degradation processes. A proof of this singularity is the fact that this phenomenon contravenes what is stated in the Felicity effect (derived from the Kaiser effect) for quasi-static loading processes, where the sign of damage is the beginning of significant AE activity before reaching the maximum load of the previous cycle. The observations in the seismic tests performed in this paper indicate just the opposite, i.e. as the

damage increases, more deformation cycles are needed to start the cracking processes.

Therefore, there is still scope for research in order to improve the calculation model of the damage indicator ($W_{c,p}$) for non-linear elements such as solid heads, and to understand exactly the behavior of the TDI index in relation to the applied load history from a physical point of view.

The work provides evidence of a direct relationship between this phenomenon and the damage caused to the concrete. This is an opportunity to study the phenomenon of the delay in the AE activity in controlled dynamic loads tests, in such a way that the cause-effect relationship will be conceptually simpler to explain.

- For the calculation of the AE energy, signals from electromagnetic or mechanical noise mechanisms, as well as friction processes in the concrete, have been filtered. For this purpose, two different filters were used: i) RMS filtering, based on the RMS value of the initial and final windows of the AE signal, ii) Swansong filtering, which establishes duration limits depending on the amplitude of the signal. Both filters eliminate long duration and low amplitude signals. The accumulated AE energy curves after applying each filter have the same plot over time, so it can be concluded that the filtering process does not influence the results obtained in the TDI- $W_{c,p}$ comparison.
- The RT classification strategy has been applied to separate the flexural and shear (or mixed) cracking modes in BS1 and BS2 specimens. Signals linked to cracks associated with shear failures were inexistent, except in the bases of columns of specimen BS1, where the rate was very low. The low presence of shear cracking was expected since the specimens were designed "by capacity", i.e. reinforcing them significantly to shear for bending failure.

Bibliografía

- [1] "Historic Earthquakes and Earthquake Statistics: Where do earthquakes occur?" US Geological Survey, <http://earthquake.usgs.gov>, 2009.
- [2] "2018 Review of Disaster Events" EM-DAT the International Disaster Database, www.emdat.be, 2019.
- [3] "Cred Crunch 51 - Earthquakes in Europe" EM-DAT the International Disaster Database, www.emdat.be, 2018.
- [4] A. Benavent-Climent, "An energy-based damage model for seismic response of steel structures" *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 36, no. 8, pp. 1049-1064, 2007.
- [5] 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, no. 1, pp. 33-49, 2014.
- [6] 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, no. 15, pp. 2399-2417, 2014.
- [7] A. Benavent-Climent, L. Morillas, and J. M. Vico, "A study on using wide-flange section web under out-of-plane flexure for passive energy dissipation" *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 40, no. 5, pp. 473-490, 2011.
- [8] A. Benavent-Climent, E. Oliver-Saiz, and J. Donaire-Ávila, "New connection between reinforced concrete building frames and concentric braces: Shaking table tests" *Engineering Structures*, vol. 96, pp. 7-21, 2015.
- [9] 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*, vol. 60, pp. 90-105, 2015.
- [10] L. Romo-Melo, "Diagnóstico de daño en disipadores de energía histeréticos tipo WPD para el control pasivo en estructuras

sismorresistentes mediante análisis de vibraciones en el dominio de la frecuencia" Universidad de Granada, 2013.

- [11] A. Benavent-Climent, "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)" Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa. Junta de Andalucía (Proyectos de Investigación de Excelencia), Informe Técnico 2007.
- [12] A. Benavent-Climent, "Disipadores de energía histeréticos avanzados con propiedades de recentrado y memoria de forma: desarrollo, monitorización del daño y estrategias de implementación en el mercado (DIMFO)" Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa. Junta de Andalucía (Proyectos de Investigación de Excelencia), Informe Técnico 2013.
- [13] P. W. Clark, I. D. Aiken, J. M. Kelly, M. Higashino, and R. Krumme, "Experimental and analytical studies of shape-memory alloy dampers for structural control" in *Smart Structures and Materials '95*, San Diego, CA, United States, 1995, vol. 2445: SPIE. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/12.208891>.
- [14] H. Funakubo and J. B. Kennedy, *Shape Memory Alloys*. Taylor & Francis, 1987.
- [15] E. J. Graesser and F. A. Cozzarelli, "Shape-Memory Alloys as New Materials for Aseismic Isolation" *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 117, no. 11, pp. 2590-2608, 1991, doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(1991)117:11(2590).
- [16] L. Janke, C. Czaderski, M. Motavalli, and J. Ruth, "Applications of shape memory alloys in civil engineering structures—Overview, limits and new ideas" *Materials and Structures*, vol. 38, no. 5, pp. 578-592, 2005, doi: 10.1007/bf02479550.
- [17] R. Krumme, J. Hayes, and S. Sweeney, "Structural damping with shape-memory alloys: one class of devices" in *Smart Structures and Materials '95*, San Diego, CA, United States, 1995, vol. 2445: SPIE. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/12.208890>.

