UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Edificación

Título:

**ESTUDIO DE LA TRANSMISIÓN DE VIBRACIONES
POR IMPACTO EN LOSAS DE HORMIGÓN Y
MORTERO**

TESIS DOCTORAL

AUTOR: DANIEL FERRÁNDEZ VEGA (Grado en Edificación)

2016

Departamento de Tecnología de la Edificación

Escuela Técnica Superior de la Edificación

Título:

**ESTUDIO DE LA TRANSMISIÓN DE VIBRACIONES
POR IMPACTO EN LOSAS DE HORMIGÓN Y
MORTERO**

AUTOR: DANIEL FERRÁNDEZ VEGA

(Grado de Edificación)

DIRECTOR: CARLOS MORÓN FERNÁNDEZ (Doctor en CC Físicas)

2016

*Tribunal nombrado por el Magfco. Y Excmo. Sr. Rector de la Universidad
Politécnica de Madrid, el día de de 2016*

EL TRIBUNAL CALIFICADOR

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis.

En Madrid, el día de de 2016

Calificación:

El presidente

Los vocales

El secretario

ESTUDIO DE LA TRANSMISIÓN DE VIBRACIONES POR IMPACTO EN LOSAS DE HORMIGÓN Y MORTERO

Daniel Ferrández Vega

Universidad Politécnica de Madrid

Grupo de Investigación de Sensores y Actuadores de la

Universidad Politécnica de Madrid

Trabajo desarrollado para la obtención del Grado de Doctor de la

Universidad Politécnica de Madrid

Junio del 2016

RESUMEN

En la actualidad existe una amplia variedad de sistemas y materiales que se emplean como atenuadores del ruido de impacto y evitan la transmisión de vibraciones en los edificios. Muchos de estos sistemas empleados en construcción, se caracterizan por desolidarizar la capa de compresión del forjado de la estructura, cumpliendo con la condición de ser materiales elásticos.

Para la realización de los ensayos acústicos que permiten validar un determinado material o sistema constructivo como atenuador de este tipo de ruidos, es necesario realizar una prueba poco económica y de difícil ejecución tal y como marca la actual norma UNE-EN ISO 140. En primer lugar se necesita elaborar un forjado de referencia, que ha de ensayarse independientemente. Después, se ha de colocar la losa flotante y volver a realizar la prueba, siendo la diferencia entre las medidas realizadas la que determina la reducción al ruido de impacto.

En este trabajo se presenta un sistema capaz de detectar las vibraciones y medir las más sencillo y económico, consistente en un dispositivo de golpeo alternativo y un sensor capaz de recoger, una vez producido el impacto, la energía absorbida por la placa. Producido el impacto, la baldosa sufre una deformación que absorbe parte de la energía, siendo la restante transmitida a través del material y, a su vez, causante del ruido aéreo inducido en la estancia colindante. La placa absorbe su energía a través de su propia deformación, la cual se mide con ayuda del sensor capacitivo.

Es por ello que para realizar este estudio de la transmisión de vibraciones y evaluar los distintos modos de transmisión a través de las estructuras, se elaboraron planchas de diferentes geometrías y dos materiales distintos, hormigón y mortero, así como, también se varió la geometría de los aislantes y su tipología, poliestireno expandido con y sin elastificar. Además, se tomaron medidas en una losa de grandes dimensiones, que puede servir como premisa para elaborar un nuevo sistema alternativo de medida del aislamiento acústico a ruido de impacto.

Palabras Clave: Vibración, ruido de impacto, sensor capacitivo, hormigón, mortero, poliestireno expandido.

ABSTRACT

Currently there is a large variety of systems and materials used as impact noise attenuators and prevent the transmission of vibrations in buildings. Many of these systems used in construction are characterized by separate the compression layer of the floor of the structure, provided the condition of being elastic materials.

For conducting acoustic tests which validate a particular material or construction system as attenuator such noises, it is necessary to perform an uneconomical and difficult to execute test, such evidence as marks the current UNE-EN ISO 140. First place needs to develop a forged reference to be tested independently. Then, should be placed floating slab and re-testing, the difference between the measurements that determines the impact noise reduction.

This paper describes a simple and economic system capable to detect vibrations, consisting of a striking alternative device and a sensor capable of collecting, once produced the impact, the energy absorbed by the plate system is presented. After the impact, the tile undergoes deformation absorbing part of the energy transmitted through the remaining material being and, in turn, causes air noise induced in the adjacent stay. The plate absorbs energy through its own deformation, which is measured with the capacitive sensor.

That is why to conduct this study of the transmission of vibrations and evaluate different modes of transmission through structures, plates of different geometries and two different materials (concrete and mortar) were developed, as well as geometry also varied insulators and typology, expanded polystyrene with and without elasticized. In addition, measures were taken on a large slab, which can serve as a premise to develop a new alternative system for measuring sound insulation impact.

Keywords: Vibration; impact noise; capacitive sensor; concrete; mortar.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a mi director de tesis, Dr. Carlos Morón Fernández, su orientación y apoyo durante todo el camino recorrido hasta la concepción de esta tesis, desde sus comienzos con el Máster de Innovación Tecnológica en Edificación en el 2013 hasta la fecha de hoy. Sin sus consejos y constantes mensajes de ánimo difícilmente hubiera conseguido llegar hasta aquí.

A los profesores Alfonso García García, David Caballol Bartolomé y Alfonso Cobo Escamilla por la comprensión y paciencia mostrada, además de la enorme ayuda prestada.

A D. José Taboada por haberme dado siempre tan buenos consejos y haberme formado desde mí comienzo en la Escuela.

Al personal del Laboratorio de Materiales de Construcción de la ETSEM por el tiempo que me ha dedicado y los medios que me facilitaron para poder llevar a cabo este trabajo. Así como, a mis compañeros del Laboratorio de Automatismos, Luisa García-Fuentevilla y Alejandro Payán que tanto me han ayudado.

A mis compañeros del colegio Salesianos Carabanchel por haberme respaldado en el trabajo y facilitarme la elaboración de esta tesis.

Por último, a mis amigos que siempre están ahí cuando les necesito. Y a mi familia, que aunque nunca se leerán este documento siempre sabrán que formaron parte de él.

ESTUDIO DE LA TRANSMISIÓN DE VIBRACIONES POR IMPACTO EN PLANCHAS DE HORMIGÓN Y MORTERO

ÍNDICE

Introducción	10
Objetivos	13
Metodología	13
Capítulo 1: Estado del conocimiento	15
1.1. Introducción	15
1.2. Fundamentos físicos	16
1.2.1. Movimiento oscilatorio o vibratorio	17
1.2.2. Movimiento armónico simple (M.A.S)	18
1.2.3. Cinemática del movimiento armónico simple	19
1.2.4. Valor medio, valor eficaz y otros valores	19
1.2.5. Estudio por exponenciales complejas	20
1.2.6. Grados de libertad	21
1.2.7. Dinámica del movimiento armónico simple	22
1.2.8. Energía del movimiento armónico simple	23
1.2.9. Movimiento armónico amortiguado	24
1.2.10. Movimiento ondulatorio no amortiguado unidimensional	27
1.2.11. Propagación de ondas en dos y tres dimensiones	30
1.2.12. Intensidad del movimiento ondulatorio	32
1.2.13. Absorción	35
1.2.14. Velocidad de grupo	36
1.2.15. Ecuación de propagación de ondas	37
1.2.16. Propagación de ondas en una membrana tensa	38
1.3. Normativa	39
1.3.1. Normativa nacional	39
1.3.2. Normativa autonómica	48
1.3.3. Normativa municipal	49
1.4. Ensayos y propiedades de los morteros para edificación	51
1.5. Ensayos y propiedades de los hormigones para edificación	55
1.5.1. Hormigón fresco	55
1.5.2. Hormigón endurecido	58

1.6. Las vibraciones y las estructuras	64
1.6.1. Vibraciones inducidas por las personas	69
1.6.1.1. Estudio de forjados sometidos a la acción de personas andando	71
1.6.1.2. Forjados de salas de baile y gimnasios	75
1.6.1.3. Forjados con asientos fijos y gradas	77
1.6.1.4. Pasarelas y trampolines	78
1.6.2. Estudios sobre el ruido y las vibraciones producidas por las instalaciones	80
1.6.2.1. Equipos generadores de ruido y vibraciones estacionarias	80
1.6.2.2. Comprobación de los niveles de vibraciones generados por las instalaciones de un local	84
1.6.2.3. Efectos de las vibraciones inducidas por la maquinaria	86
1.6.2.4. Descripción de las fuentes sonoras debidas a las instalaciones	87
1.6.2.5. Estudios de la actuación frente a las vibraciones en salas de instalaciones	89
1.6.3. Estudios sobre impactos en las estructuras	94
1.6.4. Estudios experimentales en hormigón y mortero mediante vibraciones	100
1.6.5. El fenómeno de la resonancia mecánica en las estructuras	105
1.7. Sensores capacitivos	110
1.7.1. Sensores de condensador variable	112
1.7.2. Aplicaciones de los sensores capacitivos	117
1.7.3. Sistemas de acondicionamiento	124
Bibliografía	126
Capítulo 2: Materiales y equipos empleados	134
2.1. Introducción	134
2.2. Materiales empleados	135
2.2.1. Cemento	135
2.2.2. Agua	137
2.2.3. Áridos	138
2.2.4. Armaduras de acero	140
2.2.5. Soportes aislantes	141
2.3. Equipos empleados	143
2.3.1. Tamizadora	143
2.3.2. Estufas de secado	144
2.3.3. Amasadora y moldes para mortero	145

2.3.4. Prensas para mortero	147
2.3.5. Hormigonera y moldes para hormigón	148
2.3.6. Prensas para hormigón	149
2.3.7. Cámara húmeda	150
2.3.8. Esclerómetro	150
2.3.9. Amplificador	151
2.3.10. Acelerómetro	152
Bibliografía	153
Capítulo 3: Proceso experimental	155
3.1. Introducción	155
3.2. Ensayos granulométricos	156
3.3. Elaboración de baldosas	160
3.4. Elaboración de la losa	170
3.5. Diseño del equipo de golpeo	174
3.6. Diseño del equipo de medida	177
3.6.1. Fundamentos teóricos del auto-oscilador clásico	177
3.6.2. Diseño del sensor	178
3.6.3. Simulaciones del comportamiento esperado del sensor	181
3.7. Equipo experimental	182
Bibliografía	184
Capítulo 4: Resultados	185
4.1. Introducción	185
4.2. Sensor capacitivo y martillo de golpeo	186
4.3. Sensor capacitivo y vibrado electromagnético	189
4.4. Ensayo normalizado UNE	193
4.5. Acelerómetro y baldosas	197
4.6. Acelerómetro y losa bajo dos equipos de golpeo	205
Bibliografía	207
Conclusiones	208
Futuras líneas de investigación	209
Difusión de resultados	210

Introducción

El trabajo presentado bajo el título “Estudio de la transmisión de vibraciones en placas de hormigón y mortero”, ha sido desarrollado entre los laboratorios de Automatismos perteneciente al Grupo Sensores y Actuadores y el laboratorio de Materiales de Construcción perteneciente al Departamento de Construcciones Arquitectónicas y su Control, ambos pertenecientes a la Escuela Técnica Superior de Edificación de la Universidad Politécnica de Madrid.

En la actualidad, existe un amplio repertorio de ensayos y equipos de medida destinados a estudiar la transmisión de vibraciones a través de los diferentes materiales de construcción. Los impactos producidos sobre la superficie de cualquier elemento constructivo generan una componente acústica denominada ruido de impacto, capaz de percibirse incluso a grandes distancias del foco emisor debido a su facilidad para transmitirse a través de la estructura del edificio.

Debido a la complejidad de la composición de materiales como el hormigón y el mortero, y al coste elevado de la realización de ensayos acústicos, no es sencillo encontrar un hueco para realizar una investigación que sea a su vez viable económicamente e innovadora en esta materia. Si bien es cierto, que tras la derogación de la anterior Norma Básica de Edificación NBE-CA-81 sobre Condiciones Acústicas en los edificios y la entrada en vigor del actual Código Técnico de la Edificación CTE-DB HR, las medidas para acondicionar acústicamente los edificios se han vuelto más restrictivas.

Algunos de los trabajos de investigación desarrollados anteriormente centraban su interés en el enfoque acústico en la edificación. Estos investigadores generalmente trabajan con la composición del material, agregando algún tipo de aditivo o variando las proporciones de la composición de la masa de hormigón/mortero que sea capaz de transmitir con mayor dificultad las vibraciones. Por otro lado, y dentro de este mismo grupo, encontramos investigaciones destinadas a desarrollar sistemas constructivos capaces de atenuar la transmisión por ruido de impacto, bien sea mediante el uso de losas flotantes capaces de desolidarizar el solado del forjado del edificio, o bien mediante resortes u otros materiales elásticos capaces de absorber gran parte de la energía producida tras el impacto y atenuar la transmisión. En ambos casos, el mecanismo de golpeo es solamente un componente del equipo.

Otras aplicaciones de las vibraciones a la investigación también muy empleadas, son aquellas que se centran en medir alguna característica o propiedad física del material en estudio. Estos estudios emplean los equipos de medida comerciales para determinar la frecuencia de vibración de los materiales, y los aplican de forma original para encontrar métodos de medida alternativos de propiedades como el módulo de elasticidad dinámico, la frecuencia de resonancia del material o el grado de compactación de la pieza tras el vibrado.

Finalmente, existe un tipo más dentro de las investigaciones con vibraciones, que serían aquellas que tratan de mejorar la forma en que se realizan los ensayos, con el objeto de obtener resultados más precisos o similares pero más económicos. Dentro de estos estudios, se puede hacer a su vez una sub-clasificación: indicando por una parte los que se centran en mejorar un componente concreto del equipo (ej. Mecanismo de golpeo, amplificador de frecuencia, precisión del software empleado...etc.), y de otra parte, aquellos que se orientan hacia la metodología mediante la cual se realiza el ensayo, tratando de crear nuevas prácticas que permitan obtener mayor rendimiento con los equipos actuales.

Con estos antecedentes, se ha considerado de gran interés la realización de un estudio que se centre en la transmisión de vibraciones, y que incluya parte de las tres tipologías de investigación antes descritas. La motivación de este trabajo, surgió con la intención de crear un método alternativo para la evaluación del ruido de impacto, diferente al propuesto por la actual norma UNE EN-140, para forjados horizontales y losas de hormigón armado.

De tal forma que parte del estudio se centró en el diseño y caracterización de un sensor capacitivo capaz de detectar y mesurar los impactos producidos sobre la superficie de dos materiales diferentes (hormigón y mortero), así como, estudiar la influencia de la geometría del aislante y del tamaño de la muestra a la hora de detectar dichas vibraciones, evaluando a su vez la diferencias existentes entre dos tipos de aislantes distintos el poliestireno expandido y el poliestireno expandido elastificado. Por otro lado, también se elaboró una losa de hormigón armado con las dimensiones propuestas por la norma ISO/CD 16251-1 para evaluar el efecto que producía el uso del equipo de golpeo desarrollado, frente al tradicional propuesto por la norma UNE, a fin de obtener un método de precertificación de losas de forjado económico y fiable.

Objetivos

Los objetivos principales que se han establecido para la realización de este trabajo son:

- I. Diseñar, construir y parametrizar un sensor capacitivo capaz de detectar vibraciones producidas por impacto sobre la superficie de dos materiales diferentes, hormigón y mortero.
- II. Estudio del comportamiento del sensor bajo dos equipos de golpeo diferentes sobre las mismas baldosas testigo. Posteriormente se analizará la descomposición en armónicos mediante la transformada rápida de Fourier.
- III. Estudiar la influencia de la geometría del aislante y de las planchas, frente a la transmisión de vibraciones en materiales de la misma composición e idéntico espesor.
- IV. Estudiar el comportamiento del equipo de golpeo diseñado en losas de forjado.

Además, como objetivos adicionales o complementarios destacan los siguientes:

- V. Estudiar la viabilidad del poliestireno expandido elastificado (EEPS) como aislamiento a ruido de impacto.
- VI. Establecer una comparación entre el poliestireno expandido (EPS) y el poliestireno expandido elastificado (EEPS) como aislantes a ruido de impacto.
- VII. Estudiar la influencia de la dosificación en la transmisión de vibraciones por impacto en hormigón y mortero.

Metodología

La presente tesis se articula en torno a cinco capítulos estructurados de la siguiente manera:

El **primer capítulo** aborda los distintos aspectos teóricos relacionados con la transmisión de vibraciones en estructuras. Se ha establecido para ello un estado del conocimiento a partir de la investigación bibliográfica en temas relacionados con esta materia, destacando los contenidos referentes a:

- Principios físicos que rigen la transmisión de vibraciones y ecuaciones que modelizan la propagación de ondas mecánicas en sólidos.

Tesis Doctoral: Estudio de la transmisión de vibraciones en losas de hormigón y mortero.

- Normativa acústica relacionada con el principio de transmisión por ruido de impacto en edificios de viviendas.
- Propiedades físicas y mecánicas de los dos materiales trabajados en esta tesis, hormigón y mortero, indicando los estudios más novedosos que aplican la transmisión de vibraciones para su obtención.
- Estudios sobre la influencia de la acción de las personas y de las instalaciones en la transmisión de vibraciones a través de las estructuras, así como, las diferentes técnicas existentes que se encargan de atenuar dichas vibraciones y evitar su propagación a lo largo de todo el edificio.
- Sensores capacitivos y equipos de medida más novedosos empleados en la detección y medición de vibraciones.

En el **segundo capítulo** se definen y analizan los distintos materiales y equipos empleados para la realización de esta tesis. Se indican entre otros, las características físicas y mecánicas de los distintos materiales, así como, la normativa y propiedades que conciernen a los distintos equipos empleados.

El **tercer capítulo** recoge los ensayos previos realizados en el laboratorio que permiten caracterizar la tipología de hormigón y mortero que se desarrollaron para este trabajo. También se incluye el proceso de elaboración de las planchas y de la losa de hormigón, así como, los trabajos de diseño y caracterización del equipo de medida y del sensor capacitivo implementado para la toma de medidas.

El **capítulo cuarto** muestra los resultados obtenidos en cada una de las fases del estudio y la metodología con la que se llevaron a cabo, así como la discusión de los mismos.

El **capítulo quinto** recoge las conclusiones obtenidas durante la realización de esta tesis y se plantean las líneas a seguir en investigaciones futuras. Además, se indican las publicaciones realizadas durante el desarrollo del presente trabajo hasta la fecha.

CAPÍTULO 1**ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO****1.1. Introducción.**

Antes de comenzar describiendo los ensayos realizados durante este trabajo de investigación, así como los materiales escogidos y métodos empleados para su desarrollo, se hace necesario exponer de manera resumida todos aquellos avances tecnológicos y estudios teóricos y experimentales, que han servido de apoyo y favorecen la comprensión posterior de este trabajo.

Es por ello, que en este apartado se describe con el rigor que exige la ocasión, los diferentes conceptos teóricos que son necesarios para la correcta comprensión de la presente tesis doctoral.

Para ello, este apartado se subdivide a su vez en otros tales como: los principios físicos que rigen la transmisión de vibraciones en medios materiales, la normativa actual sintetizada y recogiendo únicamente las partes que guardan relación con los experimentos realizados, además de las investigaciones más actuales y más innovadoras que versan sobre las diferentes formas de generar vibraciones y su influencia sobre las estructuras (especialmente las de hormigón y mortero) y las instalaciones de edificación, principales focos emisores de ruido de impacto en las construcción.

También se describen en este apartado las diferentes formas de medir esas vibraciones, y los conceptos de electrónica y de sensores (en especial los capacitivos) que guardan relación con el equipo de medida desarrollado en este trabajo.

1.2. Fundamentos físicos.

Si en un punto de un medio material provocamos una perturbación, la experiencia comprueba que ésta se propaga en el medio, llegando a los demás puntos del material con un retraso tanto mayor, cuanto más alejado se encuentre del centro o foco donde se produjo la perturbación (siempre y cuando el medio se pueda asimilar homogéneo). Este fenómeno de propagación se conoce como movimiento ondulatorio.

La perturbación puede ser de naturaleza muy diversa y su propagación se realizará por diferentes causas, dependiendo de la naturaleza física de la perturbación a propagar y las características del medio propagador. Para la realización de este trabajo se han empleado perturbaciones producidas por impacto sobre una superficie plana de hormigón o mortero, siendo éstos nuestros medios de propagación y tratando por tanto con un tipo de ondas específico denominadas ondas mecánicas.

En la propagación de ondas a través de medios materiales jamás se propaga materia, lo que se propaga es energía, es decir, el movimiento ondulatorio se puede considerar como un fenómeno de propagación de la energía. Ejemplo típico es aquel que representa un corcho situado sobre una superficie del agua; si en un punto de la citada superficie se produce una perturbación (ej. Dejar caer un objeto), la perturbación se propaga a los diferentes puntos de la superficie y, al llegar donde está el corcho, hace que éste se mueva en sentido vertical subiendo y bajando, pero no en el sentido de propagación que es el plano de la superficie del agua [1].

En el caso anterior, la onda se propaga a merced de la tensión superficial de la superficie del agua. En nuestro caso, se propagará en virtud de las características elásticas del hormigón.

Esta oscilación de las partículas, está íntimamente relacionada con otro fenómeno físico como es el movimiento vibratorio.

Cuando una partícula o cualquier sistema se mueven periódicamente con relación a su posición de equilibrio estable, se dice que oscila o vibra alrededor de esa posición. Este tipo de movimiento se presenta en multitud de ocasiones en la naturaleza, desde los átomos hasta en los tímpanos de una persona. Pero si algo es característico de un movimiento oscilatorio es su periodicidad, siendo el movimiento armónico simple el

movimiento vibratorio más sencillo y al mismo tiempo más importante dentro de los posibles mecanismos que describen dicha variación periódica.

En el movimiento ondulatorio, la perturbación propagada se debilitará debido no solamente a la disipación de energía por absorción del medio propagador o por su transformación, sino también a que la energía comunicada en la perturbación inicial se va distribuyendo cada vez entre un mayor número de partículas y la amplitud de vibración de éstas irá disminuyendo. Es importante tener en cuenta que la perturbación propagada es debida a la variación de una magnitud escalar, como son el desplazamiento y la densidad del medio.

Así, antes de comenzar nuestro estudio, se debe distinguir muy bien entre el movimiento de la onda que avanza a una velocidad constante a través del medio, y el movimiento de una partícula, que es armónico simple y perpendicular a la superficie.

1.2.1. Movimiento oscilatorio o vibratorio.

Se define oscilación como el movimiento que se produce en torno a una posición de equilibrio con pasos sucesivos en torno a la misma. Asimismo, se denomina vibración a un movimiento periódico, es decir, a un movimiento que se repite en todos los detalles después de un cierto intervalo de tiempo y que se denomina precisamente período.

En la práctica, es muy frecuente encontrarnos con un tipo de movimiento que se origina debido a la fuerza elástica recuperadora del material deformado, la cual se manifiesta produciendo vibraciones en torno a su posición de equilibrio. Este tipo de oscilaciones se produce con frecuencia en edificación, como es el caso de los puentes o los edificios cuando reciben súbitamente una carga.

Se sabe además, que cuando se obliga a un cuerpo a cambiar de forma, la fuerza deformadora es proporcional a la deformación, siempre y cuando no se sobrepase el límite de elasticidad. Esta variación puede consistir en un aumento o una disminución de longitud, en una flexión, en una torsión o bien otros tipos menos frecuentes y que se estudian en otros campos [2].

Si restringimos el caso de nuestra fuerza deformadora al estudio de un empuje, en cuyo caso la deformación es simplemente el desplazamiento del punto de aplicación de la fuerza, ésta se halla relacionada con el desplazamiento mediante la Ley de Hooke:

$$F = k \cdot x \quad (1)$$

donde k es la constante de proporcionalidad elástica y x es el desplazamiento respecto a la posición de equilibrio.

Cuando la fuerza actúa como recuperadora en el caso de un sólido elástico, ésta se produce en sentido contrario a la fuerza aplicada y por tanto, cambia el signo de la ecuación (1).

1.2.2. Movimiento armónico simple (M.A.S).

El caso más sencillo de movimiento en torno a una posición de equilibrio lo constituye el movimiento armónico. Para su definición, supondremos que una partícula de masa m puede moverse libremente en la dirección del eje de abscisas y elegiremos el origen de coordenadas como la posición de equilibrio estable. Podemos decir que una partícula se mueve con movimiento armónico simple (M.A.S) cuando su posición esté dada por una expresión del tipo:

$$x = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

donde la constante A se denomina amplitud de la oscilación y es el mayor valor posible de la variable x que, de forma genérica, se suele denominar elongación. La cantidad $(\omega t + \varphi)$ se denomina fase del movimiento y su valor φ se corresponde al estado inicial y se conoce con el nombre de fase inicial.

Por otro lado, al tratarse de una función seno o coseno este desplazamiento se repite cada cierto periodo, definiendo éste como el tiempo mínimo necesario para que la partícula o el sistema realicen un ciclo completo y vuelvan a ocupar la misma posición o estado. Lo designaremos mediante la letra T , se mide en segundos y en el caso del movimiento armónico debe de verificar que:

$$A \sin(\omega t + \varphi) = A \sin(\omega(t + T) + \varphi) \Rightarrow \omega t + \varphi + 2\pi = \omega(t + T) + \varphi \Rightarrow T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (3)$$

Otro término de interés es el número de oscilaciones por unidad de tiempo, es decir la frecuencia, definida como:

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad [s^{-1} \text{ ó } Hz] \quad (4)$$

donde la cantidad ω se denomina frecuencia angular o pulsación del movimiento, y se mide en rad/s, pudiéndose expresar en función del período o de la frecuencia, sin más que despejar de alguna de las dos ecuaciones anteriores.

1.2.3. Cinemática del movimiento armónico simple.

Como hemos visto, una oscilación armónica puede expresarse analíticamente de diferente forma según el origen escogido. Se entiende así por cinemática del M.A.S las ecuaciones de la velocidad y de la aceleración.

La velocidad de la partícula se obtiene sin más que derivar frente al tiempo la ecuación indicada anteriormente para la posición:

$$v(t) = \dot{x} = \frac{dx}{dt} = A\omega \cos(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

Si además, derivamos otra vez frente al tiempo la ecuación de la velocidad, obtendremos la ecuación correspondiente para la aceleración.

$$a(t) = \ddot{x} = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi) = -\omega^2 x \quad (6)$$

Esto nos indica que en este movimiento la aceleración es proporcional y opuesta al desplazamiento.

1.2.4. Valor medio, valor eficaz y otros valores.

Además de la función que describe el movimiento, en la práctica se utilizan otras formas de expresar las características de esa función.

Valor pico de una función: Es el que da la máxima desviación de la posición de equilibrio en un elemento que oscila, para una función armónica del tipo $x = A \sin(\omega t + \varphi)$ es simplemente la amplitud A .

Valor pico a pico de una función: El que da el recorrido máximo de un elemento que oscila, para un movimiento descrito por una función armónica es $2A$, el doble de la amplitud.

Valor medio de una función: Se define como el valor medio de una función $x(t)$ en un periodo (o en general en un cierto intervalo de tiempo T) como:

$$x_{medio} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (7)$$

El valor medio de una función armónica en un período es cero.

Valor eficaz o cuadrático medio de una función: Se define el valor eficaz o valor cuadrático medio de una función $x(t)$ en un período (o en general en un intervalo de tiempo T) como la raíz cuadrada del valor medio de su cuadrado, es decir:

$$x_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (8)$$

Este es quizás el valor más significativo, ya que está relacionado con la energía. También se denomina valor *rms* (*root mean square*). Para una función armónica, resulta ser el valor de pico dividido por $\sqrt{2}$.

Valor medio rectificado de una función: Se define como:

$$x_{mr} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (9)$$

que para una función armónica es el valor de pico multiplicado por $2/\pi$

1.2.5. Estudio por exponenciales complejas.

Una forma interesante de representar un movimiento oscilatorio es a través de un vector que rota en el plano complejo. Antes de presentar este método de representación, conviene recordar que un vector complejo expresado en forma módulo argumental está relacionado con el mismo vector expresado explícitamente a través de la ecuación de Euler:

$$Ae^{i\theta} = A(\cos\theta + i\sin\theta); \quad Ae^{-i\theta} = A(\cos\theta - i\sin\theta) \quad \text{donde } i = \sqrt{-1} \quad (10)$$

Así, podemos considerar la ecuación para el espacio recorrido en el movimiento armónico simple mediante el siguiente vector complejo:

$$x = Ae^{i(\omega t + \varphi)} \quad (11)$$

Este vector gira en el plano complejo con una velocidad angular constante ω en el sentido antihorario, formando en el instante inicial $t = 0$ un ángulo φ con la horizontal

o eje real. La proyección horizontal de este vector representa la parte real del vector complejo y la proyección vertical, representa la parte imaginaria de dicho vector, y ambas pueden escribirse respectivamente como:

$$\text{Real: } A\cos(\omega t + \varphi) \quad \text{Imaginaria: } A\sin(\omega t + \varphi) \quad (12)$$

Esta representación, es la que ha dado el nombre de frecuencia angular a la magnitud ω . Además, agrupando los términos que son constantes en esta representación compleja, se define como amplitud compleja a la expresión:

$$\bar{A} = Ae^{i\varphi} \Rightarrow x = \bar{A}e^{i\omega t} \quad (13)$$

Si el desplazamiento viene dado por la parte real de la ecuación de la posición, la velocidad vendrá dada por la parte real de su derivada.

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = i\omega A e^{i(\omega t + \varphi)} \Rightarrow v(t) = -A\omega \sin(\omega t + \varphi) \quad (14)$$

Asimismo, la aceleración será la parte real de la segunda derivada de esa misma expresión para la posición:

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A e^{i(\omega t + \varphi)} \Rightarrow a(t) = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi) = -\omega^2 x \quad (15)$$

Así pues, se demuestra que las derivadas sucesivas en las exponenciales complejas se van obteniendo sin más que multiplicar la expresión que le precede por el término $i\omega$. Además, al multiplicar un número complejo por un número real se multiplica su módulo, o lo que es igual, sus dos componentes, por lo cual el argumento no varía. La multiplicación de un número complejo por la unidad imaginaria equivale a su vez a girar aquél $\pi/2 \text{ rad}$ en sentido contrario a las agujas del reloj, puesto que la parte real pasa a ser imaginaria y la parte imaginaria pasa, cambiada de signo, a ser real.

La utilización de exponenciales complejas simplifica los cálculos, sobre todo en procesos en los que se requiere de la composición de varios movimientos armónicos, los cuales no son objeto de estudio de este trabajo.

1.2.6. Grados de libertad.

Diremos que un sistema mecánico tiene un grado de libertad si su posición geométrica puede expresarse en cada instante en función de una única variable, (ej. ángulo de giro de un cigüeñal del motor de un coche montado rígidamente).

En general, si son necesarias n variables para especificar completamente la posición de un sistema mecánico, decimos que el sistema tiene n grados de libertad (Ejemplo: un sólido rígido que se desplaza en el espacio libremente).

En el extremo más opuesto, se encuentra el caso de los sistemas con infinitos grados de libertad, como es el caso de un elemento flexible como una viga, la cual cargándola adecuadamente dentro de sus límites es posible deformarla prácticamente de cualquier manera. La descripción de esta curva requiere de una función $f(x)$ que equivale a los infinitos grados de libertad.

1.2.7. Dinámica del movimiento armónico simple.

Considerando un sistema con un grado de libertad, sometido a una fuerza recuperadora proporcional al desplazamiento, considerando la ley de Hooke antes mencionada (1) y teniendo en cuenta la ecuación fundamental de la dinámica dada por la expresión:

$$F = \frac{d(m \cdot \vec{v})}{dt} \quad (16)$$

la fuerza quedaría definida como:

$$F = -kx = ma \Leftrightarrow F = -kx = -m\omega^2 x \quad (17)$$

Esto pone de manifiesto que la fuerza en un movimiento armónico simple es proporcional al desplazamiento y opuesta a él. Por tanto, la fuerza está siempre dirigida hacia el origen, tratando de llevar la partícula a su posición de equilibrio estable.

Con lo descrito, ya estamos en condiciones de enunciar la ecuación fundamental de la dinámica que describe el movimiento del sistema estudiado:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = 0 \rightarrow \frac{d^2 x}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \quad \text{de donde se deduce } \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (18)$$

La solución general de esta ecuación diferencial es una función armónica de la forma seno o coseno que oscila con la frecuencia natural del sistema. Además, como se vio también, esta solución puede expresarse en forma de exponencial compleja, siendo soluciones tanto la parte real como la parte imaginaria.

1.2.8. Energía del movimiento armónico simple.

En este apartado obtendremos las energías potencial y cinética de un oscilador libre, para terminar haciendo un balance que nos permita calcular la energía total del sistema,

La energía cinética de una partícula que realiza un movimiento armónico simple, teniendo en cuenta el valor de la velocidad ya calculado para este tipo de desplazamientos, viene dado por:

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mA^2\omega^2\cos^2(\omega t + \varphi) \quad (19)$$

Por otro lado, la energía potencial de la cual deriva la fuerza viene reflejada por la siguiente ecuación:

$$E_P = - \int F \cdot dr = - \int_0^x -kx dx = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}kA^2\sin^2(\omega t + \varphi) \quad (20)$$

Esta energía potencial como se aprecia no es constante, sino que fluctúa con el movimiento armónico simple sin hacerse nunca negativa. La suma de estas dos energías teniendo en cuenta que $k = m\omega^2$, es:

$$E_M = E_C + E_P = \frac{1}{2}mA^2\omega^2\cos^2(\omega t + \varphi) + \frac{1}{2}kA^2\sin^2(\omega t + \varphi) = \frac{1}{2}m\omega^2A^2 \quad (21)$$

Esta suma, entendida como la energía total del sistema, se mantiene constante durante el movimiento siempre y cuando no existan fuerza disipativas.

Esta energía total depende del cuadrado de la amplitud, teniéndose una energía cuatro veces mayor para una amplitud doble. Tanto la energía potencial promedio como la energía cinética promedio del oscilador son la mitad de la energía total. Además, cuando la energía potencial es máxima la energía cinética es nula y viceversa.

En nuestras planchas de mortero y hormigón, este principio de conservación de la energía debe ser considerado de manera teórica, ya que establece para determinadas condiciones una buena aproximación a la realidad, pero, en nuestros ensayos existirán fuerzas atenuadoras como por ejemplo la temperatura o el rozamiento y habrá pérdidas de energía que en cierta medida se intentarán controlar.

Fig. 1.2.1. Suma de las energías cinética y potencial según varía la posición.

1.2.9. Movimiento armónico amortiguado.

Las vibraciones de todo sistema real conllevan una disipación de energía. En consecuencia, la amplitud de las vibraciones libres no permanecerá constante, sino que irá disminuyendo a medida que lo hace la energía del sistema.

Para establecer la idea de este apartado, imaginaremos un sistema oscilante unidimensional con una partícula suspendida sobre él. En la posición de equilibrio estable se verifica que $k\delta - mg = 0$, siendo δ el alargamiento del muelle en esa posición. Para un desplazamiento x a partir de la posición de equilibrio, la ecuación de la dinámica se expresa como:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \Rightarrow \ddot{x} + \frac{2}{\tau}\dot{x} + (\omega_0)^2 x = 0 \quad (22)$$

donde $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ es la pulsación de la oscilación libre no amortiguada, c es el coeficiente de amortiguamiento y $\tau = 2m/c$ es el tiempo de relajación de la amplitud.

Esta ecuación, es una ecuación diferencial de segundo orden, de coeficientes constantes, cuya solución es del tipo: $x = Ae^{zt}$, y las derivadas de ésta respecto al tiempo sustituidas en la ecuación anterior son:

$$\dot{x} = Aze^{zt}, \quad \ddot{x} = Az^2e^{zt} \Rightarrow \text{Ec. Característica: } z^2 + \frac{2}{\tau}z + (\omega_0)^2 = 0 \quad (23)$$

$$z_{1,2} = -\frac{1}{\tau} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{\tau}\right)^2 - (\omega_0)^2} \quad (24)$$

Según la naturaleza de las soluciones de esta ecuación característica, se presentan tres posibles casos distintos.

Caso 1: Amortiguamiento Crítico. Es el que aparece cuando se da $(1/\tau) = \omega_0$, al coeficiente de amortiguamiento en este caso se le denomina de amortiguamiento crítico, y su valor se calcula como:

$$\frac{1}{2} \frac{c_c}{m} = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{donde } c_c = 2\sqrt{mk} \quad (25)$$

En este caso, la raíz de la ecuación característica es doble y la solución general de la ecuación diferencial queda de la forma:

$$x = (A + Bt)e^{-t/\tau} \quad (26)$$

El movimiento no es oscilatorio. Las constantes A y B se determinan de acuerdo a las dos condiciones particulares del movimiento.

Caso 2: Amortiguamiento sub-crítico. Se presenta cuando se da:

$$\omega_0 > \frac{1}{\tau} \quad \text{ó} \quad \sqrt{\frac{k}{m}} > \frac{1}{2} \frac{c}{m} \quad \text{de donde } c < 2\sqrt{mk} = c_c \quad (27)$$

El coeficiente de amortiguamiento es en este caso inferior al crítico. Las raíces de la ecuación característica son números complejos conjugados, que simplificando, nos dan la siguiente solución general para la ecuación.

$$\frac{1}{\tau} = a \quad y \quad b = \sqrt{(\omega_0)^2 - \left(\frac{1}{\tau}\right)^2} \Rightarrow \text{Las raíces son: } z_{1,2} = -a \pm bi \quad (28)$$

$$\text{Solucion General de la forma } x = A_1 e^{z_1 t} + A_2 e^{z_2 t} \quad (29)$$

que se puede escribir como:

$$x = A_1 e^{-at} e^{ibt} + A_2 e^{-at} e^{-ibt} = e^{-at} [(A_1 + A_2) \cos bt + i(A_1 - A_2) \sin bt] \quad (30)$$

y en la cual A_1 y A_2 deben ser complejos conjugados, ya que el movimiento es real. Haciendo por tanto:

$$\begin{aligned} (A_1 + A_2) &= A \sin \varphi \\ (A_1 - A_2)i &= A \cos \varphi \end{aligned} \Rightarrow x = A e^{-at} \sin(bt + \varphi) = \overbrace{A e^{-t/\tau}}^{\text{Amplitud}} \overbrace{\sin\left(\sqrt{(\omega_0)^2 - \left(\frac{1}{\tau}\right)^2} t + \varphi\right)}^{\text{Pulsación } \omega} \quad (31)$$

De lo anterior deducimos que las oscilaciones amortiguadas serán más lentas, cuanto menor sea τ . El tiempo de relajación de cualquier variable es el tiempo que tarda la amplitud en llegar a valer $1/e$ de su valor inicial. Viendo que, efectivamente, τ es el tiempo de relajación de la amplitud, que en el instante inicial coincidirá con la amplitud máxima. Se considera que el tiempo de relajación de la amplitud será por tanto:

$$A e^{-t/\tau} = A e^{-1} \Rightarrow t = \tau \quad (32)$$

Así, la oscilación estará comprendida entre las exponenciales: $x = \pm A e^{-t/\tau}$

Las constantes que aparecen en la ecuación del movimiento deben determinarse particularizando ésta para dos situaciones dadas. En general, suelen darse las condiciones iniciales del movimiento, es decir, la posición x_0 y la velocidad v_0 , en el instante $t = 0$. Con el objeto de no engrosar demasiado este apartado, se indica directamente la solución para la constante:

$$A^2 = x_0^2 + \frac{(ax_0 + v_0)^2}{b^2} \quad (33)$$

El factor de calidad Q del sistema oscilante se define como el semiproducto del tiempo de relajación de la amplitud por la pulsación libre no amortiguada:

$$Q = \frac{1}{2} \tau \omega_0 = \frac{m}{c} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2} \frac{c_c}{c} \quad (34)$$

Por tanto siempre será mayor de 1/2, puesto que c es inferior, en este caso, al amortiguamiento crítico. La pulsación de la oscilación libre puede expresarse en función del factor de calidad y los periodos también están relacionados con ella.

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{\tau^2 \omega_0^2}} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} \quad T = T_0 \frac{2Q}{\sqrt{4Q^2 - 1}} \quad (35)$$

Se define también, el decremento logarítmico, d , de una oscilación amortiguada, como el logaritmo neperiano del cociente de dos amplitudes separadas por un período:

$$d = \ln\left(\frac{A_n}{A_{n+1}}\right) = \ln\left(\frac{e^{-at_1}}{e^{-a(t_1+P)}}\right) = aT = \frac{2\pi}{\tau\omega} \rightarrow \text{o lo que es igual: } d = \frac{2\pi}{\sqrt{4Q^2 - 1}} \quad (36)$$

Así, un factor de calidad grande indica una disminución lenta de la amplitud de la oscilación y viceversa.

Caso 3: Sobre – Amortiguamiento. En este caso las dos raíces de la ecuación característica son reales, es decir:

$$\frac{1}{\tau} > \omega_0 \quad \text{ó bien} \quad \frac{1}{2} \frac{c}{m} > \sqrt{\frac{k}{m}} \Rightarrow c > 2\sqrt{km} = c_c \quad (37)$$

La solución general de la ecuación característica es ahora: $x = A_1 e^{z_1 t} + A_2 e^{z_2 t}$. Puesto que z_1 y z_2 son reales, la solución es una exponencial real y como el movimiento no es

oscilante, la forma dependerá del valor de las constantes A_1 y A_2 , que deben determinarse mediante dos condiciones particulares del movimiento.

En consecuencia, para mantener un sistema amortiguado oscilando de forma permanente, sería necesario suministrar una cantidad de energía equivalente a la que absorbe dicha amortiguación. Un oscilador tiene una frecuencia natural, entendiendo como tal la que tendría si no estuviesen presentes ni el amortiguamiento ni el sistema impulsor. Una forma de introducir energía en un sistema amortiguado es generando un movimiento armónico simple, con una frecuencia que lo acompañe. Si el sistema impulsor oscila con la misma frecuencia que la natural del sistema, la amplitud sería máxima. Este fenómeno se denomina resonancia, y las frecuencias que generan estos fenómenos, frecuencias de resonancia [3].

1.2.10. Movimiento ondulatorio no amortiguado unidimensional.

Para comenzar este apartado imaginemos un medio compuesto de un gran número de partículas o elementos, (por ejemplo nuestras planchas de mortero u hormigón), en el cual cada una de estas partículas se encuentra unida o acoplada a sus vecinas por medio de una sustancia elástica. Si uno de los extremos de este medio se perturba o se desplaza de algún modo, el desplazamiento no tendrá lugar inmediatamente en todas las restantes partes del medio. Este desplazamiento originará una fuerza elástica en la sustancia próxima a él, de tal forma que la partícula contigua se desplazará, después lo hará la inmediata, y así sucesivamente. En otras palabras, el desplazamiento se propagará a lo largo del medio con una velocidad determinada.

Dentro de este desplazamiento producido, el proceso se verá influenciado según sea la dirección en la que varía el valor de la magnitud que define la perturbación, pudiéndose dar los siguientes casos:

- ❖ La dirección en la que varía la magnitud que define la perturbación coincide con la dirección de propagación de la misma, en cuyo caso reciben el nombre de ondas longitudinales (Ej. Ondas sonoras).
- ❖ La dirección en la que varía la magnitud que define la perturbación es normal a la dirección de propagación de la misma, en cuyo caso reciben el nombre de ondas transversales (Ej. Ondas superficiales en los líquidos).

Es importante denotar que para que una onda mecánica transversal se propague en un cierto medio, es necesario que este sea capaz de soportar esfuerzos cortantes, puesto que de lo contrario la perturbación primitiva no se transmitirá a las contiguas. Esta es la razón por la cual en los gases no se propagan este tipo de ondas, y en los líquidos se propagan únicamente las superficiales en virtud de su tensión superficial. Por otro lado, en las ondas longitudinales hay variaciones de densidad en los diferentes puntos del medio, y las ondas por tanto se propagan cualquiera que sea la naturaleza de este. En algunos casos estos dos tipos de ondas aparecen combinados, como ocurre con las ondas sísmicas.

Así, la descripción matemática de un movimiento ondulatorio no amortiguado unidimensional se puede realizar mediante una función del tipo $Y = f(x, t)$, en la que Y determine el estado de la perturbación, x la distancia al foco perturbador y t el tiempo.

Fig. 1.2.2. Representación gráfica en ejes de coordenadas del movimiento armónico no amortiguado.

Supongamos pues, que en el instante inicial el estado de la perturbación está dado por la función $Y = f(x)$, es decir, el foco de la perturbación ha realizado el primer periodo de su movimiento vibratorio y en el medio ha aparecido una onda del tipo $Y(x, 0) = f(x)$ que se va a propagar.

Si la perturbación se mueve con una velocidad constante v , que se denomina comúnmente como velocidad de fase, al cabo de un cierto tiempo t habrá recorrido un espacio vt (Ver Fig. 1.2.2). Trasladando el origen del sistema de referencia a dicha posición, la misma función que describe la onda en el instante $t = 0$, con origen en el $(0,0)$, es la que describe la onda en el instante t en esa posición que denotaremos como x' , esto es:

$$Y(x, t) = f(x') \quad \overset{x' = x - vt}{\Rightarrow} \quad Y(x, t) = f(x - vt) \quad (38)$$

En el caso de que la onda anterior se propagase en sentido contrario, la única variación sería la velocidad que tendría signo negativo, esto es, la función se expresaría como: $Y(x, t) = f(x + vt)$

Especial interés tiene el estudio de la propagación de una onda armónica:

$$Y(x, t) = A \sin[k(x + vt)] \quad (39)$$

donde A es la amplitud de la onda o valor máximo de la perturbación, x la distancia al foco, k el número de onda, v la velocidad de propagación o velocidad de fase, y el conjunto $k(x - vt)$ la fase de la onda en el punto x y en el instante t .

Se define a su vez la longitud de onda del movimiento ondulatorio como la distancia, medida según la dirección de propagación, entre dos puntos consecutivos que en todo momento tienen el mismo estado de perturbación, lo que también puede definirse como la longitud mínima de onda que por repetición puede generar una onda completa. Se simboliza mediante λ , y su valor se calcula como:

$$A \sin[k(x - vt)] = A \sin\{k[(x + \lambda) - vt]\} \quad (40)$$

$$2\pi + k(x - vt) = k[(x + \lambda) - vt] \Rightarrow \lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (41)$$

La longitud de onda también podría denominarse periodo espacial, puesto que la onda se repite cada longitud λ . A la constante k , en cambio, se la denomina número de onda, porque es el número de longitudes de onda en la distancia 2π .

Cuando dos puntos en todo instante están en igual estado de perturbación, se dice que están en fase, debiendo verificarse:

$$\begin{aligned} Y_1 = Y_2 &\Leftrightarrow \sin k(x_1 - vt) = \sin k(x_2 - vt) \Leftrightarrow 2n\pi + k(x_1 - vt) = k(x_2 - vt) \\ &\Leftrightarrow k(x_1 - x_2) = 2n\pi \Leftrightarrow (x_1 - x_2) = n\lambda \end{aligned} \quad (42)$$

Es decir, están en fase todos los puntos cuya separación entre sí es igual a un número entero de longitudes de onda.

El caso opuesto sucede cuando dos puntos vibran en oposición, en este caso se verifica:

$$\begin{aligned} -Y_1 = Y_2 &\Leftrightarrow -\sin k(x_1 - vt) = \sin k(x_2 - vt) \Leftrightarrow (2n + 1)\pi + k(x_1 - vt) \\ &= k(x_2 - vt) \Leftrightarrow (x_1 - x_2) = (2n + 1)\frac{\lambda}{2} \end{aligned} \quad (43)$$

Es decir, están en oposición todos los puntos cuya separación entre sí es igual a un número impar de medias longitudes de onda.

Se denomina frecuencia del movimiento ondulatorio, ν , al número de ondas que pasan por un punto fijo en la unidad de tiempo.

Se verifica a su vez que $v = \lambda \cdot \nu$, puesto que el número de ondas que pasan en la unidad de tiempo multiplicado por la longitud de cada onda es la longitud que pasa por la unidad de tiempo, es decir, la velocidad de onda. Si tenemos en cuenta además, que la frecuencia angular $\omega = 2\pi\nu$, podemos escribir:

$$Y(x, t) = A \sin\left(kx - \frac{2\pi}{\lambda} vt\right) = A \sin(kx - \omega t) \quad (44)$$

Además, si T es el período de la oscilación, al ser $T = 1/\nu = 2\pi/\omega$, tenemos:

$$Y(x, t) = A \sin 2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right) \quad (45)$$

Por tanto, en el movimiento ondulatorio sinusoidal hay dos tipos de periodicidad, una en el tiempo, de periodo T , y otra en el espacio de periodo λ .

La especial importancia de las ondas armónicas se debe al hecho de que cualquier perturbación periódica puede descomponerse en una superposición de ondas armónicas de frecuencias y fase adecuadas según el teorema de Fourier. Este teorema nos dice que, considerando una función $\chi(t)$ que represente la magnitud que tiene en una cierta posición una onda periódica de periodo T , esta función puede representarse mediante una serie de la forma:

$$\chi(t) = a_0 + a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t + \dots + a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t \quad (46)$$

Dependiendo del perfil de la onda, el número de términos necesarios para obtener una buena representación de la onda original será mayor o menor. Se denomina frecuencia angular fundamental o armónico angular principal a la frecuencia angular ω y a las frecuencias angulares $2\omega, 3\omega, \dots, n\omega$ armónicos angulares superiores o sobretonos angulares. Denominándose a su vez análisis de Fourier al proceso de determinación matemática de los coeficientes a_i y b_i .

Además, una onda puede expresarse como exponencial compleja de la forma:

$$Y = A e^{i(kx - \omega t)} \quad (47)$$

1.2.11. Propagación de ondas en dos y tres dimensiones.

Para el caso que se pretende abarcar con este trabajo, trabajaremos con ondas que se propagan esencialmente en dos dimensiones, ya que al tratarse de planchas de hormigón y mortero predomina la superficie sobre el espesor [4].

Un movimiento ondulatorio en dos dimensiones está definido por una función del tipo $Y = f(x, y, t)$, así son las ondas que se producen en elementos superficiales. Pero estas ondas bidimensionales pueden ser de dos tipos:

- Lineales: En donde la propagación se realiza siguiendo la dirección de un único eje, como sucede en el caso las olas del mar o las inducidas en una pasarela de hormigón que constituye el tablero de un puente.
- Circulares: Donde la propagación se produce formando círculos concéntricos entorno al punto donde se produce la perturbación inicial, como son las producidas al golpear periódicamente una superficie en un punto, este será el caso que concierne a nuestro proyecto al estudiarse el impacto producido por una masa puntual en la superficie de una baldosa.

Podemos decir, que las ondas toman el nombre de la forma geométrica del frente de onda que producen al transmitirse a través de un determinado medio.

En tres dimensiones, el movimiento ondulatorio más general está representado por una función del tipo $Y = f(x, y, z, t)$. Según la forma geométrica que toma reciben el nombre de ondas planas, esféricas, cilíndricas...etc.

La onda que hemos estudiado como unidimensional, $Y(x, t) = f(x - vt)$, en el espacio de tres dimensiones representa a una onda plana, puesto que en cualquier punto del plano toma el mismo valor el estado de la perturbación. Lo característico de estas ondas es su dirección de propagación, que se define mediante el vector $\mathbf{u}$ normal al plano de la onda. Si la dirección de propagación es paralela al eje de las X y el vector de posición de un punto cualquiera del frente de la onda es $\mathbf{r}$, será $x = \mathbf{r} \cdot \mathbf{u}$ y podremos expresar la onda anterior como:

$$Y = f(\mathbf{r} \cdot \mathbf{u} - vt) \quad (48)$$

Esta ecuación, en general, representa una onda plana que se propaga en dirección del vector $\mathbf{u}$, puesto que $\mathbf{r} \cdot \mathbf{u}$ es la distancia del origen al frente de onda. En el caso de una onda plana armónica la ecuación es:

$$Y = A \sin(\mathbf{r} \cdot \mathbf{u} - vt) = A \sin(\mathbf{r} \cdot \mathbf{k} - \omega t) \quad (49)$$

Al vector $\mathbf{k} = k \cdot \mathbf{u}$ se le denomina vector de ondas o vector de propagación.

Hemos visto cómo la perturbación del valor de una magnitud, producida en un punto del medio elástico, se propaga a través de éste mediante un movimiento ondulatorio, que propaga energía y hace que la perturbación vaya llegando a los diferentes puntos del medio. Esto nos lleva a enunciar el principio de Huygens (1629-1695) que dice: *“todo punto alcanzado por una onda se puede considerar como foco emisor de nuevas ondas, llamadas secundarias, que sólo son activas, en cada instante, en los puntos de contacto con la envolvente común a todas ellas en ese instante.”*

Llamando O al centro emisor de ondas que se propagan en un medio homogéneo e isótropo, los frentes de onda serán esferas, con lo que el frente correspondiente al instante t tendrá un cierto radio r . Cada punto de esta onda será a su vez, centro emisor de ondas secundarias y la envolvente común a todas ellas en el instante $t + \Delta t$ es el nuevo frente de onda correspondiente a ese instante, que será otra esfera de radio $r + \Delta r$, siendo Δr el espacio recorrido por la onda secundaria en el intervalo de tiempo Δt , igual para todas ellas por la homogeneidad e isotropía del medio. Para aplicar este principio, no se tienen en cuenta la parte de retroceso de las ondas secundarias.

Fig. 1.2.3. Principio de Huygens.

Para el caso del hormigón y mortero al tratarse de un material heterogéneo, esta transmisión por medio de ondas concéntricas no sería del todo correcta, ya que los focos secundarios de emisión actuarían de formas diversas.

1.2.12. Intensidad del movimiento ondulatorio.

Se define la intensidad del movimiento ondulatorio como: la energía transportada por la unidad de tiempo a través del punto en el caso de transmisión lineal, la unidad de longitud normal a la dirección de propagación en el caso de transmisión superficial o la unidad de superficie normal a la dirección de propagación en el caso de propagación tridimensional. Sus unidades en el S.I. son J/s , J/ms , J/m^2s respectivamente.

Fig. 1.2.4. Superficie unitaria

Consideremos un área unidad situada normal a la dirección de propagación. La energía que en un segundo atraviesa esta área es la contenida en un cilindro de base el área citada, de arista v y volumen también v , siendo v a su vez la velocidad de propagación de las ondas.

La energía contenida en ese volumen es: $I = n \cdot e$, siendo n el número de partículas contenidas en el volumen v y e la energía media de cada una de éstas debida a su estado de vibración. Al estar sometida cada una de las partículas a un movimiento vibratorio armónico simple, su energía debida a éste será:

$$e = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2 \quad (50)$$

Y en consecuencia, la energía total queda expresada como:

$$I = \frac{1}{2} n m \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 v \quad (51)$$

donde ρ es la densidad del medio, A es la amplitud de oscilación de las partículas, ω es la pulsación de la oscilación y v es la velocidad de propagación de las ondas.

Esta misma ecuación se puede expresar como:

$$I = 2\rho A^2 \frac{\pi^2}{P^2} v = 2\rho A^2 \pi^2 v^2 v \quad (52)$$

resultando ser la intensidad del movimiento ondulatorio proporcional a la densidad del medio, al cuadrado de la amplitud de la vibración de las partículas, a la velocidad de propagación del movimiento ondulatorio y al cuadrado de la frecuencia.

La densidad de energía espacial o energía por unidad de volumen es $w = I/v = (\rho \omega^2 A^2)/2$, y sus unidades son J/m^3 .

Una perturbación producida en un punto de un medio, isótropo para la propagación de esa perturbación, da lugar a un movimiento ondulatorio de propagación con ondas

esféricas, pero para el caso que nos ocupa, se trata de un material en el cual la superficie predomina sobre el volumen, por lo tanto, ese punto emisor de ondas esféricas se asemeja más a una línea emisora de ondas cilíndricas.

$$I_1 = \frac{P}{2\pi r_1} \quad e \quad I_2 = \frac{P}{2\pi r_2} \quad \Rightarrow \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2}{r_1} \quad (53)$$

En consecuencia, la intensidad es inversamente proporcional a la distancia a la fuente emisora. Siendo P la energía emitida por unidad de tiempo y unidad de longitud.

Además también podemos obtener la relacion de amplitudes, en relacion con lo anteriormente expuesto:

$$\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 = \frac{r_2}{r_1} \quad \Rightarrow \quad \frac{A_1}{A_2} = \sqrt{\frac{r_2}{r_1}} \quad (54)$$

La onda en este caso, se expresa como:

$$Y = A_0 \sqrt{\frac{x_0}{x}} \text{sen}k(x - vt) \quad (55)$$

donde A_0 es la amplitud a la distancia inicial y x es la distancia al foco de la perturbación.

Fig. 1.2.4. Emisor cilíndrico.

Es importante destacar, que para que este modelo funcione correctamente se debe estar bajo la hipótesis de medio isótropo, por lo tanto, en nuestro caso al tratarse de hormigón debe considerarse como una aproximación.

Fig. 1.2.5. Emisor esférico

A modo informativo se indica la intensidad para ondas esféricas, considerando dos esferas como las de la figura adjunta obtenemos las siguientes relaciones:

$$I_1 = \frac{P}{4\pi r_1^2} \quad e \quad I_2 = \frac{P}{4\pi r_2^2} \quad \Rightarrow \quad \frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 \quad (56)$$

Es decir, la intensidad del movimiento ondulatorio propagado mediante ondas esféricas es inversamente proporcional al cuadrado de las distancias al foco emisor.

Además:

$$I_1 = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A_1^2 v \quad e \quad I_2 = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A_2^2 v \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \Rightarrow \frac{A_1}{A_2} = \frac{r_2}{r_1} \quad (57)$$

Las amplitudes son inversamente proporcionales a las distancias al foco y directamente proporcional a la intensidad del movimiento ondulatorio, en consecuencia la ecuación de ondas puede expresarse como:

$$Y = A_0 \frac{x_0}{x} \text{sen} k(x - vt) \quad (58)$$

donde A_0 es la amplitud a la distancia inicial y x es la distancia al foco de la perturbación.

1.2.13. Absorción.

La absorción de un movimiento ondulatorio se puede definir como la disminución en su intensidad que sufre al recorrer el medio propagador, debido a su naturaleza y a las características físicas del medio propagador.

La absorción se produce de forma independiente y, además, de la puramente geométrica descrita en el apartado anterior, la cual recordamos, era debida únicamente al reparto de energía entre un frente de onda cada vez mayor.

Para el estudio de este apartado, vamos a considerar una onda plana que se propaga en un medio homogéneo e isótropo y en la dirección del eje OX . La disminución relativa de intensidad, dI/I resulta ser proporcional al desplazamiento según la ecuación:

$$\frac{dI}{I} = -\gamma dx \Rightarrow \ln I = -\gamma x + C \quad (59)$$

donde denominamos γ al coeficiente de absorción, el cual depende de la naturaleza del medio y de la frecuencia de la onda, y el signo menos es debido a que la intensidad disminuye al aumentar el camino recorrido. Además, si para $x = 0$, es $I = I_0$, podemos hallar la solución particular de la ecuación diferencial anterior y calcular el valor de la constante:

$$\ln I = -\gamma x + \ln I_0 \Rightarrow I = I_0 e^{-\gamma x} \quad (60)$$

Esto nos indica que la intensidad de la onda disminuye exponencialmente con tanta mayor rapidez cuanto mayor sea el coeficiente de absorción γ .

Además, sabiendo que la intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud, podemos llegar a la conclusión de que ésta también decrecerá exponencialmente según la expresión:

$$A^2 = (A_0)^2 e^{-\gamma x} \Rightarrow A = A_0 e^{-(\gamma x/2)} \quad (61)$$

Por lo tanto, la ecuación de la onda amortiguada se expresará de la forma:

$$Y = A_0 e^{-(\gamma x/2)} \sin(kx - \omega t) \quad (62)$$

Por ser nuestro material un material heterogéneo esta ecuación es solo una aproximación al modelo real, no existiendo un valor único para el coeficiente de absorción ya que cada hormigón puede tener un grado de compactación diferente, una dosificación distinta o una geometría interna variable.

No obstante, la propagación de una onda no se realiza nunca sin pérdidas, sino que está supeditada siempre a una mayor o menor amortiguación, ya que o bien la presión o bien la velocidad disminuyen al aumentar la distancia al foco emisor, transformándose parte de la energía inicial en forma de calor cuando viaja a través del medio.

1.2.14. Velocidad de grupo.

La velocidad v , que hemos llamado velocidad de fase, no es necesariamente la que se observa al detectar un movimiento ondulatorio, ya que, en general, éste no está constituido por una onda única, sino por un conjunto de ondas de frecuencias y velocidades próximas, cuya composición de un movimiento ondulatorio resultante, que se propaga en la misma dirección y sentido de sus componentes presentando máximos y mínimos de amplitud. Al conjunto de ondas comprendidas entre dos valores nulos y consecutivos de esta amplitud se denomina pulso, tren de ondas o paquete de ondas, y a la velocidad de desplazamiento de estos, velocidad de grupo, que será la misma que lleva la señal que se transmite con el tren de ondas [5].

Para analizar este apartado, se utilizarán dos ondas sinusoidales de la misma amplitud y frecuencias próximas, y se hará la superposición de ambas teniendo en cuenta las formulas trigonométricas para la suma de senos:

$$\begin{aligned} Y_1 &= A \sin[k\omega x - \omega t] \\ Y_2 &= A \sin[(k\omega + \Delta k\omega)x - (\omega + \Delta\omega)t] \Rightarrow \end{aligned}$$

$$Y_1 + Y_2 = \overbrace{2A \cos \frac{1}{2} [\Delta\omega t - \Delta k\omega x]}^{A'} \times \sin \left[\left(\omega + \frac{\Delta k\omega}{2} \right) x - \left(\omega + \frac{\Delta\omega}{2} \right) t \right] \quad (63)$$

Donde A' es la amplitud de la onda resultante. De esta podemos deducir la expresión que toma en un punto mediante:

$$\Delta\omega t - \Delta k\omega x = Cte \Rightarrow \Delta\omega \left(t - \frac{\Delta k}{\Delta\omega} x \right) = Cte \Rightarrow t - \frac{dk}{d\omega} x = Cte \quad (64)$$

y la velocidad con que estos puntos se desplazan se obtiene derivando la expresión anterior respecto al tiempo:

$$1 - \frac{dk}{d\omega} \cdot \frac{d\omega}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{dx}{dt} = \frac{d\omega}{dt} = v_g \quad (65)$$

donde v_g es la velocidad de desplazamiento del tren de ondas o velocidad de grupo. Ésta se relaciona con la velocidad de fase de forma que si la velocidad de onda es independiente de la longitud de onda, ambas son coincidentes.

1.2.15. Ecuación de propagación de ondas.

Considerando la ecuación de la onda armónica $Y(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$, hallaremos primero las derivadas parciales segundas con respecto de la variable x :

$$\frac{\partial Y}{\partial x} = Ak \cos(kx - \omega t) \rightarrow \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} = -Ak^2 \sin(kx - \omega t) = -k^2 Y(x, t) \quad (66)$$

Ahora, hallaremos la derivada parcial segunda respecto del tiempo t de la función $Y(x, t)$:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -A\omega \cos(kx - \omega t) \rightarrow \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = -A\omega^2 \sin(kx - \omega t) = -\omega^2 Y(x, t) \quad (67)$$

Eliminando el término $Y(x, t)$ de las dos ecuaciones anteriores, obtenemos que:

$$Y(x, t) = \frac{-1}{k^2} \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} \Rightarrow \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} = \frac{k^2}{\omega^2} \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} \quad (68)$$

Y haciendo las transformaciones indicadas obtenemos la ecuación:

$$\frac{k}{\omega} = \frac{2\pi}{2\pi v\lambda} = \frac{1}{v} \Rightarrow \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} \quad (69)$$

que es la denominada ecuación de ondas, para ondas unidimensionales, en la que v representa la velocidad de propagación de las ondas.

1.2.16. Propagación de ondas transversales en una membrana tensa.

En este estudio, se supone que la membrana es delgada y uniforme y que tiene un comportamiento perfectamente elástico, con una rigidez muy baja y sin disipación de energías por rozamiento, siendo ρ_s la densidad superficial de masa de la membrana [6].

Como premisa se considera que la fuerza tensora por unidad de longitud F_l es constante en la membrana e isótropa. Así, la fuerza ejercida a través de un segmento de longitud dl por el material de un lado sobre otro es $F_l dl$.

Cabe indicar, que para que este modelo cobre sentido en nuestro trabajo, deben analizarse losas de forjado con una superficie considerable con respecto al espesor para que la rigidez no cobre tenga una importancia excesiva y sea incompatible con los principios de superficie delgada y elástica. Además, para poder considerar la homogeneidad del conjunto en la realización de las pruebas, es necesario extenderlo a superficies grandes que ayuden a despreciar la estructura interna del hormigón como material.

Utilizando coordenadas cartesianas para resolver el problema, denominamos xy al plano de la membrana y z al eje en el que tienen lugar los desplazamientos (a los que denominaremos u), la fuerza recuperadora que actúa sobre un elemento de superficie infinitesimal $dS = dxdy$ será la suma de las componentes según z de las fuerzas recuperadoras en los lados paralelos a x e y .

La fuerza neta en la dirección z que actúa sobre el elemento de superficie dS debido a las fuerzas en la dirección y es:

$$F_l dy \frac{\partial \tan \alpha_y}{\partial x} dx = F_l dy \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} dx = F_l \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dxdy \quad (70)$$

mientras que la fuerza neta en la dirección z que actúa sobre el elemento de superficie dS debido a las fuerzas en la dirección x es:

$$F_l dx \frac{\partial \tan \alpha_x}{\partial y} dy = F_l dx \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial y} dy = F_l \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} dx dy \quad (71)$$

La suma de ambas fuerzas debe ser igual al producto de la masa del elemento de superficie por su aceleración en la dirección z , la cual nos da la ecuación de ondas para una membrana tensa elástica (72):

$$F_l \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) dx dy = \rho_s dx dy \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Rightarrow \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \nabla_2^2 u = \frac{\rho_s}{F_l} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \rightarrow c = \sqrt{\frac{F_l}{\rho_s}}$$

El término c es la velocidad de propagación, y el miembro $\nabla_2^2 u$ es la laplaciana de u en coordenadas cartesianas planas, la cual es muy útil para analizar membranas rectangulares como es el caso de nuestra losa.

1.3. Normativa.

La normativa acústica relacionada con la edificación se extiende desde el marco internacional, hasta las ordenanzas municipales propias de cada localidad. No se pretende por tanto hacer un resumen de toda la legislación vigente, pero sí resaltar aquellos apartados que tratan sobre la transmisión de vibraciones y la limitación del ruido de impacto.

En primer lugar, la pertenencia de España a la Unión Europea conlleva el obligado cumplimiento del ordenamiento jurídico correspondiente al Derecho Comunitario. La UE ha abordado la lucha contra el ruido en el marco de su política medioambiental a través de directivas comunitarias cuya finalidad es reducir la contaminación acústica [7]. Entre ellas cabe destacar, la entrada en vigor de la Directiva 2002/49/CE del 25 de junio sobre la evaluación y gestión del ruido ambiental, en la cual se establecen una serie de objetivos entre los cuales destaca la creación de un marco común frente a la protección contra el ruido.

1.3.1. Normativa Nacional.

Actualmente en España la normativa vigente encarga de regular el comportamiento acústico de los edificios es el Código Técnico de la Edificación (CTE), y más concretamente el apartado correspondiente al documento básico de protección frente al ruido CTE DB – HR [8]. La publicación de este documento y su edición actual vigente desde el 2009 se encargan del estudio y control de la calidad acústica en el interior de

los edificios, indicando pautas de diseño y buenas normas de construcción que reemplazan a la anterior normativa (NBE – CA 88, de condiciones acústicas de los edificios, publicada en 1988).

El CTE actual fue el resultado del trabajo conjunto de varias organizaciones por unificar en una sola normativa las diferentes leyes existentes hasta el momento en materia de acústica, integrando las prescripciones que venían de la Unión Europea. Los principales antecedentes de esta norma, así como su ámbito de aplicación y sus características más importantes serían [9-11]:

- Ley 37/2003 de 17 de Noviembre del Ruido, la cual desarrolló la disciplina de acústica en la edificación hasta ese momento dispersa. (BOE, núm. 254, 18 de Noviembre de 2003).
- Real Decreto 1513/2005 del 16 de Diciembre de 2005, referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental, destinada a evitar, prevenir o reducir con carácter prioritario los efectos nocivos de la exposición al ruido ambiental, (BOE, núm. 301, 17 de Diciembre de 2005).
- Real Decreto 1367/2007 del 19 de Octubre de 2007, referente a la zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas, donde se definen los índices de ruido y de vibraciones, sus aplicaciones, efectos y molestias sobre la población y su repercusión ambiental, (BOE, núm. 254, de 23 de Noviembre de 2007).

El CTE es por tanto de vital importancia para definir los parámetros acústicos referentes a la transmisión de vibraciones y de protección frente al ruido de impacto. Para este trabajo, prestaremos especial atención a la transmisión a través de elementos horizontales que son los que trabajaremos en el dispositivo experimental.

En primer lugar y después de dar algunas pautas para la verificación del cumplimiento de esta normativa, el CTE fija unos valores límites relacionados con el aislamiento acústico.

En lo referente a elementos de construcción horizontales, éstos deben tener en conjunción con los elementos constructivos adyacentes unas características tales que:

Recintos Protegidos		Recintos Habitables
<i>Protección frente al ruido generado en recintos no pertenecientes a la misma unidad de uso</i>	<i>Protección frente al ruido generado en recintos de instalaciones o en recintos de actividad</i>	<i>Protección frente al ruido generado en recintos de instalaciones o en recintos de actividad</i>
$L'_{nT,w} \leq 65 \text{ dB}$	$L'_{nT,w} \leq 60 \text{ dB}$	$L'_{nT,w} \leq 60 \text{ dB}$

Tabla 1.3.1. Aislamiento acústico a ruido de impactos exigido por el CTE DB-HR.

Acto seguido establece unas pautas de diseño y dimensionado de los elementos, ofreciendo dos alternativas, una simplificada y otra mediante el método general, siendo necesario conocer en ambos casos para el ruido de impactos:

- ✓ Los valores de la masa por unidad de superficie m .
- ✓ El índice global de reducción acústica, ponderado A , R_A
- ✓ El nivel global de presión de ruido de impactos normalizado $L_{n,w}$.

Los dos últimos se pueden obtener mediante el proceso indicado en la normativa incluida en el Anejo C.

Opción simplificada

Proporciona soluciones de aislamiento de todos los elementos constructivos que conforman el recinto y que influyen en la transmisión del ruido y de las vibraciones entre recintos adyacentes, dando conformidad a las exigencias anteriores. Esto lo hace mediante unas tablas que indican los valores mínimos que deben cumplir los paramentos acústicos que definen dichos elementos constructivos.

Fig. 1.3.1. Elementos que componen dos recintos y que influyen en la transmisión del ruido de impacto. Fuente CTE-DB HR.

Fig. 1.3.2. Composición de los elementos de separación entre recintos. Fuente CTE-DB HR.

El CTE define a su vez los elementos de separación horizontales como aquellos que separan una unidad de uso de cualquier otro recinto del edificio, o que separan un recinto protegido o un recinto habitable de un recinto de instalaciones o un recinto de actividad. Los paramentos acústicos de los elementos constructivos de separación horizontal que se deben definir son:

- ✓ ΔL_w , reducción del nivel global de presión de ruido de impactos, en dB, debida al suelo flotante.
- ✓ m , masa por unidad de superficie del forjado en kg/m^2 , correspondiente al valor de masa por unidad de superficie de la sección tipo, excluyendo ábacos, vigas y macizados.
- ✓ R_A , índice global de reducción acústica, ponderado A, del forjado en dBA.
- ✓ ΔR_A , mejora del índice global de reducción acústica, ponderado A, en dBA, debido a suelo flotante o techo suspendido

Una vez determinados los parámetros anteriores con ayuda de equipos normalizados, se recurre a la tabla 3.3 de dicha normativa, donde se muestran los requisitos mínimos a cumplir por los elementos de separación horizontal.

La tabla 1.3.2. muestra con ayuda de una sección vertical como deben disponerse los suelos flotantes para limitar la transmisión de ruido de impactos entre recintos colindantes. Además, se indican en la misma figura las condiciones constructivas en las que el CTE incide para mejorar el aislamiento a ruido de impacto.

Condiciones constructivas para mejorar el aislamiento a ruido de impacto

Fig. 1.3.3. Disposición óptima de suelos flotantes para limitar la transmisión de ruido de impactos

<i>Medidas de mejora en sistemas constructivos</i>	Apoyo de la tabiquería sobre bandas elásticas en contacto con el suelo de apoyo.
	Disposición regular de los suelos flotantes respetando los márgenes de separación con los elementos verticales.
	Disposición de falsos techos acústicos en forjados que alberguen recintos de instalaciones.
	Instalación de amortiguadores en zonas en las que puedan aparecer bajas frecuencias de transmisión.
	Colocación de material aislante continuo en toda la superficie.

Tabla 1.3.2. Condiciones para la mejora acústica a ruido de impacto.

Opción general

Este método contiene el procedimiento basado en el modelo simplificado para la transmisión acústica estructural que refleja la norma UNE-EN 12354. El CTE es flexible en este apartado y permite también el empleo de dicha norma UNE para calcular el aislamiento acústico. Las pautas a seguir para la aplicación de este método se resumen en los siguientes pasos:

- 1) Debe realizarse el diseño y dimensionando de los recintos de cara a cumplir con el aislamiento acústico teniendo en cuenta las diferencias de forma, tamaño y de elementos constructivos entre parejas de recintos, y considerando cada uno de ellos como recinto emisor y receptor.
- 2) Debe procederse separadamente al cálculo del aislamiento acústico a ruido aéreo (para cada uno de los elementos) y al aislamiento acústico frente a ruido de impacto (para cada uno de los recintos existentes).

- 3) Debe determinarse el aislamiento acústico a ruido aéreo y el nivel global de presión de ruido de impactos estandarizado para un recinto teniendo en cuenta tanto las transmisiones directas como las indirectas, así como, las características geométricas del recinto, sus elementos constructivos y las formas de encuentro entre ellos.
- 4) Los valores finales de las magnitudes calculadas se redondearan en números enteros.

Además se fijan unas hipótesis previas de cálculo que resumidas brevemente, indicando solo las relacionadas con ruidos de impacto serían:

- 1) Las transmisiones por vía directa y por vía de flancos deben establecerse en términos de aislamiento in situ, pudiendo aproximarse a los valores de presión de ruido de impactos normalizados medidos en laboratorio.
- 2) Así, para revestimientos, suelos flotantes y trasdosados, los valores medidos in situ de la mejora del índice de reducción acústica ΔR_{situ} y para la reducción de nivel de presión de ruido de impactos por revestimiento de la cara de emisión de elementos de separación ΔL_{situ} y de la cara de recepción del elemento de separación $\Delta L_{\text{d,situ}}$, pueden aproximarse a los valores medidos en laboratorio.

También se fijan otras que están relacionadas con los requisitos que deben de cumplir dichos coeficientes para poder utilizarse, simplificaciones de notación que serán tenidas en cuenta a la hora de representar las ecuaciones posteriores e indican cómo obtener el valor del índice de reducción por vibraciones a través del Anejo D de la norma.

El método de cálculo para el aislamiento acústico frente al ruido de impactos, considera como situaciones más importantes las que corresponden a recintos superpuestos, recintos adyacentes y recintos con una arista horizontal común:

Fig. 1.3.4. Secciones que representan los caminos posibles de transmisión entre dos recintos.

El nivel global de presión de ruido de impactos estandarizado se calcula mediante la expresión:

$$L'_{nT,w} = L'_{n,w} - 10 \cdot \lg(0,032 \cdot V) \text{ [dB]} \quad (73)$$

donde V es el volumen del recinto receptor en m^3 , y $L'_{n,w}$ es el nivel global de presión de ruido de impactos normalizado en dB, calculado según (2):

$$L'_{n,w} = 10 \cdot \lg \left(10^{0,1L'_{n,w,d}} + \sum_{j=1}^n 10^{0,1L'_{n,w,ij}} \right) \text{ [dB]} \quad (74)$$

donde $L'_{n,w,d}$ es el nivel de presión de ruido de impactos normalizado debido a la transmisión directa en dB calculado según (3), $L'_{n,w,ij}$ es el nivel de presión de ruido de impactos normalizado debido a la transmisión indirecta en dB calculado según (4) y n es el número de flancos o de elementos de flanco (generalmente 4). Así

$$L'_{n,w,d} = L'_{n,w} - \Delta L_w - \Delta L_{d,w} \text{ [dB]} \quad (75)$$

donde $L'_{n,w}$ es el nivel global de presión de ruido de impactos normalizado en dB, ΔL_w es la reducción del nivel global de presión de ruido de impactos por revestimiento del lado emisor en dB y $\Delta L_{d,w}$ es la reducción del nivel global de presión de ruido de impactos por revestimiento del lado receptor también en dB.

$$L'_{n,w,ij} = L_{n,w} - \Delta L_w + \frac{R_{i,A} - R_{j,A}}{2} - \Delta R_{j,A} - K_{i,j} - 10 \cdot \lg \left(\frac{S_{i,j}}{I_{ij} \cdot I_0} \right) \text{ [dB]} \quad (76)$$

Aquí $L'_{n,w}$ es el nivel global de presión de ruido de impactos normalizado en dB, ΔL_w es la reducción del nivel global de presión de ruido de impactos por revestimiento del lado emisor en dB, R_A es el índice global de reducción acústica de un elemento ponderado A, dBA, $\Delta R_{j,A}$ es la mejor del índice global de reducción acústica por revestimiento del elemento j en dB, $K_{i,j}$ es el índice de reducción de vibraciones para cada camino de transmisión del elemento i al j en dB, $S_{i,j}$ es el área del elemento excitado en m^2 , I_{ij} es la longitud común de la arista de unión entre el elemento i y el j en m, e I_0 es la longitud de la arista común de unión de referencia de valor un metro.

Para el caso de recintos adyacentes y recintos con una arista horizontal común, esto es, aquellos en los cuales las superficies no están superpuestas, el valor del nivel global de

presión de ruido de impactos normalizado se calcula de manera análoga empleando las mismas ecuaciones, haciendo nulo el término correspondiente a la transmisión directa.

Por otro lado, en este mismo apartado se fijan condiciones de unión entre los elementos constructivos de separación horizontales, que se resumen en:

Encuentros con los elementos verticales:

- ❖ Deben eliminarse los contactos entre el suelo flotante y los elementos de separación verticales, pilares y tabiques con apoyo directo. Para ello, se interpondrá entre ambos una capa de material elástico o del mismo material aislante a ruido de impactos del suelo flotante.
- ❖ Los techos suspendidos o los suelos registrables no serán continuos entre dos recintos pertenecientes a unidades de uso diferentes. La cámara de aire entre el forjado y un techo suspendido o un suelo registrable, debe interrumpirse cuando sobre ellos acometa un elemento de separación vertical entre unidades diferentes.

Encuentros con los conductos de instalaciones:

- ❖ En el caso de que el conducto atraviese un elemento horizontal, se recubrirá y se sellarán las holguras de los huecos efectuados en el forjado para paso del conducto con un material elástico que garantice la estanqueidad e impida el paso de vibraciones a la estructura del edificio.
- ❖ Deben eliminarse los contactos entre el suelo flotante y los conductos de instalaciones que discurran bajo él. Para ello, los conductos se revestirán de un material elástico.

La transmisión de vibraciones a través de instalaciones de edificación será tratada más adelante en detalle. Es necesario a su vez, seguir un control visual y estadístico en la recepción de productos en obra y exigir los documentos de idoneidad reconocidos que certifiquen que los productos instalados han pasado los controles de calidad pertinentes. Además el CTE incluye también un apartado dedicado a buenas pautas de construcción destacando para elementos horizontales:

Suelos flotantes:

- ❖ Previamente a la colocación del material aislante a ruido de impactos, el forjado debe estar limpio de restos que puedan deteriorar el material empleado.

- ❖ El material aislante a ruido de impactos cubrirá toda la superficie del forjado y no debe interrumpirse su continuidad, para ello se solaparan o sellarán las capas de dicho material conforme indique el fabricante.
- ❖ En el caso de que el suelo flotante estuviera formado por una capa de mortero sobre un material aislante a ruido de impactos y este no fuera impermeable, debe protegerse previamente con una barrea impermeable.
- ❖ Los encuentros entre el suelo flotante y los elementos de separación verticales, tabiques y pilares, deben realizarse de tal manera que se eliminen los contactos rígidos.

Techos suspendidos y suelos registrables.

- ❖ Cuando discurran a través de ellos conductos de instalaciones debe evitarse que dichos conductos conecten rigidamente el forjado y las capas que forman el techo y el suelo.
- ❖ Las luminarias empotradas no deben formar una conexión rígida entre las placas del techo y el forjado y su ejecución no debe disminuir el aislamiento acústico inicialmente previsto.
- ❖ En el caso de que los techos dispongan de un material absorbente en la cámara, éste debe rellenar de forma continua toda la superficie de la cámara y reposar en el dorso de las placas.
- ❖ Deben sellarse todas las juntas perimétricas o cerrarse el plenum del techo suspendido o del suelo registrable, especialmente los encuentros con elementos de separación verticales entre unidades de uso diferentes.

Para finalizar, el CTE DB-HR incluye un apartado dedicado al mantenimiento y conservación de las propiedades acústicas. Dentro de los anexos, el anexo E dedicado a la medida y valoración de la mejora del índice de reducción acústica y de la reducción del nivel de presión de ruido de impactos de revestimientos es el que más relevancia cobra para la realización de este trabajo.

Es importante destacar que la normativa permite el empleo de otras soluciones diferentes a las definidas en este apartado, siempre y cuando sigan el procedimiento de elaboración establecido el CTE y estén perfectamente documentadas en el proyecto en relación al cumplimiento de las exigencias básicas establecidas. Este apartado es de

vital importancia, ya que abre la puerta a la búsqueda de nuevas soluciones acústicas y equipos de media alternativos como los propuestos en este trabajo.

Los diferentes métodos de cálculo y ensayos de los materiales vienen definidos en las normas UNE indicadas en el anejo C, y que se describen más adelante, ya que fueron las seguidas para la realización de los ensayos.

1.3.2. Normativa Autonómica.

La Comunidad de Madrid también ha desarrollado su propia legislación mediante el Decreto 78/1999 del 27 de Mayo [12], por el cual se regula el régimen de protección contra la contaminación acústica, y tiene por objeto prevenir, vigilar y corregir los daños de este tipo que afecten tanto a las personas como al medio ambiente, protegiéndolos frente al ruido y vibraciones, cualquiera que sea su origen. Este Decreto es de aplicación en toda la Comunidad de Madrid sin perjuicio de las Ordenanzas que en ejercicio de sus competencias aprueben los Ayuntamientos, siempre y cuando éstas sean más estrictas que la norma anterior.

El mapa del ruido de la Comunidad de Madrid elaborado a principios de este siglo arroja unos resultados que muestran que: casi 4 millones de habitantes de la región están sometidos a niveles de ruido superiores a los objetivos propuestos por la UE. Además, este mapa, ha permitido clasificar las actividades que generan más molestias por ruidos y vibraciones, en función de la demanda social.

Fig. 1.3.5. Mapa acústico de la comunidad de Madrid, clasificación por colores aumentando de cinco en cinco desde el verde claro (< 50dB), hasta el morado (>70dB).

El límite de transmisión de vibraciones al ambiente interior que indica esta normativa no debe superar los valores del índice de percepción vibratoria K que se muestran en la Tabla 1.3.3. Este índice K es un parámetro subjetivo experimental que permite evaluar la sensación frente a las vibraciones de los seres humanos, mediante la medida de la aceleración vibratoria en el rango comprendido entre 1 y 80 Hz.

Valores expresados en unidades K			
Área de sensibilidad acústica	Uso del recinto	Período diurno	Período nocturno
Tipo VI (Área de trabajo)	Sanitario	1	1
Tipo VI (Área de trabajo)	Docente	2	2
Tipo VI (Área de trabajo)	Cultural	2	2
Tipo VI (Área de trabajo)	Oficinas	4	4
Tipo VI (Área de trabajo)	Comercios	8	8
Tipo VI (Área de viviendas)	Residencial habitable	2	1, 4
Tipo VI (Área de viviendas)	Residencial servicios	4	2
Tipo VI (Área de viviendas)	Hospedaje	4	2

Tabla 1.3.3. Valores límite de la transmisión de vibraciones al ambiente interior en la CM.

Las medidas se efectuarán siempre en el plano vibrante y en dirección perpendicular a él, ya sea suelo, techo o paredes. La relación entre la frecuencia de vibración y la aceleración para obtener el índice K , viene recogido en el Anexo 6 del RD 78/1999.

La evaluación de la incidencia acústica sobre el medio ambiente formará parte de la documentación necesaria para solicitar licencias de apertura de actividad en la CM, pudiendo quedar sometidas a evaluación si no se cumplen los requisitos.

Además, la instalación de sistemas de alarma mediante aviso acústico, como las sirenas o similares, también deben estar autorizadas por el ayuntamiento correspondiente. Por lo tanto, la búsqueda de nuevos sistemas de seguridad menos ruidosos y más efectivos, como los basados en sensores capacitivos similares al desarrollado en este trabajo, quedan respaldados por la normativa vigente que incita a su desarrollo.