- [18] J. C. Wilson and M. J. Wesolowsky, "Shape Memory Alloys for Seismic Response Modification: A State-of-the-Art Review" *Earthquake Spectra*, vol. 21, no. 2, pp. 569-601, 2005, doi: 10.1193/1.1897384.
- [19] A. Gallego and E. Marínez, *Emisión Acústica. Niveles I y II*. FC Editorial, 2015.
- [20] C. U. Grosse and M. Ohtsu, *Acoustic Emission Testing*. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [21] R. K. Miller, E. K. Hill, and P. O. Moore, *Acoustic Emission Testing*. American Society for Nondestructive Testing, 2005.
- [22] Y. Mizutani, *Practical Acoustic Emission Testing*. Springer Japan, 2016.
- [23] K. Ono, "Application of acoustic emission for structure diagnosis" *Diagnostyka*, pp. 3-18, 2011.
- [24] S. Yuyama, Z.-W. Li, M. Yoshizawa, T. Tomokiyo, and T. Uomoto, "Evaluation of fatigue damage in reinforced concrete slab by acoustic emission" *NDT & E International*, vol. 34, no. 6, pp. 381-387, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(01\)00004-4](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(01)00004-4).
- [25] P. H. Ziehl, "Applications of acoustic emission evaluation for civil infrastructure" in *SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, San Diego, California, United States, 2008, vol. 6934: SPIE. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1117/12.779069>.
- [26] A. Benavent-Climent, E. Castro, and A. Gallego, "AE monitoring for damage assessment of RC exterior beam-column subassemblages subjected to cyclic loading" *Structural Health Monitoring*, vol. 8, no. 2, pp. 175-189, 2009.
- [27] A. Benavent-Climent, E. Castro, and A. Gallego, "Evaluation of low-cycle fatigue damage in RC exterior beam-column subassemblages by acoustic emission" *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 10, pp. 1830-1842, 2010.
- [28] A. Benavent-Climent, A. Gallego, and J. M. Vico, "An acoustic emission energy index for damage evaluation of reinforced concrete slabs under

- seismic loads" *Structural Health Monitoring*, vol. 11, no. 1, pp. 69-81, 2012.
- [29] G. Cortés, E. Suárez, A. Gallego, and A. Benavent-Climent, "Health monitoring of reinforced concrete structures with hysteretic dampers subjected to dynamical loads by means of the acoustic emission energy" *Structural Health Monitoring*, p. 1475921718813489, 2018.
- [30] A. Gallego, A. Benavent-Climent, and C. Infantes, "Health monitoring of reinforced concrete slabs subjected to earthquake-type dynamic loading via measurement and analysis of acoustic emission signals" *Smart Structures and Systems*, vol. 8, no. 4, pp. 385-398, 2011.
- [31] F. A. Sagasta, A. Benavent-Climent, T. Fernández-Quirante, and A. Gallego, "Modified Gutenberg–Richter Coefficient for Damage Evaluation in Reinforced Concrete Structures Subjected to Seismic Simulations on a Shaking Table" *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 33, no. 4, pp. 616-631, 2014.
- [32] F. A. Sagasta, A. Benavent-Climent, A. Roldán, and A. Gallego, "Correlation of plastic strain energy and acoustic emission energy in reinforced concrete structures" *Applied Sciences*, vol. 6, no. 3, p. 84, 2016.
- [33] F. A. Sagasta, L. Morillas, A. Benavent Climent, and E. Suárez, "Discrimination of AE signals from friction and concrete cracking in a reinforced concrete frame subjected to seismic trainings" in *6th ECCOMAS Conference on Smart Structures and Materials*, Turin, Italia, 2013, pp. 1-15.
- [34] F. A. Sagasta, M. E. Zitto, R. Piotrkowski, A. Benavent-Climent, E. Suárez, and A. Gallego, "Acoustic emission energy b-value for local damage evaluation in reinforced concrete structures subjected to seismic loadings" *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 102, pp. 262-277, 2018.
- [35] M. E. Zitto, R. Piotrkowski, A. Gallego, F. A. Sagasta, and A. Benavent-Climent, "Damage assessed by wavelet scale bands and b-value in dynamical tests of a reinforced concrete slab monitored with acoustic emission" *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 60, pp. 75-89, 2015.