1.3.3. Normativa Municipal.

El Ayuntamiento de Madrid también publicó su propia ordenanza el 7 de Marzo de 2011 con el objeto de proteger a las personas y los bienes frente a las agresiones derivadas de la contaminación acústica y térmica [13].

En ella se trata, entre otros temas, la limitación sobre los niveles sonoros transmitidos a los locales acústicamente colindantes, fijando los límites de transmisión que se deben respetar y que varían en función del tipo de estancia y del período del día en el que nos encontremos al hacer la medición. Además, también establece una clasificación de las actividades en función de las condiciones de insonorización y unos valores límites para la calibración de los equipos y protección frente a las vibraciones.

En esta normativa se indica que las mediciones de las vibraciones han de llevarse a cabo en el lugar en que su valor sea más alto y, si fuese necesario, en aquellos momentos en que su actividad fuese más acusada.

Se debe medir el valor eficaz máximo obtenido con un detector de medida exponencial de ponderación de tiempo 1 s durante la medición. Este valor se corresponderá con el parámetro de vibración transitoria máxima a_w según viene recogido en la norma ISO 2631-1: 1997.

En el caso de que la dirección dominante de las vibraciones no esté definida, se debe medir en tres direcciones ortogonales simultáneamente. De esta forma se obtiene el valor de a_w en función del tiempo:

$$a_w(t) = \sqrt{a_{w,x}^2(t) + a_{w,y}^2(t) + a_{w,z}^2(t)} \quad (78)$$

Por otro lado, la normativa hace responsable a las comunidades de vecinos del correcto mantenimiento de los cuartos de instalaciones y otros focos generadores de ruido y vibraciones, indicando una lista de sanciones a aquellos que sobrepasen los límites establecidos.

Por último indicar, que en el ámbito municipal también nos encontramos con la Ordenanza de Evaluación Ambiental del Ayuntamiento de Madrid del 27 de Enero de 2005, en la cual también se tienen en cuenta las calidades acústicas de la zona estudiada.

A su vez, en la Comunidad de Madrid, algunos investigadores han realizado sus propios estudios para obtener resultados acerca de las fuentes generadoras de ruido y la calidad acústica de la zona [15]. Para un total de cerca de 2000 encuestas el 40% de los madrileños clasificaba el ruido entre los aspectos que más les preocupaban en términos de calidad medioambiental, siendo los barrios céntricos los que más remarcaban esta

Fig. 1.3.6. Estudio acústico en la CM. (a) Impacto específico de las fuentes de ruido; (b) Efectos psicosociales causados por el ruido.

preocupación (en concordancia con el mapa acústico de la figura 1.3.5). Además se mostraban los siguientes resultados curiosos: como se aprecia la figura 1.3.6 (a) las instalaciones en los edificios y las vibraciones no son la principal causa de malestar en los ciudadanos madrileños, estando los primeros puestos ocupados por el ruido aéreo generado por el tráfico urbano. Esta percepción de molestia se hacía mayor en las épocas de verano aumentando los efectos nocivos mostrados en el gráfico 1.3.6 (b). No obstante, la práctica totalidad de los ciudadanos encuestados insistió en la necesidad de aumentar el aislamiento acústico en ventanas y forjados de viviendas.

1.4. Ensayos y propiedades de los morteros para edificación.

Según el CTE DB SE-F, se denomina mortero a toda materia plástica obtenida por mezcla de uno o varios conglomerantes, arena, agua y posibles aditivos (aunque de estos puede carecer, como en los elaborados para esta tesis).

Los morteros pueden clasificarse por su resistencia, designándose por la letra M seguida de la resistencia a compresión en N/mm^2 , o bien por su dosificación en volumen, en cuyo caso las propiedades del mortero se pueden suponer ligadas a dicha dosificación.

Dentro de todas las variedades de morteros existentes en el mercado, para la realización de este trabajo se escogieron los morteros de cemento de base Portland, por ser los más empleados en edificación y asemejarse lo más posible al hormigón fabricado, ya que también utilizan cemento como conglomerante. El tipo de cemento empleado fue un CEM II/B-L 32,5 R, siendo estos los más aconsejables según la instrucción RC – 08. En

cuanto a los tipos de arenas, agua y dosificaciones empleadas se explican más detalladamente en los siguientes capítulos.

Dentro de las características que conviene estudiar en los morteros, tiene especial importancia la resistencia que estos alcanzan una vez endurecidos. Esto significa determinar por un lado la resistencia a flexión del material, y por otro la resistencia a compresión [16].

Cuando se trata de determinar la resistencia a flexión de una muestra de mortero, se confeccionan tres probetas normalizadas de 40x40x160 mm, que se conservan en un ambiente húmedo y se rompen a los 28 días. Esta resistencia a flexotracción se calcula empleando una balanza de Michaelis, ó como en nuestro caso una prensa normalizada [17]. Para determinar dicha resistencia se coloca la probeta sobre dos apoyos separados una distancia l y se aplica una fuerza puntual F en el centro como muestra el esquema 1:

Así, la resistencia a flexotracción viene determinada como el cociente que relaciona el momento flector M_f con el momento resistente M_r del material.

$$\sigma_f = \frac{\text{Momento Flector}}{\text{Momento Resistente}} = \frac{M_f}{M_r} \quad (79)$$

En el caso de una pieza simplemente apoyada sometida a una carga puntual en el centro:

$$M_f = \frac{F \times l}{4} \quad (80)$$

Por otro lado, el momento resistente de una probeta prismática como la trabajada es:

$$M_r = \frac{a \times b^2}{6} \quad (81)$$

De esta forma la ecuación que determina la resistencia a flexión en N/mm^2 se obtiene sin más que hallar el cociente entre ambos términos, dando como resultado:

$$\sigma_f = \frac{M_f}{M_r} = \frac{3 \times F \times l}{2 \times a \times b^2} \quad (82)$$

Los valores de la resistencia a flexión son aportados directamente por la prensa de ensayos, así el valor final de la resistencia a flexotracción del mortero se obtendrá como el valor medio de los tres valores obtenidos para cada una de las probetas.

Una vez realizado este ensayo, la pieza prismática queda dividida en dos trozos, que serán los empleados en el ensayo a compresión, ejerciendo el esfuerzo sobre una sección de $40 \times 40 \text{ mm}$ como muestra el esquema 2. Al igual que en el caso anterior, la resistencia a compresión del mortero se determinará como el valor medio de los 6 resultados obtenidos en el ensayo expresado en N/mm^2 .

Al ensayar morteros en laboratorio es importante controlar la relación agua/cemento, ya que de ésta dependerá la retracción final de la masa. Aunque la arena actúa como base sólida regulando los cambios de volumen y evitando los agrietamientos, esto solo es posible si el secado se produce de forma lenta y el mortero es capaz de alcanzar la suficiente resistencia a tracción como para soportar las tensiones internas generadas. Si por el contrario, el secado es muy virulento, la pérdida de agua es excesiva y se forman grietas apreciables, que dividen al mortero en formas más o menos poligonales [18].

El proceso de retracción tiene dos orígenes bien diferenciados:

- 1) Retracción térmica: La hidratación de los compuestos anhidros del cemento es una reacción exotérmica que eleva la temperatura de los morteros, de tal forma, que el calor desprendido pasa finalmente al medio con el consiguiente descenso de la temperatura del mortero. El enfriamiento del mortero es el origen de la retracción térmica, que viene determinada por la siguiente ecuación:

$$R_T = \alpha \cdot (T_1 - T) \quad (83)$$

donde α es el coeficiente de dilatación térmica del mortero, y T_1 y T son las temperaturas inicial y final respectivamente.

- 2) Retracción hidráulica: La pérdida de agua de amasado por evaporación en el mortero se produce desde el momento en que no está permanentemente en un ambiente húmedo (100% de humedad relativa). Parte de esta agua se encuentra en poros, y su evaporación origina una presión negativa, que es la causante de esta retracción. La fórmula algebraica de la retracción hidráulica es:

$$R_H = 2R_M \cdot \frac{(1 - \eta)^{0.7}}{D^n} \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(1 + 0,79 \left(\frac{s}{v} \right)^2 \cdot t \right)^{0,2} + 1,024^{(s/t) \cdot 2t}} \right] \quad (84)$$

donde R_M es la retracción máxima al cabo de un año, η es la humedad relativa de la atmósfera, D es la dimensión máxima del árido en mm , n variable en función de los huecos del árido, s/v superficie libre entre el volumen de mortero y t el tiempo en días.

La forma de medir esta retracción durante el secado, viene referida en la Norma UNE EN 80-112: 1989, y consiste en definitiva, en la confección de probetas de mortero mediante dimensiones de 25 x 25 x 287 mm con unas varillas insertadas que permiten realizar medidas comparando la separación entre ellas a lo largo del proceso de curado. No obstante, algunos estudios demuestran que esta metodología de medida es solo útil en el caso de los morteros de cemento, apreciándose notables diferencias cuando se trata de morteros que contienen cal [19].

Para disminuir la velocidad de evaporación, en los casos en que ésta pueda tener efectos nocivos sobre el experimento, se recomienda cubrir los testigos con telas de plástico.

Es importante conocer también, que cuando un mortero se encuentra sometido a temperatura de entre 5 y 10°C, el proceso de hidratación del cemento se ralentiza en exceso impidiendo el correcto fraguado del mortero, y disminuyendo en exceso su trabajabilidad. Por otro lado, cuando nos encontramos a temperaturas de menos de cero grados, el agua de los poros se congela, aumenta su volumen y debido a la presión que esta ejerce el mortero se disgrega.

Cuando se realizan morteros en obra y su aplicación entra directamente vinculada a la edificación, es necesario a su vez controlar los ataques por agentes externos tales como sales, grasas, yesos o líquidos con carácter ácido que puedan causar eflorescencias o disminuciones de su capacidad resistente.

No obstante, todos los factores hasta ahora indicados (resistencias mecánicas, retracción, disgregaciones...etc.), están íntimamente relacionados con una propiedad de los morteros conocida como consistencia. La consistencia es, en términos generales, la oposición que presenta el mortero fresco a deformarse, para determinarla se emplean los métodos de la mesa de sacudidas o el procedimiento de penetración del pistón. Los factores que influyen en esta propiedad son:

- Relación agua/cemento y conglomerante/arena.
- Granulometría de la arena.
- Tipo de aditivos y de conglomerante.
- Cantidad de aire incluida en la masa.

Hablar de una buena consistencia, es a su vez sinónimo de que el mortero posee una buena trabajabilidad. Cuando esto sucede, las probetas quedan completamente rellenas y la masa de mortero se distribuye con facilidad ocupando todo el molde evitando espacios internos, a priori esto es ventajoso, pero si el escurrimiento es excesivo puede debilitar en exceso la muestra obteniendo consecuencias contraproducentes [20]. Además, en morteros excesivamente fluidos, el árido tiende a depositarse en el fondo dando lugar a una lechada superficial.

Algunos estudios demuestran que el mortero puede emplearse hasta en las dos horas inmediatas a su amasado, periodo en el cual puede agregarse agua si fuera necesario. En todo caso, se debe desechar cualquier mortero que ya haya comenzado su fraguado y elaborar otro nuevo.

1.5. Ensayos y propiedades de los hormigones para edificación.

Cuando se trata de hormigones es necesario diferenciar entre las propiedades y ensayos antes del fraguado del cemento y una vez la masa está endurecida. En este apartado se indican solo las propiedades referentes al hormigón en sí, ya que la descripción de los materiales y la dosificación queda definida más adelante. Por otro lado, temas como la durabilidad o la corrosión no están reflejados por escaparse del alcance de este trabajo.

1.5.1. Hormigón fresco.

El hormigón por definición se describe como un material heterogéneo debido a que su composición es la mezcla de varios elementos sólidos y líquidos. No obstante, se suele

hablar de hormigón homogéneo para indicar que la mezcla final contiene en cada parte la misma proporción de todos los componentes uniformemente distribuidos [21].

Para analizar la homogeneidad del hormigón se deben estudiar la dispersión existente entre las características de varias catas tomadas dentro de una misma amasada. Generalmente se suele elegir la resistencia a compresión a 28 días como medida estándar de la variación, aunque también se pueden evaluar otras propiedades mecánicas del hormigón, no por ello menos validas.

Los hormigones poco cohesivos son como norma general menos homogéneos. Esta pérdida de cohesión se acentúa cuando la relación de tamaños entre los áridos es muy acusada o el contenido en agua es excesivo. En general, si la mezcla en la hormigonera ha sido eficaz, los componentes se encontrarán distribuidos de forma homogénea, y el problema radica en estos caso en el vertido en obra, donde el choque con las armaduras y las diferentes densidades de los materiales favorecerán la segregación que provocará coqueras que disminuyen la durabilidad hormigón.

En los casos en que el transporte no sea a grandes distancias y la altura del vertido sea reducida, el problema de la segregación puede ser provocado por una vibración excesiva que favorezca la formación de capas de pasta en la superficie superior con los posibles problemas de retracción superficial.

Es importante a su vez controlar la pérdida de agua por exudación, ya que esta puede tener dos efectos contradictorios. Por un lado, si la pérdida es lenta favorece la disminución de la relación agua/cemento con el consiguiente aumento de la resistencia del hormigón. En cambio, cuando la velocidad es elevada, el agua arrastra en su salida a la superficie la pasta de cemento creando micro fisuras internas, favoreciendo la disgregación de los áridos y disminuyendo la durabilidad. Esto se debe a la creación interior de conductos capilares que aumentan la permeabilidad del hormigón. Estos efectos son más notables en los elementos en los que predomina la superficie sobre el volumen, como es el caso de baldosas y losas, por lo que es imprescindible controlar los tiempos de fraguado y el contenido en cemento para reducir la exudación [22].

Como hemos podido ver, la composición de la masa va a tener una gran importancia en la cohesión de sus componentes y en la oposición que estos hormigones frescos van a experimentar frente a posibles deformaciones, o lo que es igual, en su consistencia. Por

otro lado, se define docilidad como la mayor o menor facilidad que ofrece un hormigón a ser manejado, transportado, colocado y compactado en los encofrados con la mínima pérdida de homogeneidad, sin producir exudación y segregación.

En general, se puede considerar que la consistencia depende fundamentalmente de la cantidad de agua de amasado (aunque también influyen los tamaños de los áridos, el contenido de cemento...etc.). Es por ello, que estando el contenido de agua bien definido, la humedad de los áridos juega un papel fundamental, ya que si ésta es excesiva tendrá efectos nocivos en la resistencia final [23].

La docilidad en cambio, suele ser mayor con áridos rodados que machacados, además de aumentar con el contenido en áridos finos y el contenido de cemento. Es importante también tener en cuenta la forma y tamaño del molde, ya que la masa final deberá adaptarse al mismo y será principalmente la que condicione el tipo de hormigón a emplear, debiendo emplearse siempre hormigones que permitan adaptarse bien a la forma de los encofrados y adherirse lo mejor posible a las armaduras con el mínimo aporte exterior de energía para conseguirlo [24].

Generalmente, en secciones masivas y sin armar (o con armado escaso), como es el caso de las empleadas en esta tesis, se pueden emplear hormigones con mezclas menos dóciles. No obstante, se debe cuidar el acabado final y que la distribución sea lo más homogénea posible, ya que estas composiciones dan acabados menos satinados cuando se desmoldan. Debido a la importancia que se ha resaltado, la consistencia del hormigón debe ser considerada desde la fase de diseño.

Existen diferentes metodologías para determinar esta cualidad, siendo la más recurrida y la empleada en este trabajo la conocida como cono de Abrams, cuyo uso es prácticamente universal.

La medida del cono de Abrams es un ensayo sencillo, conocido por no requerir de equipos costosos, ni personal especializado y proporcionar unos resultados muy aproximados a la realidad. El proceso para realizar este ensayo viene recogido en la norma UNE EN 12350-2.

En términos generales, el ensayo consiste en colocar una parte de la masa de hormigón elaborado en un molde metálico troncocónico de 30 cm de altura y de 10 y 20 cm de diámetro interior, superior e inferior respectivamente. El hormigón se va introduciendo

en el molde y compactando por capas, aproximadamente la tercera parte en volumen del molde en cada compactación. Una vez introducida la masa se pica mediante una barra de acero terminada en punta esférica de 16 mm de diámetro realizando 25 golpes que homogeneícen la mezcla. Es preciso destacar, que antes de introducir el hormigón en el molde, éste debe estar humedecido para evitar el rozamiento y favorecer la distribución de la masa en el interior [25].

Una vez lleno, el molde debe estar colocado sobre una base plana y firmemente sujeto con ayuda de unos salientes en la base del molde sobre los que se apoya el operario. Se enrasa a la perfección en la capa superior y se eleva el molde verticalmente, ya que si se ladea se puede desviar el centro de gravedad del testigo introduciendo esfuerzos cortantes que condicionen el ensayo.

Para determinar el asentamiento se sitúa el molde al lado del cono y se coloca la barra encima del molde para que sirva como referencia en altura, después se mide la diferencia entre la altura del molde u el punto más alto del ensayo, con una precisión de hasta medio centímetro.

Ensayo del cono de Abrams

<i>Consistencia</i>	<i>Asiento (cm)</i>	<i>Tolerancia (cm)</i>
Seca	0 – 2	0
Plástica	3 – 5	± 1
Blanda	6 – 9	± 1
Fluida	10 – 15	±2

Tabla 1.5.1. Ensayo de consistencia según UNE EN 12350 – 2.

Como últimas prescripciones indicar que este método no es muy útil para hormigones con asientos inferiores a un centímetro y para hormigones reforzados con fibras. En hormigones con tamaño mayor de 40 cm tampoco ofrece buenos resultados, siendo además un método muy sensible al contenido en agua ya que variaciones de un 3% en volumen pueden producir incrementos de hasta 25 mm de asiento.

1.5.2. Hormigón endurecido.

Las características del hormigón endurecido dependen fundamentalmente de la composición inicial del mismo y de su dosificación. No obstante, es sabido que algunas propiedades como la resistencia cambian con la edad del hormigón, y varían según

hayán sido las condiciones a las cuales se haya visto sometido. Entre las propiedades más representativas para este trabajo encontramos:

Densidad

La densidad real de un hormigón depende principalmente de la composición de los áridos y de la densidad de los mismos, así como, de la granulometría escogida que permita obtener la mayor compacidad posible. De otro lado, también influye la relación agua cemento, que está íntimamente ligada con la porosidad y por ende con la densidad del conjunto [26].

En general, una densidad elevada es indicativa de una buena resistencia, en general, para hormigones en masa como los trabajados en esta tesis la densidad oscila entre los 2.2 y 2.4 kg/dm³.

Elasticidad

Se puede afirmar que el hormigón no cumple la ley de Hooke en ninguno de los tramos de su gráfico tensión/deformación (algunos autores señalan que en las primeras etapas del diagrama puede comportarse como una recta [27]).

Fig. 1.5.1. Gráfico Tensión (N/mm²) – Deformación (mm) de hormigón en ensayo lento.

Este gráfico tensión/deformación puede obtenerse mediante ensayos realizados a velocidad lenta en el laboratorio (figura 1.5.1), en el se vislumbran tres partes: una pequeña primera parte prácticamente recta donde se puede estimar que trabaja en régimen elástico, una curva ascendente hasta alcanzar la tensión de rotura $f_{c,max}$ y una

descendente hasta alcanzar la deformación máxima coincidente con el punto de rotura e_{max} .

El comportamiento del conjunto del hormigón está a su vez muy influenciado por las microfisuras que aparecen en la interfase pasta-árido cuando se somete a carga a la muestra. Si se consideran por separado, los áridos tienen un módulo de elasticidad más elevado que el del hormigón, y éste a su vez tiene un módulo de elasticidad superior al de la pasta de cemento [28]. No obstante, este módulo de elasticidad del hormigón se hace mayor cuanto más aumenta su edad [29].

La adición de áridos reciclados en el hormigón también influye de manera negativa. En general para valores bajos de adición ($< 15\%$) no existen diferencias significativas con el módulo de elasticidad del hormigón convencional, pero para valores superiores este disminuye de forma progresiva [30]. Aun así influyen otras muchas propiedades como son la relación agua/cemento y la temperatura de curado, aunque estas en menor manera el tipo de árido empleado.

El módulo determinado sometiendo a carga a una probeta es el estático, y éste módulo como se ha visto depende del tiempo de duración del ensayo que influye en la fluencia del material. En la determinación dinámica desaparece la componente de fluencia y el valor es más aproximado a las primeras partes del diagrama tensión-deformación donde el hormigón trabaja en régimen cuasielástico. La determinación del módulo de elasticidad dinámico se hace sometiendo a la pieza de hormigón a una serie de impulsos ultrasónicos y midiendo el tiempo que tardan en recorrer un espacio fijo situado entre emisor y receptor.

Este ensayo tiene especial relevancia en este trabajo, ya que nos permite determinar la velocidad de propagación de las ondas a través del hormigón. Para ello seguiremos las indicaciones dadas por M. Fernández Cánovas en su libro sobre el hormigón armado.

Las ondas longitudinales se propagan paralelamente al movimiento de las partículas y reciben el nombre de ondas de presión. Estas ondas son las que poseen mayor velocidad y ésta viene dada por:

$$V_L = \sqrt{\frac{E_d \cdot g}{\gamma} \cdot \frac{1 - \nu}{(1 + \nu) \cdot (1 + 2\nu)}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (85)$$

donde E_d es el módulo dinámico de elasticidad del hormigón en N/mm^2 , g es la aceleración de la gravedad en m/s^2 , γ es la densidad del hormigón en Kg/dm^3 y ν es el coeficiente de Poisson.

Las ondas transversales en cambio, dan lugar a oscilaciones de las partículas según la dirección perpendicular de propagación, denominándose también ondas de cizalladura y su velocidad viene dada como:

$$V_T = \sqrt{\frac{E_d \cdot g}{\gamma} \cdot \frac{1}{2(1 + \nu)}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (86)$$

Las ondas superficiales o de Rayleigh son las más lentas de todas y se propagan en la periferia de un sólido semi-infinito siguiendo las irregularidades de la misma:

$$V_T = \sqrt{\frac{E_d \cdot g}{\gamma} \cdot \frac{1}{2(1 + \nu)} \cdot \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (87)$$

El módulo de elasticidad dinámico, a su vez, puede estimarse midiendo cualquiera de las tres velocidades. Por otro lado, el coeficiente de Poisson se puede estimar en 0,2.

Por otro lado, para hormigones normales con módulos de elasticidad comprendidos entre 20000 y 47000 MPa, para determinar la resistencia a compresión puede emplearse la ecuación empírica dada por:

$$f_c = 3,5 \cdot 10^{-9} \cdot E_d^2 - 1 \cdot 10^{-3} \cdot E_d + 200 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right] \quad (88)$$

Resistencia

El hormigón, como todos los materiales estructurales, resisten esfuerzos de compresión, tracción y flexión. Siendo el primero de todos el más elevado (casi diez veces superior al de tracción), es por ello, que se dice que en las estructuras de hormigón armado el hormigón resiste las compresiones y el acero las tracciones, aunque esto no sea del todo cierto ya que ambos resisten parte otros esfuerzos [31].

Esto no quiere decir que la resistencia a compresión sea siempre la más importante dentro de los compuestos de hormigón, ya que por ejemplo, en este trabajo para la elaboración de planchas o baldosas será la resistencia a flexión la que más interese.

a) Resistencia a compresión.

Cuando se mide la resistencia a compresión del hormigón es necesario conocer la geometría y la dosificación de la probeta sobre la cual se realiza el ensayo, ya que estos dos factores son determinantes a la hora de dar un resultado definitivo. No obstante, nunca se obtienen valores idénticos de resistencia a compresión dentro de una misma amasada, es por eso, que se deben realizar varios ensayos hallando al final lo que se conoce como resistencia media.

La actual EHE-08 estipula que las probetas ensayadas a 28 días habrán alcanzado el 95% de su resistencia a compresión, siendo este el ensayo más generalizado (aunque también se pueden hacer ensayos tempranos a 7 días o más tiempo 90 días...etc.). Las resistencias a compresión también varían en función del tipo de hormigón a elaborar. Por ejemplo: los hormigones en masa suelen tener una resistencia en torno a los 20 N/mm², para resistencias superiores de 25 N/mm² a 40 N/mm² hablamos de hormigones estructurales para edificación y para resistencias mayores a los 50 N/mm² la EHE habla ya de hormigones de alta resistencia.

Las probetas de ensayo normalizadas son las cilíndricas de altura 30 cm y diámetro 15 cm, aunque también existen otras de tamaño menor o de geometría cúbica que se pueden emplear aplicando después los factores de corrección pertinentes. Aun así, para un tamaño de árido comprendido entre los 20 y 40 mm, las citadas probetas cilíndricas de diámetro 30 son las que mayores beneficios reportan. Estas probetas deben curarse en cámara húmeda durante el periodo de 28 días previos al ensayo en condiciones de humedad de entre el 95 y el 97 %.

Para el ensayo a compresión se siguen las pautas que dicta la norma UNE-EN 12390-3:2003 en la cual se indica que se debe emplear una prensa con superficies plano paralelas. Para mantener a su vez la planeidad de las caras, se debe refrentar con mortero de azufre la cara superior de la probeta a ensayar ya que ésta presenta una superficie más rugosa durante el fraguado. Se coloca posteriormente la probeta centrada en el disco inferior de la prensa y se ajusta la cara superior hasta enrasar con el tope de la prensa, después se comienza el ensayo aplicando la carga de manera continua y a velocidad constante tal que el incremento de la carga por segundo produzca un aumento de la tensión de $0,5 \pm 0,2$ N/mm². El ensayo termina cuando se registra la carga máxima hasta la rotura soportada por la probeta.

b) Resistencia a flexotracción.

Para ello se siguen las pautas de la norma UNE-EN 12390-5:2001, mediante probetas de sección cuadrada y longitud cuatro o cinco veces su ancho. Las probetas rompen a flexión mediante la aplicación de dos cargas iguales y simétricas ejercidas por dos rodillos de 20 mm de diámetro sobre las caras que estuvieron en contacto con el molde. La resistencia a flexotracción para una velocidad de $0,5 \pm 0,1 \text{ N/mm}^2$ se mide por:

$$f_{ctf} = \frac{M_r}{W} = \frac{6M_r}{a^3} = \frac{3F}{a^2} \quad (89)$$

c) Resistencia a tracción indirecta o ensayo brasileño.

Según la norma UNE-EN 12390-6:2001 se emplea una carga a compresión sobre las dos generatrices de la probeta diametralmente opuestas, de forma que para un aumento de la velocidad de $0,03 \pm 0,01 \text{ N/mm}^2$ se mide mediante la ecuación:

$$f_{ctl} = \frac{2F}{\pi \cdot a \cdot l} \quad (90)$$

(a)

(b)

Fig. 1.5.2. Métodos de ensayo. (a) Ensayo a flexotracción; (b) Ensayo brasileño.

Fisuras por retracción

Las fisuras por retracción que conciernen a este trabajo pueden ser de dos tipos: plásticas o térmicas. Las primeras tienen lugar durante las horas iniciales del fraguado que siguen a la puesta en obra del hormigón, las segundas en cambio, están relacionadas con los esfuerzos de origen térmico que sufren las losas y otras piezas en las que prima la superficie frente al volumen cuando se someten a cambios bruscos de temperatura.

En general, como algunos autores señalan [32], cuanto mayor sea la resistencia a tracción del hormigón menos será el peligro de que rompa cuando se encuentra

sometido a esfuerzos de origen térmico o pérdida de agua, esto parece lógico ya que los hormigones con mayor resistencia a tracción son a su vez los que tienen un módulo de elasticidad más elevado, esto parece contradictorio de cara a la retracción ya que estos hormigones también son los que menos se deforman.

La cantidad de agua de amasado es el factor que más influye en los procesos de retracción debido a que la pérdida excesiva de ésta es la que origina las fisuraciones superficiales. Por otro lado, el elevado contenido en cemento también perjudica aumentando la retracción, pero tiene el efecto positivo de aumentar la resistencia final de las piezas, es por eso que los hormigones de alta resistencia empleados en obras especiales tienden a fisurarse con mayor facilidad.

En el caso del hormigón en masa, si no se realiza un vibrado posterior al vertido, la decantación de los áridos hace que estos descendan al fondo, creando una lechada superficial que favorece la fuga de agua de amasado y las consiguientes retracciones. Estas fisuras también se encuentran condicionadas por el tiempo de secado, ya que si existen vientos cálidos o altas temperaturas serán más pronunciadas. No obstante, estas fisuraciones son siempre superficiales y en general no superan los 10 cm de espesor.

Otro factor importante que influye en los procesos de retracción es la hidratación del cemento, que aumenta la masa de hormigón y con ello la evaporación de agua. Esta hidratación es necesaria para el fraguado del hormigón y genera porosidades internas que debilitan el material. También es necesario controlar los gradientes térmicos ya que producen variaciones diferenciales de temperatura a lo largo de las piezas, aumentando así las tensiones internas del material y favoreciendo la retracción del hormigón.

1.6. Las vibraciones y las estructuras.

En general, cuando se estudia la estructura de un edificio, y se quiere saber cómo trabaja y de qué forma transmiten sus esfuerzos, es necesario conocer como mínimo los siguientes tres aspectos fundamentales [33]:

1) Conocer los diferentes elementos estructurales que componen el edificio:

Elementos estructurales horizontales: Se encargan de recibir las cargas de uso del edificio y de transmitirlas a otros elementos de la estructura. En este grupo se encuentran las losas, las placas, los forjados y las vigas. Los tres primeros se encargan

de conducir las acciones ejercidas sobre ellos a las vigas, las cuales a su vez las transmitirán después a los pilares, aunque no siempre son necesarias las vigas para realizar esta transmisión.

En este grupo también se incluyen las rampas y las losas inclinadas, puesto que tienen la misma constitución y solo difieren de las anteriores en su inclinación. Serán el objeto principal de estudio en esta tesis y que tratamos el ruido de impacto en planchas de hormigón y mortero.

Elementos estructurales verticales: Reciben las cargas de los elementos horizontales y se encargan de transmitir las a las cimentaciones. En este grupo se encuentran los pilares y los muros.

En general en edificación se trabaja con pilares para aguantar las acciones, los muros tienen una capacidad superior, y se emplean para aguantar además de cargas gravitatorias, empujes horizontales debidos al viento o al terreno. En ocasiones son convenientes para sectorizar el edificio.

Fig. 1.6.1. Transmisión de cargas

Cimentaciones: Transmiten las cargas que llegan de pilares y muros al terreno, incluyen zapatas, pozos de cimentación, losas de cimentación, pilotes y muros pantalla. La elección de uno u otro varía según las acciones a que se encuentre sometido el edificio y las características del terreno.

2) Qué son los pórticos y como se organizan dentro de la estructura.

Se define pórtico como el conjunto de vigas y pilares que se encuentran en un mismo plano vertical del edificio. Incluyen todo lo que se encuentre a lo largo de la sección que pasa por sus ejes y va desde la cimentación hasta la cubierta. En edificación, la importancia de su estudio radica en que generalmente se disponen paralelos entre sí, y los forjados, placas o losas apoyan entre ellos para transmitir sus cargas.

Un caso particular, es el presentado por las placas de hormigón armado que no necesitan vigas para la transmisión de esfuerzos. En este caso, las estructuras se organizan en los

denominados pórticos virtuales, sectorizando las placas en franjas donde deberían estar las vigas.

3) Cómo son las uniones entre los diferentes elementos estructurales.

Empotradas o Rígidas: Son las más utilizadas en edificación. Las armaduras de vigas y pilares se cruzan en los nudos, hormigonados a la vez, con lo que se consigue mayor rigidez en la unión. Se caracteriza por la viga transmite momentos a los pilares en los que se empotra, es decir, si la viga girase, el giro producido en sus extremos arrastraría al pilar colindante con ella.

Articuladas o apoyadas: Aquí la viga transmite una carga vertical al pilar pero no le transmite momento flector. Las vigas y pilares son elementos estructurales independientes. La viga flexa libremente sin arrastrar al pilar.

Fig. 1.6.2. Uniones; Superior: Apoyos en hormigón y metálica; Inferior: Rígidas en hormigón y metálica.

Siguiendo los esquemas anteriores, podemos deducir que las vibraciones que se originan en una pared o forjado de un edificio bajo el efecto de la presión acústica o de una fuerza mecánica no quedan limitadas a dicho elemento. Mientras una parte de la energía del impacto se disipa en forma de calor dentro del mismo elemento constructivo, o en forma de energía acústica irradiada al aire hacia uno u otro lado del elemento, el resto de la energía se transfiere a los elementos colindantes para terminar disipándose finalmente en forma de calor o de ruido aéreo inducido.

Los estudios teóricos acerca de la propagación acústica del ruido de impacto quedan limitados por su complejidad a elementos constructivos infinitos en los que las deformaciones se producen únicamente en dos dimensiones [34]. Para el caso de sistemas de dimensiones finitas se trabaja con estudios de campo llevados a cabo por profesionales del sector que dan una buena aproximación del comportamiento real de los edificios, aunque no siempre se obtengan resultados extrapolables.

Tipologías estructurales más utilizadas

De las diferentes tipologías que se exponen a continuación, cabe decir que su uso depende de las cargas a soportar, la distancia entre pilares necesarios y su disposición en planta, así como el coste total tanto de los materiales como el derivado de las condiciones y plazos de ejecución [35]. Así encontramos:

Estructura de forjados o losas trabajando en una dirección apoyados sobre pórticos paralelos entre sí: En España, la más empleada es la de forjados aligerados con bovedillas (bien cerámicas o de hormigón, según vayamos a la zona centro o levantina de la península) ya que estas no son caras y ahorran hormigón, y peso al forjado. La limitación se encuentra en que las luces no pueden sobre pasar los 6,5m. En caso de tener que aumentar esta distancia, se recurre a las losas, en principio más caras debido al mayor contenido en hormigón (siendo, sin embargo, las más utilizadas en Europa).

Una variante que además es muy utilizada, es la de forjados con vigas planas en lugar de vigas de cuelgue, las cuales se caracterizan por tener el mismo canto que el forjado, facilitando el encofrado y una posterior distribución. El inconveniente es que trabajan peor a flexión y necesitan un armado superior.

Estructura de placas trabajando en las dos direcciones, apoyadas sobre pórticos dispuestos en las dos direcciones cruzándose: Se tiene el doble de vigas, las placas pueden ser macizas, esto es de sección constante, o aligeradas mediante casetones. Se utiliza para edificios con grandes cargas.

Estructura de placas trabajando en dos direcciones apoyadas sobre pilares sin vigas intermedias: No son adecuadas para cargas elevadas, ya que estas viajan directamente a los pilares, además, las placas suelen ser aligeradas mediante bañeras, formando forjados reticulares. Permite una mayor libertad en la distribución de pilares, son muy

empleadas en edificios de oficinas, ya que requieren de la utilización de falso techo y de un meticuloso armado.

Estructura de losas y muros de hormigón: Disponiendo muros en forma paralela, en lugar de pórticos de pilares. Emplean los denominados encofrados túnel, que sirven para hormigonar simultáneamente el muro y la losa superior. Son más caros que los anteriores, pero resisten también mayores esfuerzos horizontales y compartimentan el edificio.

Estructura de hormigón prefabricado: En este caso los elementos son prefabricados en taller y llevados después a la obra, con la consiguiente limitación en el transporte para sus dimensiones, siendo necesario hormigonar in situ solamente las cimentaciones y las uniones entre elementos, así como sus capas de compresión. El montaje se realiza con la ayuda indispensable de la grúa, pero tiene la ventaja de una mayor rapidez y economía. Las piezas en cambio deben de ser modulares, restringiendo demasiado la creatividad del proyecto, aunque en naves industriales tienen una mayor ventaja.

Estructura en tubo para edificios de altura: Útil cuando el edificio tiene más de 10 plantas y la influencia del viento tiene mayor importancia, ya que esta crece exponencialmente con la altura, siendo en ocasiones superior a las cargas verticales que recibe la estructura. Es necesario utilizar muros en vez de pilares, y que estén colocados perpendicularmente entre sí para que cada uno recoja los esfuerzos que se generan en su plano. En edificios de gran altura, se coloca un tubo rígido en el centro que sirve a su vez como hueco del ascensor y paso de instalaciones, además arriostra el edificio y une la estructura.

En todo caso, la propagación de ondas en una estructura que emiten sonido al aire, es decir el ruido de impacto, pueden ser detectadas por el oído humano a partir de frecuencias de 16 Hz.

Se debe distinguir entre ondas viajeras y estacionarias (vibraciones) en estructuras. Las ondas estacionarias resultan de la reflexión en los contornos de modo que originan movimientos varían en la forma sólo con el tiempo.

Dado que los sólidos como el hormigón pueden transmitir deformaciones a cortante, la propagación de las ondas también posee una componente transversal, a diferencia del aire [36]. La combinación de ondas transversales y longitudinales puede ocasionar:

Cambios de signo en las tensiones sobre el material y ondas de flexión o transmisión del ruido a otras construcciones.

Las propiedades de amortiguamiento y las frecuencias naturales de las estructuras afectadas por este efecto pueden variar en un amplio rango, ya que dependen de las propiedades de la estructura y de los parámetros de la acción dinámica causante.

Se puede actuar sobre la fuente generadora del ruido, bien evitando su aparición, efectuando cambios en las fuerzas de excitación o en las impedancias de entrada, o bien evitando la transmisión con ayuda de materiales elásticos de apoyo que atenúen los impactos producidos por la maquinaria instalada o la acción de las personas al desplazarse sobre su superficie [37].

De los estudios realizados sobre la transmisión a través del suelo de ondas mecánicas, todos ellos se ven influenciados por las propiedades de transmisión del forjado, ya que debido a la heterogeneidad del suelo, estos mecanismos de vibración son muy complicados y las estimaciones de cálculo suelen ser meras aproximaciones [38]. No obstante, por medio de la experimentación in situ se puede aumentar la fiabilidad de dichos métodos.

El contenido en intensidad y frecuencia de las vibraciones de una estructura inducidas por el impacto sobre su superficie está gobernado por el foco de la excitación, el camino de la transmisión y las propiedades de la estructura en sí.

La medida de las características de propagación del suelo pueden proporcionar suficiente información sobre el área a estudiar, estas medidas son la velocidad de propagación según la rigidez del forjado y los factores de amortiguación en función de la frecuencia. Aunque también, se puede trabajar con la impedancia, que es la relación entre la fuerza ejercida y la velocidad.

1.6.1. Vibraciones inducidas por las personas.

Las vibraciones inducidas por los movimientos de las personas son de gran importancia en el cálculo de estructuras. Estas pueden producirse de las formas que se pueden observar en la tabla 1.6.1.

Este tipo de vibraciones producidas por la acción de las persona rara vez afectan al comportamiento en fatiga del edificio, pero si tienen efectos notorios de cara al comportamiento en servicio en forma de ruido de impacto.

Modos de generar vibraciones

<i>Movimientos frecuentes</i>		<i>Movimientos aislados</i>
Andar y correr	Aplaudir saltando mientras se está de pie	Taconazos
Saltar	Aplaudir estando sentado	Impacto por salto
Bailar	Inclinar el cuerpo o balanceos laterales	Impactos por caídas en altura

Tabla 1.6.1. Generación de vibraciones debidas a la acción de las personas.

En cuanto a la sensibilidad humana a las vibraciones cabe decir que esta es muy aguda, pudiendo sentir el cuerpo humano amplitudes de desplazamientos tan bajas como 0.001 mm, tal y como afirma la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Por otro lado, la respuesta a estas vibraciones es muy diferente y varía según la circunstancia en la que nos encontremos, ya que para determinadas tareas se hace más notoria [39]. La actitud personal también es importante, pero como norma general los parámetros que afectan a la sensibilidad humana son los siguientes:

- ✓ Posición (de pie, sentando, tumbado)
- ✓ Dirección de la incidencia respecto a la espina dorsal
- ✓ Actividad personal (descansando, caminando...etc.)
- ✓ Compartiendo o no la experiencia
- ✓ Edad y Sexo
- ✓ Frecuencia de ocurrencia y hora del día
- ✓ Forma en que evoluciona la vibración

Además, esta intensidad de percepción depende de otros factores como son: las amplitudes de aceleración, la velocidad y el desplazamiento producidos, el tiempo al que un sujeto se encuentra expuesto a esas vibraciones y la frecuencia de las mismas. Esta intensidad de percepción ha sido a su vez estudiada por muchos autores [40], que han tratado de mejorar el diseño de las estructuras para evitar los efectos nocivos de estas vibraciones, más aún si cabe con el uso de la actuales construcciones prefabricadas como los actuales paneles sándwich [41]. En general, para el rango de 1 a 10 Hz la percepción de las vibraciones se hace proporcional a la aceleración y en el rango de 10 a 100 Hz se hace proporcional a la aceleración.

La división mostrada en la tabla 1.6.2 varía ligeramente en función del estímulo. No obstante existen normas de aplicación como la ISO 2631 que ayudan a esclarecer los criterios realistas para su aplicación.

Grados de percepción de vibraciones

<i>Descripción</i>	<i>Rango de frecuencia de 1 – 10 Hz velocidad de pico [mm²]</i>	<i>Rango de frecuencia de 10 – 100 Hz velocidad de pico [mm²]</i>
Ligeramente perceptible	34	0,5
Claramente perceptible	100	1,3
Molesto/Desagradable	550	6,8
Intolerable	1800	13,8

Tabla 1.6.2. Grados de percepción de las vibraciones en función del rango de frecuencia y velocidad de pico. ACHE.

1.6.1.1. Estudio de forjados sometidos a la acción de personas andando.

Como norma general los forjados de oficinas y viviendas están sujetos a las vibraciones provocadas por la acción de las personas al andar, aunque también al bailar y saltar (en caso de existir pistas de baile o similares) y correr (generalmente cuando las construcciones disponen de pasillos que permiten realizar esta actividad).

La naturaleza de las vibraciones en oficinas y edificios residenciales se ve influenciada por diversos factores, entre ellos, la configuración de las particiones, el mobiliario, los falsos techos, la concentración de cargas y la forma de las estancias. Estos factores, no influyen solo en el modo de vibración y en las frecuencias naturales de los forjados, sino también, en el amortiguamiento de estas vibraciones.

Cuando caminamos, las fuerzas dinámicas se producen por el impacto de la pisada de una persona que da un paso. De tal forma que se puede describir no solo la fuerza provocada al andar en función del tiempo, sino que también se puede expresar en términos de su desarrollo en serie de Fourier, con frecuencias que sean múltiplos de las frecuencias comunes al andar, es decir, entre 1.6 y 2.4 Hz. Por otro lado, estas frecuencias no son iguales si se trata de una única persona o de un grupo de ellas, y tampoco si se trata de un conjunto de personas realizando una actividad coordinada con algún movimiento o no [42].

Los forjados de los edificios pueden llegar a tener luces importantes, especialmente en oficinas sin particiones, resultando frecuencias fundamentales tan bajas como 4 a 6 Hz, aunque también en pasillos y rellanos de escalera puede ocurrir algo similar. Generalmente, las estructuras mixtas (losa de hormigón con vigueta metálica) con frecuencias naturales inferiores a 7 u 8 Hz, son las más proclives a vibrar de forma

incomoda, más que los forjados de losa de hormigón armado que poseen mayor masa y un mayor amortiguamiento. Estos generalmente no alcanzan vibraciones molestas in situ ya que las frecuencias naturales de las losas son superiores a 7,5 Hz.

Como ya se comentó, este tipo las vibraciones producidas por las personal al caminar apenas tienen efectos críticos sobre las estructuras, ya que sus amplitudes de vibraciones no afectan a la fatiga y resistencia de las mismas. Sin embargo, no ocurre igual con las personas que sí que se ven afectadas bien mediante la desconfianza en la seguridad de la estructura, o simplemente por las molestias generadas.

En cuanto a los valores admisibles, dependen del uso que tenga el edificio, pero como norma general se hace aceptable para edificios de oficinas una amplitud de vibración de pico de 0,5%g intermitente (10 – 30 ciclos), y en casos especiales como aulas de estudio, esta se rebaja a 0,2%g.

Entre los métodos de comprobación de las frecuencias de vibración, encontramos dos:

1) Método de acoplamiento:

Basado en alejar la frecuencia fundamental del forjado y la de uno de los armónicos de las solicitaciones producidas al andar, para evitar la coincidencia entre ambos y con ello el fenómeno de resonancia. Este método es simple y efectivo, (se suele aumentar la frecuencia fundamental hasta un valor de 7,5 Hz), pero puede llegar a ser demasiado conservador.

2) Método del golpe de tacón, (el más empleado):

Es un método que para frecuencias por debajo de los 10 Hz y para luces de más de 8m proporciona resultados muy buenos (para luces más cortas se debe considerar el peso de la persona y el amortiguamiento). Está especialmente indicado para forjado de losa de hormigón sobre vigueta metálica aunque también puede usarse en losas de hormigón armado.

El método consiste en que una persona de peso en torno a los 700 N eleve sus tacones y los deje caer al suelo de forma repentina. El procedimiento puede ser utilizado tanto como herramienta de proyecto, como para evaluar las acciones provocadas al andar en los forjados existentes. Es preciso decir que sirve para comprobar la respuesta bajo las

vibraciones producidas al andar, y no se ve como una aproximación simplista del fenómeno de andar de forma continua.

El método de comprobación o proyecto consiste en los siguientes pasos:

- Cálculo o medición de la frecuencia fundamental del forjado.
- Cálculo o medición de la aceleración máxima inducida por un impulso que represente el golpe de tacón.
- Determinación del amortiguamiento del forjado.
- Comparación de los resultados del método con los valores aplicables según las características del forjado.

La frecuencia fundamental de los forjados puede ser calculada por cualquier método. Para forjados de losa de hormigón y viga metálica se puede calcular de forma precisa mediante la ecuación:

$$f = 156 \cdot \left(\frac{EI_T}{WL^4} \right)^{0,5} \quad [\text{Hz}] \quad (91)$$

Donde E es el módulo de elasticidad en MPa, I_T es el momento de inercia de la sección homogeneizada en mm^4 , la anchura de la losa s es la separación entre viguetas y el espesor total t_c es el resultante de homogeneizar el acero, W es la carga muerta total en el espacio entre vigas en N/mm y L es la luz en mm.

Fig. 1. 6.3. Valores geométricos para calcular la frecuencia fundamental en tramos simplemente apoyados (ACHE)

Para forjados cuyas vigas o viguetas se apoyen en vigas, f se podrá calcular mediante la aproximación de Dunkerley:

$$f = (f_1^{-2} + f_2^{-2})^{-1/2} \text{ [Hz]} \quad (92)$$

donde f_1 es la frecuencia fundamental del forjado en caso de apoyo rígido y f_2 es la frecuencia natural de la viga de masa equivalente al área del forjado que soporta en Hz.

La aceleración máxima a_0 inducida por el taconazo puede obtenerse a partir de la respuesta general de un sistema de impulso unidad:

$$a_0 = \frac{2 \Pi F I}{M} 0.9 \left[\text{m/s}^2 \right] \quad (93)$$

donde f es la frecuencia fundamental del forjado en Hz, I es el impulso equivalente a un golpe de tacón de 67N y M es la masa movilizada en Kg.

El efecto del amortiguamiento se tiene en cuenta mediante un factor de ajuste de valor 0,9. O lo que es igual:

$$a_0 = \frac{60f}{wBL} [\%g] \quad (94)$$

Valores de amortiguamiento asociados al crítico

Forjado desnudo (mixto)	0,03
Forjado terminado (con techos, solados, muebles y servicios)	0,06
Forjado terminado incluyendo tabiques	0,12

Tabla. 1.6.3. Valores de amortiguamiento asociados al crítico mediante el método del golpe tacón.

Estos valores de amortiguamiento, son calculados a partir del decrecimiento de la respuesta al impacto aplicado en el centro de los forjados acabados y ocupados, que generalmente, son mayores que los medidos a amplitudes apenas apreciables.

En la figura 1.6.4 se encuentran los valores de aceptación obtenidos de manera experimental, según los cuales, a_0 debería ser inferior a las curvas correspondientes al valor de amortiguamiento aplicable.

Fig. 1. 6.4. Valores límites aceptables para vibraciones producidas al andar en edificios de oficinas y residenciales

El método no proporciona una respuesta convergente para incrementos progresivos de la rigidez, pero proporciona, resultados favorables para incrementos de masa y amortiguamiento.

Se debe cuidar especialmente la estimación del nivel de vibraciones satisfactorio en un tramo adyacente sometido al paso de los peatones, ya que las vibraciones se transmitirán en este con las mismas amplitudes que en el tramo excitado, debido a la continuidad estructural. Se adoptará el criterio más restrictivo de entre las dos salas.

Se puede obtener un límite superior aplicando la componente de la acción armónica de la acción de andar al sistema de un grado de libertad que modela el forjado y calculando la respuesta en estado estacionario.

Como medidas correctoras destacan:

- Alejar las frecuencias naturales del valor del armónico crítico de las acciones producidas al andar, mediante el cambio de la rigidez o la masa del forjado, o incrementando el amortiguamiento en especial si la frecuencia coincide con el tercer armónico.
- Para los forjados comprobados por el método de golpe tacón, se incrementará la masa o el amortiguamiento añadiendo varios elementos no estructurales como tabiques o añadiendo dispositivos mecánicos de absorción de vibraciones.

1.6.1.2. Forjados de salas de baile y gimnasios.

En ese apartado se consideran los centros deportivos (gimnasios y salas de entrenamiento), donde se efectúan ejercicios rítmicos como correr o saltar, realizados generalmente por un gran número de personas sincronizadas durante al menos 20 segundos, y que pueden provocar acciones dinámicas muy elevadas. También en salas de baile donde se realizan movimientos coordinados o existe el efecto de varias personas aplaudiendo rítmicamente [43].

En la mayor parte de las actividades deportivas el contacto de los pies en el suelo no es continuo, resultando altas fuerzas de impacto rítmicas, la frecuencia máxima observada esta en torno a los 3,5 Hz y densidad de gente baja. Para el caso del salas de baile, hay mayor contacto de los pies en el suelo y se asemeja más al fenómeno de andar (salvo en

bailes primitivos), la frecuencia máxima observada en estos casos es de unos 3,1 Hz, aunque la densidad de personas suele ser superior.

Los forjados para uso deportivo de gran luz proyectados únicamente para cargas estáticas suelen tener unas frecuencias fundamentales que oscilan entre 4,5 y 5,5 Hz, pudiendo alcanzar niveles de resonancia, especialmente con el segundo armónico de la excitación (3,6 a 6,8 Hz). En cambio, para luces más pequeñas las frecuencias fundamentales oscilan entre 6 y 9 Hz, pudiendo entrar en resonancia en estos casos con el tercer y cuarto armónico de la excitación.

Los forjados de baile, pueden entrar en resonancia en cambio, con la frecuencia del segundo armónico (4 a 6 Hz, llegando hasta 7,5 Hz en casos extremos).

El amortiguamiento en estos forjados se ve incrementado considerablemente por el amortiguamiento de los elementos estructurales. En cambio, el amortiguamiento viscoso oscila entre los valores de la siguiente tabla:

Valores del factor de amortiguamiento para forjados de uso deportivo y bailes			
<i>Tipo de construcción</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Medio</i>	<i>Máximo</i>
Hormigón Armado	0.014	0.025	0.035
Hormigón Pretensado	0.010	0.020	0.030
Mixta	0.008	0.016	0.025
Metálica	0.006	0.012	0.020

Tabla 1.6.4. Valores del amortiguamiento viscoso. Fuente ACHE.

En algunos casos las vibraciones pueden ser molestas hasta el punto de hacer creer a la audiencia la posibilidad de colapso de la estructura. En este tipo de forjados, las personas que se encuentran en estancias colindantes pueden resultar molestadas, mientras que las personas situadas en el foco emisor no se percaten.

El máximo valor tolerable de la aceleración para forjados deportivos es de 0,5%g (0,1 en los casos extremos). En las salas de baile el valor también es de 0,5%g pudiendo llegar hasta 0,3%g en salas de conciertos de pop/rock sin que la gente se queje.

La frecuencia fundamental de los forjados para uso deportivo y salas de baile deberá ser mayor que la frecuencia del segundo armónico ($> 6,8$ Hz en deportivos y > 6 Hz en baile), debiendo tener en cuenta los diferentes tipos de rigideces efectivas, masa y amortiguamientos, de forma aproximada para los diferentes tipos de construcción:

Frecuencias fundamentales para los diferentes forjados

<i>Tipo de estructura</i>	<i>Uso deportivo</i>	<i>Salas de baile</i>
Hormigón Armado	$f_1 > 7,5 \text{ Hz}$	$f_1 > 6,5 \text{ Hz}$
Hormigón Pretensado	$f_1 > 8,0 \text{ Hz}$	$f_1 > 7,0 \text{ Hz}$
Mixtas	$f_1 > 8,5 \text{ Hz}$	$f_1 > 7,5 \text{ Hz}$
Metálicas (acero)	$f_1 > 9,0 \text{ Hz}$	$f_1 > 8,0 \text{ Hz}$

Tabla 1.6.5. Frecuencias fundamentales para las diferentes tipologías de forjados. Fuente ACHE.

El cálculo de las frecuencias naturales debe llevarse a cabo con especial cuidado, contando con la contribución de acabados, con el modulo de elasticidad dinámico y en el caso del hormigón armado, con la fisuración.

Entre las medidas correctoras a aplicar destacan:

- ✓ Aumentar la frecuencia natural mediante el aumento de la rigidez del forjado, prestando especial atención a la masa añadida.
- ✓ Incrementar el amortiguamiento, pudiéndose realizar de diversas formas como incorporando dispositivos en apoyos o soportes.
- ✓ Usar dispositivos de absorción, sistemas del tipo masa – muelle – amortiguador, que se ajusten a la frecuencia crítica del forjado en cuestión.

1.6.1.3. Forjados con asientos fijos y gradas.

En este aparatado se incluyen las salas de concierto y teatros, así como los grandes estadios de futbol. En todas ellas, las vibraciones pueden ser inducidas por: Aplausos de la audiencia sentada al ritmo de la música o al finalizar la misma, aplausos rítmicos con saltos verticales simultáneos de la audiencia que se encuentra entre las filas de asientos, o por movimientos laterales de las personas manteniendo los pies en el suelo bien sentados o de pie con los brazos entrelazados [44].

La acción dinámica de una persona aplaudiendo depende de la intensidad del aplauso y de si el movimiento de hombros se da al mismo tiempo. En general, la fuerza dinámica producida por una persona aplaudiendo sentada o de pie es la misma, siempre y cuando no haya saltos verticales provocados por los movimientos de flexión de los segundos. La fuerza dinámica horizontal producida por el movimiento lateral del cuerpo depende casi exclusivamente de la frecuencia del movimiento, de la amplitud del desplazamiento y de la masa del participante del cuerpo.

Las estructuras de gradas pueden llegar a tener una frecuencia horizontal fundamental de 1 Hz, dependiendo de la rigidez horizontal. Podrán ser excitadas hasta fuertes vibraciones horizontales de resonancia por el tercer armónico.

Los forjados de grandes luces en salas de conciertos o estructuras de gradas que han sido sometidas a cargas estáticas pueden tener como frecuencia vertical fundamental un valor de, aproximadamente 2 Hz. El amortiguamiento se encontrará en el intervalo de 0,015 a 0,03. Estos forjados pueden llegar a resonar con el primer armónico de la excitación vertical de la audiencia sentada y aplaudiendo. En forjados con una frecuencia natural mayor pero con audiencia de pie o saltando, las vibraciones molestas se causaran por el segundo armónico.

Los valores del amortiguamiento y los efectos producidos sobre las personas también son prácticamente idénticos que en los forjados de salas de baile y gimnasios.

Se toma como valor máximo aceptable para el pico de la aceleración vertical el 1%g. En el caso de los conciertos “pop” se desplazara hasta el 5%g. Para la aceleración horizontal son validos los valores correspondientes a la mitad de los anteriores.

La frecuencia fundamental de la estructura se debe establecer conforme a los siguientes criterios mostrados en la tabla 1.6.5:

Criterios de selección de la frecuencia fundamental de las estructuras.

Forjados de salas de conciertos y teatros con asientos fijos donde se celebran conciertos de música pop suave solamente	$f_1 > 3,4 \text{ Hz}$
Forjados de salas de conciertos y teatros con asientos fijos y gradas donde se celebran conciertos de música clásica y pop duro solamente	$f_1 > 6,5 \text{ Hz}$
Gradas de espectadores con asientos fijos donde la audiencia canta y mueve lateralmente inclinando el tronco	$f_1 > 2,5 \text{ Hz}$

Tabla 1.6.5. Frecuencia fundamental de los diferentes forjados. Fuente ACHE.

1.6.1.4. Pasarelas y trampolines.

Las pasarelas peatonales construidas normalmente de hormigón o acero, se caracterizan por ser esbeltas y flexibles. En la mayor parte de los casos el problema es del tipo de movimiento forado causado por la cadencia de paso de los peatones, generalmente de

naturaleza transitoria sin alcanzar el régimen permanente. Cuando dos o más personas caminan a la vez, estas lo hacen generalmente al paso, con lo cual implementan las cargas.

La diferencia con los forjados y la principal razón de que no se estudien con el mismo detalle, es que la transmisión de las oscilaciones en este tipo de estructuras se transmite principalmente en una única dirección. El objetivo cuando se realiza una construcción de este tipo es evitar que la cadencia media de paso coincida con alguna frecuencia natural de la pasarela. Los problemas ocurren cuando las luces en puentes de hormigón superan los 25 m.

El amortiguamiento aumenta con la amplitud de la vibración, en hormigón armado tiene un valor medio de 0,013. Si se acepta un límite de aceleración de $0,7 \text{ m/s}^2$ no surgirán problemas de vibración siempre que la rigidez sea mayor de 8 kN/m, para valores superiores se genera desconfianza e inquietud entre los transeúntes. Para atenuar estos problemas se propone aumentar la rigidez.

En el caso de los trampolines de hormigón, las vibraciones son producidas por el impulso que toma el atleta cuando salta. En el caso de saltos normales bastará con una plataforma rígida, en cambio, para saltos artísticos esta debe ser ligeramente flexible para ganar impulso en el salto.

Los trampolines proyectados para soportar cargas estáticas suelen tener frecuencias naturales de entre 2 y 3 Hz, en el caso de trampolines rígidos el amortiguamiento estructural aumenta por la energía radiada en el terreno. Pero en general los trampolines deben de cumplir con un criterio de rigidez exigida y poseer una frecuencia natural de resonancia inferior a la que será sometido.

Un caso particular lo componen las vías para trenes que deben repartir las vibraciones producidas por el avance del tren en una única dirección para no generar sobre tensiones, además de evitar la sensación de inestabilidad a los pasajeros. Para ello se emplean métodos de simulación por elementos finitos que permiten discretizar el comportamiento de la estructura y estudiar en detalle cada una de las partes del conjunto. La solución más genérica a este tipo de vibraciones consiste en aumentar la inercia de los elementos que sustentan las cargas y realizar apoyos elásticos (ej. Tacos de neopreno) para evitar la sobrecarga en las esquinas [45-46].

1.6.2. Estudios sobre el ruido y las vibraciones producidas en las instalaciones.

En este apartado se tratan los equipos de instalaciones que a causa de su trabajo continuado causan vibraciones, las cuales como ya se sabe, además de los efectos dinámicos directos, pueden ocasionar efectos dinámicos indirectos particularmente desagradables que se transmiten a través de la estructura y se irradian después en forma de sonido en estancias separadas del foco inicial.

El CTE DB – HR establece las siguientes especificaciones relativas al ruido de las instalaciones:

“Se limitarán los niveles de ruido y de vibraciones que las instalaciones puedan transmitir a los recintos protegidos y habitables del edificio a través de las sujeciones o puntos de contacto de aquellas con los elementos constructivos, de tal forma que no se aumenten perceptiblemente los niveles debidos a las restantes fuentes de ruido del edificio.”

Es decir, este incide en que para mitigar estas vibraciones transmitidas estructuralmente, es necesario desligar las uniones rígidas de los puntos de apoyo o fijaciones de las máquinas a los distintos paramentos.

En cualquier caso, para poder actuar desde el inicio sobre estas fuentes de vibración, se hace necesario que los suministradores de los equipos y productos, incluyan en la documentación de los mismos los valores de las magnitudes que caracterizan los ruidos y las vibraciones procedentes de las instalaciones de los edificios.

1.6.2.1. Equipos generadores de ruido y vibraciones estacionarias.

Considerando como tales [47]: los quemadores, la maquinaria de los ascensores, las bombas de impulsión, los compresores...etc. Una máquina causa diferentes fuerzas dinámicas dependiendo de la función que realice, las condiciones en las que opera, el estado de mantenimiento...etc.

Estas fuerzas dependen en primer lugar, del tipo de movimiento que describen las partes de la máquina, tanto si es de rotación, oscilación o con carácter de impacto. Según su variación en el tiempo las fuerzas dinámicas pueden ser periódicas (dentro de las cuales en ocasiones pueden ser armónicas) o no periódicas (dentro de las cuales pueden ser transitorias o impulsivas).

1. Equipos situados en recintos de instalaciones.

La expresión que representa el máximo nivel de potencia acústica admitido por estos equipos es:

$$L_w \leq 70 + 10 \log V - 10 \log T + K\zeta^2 \quad [\text{dB}] \quad (95)$$

donde L_w es el máximo nivel de potencia acústica de emisión, V es el volumen en m^3 del recinto de las instalaciones, T es el tiempo de reverberación en segundos del recinto, K es un factor que depende del equipo y ζ es el factor de transmisibilidad del soporte antivibraciones en el que se realiza la instalación, mostrados en la tabla 1.6.6.

Valores de K y ζ de los sistemas antivibratorios

<i>Tipo de equipo</i>	<i>K</i>	<i>Valor de transmisibilidad ζ, máximo del sistema antivibratorio</i>
Calderas	12.5	0.15
Bombas de impulsión	12.5	0.10
Maquinaria de ascensores	10	0.01

Tabla 1.6.6. Valores de los coeficientes para equipos situados en recintos de instalaciones.

Además, cuando la instalación requiera tener unos niveles de potencia acústica mayores que el indicado, deben tenerse en cuenta los niveles de inmisión de los recintos colindantes, reflejados en la Ley 37/2003 del Ruido.

2. Equipos situados en recintos protegidos.

Valores del nivel sonoro continuo equivalente estandarizado, ponderado A, $L_{Aeq,T}$

<i>Uso del edificio</i>	<i>Tipo de recinto</i>	<i>Valor de $L_{Aeq,T}$ (dBA)</i>
Sanitario	Estancias	35
	Dormitorios y Quirófanos	30
	Zonas Comunes	40
Residencial	Dormitorios y Estancias	30
	Zonas Comunes y Servicios	50
Administrativo	Despachos Profesionales	40
	Oficinas	45
	Zonas Comunes	50
Docente	Aulas	40
	Salas de Lectura y Reunión	35
	Zonas Comunes	50
Cultural	Cines y Teatros	30
	Salas de Exposiciones	45
Comercial		50

Tabla 1.6.7. Valores de potencia acústica en recintos protegidos.

El nivel de potencia acústica, L_w máximo de un equipo que emita ruido, tal como una unidad interior de aire acondicionado, que se encuentre situada en un recinto protegido, debe ser menor que el valor del nivel sonoro continuo equivalente estandarizado, ponderado A, $L_{Aeq,T}$ establecido en la tabla 1.6.7.

3. Equipos situados en cubiertas y zonas exteriores anejas.

El nivel de potencia acústica máximo de estos equipos, será tal que en el entorno del equipo y en los recintos habitables y protegidos no se superen los objetivos de calidad acústica correspondientes a las zonas de uso.

4. Acciones dinámicas y condiciones de montaje.

Los elementos rotativos de la maquinaria causan fuerzas dinámicas no despreciables cuando el centro de masas de alguno de los elementos rotativos no coincide con el eje de rotación.

Esas fuerzas desequilibradas se hacen cada vez mayores con el envejecimiento de la máquina (aunque también pueden provenir de las operaciones de arranque y parada de la misma), de tal forma que un diseño adecuado, intentará equilibrar la mayor parte de la fuerza dentro de la estructura de máquina. Se puede calcular a su vez el efecto de estos desequilibrios sobre la estructura [48].

Para excitaciones periódicas la fuerza centrífuga depende del cuadrado del radio de rotación, esta clase de excitación es conocida como excitación cuadrática. Una velocidad constante de rotación equivale a una amplitud constante de la fuerza, excitación de fuerza constante. La amplitud de un elemento sencillo no equilibrado es el caso típico de una excitación cuadrática:

$$F_0 = m' \cdot e \cdot \frac{4\pi^2}{3600} \cdot n^2 = m' \cdot e \cdot 4\pi^2 \cdot f_B^2 = m' \cdot e \cdot \Omega^2 \quad (96)$$

donde m' es la masa del elemento rotativo (fracción desequilibrada), e es la excentricidad de la fracción de masa desequilibrada, n es la velocidad de rotación de la masa desequilibrada en revoluciones por minuto, f_B es la frecuencia de funcionamiento [$f_B = n/60$], Ω es la velocidad angular del elemento rotativo [$\Omega = 2\pi f_B$].

En una dirección arbitraria la fuerza armónica puede ser definida como:

$$F(t) = F_0 \cdot \text{sen}(\Omega t) = m' \cdot e \cdot \Omega^2 \cdot \text{sen}(\Omega t) \quad (97)$$

siendo F_0 la fuerza centrífuga.

Si varios de los armónicos rotativos con masas descompensadas individuales se montan sobre el mismo eje, rotarán con idéntica velocidad pero diferente ángulo de fase, por lo que producirán una fuerza armónica resultante.

Si varios elementos (n) descompensados giran con diferentes velocidades, resultará una fuerza periódica debido a la superposición de sus armónicos individuales, así:

$$F(t): \sum_{i=1}^n A_i \cdot \text{sen}(2\pi \cdot i \cdot f_B \cdot t - \emptyset_i) \quad (98)$$

donde i es el orden del armónico, A_i es la amplitud del i -ésimo armónico y f_i son los retrasos de fase del i -ésimo armónico respecto del primero.

Para excitaciones transitorias las maquinas con elementos que impactan ocasionan grandes efectos dinámicos intermitentes. La carga puede ser caracterizada por los siguientes parámetros en la fase de impacto:

- Duración del impacto (t_p) – Pico de máxima fuerza ($F_{p,máx}$)
- Impulso (I) – Tiempo de alcance de la máxima fuerza (t_a)

Para excitaciones aleatorias en muchos casos no es posible escribir una función de la fuerza de forma determinista, dado que depende de elementos aleatorios, entonces se hace necesario realizar un análisis estocástico con parámetros característicos determinados estadísticamente.

Debido a la complejidad de estos dos últimos apartados y a que no son del todo relevantes para la pretensión de este trabajo, no se han incluido sus métodos de cálculo.

Como condiciones de montaje de estas instalaciones podemos indicar:

- ✓ Los equipos se instalarán sobre soportes antivibratorios elásticos cuando se trate de equipos pequeños y compactos, o sobre una bancada de inercia cuando el equipo no posea una base propia suficientemente rígida para resistir los esfuerzos causados por su función o se necesite la alineación de sus componentes (ej. El motor y el ventilador o del motor y la bomba).

Los valores típicos de amortiguamiento para losas de soporte de maquinaria son:

Valores de amortiguamiento

<i>Tipo de construcción</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Media</i>	<i>Máximo</i>
Hormigón armado	0.010	0.017	0.025
Hormigón pretensado	0.007	0.013	0.020
Estructuras Mixtas	0.004	0.007	0.012
Acero	0.003	0.005	0.008

Tabla 1.6.8. Amortiguamiento típico en soportes para maquinaria.

- ✓ Si es posible, se debe evitar la coincidencia entre la frecuencia fundamental del elemento estructural y la frecuencia de funcionamiento de la máquina.
- ✓ Entre la bancada sobre la que apoyen los equipos instalados y la estructura del edificio, deben interponerse elementos antivibratorios.
- ✓ Se consideraran válidos los soportes antivibratorios y los conectores flexibles que cumplan con la norma UNE 100153 IN.
- ✓ Se instalaran conectores flexibles a la entrada y la salida de las tuberías de los equipos.
- ✓ En las chimeneas de las instalaciones térmicas que lleven incorporados dispositivos electromecánicos se utilizarán silenciadores.
- ✓ Las bombas de impulsión se instalarán preferiblemente sumergidas.
- ✓ Se evitarán suspensiones complementarias en general, cuando las bombas se instalen en la cubierta.

1.6.2.2. Comprobación de los niveles de vibraciones generados por las instalaciones de un local. Caso de la Comunidad de Madrid.

La comprobación de los niveles de vibraciones generados por la actividad deberá realizarse midiendo éstos en el interior de los locales acústicamente colindantes [49].

Los límites admisibles por la Ordenanza son [50]:

Límites admisibles de vibración en locales de la Comunidad de Madrid

<i>Uso del Edificio</i>	<i>Índice de vibración L_{aw}</i>
Hospitalario	72
Educativo o cultural	72
Residencial	75
Hospedaje	78
Oficinas	84
Comercio y almacenes	90

Tabla 1.6.9. Objetivos de calidad acústica para vibraciones transmitidas a espacios interiores.

La tabla 1.6.9. indica los límites para los casos de emisores nuevos. Cuando las vibraciones sean de tipo estacionario se respetarán los objetivos de calidad cuando ningún valor del índice L_{aw} supere los anteriores. Además cumplirán con los valores según las franjas horarias, indicados en la Norma.

Las medidas de las vibraciones se realizarán conforme a las normas: ISO 2631-1: 1997 e ISO 2631-2: 2003.

1. El método empleado por los servicios municipales para la medición de las vibraciones a los fines de evaluación del índice L_{aw} será el descrito en el RD 1367/2007 de 19 de Octubre.
2. Se medirá el valor eficaz máximo obtenido con un detector de media exponencial de ponderación de tiempo 1s durante la medición. Este valor corresponderá con el parámetro aw , según se recoge en la Norma ISO 2631-1: 1997.

Para los procesos de medición in situ empleados en la evaluación del índice de vibración es preciso identificar los posibles focos de vibración, las direcciones dominantes y sus características temporales.

Las mediciones se realizarán sobre el suelo en el lugar y momento de mayor actividad y en la dirección dominante de la vibración en el caso de que ésta exista y sea identificable. Si la dirección no es identificable, se medirá en tres direcciones ortogonales simultáneamente, obteniendo el valor eficaz $a_{w,i}$ de cada una de ellas y el índice de evaluación como suma cuadrática, mediante:

$$a_w(t) = \sqrt{a_{w,x}^2(t) + a_{w,y}^2(t) + a_{w,z}^2(t)} \quad (99)$$

Para la medición de vibraciones generadas por actividades, se distinguirá entre vibraciones de tipo estacionario (midiendo en al menos en un minuto el periodo de tiempo en que se establezca el régimen de funcionamiento más desfavorable), o transitorio (teniendo en cuenta los escenarios diferentes que puedan modificar la percepción de la vibración).

En la medición de las vibraciones generadas por las infraestructuras igualmente se distinguirá entre los dos casos anteriores, considerando las vías de circulación a tal efecto, como estacionarias.

Especial caso cobran los episodios reiterativos, en los cuales se realizarán las mediciones al menos tres veces dando como resultado el valor más elevado de los que se obtengan, o en caso de que esto no fuera posible se debe realizar la media de los valores obtenidos más una desviación típica. Por otro lado se debe corregir la vibración de fondo (ruido), realizando las mediciones siempre durante un periodo de tiempo significativo en función del tipo de fuente vibrante.

1.6.2.3. Efectos de las vibraciones inducidas por la maquinaria.

Los efectos de las vibraciones producidas por la maquinaria pueden ser de una amplia variedad. La distinción básica se encuentra en sobre quien recaen esos efectos:

1. Efectos sobre las estructuras:

- ✓ Aparición de fisuras, daños en los acabados, pérdida de piezas...etc.
- ✓ Problemas de fatiga en vigas con el consiguiente daño que podrá causar el colapso.
- ✓ Pérdida de la capacidad portante (en el caso de las sobretensiones).

2. Efectos sobre las personas, la intensidad puede variar desde apenas apreciable hasta muy molesta o peligrosa para la salud. Esto puede ocurrir de tres formas diferentes:

- ✓ Efectos mecánicos (ej. Vibración del suelo o falso techo).
- ✓ Efectos acústicos (ej. Ruido generado por los equipos transmitido por la estructura).
- ✓ Efectos ópticos (ej. Movimiento visible de los elementos).

3. Efectos sobre la maquinaria e instalaciones:

- ✓ Problemas de comportamiento de la maquina en sí misma.
- ✓ Problemas en el resultado producido.

Estos efectos pueden dificultar a su vez la inteligibilidad de la información oral transmitida. Además [51], estudios demuestran que para bajas frecuencias de 3 – 6 Hz la parte más afectada es el abdomen, entre 20 - 30 Hz el problema es mayor en hombros y cuello, entre 60 – 90 Hz la parte más afectada es el globo ocular y la resonancia se hace más importante en mandíbula inferior y cráneo entre los 100 y 200 Hz.

1.6.2.4. Descripción de las fuentes sonoras debidas a las instalaciones.

Al evaluar las fuentes de vibración y focos de emisión de sonido es importante clasificar la procedencia de los mismos y distinguir si son propias o ajenas [52]:

1. Aparatos domésticos, generan sonidos aéreos y de impacto, estos últimos cuando dan lugar a vibraciones y desplazamientos no controlados. Los niveles sonoros son del orden de 70 dB y en el espectro de emisión dominan la frecuencias bajas y medias:
 - ✓ Lavavajillas: Pueden generar niveles de entre 40 y 50 dB.
 - ✓ Lavadoras: Pueden generar niveles de sonido en el llenado de hasta 65 dB, y en el centrifugado de hasta 85 dB. Cobran gran importancia los procesos de carga y descarga.
 - ✓ Aspiradoras: Pueden generar hasta 80 dB en el local en estudio.
 - ✓ Extractores: En las cocinas (domésticas) generan niveles de 55 a 75 dB.
 - ✓ Frigoríficos: Son poco ruidosos, con niveles de 40 a 55 dB.
2. Instalaciones de Fontanería, son una fuente importante de ruidos ya que este se transmite a su vez a lo largo de toda la estructura y son difíciles de controlar debido a que su canalización discurre por muchos sitios. Son más potentes cuando el agua circula en régimen turbulento.
 - ✓ Aparatos sanitarios: Dependen de la calidad de los mecanismos y de la correcta unión a la red, en uso o desagüe, pueden generar niveles entre 35 y 65 dB.
 - ✓ Grupos de presión: Puede generar niveles entre 35 y 85 dB.
 - ✓ Canalizaciones: Según su turbulencia, sujeción, golpes de ariete...etc. Pueden emitir niveles sonoros de entre 35 y 45 dB.
 - ✓ Grifos: En función de las turbulencias y de los fenómenos de cavitación, pueden generar niveles de entre 65 y 85 dB.
 - ✓ Instalaciones de desagüe: Para el caso de sifonamientos niveles de entre 65 y 70 dB.

En el paso de estas tuberías a través de los elementos constructivos se utilizarán sistemas antivibratorios (ej. Manguitos elásticos). Cuando la instalación de evacuación de los cuartos húmedos discurra descolgada del forjado debe instalarse un techo acústico registrable.

Las bañeras deben llevar elementos elásticos entre ellas y el suelo inferior más allá de las tradicionales camas de arena o de las bancadas realizadas con cascotes de obra. Además, los radiadores no se deben apoyar al suelo y fijar a la pared simultáneamente para mantener al menos dos grados de libertad.

3. Instalaciones eléctricas, en general emiten de una forma continua frecuencias discretas que son amplificadas por objetos de montaje y de mantenimiento.
 - ✓ Centros de transformación: Deben controlarse si se encuentran dentro de los edificios, ya que generan niveles de entre 50 y 70 dB.
 - ✓ Aparellaje eléctrico: Las reactancias o los relés pueden originar niveles de entre 60 y 75 dB, debiendo montarse sobre soportes elásticos y llevar un recubrimiento absorbente.
4. Instalaciones de eliminación de residuos, son fuentes de ruido aéreo y estructural de tipo intermitente, deben colocarse los más independientes del edificio, anclándose con bridas de forma que la frecuencia de resonancia no supere los 30 dB y con un suelo flotante al final. Si tienen un grado de libertad esta frecuencia de resonancia de los sistemas antivibraciones se calcula mediante:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k'}{m}} \quad [Hz] \quad (100)$$

donde k' es la rigidez dinámica de los sistemas en suspensión (MN/m^3), y m es la masa por unidad de superficie del elemento estudiado (Kg/m^2).

5. Ascensores y montacargas: En el cuarto de maquinas pueden generarse niveles sonoros de hasta 80 dB en los arranques y paradas y de 60 a 70 dB en marcha normal. Las guías pueden transmitir impactos colindantes de 30 dB. Deberán de estar desolidarizados con el resto de la estructura y tener topes elásticos en las puertas de acceso en las distintas plantas.
6. Instalaciones de climatización por aire: Estos sistemas facilitan la transmisión de vibraciones debido a sus conductos, los cuales deben de estar por tanto recubiertos de materiales aislantes. Los conductos más comunes son elaborados a partir de chapa metálica, lana de vidrio de alta densidad o bien compuestos por dos tubos de aluminio y poliéster con aislamiento flexible entre los dos tubos.

- ✓ Plantas de refrigeración: Los compresores y bombas de producción de frío, pueden llegar a dar niveles de 80 dB.
- ✓ Ventiladores y conductos: Los ventiladores centrífugos generan niveles de hasta 110 dB y los axiales de 90 dB.

En general se utilizarán rejillas y difusores térmicos. El nivel de potencia acústica máximo generado por el paso del aire acondicionado viene dado por:

$$L_w \leq L_{Aeq,T} + 10 \log V - 10 \log T - 14 \text{ [dB]} \quad (101)$$

donde $L_{Aeq,T}$ es el nivel sonoro continuo equivalente estandarizado, T es el tiempo de reverberación en segundos y V es el volumen del recinto en m^3 .

7. Ventilación: Producidas debido a la transmisión a través de los conductos, por una separación acústica incorrecta y un mal aislamiento.
 8. Instalaciones térmicas de agua, estos ruidos de duraciones variables son ricos en los espectros de bajas frecuencias.
- ✓ Grupos térmicos: Las calderas y quemadores pueden producir niveles de entre 70 y 80 dB. Deben anclarse mediante soportes amortiguadores.
 - ✓ Bombas de calefacción y canalizaciones: Pueden generar niveles de 30 a 50 dB.

1.6.2.5. Estudios de actuación frente a las vibraciones en salas de instalaciones.

Estas actuaciones se encuentran diferenciadas entre aquellas que se centran en actuar sobre el recinto que alberga la instalación en cuestión y en impedir la transmisión a través de los cerramientos del edificio, y aquellos que centran el problema en la máquina como foco de actuación.

Dentro de los cerramientos del edificio

En general se trata de actuaciones encaminadas a conseguir un “paralelepípedo independiente” que minimice la transmisión de ruidos y vibraciones al edificio.

1. Incremento del aislamiento acústico y del la absorción del techo.

Los investigadores F. J. Rodríguez y C. Díaz Sanchidrián proponen las siguientes medidas como las más efectivas [53]:

- ✓ Aplicación de un enfoscado generoso nunca menor de 15 mm de espesor.
 - ✓ Instalación de un techo acústico, que consta de:
 - Amortiguador para la fijación elástica del techo acústico al forjado.
 - Perfilería metálica.
 - Panel de material absorbente (ej. Lana mineral $e \approx 6/10\text{cm}$)
 - Doble placa de yeso laminado 15+15 mm, con lámina plástica entre ellas.
 - ✓ Tratamiento absorbente (a base de lana mineral) a cara vista para evitar el sonido reflejado, muy empleado en salones de actos o habitaciones de hotel.
2. Incremento del aislamiento y absorción de los tabiques.

Fig. 1.6.5. Techo acústico

Las consideraciones en este apartado son similares a las del techo anterior pero ubicando los aislamientos y las perfilierías en posición vertical. Se puede jugar con la geometría de la pared para favorecer la atenuación de las ondas acústicas de forma que dificulten el paso de las mismas. Otra medida consiste en añadir un velo acústico exterior con una placa perforada metálica ($e \sim 0.8\text{ mm}$).

3. Instalación de un suelo flotante o antivibraciones.

Una de las soluciones propuestas por los investigadores antes mencionados es la de implementar una sistema de losa flotante. Aplicado a instalaciones, consiste en la construcción de una losa de hormigón armado de unos 10 o 12 cm de espesor apoyada sobre un sistema de amortiguamiento mixto que combine lana mineral o fibra de vidrio de alta densidad, con soportes puntuales elásticos metálicos, separados de la losa por medio de una lámina de polietileno reticulado de 5 mm.

En ellas la lana de roca y el polietileno han de evitar el contacto directo de la losa con los tabiques para impedir la transmisión de vibraciones estructurales a través de las paredes colindantes.

La figura 1.6.6 muestra el estudio realizado por el ingeniero P. Flores

Fig. 1.6.6. Losa flotante y apoyos discontinuos.

Pereita, en el cual se muestra como la aplicación de losas flotantes en salas de instalaciones mejoran la acústica [54].

Fig. 1.6.7. Reducción del nivel de ruido de impacto en salas de instalaciones mediante losa flotante. INASEL.

Actuaciones en las instalaciones y en la misma maquinaria

En estos casos se actúa directamente sobre el foco emisor de la instalación para reducir el nivel de transmisión de vibraciones.

1. Aplicación de amortiguadores que impidan una conexión rígida entre los equipos vibratorios y la estructura de soporte.

Los elementos antivibratorios son objetos elásticos que unen la máquina (o el zócalo sobre el que ésta se apoya) a la pared de soporte, de esta forma, se permite el movimiento en la dirección que recoge los esfuerzos y se regresa a la posición de equilibrio cuando la máquina se encuentra en reposo [55]. Casi siempre, los elementos elásticos se complementan con ayuda de amortiguadores que atenúan la amplitud de las oscilaciones accidentales.

Los resortes de metálicos son un caso particular del anterior ya que aúnan en un mismo elemento la componente amortiguadora y la componente elástica. La

transmisibilidad por su parte es la relación existente entre el esfuerzo que se transfiere a la estructura y el esfuerzo de excitación que la genera.

La figura 1.6.8 refleja que:

- ✓ Para $f_e/f_p < 2$ y en particular cuando la frecuencia propia de la suspensión es mayor que la frecuencia excitadora, no hay atenuación sino amplificación de las vibraciones, lo que significa que la interposición de soportes elásticos, en este caso mal adaptados, ha empeorado el problema en vez de resolverlo.
- ✓ Para $f_e/f_p > 2$ hay una atenuación de las vibraciones, lo que refleja el interés que tiene la utilización de una suspensión de frecuencia propia f_p lo más baja posible respecto de la frecuencia de excitación f_e , ya que la atenuación obtenida es mejor a medida que la diferencia entre ambas es mayor.

Fig. 1.6.8. Esquema de la transmisión de vibraciones debidas la maquinaria

Aun así, con independencia de la reducción de la fuerza transmitida, las suspensiones bien diseñadas presentan la ventaja de reducir algunos de los esfuerzos que se desarrollan en el propio seno de las máquinas.

No obstante las fuerzas desarrolladas por las máquinas pueden tener direcciones varias, es por ello que deben diseñarse suspensiones que sean eficaces en todos los sentidos [56].

En la figura 1.6.9 se muestra una solución del Ayuntamiento de Valencia para el anclaje de máquinas de peso medio sobre la estructura de apoyo.

Para máquinas más pesadas es preferible la ubicación de las mismas sobre bancadas de inercia que las aíslen del suelo amortiguando sus movimientos, hace eco de esta buena solución el artículo publicado por R. Torres del Castillo, que nos ofrece los siguientes datos y soluciones mostrados en la figura 1.6.10.

Fig. 1.6.9. Anclaje antivibración

Fig. 1.6.10. Reducción del nivel de presión acústica mediante bancadas.

Fig. 1.6.11. Ejemplo de soporte mediante bancada de inercia de hormigón.

2. Colocación de juntas elásticas (expansivas) de unión entre la maquinaria y las diversas conducciones que salen de ella.
3. En las aberturas hacia el exterior se han de instalar silenciadores.
4. Cuando las conducciones atraviesen paramentos han de estar forradas con material elástico y se ha de realizar un macizado correcto de las roturas.

Fig. 1.6.12. Bancadas reales para sales de

Otras actuaciones

Reforzar los techos acústicos aislantes mediante una suspensión aislante de las

Fig. 1.6.13. Amortiguadores y antivibraciones.

tuberías, pero nunca agujereando el techo ya que de esta forma actuaría como puente acústico.

También se puede recurrir a la ejecución de estructuras de perfiles huecos suspendida mediante amortiguadores baja frecuencia para soportar las maquinas de climatización y desolidarizarla de la estructura de apoyo.

1.6.3. Estudios sobre impactos en las estructuras.

Para comprender el comportamiento de un forjado frente al ruido de impacto, se debe comenzar estudiando que sucede cuando se deja caer un objeto sobre el suelo de una habitación [57]. Supongamos que dejamos caer un objeto de masa m desde una altura h conocida, de forma que produzca una fuerza de percusión al impactar sobre la superficie horizontal. Si a su vez esta caída se produce rítmicamente con un periodo T (o lo que es igual, una frecuencia $f = 1/T$) entonces, obtenemos una excitación similar a la de las pisadas, que ponen en vibración a la losa estructural que separa dos estancias, con una fuerza F_n determinada por Fourier, y definida como:

$$F_n = \frac{2m}{T} \cdot \sqrt{2gh} \text{ [N]} \quad (102)$$

donde g es la aceleración de la gravedad. Cualquiera que sea el valor de la fuerza del impacto transmitida al forjado, se producirá una deformación del material en el área que ocupa el cuerpo que cae desplazándolo de su posición de equilibrio, hasta que las fuerzas elásticas de recuperación del forjado retornen a su posición inicial, arrastrando en su movimiento de vaivén a las partículas del material de las áreas contiguas, así, lo único que en realidad se transmite en el elemento estructural es la deformación inicial producida por el impacto.