- [36] D. G. Aggelis, "Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters" *Mechanics Research Communications*, vol. 38, no. 3, pp. 153-157, 2011.
- [37] Y. Farnam, M. R. Geiker, D. Bentz, and J. Weiss, "Acoustic emission waveform characterization of crack origin and mode in fractured and ASR damaged concrete" *Cement and Concrete Composites*, vol. 60, pp. 135-145, 2015.
- [38] K. Ohno and M. Ohtsu, "Crack classification in concrete based on acoustic emission" *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 12, pp. 2339-2346, 2010.
- [39] S. Shahidan, R. Pulin, N. M. Bunnori, and K. M. Holford, "Damage classification in reinforced concrete beam by acoustic emission signal analysis" *Construction and Building Materials*, vol. 45, pp. 78-86, 2013.
- [40] *JCMS-III B5706. Monitoring method for active cracks in concrete by acoustic emission*, Japan: Federation of construction Materials Industries, 2003.
- [41] M. Ohtsu, T. Isoda, and Y. Tomoda, "Acoustic emission techniques standardized for concrete structures" *Journal of Acoustic Emission*, vol. 25, no. 2007, pp. 21-32, 2007.
- [42] K. Ono, Y. Sawada, K. Utsunomiya, and M. Ohtsu, "Classification of micro-cracks generated in concrete by acoustic emission" in *Progress in Acoustic Emission XIV, The Japanese Society for NDI*, 2008, pp. 347-354.
- [43] B. M. Lempriere, *Ultrasound and elastic waves: frequently asked questions*. Elsevier, 2003.
- [44] A. Hikata and C. Elbaum, "Generation of ultrasonic second and third harmonics due to dislocations. I" *Physical Review*, vol. 144, no. 2, p. 469, 1966.
- [45] J. Zhang, S. Li, F.-Z. Xuan, and F. Yang, "Effect of plastic deformation on nonlinear ultrasonic response of austenitic stainless steel" *Materials Science and Engineering: A*, vol. 622, pp. 146-152, 2015.

- [46] R. Hornreich, H. Rubinstein, and R. Spain, "Magnetostrictive phenomena in metallic materials and some of their device applications" *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 7, no. 1, pp. 29-48, 1971.
- [47] Y. Kikuchi, "Magnetostrictive materials and applications" *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 4, no. 2, pp. 107-117, 1968.
- [48] A. A. Doubov, "Screening of weld quality using the magnetic metal memory effect" *Welding in the World*, vol. 41, no. 3, pp. 196-199, 1998.
- [49] A. A. Dubov, "A technique for monitoring the bends of boiler and steam-line tubes using the magnetic memory of metal" *Thermal engineering*, vol. 48, no. 4, pp. 289-295, 2001.
- [50] R. Jarvis, P. Cawley, and P. B. Nagy, "Current deflection NDE for pipeline inspection and monitoring" in *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1706, no. 1: AIP Publishing, p. 160002.
- [51] W. Mao and D. L. Atherton, "Effect of compressive stress on the reversible and irreversible differential magnetic susceptibility of a steel cube" *Journal of magnetism and magnetic materials*, vol. 214, no. 1-2, pp. 69-77, 2000.
- [52] G. W. Housner, L. A. Bergman, T. K. Caughey and A. G. Chassiakos, "Structural control: past, present, and future" *Journal of engineering mechanics*, vol. 123, no. 9, pp. 897-971, 1997.
- [53] N. Torunbalci, "Earthquake protective systems in civil engineering structures-evolution and application" *WIT Transactions on The Built Environment*, vol. 72, 2003.
- [54] J. T. Yao, "Concept of structural control," *Journal of the Structural Division*, vol. 98, no. st 7, 1972.
- [55] *ISO 3010:2017 Bases for design of structures — Seismic actions on structures*, 2017.
- [56] N. Torunbalci, "Seismic isolation and energy dissipating systems in earthquake resistant design" in *Proc. 13th World conference on earthquake engineering, 13WCEE*, Vancouver, Canada, 2004: Citeseer.