La onda de vibración originada se propaga con una velocidad longitudinal que depende de la naturaleza del material que compone el forjado, es decir, de la densidad del material ρ y del módulo de elasticidad dinámico E :

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [\text{Para el caso del hormigón } \approx 3000 \text{ m/s}] \quad (103)$$

En general, cuanto mayor sea el módulo de elasticidad a igualdad de densidad del material, obtendremos una mayor velocidad de propagación del sonido en el material. Así, el impacto sobre un forjado produce:

- Una deformación que se manifiesta en forma de flexión, que desplaza al material colindante.
- Todo forjado que se ponen en vibración se comporta a su vez como una fuente de generación de ruidos aéreos.
- Las partículas del material solicitadas a moverse, lo hacen sólo en una cantidad infinitesimal alrededor de su posición de equilibrio, a causa de las fuerzas elásticas restauradoras.
- La única energía que progresa, es la causada por la perturbación del impacto, que se manifiesta como una vibración en la losa, trasladándose a una velocidad particular para cada material.
- La vibración del forjado se transmite al espacio receptor subyacente, poniendo en movimiento las partículas de aire que posteriormente trasladarán la perturbación a través del espacio aéreo receptor, creando un ruido aéreo inducido.
- La energía comunicada por el impacto es más difícil de atenuar que la correspondiente al ruido aéreo al ser más potente.

Fig. 1.6.14. Forma de propagación de la vibración.

Además, como ya se ha indicado al describir el comportamiento frente al ruido de los edificios, los impactos producidos sobre los forjados de viviendas tienen el inconveniente de que pueden transportarse por vías secundarias, a través de los elementos constructivos solidarios con el foco emisor [58].

No obstante, y como puede verse en la figura 1.6.14, parte de las ondas de vibración que se propagan a través del material cuando llegan a la parte inferior del forjado son reflejadas y reenviadas a la cara superior, siendo tan solo una fracción de la energía inicial la que se transmite al recinto inferior.

Definimos el nivel de ruido de impactos normalizado L_n , como aquel que es producido por una máquina de impactos sobre un forjado, dicha máquina ya descrita en la normativa consta de cinco martillos que golpean de forma periódica e ininterrumpida la superficie del elemento a evaluar. Su valor, expresado en decibelios, se halla a partir del nivel medio de la presión acústica medida en el local subyacente L_i , y las unidades de absorción del recinto, o área equivalente A , mediante la expresión:

$$L_n = L_i + 10 \cdot \log\left(\frac{A}{A_0}\right) [dB] \quad (104)$$

donde A_0 es un área de absorción equivalente de referencia que vale 10 m^2 , A es el área de absorción equivalente, que se calcula a través de tiempo de reverberación t en segundos, y el volumen V en m^3 del local subyacente receptor del ruido mediante la ecuación de Sabine:

$$A = 0,163 \frac{V}{t} [m^2] \quad (105)$$

Existe a su vez, un tiempo de reverberación asociado a la absorción de referencia mediante la ecuación $A = 0,163(V/t_0)$, así resulta que el nivel de ruido normalizado, escrito de forma estandarizada, es:

$$L_{nt} = L_i - 10 \cdot \log\left(\frac{t}{t_0}\right) [dB] \quad (106)$$

donde $t_0 = 5s$ es un valor de referencia que se obtiene frecuentemente en instalaciones.

Los doctores I. L. Vér y Heckl – Rathe descubrieron de manera independiente que el aislamiento acústico normalizado R , medido en dB y el nivel de ruido de impacto normalizado L_n , obedecen la siguiente expresión:

$$R + L_n = 43 + 30 \log f [dB] \quad (107)$$

donde f es la frecuencia en hercios en bandas de octava. Esta ecuación solo es válida para forjados de hormigón armado. En el caso de losas de hormigón, el nivel de ruido de impactos normalizado puede calcularse según la densidad del material empleando alguna de las siguientes ecuaciones:

- Para hormigones densos ($\rho \approx 2300 \text{ Kg/m}^3$):

$$L_n = 32,5 - 30 \log h + 10 \log (\sigma_{rad}/\eta) \text{ [dB]} \quad (108)$$

- Para hormigones de baja densidad ($\rho \approx 600 \text{ Kg/m}^3$):

$$L_n = 47 - 30 \log h + 10 \log (\sigma_{rad}/\eta) \text{ [dB]} \quad (109)$$

donde h es el espesor del forjado en metros, σ_{rad} es el factor de radiación del sonido para frecuencias superiores a la crítica del forjado su valor es la unidad, y η es el factor de amortiguamiento.

Estas ecuaciones solo son empleables cuando no es posible realizar los ensayos normalizados, en general para forjados de 20 – 25 cm el nivel de L_n es de 80 dB.

En general, cuando no se obtiene el aislamiento acústico recomendado por la normativa es preferible utilizar soluciones complementarias, menos costosas y más eficientes que aumentar el espesor del forjado por encima de las necesidades estructurales, esto es debido a que la escala acústica es logarítmica y, a un aumento considerable del espesor le corresponde una disminución poco significativa del aislamiento acústico.

Recubrimiento elástico flexible

Se trata de colocar una capa elástica y flexible sobre la superficie del sueño [59], de tal forma que produzca un cambio en la forma del pulso de la fuerza de impacto, consiguiendo de esta manera una reducción de la potencia mecánica comunicada a la losa, que depende de la rigidez mecánica del material y viene dada por:

$$s = \frac{E \cdot A_h}{h} \quad (110)$$

donde A_h es el área de impacto en m^2 , h es el espesor de la capa resiliente no comprimida en m y E es el módulo de elasticidad dinámico. A causa del efecto muelle de la capa elástica, se produce la aparición de una frecuencia de resonancia f_0 , dada por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{A_h}{m}} \cdot \sqrt{\frac{E}{h}} \quad (111)$$

La reducción del nivel de impacto ΔL_n debido a la capa resiliente es:
 $\Delta L_n = 40 \log(f/f_0)$

De lo anterior se deduce que para que sea efectiva la medida tomada, la relación entre las frecuencias debe de ser mayor que uno, incrementándose así el aislamiento frente al ruido de impacto en una relación de 12 dB por octava.

Según M. S. Auzou, existen cuatro categorías de suelos, valorados de mejor a peor son:

Clasificación de los recubrimientos elásticos para forjados

<i>Categoría 1</i>	<i>Categoría 2</i>
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Caucho sintético sobre espuma. ✓ Moqueta con arpillera. ✓ Moqueta sola. ✓ Moqueta fibrosa con o sin arpillera. ✓ Revestimiento plástico sobre PEX. ✓ Pelo de vaca sobre arpillera. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Plásticos sobre fieltro. ✓ Fibras vegetales trenzadas. ✓ Losa flotante lisa. ✓ Plástico ligeramente expandido sobre yute. ✓ Aglomerado de corcho y látex.
<i>Categoría 3</i>	<i>Categoría 4</i>
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Plástico sobre yute. ✓ Plástico sobre fieltro. ✓ Baldosas de gres y parquet sobre aglomerado de corcho y látex 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Baldosas plásticas o de gres ✓ Linóleos ✓ Parquet encolado. ✓ Láminas de plásticos. ✓ Arpilleras

En esta clasificación, los materiales de categoría 4 apenas producen mejoras significativas sobre los niveles de aislamiento acústico [60].

Método de la losa flotante

Consiste en construir una losa separada del suelo del forjado, por la interposición de una capa resiliente que las desolidariza [61]. Por lo general, el material que forma la losa rígida, flotante sobre material elástico, es la capa de mortero junto con la baldosa, parquet u otro material de recubrimiento.

La flotabilidad se puede conseguir:

1. Interponiendo una lámina homogénea elástica debajo de la losa rígida.
2. Colocando elementos elásticos individuales repartidos por todo el área de la losa regularmente.

Fig. 1.6.15. Losa flotante sobre lámina homogénea
Daniel Ferrández Vega

Fig. 1.6.16. Losa flotante sobre soportes elásticos

Para calcular el aislamiento frente al ruido de impacto obtenido por la solución 1, la frecuencia de resonancia f_0 , que depende de la rigidez dinámica del material elástico por unidad de área s' y la masa unitaria m de la losa flotante, es:

$$f_0 = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{s'}{m}} \rightarrow s' = \frac{E}{d_0 \cdot (1 - \delta)} \quad (112)$$

donde E es el módulo de elasticidad dinámico, d_0 es el espesor en m del material elástico sin comprimir y δ es la deflexión producida a causa del peso de la losa.

La expresión anterior, también puede escribirse de la siguiente forma:

$$f_0 = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot E}{P_n \cdot d_0 (1 - \delta)}} \quad \text{donde la compresión de la losa } P_n = \frac{F}{S} = m \cdot g \quad (113)$$

Debido a la gran deformabilidad de los materiales colocados como atenuadores es necesario armar la losa para dotarla de una rigidez suficiente a flexión, además, se debe de colocar entre el material resilente y la losa una lámina de madera o plástico para evitar puentes acústicos.

En la segunda vía de solución, mediante colocación de soportes elásticos entre la losa y la estructura, se deben rellenar los espacios vacíos entre soportes con material poroso de cierta resistencia al paso del flujo de aire [62]. Además, se debe de cuidar de hacer sobresalir por los bordes de la losa el material resilente, de modo que ésta no toque en ningún punto la pared.

Otros ensayos [63], demuestran que cuando en elemento de separación horizontal entre los recintos hay una capa intermedia de arena, el aislamiento acústico es mejor que el que se obtendría con otros sistemas constructivos de igual masa por unidad de superficie, con el suelo unido rígidamente al forjado.

Otro foco de vibraciones en las estructuras son los campanarios, en estos, el movimiento de las campanas tiene lugar a frecuencias bajas y causa vibraciones de flexión y torsión en la torre.

Es necesario evitar la resonancia con los componentes armónicos de las fuerzas inducidas por las campanas, especialmente con el tercer armónico, ya que esta resonancia puede producir movimientos de la torre que se perciban como excesivos. No

obstante, este movimiento depende en gran medida de la sustentación en la base, ya que serán más acusados cuando la cimentación sea rígida.

Pero no todos los estudios realizados sobre la efectividad de la losa flotante se han hecho in situ. También, existen análisis numéricos que indican la transmisión del sonido de baja frecuencia a través de impacto en sistemas de losas flotantes elaboradas en obra [64]. En estos estudios, se analiza a su vez la relación existente entre la frecuencia de resonancia del forjado y la composición del mismo, indicando cuales son los espesores óptimos para atenuar el ruido según la disposición constructiva que se plantee

1.6.4. Estudios experimentales en hormigón y mortero mediante vibraciones.

El uso de las vibraciones también ha sido empleado para determinar algunas propiedades de los materiales. Este es el caso por ejemplo del módulo de Young dinámico (MOE) [65]. Para ello, se inducían pequeñas perturbaciones mecánicas en probetas de mortero de cal y cemento, y se correlacionaban los resultados con las correspondientes medidas realizadas con otras técnicas como ultrasonidos o los ensayos a flexión convencionales.

Este ensayo guarda cierta relación con el trabajo realizado en esta tesis ya que, el modo en que se recogía la frecuencia fundamental de resonancia mediante el golpeo de la probeta y su análisis posterior mediante software capaz de realizar transformada rápida de Fourier es similar a nuestro trabajo. El equipo empleado y los resultados obtenidos se muestran en la figura 1.6.20, y consta de un martillo percutor, soportes de poliestireno, sistema de captación de señal y el acondicionador/amplificador de señal.

(a)

(b)

Fig. 1.6.20. Ensayo para determinar el MOE. (a) Equipo de medida empleado; (b) Resultados obtenidos tras el ensayo.

A partir de la frecuencia fundamental de resonancia, se obtiene el MOE_{Long} :

$$v = 2 \cdot L \cdot f \Rightarrow \text{MOE}_{\text{Long}} = \rho \cdot v^2 \quad (114)$$

donde v es la velocidad de la pulsación en m/s, f es la frecuencia fundamental de resonancia en HZ, y ρ es la densidad de la probeta en Kg/m³.

El ensayo a ultrasonidos se realizó con ayuda del equipo C368 de Matest, con palpadores de contacto receptor – transistor de 55 kHz, en sentido longitudinal. El otro ensayo fue el de flexión pura con ayuda de galgas extensiométricas. La relación de los resultados de dicho método se muestra en la gráfica 1.6.20 (b).

Con ensayos como el anterior se respalda la hipótesis de que si los resultados son coherentes es posible combinar métodos para alcanzar el mismo objetivo. Otros ensayos, son de aplicación más directa y no necesitan un tratamiento tan meticuloso de los resultados. Este es el caso de aquellos que relacionan alguna de las propiedades del hormigón con la energía de impacto introducida en el sistema [66-67].

Algunos ensayos encontraron la existencia de una relación entre la tenacidad a flexión y la energía de impacto introducida en hormigones reforzados con fibras de acero [68]. La buena correlación existente se puede ver en la figura 1.6.21, en la cual se produce un aumento de ambas propiedades según se va añadiendo mayor cantidad de fibra a la mezcla.

Fig. 1.6.21. Relación entre la energía de impacto y la tenacidad en hormigones reforzados con fibras de acero.

En ocasiones, la forma de introducir la energía de impacto al hormigón no es siempre a pequeña escala. Este es el caso por ejemplo, de los ensayos de balística, en los cuales se pretenden estudiar hormigones de una resistencia elevada y con fines militares frente al posible impacto de proyectiles [69]. Estos experimentos, han demostrado que hormigones reforzados con fibras de acero, son más reacios a la perforación que los hormigones convencionales o reforzados con otras fibras.

Pero no todos los hormigones reforzados frente a impacto lo son siempre con fibra de acero. Si lo que se desea no es mejorar las características mecánicas sino un mejor comportamiento acústico frente a ruido de impacto las adiciones son diferentes. Este es el caso por ejemplo, de las fibras de etileno vinilo acetato (EVA) [70], que ha sido estudiado por algunos autores llegando a la conclusión de que incorporación de este material en la masa del hormigón reduce el nivel de ruido de impacto hasta en 15 dB. Existen otros muchos estudios añadiendo otras fibras como las de coco o plásticas recicladas [71-72].

Volviendo a los hormigones convencionales sin fibras, la antigua Norma Americana ASTM C215 – 60 [73], para determinar la durabilidad del hormigón tras sufrir ciclos de hielo/deshielo comparaba las frecuencias fundamentales de las probetas de hormigón mediante un ensayo ruidoso, tardío y algo impreciso. Este método, fue mejorado años atrás, por algunos autores [74], mediante el análisis de las frecuencias fundamentales en el hormigón por simple golpeo con ayuda de la Transformada Rápida de Fourier para analizar los resultados.

En la Norma ASTM C215 – 60, una viga de hormigón se apoyaba sobre sus puntos nodales de modo que pudiera vibrar transversalmente sin ninguna restricción. Para ello se excitaba la probeta por el centro de una de sus caras verticales, mediante un dispositivo formado por un altavoz de audio al cual se le había incorporado una punta cónica de acero pegada al diafragma del altavoz. Las vibraciones de las probetas se recogían mediante una aguja fonocaptadora apoyada sobre la cara superior y cercana a uno de sus extremos. El dispositivo se excitaba en la banda de 500 a 2500 Hz, mediante un oscilador y un amplificador sintonizado a estas frecuencias hasta que las vibraciones alcanzaban su máximo a la frecuencia natural de resonancia de la probeta. Las distintas frecuencias, longitudinales, transversales y torsionales se obtienen situando en las posiciones adecuadas el excitador y el captador.

En el ensayo propuesto por estos autores, la amplitud y frecuencias de las vibraciones de resonancia se obtienen mediante un analizador de espectros que determina las frecuencias de la respuesta del hormigón a los golpes por medio de la transformada rápida de Fourier. La amplitud de la respuesta en función de la frecuencia se puede poner de manifiesto en la pantalla de un TRC, donde los picos mayores pueden leerse directamente.

Las distinciones entre frecuencias fundamentales y armónicas pueden hacerse, generalmente, comparando las alturas de los picos en los diversos modos de excitación. Para ello emplearon un kit piezotrónico que estaba constituido por un acelerómetro que sustituye a la aguja fonocaptora, un martillo instrumentado que actúa como disparador para el comienzo de la adquisición de datos, y dos pequeños amplificadores.

La ecuación que modelizaba el ensayo es:

$$P_c = \frac{N_c^2}{N_i^2} \times 100 \quad (115)$$

donde P_c es el módulo de elasticidad dinámico, N_i es la frecuencia fundamental de resonancia transversal y N_c es la frecuencia fundamental de resonancia transversal final. El ensayo propuesto por la norma americana y el alternativo realizado por los autores son los que recoge la figura 1.6.22.

Fig. 1.6.22. Equipo para medir la frecuencia de resonancia. (a) Ensayo propuesto por la ASTM – 215; (b) Equipo de medida alternativo.

Pero no todos los métodos que emplean energía de impacto se basan en las frecuencias fundamentales del material, este es el caso, por ejemplo, de los métodos esclerométricos, que determinan la dureza superficial del hormigón, gracias a la interpretación de la energía residual que se produce tras un impacto en su superficie,

este método no apropiado para hormigones carbonatados, viene descrito en la norma UNE – EN 12504 – 2: 2002.

El hormigón es un material con múltiples fases que endurece con la hidratación del cemento. De entre los ensayos no destructivos destaca el ensayo de ultrasonidos, que se basa en la velocidad de transmisión de ondas a través del hormigón y que posteriormente se relacionan con el módulo de elasticidad u otras propiedades [75].

El problema radica en que cuando se trata de aplicar alguno de los métodos anteriores el hormigón debe estar desencofrado, y por tanto, no se pueden obtener resultados del progreso del módulo de elasticidad desde edades tempranas. De otra parte, los métodos de ultrasonidos son muy sensibles a las perturbaciones externas que pueden provocar ondas parasitarias que distorsionen las medidas reales. Es por ello, que algunos investigadores [76], han tratado de establecer nuevos métodos para determinar el módulo de elasticidad desde el desencofrado del hormigón. Para ello, consideraban al material como un fluido viscoso en sus primeras etapas, de manera que tras la emisión de las primeras vibraciones lo que se obtenía era la frecuencia de resonancia del encofrado que albergaba el hormigón, y conforme este se iba endureciendo la frecuencia variaba y se podía establecer una correlación con el módulo de elasticidad correspondiente como se puede ver en la figura 1.6.23.

Fig. 1.6.23. Evolución del módulo de elasticidad del hormigón en los primeros 28 días y su frecuencia de resonancia.

Desde el punto de vista de la seguridad también encontramos aplicaciones en los ensayos de transmisión de vibraciones. Este es el caso de los estudios acerca de la degradación las estructuras de hormigón tras soportar un incendio [77]. Algunos autores, lograron determinar la relación existente entre el daño sufrido en la estructura, estudiando la modificación producida en la frecuencia natural de resonancia del material tras el incendio como se puede ver en la figura 1.6.24.

Fig. 1.6.24. Variación de la frecuencia de resonancia con la temperatura. (a) 20⁰ C; (b) 400⁰ C

1.6.5. El fenómeno de la resonancia mecánica en las estructuras.

La resonancia mecánica es un fenómeno particular en el que la fuerza constante que le aplicamos a nuestro sistema coincide con la pulsación de resonancia, esta es una característica propia de cada sistema oscilante simple. Cuando ambas magnitudes coinciden la amplitud del sistema oscilante alcanza su punto máximo [78].

Para poder ver algunos ejemplos de la resonancia, desarrollaremos previamente el análisis de un sistema sencillo como es el de una masa m ligada a un resorte de constante elástica k .

$$\left. \begin{array}{l} 2^{\text{a}} \text{ Ley de Newton: } m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = -ky \\ M.A.S \rightarrow y(t) = A \cdot \cos(\omega_0 t) \end{array} \right\} \Rightarrow \text{Frecuencia Angular: } \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (116)$$

Como se aprecia (Figura 1.6.25), este sistema tiene una sola frecuencia que adopta de manera espontanea en cuanto se le deja oscilar libremente, por ellos se la denomina frecuencia natural del sistema.

Fig. 1.6.25.
Oscilador
forzado.

El siguiente caso, lo constituye un oscilador forzado, en el cual se aplica sobre la masa otra fuerza más, la cual tendrá un carácter periódico con una amplitud F , una frecuencia angular ω y actuando en la dirección del eje del resorte. (Ver imagen)

Si la fuerza externa periódica tiene la forma $F = F \cdot \cos(\omega t)$, entonces:

$$\left. \begin{array}{l} 2^{\text{a}} \text{ Ley de Newton: } m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = -ky + F \cdot \cos(\omega t) \\ M.A.S \rightarrow y(t) = A \cdot \cos(\omega t) \end{array} \right\} \quad (117)$$

Resolviendo el sistema con ω la frecuencia angular externa, tenemos que:

$$-mA\omega^2 \cos(\omega t) = -kA \cos(\omega t) + F \cos(\omega t) \Rightarrow A = \frac{F}{m \cdot (\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (118)$$

Se observa que, cuando ω tiende a ω_0 , el valor absoluto de A tiende a infinito, diciéndose entonces, que el sistema ha entrado en un estado de resonancia. En el caso de que ω tenga un valor muy elevado, la amplitud puede ser negativa, para evitarlo se introduce el ángulo de fase α :

$$y = A \cdot \cos(\omega t + \alpha) \Rightarrow \begin{cases} \alpha = 0, & \text{si } \omega < \omega_0 \\ \alpha = \pi, & \text{si } \omega > \omega_0 \end{cases} \quad (119)$$

Teniendo en cuenta la fricción, un modelo más realista que el anterior sería:

$$m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = -ky + F \cdot \cos(\omega t) - b \cdot \frac{dy}{dt} \Rightarrow A = \frac{F/m}{[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (b\omega/m)^2]^{1/2}} \quad (120)$$

donde b es una constante de proporcionalidad.

Así, deducimos que, el fenómeno de la resonancia requiere por tanto:

1. De un sistema elástico que presente frecuencias naturales de vibración.
2. De una fuerza externa periódica que actúe sobre el sistema elástico.
3. De una coincidencia entre ambos tipos de frecuencia.

La elasticidad es la propiedad que tienen los cuerpos de deformarse bajo la acción de fuerzas externas y de recuperar su forma una vez desaparecidas estas fuerzas [79]; dentro de ciertos rangos la deformación para todos los cuerpos es proporcional a la fuerza deformante aplicada. Por tanto, antes de alcanzar su estado de equilibrio los cuerpos realizaran cierto número de oscilaciones; y cada cuerpo, dependiendo de su forma, masa y material de que este hecho, así como de las restricciones a las que se encuentre sometido, oscilará con ciertas frecuencias propias a las cuales se las denomina frecuencias naturales. Las placas descritas en este trabajo presentan frecuencias naturales, si bien todas ellas no tienen por qué ser múltiplos de una frecuencia básica.

Puesto que estamos en un mundo sometido continuamente a fuerzas oscilantes, y además los edificios en que habitamos o en que trabajamos son estructuras elásticas que permanentemente están vibrando tales como las ventanas, puentes, edificios...etc. Es factible que en muchos casos la frecuencia de las fuerzas oscilantes coincida con alguna

de las frecuencias naturales de las estructuras elásticas provocando fenómenos de resonancia.

Algunos ejemplos de resonancia comúnmente conocidos, son por ejemplo: el paso de soldados por un puente que se ven obligados a romper su formación para que el ritmo constante de su paso no entre en resonancia con alguna frecuencia natural del mismo causando su ruina, la vibración de ventanas cuando se escucha música en una habitación cerrada, las vibraciones generadas por el motor de un automóvil transmitidas al resto del vehículo, determinadas maquinarias en la medicina laboral para que estas no encuentren frecuencias de golpeteo coincidentes con las naturales del cuerpo humano o por ejemplo el apareamiento de ciertos insectos basado en las distintas frecuencias de resonancia entre machos y hembras.

Antes de pasar a ejemplos más propios de la edificación, veremos ensayos realizados por diversos autores que han estudiado la resonancia mediante experimentos de laboratorio.

De acuerdo con Feynman [80], el desplazamiento vertical del extremo libre de una viga voladiza a la cual se le aplica una fuerza en dicho extremo será:

$$W = \left(\frac{3YI}{L^3} \right) \cdot Z \quad (121)$$

donde Y es el módulo de Young, I es el momento de inercia de la sección transversal y Z es el desplazamiento del extremo libre.

Esta relación para la fuerza de restauración de una viga nos permite afirmar que una masa acoplada a su extremo desarrollara un M.A.S, luego, si se le aplica una fuerza periódica de frecuencia adecuada entrará en resonancia.

Fig. 1.6.26. Estudios sobre resonancia mecánica. (a) Montaje experimental de la viga estudiada; (b) Esquema eléctrico del sensor empleado.

Ciertos autores [81], fueron capaces de visualizar este fenómeno recurriendo al montaje del dispositivo mostrado en figura 1.6.26. En él se aprecia una viga voladiza metálica que se encarga de golpear la placa, los pulsos de fuerza periódicos se aplicaron con ayuda de un electroimán conectado a un generador de pulsos de fuerza magnética.

Con la ayuda de estos equipos se obtuvieron los resultados que muestra la figura 1.6.27.

Fig. 1.6.27. Resultados obtenidos. (a) Oscilaciones y frecuencia natural de la placa, (b) Crecimiento de la amplitud de la oscilación de la placa.

Como se puede apreciar en la figura 1.6.27 en cada pulso se va llegando a un estado acumulado de energía hasta llegar a la frecuencia de resonancia de la placa.

Otro experimento [82], mostró que colocando cuatro sistemas oscilantes unidos a una misma barra con diferentes longitudes, si se encuentran sometidos a diferentes fuerzas de excitación cada sistema vibra con su propia frecuencia natural y, si ésta frecuencia coincide con la fuerza externa hacía alcanzar al sistema la máxima amplitud, mientras que el resto de los sistemas seguían conservando amplitudes bajas (Figura 1.6.28).

Otro ejemplo de las altas vibraciones y la posibilidad de destruir la estructura entrando en resonancia, fueron el Centro Nyedermeyer y la Pasarela Milenio, las cuales se tuvieron que revisar por este motivo, ante la posibilidad de ruina frente al paso de transeúntes o la acción pronunciada del viento.

Fig. 1.6.28. Resultados obtenidos de los cuatro diferentes sistemas oscilantes estudiados.

Fig. 1.6.29. Colapso de estructuras por efecto de la resonancia mecánica. Puente de Tacoma.

Quizá el caso más conocido dentro del fenómeno de la resonancia sea el de puente de Tacoma (Figura 1.6.29), el cual se destruyó por causa del viento que proporcionó una fuerza constante formando pequeños remolinos debajo del tablero del puente, que provocaron que éste oscilase hasta alcanzar la frecuencia natural de resonancia provocando que los cables colapsasen.

No obstante, si se habla de resonancia no se pueden dejar de lado los estudios realizados por Nikola Tesla [83], ingeniero y físico serbio que fue capaz ya en el siglo pasado de descubrir la frecuencia de resonancia de la tierra (aproximadamente 8 Hz). Estos estudios

Fig. 1.6.30. Proyecto Wardenclyffe para conducción de electricidad sin cables. Nikola Tesla.

fueron recopilados después por Winfried Otto Schumann quién los formuló matemáticamente tal y como los conocemos hoy en día.

Entre las investigaciones más destacadas de Nikola Tesla aprovechando el fenómeno de la resonancia de la tierra, se encuentran aquellas basadas en la experiencia de que la superficie existente entre la corteza de la tierra y la ionosfera puede actuar como guía de onda para conseguir la transmisión de electricidad sin cables, experimento que fue clausurado por el gobierno de los EE.UU hace ya casi un siglo.

1.7. Sensores Capacitivos.

Los sensores capacitivos son aquellos que basan su comportamiento en la variación de un componente eléctrico o electrónico en respuesta a una variación de la capacidad [84]. En este apartado se describe su principio de funcionamiento, así como, los tipos y aplicaciones de este tipo de dispositivos.

Para describir cómo trabajan este tipo de sensores es necesario comprender el funcionamiento de un condensador. Los condensadores son dispositivos eléctricos formados por dos materiales conductores que se hayan separados por un material aislante denominado dieléctrico. Estos elementos se caracterizan por ser capaces de almacenar cargas cuando se les somete a una tensión entre los dos conductores, así, podemos definir la capacidad de un condensador, como la relación que existe entre la cantidad de carga almacenada y la tensión aplicada en el sistema.

$$C = \frac{Q}{V} \quad \begin{array}{l} C = \text{Capacidad [F]} \\ Q = \text{Culombios [C]} \\ V = \text{Tensión [V]} \end{array} \quad (122)$$

Así pues, se puede decir que la capacidad de un condensador es un Faradio, si para una diferencia de potencial de un Voltio entre ambos conductores, la carga transmitida de uno a otro es de un Culombio. Por otro lado, el valor de la capacidad depende de la disposición geométrica de los conductores y de las características del material dieléctrico.

La aplicación de este tipo de dispositivos por tanto es que son capaces de convertir el tipo de energía que queremos medir en energía eléctrica [85]. Esta conversión puede ser a su vez directa, cuando el estímulo recibido se transforma directamente en un impulso eléctrico, o compuesta, si necesita uno o más transductores de energía antes de que el sensor directo realice su función.

Aún así, los sensores necesitan siempre de un sistema que permita su empleo, por lo que estos equipos deben incorporar entre otros: detectores, acondicionadores y procesadores de señal, memorias...etc. El sensor en cuestión se posiciona a la entrada del sistema para recibir los efectos exteriores y mandar señales al resto del equipo, que se encarga de recoger estas variaciones actuando si se producen anomalías, o bien, monitorizando los datos para un empleo posterior. La figura 1.7.1 representa el principio de funcionamiento de un complejo electrónico con diferentes tipos de sensores.

Fig. 1.7.1. Sistema electrónico complejo con distintos tipos de sensores

En la figura 1.7.1 podemos ver que existen distintos tipos de sensores a su vez, los tipo 2, 3 y 4, serían sensores recopiladores de datos posicionados sobre el objeto, a diferencia del sensor 1 que no necesita estar físicamente unido al objeto para detectar la transferencia de energía entre ellos. El sensor 5 en cambio, se encarga de monitorizar las condiciones internas del sistema de adquisición de datos para que no se vea afectado por las perturbaciones externas. Los interfaces se encargan de acondicionar la señal y permiten conectar los sensores al sistema. El multiplexor (MUX) se encarga de conectar los sensores todos a la vez a un convertidor Analógico/Digital si el sensor produce señales analógicas, o conectar directamente con el ordenador si produce señales digitales. El ordenador controla el multiplexor y el A/D convertidor a través de un adecuado cronometraje, también se encarga de mandar señales a un actuador que incide directamente sobre el objeto. El sistema contiene a su vez servicios periféricos (como alarmas, acumuladores de memoria...etc.) que no son incluidos.

Los sensores, pueden ser a su vez: pasivos, si no necesitan ninguna energía adicional para generar una señal eléctrica en respuesta a un estímulo externo (la mayoría de ellos son directos), o bien activos, si requieren de una fuente externa para realizar su operación, ésta es la llamada señal de excitación y es modificada por el sensor para producir la señal de salida. Las medidas de los sensores pueden estar referenciadas a su vez a una escala física absoluta e independiente de las condiciones de medida, o pueden ser relativas. Se emplean para medir desplazamientos lineales y angulares, detectar objetos próximos, medir el grado de humedad, presión, nivel y aceleración...etc.

En general, cuando se trata de sensores capacitivos no les afectan las variaciones suaves de temperaturas (a no ser que el dieléctrico sea agua), siendo muy estables en cualquier entorno y presentando un consumo relativamente bajo.

1.7.1. Sensores de condensador variable.

El primero que estudiaremos dentro de los condensadores de este tipo es el sensor de placas plano – paralelas. Está compuesto de dos láminas conductoras y paralelas, separadas por una distancia que es pequeña comparada con las dimensiones lineales de las láminas. Prácticamente, todo el campo de este condensador está localizado en el espacio comprendido entre las láminas, aunque, hay una pequeña dispersión del campo en los bordes, la cual disminuye a medida que se aproximan las láminas. No obstante, si las láminas están suficientemente próximas la dispersión puede despreciarse, y el campo y las cargas se consideran uniformes. Las placas pueden ser láminas metálicas muy finas, separadas y asiladas por una lámina delgada de plástico, a su vez, estas se pueden enrollar dando lugar a una superficie muy grande concentrada en un espacio pequeño.

Sea A el área de cada placa y d la distancia de separación, que es pequeña comparada con la longitud y anchura de las placas. Situamos una carga $+Q$ en una placa y otra $-Q$ en la otra, estas se atraen entre sí de manera uniforme. Suponiendo además, que estas láminas se encuentran en el vacío, el campo eléctrico que se genera entre ellas viene dado por la ecuación:

$$E = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \sigma = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{A} \quad (123)$$

Empleando la ecuación 123, obtenemos la capacidad de un condensador de este tipo:

$$\begin{cases} E = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{A} \\ V = E \cdot d \end{cases} \Rightarrow C = \frac{Q}{V} \Leftrightarrow C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \quad [F] \quad (124)$$

en la cual $\epsilon_0 = 8,85 \text{ pF/m}$ es la permitividad del vacío. La impedancia Z del condensador es:

$$Z = \frac{1}{\omega C} = \frac{d}{\omega \epsilon A} \quad [\Omega] \quad \begin{matrix} \omega = 2\pi f \\ \epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \end{matrix} \quad (125)$$

siendo ϵ_r la permitividad relativa del medio en que se trabaja y f la frecuencia en hercios.

Fig. 1.7.2. Condensador de placa plano-paralela.

Una variante son los condensadores variables rotatorios [86], cuya capacidad puede modificarse entre ciertos límites y son empleados en los circuitos de sintonía de radio.

Según se mida la impedancia o la admitancia y en función del parámetro que se modifica, los sensores de condensador plano son o no lineales. Si se mide la admitancia (proporcional a la capacidad C) se obtiene:

- Un sensor no lineal si se hace variar la distancia x entre las placas.
- Un sensor lineal si se modifica el área A de las placas.
- Un sensor lineal si se modifica la constante dieléctrica ϵ .

Estos sensores y su capacidad se pueden ver en la Tabla 1.7.1.

Sensores de placas plano - paralelas

<i>Sensor no lineal</i>	<i>Sensor lineal con variación de área</i>	<i>Sensor lineal con variación de constante dieléctrica</i>
<p>Placa Fija</p> <p>Placa Móvil</p> <p>$C_x = \frac{\epsilon A}{x}$</p>	<p>$C_x = \frac{\epsilon}{d} \cdot (A - wx)$</p>	<p>$C_x = \frac{\epsilon_0 w}{d} \cdot (\epsilon_2 l - (\epsilon_2 - \epsilon_1)l)$</p>

Tabla 1.7.1. Tipos de sensores de condensador plano.

También es muy frecuente que existan condensadores con dos o más dieléctricos:

Fig. 1.7.3. Condensador de dos dieléctricos

La ϵ_r del aire, en general, se estima igual a la del vacío. La ϵ_r del agua pura varía con la temperatura y su valor es: $\epsilon_r = 88$ a 0°C y $\epsilon_r = 55,3$ a 100°C . Esta diferencia se puede usar para medir el nivel de agua en un depósito, la humedad o la temperatura ambiente.

Si tenemos un material ferromagnético actuando como dieléctrico y su temperatura es superior a la de Curie, la ϵ_r es proporcional a la inversa de la temperatura T menos la temperatura de Curie T_c como muestra la ecuación (127).

$$\epsilon_r = \frac{k}{T - T_c} \quad (127)$$

En este caso la variación de la temperatura produce un cambio en la capacidad del condensador.

Existen a su vez dos casos particulares especialmente interesantes dentro de los condensadores de placas plano – paralelas dependiendo de su geometría, el condensador cilíndrico y el condensador esférico.

En el primer caso del condensador cilíndrico, supondremos que la longitud del mismo es muy elevada respecto al espesor del condensador, así, el campo es perpendicular al eje de los cilindros y está confinado en la región entre ellos. De esta forma, como se puede ver en la ecuación 7, la capacidad queda definida como:

Fig. 1.74. Condensador

Un cable coaxial puede considerarse un condensador cilíndrico. Esta geometría es especialmente útil para proteger una señal eléctrica contra influencias externas. En construcción tienen su aplicación como sensores para medir el nivel de áridos que hay dentro de una tolva, actuando el árido que va cayendo dentro de la misma como variador del dieléctrico, que en este caso sería el aire.

Por otro lado, el condensador esférico, es aquel formado por dos casquetes conductores concéntricos con forma de esfera y espesores despreciables, cuyos radios a (interior) y b (exterior) se pueden ver en la figura 4. La capacidad de este tipo de condensadores es la que viene dada por la expresión (129).

$$C = 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{(a \cdot b)}{(a + b)} [F] \quad (129)$$

Fig. 1.7.5. Condensador

Cuando cargamos un condensador estamos realizando un trabajo y consumiendo energía. Esta energía no se pierde, sino que se transforma en energía potencial eléctrica. A medida que el condensador se va cargando, el trabajo necesario para introducir una determinada cantidad de carga dq cada vez será superior: $dW = V \cdot dq$.

Puesto que el trabajo realizado es igual a la energía almacenada, ésta energía potencial se puede expresar de la siguiente forma:

$$W = \int dW = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} [J] \rightarrow U = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} \cdot QV = \frac{1}{2} \cdot CV^2 [J] \quad (130)$$

Aunque este resultado es independiente de la geometría del condensador, en la práctica nos encontramos con un límite frente a la energía que puede ser almacenada, debido a que es muy posible que se produzca una descarga eléctrica cuando la tensión alcanza valores muy altos. Por este motivo los condensadores vienen generalmente marcados con el máximo voltaje al que pueden operar.

Además si la diferencia de potencial entre las dos armaduras es muy grande o el espesor del dieléctrico muy pequeño, los electrones pueden saltar de una armadura a la otra a través del dieléctrico, perforándolo y quedando el sensor inutilizado. Este fenómeno se

conoce como rigidez dieléctrica, es decir, la máxima tensión por centímetro de espesor del dieléctrico a que se puede someter una aislante sin que se perfore.

Las moléculas de un dieléctrico se pueden clasificar en polares y no polares. Una molécula se dice no polar si, normalmente, el centro de gravedad de los núcleos positivos coincide con el de los electrones, si por el contrario existe una asimetría decimos que la molécula es polar.

Cuando sometemos una molécula no polar a la influencia de un campo eléctrico sus cargas pueden llegar a desplazarse, recibiendo así el nombre de dipolos inducidos. En ese momento entran en juego fuerzas recuperadoras sobre las cargas desplazadas, que tienden a juntarlas como si estuviesen unidas por un resorte.

Si por el contrario un dieléctrico se compone de moléculas polares, estos dipolos están orientados al azar cuando no existe campo eléctrico. Bajo la acción de un campo, tiene lugar una orientación posterior. Cuanto más intenso es el campo, tanto mayor es el número de dipolos que se orientan en la dirección del mismo. La figura 1.7.6 muestra el comportamiento de estos dos tipos de moléculas dentro de un dieléctrico.

Fig. 1.7.6. a) Comportamiento de moléculas no polares; b) Comportamiento de moléculas polares

El efecto neto de la polarización de un dieléctrico homogéneo en un condensador es la creación de una carga superficial ligada sobre las caras del dieléctrico próximas a las placas. La carga ligada produce un campo eléctrico opuesto a la dirección del engendrado por la carga libre de los conductores, así, el campo neto entre las placas tiende a debilitarse. En ciertos cristales que contienen moléculas polares, una tensión mecánica polariza las moléculas induciendo un voltaje a través del cristal. Inversamente, la aplicación de un voltaje induce una tensión mecánica (deformación) en el cristal, dando lugar al conocido efecto piezoeléctrico.

Un caso especial son los sensores capacitivos de condensador variable diferencial, estos dispositivos están formados por dos placas metálicas fijas entre las que se puede

desplazar de forma paralela otra placa, de esta forma se consigue que los dos condensadores experimenten la misma variación en su capacidad pero en sentidos opuestos. Mediante un circuito de acondicionamiento adecuado que proporcione una tensión de salida en función de la diferencia de capacidades se obtiene una salida lineal y un aumento de la sensibilidad.

1.7.2. Aplicaciones de los sensores capacitivos.

Cuando nos encontramos en un medio conductor con una elevada constante dieléctrica, el cuerpo humano puede actuar como un condensador adaptando su capacidad al medio que le rodea [87]. Esta capacidad puede variar desde unos pocos picofaradios hasta varios nanofaradios, dependiendo de factores tan diversos como el peso de la persona, su vestimenta, el clima de la zona...etc. Este fenómeno nos permite diferenciar entre posiciones estáticas y de desplazamiento estudiando el grado de adaptación que tienen unos objetos frente a otros en el mismo medio.

Fig. 1.7.7. Detector de presencia mediante un sensor capacitivo, a) Reposo; b) Estado de excitación

Si un humano se moviese en las inmediaciones de un objeto, cuya capacidad hubiese sido previamente establecida con la ayuda de un sensor, se produciría un incremento en el valor de la capacidad entre el objeto y el sensor.

En la figura 1.7.7a la capacidad entre las placas del sensor y la referencia (tierra) es C_1 . Cuando una persona se mueve en los alrededores del sensor (Fig. 1.7.7b), se producen dos capacidades adicionales, una entre la placa y el cuerpo en sí, C_a y otra entre el cuerpo y la referencia, C_b . Luego el incremento de capacidad producido entre la placa y el sistema de referencia viene dado por la expresión:

$$C = C_1 + \Delta C = C_1 + \frac{C_a \cdot C_b}{C_a + C_b} [F] \quad (131)$$

Mediante un aparataje apropiado, este fenómeno puede ser aplicado para detectar la presencia de personas en una determinada zona, con solo medir la diferencia entre la capacidad inicial del sensor tomada como referencia y la capacidad del mismo con una persona encima [88].

Una de las partes de esta tesis consistió en desarrollar un sistema que sirviese para tal fin, con la idea de que en un futuro pudiese ser implementado como sistema de alarma.

Otra aplicación de este tipo de sensores es detectar la intrusión dentro de un automóvil. Para ello se coloca un condensador de placas plano – paralelas metálicas en el interior de un asiento, y se conecta un circuito como el que muestra la figura 1.7.8a. Las placas del condensador al estar conectadas a las resistencias, permiten controlar la diferencia de tensión producida con ayuda de un oscilador que produce un pulso constante. Si tomamos como referencia la capacidad del sensor cuando no hay nadie sentado y se definen las constantes del circuito RC de trabajo, cuando alguien se sitúe encima del asiento producirá un incremento en la constante de tiempo que se verá reflejado en un aumento en los picos de amplitud definidos a la salida del amplificador diferencial. Comparándose después el voltaje de referencia con el emitido, el sensor activo es capaz de diferenciar si hay alguien dentro del vehículo.

Modificando las dimensiones y configuraciones de los electrodos se ha llegado incluso a poder discernir entre si se trata de un adulto o de un niño, incluso identificar la posición de la persona en el asiento [89]. Su principal limitación no obstante, sigue

siendo que objetos grandes como garrafas de agua u otros similares pueden ser detectados también como si de personas se tratase.

Figura 1.7.8. a) Detector de intrusión en automóviles; b) Brazo robótico.

Este tipo de sensores también han sido utilizados en brazos robóticos (Figura 7b), ya que en un ambiente lo suficientemente aislado y con el aire actuando como dieléctrico, el sensor, si tiene una sensibilidad suficiente, es capaz de detectar la variación de capacidad producida en un campo eléctrico cuando un objeto se mueve en un rango de aproximadamente 30 cm y mediante un sistema electrónico apropiado alcanzar dicho objeto [90].

Los sensores capacitivos pueden ser empleados directamente para la medida del desplazamiento y posición, o ser incluidos formando un bloque con otros sensores en los cuales la variación de la posición se deba a un cambio de presión, temperatura o de fuerza entre otros. Al no existir errores de fricción se pueden medir desplazamientos de hasta 10^{-10} mm.

Figura 1.7.9. Ejemplo de detector de presión mediante un sensor capacitivo

Gracias a que la capacidad de un condensador es inversamente proporcional a la distancia entre las placas del mismo, podemos determinar la posición de un objeto bajándonos en la mayor o menor proximidad de las placas al presionar sobre ellas. Este fenómeno, que en este trabajo se empleó para detectar el impacto producido sobre

planchas de hormigón, es muy similar al que emplean las teclas de un ordenador, donde una placa metálica acoplada a cada tecla actúa como tope de un condensador. Al oprimir la tecla disminuye la separación entre la placa superior y la inferior y crece la capacidad, lo cual pone en marcha el circuito electrónico del ordenador.

El diafragma, a su vez, puede ser diseñado para producir cambios de hasta el 25% en la capacitancia, lo cual los hace candidatos idóneos para su aplicación en sensores de digitalización directa. Además, estos diafragmas pueden ser protegidos contra las sobrepresiones incluyendo un mecanismo de tope que limite el desplazamiento de los mismos.

Es importante mantener una buena planeidad en las caras del diafragma si se pretende obtener una buena linealidad en los resultados. Un modo de mejorar la gama lineal es hacer un diafragma con micro acanaladuras y arrugas. En general, los diafragmas planos son considerados más sensibles que los diafragmas acanalados con el mismo tamaño y grosor, sin embargo, si existe presencia de irregularidades en la superficie, estas marcas se encargan de suavizar las acentuaciones que se producen y que varían la sensibilidad del dispositivo.

Por otro lado, en su esencia, un micrófono es un transductor de presión adaptado para la transducción de las ondas de sonido en un rango espectral con un ancho conocido, el cual generalmente, excluye las bajas frecuencias.

La mayor diferencia entre un sensor de presión y un sensor acústico es que este último no tiene que medir presiones de cambio constantes o muy lentas. La característica más notable de estos sensores, es su capacidad de transformar la onda mecánica transmitida a través del medio aéreo en una señal eléctrica legible y aplicable. Así, un micrófono

Figura 1.7.10. Micrófono capacitivo con regeneración mecánica

capacitivo lineal convierte la distancia entre las placas del condensador en un potencial eléctrico el cual puede ser amplificado.

Estas vibraciones acústicas han sido empleadas recientemente en festivales de música electrónica para recargar la batería de los móviles. Para ello, los asistentes al concierto llevaban una camiseta con un circuito electrónico integrado capaz de transformar dichas ondas en señales eléctricas utilizables para cargar una batería.

A continuación veremos un ejemplo de un condensador de tres placas, separadas a la misma distancia y con la misma área como se puede ver en la figura 1.7.11. Las placas forman dos condensadores C_1 y C_2 . Tanto la placa superior como la inferior, están alimentadas mediante señales sinusoidales desfasadas entre sí 180° . Ambos condensadores se encuentran ubicados a la misma distancia uno del otro con respecto a la placa central, la cual no tienen voltaje alguno, ya que, la señales que llegan a ambas placas se anulan entre sí.

Figura 1.7.11. Sensor de posición de tres placas, a) Estado inicial, b) Estado excitado

Ahora, si suponemos que la placa central se mueve una cierta distancia con respecto a las anteriores, se producirá una variación en la capacidad de ambos condensadores, que se verá reflejada en la amplitud de la señal de salida tal y como se indica en la siguiente ecuación:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{\epsilon A}{x_0 + x} \\ C_2 = \frac{\epsilon A}{x_0 - x} \end{cases} \Rightarrow V_{out} = V_0 \cdot \left(-\frac{x}{x_0 + x} + \frac{\Delta C}{C} \right) \quad (132)$$

La fuerza en cambio, es un resultado de la atracción y la repulsión entre las cargas aplicadas a las placas del sensor, que se comportan como muelles. El valor instantáneo de esta fuerza es:

$$F = -\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{C \cdot V^2}{x_0 + x} \right) \quad (134)$$

Este mismo tipo de sensores también pueden ser añadidos en la parte inferior de las baldosas que constituyen un solado y mediante un ajuste adecuado de las frecuencias de medida puede ser utilizado como sistema de detención de personas sobre una superficie.

Otra de las aplicaciones puede ser la constitución de galgas extensiométricas que permiten medir a altas temperaturas, las cuales están formadas por dos láminas flexibles arqueadas, montadas una sobre la otra y cementadas sobre la pieza a ensayar. La deformación horizontal de la pieza cambia la distancia entre los arcos y con ella la capacidad del condensador. También, se pueden aplicar estos sensores para la medición del nivel de los líquidos conductores y no conductores.

Un condensador con el aire como dieléctrico, puede servir también como sensor de medición de la humedad relativa en una estancia, ya que los cambios de humedad de la atmósfera modifican la permitividad eléctrica del medio según la ecuación:

$$k = 1 + \frac{211}{T} \cdot \left(P + \frac{48 \cdot P_s}{T} \cdot H \right) \cdot 10^{-6} \quad (135)$$

donde T es la temperatura absoluta en K, P y P_s son las presiones del aire húmedo y de saturación del vapor de agua ambas medidas en mmHg. Sí en vez de aire empleamos un

Fig. 1.7.12. Esquema simplificado de un circuito para medir humedad mediante sensores

aislante que esté sujeto a cambios significativos en su constante dieléctrica con la variación de la humedad en el ambiente, la capacidad del sensor será aproximadamente proporcional a la humedad relativa H :

$$C_H \approx C_0 \cdot (1 + \alpha \cdot H) \quad (136)$$

Para el uso de un sensor capacitivo, con un 2% de precisión en el rango del 5% al 90% de humedad relativa se puede emplear el circuito simplificado de la figura 1.7.12.

Una técnica similar a la descrita es la que emplean las grandes farmacéuticas para medir la humedad en los sistemas de control de calidad, aunque este método no deja de tener sus limitaciones cuando el contenido en humedad es pobre y no sobrepasa el 0,5%.

Hasta ahora hemos visto las múltiples aplicaciones que tienen este tipo de sensores. No obstante, el empleo como sensor de un condensador variable puede tener algunas limitaciones, como por ejemplo:

1. La dispersión del campo en los bordes de los electrodos hace que la diferencia entre las capacidades C_1 y C_2 no siempre sea proporcional a la variación x .

Una posible solución es la que muestra la figura 1.7.13, que consiste en rodear el electrodo 3 por un electrodo de guarda que esté al mismo potencial que él y se desplace de forma simultánea. De esta forma se puede uniformar el campo eléctrico entre las placas.

Fig. 1.7.13, a) Sensor capacitivo con dispersión de borde, b) Condensador con electrodo de guarda

2. Si el aislamiento entre placas no es lo suficientemente elevado y constante, la humedad puede dar lugar a resistencias parasitarias en paralelo con la capacidad del condensador y variaciones parásitas en la impedancia del condensador.
3. Existencia de interferencias capacitivas debido a que solo se puede poner a tierra una de las dos placas.

Para evitarlas se puede apantallar eléctricamente la placa y los cables conectados a ella con respecto al entorno del sensor.

No obstante se debe ser cuidadoso, ya que al apantallar los cables de conexión para evitar interferencias capacitivas, se introduce una capacidad en paralelo con el condensador disminuyendo la sensibilidad del sensor.

4. La posición relativa entre los conductores del cable y el dieléctrico constituye una fuente de error adicional, que puede ser muy grave si las variaciones de geometría son importantes

Entre sus ventajas más significativas destacan:

1. Tienen un error de carga mínimo porque no existe contacto mecánico directo. No hay errores de fricción, ni de histéresis y además, no es necesario realizar grandes esfuerzos para desplazar el elemento móvil.
2. La estabilidad y la reproducibilidad son muy elevadas porque el valor de C no depende de las propiedades de las placas, ni de los cambios de temperatura. Además los efectos del envejecimiento son mínimos y no existen derivas temporales.
3. Si el dieléctrico es aire, la constante dieléctrica varía poco con la temperatura.
4. No producen campos magnéticos y los campos eléctricos son pequeños, en contraposición con los sensores inductivos.
5. La energía consumida es mínima.

1.7.3. Sistemas de acondicionamiento.

Son sistemas que se encargan de convertir la variación de capacidad del condensador en la variación de un parámetro de una señal eléctrica, esto es: amplitud de una señal

Fig. 1.7.14. Esquema de sistema de acondicionamiento.

senoidal de frecuencia constante [91], frecuencia de una señal senoidal o de una onda cuadrada, anchura de impulsos de frecuencia constante...etc. Para ello el condensador forma parte de un circuito electrónico como muestra la figura 1.7.14.

De entre los sistemas de acondicionamiento, nos centraremos en los circuitos de señales senoidales de frecuencia constante. Entre ellos encontramos:

- a) Divisores de tensión alimentados en corriente alterna.

- b) Amplificador de corriente alterna.

En teoría un amplificador de señales analógicas variables se puede emplear para linealizar la relación entre la tensión de salida y la capacidad de un sensor capacitivo en el cual varía la distancia entre las placas.

No obstante en la realidad esto no es del todo posible, ya que en la práctica se presentan problemas de estabilidad.

Fig. 1.7.15. Amplificador de alterna.

c) Puente de corriente alterna.

La configuración en puente se emplea para eliminar la tensión fija que aparece a la salida de un divisor de tensiones, incluso cuando se emplea un sensor diferencial. Si se utilizan brazos resistivos, sus capacidades parásitas introducen errores. Por ello se utilizan puentes de alterna con transformador, para reducir dichos efectos.

Fig. 1.7.16. Puente de corriente alterna.

Aun así, el método más común es utilizar el condensador como elemento modulador de un circuito oscilante que genera una señal alterna cuya frecuencia es función del valor de la capacidad. Esta señal se aplica a un convertidor frecuencia/tensión que proporciona una señal analógica que lleva la información en su amplitud. Esta será la forma de empleo en nuestro trabajo tal y como se puede ver en la figura 1.7.17.

Fig. 1.7.17. Circuito oscilante con condensador variable.

Bibliografía

- [1] De Juana, J. M. (2003). “*Física General, Volumen I*”. Editorial PEARSON, 2ª Edición, ISBN: 84-205-3342-4, Madrid, España.
- [2] Francis W. Sears & Mark W. Zemansky “*FÍSICA GENERAL*”, (Traducido por Albino Yusta Almarza). Editorial Aguilar, 5ª Edición, 1977.
- [3] Andreu Tormo, J. & Andreu Jornet, R. “*FÍSICA*”, Editorial AMERICA, 1963.

- [4] Paul A. Tipler & Gene Mosca. (2005). *“FÍSICA, para la ciencia y la tecnología. Vol. 2”*, Editorial Reverte, 5ª Edición, Mayo 2005.
- [5] Martín Domingo, A. *“Vibraciones y Ondas. Vol. I”*, Cuadernos del Instituto Juan de Herrera, Publicaciones ETSA, reseña 3 – 74 – 01/2
- [6] Martín Domingo, A. *“Vibraciones y Ondas. Vol. II”*, Cuadernos del Instituto Juan de Herrera, Publicaciones ETSA, reseña 3 – 74 – 01/2
- [7] *“Estudio Acústico Para Licencia de Actividad”*, Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Madrid. Cuaderno Técnico, Febrero de 2012.
- [8] CTE DB – HR. Protección Frente al Ruido, Septiembre 2009. «BOE» nº. 254, de 23 de octubre de 2007, pp. 42992 – 43045.
- [9] Ley 37/2003 de 17 de Noviembre del Ruido, la cual desarrollo la disciplina de acústica en la edificación hasta ese momento dispersa. (BOE, núm. 254, 18 de Noviembre de 2003).
- [10] Real Decreto 1513/2005 del 16 de Diciembre de 2005, referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental, destinada a evitar, prevenir o reducir con carácter prioritario los efectos nocivos de la exposición al ruido ambiental, (BOE, núm. 301, 17 de Diciembre de 2005).
- [11] Real Decreto 1367/2007 del 19 de Octubre de 2007, referente a la zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas, donde se definen los índices de ruido y de vibraciones, sus aplicaciones, efectos y molestias sobre la población y su repercusión ambiental, (BOE, núm. 254, de 23 de Noviembre de 2007).
- [12] Decreto 78/1999 de 27 de Mayo, por el que se Regula el Régimen de Protección contra la Contaminación Acústica. Publicado en B.O.C.M., nº 34, 8 de Junio de 1999, pp. 13 – 25.
- [13] Ordenanza de Protección contra la Contaminación Acústica y Térmica del Excelentísimo Ayuntamiento de Madrid de 7 de Marzo de 2011. Publicado en BO. Ayuntamiento de Madrid el 7 de Marzo de 2011, nº 6385, pp. 6 – 46.
- [14] Ordenanza de Evaluación Ambiental de Actividades del Ayuntamiento de Madrid del 27 de Enero de 2005. Publicado en BO. Comunidad de Madrid 21/02/2005 nº. 43 pp. 58-63
- [15] Ayuntamiento de Madrid. (2014). *“Estudio psicosocial del ruido en Madrid”*. LABEIN, PR0688-IN-CM-22 (v01), pp. 1 – 26.

- [16] Cabrera, J.L. Fernández, Y, González, N. & Bermúdez, S. (2000). “*Morteros a base de suelos. Caracterización*”. Materiales de Construcción, Vol. 50, nº 258, pp. 67 – 72.
- [17] Courard, L. Darimont, A. Shouterden, M, Ferauche, F. Willen, X. & Degeimbre, R. (2003). “*Durability of mortars modified with metakaolin*”. Cement and concrete research, Vol. 33, Issue 9, Septiembre 2003, pp. 1473 – 1479.
- [18] Choi, H. Lim, M, Kitagaki, R. Noguchi, T. & Kim, G. (2015). “*Restrained shrinkage behavior of expansive mortar at early ages*”. Construction and Building Materials, Vol. 84, Junio 2015, pp. 468 – 476.
- [19] Sánchez, J. Barrios, J. Barrios, A. & Arellano, A. (1997). “*La retracción en morteros de cal*”. Materiales de Construcción, Vol. 47, nº 245, pp. 17 – 28.
- [20] Haach, V. Vasconcelos, G. & Lourenço, P. (2011). “*Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars*”. Construction and Building Materials, Vol. 25, Issue 6, Junio 2011, pp. 2980 – 2987.
- [21] Fernández Canovas, M. (1994). “*Patología y terapéutica del hormigón armado*”. 3ª Edición, Servicio de publicaciones: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.
- [22] Cook, M. D. Ley, M. Ghaeezadah, A. (2014). “*A workability test for slip formed concrete pavements*”. Construction and Building Materials, Vol. 68, Octubre 2014, pp. 376 – 383.
- [23] Mechtcherine, V. & Shyshko, S. (2015). “*Simulating the behaviour of fresh concrete with the Distinct Element Method – Deriving model parameters related to the yield stress*”. Cement and Concrete Composites. Vol. 55, Enero 2015, pp. 81 – 90.
- [24] Li, Z. (2007). “*State of workability design technology for fresh concrete in Japan*”. Cement and Concrete Research, Vol. 37, Issue 9, Septiembre 2007, pp. 1308 – 1320.
- [25] Singh, S. B. Munjal, P. & Thammishetti, N, (2015). “*Role of water/cement ratio on strength development of cement mortar*”. Journal of Building Engineering, Vol. 4, Diciembre 2015, pp. 94 – 100.
- [26] Monteiro, P. J. (1985). “*Microestructure of concrete and its influence on the mechanical properties*”. Ph. D. Thesis. Berkely, USA, 1985.

- [27] Brooks, J. J. (2015). *"Elasticity of concrete"*. Construction and Building Movements, 2015, pp. 61 – 93.
- [28] Fernández Cánovas, M. (2000). *"Consideraciones sobre los ensayos con probetas testigo"*. Ciencia y Técnica, nº 20, Buenos Aires, 2000.
- [29] Tobio, J. M. (1967). *"Ensayos no destructivos"*, Instituto Eduardo Torroja, Madrid, 1967.
- [30] British Standard Institution (BSI). (1986). *"Testing concrete: Guide to the use of non-destructive methods of tests for hardened concrete"*. BSI, Londres, 1986.
- [31] García Meseguer, A. Morán Cabré, F. Arroyo Portero, J. C. (2011). *Jiménez Montoya. Hormigón Armado*. Editorial Gustavo Gil, 15ª Edición, Barcelona.
- [32] Richardson, M. (2002). *"Fundamentals of durable reinforced concrete"*. Spon Press. London & New York.
- [33] Medina Sánchez, E. (2009). *Construcción de estructuras de hormigón armado en edificación*. Editorial BELLSCO, Biblioteca Técnica Universitaria, Vol. 8.
- [34] Josse, R. (1975). *La acústica en la construcción*. Editorial Gustavo Gil, Barcelona, España 1975.
- [35] Salvadori, M & Heller, R. (1998) *"Estructuras para arquitectos"*. Kliczkowski Publisher CP 67, ISBN: 950-9575-14-3, Septiembre 1998, Madrid, España.
- [36] William D. Castiller, Jr. (2012) *"Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales"*. Editorial Reverte, ISBN: 978-84-291-7252-9, Marzo 2012, Barcelona, España.
- [37] Recuero López, M. (2000) *"Ingeniería Acústica"*. Editorial PARANINFO, Madrid, España.
- [38] Li. X & Dong, L. (2014). *"An efficient closed-form solution for acoustic emission source location in three-dimensional structures"*. AIP Advances, Vol. 4, 027110, pp. 1 – 8.
- [39] Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural. *"Problemas de Vibraciones en Estructuras"*. Editorial ACHE, Publicación E – 8, 1991.
- [40] Varela, D. W & Battista, C. R. (2011). *"Control of vibrations induced by people walking on large span composite floor decks"*. Engineering Structures, Vol. 33. Issue 9, Septiembre 2011, pp. 2485 – 2494.
- [41] De Juan, A. García, P. Fernández, A. Diez-Ibarabia, A. Iglesias, M & Viadero, F. (2015). *"Analysis of human-induced vibrations in a lightweight framework"*. Applied Acoustics, Septiembre 2015, (in press).

- [42] Turchet, L. (2016). “*Footstep sound synthesis: Design, Implementation, and evaluation of foot-floor interactions, surface materials, shoe types and walkers’ features*”. Applied Acoustics, Vol. 107, Junio 2016, pp. 46 – 68.
- [43] Lee, S. Lee, K. Woo, S. & Cho, S. (2013). “*Global vertical mode vibrations due to human group rhythmic movement in a 39 story building structure*”. Engineering Structures, Vol. 57, Diciembre 2013, pp. 296 – 305.
- [44] An, Q. Chen, Z. Ren, Q. Liu, H & Yan, X. (2015). “*Control of human-induced vibration of an innovative CSBS-CSCFS*”. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 115. Diciembre 2015, pp. 359 – 371.
- [45] Li, X. Zhang, Z & Zhang X. (2016). “*Using elastic bridge bearings to reduce train-induced ground vibrations: An experimental and numerical study*”. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 85, Junio 2016, pp. 78 – 90.
- [46] Cantero, D. Ülker-Kaustell, M & Karoumi, R. (2016). “*Time-frequency analysis of railway bridge response in forced vibration*”. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 76 – 77, August 2016, pp. 518 – 530.
- [47] Rodríguez, F. J, de la Puente Crespo, J. & Díaz Sanchidrián, C. (2008). *Guía Acústica de la Construcción*. Fundación Serafín Ocaña, 2ª Edición, Septiembre 2008.
- [48] *Problemas de vibraciones en estructuras*. Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural. Editorial ACHE, publicación E – 8, 1991.
- [49] *Estudio Acústico Para Licencia de Actividad*. Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Madrid. Cuaderno Técnico, Febrero de 2012.
- [50] Ordenanza de Protección contra la Contaminación Acústica y Térmica del Excelentísimo Ayuntamiento de Madrid de 7 de Marzo de 2011.
- [51] Recuero López, M. (2000). *Ingeniería Acústica*. Editorial PARANINFO, 2ª Edición, Madrid.
- [52] Gálvez Huerta, M. A. et al. (2013). Instalaciones y servicios técnicos. Departamento de Física e Instalaciones Aplicadas, Publicaciones ETSAM, Apuntes 2013/14.
- [53] Sanchidrián, C. D. (2010). “*Aislamiento acústico*”. Publicaciones Instituto Juan Herrera, ETSAM, ISBN: 978-84-9728-325-0.
- [54] Flores Pereita, P. (2012). *Ruido y vibraciones en las instalaciones. Soluciones constructivas*. INASEL. Colegio Oficial de Arquitectos de Cádiz, 2012.

- [55] VIBRACHOC. (2009). *Suspensiones metálicas*. Catalogo comercial, 2009.
- [56] Josse, R. (1975). *La acústica en la construcción*. Editorial Gustavo Gil, Barcelona, España, 1975.
- [57] Higini Arau Puchades. “*El Ruido de Impacto en Forjados*”, Artículo sobre normativa acústica, facultad de Ciencias Físicas.
- [58] Ordenanza del Ayuntamiento de Valencia. (2008). “*Evitar la Transmisión de Vibraciones a través de la Estructura del Edificio*”
- [59] Maderuelo-Sanz, R.; Martín-Castizo, M.; Vílchez-Gómez, R. (2011). “*The performance of resilient layers made from recycled rubber fluff for impact noise reduction*”, Applied Acoustics, Vol. 72, pp. 823 – 828.
- [60] Seon, H. Kwan, B. Kim, Y & Cho, T. (2015). “*Low frequency impact sound transmission of floating floor: Case study of mortar bed on concrete slab with continuous interlayer*”. Building and Environment, Vol. 94, Diciembre 2015, pp. 792 – 801.
- [61] Stewart, M. A. & Robert. J. M. Craik. (2000). “*Impact sound transmission through a floating floor on a concrete slab*”. Applied Acoustics, Vol. 59, Issue 4, Abril 2000, pp. 353 – 372.
- [62] Morais, L.; Pereira, A. (2009) “*Experimental characterization of the impact noise insulation of floating slab systems and floating floor system using a small footprint*”, X Encontro Nacional e VI Congresso Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído , Natal, ANTAC. 2009
- [63] Díaz, C. Caballol, D. & Rodríguez A. (2013). “*La arena como capa intermedia para la mejora del aislamiento acústico entre recintos superpuestos*”. Materiales de Construcción, Vol. 63, nº 31, pp. 423 – 432.
- [64] Cho, T. (2013). “*Experimental and numerical analysis of floating floor resonance and its effect on impact sound transmission*”. Journal of Sound and Vibration, Vol. 332, Issue 25, Diciembre 2013, pp. 6552 – 6561.
- [65] J. R. Rosell, I. R. Cantalapiedra, (2011). “*Método Simple para Determinar el Módulo de Young Dinámico a partir de una Excitación por Impacto aplicado a Morteros de Cal y Cemento*”, (UPC) Materiales de Construcción, Enero – Marzo 2011. Vol. 61, 301, pp. 39 – 48.
- [66] J. Mater. Civ. Eng. Nagy, A. (1997). “*Determination of E-modulus of young concrete with nondestructive method*”, 9(1), 15-20 (1997). doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1997)9:1(15).

- [67] E.K. Scharader. (1981), “*Impact resistance and test procedure for concrete*”, ACI Materials Journal, Vol. 78, nº2, pp. 141-146.
- [68] Khaledmarar, T. (2001). “*Relación entre la Tenacidad a Flexión y la Energía de Impacto en Hormigones de Alta Resistencia Reforzados con Fibras*”, (Universidad de Turquía). Materiales de Construcción, Vol. 51, 262, págs. 5 – 13, Abril – Junio 2001.
- [69] Cánovas, M. F. Hernando, V. M. (2012). “*Comportamiento de hormigones de alta resistencia reforzados con fibras de acero frente al impacto de proyectiles*”. Materiales de Construcción, Vol. 62, nº 307, Septiembre 2012, pp. 381 – 396.
- [70] B. F. Tutikian, M. F. O. Nunes, L. C. Leal, L. Marquette. (2013). “*Hormigón ligero con agregado de EVA para la atenuación del ruido de impacto*”, (Universidad de Rio dos Sinos). Materiales de Construcción. Vol. 63, 310, pp. 309 – 316, Abril – Junio, 2013.
- [71] Rushforth, I. M.; Horoshenkov, M.; Mirafteb; Swift, M. J. (2005). “*Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactured from recycled waste*”. Applied Acoustics, Vol. 66, pp. 731-749.
- [72] Maderuelo-Sanz, R.; Martín-Castizo, M.; Vélchez-Gómez, R. (2011). “*The performance of resilient layers made from recycled rubber fluff for impact noise reduction*”. Applied Acoustics, Vol. 72, pp. 823 – 828.
- [73] ASTM, Standard Test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional frequencies of concrete specimens, 2002.
- [74] J. M. Gaidis & A. H. Rosemberg. (1986). “*Nuevo Ensayo para la Determinación de Frecuencias Fundamentales Longitudinales, Transversales y Torsionales en Probetas de Hormigón*”, Materiales de Construcción, Vol. 36, nº202, pp. 5 – 10, Abril – Junio 1986.
- [75] N. Robeyst, C.U. Grosse, N. De Belie. (2009). *Measuring the change in ultrasonic p-wave energy transmitted in fresh mortar with additives to monitor the setting*, Cement and Concrete Research, Vol. 39 pp. 868 – 875.
- [76] Azenha, M. Magalhaes, F. Faria, R. Cunha, A. (2010). *Measurement of concrete E-modulus evolution since casting: A novel method based on ambient vibration*. Cement and Concrete Research, Vol. 40, pp. 1096 – 1105.
- [77] Park, S. Yim, H & Kwak, H. (2014). “*Nonlinear resonance vibration method to estimate the damage level on heat-exposed concrete*”. Fire Safety Journal, Vol. 69, Julio 2014, pp. 32 – 42.

- [78] UPV. (2011). “*Resonancia Mecánica*”. Cursos de Física de la Universidad de Vigo.
- [79] Timoshenko, S (2008). “*Resistencia de Materiales*”. Thomson, 5ª Edición (castellano). Madrid. ISBN: 978-84-9732-065-8.
- [80] Gottfried, M. A. & Pfeiffer, R. (2013). “*Resonance*”. Basic Books, California Institute of Technology, ISBN: 978-0-465-02414-8.
- [81] Peralta, J. A. Reyes, P. & Godínez, A. (2009). “*El Fenómeno de la Resonancia*”, (Dpto. Física, Universidad Politécnica de Mexico). Latin American Journal of Physics Education, Vol. 3, Nº 3, pp. 612 – 618, Septiembre de 2009.
- [82] Departamento de Física I, (2013). “*Resonancia mecánica*”, Universidad de Vigo, Facultad de ingeniería de minas.
- [83] Massimo Teodorani. “*NIKOLA TESLA. Vida y descubrimientos del más genial inventor del siglo XX*”, Editorial SIRIO, 2005.
- [84] Mandado Pérez, E. Murillo Roldan, A. Quintáns Graña, C. *Sensores Capacitivos*. Sensores y Acondicionares, Tema 6, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de Vigo.
- [85] Fraden, J. (2003), *Handbook of Modern Sensors*, SPRINGER, 3ª Edición, San Diego, USA, ISBN 0-387-00750-4.
- [86] Sears, F. W. Zemansky, W. M. (1977), Física General. Editorial Aguilar, 5ª Edición, Madrid, España, ISBN 84-03-20139-7.
- [87] Fraden, J. (1991). *Apparatus and method for detecting movement of an object*. U.S. patent 5,019,804.
- [88] Fraden, J. (1984). *Motion discontinuance detection system and method*. U.S. patent 4,450,351.
- [89] Long, D. J. (1975). *Occupancy detector apparatus for automotive safety system*. U.S. patent, 3,898,472.
- [90] Fraden, J. (1984). *Toy including motion-detecting means for activating same*. U.S. patent 4,479,329.
- [91] Floyd, T. L. (1999). “*Fundamentos de sistemas digitales*”. Prentice Hall, 6ª Edición, ISBN: 84-89660-21-2, España.

CAPÍTULO 2**MATERIALES Y EQUIPOS EMPLEADOS.****2.1. Introducción**

Desde que surgió de manera formal el método científico allá en el siglo XVII con Galileo Galilei, han sido muchos los investigadores que han tomado como referencia esta forma de proceder a la hora de llevar a cabo sus estudios. Este método se emplea con el objetivo de incrementar nuestro conocimiento acerca de un tema en concreto y con ello mejorar nuestro bienestar.

Una parte importante es la que se centra en la descripción de los materiales empleados y los equipos utilizados para la realización de las experimentaciones. Su correcta descripción y estudio de sus características, permite no solo extrapolar conclusiones una vez obtenidos los resultados del experimento, sino que también habilita a futuros investigadores la posibilidad de volver a repetir los mismos ensayos en busca de nuevos resultados.

En una primera parte, en este capítulo se describen los materiales que se emplearon para la elaboración de probetas y prototipos de hormigón y mortero, que fueron utilizados en los ensayos de esta tesis. Se describen sus características más notables, así como sus propiedades físicas y químicas por las cuales fueron elegidos y que fueron consideradas en la toma de datos posterior.

Por otra parte, también se muestran los equipos de laboratorio empleados, tanto para la elaboración de probetas como para las medidas posteriores, indicando su precisión y otros datos que se deban tener en cuenta para el adecuado seguimiento del trabajo presentado.

2.2. Materiales empleados.

En este apartado se detallan las propiedades de los materiales utilizados en la realización de este trabajo.

2.2.1. Cemento.

Para la realización de esta tesis se empleó un cemento tipo CEM II/B-L 32,5 R. Esto es, un cemento portland con adiciones de tipo B, clasificado según la norma UNE EN 197-1: 2011.

Las adiciones son filleres calizos con un contenido orgánico total, determinado según la norma UNE-EN 13639:2002, que no excede del 0,5% en masa. La resistencia de este tipo de cemento es de $32,5 \text{ N/mm}^2$, englobado dentro del tipo de cementos de alta resistencia inicial. El material poseía el correspondiente certificado AENOR y marcado CE.

Fig. 2.1. Tipo de Cemento

La adición de filler calizo en la molienda conjunta del clínker portland, mejora notablemente las propiedades físicas de hidratación, trabajabilidad (a causa de una mayor densificación del mortero en proporciones de entre $50 - 100 \text{ Kg/dm}^3$), retención de agua, capilaridad, permeabilidad, retracción y fisuración de los morteros y hormigones tanto frescos como endurecidos.

La composición en masa de este tipo de cementos es la que muestra la tabla 2.1.

Composición en masa

<i>Tipo</i>	<i>Designación</i>	<i>Clínker (K)</i>	<i>Caliza (L)</i>	<i>Otros</i>
Cemento portland con caliza	CEM II/B-L	65 – 79	21 – 35	0 – 5

Tabla 2.1. Composición en masa del cemento

Según la norma UNE EN-197-1, los requisitos que deben cumplir los cementos con adiciones de caliza son:

- Contenido en CaCO_3 mayor o igual al 75%.
- Contenido en arcilla menor o igual de $0,20\text{g}/100\text{g}$
- Contenido en materia orgánica (TOC) menor o igual al 0,50% en masa.

Algunos autores afirman que los cementos con un contenido superior al 10% de caliza y finura elevada, desarrollan casi la misma resistencia mecánica que los cementos puros correspondientes [1]. Y además no alteran significativamente las resistencias a ninguna edad [2], si bien es cierto, que la molienda del Clínker y de los materiales calizos debe realizarse de forma simultánea con objeto de que no se produzca un envejecimiento prematuro de los materiales calizos haciendo que pierdan actividad [3].

Las propiedades mecánicas y físicas de este tipo de cemento se muestran en la tabla 2.2.

Propiedades físico-mecánicas

Clase de resistencia	Resistencia Compresión			Tiempo de fraguado		Estabilidad de volumen	Calor hidratación	
	Inicial-MPa		Final-MPa				UNE-EN 169 (J/g)	
	2 días	7 días	28 días	Inicio mín.	Final horas	Expansión mm	41 horas	7 días
32,5 R	≥ 10	-	≥ 32,5	≥ 75	≤ 12	≤ 10	≤ 270	

Tabla 2.2. Propiedades mecánicas y físicas del cemento empleado

Los hormigones basados en cementos con caliza tienen menor porosidad que los basados en cementos puros, además de que el tamaño medio de los poros también es inferior. Esta es una propiedad notable si se pretende estudiar la transmisión de ondas mecánicas y se pretende asemejar el hormigón a un material homogéneo e isótropo.

Las propiedades químicas de este tipo de cemento se describen en la tabla 2.3.

Prescripciones químicas del cemento tipo CEM II 32,5 R

Contenido en Sulfatos (SO_3) UNE EN 196 – 2	Contenido en Cloruros (Cl) UNE EN 196 – 2
≤ 3,5 %	≤ 0,1 %

Tabla 2.3. Propiedades químicas del cemento empleado

Estos cementos se caracterizan además por su bajo calor de hidratación y la baja retracción que producen durante su fraguado, propiedades idóneas para la fabricación de las losas y placas empleadas en este trabajo [4]. Por otro lado, se considera que poseen una resistencia mecánica media y mayor sensibilidad a las bajas temperaturas, propiedades que no influyeron en exceso ya que al tratarse de un estudio de laboratorio se mantuvieron controladas a lo largo de la tesis. Además, la realización de las probetas y placas se realizó en un periodo inferior a tres meses, de forma que el almacenamiento no sobrepasó el límite óptimo propuesto por la actual EHE 08.

2.2.2. Agua.

A la hora de fabricar un hormigón que debe alcanzar una resistencia predeterminada, se debe tener en cuenta que el agua de amasado tiene doble papel en la elaboración de la masa. Por un lado, se encarga de hidratar el cemento, y por otro, de permitir la trabajabilidad del material para su posterior manipulación. De esta manera, la cantidad de agua aportada en el proceso de fabricación debe limitarse al mínimo necesario a fin de evitar que ésta se evapore, dejando huecos en el hormigón endurecido que reduzcan su resistencia.

Por otro lado, el agua de curado utilizada durante el proceso de fraguado, tiene como objetivo evitar la desecación, hidratar mejor el cemento e impedir que se produzca una retracción prematura en la pieza.

En este caso, para la elaboración de todas las probetas, placas y losas se empleó el mismo tipo de agua corriente potable, tomada del Canal de Isabel II de la Comunidad de Madrid [5]. Las propiedades químicas de esta agua se resumen en la tabla 2.4.

Características del agua de la Comunidad de Madrid

<i>Origen</i>	<i>Dureza</i>	<i>pH</i>		<i>Contenido en Cl</i>
Terreno granítico con bajo contenido en sales	Blanda 25 mg CaCO ₃ /l	Min.	Máx.	1 – 1,5 mg/l
		7	8,5	

Tabla 2.4. Propiedades químicas del agua empleada

Al tratarse de agua apta para el consumo humano cumple con los requisitos mínimos exigidos por la actual EHE 08.

El pH se sitúa al menos dos puntos por encima el mínimo determinado según la norma UNE 7234:1971, que indica que éste valor no deberá descender por debajo de cinco si se pretende evitar alteraciones en el fraguado y disminuciones excesivas de la resistencia y de la durabilidad. El contenido en ión cloro también se encuentra muy por debajo de los tres gramos por litro que fija la norma UNE 7178:1960, y que favorecerían la corrosión de las armaduras, además de otras alteraciones en el hormigón.

Su bajo contenido en sales permite la elaboración de las placas sin miedo a la aparición de eflorescencias o de fenómenos expansivos a largo plazo [6], así como, la disminución progresiva de la resistencia mecánica. Se entiende que el contenido en sustancias orgánicas es nulo.

2.2.3. Áridos.

En la presente investigación se realizaron ensayos con mortero y hormigón, luego fueron necesarios tanto los áridos gruesos (grava), como los áridos finos (arena). Las propiedades de estos áridos son las siguientes:

Árido grueso

La grava empleada en la fabricación del hormigón era del tipo: Grava 4/20 – M – S. Este tipo de grava está formada por una mezcla de áridos de machaqueo y rodados que se retienen según la norma UNE EN 933-2:1996, entre el tamiz de 20 mm (tamaño máximo recomendado por la actual instrucción EHE 08) y el tamiz de 4 mm, y que son de naturaleza silícea extraídos en cantera.

Fig. 2.2. Tipo de Árido Grueso

Este tipo de áridos que contienen mezcla de los dos existentes (rodado y de machaqueo), proporcionan al hormigón dos efectos beneficiosos, por un lado, mejoran la docilidad y facilidad a la hora de trabajar la mezcla del hormigón fresco con ayuda del árido rodado, y por otro, mejoran la trabazón y por ende la resistencia a tracción con ayuda del árido de machaqueo. Además, se tiene la seguridad de emplear piedras duras y limpias para construir las placas, desprovistas de polvo que puede provocar fisuras en las primeras edades del hormigón [7].

Como tratamiento previo, se extrajeron de forma manual durante el tamizado todas las posibles lascas que dificultasen la compactación del hormigón y disminuyesen la resistencia y compacidad de la pieza final.

En cuanto la dureza de los áridos empleados, se entiende que son de dureza media y que por tanto ofrecen una resistencia que oscila entre los 50 MPa y los 100 MPa, siendo su densidad mayor de $2,3 \text{ Kg/dm}^3$ y menor de $2,6 \text{ Kg/dm}^3$. Por otro lado, esta rigidez del árido es proporcional a su oposición a la retracción del hormigón.

Además indicar, que desde el punto de vista de la durabilidad, siempre es preferible el empleo de áridos silíceos como los empleados para la realización de esta tesis, siendo éstos los más idóneos para colocarse en ambientes agresivos.

Árido fino

Para la realización de los morteros y de los hormigones fue necesario el empleo de arena de buena calidad, ya que como es sabido este es el árido de mayor responsabilidad en la elaboración de un hormigón [8]. Las arenas de río, generalmente son las más idóneas, no siendo necesario preocuparse por la resistencia que aportan y por su durabilidad, además no es necesario lavarlas previamente.

Fig. 2.3. Tipo de Árido Fino

En nuestro caso se empleó una árido fino del tipo: Arena 0/4 – M – S, es decir, formada por una mezcla de áridos de machaqueo y rodados que se retienen según la norma UNE EN 933-2:1996, entre el tamiz de 4 mm y el fondo, y que son de naturaleza silícea.

El contenido máximo de finos no debe de superar en este tipo de arenas, empleadas para estructuras ubicadas en ambiente normal, al 10% en peso del contenido total de la arena. Con esta limitación se cumple que el contenido en finos es inferior a los 175 Kg/m³ que fija la actual EHE – 08 como máximo. El marcado CE del material garantiza que no se sobrepasan estos valores cumpliendo con la normativa vigente.

Otro factor de la arena que es de gran importancia de cara a dosificar morteros y hormigones, es la humedad que contiene previamente [9]. Para determinar este contenido en humedad, se tomó una muestra de tres kilogramos de material y se secó durante 24 horas en una estufa a una temperatura de 123 °C, midiendo después la variación entre el peso inicial y final para obtener el tanto por ciento de agua en el árido, la ecuación empleada fue la siguiente:

$$Humedad = \frac{P_{Húmedo} - P_{Seco}}{P_{Seco}} \times 100 \quad (1)$$

Sustituyendo en la ecuación (1) los datos de peso húmedo inicial de 3000 g y peso seco final de 2885,2 g, obtenemos que para el caso de la arena la humedad sea de aproximadamente el 4%. Este porcentaje se tuvo en cuenta para calcular el agua necesaria para la dosificación, ya que en caso contrario se estaría disminuyendo la resistencia de la pieza final.

2.2.4. Armaduras de acero.

Para la realización de la losa de hormigón, cuyo proceso de ejecución se describe en el capítulo tercero, fue necesario el empleo de un mallazo electrosoldado que resistiese los esfuerzos de tracción a los que iba a estar sometida en los ensayos.

El tipo de acero empleado en las mallas era un B 500 S de diámetro 6 mm, donde la letra B indica que se trata de aceros para hormigón, el número indica el límite elástico garantizado en N/mm^2 y la letra S indica que se trata de aceros soldables. Dichas barras están normalizadas en España según la norma UNE EN 10080:2006.

Fig. 2.4. Armadura de acero de la losa

Las características de este tipo de barras en el ensayo a tracción según fija la actual EHE-08 se describen en la tabla 2.5.

Características mecánicas del acero B 500 S sometido al ensayo de tracción

<i>Límite Elástico (MPa)</i>	<i>Carga unitaria de rotura (MPa)</i>	<i>Alargamiento de rotura (%)</i>	<i>Alargamiento total bajo carga máxima (%)</i>
≥ 500	≥ 550	≥ 12	≥ 5

Tabla 2.5. Características del ensayo a tracción.

En nuestro caso se dispuso de un mallazo estándar electrosoldado, como ya se indicó antes, cuyas retículas cuadradas eran de 150 mm de lado. El principal motivo por el cual se empleó este sistema y no otro realizado in situ, fue por la comodidad a la hora de realizar el montaje, así como, para evitar errores en el proceso de ejecución [10]. Además, previamente a su puesta en carga se verificó el correcto estado de todas las soldaduras en cada uno de los nudos de la malla, ya que la presencia de algún tipo de resalto o punto conflictivo puede disminuir de forma considerable la resistencia a fatiga del acero empleado.

Como se puede ver en la imagen 2.4, se emplearon arañas de diámetro 10 mm y 30 cm de altura para poder manipular la losa durante los ensayos, también del mismo acero y conformadas mediante dobladora manual. Además se usaron separadores de mortero de tres cm de altura para evitar el contacto de la armadura con la cara inferior del encofrado, atados con alambre de acero a la malla.