- [57] D. Gómez, J. Marulanda, and P. Thomson, "Control systems for dynamic loading protection of civil structures" *Dyna*, vol. 75, no. 155, pp. 77-89, 2008.
- [58] A. Sánchez, "Análisis y evaluación de la aplicación de disipadores histeréticos de fluencia para el mejoramiento del desempeño sísmico de estructuras de hormigón armado en la Ciudad de Guayaquil" ed: Guayaquil, 2014.
- [59] R. A. Cancelado, "Caracterización experimental de riostras de pandeo restringido a escala sometidas a cargas cíclicas" *Revista de Ingeniería*, no. 39, pp. 17-23, 2013.
- [60] C.-M. Uang, M. Nakashima, and K.-C. Tsai, "Research and application of buckling-restrained braced frames" *International Journal of Steel Structures*, vol. 4, no. 4, pp. 301-313, 2004.
- [61] M. Bruneau, C.-M. Uang, and A. Whittaker, *Ductile design of steel structures*. McGraw-Hill New York, 1998.
- [62] A. Benavent-Climent, "A brace-type seismic damper based on yielding the walls of hollow structural sections" *Engineering Structures*, vol. 32, no. 4, pp. 1113-1122, 2010.
- [63] R. N. Thurston, A. D. Pierce, and E. P. Papadakis, *Reference for Modern Instrumentation, Techniques, and Technology: Ultrasonic Instruments and Devices II: Ultrasonic Instruments and Devices II*. Elsevier Science, 1998.
- [64] "NDT Resource Center." <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics>.
- [65] M. J. Sansalone and W. B. Streett, *Impact-echo. Nondestructive evaluation of concrete and masonry*. Bullbrier Press Ithaca, N. Y., 1997, p. 339.
- [66] J. Grandt and F. Alten, *Fundamentals of structural integrity: damage tolerant design and nondestructive evaluation*. John Wiley & Sons, 2003.
- [67] *ISO 24497-1:2007 Non-destructive testing — Metal magnetic memory — Part 1: Vocabulary*, 2007.

- [68] *UNE-EN ISO 16823:2014 Ensayos no destructivos. Ensayos por ultrasonidos. Técnica de transmisión*, 2014.
- [69] J. D. Watson and N. B. Jones, *Digital signal processing: Principles, devices and applications*. Institution of Electrical Engineers, 1990.
- [70] K. Mumtaz, S. Takahashi, J. Echigoya, L. F. Zhang, Y. Kamada, and M. Sato, "Detection of martensite transformation in high temperature compressively deformed austenitic stainless steel by magnetic NDE technique" *Journal of materials science*, vol. 38, no. 14, pp. 3037-3050, 2003.
- [71] L. I. Mañosa, J. L. Macqueron, and J. C. Baboux, "Ultrasonic attenuation during the martensitic transformation in Cu-Zn-Al shape-memory alloys measured by a broad-band pulse-echo technique" *Philosophical Magazine A*, vol. 59, no. 6, pp. 1277-1287, 1989.
- [72] 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, no. 3, pp. 485-509, 2015.
- [73] J. Colin, A. Fatemi, and S. Taheri, "Fatigue behavior of stainless steel 304L including strain hardening, prestraining, and mean stress effects" *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 132, no. 2, p. 021008, 2010.
- [74] D. Broeck, *Elementary engineering fracture mechanics*. Springer Science & Business Media, 2012, p. 469.
- [75] Ministerio de Fomento (España), *EHE-08 instrucción de hormigón estructural y RC-08 instrucción para la recepción de cementos*. La Ley, 2009, p. 648.
- [76] A. Benavent-Climent, D. Galé-Lamuela, and J. Donaire-Ávila, "Energy capacity and seismic performance of RC waffle-flat plate structures under two components of far-field ground motions: Shake table tests" *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 48, 8, pp. 949-969, 2019.
- [77] A. S. Hadi, "Identifying multiple outliers in multivariate data" *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, vol. 54, 3, pp. 761-771, 1992.

- [78] "Procedure for acoustic emission evaluation of tank cars and IM-101 tanks" Operation and Maintenance Department (Association of American Railroads), 1999.
- [79] V. Soltangharaei, R. Anay, N. W. Hayes, L. Assi, Y. Le Pape, Z. J. Ma and P. Ziehl, "Damage Mechanism Evaluation of Large-Scale Concrete Structures Affected by Alkali-Silica Reaction Using Acoustic Emission" *Applied Sciences*, vol. 8, 11, 2018.
- [80] M. E. Zitto, R. Piotrkowski, A. Gallego, and F. A. Sagasta, "AE Wavelet Processing in Dynamical Tests of a Reinforced Concrete Slab" *Journal of Acoustic Emission*, vol. 30, pp. 64–75, 2012.
- [81] D. J. Wald, V. Quitoriano, T. H. Heaton, and H. Kanamori, "Relationship between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California" *Earthquake Spectra*, vol. 15, 3, pp. 557-564, 1999.