2.2.5. Soportes aislantes

Para separar las losas construidas del suelo y estudiar la repercusión que tiene la interposición de un aislante acústico como capa desolidarizadora entre ambas superficies, se diseñaron unos soportes elásticos encargados de repartirse de manera regular a lo largo de toda el área de las placas, produciendo así un efecto de flotabilidad que atenuase los impactos provocados sobre su superficie.

Los aislantes se elaboraron mediante poliestireno expandido (EPS), variando con diversas texturas y geometrías la superficie de apoyo sobre el forjado.

El poliestireno expandido se caracteriza por tener el 98% de su volumen ocupado por aire [11]. Se caracteriza por tanto por ser un material muy liviano con densidades que oscilan entre los 9 y los 55 Kg/dm³, y que es estable frente a los materiales de construcción comunes como el hormigón. Además, al no constituir un sustrato nutritivo para microorganismos, no se pudre y descompone, lo que le convierte en un material con un ciclo de vida útil muy amplio.

Las principales cualidades físicas de esta espuma rígida de poliestireno son:

- Prácticamente no absorbe la humedad del aire y su absorción en presencia del agua es casi nula, por carecer de capilaridad.
- Bajo coeficiente de conductividad térmica ($0,029 \text{ W/mK} < \lambda < 0,041 \text{ W/mK}$)
- No atacable por los álcalis ni ácidos comunes, y resistente a agentes bióticos.
- Difícil de inflamar, siendo un material auto-extinguible.
- Elevada resistencia mecánica y buen comportamiento acústico frente al ruido de impacto debido a su baja rigidez dinámica.
- Soporta temperaturas comprendidas entre +90°C y -150°C.

Estas propiedades hacen del poliestireno uno de los plásticos más empleados en la construcción, por su versatilidad a la hora de emplearse tanto en cubiertas y azoteas, como en tabiques y fachadas [12].

También se empleó para la realización de algunas bandas aislantes de poliestireno expandido elastificado (EEPS), que se obtiene aplicando fuerzas de compresión reguladas al EPS, de forma que rompe sus partículas internas, confiriendo al material una elasticidad y una rigidez dinámica que optimizan sus propiedades acústicas [13].

Las planchas aislantes de EPS de 50 x 50 cm, con diferentes geometrías diseñadas fueron las siguientes:

EPS - 01

Imagen diseñada en FreeCAD EPS - 01

Imagen real de EPS - 01

EPS - 02

Imagen diseñada en FreeCAD EPS - 02

Imagen real de EPS - 02

EPS - 03

Imagen diseñada en FreeCAD EPS - 03

Imagen real de EPS - 03

EPS - 04

Imagen diseñada en FreeCAD EPS - 04

Imagen real de EPS - 04

EPS - 05

Imagen diseñada en FreeCAD EPS - 05

Imagen real de EPS - 05

EPS - 06

Imagen diseñada en FreeCAD EPS - 06

Imagen real de EPS - 06

2.3. Equipos empleados

Para trabajar con los materiales presentados en el apartado anterior, fue necesario disponer de los equipos disponibles en el Laboratorio de Materiales de Construcción y el Laboratorio del Grupo Sensores y Actuadores de la ETSEM. Dichos equipos se describen en este apartado, indicando sus características y utilidades.

2.3.1. Tamizadora

Cuando se dosifica un hormigón es imprescindible controlar su granulometría; para ello se realiza un análisis que consiste en determinar la distribución por tamaños de los áridos que lo van a conformar, clasificándolos dentro de unos límites y determinando posteriormente el porcentaje de árido que existe en cada una de estas fracciones.

El estudio de la distribución por tamaños de un determinado árido se realiza mediante la criba del mismo a través de una serie de tamices normalizados. Estos tamices pueden corresponder a distintas series en función de la normativa empleada, en nuestro caso se empleó la clasificación recogida en la norma UNE-EN 933-2. Dicha serie y la tamizadora empleada se muestran en la tabla 2.6.

Ensayo de tamizado según norma UNE-EN 933-2	
<i>Serie de tamices, abertura en mm</i>	<i>Tamizadora de vaivén</i>
63,00
31,50	
16,00	
8,00	
4,00	
2,00	
1,00	
0,50	
0,25	
0,125	
0,063	
Fondo	

Tabla 2.6. Ensayo de tamizado y maquinaria

Estos ensayos de tamizado se determinan de manera independiente para cada tipo de árido que vaya a ser empleado en la dosificación del hormigón. En este proceso, por el tamiz mayor de la serie, pasará una cierta cantidad de material, y otra quedará retenida, la cantidad pasante llegará al tamiz inmediatamente inferior y se comienza de nuevo el proceso que continua hasta llegar al fondo.

La relación entre el peso retenido por cada tamiz con respecto al peso total de la muestra, nos da el porcentaje parcial retenido por ese tamiz. Aunque, como veremos en el capítulo tres para realizar ajustes y cálculos granulométricos emplearemos los porcentajes retenidos acumulados.

2.3.2. Estufas de secado

Es sabido, que antes de comenzar a tamizar los áridos y previamente a la realización de un ensayo granulométrico, es necesario secar los áridos. En general, cuando se trabaja en obra, este secado se realiza al aire y en condiciones atmosféricas. Pero cuando trabajamos en laboratorio y se desea obtener unos resultados fiables controlando en todo momento el contenido en agua de la mezcla, este secado se realiza con ayuda de unas estufas especiales.

Este proceso de secado cobra especial interés en el caso de las arenas, ya que evita que éstas se apelmacen formando terrones por efecto de la humedad y queden retenidas en tamices de más abertura que los que corresponderían al tamaño real de la arena, modificando por tanto los resultados del ensayo granulométrico.

En el laboratorio de materiales de construcción dispusimos de las siguientes estufas:

Fig. 2.5. Estufas de secado; a) IEP CONTROL 150L b) LOBOLAN 80L

Ambas estufas poseen un aislamiento interno de alta resistencia para evitar fugas de temperatura, un termostato regulable que permite controlar a tiempo real la temperatura interior y un interruptor de apagado manual en caso de emergencia.

Estas estufas, son empleadas generalmente para pequeñas cantidades y ensayos de arenas que van a ser empleadas posteriormente en la elaboración de morteros con características especiales, o que por alguna razón, requieren de un control específico en su dosificación.

2.3.3. Amasadora y moldes para mortero

El amasado del mortero es una parte crucial dentro del proceso de elaboración del mismo, ya que de su correcta ejecución depende que el compuesto final alcance las condiciones de resistencia y durabilidad exigidas en el proyecto. En general, el amasado a máquina es más perfecto y económico que el manual (salvo que se trate de cantidades muy pequeñas y controladas).

El amasado mecánico presenta ventajas desde el punto de vista de la homogeneidad de la masa y de su trabajabilidad, ya que cuanto más se prolonga su duración, más se mejora la plasticidad y la retención de agua al introducirse aire en la masa. Por esta razón, es necesario controlar muy bien los tiempos de amasado en morteros aireados, a fin de no disminuir su resistencia elevando en exceso el contenido en aire ocluido.

En nuestro caso, para la elaboración de probetas previas a los ensayos de flexión y compresión normalizados, se empleó una amasadora planetaria como la representada en la figura 2.6. Por otro lado, para la elaboración de las baldosas de gran tamaño, se empleó la hormigonera también descrita en este capítulo por tener capacidad para albergar volúmenes mayores.

Fig. 2.6. Amasadora planetaria modelo IB 32 – 040V01 (IBERTEST S.A.)

Breve descripción:

Bastidor que alberga en su cuerpo todos los elementos de accionamiento y mando:

- Cazo para amasar.
- Paleta de amasado.
- Motor.
- Módulo electrónico programable.
- Silo para verter las arenas.
- Temporizador.
- Conexión a 230V monofásica.

Lo ideal durante el proceso de amasado es verter primero parte del agua, después el cemento y la arena conjuntamente (en nuestro caso no es posible, así que se trata de alternar cantidades de cada uno), y finalmente, el resto del agua poco a poco. El tiempo de amasado debe superar el minuto de actuación, pero sin ser excesivo a fin de evitar la disgregación de los áridos, siempre bajo supervisión visual [14].

Una vez elaborada la pasta de mortero, si fuese conveniente, se puede realizar el ensayo de consistencia con una parte del mismo. Para ello se coloca el mortero dentro de un molde y encima de una mesa de sacudidas, midiendo después de realizar los golpes el escurrimiento que sufre la masa. De esta forma se puede determinar la oposición que el mortero presenta a la deformación, influyendo claro está, la relación agua/cemento que determinará una mayor o menor trabajabilidad y resistencia.

Pero en general, si la consistencia está determinada, se procede a elaborar las probetas que servirán para realizar los ensayos a flexión y compresión. Para ello se emplearon moldes tripes de 40x40x160 mm de acuerdo con la norma UNE EN – 196-1.

Estos moldes, como se puede ver en la figura 2.7, son totalmente rígidos y elaborados con acero templado rectificado, de forma que sean no absorbentes y no influyan en el proceso de fraguado del mortero. Sus caras son totalmente planas y estancas, con ángulos rectos que cumplen con las tolerancias de la normativa citada. Además, y con el objeto de facilitar el desmoldado de las probetas, deben untarse previamente al vertido con aceite mineral para evitar la adherencia del mortero a las paredes del molde. En nuestro caso, y con motivo de la ejecución de las planchas de mortero, se tuvieron que emplear unos encofrados manuales que se describirán en el capítulo tercero.

Para favorecer el asiento del mortero, y la distribución uniforme de toda la pasta dentro del molde, es conveniente someterlo a una serie de sacudidas. Para ello se empleó una compactadora horizontal como la que muestra la figura 2.8. Dicha maquina consta de una bancada metálica con dos brazos paralelos unidos entre sí a un eje de giro y por el otro unidos a la mesa de compactación donde se colocan los moldes normalizados, también dispone de un cuadro de mando que permite controlar la duración de los impactos y apagado/encendido manual.

Fig. 2.7. Moldes UNE EN 196-1.

Fig. 2.8. Compactadora horizontal Modelo CIB-801 IBERTEST

2.3.4. Prensas para Morteros

Una vez elaboradas las probetas de mortero con la dosificación escogida se hace necesario someterlas a ensayo con ayuda de una prensa hidráulica para conocer sus resistencias a flexión y a compresión.

Fig. 2.9. Prensa hidráulica modelo AUTOTEST 200-10SW

Para la realización de nuestros ensayos se empleó la prensa de la figura 2.9 que consta de un bastidor metálico, que aloja la central hidráulica con los correspondientes dispositivos de ensayo a flexión y compresión. Además, consta de un equipo de control por ordenador que nos aporta información a tiempo real del tiempo que tarda en romperse el testigo, y de la fuerza a la que se encuentra sometido en cada momento. Al finalizar el ensayo (justo cuando se produce la rotura), la máquina se detiene de forma automática y proporciona los valores de la resistencia del material ensayado.

Para el manejo de la prensa se contó con la ayuda del técnico del laboratorio de materiales de construcción. Una vez realizado un ensayo, es necesario limpiar la superficie de apoyo de las probetas, ya que en caso de existir irregularidades estas pueden condicionar el resultado final al producir sobretensiones en zonas muy localizadas, favoreciendo que el prisma de mortero rompa por esas zonas preferentemente. Además, la colocación de los testigos sobre los apoyos se debe realizar de la forma más simétrica posible, tal y como se describe en la norma UNE EN 1015-11 para ensayos con morteros.

2.3.5. Hormigonera y moldes para hormigón

Para la elaboración de probetas de hormigón y de las baldosas de 50 x 50 cm no fue posible emplear la amasadora de la figura 2.6, ya que el volumen de la mezcla es muy superior y además el contenido de árido grueso hace que no sea posible emplear la tobera para áridos. Es por ello que se recurrió al uso de una hormigonera eléctrica capaz de conectarse a 230 V y con capacidad de más de 50 litros.

Por otro lado, los moldes normalizados para realizar probetas de hormigón son los que describen las normas UNE – EN 12390-1: 2001 e ISO 1920. Esta normativa indica que los moldes para probetas deben ser rígidos y no absorbentes, en nuestro caso son de acero inoxidable. Además, deben de ser estancos para evitar la pérdida excesiva de agua de amasado y deben estar untados en aceite mineral para facilitar el desmolde posterior evitando la adherencia.

Las dimensiones de las probetas cilíndricas son de 30 cm de altura y 15 cm de diámetro, aunque existen moldes de dimensiones menores o de forma cúbica, siendo necesario en estos casos aplicar un factor de conversión para obtener resultados válidos. También se empleó una barra de picado de 60 cm de longitud y 16 cm de diámetro con punta troncocónica redondeada en su extremo final, que se emplea para trabar las tres tongadas en las cuales se deben moldear las probetas, siendo necesario unir las capas superficiales con las inferiores.

(a)

(b)

Fig. 2.10. Amasadora de hormigón. (a) Materiales pesados y hormigonera antes de la elaboración; (b) Hormigonera en pleno funcionamiento elaborando HM – 30.

El tiempo de elaboración de este tipo de probetas varía en función de la dosificación ya que contra más seca sea es más difícil de trabajar.

2.3.6. Prensas para Hormigón

Ya elaboradas las probetas de hormigón, fue necesario someterlas a ensayo para verificar que la dosificación escogida cumplía con las condiciones de resistencia exigidas en el trabajo. Para ello se empleó una prensa de ensayo a compresión regida por las normas UNE-EN 12390-3:2003 e ISO 4012.

Según la normativa anterior, las prensas de ensayo a compresión deben limpiarse previamente para que la superficie de contacto de los platos sobre la probeta sea lo más uniforme posible. Además, es conveniente para mejorar la planeidad de las caras refrentar con mortero de azufre la cara superior de las probetas cilíndricas, ya que ésta presenta más irregularidades que la cara inferior. Antes de comenzar el ensayo, debe verificarse que las superficies de la cara superior de la probeta y del plato que desciende de la presea se encuentran en contacto, a fin de realizar un ensayo uniforme.

La máquina debe ser capaz de aplicar la fuerza de manera continua y sin saltos, a velocidad constante de forma que el incremento de carga por segundo produzca aumentos de tensión de aproximadamente $0.5 \pm 0,2 \text{ N/mm}^2$. En nuestro caso se emplearon probetas normalizadas (ver apartado 2.3.5), pero en caso de emplear probetas de dimensiones o geometrías diferentes, se debe introducir un factor de corrección.

(a)

(b)

Fig. 2.11. Equipos de ensayo a compresión. (a) Prensa de compresión ICON, IBERTEST S.A. (b) Probeta tras la realización del ensayo.

Como se puede ver en la figura 2.11, se trata de una maquina de ensayo formada por dos columnas de acero fijas, mecanizado en acero con un plato ajustable y un pistón con un plato fijo, que se mueven en vertical a través de una central con un sistema hidráulico. El sistema de mando se programa con el software WINTTEST.

2.3.7. Cámara húmeda

Las probetas que se ensayan según el apartado 2.3.6 deben conservarse en estado húmedo hasta el momento de la rotura a compresión. Es por ello que para la realización de esta tesis se dispuso de una cámara húmeda como la mostrada en la figura 2.12, que permitió conservar las probetas al 95% de humedad hasta una hora antes del ensayo durante los 28 días posteriores a su elaboración.

La cámara húmeda empleada es utilizable tanto para probetas de mortero, como de hormigón. Consiste en un armario metálico con regulador de temperatura – humedad, datos que son visualizados mediante relojes digitales. Como es lógico, dispone de una toma de agua para obtener las condiciones de humedad deseada, y de un desagüe por si se produjesen inundaciones.

Para la conservación de las planchas de 50 x 50 cm, fue necesario emplear la habitación húmeda disponible en el laboratorio.

Fig. 2.12. Cámara Húmeda

2.3.8. Esclerómetro

Los métodos esclerométricos permiten determinar la dureza superficial de las probetas de hormigón mediante la energía residual de un impacto sobre la superficie del hormigón, (medición mediante el rebote).

En nuestro caso este método fue empleado para estudiar posibles diferencias en la dureza de la superficie de las planchas que pudiesen condicionar el ensayo de ruido de impacto. Para ello se empleó un esclerómetro Schmidt (UNE-EN 12504-2:2002). Éste método es el más sencillo y consiste en el rechazo de un martillo ligero, constituido por un pequeño cilindro macizo de acero que se hace chocar sobre la superficie de las baldosas.

En realidad se trata de un ensayo de evaluación cuyos resultados deben ser interpretados cuidadosamente, ya que dependen del tamaño y rigidez de la pieza.

2.3.9. Amplificador

En nuestro equipo de medida, la señal eléctrica emitida por nuestro generador de funciones, no es lo suficientemente estable como para poder ser enviada directamente al vibrador que golpea la losa, por lo que necesita un amplificador de potencia para que esta señal llegue con la amplitud necesaria.

El amplificador construido, es de diseño propio y la particularidad que tiene con respecto a los comerciales es su capacidad de amplificar señales de frecuencia menor a 15 Hz. Dicho amplificador consta de un previo que nos permite sumar a la señal un potencial continuo y regulable.

Por otro lado, las características generales del amplificador son: Factor de ganancia en voltaje 10, corriente máxima de salida 1A, voltaje máximo de salida 30V, protegido contra cortocircuito y amplificación sin distorsión apreciable desde los 0Hz hasta los 10kHz.

El conjunto generador y amplificador nos permite aplicar señales de frecuencias muy estables y variables, que pueden ser reguladas por nosotros en todo momento. El esquema electrónico del amplificador construido es el siguiente que se muestra en la figura 2.13.

Fig. 2.13. Esquema Electrónico del Amplificador de Potencia

2.3.10. Acelerómetro

Para la realización de las medidas se utilizó un transductor capaz de medir las vibraciones producidas en los edificios, y aquellas que tienen su origen en la maquinaria instalada dentro de la construcción. Es por ello que se dispuso de un acelerómetro de alta sensibilidad capaz de medir vibraciones de muy bajas frecuencias.

Dicho acelerómetro triaxial (Fig. 2.13) capaz de medir vibraciones en sus tres ejes está diseñado con un cristal piezoeléctrico en modo corte, eliminando prácticamente tensiones de base, transitorios térmicos y otros efectos que aparecen a bajas frecuencias como las estudiadas en este trabajo. Al tratarse a su vez de un acelerómetro activo requiere de una fuente de corriente constante. A pesar de ser de acero inoxidable, su carcasa está eléctricamente aislada y se caracteriza por su fácil utilización.

Acelerómetro modelo AC032 CESVA

<i>Imagen</i>	<i>Características</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Salida: IEPE • Transductor: Piezoeléctrico • Construcción: Cortadura • Sensibilidad: $500 \pm 5\%$ mV/g • Rango dinámico de aceleración: ± 12 g • Aceleración máxima de choque: 2000 g • Margen frecuencial ($f_{10\%}$): 0,13 .. 4800 Hz • Frecuencia de resonancia: 9 kHz • Sensibilidad cruzada: $< 5\%$ • Ruido intrínseco (0,5.. 20kHz): < 26 μg • Alimentación: 2 – 20 mA cc • Tensión de salida de polarización: 12 – 14 V • Impedancia de salida: < 100 Ω

Fig. 2.14. Modelo del acelerómetro empleado en la toma de resultados.

El margen de temperaturas de dicho acelerómetro oscila entre los -30°C y los 90°C , por lo que se ha podido utilizar sin tener que regular las temperaturas ambientales en el laboratorio de sensores y actuadores de la ETSEM. Es importante destacar, que para poder fijar el acelerómetro a las placas fue necesario emplear discos de cera de abeja que previamente se calentaba y vertía sobre la superficie de las placas. Estos discos permiten homogeneizar la superficie de contacto para que la toma de resultados sea lo más fidedigna posible.

Además para la medición de vibraciones según el CTE-DB HR se empleó un vibrómetro triaxial de altas prestaciones de la compañía CESVA® modelo VC431 capaz de medir a tiempo real las excitaciones producidas por un vibrador electromagnético en la superficie de las planchas.

Los datos eran capturados del acelerómetro y tratados después con ayuda del programa CESVA Studio Editor®, marca propia del vibrómetro que permite obtener las gráficas resultantes de las medidas tomadas por el acelerómetro ajustándose en función de sus sensibilidad. De igual modo, la intensidad con que golpeaba el vibrador sobre las superficies de las planchas era regulada con ayuda de una fuente de alimentación disponible en el laboratorio de automatismos, y controlada con ayuda de un osciloscopio TEKTRONIX®.

2.4. Bibliografía

- [1] *Cement and concrete composites*. Vol. 21, nº2. Editor R.N. Swamy. Special issue on Portland Limestone Cements. (1999).
- [2] Morano Rodríguez, A. J. (2003). *Influencia de las características mecánicas de adiciones calizas de distinto tamaño de grano, en cementos portland con diferentes contenidos de C₃A*. Departamento de materiales de construcción, ETSI de Minas, UPM, 2003.
- [3] Blanco Varela, M.T. Aguilera, J & Martínez Ramírez, S. (2006). *Effect of cement C₃A content, temperatura and storage médium on thaumasite formation in carboned mortars*. Cement and Concrete Research, Vol. 36, pp. 707 – 715.
- [4] García Meseguer, A. Morán Cabré, F. Arroyo Portero, J. C. (2011). *Jiménez Montoya. Hormigón Armado*. Editorial Gustavo Gil, 15ª Edición, Barcelona.
- [5] Canal de Isabel II. (2012). *Informe anual sobre la calidad del agua en Madrid*. Madrid: Canal de Isabel II.
- [6] López-Gayarre, F. Blanco Viñuela, R. Serrano López, M.A. & López Colina, C. (2015). *Influence of the water variation on the mechanical properties of concrete manufactured with recycled mixed aggregates for pre-stressed components*. Construction and Building Materials, Vol. 94, September 2015, pp. 844 – 850.

- [7] Fernández Cánovas, M. (1996). *Hormigón*, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 4ª Edición.
- [8] Delibes, A. (1987). *Tecnología y propiedades mecánicas del hormigón*, INTEMAC, Madrid, 1987.
- [9] Hasdemir, S. Tugrul, A. & Yilmaz, M. (2016). *The effect of natural sand composition on concrete strength*. Construction and Building Materials, Vol. 112, June 2016, pp. 940 – 948.
- [10] Calavera, J. (1997). *Armaduras pasivas para hormigón estructural: Recomendaciones sobre proyecto, detalle, elaboración y montaje*, Cuadernos técnicos, nº1, Calidad Siderúrgica, Madrid, 1997.
- [11] Rodríguez Delgado J. (2010). *Plásticos*. Cuadernos técnicos de la asignatura de Materiales II, Escuela Técnica Superior de Edificación, UPM.
- [12] EPIFOR. (2015). *Protección y rehabilitación térmica de edificios*. Islas Baleares; Poraxa
- [13] Seung Yup Yoo & Jin Yong Jeon. (2014). *Investigation of the effects of different types of interlayers on floor impact sound insulation in box-frame reinforced concrete structures*. Building and Environment, Vol. 76, June 2014, pp. 105 – 112.
- [14] Fernandes, V. Sivla, L. Ferreira, V. M. & Labrincha, J. A. (2005). Influence of the kneading water content in the behavior of single-coat mortars. Cement and Concrete Research, Vol. 35, Issue 10, October 2005, pp. 1900 – 1908.

CAPÍTULO 3**PROCESO EXPERIMENTAL****3.1. Introducción**

Los ensayos previos comprenden todas aquellas acciones realizadas antes de comenzar el experimento, y que se encargan de verificar que los materiales y procesos de ejecución previstos posteriormente son los adecuados para conseguir un mortero u hormigón que posea las condiciones de resistencia y durabilidad que se exigen en el proyecto en cuestión.

En este apartado se incluyen tanto las tareas de validación de los materiales y dosificaciones empleadas, como aquellas tareas propias del diseño del experimento tales como el diseño de las planchas elásticas, construcción de los equipos de medida y validación del sensor capacitivo. Los trabajos experimentales realizados se muestran en forma de tablas o gráficos que reflejan los valores de resistencia, sensibilidad, tamaño...etc. Estos trabajos previos fueron necesarios para la posterior extracción de resultados y conclusiones en esta tesis.

A su vez, se describe la metodología con que se llevaron a cabo y la secuencia de operaciones realizadas en el laboratorio, contrastándola con algunos contenidos teóricos de los ya expuestos en el capítulo primero. La necesidad de seguir las operaciones tal y como dicta la normativa actual, no es otra que la de poder obtener resultados extrapolables; así, todas las secuencias realizadas en el laboratorio fueron ejecutadas siguiendo las pautas de la norma UNE, ISO o EHE-08, que regula la forma de proceder en estos casos.

3.2. Ensayos granulométricos

Los ensayos granulométricos tienen por finalidad determinar la distribución de los tamaños de las partículas que conforman el árido con el que vamos a trabajar. Para ello, se separa el árido en diferentes fracciones de arena o grava del mismo tamaño, y posteriormente se determina el porcentaje de árido que queda retenido en cada una de esas fracciones.

Antes de proceder a la criba de los áridos haciéndolos pasar a través de los tamices normalizados UNE – EN 933-2, se deben secar para evitar que el contenido en humedad que estos puedan tener favorezca la colmatación de los granos, haciendo que estos queden retenidos en tamices de más abertura que los que corresponderían al tamaño real del árido seco.

Para determinar el contenido en humedad de la arena y la grava, se procedió al secado de una parte de la muestra y se halló posteriormente la diferencia, obteniendo el tanto por ciento en humedad de cada uno de los áridos como muestra la tabla 3.1.

Contenido en humedad de los áridos empleados	
<i>Arena</i>	<i>Grava</i>
Peso Húmedo: 3000g	Peso Húmedo: 4500g
Temperatura de secado: 123 ⁰ C	Temperatura de secado: 123 ⁰ C
Peso Seco: 2885,2g	Peso Seco: 4493.7g
Tiempo de secado: 24 horas	Tiempo de secado: 24 horas
$Humedad = \frac{Peso_{Húmedo} - Peso_{Seco}}{Peso_{Seco}} \cdot 100 \quad [\%]$	
Humedad de la arena: 4%	Humedad de la grava: 0.14%

Tabla 3.1. Determinación del contenido de humedad

Una vez realizado el secado de las muestras, se procedió al tamizado de las mismas con ayuda de una tamizadora de vaivén eléctrica. Para ello se colocó una muestra de 1 Kg de arena en la tamizadora durante un minuto, obteniendo después las cantidades en peso que quedaron retenidas en cada tamiz. Posteriormente se repitió la operación, esta vez con la grava y con una cantidad de 3.3 Kg. Los resultados de las cantidades retenidas en cada tamiz para los diferentes áridos se muestran en la tabla 3.2.

Los tamices empleados corresponden a la serie UNE-EN 933-2:1996, cuyas aberturas están en progresión geométrica de razón dos y las medidas vienen dadas en mm.

Resultados del ensayo de tamizado

<i>Tamización de la Arena: Cantidad total 1000g</i>								
Tamiz	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063	Fondo
Retenido	37.1	129.7	189.9	264.6	246	83.6	30.9	7.8
<i>Tamización de la Grava: Cantidad total 3300g</i>								
Tamiz	32	16	8	4	2			Fondo
Retenido	0	1557.8	1297.8	429.8	8.30			9.6

Tabla 3.2. Ensayo de Tamizado para la grava y la arena

Una vez realizado el cribado de los áridos se procedió al dibujo de las curvas granulométricas. Estas se realizaron tomando en el eje de abscisas las aberturas de los tamices y en el eje de ordenadas los porcentajes de árido que pasan por cada tamiz.

No obstante, como indica la normativa EHE – 08, no es posible establecer de manera general una curva granulométrica óptima única, debido a que el hormigón a elaborar contendrá una mezcla de arenas y gravas en proporciones óptimas (y en algunas ocasiones tres o más grupos de áridos). Además, las resistencias exigidas y los defectos de ejecución pueden condicionar los resultados ampliando así la cantidad de variables que hacen muy difícil el control de los áridos [1].

Los parámetros que determinan fundamentalmente las características de un árido son:

1. Tamaño máximo del árido (D): Es la mínima abertura de tamiz por el que pasa más del 90% en peso del árido tamizado, debiendo pasar además la totalidad del árido por el tamiz de abertura doble. En nuestro caso, para la arena se corresponde con el tamiz 4, y para la grava con el tamiz 16.
2. Tamaño mínimo del árido (d): Es la máxima abertura por el que pase menos del 10% en peso del árido tamizado. En nuestro caso para la arena se corresponden con el tamiz de 0.063, y para la grava con el tamiz de 2.

En general, cuanto mayor es el tamaño máximo del árido más pequeña será la superficie específica a mojar, y por tanto a igualdad de cemento, se obtendrá una mayor relación agua/cemento y un consiguiente aumento en la resistencia final. No obstante, algunos estudios demuestran que esto solo es cierto para tamaños de hasta 40 mm [2], ya que para valores superiores las discontinuidades que se introducen son bastante elevadas y dan lugar a problemas como la segregación y descenso de las resistencias esperadas. Además, aunque el tamaño máximo del árido es empleado en obra para disminuir el contenido en cemento, éste viene también limitado por la separación entre armaduras.

En nuestro caso, para la elaboración de probetas se desecharon los áridos de tamaño máximo, ya que al tratarse de un estudio en el que se van a evaluar la transmisión de ondas a través del material, no interesa que existan discontinuidades internas dentro de la composición final, aunque ello implique un gasto adicional de cemento para obtener las resistencias deseadas.

3. Módulo granulométrico (M_g): Con este nombre se denomina a la suma de los porcentajes retenidos y acumulados de la serie UNE hasta la abertura máxima dividida por 100. En nuestro caso vienen reflejados en la tabla 3.4.

El módulo granulométrico nos da una idea del tamaño medio del árido. Conocer su valor es interesante debido a que todas las mezclas de áridos que poseen el mismo módulo precisan la misma cantidad de agua para producir hormigones de la misma docilidad y resistencia, siempre y cuando empleen la misma cantidad de cemento [3].

Ya hemos visto que no es posible establecer de forma genérica una curva granulométrica única. Es por ello que debemos tratar de encontrar una curva adecuada a nuestra composición [4]. En nuestro caso se escogió el método de la parábola de Fuller para áridos de hormigón armado, ya que es un método que ofrece buenos resultados para granulometrías continuas como la nuestra, en la que se encuentran representados todos los tamaños de los granos.

Dicha parábola viene dada por la ecuación:

$$p = 100 \cdot \sqrt{\frac{d}{D}} \quad [\%] \quad (1)$$

donde p es el porcentaje en peso que pasa por cada tamiz, d es la abertura (diámetro) de cada tamiz, y D el tamaño máximo (diámetro) del árido.

Según algunos autores, no es necesario ceñirse a una única curva teórica, sino que basta con que el módulo granulométrico del árido sea el mismo que el de la curva teórica adoptada a igualdad de consistencia, o lo que es lo mismo, que el área encerrada bajo la curva teórica coincida con el área encerrada bajo la curva ajustada.

En la tabla 3.3 se indican los contenidos en peso y en porcentaje de arena, grava y de la mezcla obtenida aplicando el método de Fuller para los áridos disponibles.

Granulometría de áridos por el método de Fuller

Tamiz	Arena				Grava				Fuller	Mezcla
	Pesos (g)		Porcentajes		Pesos (g)		Porcentajes		T.Máx	
	R	R-A	R	Pasa	R	R-A	R	Pasa	32	
32	0	0	0	100	0	0	0	100	100	100
16	0	0	0	100	1557.8	1557.8	47.16	52.84	70.71	70.69
8	0	0	0	100	1297.8	2855.6	86.45	13.55	50.00	46.27
4	37.1	37.1	3.75	96.25	429.8	3285.4	99.46	0.54	35.36	36.76
2	129.7	166.8	16.86	83.14	8.3	3293.7	99.71	0.29	25.00	31.64
1	189.9	356.7	36.04	63.96	0	3293.7	99.71	0.29	17.68	24.38
0.5	264.4	621.3	62.78	37.22	0	3293.7	99.71	0.29	12.50	14.26
0.25	246.0	867.3	87.64	12.36	0	3293.7	99.71	0.29	8.84	4.86
0.125	83.6	950.9	96.09	3.91	0	3293.7	99.71	0.29	6.25	1.66
0.063	30.9	981.8	99.21	0.79	0	3293.7	99.71	0.29	4.44	0.48
Fondo	7.8	1000	100	0	9.6	3300	100	0	0	0

Tabla 3.3. Método de Fuller analítico para la granulometría de los áridos.

Módulos granulométricos

Arena	Grava	Fuller	Mezcla
4.02	8.31	6.69	6.69

Tabla 3.4. Módulo granulométrico de los áridos

Con los datos anteriores se obtuvieron las siguientes curvas granulométricas:

Como se puede apreciar, según la norma alemana DIN – 1045 la curva de nuestra mezcla se corresponde con un Dominio 3, hormigones dóciles y trabajables.

3.3. Elaboración de baldosas

Para la elaboración de las baldosas de esta tesis se emplearon dos conglomerantes diferentes, mortero y hormigón. El proceso de diseño y elaboración de cada uno de ellos es diferente como se muestra a continuación.

Diseño de los morteros

Para la elaboración de los testigos de mortero se siguieron las recomendaciones de la norma UNE EN 196-1. La dosificación empleada en peso seguía una relación 1/3/0,5 (cemento/arena/agua).

Con estas proporciones se elaboraron las probetas de ensayo en moldes RILEM de 40 x 40 x 160 mm. La masa se preparó con ayuda de una amasadora mecánica que regula los tiempos de elaboración (90s a velocidad lenta y 90s a velocidad rápida) y permite obtener una mayor homogeneidad en el mezclado. Las cantidades en peso manejadas fueron las siguientes:

Elaboración de probetas de mortero			
Dosificación en peso 1 / 3 / 0,5 (Cemento / Arena / Agua)			
Material	<i>Cemento</i>	<i>Arena</i>	<i>Agua</i>
Cantidad	450 g	1350 g	234 g

Tabla 3.5. Dosificación de morteros según UNE EN 196-1.

Además de elaborar las probetas testigo, también se realizó el ensayo de consistencia con ayuda de la mesa de sacudidas disponible en el laboratorio. Para realizar este ensayo se coloca una cantidad del mortero elaborado dentro de un molde troncocónico (60 mm de altura, $\varnothing_{INT. Superior}$ de 70 mm y $\varnothing_{INT. Inferior}$ de 100 mm), perfectamente enrasado en ambas caras y centrado en la mesa de sacudidas. Después se activa la máquina y se somete dos veces a 60 golpes la masa elaborada, midiendo finalmente dos diámetros perpendiculares que deja la torta de mortero tras el ensayo. En nuestro caso el diámetro fue de 179 mm, de donde se puede deducir que contábamos con un mortero de consistencia plástica.

Tras la elaboración de las probetas, se dejaron curar en cámara húmeda a unas condiciones del 97% de humedad y a temperatura de 23⁰ C durante un tiempo de 28 días, tal y como marca la norma, antes de ser sometidas a ensayo para evaluar su resistencia a flexión y compresión.

Los ensayos a flexión y compresión descritos con más detalle en el Capítulo 1, nos dieron los siguientes resultados correspondientes a los morteros:

Ensayos a flexión simple

<i>Probeta</i>	<i>Fuerza (KN)</i>	<i>Resistencia (MPa)</i>	<i>t (s)</i>
I	2,162	6,123	53
II	2,930	6,867	59
III	2,654	6,220	53

Tabla 3.6. Resultados del ensayo normalizado a flexión

Ensayos a compresión

<i>Probeta</i>	<i>Mitad</i>	<i>Fuerza (KN)</i>	<i>Resistencia (MPa)</i>	<i>t (s)</i>
I	A	49,22	30,76	22
	B	46,54	29,09	21
II	A	49,36	30,85	22
	B	49,98	31,24	22
III	A	48,07	30,04	21
	B	43,68	27,30	19

Tabla 3.7. Resultados del ensayo normalizado a compresión

Como se puede deducir de las gráficas, la resistencia normalizada a flexión oscila alrededor de los 6,3 MPa y la resistencia a compresión se encuentra en torno a los 30 MPa para el mortero elaborado. Estos valores de resistencia se corresponden con los óptimos para la elaboración de baldosas para solados, y por tanto se validaron.

Por otro lado, la relación arena/agua es elevada, 3/0.5, lo cual favorece que la arena actúe como esqueleto e impida los cambios volumétricos excesivos por secado y los consecuentes problemas por retracción en el mortero. El control de este fenómeno es importante para evitar agrietamientos superficiales en la cara de las baldosas, ya que estos pueden condicionar el ensayo de impactos realizado posteriormente. Además, al contar con tiempos de curado elevados se disminuyó la evaporación de agua en verano. También se controlaron las retracciones excesivas en las planchas mixtas de mortero más EPS, evitando que el aislante absorbiera el agua de fraguado del mortero una vez vertido sobre su superficie.

Tampoco existieron problemas de segregación de fluidos, ya que al contar con una relación agua/cemento de 0.5 no hubo problemas de decantación de la arena por gravedad y los consecuentes problemas de segregación de lechadas superficiales.

Elaboración de las baldosas de mortero

Para la elaboración de las planchas de mortero empleadas en la toma de medidas acústicas se siguió la dosificación empleada en los ensayos con probetas normalizadas. Éstas se construyeron de dos medidas diferentes; grandes de 50 x 50 x 4 cm y pequeñas 30 x 30 x 4 cm de espesor, para estudiar la influencia que el tamaño de la muestra tiene sobre los ensayos acústicos, ya que las condiciones de borde varían de unas superficies a otras influyendo en la transmisión de las ondas a través del material.

Los encofrados se construyeron manualmente en el Laboratorio de Materiales de Construcción con maderas de contrachapado, tal y como muestra la figura 3.1.

Fig. 3.1. Encofrados de madera para baldosas; (a) Encofrado para baldosas de 50 x 50 cm sin aislante, (b) Encofrado para baldosas de mortero de 30 x 30 cm con EPS.

Como se puede apreciar en dicha figura, los encofrados fueron diferentes tratándose de las baldosas con aislante, ya que el EPS debía conformar la base de las planchas desde el momento del vertido del mortero para solidarizar el conjunto final. Las piezas del encofrado estaban unidas entre sí por unas varillas roscadas, sellando los laterales con láminas de polietileno para evitar las pérdidas de mortero. Además las placas del aislante de EPS se calzaban inferiormente para que con el peso del mortero no se hundieran de la posición marcada.

El vertido y compactado de la masa fresca de mortero se hacía de forma manual debido al reducido espesor de las probetas y la fragilidad de los moldes. No obstante, debido a la fluidez de la masa del mortero, no hubo problemas para repartir el vertido de forma homogénea en toda la superficie.

El desencofrado de las mismas se hacía de forma manual y cuidadosamente, ya que al no ir armadas y tratarse de una masa aún fresca las baldosas podían partir a flexión tanto en el desmolde como en el transporte a cámara húmeda. Para facilitar el proceso los encofrados se untaban antes del vertido con aceite.

Diseño de los hormigones

Para la dosificación de los hormigones se empleó el método de Fuller basado en el contenido de cemento que lleva la masa final de hormigón. No obstante, como bien es sabido, aunque la dosificación sea lo más rigurosa posible, siempre es necesario realizar comprobaciones experimentales que garanticen que el hormigón fabricado cumple con las exigencias que dicta el proyecto en cuestión, es por ello que antes de la realización de las baldosas se realizaron ensayos de resistencia tal y como se muestra en este apartado. Por otro lado, al tratarse de hormigones realizados en laboratorio y que no iban a emplearse en obra, se tomaron las condiciones de clase de exposición menos restrictivas [5].

Para el empleo del método de Fuller era necesario que el tamaño máximo del árido estuviese comprendido entre 50 y 20 mm, siendo éste preferentemente rodado, y que la cantidad de cemento no fuese inferior a 300 Kg/m³ y no existiesen secciones fuertemente armadas [1]. Todas las condiciones indicadas se cumplían en nuestro proyecto, por lo que partiendo de ese punto se puede comenzar a realizar tanteos hasta ajustar la dosificación a la parábola de Fuller deseada. Los resultados obtenidos para nuestras dosificaciones se pueden ver en la tabla 3.8.

Elaboración de probetas de hormigón				
<i>Dosificación en peso para la realización de probetas</i>				
Hormigón de baja calidad				
Material	<i>Cemento</i>	<i>Arena</i>	<i>Grava</i>	<i>Agua</i>
Peso (Kg)	5,25	10,34	16,78	3,15
Hormigón de resistencia estructural				
Material	<i>Cemento</i>	<i>Arena</i>	<i>Grava</i>	<i>Agua</i>
Peso (Kg)	7,36	11,86	19,13	2,71

Tabla 3.8. Dosificación de las baldosas de hormigón.

Ensayo de consistencia	
<i>Imagen del ensayo</i>	<i>Valores de consistencia</i>
Hormigón de baja calidad (HM – 20)
	$h_{cono} = 17 \text{ cm}$ Fluida-Líquida
	Hormigón de resistencia estructural (HM – 30)
	$h_{cono} = 1 \text{ cm}$ Seca

Tabla 3.9. Medida de consistencia por el cono de Abrams.

Como se puede deducir de la tabla 3.9, el hormigón de baja calidad era fácilmente trabajable debido a que la relación agua/cemento era muy superior a la de su homólogo de resistencia estructural. La trabajabilidad también era mucho mayor en el caso del hormigón de consistencia fluida, facilitando el relleno de las probetas y posteriores moldes (no siendo necesario prácticamente vibrado), en cambio era de suponer resistencias mayores en el hormigón de menos descenso del cono.

Las probetas empleadas para la realización de los ensayos de resistencia a compresión fueron las normalizadas por la EHE – 08, cilíndricas de dimensiones: diámetro de la base $\varnothing = 15$ cm y altura 30 cm. El método de confección de las mismas fue por picado (tres tongadas de aproximadamente un tercio de la altura de la probeta, mediante 25 golpes distribuidos con barra de acero de punta redondeada por toda la sección del molde), cuidando que las capas se trabaran entre sí. La cara superior, una vez compactada la probeta, fue repasada con pasta de cemento para enrasarla.

La conservación de las probetas se realizó en la cámara húmeda del laboratorio de materiales de construcción, aproximadamente a 23° C y al 98% de humedad durante los 28 días previos a la realización de los ensayos.

Antes de romper las probetas se realizó el ensayo de ultrasonidos en dos sentidos perpendiculares a lo ancho de los cilindros de hormigón para poder correlacionar las velocidades de propagación con la resistencia a compresión esperada [6], obteniendo los resultados mostrados en la tabla 3.10.

Ensayo de ultrasonidos

<i>Esquema del ensayo</i>	<i>Resultados</i>			
	Velocidad probeta de baja calidad (μs)			
	HM – 20 I		HM – 20 II	
	1.1. – 40,9	2.1. – 39,6	1.1. – 42,0	2.1. – 40,2
	1.2. – 38,7	2.2. – 37,2	1.2. – 40,3	2.2. – 37,1
	1.3. – 36,1	2.3. – 36,2	1.3. – 39,2	2.3. – 38,2
	Velocidad probeta de resistencia estructural (μs)			
	HM – 30 I		HM – 30 II	
	1.1. – 36,5	2.1. – 36,4	1.1. – 34,9	2.1. – 36,0
	1.2. – 34,0	2.2. – 34,2	1.2. – 35,3	2.2. – 34,4
	1.3. – 38,2	2.3. – 35,8	1.3. – 36,8	2.3. – 37,9

Tabla 3.10. Resultados de los ensayos de ultrasonidos

Fig. 3.2. Máquina de ensayo y ensayo de ultrasonidos en probetas de hormigón.

A priori los resultados parecían contradictorios, ya que en general la velocidad de propagación aumenta cuando se incrementa la resistencia (al contrario de nuestro caso). Es necesario indicar que los palpadores fueron debidamente aislados con vaselina y que los resultados pueden estar condicionados por la mala trabajabilidad del HM – 30, ya que al ser menos homogéneo fue más difícil distribuirlo en el molde, con la consiguiente formación de imperfecciones en su superficie. Estas imperfecciones superficiales, unidas a una mala transmisión de las ondas de ultrasonido en el aire, pueden condicionar los resultados como en este caso.

Una vez realizados los ensayos de ultrasonidos, se procedió a romper las probetas elaboradas. Para ello, antes de realizar el ensayo a compresión se refrentó con azufre la cara superior de los testigos, con el objetivo de obtener una superficie plana que no condicionase el ensayo tal y como marca la norma (figura 3.3).

Fig. 3.3. Ensayo normalizado a compresión. Laboratorio de materiales de construcción.

Los resultados obtenidos para cada tipo de probeta en el ensayo de compresión son los que refleja la tabla 3.11:

Ensayo a compresión					
Condiciones: Maquina IBERTEST, velocidad de ensayo = 8800 kN/s área en mm ² para el cálculo de la resistencia 17671,46 mm ²					
HM – 20 I			HM – 20 II		
Resistencia		Fuerza	Resistencia		Fuerza
33784 kp	18,747 MPa	0331,3 kN	26359 kp	14,627 MPa	0258,4 kN
HM – 30 I			HM – 30 II		
Resistencia		Fuerza	Resistencia		Fuerza
55819 kp	30,976 MPa	0547,3 kN	56547 kp	31,380 MPa	0554,5 kN

Tabla 3.11. Resultados de la rotura a compresión de las probetas.

Como se puede apreciar en la tabla 3.11, los resultados del HM – 20 dieron resistencias a compresión por debajo de los 20 MPa consiguiendo con ello un hormigón de muy baja calidad. Las diferencias entre los valores de ambas probetas son muy elevadas, quizá debido a desigualdades en el amasado. No obstante, este hormigón no podría ser empleado en obra con aplicaciones en las estructuras tal y como dicta la EHE – 08, pero sí en la cara superior de baldosas acústicas si posteriormente se aplica algún tratamiento frente al desgaste en su cara superficial.

Por otro lado, los resultados del hormigón HM – 30 dieron resistencias propias de un hormigón estructural, contrarrestando así la información inicial obtenida en el ensayo de ultrasonidos. Además, las diferencias menores del 10% entre los valores obtenidos para ambas probetas validaron la dosificación. De otra parte, se comprobó que una buena selección previa de los áridos que permitiese obtener densidades más elevadas estaría correlacionada con elevados valores de resistencia a compresión. Esto último unido a una menor cantidad de agua en el amasado, confirmaba ambas técnicas como herramientas para mejorar la capacidad resistente de las probetas.

Con esto logramos conseguir dos hormigones de características muy diferentes entre sí, que permiten obtener resultados claros en los ensayos a ruido de impacto.

Además, se obtuvo una dosificación óptima (HM – 30) para la posterior ejecución de la losa de grandes dimensiones también realizada en este trabajo, con la salvedad de que ésta si estaba armada a diferencia de las baldosas.

Elaboración de las baldosas de hormigón

Para la elaboración de las baldosas de hormigón se emplearon las distintas dosificaciones trabajadas con las probetas normalizadas, con la idea de obtener un hormigón de baja calidad y otro de resistencia y características propias de un hormigón estructural. Estas se fabricaron en el formato de 50 x 50 x 4 cm ya que era el único que permitía (aunque vagamente) realizar un vibrado mecánico. Los encofrados empleados fueron idénticos a los utilizados en las planchas de mortero, reutilizando las mismas maderas para homogeneizar las dimensiones tal y como muestra la figura 3.4.

Fig. 3.4. Elaboración de baldosas de hormigón; (a) Proceso de fabricación de planchas de hormigón, (b) Estado final de las baldosas elaboradas y apiladas en el laboratorio de automatismos.

Como se puede ver en la figura 3.4b, las baldosas elaboradas obtuvieron las dimensiones deseadas con un error de $\pm 0,5$ cm. A su vez, la superficie de las mismas fue repasada con la llana y con la regla hasta dejarla lo más regular posible, evitando las imperfecciones propias del vertido como se puede ver en la figura 3.4a.

En el caso del hormigón, a diferencia del mortero, sí fue necesario emplear un vibrador mecánico de 6000 c.p.m para distribuir la masa de manera regular en todo el molde, en especial para los hormigones de baja calidad cuya consistencia seca dificultaba enormemente la trabajabilidad del hormigón. El vibrado realizado puede ser considerado efectivo, ya que la aguja se introdujo de forma vertical sobre el molde, y la capa de hormigón tenía un espesor inferior a la altura del vibrador de forma que se aumentaba la eficacia. Los tiempos de vibrado fueron de alrededor de 20 – 30 segundos para no resultar excesivos y favorecer la segregación de los áridos. Por otro lado, para el caso del desmolde se procedió de igual forma que con las baldosas de mortero, untando previamente los encofrados con aceite para favorecer la separación de las maderas.

Para la definición de las planchas de poliestireno expandido (EPS) que sirviesen como capa atenuadora se siguieron criterios de deformación, siempre buscando que esta no fuese superior al 30% de la altura de los tetones. La expresión que rige la deformación producida en un sólido elástico viene dada por [7]:

$$\Delta L = \frac{P \cdot L}{A \cdot E} \quad (2)$$

donde P es la carga que va a soportar el material en N, L es la longitud inicial en m del tetón, A es la superficie de apoyo en m^2 y E es el módulo de elasticidad en MPa.

Debido a la complejidad que conlleva realizar las operaciones manualmente, se decidió automatizar el proceso con ayuda del programa de control numérico (Mastercam), capaz de convertir el diseño base realizado en CAD en lenguaje máquina para su corte. Los tipos de corte diseñados se pueden ver en la figura 3.5.

Fig. 3.5. Dimensiones de los cortes elegidos para las planchas de EPS.

Además, en la tabla 3.12, se puede ver las secuencias de pasadas seguidas para la elaboración de cada plancha:

Control numérico de piezas		
Nº Plancha	<i>Pasada 1</i>	<i>Pasada 2</i>
<i>Plancha 1</i>	Tipo 1	Tipo 1
<i>Plancha 2</i>	Tipo 1	Tipo 3
<i>Plancha 3</i>	Tipo 3	Tipo 3
<i>Plancha 4</i>	Tipo 2	Tipo 2
<i>Plancha 5</i>	Tipo 2	Tipo 4
<i>Plancha 6</i>	Tipo 4	Tipo 4

Tabla 3.12. Secuencias de las pasadas seguidas en el control numérico.

El corte de las piezas se realizaba por un hilo de cobre por el que se hacía pasar una corriente eléctrica, el cable se calentaba y cortaba el EPS. Mediante acciones combinadas de movimientos verticales y avance horizontal de la mesa, se consigue cualquier forma deseada. Por otro lado, haciendo pasar la pieza dos veces, la segunda girada 90° respecto de la primera pasada, se consigue el desarrollo en 3 dimensiones buscado, como se puede ver en la figura 3.6.

Fig. 3.6. Pasadas tipo realizadas por la máquina de control numérico.

Estas planchas fueron empleadas para las baldosas de hormigón y mortero de dimensiones 50 x 50 cm. Para el caso de las baldosas pequeñas de 30 x 30 se emplearon planchas con la misma tipología de tetones tal y como muestra la figura 3.7. La salvedad reside en que en el caso de las planchas pequeñas se emplearon dos tipos diferentes de poliestireno, convencional (EPS) y elastificado (EEPS). Ambos materiales son muy empleados como aislantes en baldosas propias de suelos radiantes o solados flotantes para atenuación de ruido de impacto.

Fig. 3.7. Baldosa de mortero de 30 x 30 cm con aislante, (a) Baldosa de mortero con EEPS, (b) Baldosa de mortero con EPS y detalle de los tetones que la sustentan de 1 cm de altura.

Como se puede ver en la figura 3.7b, debido al peso del mortero se produce una deformación de los tetones tal y como se predecía en la ecuación (2).

3.4. Elaboración de la losa

La actual normativa UNE EN 140 – 8 e ISO 717 – 2 regulan los ensayos normalizados a ruido de impacto, para lo cual se construyen recintos de transmisión compuestos por una sala emisora y otra receptora. De esta forma la cámara emisora se desplaza en sentido vertical alejándose de la cámara receptora, para permitir la colocación de las muestras que se deseen ensayar, validándose posteriormente su posible implantación como sistemas de losa flotante. El esquema de colocación de la losa sobre el forjado se puede ver en la figura 3.8.

Fig. 3.8. Esquema de colocación de la muestra sobre forjado normalizado.

Dicho proceso tiene el inconveniente de ser una tarea laboriosa y con precios elevados que dificultan su accesibilidad a los pequeños y medios comercios. Un ejemplo de sala de transmisión a ruido de impacto se puede ver en la figura 3.9.

Fig. 3.9. Esquemas de sala de ensayo a ruido de impacto. Transmisión vertical.

Debido a su elevado coste, algunos autores han tratado de disminuir los tamaños de la sala de ensayo [8]. Para ello se dispone de una losa de pequeñas dimensiones, en la cual se realizan las medidas con y sin material de aislamiento, deduciendo a posteriori la reducción de los niveles de presión acústica obtenidos.

Es por ello que se decidió fabricar una losa de dimensiones estandarizadas según la norma ISO 16251 – 1 que fijan un volumen de $1,2 \times 0,8 \times 0,2 \text{ m}^3$. Para estas dimensiones se conoce la primera frecuencia de resonancia del material $f_0 = 38 \text{ Hz}$ [9]. Previamente a su fabricación se decidió simular mediante métodos numéricos el comportamiento que iba a presentar la losa una vez elaborada, por lo que se modelizó el diseño 3D en FreeCad para su posterior análisis mediante el programa de elementos finitos LISA. La figura 3.10 ayuda a comprender mejor el comportamiento del sistema como sólido rígido sometido a un impacto en el centro de su superficie, así como, modo de flexión de la losa.

Fig. 3.10. Simulación de la losa de 120 x 80 x 20 cm. (a) Diseño en FreeCAD 3D y mallado en LISA; (b) Primer modo de flexión de la losa diseñada.

Una vez estudiado el comportamiento de la losa, se procedió a su fabricación en el laboratorio de Materiales de Construcción de la ETSEM. En primer lugar se definieron los apoyos que debían aguantar el peso de la losa una vez elaborada (aproximadamente 480 Kg), es por ello que se decidió emplear cuatro dados de hormigón HM – 25 de dimensiones 30 x 30 cm, con tacos de neopreno colocados en su parte superior e inferior al objeto de evitar que el ruido exterior condicionase los ensayos acústicos posteriores.

Basándonos en los resultados obtenidos para las baldosas de hormigón antes elaboradas, se empleó la dosificación correspondiente a un hormigón HM – 30.

Como el volumen de la losa a hormigonar era de 192 dm^3 (sin contar el material desechado en los ensayos de consistencia mediante el cono de Abrams), fue necesario realizar varias amasadas, tomando testigos de cada una de ellas. En total se realizaron cuatro amasadas con la dosificación en peso que refleja la tabla 3.13.

Elaboración de la losa de hormigón ($120 \times 80 \times 20 \text{ cm}^3$)				
Material	<i>Cemento</i>	<i>Arena</i>	<i>Grava</i>	<i>Agua</i>
Peso (Kg)	21	33,84	54,58	10,5

Tabla 3.13. Dosificación de la losa.

Como se puede ver se mantiene la relación agua/cemento en 0,5, cumpliendo con los límites que establece la EHE – 08 para obtener un hormigón dócil, pero sin influir en la resistencia. La granulometría y tamaños de los áridos siguieron la relación del apartado 3.1. Por otro lado, los ensayos de consistencia y resistencia a compresión dieron los siguientes resultados reflejados en la tabla 3.14.

Ensayos característicos de la losa			
Ensayo de consistencia normalizado UNE EN 12350-2 mediante cono de Abrams.			
<i>Amasada 1</i>	<i>Amasada 2</i>	<i>Amasada 3</i>	<i>Amasada 4</i>
h = 18	h = 21	h = 19	h = 18
Ensayos de resistencia a compresión probetas normalizadas h = 30 cm y $\varnothing = 15 \text{ cm}$			
<i>P. Amasada 1</i>	<i>P. Amasada 2</i>	<i>P. Amasada 3</i>	<i>P. Amasada 4</i>
28,793 MPa	30,952 MPa	31,023 MPa	28,526 MPa

Tabla 3.14. Cono de Abrams y resistencia a compresión de las probetas elaborados para las amasadas de la losa.

Como se puede deducir de la tabla 3.14, se trata de un hormigón de consistencia blanda-fluida que era fácilmente trabajable. Por otro lado, los ensayos de rotura a compresión dieron, como era de esperar, resistencias cercanas a los 30 MPa.

Para el caso de la armadura, al tratarse de una losa apoyada-apoyada no existen momentos flectores negativos, por lo que solo era necesario emplear armadura de trabajo (de tracción) en la cara inferior [10]. Por otro lado al no tener que soportar cargas estructurales más allá del peso propio de la losa, no se empleó armado superior de reparto que podía condicionar los ensayos acústicos.

La cuantía mínima que fija la EHE – 08 es del 1,8% para el caso el acero B 500 S, que fue el empleado en esta tesis. Esta cuantía se refiere, por separado, a la armadura longitudinal y a la transversal a repartir entre ambas caras. En nuestro caso se emplearon redondos de $\varnothing = 6 \text{ mm}$ que eran los disponibles en el laboratorio.

Para colocar las armaduras de la losa sobre el encofrado se apoyaron sobre separadores de aproximadamente 3 cm de altura, elaborados únicamente con el fin de conseguir los recubrimientos mínimos de la cara inferior y permitir así un vibrado eficaz de la masa de hormigón que diera como resultado mejores resistencias, ya que un hormigón bien compactado por vibración contiene un volumen de aire aproximado del 1% [11]. Además, se untaron las paredes del encofrado con aceite en capas continuas y uniformes de forma que fuese más sencillo el desmolde posterior. Es importante indicar que todas las tareas de ejecución se llevaron a cabo el mismo día, dentro del periodo de efectividad de los materiales empleados.

El estado final de las armaduras colocadas en la losa y ésta una vez desmoldada se puede ver en la figura 3.11.

Fig. 3.11. Losa de hormigón. (a) Armado inferior Ø 6 mm con separadores y arañas para manipulación posterior; (b) Estado final de la losa apoyada sobre cubículos de hormigón y tacos de neopreno.

Una vez colocado el hormigón, antes de proceder al desencofrado a los 28 días, se llevó a cabo un proceso de curado ordinario [12]. Puesto que era difícil compensar las pérdidas de agua por evaporación excesiva mediante un regado de su superficie, se optó por la solución de crear una barrera impermeable que impidiese las evaporaciones rápidas y la consiguiente fisuración del hormigón. Para ello se cubrió la losa con una lámina de polietileno en su cara superior.

Por último indicar, que para la manipulación de la losa ya fraguada se empleó una grúa hidráulica disponible en el laboratorio, que permitió desplazar la losa hasta la zona de ensayos y retirar el fondo del encofrado de madera.

3.5. Diseño del equipo de golpeo

Para la realización de los ensayos de esta tesis se diseñaron dos equipos de golpeo diferentes, alternativos al propuesto por la norma UNE EN 140-3.

Esta norma describe brevemente como debe ser el equipo de golpeo normalizado. Podemos indicar que consiste en 5 martillos situados en línea con pies aislantes de vibraciones, separados una distancia entre ejes de 100 ± 3 mm. El momento de cada martillo que golpea el suelo debe ser igual a 500 g que cae libremente desde una altura de 40 mm con unos límites de tolerancia del 5 % y una velocidad de 0,033 m/s. La parte del martillo que golpea el suelo perpendicularmente, será de acero endurecido de cuerpo cilíndrico con un diámetro de 30 ± 2 mm y punta esférica. El tiempo entre impacto y elevación del martillo será inferior a 80 ms.

Además de lo descrito, el ensayo lleva aparejado un software para la toma de datos. Como novedad en este trabajo se propusieron los siguientes equipos de impacto:

1. Martillo de golpeo.

En primera instancia se diseñó un equipo de golpeo que permitiese conseguir un único impacto uniforme en todos los ensayos. La disposición de golpeo que mejor se adaptaba a esta condición es la del péndulo simple. Por ello, se colocaba el extremo del mango del martillo diseñado sobre un eje de manera, de forma que la trayectoria seguida por la maza al caer fuera siempre la misma [13].

Se debe fijar a su vez el punto de inicio para que el impacto producido transmita siempre la misma energía. Además, teniendo en cuenta que las probetas poseen diferentes alturas, el sistema debe ser versátil y permitir adaptarse a todas las posibles geometrías diseñadas.

Así, el martillo está compuesto por un cilindro inferior soldado a una base plana nivelada y un cilindro superior sobre el que se dispone el eje alrededor del cual gira el martillo. En el eje longitudinal del mango del martillo se realizó un taladro por el cual se hace pasar un bulón que sujeta el mazo en la posición de inicio deseada. La placa se sitúa entonces en paralelo al plano de la trayectoria del martillo, de forma que cuando se retira el bulón se produce la caída del martillo produciendo el impacto siempre en las mismas condiciones.

La cabeza del martillo, de conformidad con las determinaciones de la norma UNE EN 140-3, tiene forma redondeada con un radio de 15 mm y una esfericidad superior a 500 mm. El sistema implementado se puede ver en la figura 3.12.

Fig. 3.12. Martillo de golpeo.

2. Vibrador electromagnético.

El otro equipo diseñado consiste en una estructura de madera conformada por dos pórticos entrecruzados de los cuales pende un vibrador electromagnético, capaz de regular los impactos producidos sobre la superficie de la placa estudiada [14].

Los materiales necesarios para la construcción del armazón de madera son:

Elementos que conforman el armazón de madera

<i>Material</i>	<i>Uds.</i>	<i>Longitud</i>	<i>Ancho</i>	<i>Alto</i>	<i>Ø (cm)</i>
Vigas horizontales de madera	2	75 cm	3 cm	4,5 cm	-
Soportes verticales de madera	4	29 cm	3 cm	4,5 cm	-
Bases de madera para soportes	4	11,5 cm	11 cm	1 cm	-
Almohadillas para las bases	4	11,5 cm	11 cm	0,3 cm	-
Barra roscada para suspensión	1	45 cm	-	-	0,5 cm

Tanto las vigas como los soportes se colocan en la dirección de mayor inercia

Tabla 3.15. Materiales empleados para la construcción de la estructura de madera.

El proceso de construcción, es bastante sencillo y se describe como sigue:

- ✓ Las vigas horizontales se unieron en primer lugar, con un machihembrado en su parte media de espesor 3 cm, de forma que pudiesen encajar una sobre la otra con la ayuda de un pegamento cola. Como refuerzo se añadieron unas escuadras en los laterales.
- ✓ Posteriormente se unieron los soportes verticales a los extremos de las vigas, con ayuda de unos clavos y escuadras en los ángulos de 90 grados, para refuerzo de la estructura.

- ✓ Después, previo cajeado con la forma del soporte en las mismas, se unieron las bases a la parte inferior de los soportes mediante tornillos, para dar estabilidad al conjunto.
- ✓ Acto seguido, se adhirieron las almohadillas de fieltro para amortiguamiento de las vibraciones en la parte inferior de las bases, con el objeto de que el balanceo producido por el vibrador influyese lo menos posible en los resultados de los ensayos.
- ✓ Por último, en la zona donde se cruzan las dos vigas, se taladró un agujero que perforase ambas con una medida igual al diámetro de la barra roscada que sostiene el vibrador ($\varnothing 0.5$ cm), y se añadieron una tuerca y una arandela tanto en la parte superior como en la inferior, para poder regular la altura a la que debe estar suspendido el vibrador.

Fig. 3.13. Estado final de la estructura construida y desglose de materiales empleados.

El elemento que golpea las losas en este caso entra dentro de los mecanismos automáticos de accionamiento manual. Se emplea como novedad un vibrador electromagnético recubierto por una carcasa de acero redonda. En el interior del cuerpo del imán se encuentra el bobinado de excitación y la armadura, la cual es guiada mediante un eje no magnético de forma central y sujeta con dos muelles en una posición media. Gracias a un imán permanente con polos guía, ubicado entre ambas bobinas del bobinado de excitación, el sistema es preinmantado y se mantiene en una posición de salida estable y neutral. En el momento de alimentar el bobinado de excitación con tensión alterna la fuerza generada por el campo alterno electromagnético interfiere en el efecto de fuerza del imán permanente, así, la frecuencia de la fuerza resultante sobre la armadura corresponde a la frecuencia de la tensión alterna, moviendo la armadura con el eje en un mismo ritmo lineal. El vibrador lineal puede ser utilizado como accionamiento oscilante y también con un peso adicional sobre el eje de la armadura como sacudidor.

3.6. Diseño del equipo de medida

Uno de los apartados de esta tesis consistió en el diseño, fabricación, modelización y validación de un equipo capaz de medir impactos producidos sobre la superficie de las baldosas diseñadas de manera alternativa al acelerómetro propuesto en la actual norma UNE EN 140-7.

3.6.1. Fundamentos teóricos del auto-oscilador clásico.

En muchos circuitos electrónicos digitales [15] es necesario, como en nuestro caso, emplear algún tipo de sincronización para realizar las tareas de tipo: transferencia de datos, control de procesos...etc. Para ello, se emplean circuitos generadores de señal del tipo onda cuadrada con ciclos de trabajo que pueden llegar al 50% u otro valor. Dichos circuitos son en esencia, osciladores que proveen una señal generalmente determinada (señal de reloj), con niveles lógicos adaptados a la lógica utilizada en cuestión TTL, CMOS...etc.

Una clasificación de los mismos divide los osciladores en alineales y en fuertemente alineales. Para nuestro equipo de medida emplearemos los segundos, los cuales si son de relajación, se construyen a base de una compuerta inversora y componentes externos del tipo resistencia y condensador, a fin de lograr mediante técnicas de carga y descarga de este último, transiciones de un nivel lógico a otro de forma periódica en tiempos bien definidos y ajustables.

Además, una manera de ver cómo hacer un oscilador es la de realimentar un número impar de inversores, así, la frecuencia de oscilación estará impuesta por el número de inversores utilizados y los tiempos de retardo de los mismos. Al cambiar la salida del último inversor, como éste está conectado a la entrada del primero de la cadena, vuelve a cambiar el estado de la salida del último, después de vencer los retardos de todas las compuertas.

La figura 3.14 muestra un circuito muy similar al empleado en este trabajo, también de relajación, que emplea tres puertas inversoras, dos resistencias y un capacitor. En estos circuitos la frecuencia de oscilación viene dada por la expresión:

$$f = 1/2R_1 \cdot C \cdot \left(\frac{0.405R_2}{R_1 + R_2} + 0.693 \right) \quad (2)$$

Este circuito funcionará correctamente siempre y cuando el período de oscilación esté por encima de los tiempos de retardo de propagación de los inversores.

Fig. 3.14. Circuito con tres puertas inversoras y ciclos de trabajo de casi el 50%.

3.6.2. Diseño del sensor.

El sensor de ensayos debe de ser capaz de medir la deformación transversal producida cuando se golpea la baldosa en su cara superior, y, permitir por tanto, conocer la energía absorbida por la misma, ya que la energía de golpeo es seleccionada por nosotros con ayuda del vibrador. En construcción, tras un golpe en la superficie del forjado, la energía no disipada en forma de calor por el mismo es la que se escucha en el recinto colindante a modo de ruido de impacto, por la facilidad de estas vibraciones mecánicas de inducir ondas acústicas que viajan a través del medio aéreo de la habitación.

El esquema básico de nuestro sensor es el que se muestra la figura 3.15:

Fig. 3.15. Esquema básico del sensor de medida diseñado.

El sensor está constituido por un condensador (el transductor) que forma parte de un circuito auto-oscilante digital. La salida de este circuito se conecta a un demodulador de FM sintonizado a una frecuencia que es la frecuencia base del circuito auto-oscilante.

Puesto que la capacidad del condensador depende únicamente de su geometría, distancia entre placas y permitividad del medio ($C = \epsilon \cdot A/d$), si dejamos constantes el área de sus placas y el dieléctrico, la capacidad del mismo variará únicamente en función de la separación entre las placas.

Una de las placas del transductor irá fijada, por tanto, a la plancha de hormigón u mortero, mientras que la otra se fijara a la superficie de referencia, en nuestro caso al suelo. Así, al producirse el impacto sobre la superficie de la baldosa se generará una deformación transversal en forma de vibración, que hará variar la capacidad de nuestro condensador.

Debido a que fijaremos nuestra baldosa de tal forma que la separación entre sus placas no superará el centímetro, y el área de las mismas es de 6×6 cm, conociendo la permitividad eléctrica del aire, estamos en condiciones de calcular la capacidad esperable de nuestro condensador.

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} = 8,8542 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{0,06 \cdot 0,06}{0,01} \approx 3,2 \text{ pF} \quad (3)$$

donde ε es la permitividad del aire $8,8541878176 \cdot 10^{-12}$

El criterio seguido para obtener la geometría de las placas, tampoco fue resultado del azar. Si nos fijamos en el esquema 3.15, una variación en la capacidad genera, a su vez, una variación en la frecuencia del circuito auto – oscilante. Este circuito auto-oscilante está construido de manera que su frecuencia de oscilación natural sea suficientemente alta, en nuestro caso 3,3 MHz. Por otro lado, el tamaño de las placas siempre debe de ser menor o igual a media longitud de onda, para que la sensibilidad del sensor se corresponda con las medidas tomadas. Así, solo nos falta conocer la velocidad de propagación de la onda transversal en dicho medio para fijar sus dimensiones.

Dicha velocidad de propagación en el caso del hormigón viene determinada por la ecuación dada por Manuel Fernández Cánovas:

$$V_T = \sqrt{\frac{E_d \cdot g}{\gamma} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \mu)}} = 2450 \frac{m}{s} \quad (4)$$

siendo E_d el Módulo de Elasticidad Dinámico del hormigón, obtenido a partir de cualquiera de las velocidades de transmisión del hormigón mediante la ecuación:

$$E_d = v^2 \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} = 3232653061 \text{ MPa} \quad (5)$$

donde v es la velocidad de transmisión longitudinal estimada en 4000 m/s, γ es la densidad del hormigón aproximada a 2200 kg/m³ y g es la aceleración de la gravedad.

Puesto que nuestras placas del condensador son de 6 cm de lado, la longitud de la onda transversal ha de ser como mucho de 12 cm, por lo que obtenemos una frecuencia:

$$v = \lambda \cdot \nu \Rightarrow 2450 = 0.12 \cdot \nu \Rightarrow \nu = 20400 \text{ Hz} \quad (6)$$

que está comprendida en el rango aceptable por nuestro circuito oscilador.

Para la velocidad de transmisión en el caso del mortero se empleó la ecuación fundamental de la propagación de ondas transversales en cuerpos sólidos dada por [16]:

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2\gamma(1+\nu)}} = 404,5 \frac{m}{s} \quad (7)$$

donde la densidad del mortero $\gamma = 2500 \text{ kg/m}^3$, el módulo de elasticidad sea de 9000 MPa y la frecuencia de inicio de 10 Hz , la cual se irá aumentando progresivamente.

Así, la variación en la capacidad del transductor reproduce la vibración transversal de deformación de la placa de mortero u hormigón, y esto genera a la salida del circuito auto-oscilante una señal modulada en frecuencia. La modulación en frecuencia es debida a la deformación transversal, por lo que añadiendo el circuito demodulador, se obtiene a la salida de éste una señal proporcional a la deformación transversal de la placa de mortero u hormigón en cada instante de tiempo.

El estado final del sensor diseñado puede verse en la figura 3.16.

Fig. 3.16. Equipo de medida diseñado al completo.

3.6.3. Simulaciones del comportamiento esperado del sensor.

En este apartado, y con la ayuda de un software (Solve Elec 2.5) para la resolución de circuitos eléctricos, se ha simulado el comportamiento esperable que debe de tener nuestro sensor, a partir de las premisas teóricas conocidas y basándonos en su proceso de fabricación. Para ello, se introdujo en el programa un circuito de primer orden que cumpliese con las características de la electrónica del sensor elaborada por el equipo en el laboratorio. Dicho circuito, tiene el siguiente esquema y las características que se indican en la figura 3.17.

Fig. 3.17. Esquema del circuito simulado y características principales.

La resolución analítica de este circuito es la siguiente:

$$U_1 = \frac{E_1}{1 + j \cdot \omega \cdot C_1 \cdot R_1} \rightarrow U_{1rms} = \frac{E_{1rms}}{\sqrt{1 + (\omega \cdot C_1 \cdot R_1)^2}} = 727\text{ mV} \quad \varphi U_1 = -43,4^\circ \quad (8)$$

Fig. 3.18. Variación de tensión respecto al tiempo en el circuito estudiado

Fig. 3.19. Variación de la capacidad frente a la tensión aplicada

Como se puede ver en la figura 3.19, se aprecia un retardo en el cambio de estado de las puertas y una disminución de la frecuencia. En la figura 3.20 se muestra la ganancia en dB con respecto a la frecuencia en Hz estudiando la frecuencia de reloj, consistente en la caída de 3 dB a 1MHz.

Fig. 3.20. Ganancia en dB respecto a la frecuencia en Hz.

3.7. Equipo experimental

El equipo implementado como alternativa a la actual norma UNE EN 140 se ha ido describiendo a lo largo de este capítulo desglosado por apartados. De forma general, podemos resumir que consta por una parte, de un generador de funciones que emite una señal eléctrica a una frecuencia determinada para cada tipo de ensayo. Después, esta señal es enviada a un amplificador de potencia de audio que transmite dicha señal al vibrador electromagnético, el cual comienza a oscilar y golpea las planchas situadas debajo. Estas vibraciones son recogidas por un sensor capacitivo ubicado debajo de la baldosa, y que consiste en un condensador de placas plano paralelas que varían su capacidad en función del impacto producido en la superficie de la placa. Por último, la electrónica del sensor se encarga de recoger dicha variación de capacidad como respuesta y enviar la información mediante un sistema de adquisición de datos (Data logger) a un ordenador para reproducir el comportamiento del material es Osciloscopio

Fig. 3.21. Diseño 3D del equipo de golpeo con

Fig. 3.22. Imagen real del equipo en funcionamiento

El esquema genérico que representa el equipo de medida en funcionamiento es el que muestra la figura 3.23.

Fig. 3.23. Esquema del equipo de medida desarrollado.

Bibliografía

- [1] Fernández Cánovas, M. (2007). *Hormigón*. Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 8ª Edición, Madrid, Octubre 2007.
- [2] O'Reilly, V. (1993). *Métodos para la dosificación del concreto*. Edición Universidad Autónoma del Estado de Morelos. México, 1993.
- [3] Herrero, E. (1992). *Caracterización de los áridos para hormigones*. I Jornadas Técnicas sobre áridos, ANEFA, Madrid, 1992.
- [4] García Meseguer, A. Morán Cabré, F. Arroyo Portero, J. C. (2011). *Jiménez Montoya. Hormigón Armado*. Editorial Gustavo Gil, 15ª Edición, Barcelona.
- [5] EHE – 08. Instrucción de Hormigón Estructural. Ministerio de Fomento de España, 2010.
- [6] Ercolani, G. D. Ortega N.F. & Señas L. (2007). *Empleo de Ultrasonidos y Esclerometría en el diagnóstico de estructuras de hormigón afectadas por elevadas temperaturas*. IV Conferencia panamericana de ensayos no destructivos, Buenos Aires, Octubre 2007.
- [7] Timoshenko, S (2008). *Resistencia de Materiales*. Thomson, 5ª Edición (castellano). Madrid. ISBN: 978-84-9732-065-8.
- [8] Morón, C. García, A. & Ferrández, D. (2015). *New system for measuring impact vibration on floor decking sheets*. Sensors. Enero 2015, Vol.15, pp. 635-641; doi: 10.3390/s150100635.

- [9] Pereira, A. Godinho, L. Mateus, D. Ramis, J. & Branco, G. F. (2014). *Assesment of a simplified experimental procedure to evaluate impact sound reduction of floor coverings*. Applied Acoustics, Vol. 79, pp. 92 – 103.
- [10] Medina, E. (2009). *Construcción de estructuras de hormigón armado en edificación*. Editorial BELLISCO, Biblioteca Técnica Universitaria, nº8, 1ª Edición, Mayo 2009, Madrid, España.
- [11] ISO/CD 16251-1: Acoustics-Laboratory measurement of the reduction of transmitted impact noise by floor coverings on a small floor mock-up – Part 1: Heavyweight compact floor.
- [12] Morón, C. García, A. Ferrández, D. & Blanco, V. (2015). *Transmission of impact vibration on concrete and mortar sheets*. Shock and Vibration. Vol. Junio 2015, Artículo ID 184648, 6 pág
- [13] Montero, E. (2006). *Puesta en obra del hormigón*. Consejo General de la Arquitectura Técnica de España.
- [14] Ródriguez, L. F. (2005). *Forjados*. 3ª Edición, Fundación Escuela de Edificación, Madrid, España 2005.
- [15] Tomasi, W. (1996). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Editorial Prentice Hall, 2º edición, 1996.
- [16] Rosell, J. R. & Cantalapiedra, I. R. (2011). *Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto aplicado a morteros de cal y cemento*. Materiales de Construcción, Vol. 61, 301, pp. 39-48 enero-marzo 2011 ISSN: 0465-2746.
- [17] Simón, F. Anthony, K. D. & Fernández, J, Mª. (2006). *Estudio de cinco métodos para determinar las propiedades dinámicas de capas elásticas para la mejora del aislamiento a ruido de impactos*. Tecniacústica Gandía 2006.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1. Introducción.

En este capítulo se muestran los resultados más significativos obtenidos a lo largo de este trabajo de investigación, dejando reservados los Anexos A y B para el total de las gráficas obtenidas.

De esta forma se muestran por separado los resultados obtenidos con ayuda del sensor de diseño propio, que reflejan que fue capaz de detectar los impactos producidos sobre la superficie de las baldosas elaboradas. En este punto se separan por un lado los resultados recogidos del golpeo con el martillo metálico, y los resultados obtenidos con ayuda del vibrador electromagnético.

Por otra parte, se muestra un estudio más propiamente acústico centrado en diversos parámetros de las planchas elaboradas como son: diferentes geometrías y efecto del tamaño en la transmisión de vibraciones, diferencias de transmisión entre morteros y hormigones, diferencias de transmisión en función de la dosificación o la validación del EPS como aislante acústico y la influencia de las diferentes geometrías de apoyo con respecto a la transmisión de ruido de impacto. También se realizó un ensayo de losa flotante normalizado UNE-EN 140:7, cuyos resultados se recogen en este apartado a modo de comprobación.

Una última parte muestra la influencia del equipo de golpeo en la transmisión de vibraciones para losas de forjado de grandes dimensiones.

4.2. Sensor capacitivo y martillo de golpeo.

Como ya se comentó en el capítulo tercero, uno de los dispositivos de golpeo implementados constaba de un martillo metálico que trataba de que todos los impactos se produjesen de la manera más regular y uniforme posible, cumpliendo así con la condición de péndulo.

La realización de los ensayos de caracterización comienza con el nivelado del martillo de golpeo. Situando el martillo en la posición inferior, nivelada a 0° , con el bulón colocado, deslizando el martillo por las guías, se sitúa la cabeza del martillo en contacto con la placa superior de la probeta (Figura 4.1).

Una vez nivelada la placa, se eleva el martillo hasta la posición fijada de golpeo y se coloca el bulón que va unido a un cordel. Se conecta el osciloscopio y se inicia la secuencia de grabado, retirando el bulón y dejando caer el martillo para que produzca el impacto. Concluida la secuencia de grabado se guardan los datos obtenidos para su procesamiento posterior.

(a)

(b)

Fig. 4.1. Metodología del ensayo. (a) Nivelación del equipo de golpeo; (b) Colocación de las placas del condensador.

El circuito va conectado a un osciloscopio digital de 1GHz de ancho de banda para tomar las medidas de la diferencia de potencial en intervalos muy cortos de tiempo. El sensor a su vez, se completa con una fuente de alimentación que hace que la carga introducida en el circuito sea constante. Por tanto, conocida la caída de tensión, se puede extrapolar el movimiento de la placa.

La figura 4.2 muestra la salida del sensor antes de que el martillo impacte sobre la superficie de la placa (curva azul) y en el momento inmediatamente después del impacto del martillo (curva naranja).

Fig. 4.2. Respuesta del sensor antes (azul) y después (naranja) del impacto.

Como se puede ver la frecuencia de salida decrece cuando el sensor detecta la deformación producida por el impacto.

Con ayuda de un programa de análisis numérico se puede reproducir la onda con la pareja de datos (tiempo y diferencia de potencial). Los voltajes varían a ambos lados del cero. Multiplicando secuencialmente cada uno de los voltajes, ($V_1 \times V_2, V_2 \times V_3, V_3 \times V_4, \dots, V_n \times V_{n+1}$) se obtienen valores positivos cuando los voltajes son del mismo signo, y valores negativos cuando son de signos distintos. Estos valores negativos indican que la curva pasa de valores positivos a negativos o viceversa. Interpolando estos puntos se puede obtener los puntos de paso por cero, siendo la distancia entre los puntos la representación de medio periodo. Si en lugar de tomar todos estos puntos, tomamos solos los pares o los impares, obtendremos la representación de un período completo y con ello la frecuencia.

Antes del impacto, la distancia entre las placas es constante y el voltaje que se le introduce al sensor es igualmente constante gracias a la fuente de alimentación. Por tanto, la frecuencia con la que recibe la señal el osciloscopio es constante. Al recibir el impacto, las placas del sensor situado debajo de la baldosa varían su posición relativa, variando la capacidad del condensador que forman, aumentando así la frecuencia que recibe el osciloscopio. A partir de ese momento de máxima frecuencia, poco a poco la deformación va amortiguándose hasta alcanzar el punto inicial.

Conocida la frecuencia en cada instante, puede determinarse la frecuencia máxima, coincidente con el momento del impacto en el ensayo, y el tiempo en que la frecuencia vuelve a su estado inicial. Cuanto mayor sea la deformación de las placas, más energía habrá absorbido, y por tanto, menos energía transmite en forma de ruido de impacto, y mejor aislamiento será. El mayor salto en la frecuencia será el indicador de la deformación y por tanto de la energía absorbida.

A continuación se muestran cuatro curvas de respuesta correspondiente a cuatro planchas de mortero con diferentes piezas de EPS, en todas las cuales, se ha situado el cero en el momento del impacto:

Fig. 4.3. Curvas de respuesta con cuatro piezas de mortero con base de poliestireno expandido (EPS) de diferente espesor. (a) 1 cm; (b) 1,5 cm; (c) 2 cm; (d) 2,5 cm.

Como se puede ver en la figura 4.3 la metodología empleada es capaz de obtener respuestas espectrales diferentes en las muestras analizadas que pueden correlacionarse con su comportamiento acústico.

4.3. Sensor capacitivo y vibrador electromagnético.

Como ya se describió en el capítulo tercero, se diseñó un segundo equipo de golpeo basado en un vibrador electromagnético como muestra la figura 4.4. Puesto que el dispositivo de medida se encarga de detectar la vibración transversal producida tras el impacto, es importante que la baldosa se asemeje lo máximo posible al modelo de vibración de una membrana tensa [1]. Para ello es imprescindible que las planchas fabricadas trabajen en sus dos direcciones principales, pudiendo ser consideradas como placas en vez de losas. Con este fin se utilizó como premisa que el espesor fuese menor que la cuarta parte de la longitud de la baldosa tal y como marca la actual EHE – 08 [2].

Para la realización de los ensayos con este equipo se tomo como muestra una baldosa de mortero con dosificación 1:3:0,5 (mortero/arena/agua) y otra de hormigón con dosificación 1:2:3:0,5 (cemento/arena/grava/agua), ambas de dimensiones de 50x50 cm. Fue necesario a su vez controlar los tiempos de vibrado y el curado final de la mezcla para evitar una exudación excesiva que favoreciese la vaporización del agua de amasado y la consecuente formación de huecos en la matriz de mortero u hormigón [3].

Fig. 4.4. Esquema definitivo del segundo equipo de medida empleando el vibrador electromagnético.

Como se puede ver en la figura 4.4 a diferencia de la máquina de martillos que describe la norma UNE EN 140:7 [4], en este experimento se empleó como alternativa un armazón de madera cuyas bases están aisladas con goma frente a las vibraciones y de la cual pende un vibrador electromagnético recubierto por una carcasa de acero, que contiene el bobinado de excitación que mueve la armadura de forma lineal conforme se varía la frecuencia de la tensión alterna a la que se encuentra conectado.

El equipo de medida consta de varias partes, por un lado se diseñó el amplificador de potencia descrito en el apartado 2.3.9, ya que la señal eléctrica emitida por el generador de funciones no era lo suficientemente estable como para poder ser enviada directamente al vibrador que golpea la plancha.

Por otro lado, se trabajaba con la ayuda del sensor diseñado que era capaz de medir la deformación transversal producida cuando se golpeaba la baldosa en su cara superior, siendo la energía de golpeo conocida y seleccionada con ayuda del vibrador. El sensor está constituido por un condensador que forma parte de un circuito auto-oscilante digital. La salida de este circuito se conectaba a un demodulador de FM sintonizado a una frecuencia que es la frecuencia base del circuito auto-oscilante. El esquema básico del sensor es el que se muestra en la Fig. 4.5.

Fig. 4.5. Esquema del sensor desarrollado.

Como en el caso del martillo metálico, la capacidad del condensador depende únicamente de su geometría, distancia entre placas y permitividad del medio de ensayo. De esta forma, si se deja constante el área entre las placas y el dieléctrico, la capacidad del condensador variaba únicamente en función de la distancia entre las placas [5]. Una de las placas del transductor se fijaba a la cara inferior de la plancha de mortero u hormigón, mientras que la otra quedaba fija en la superficie plana de referencia, de forma que al producirse el impacto, la deformación transversal que produce la vibración hacía variar la capacidad del condensador cuya señal era registrada.

El circuito auto-oscilante está construido de manera que su frecuencia de oscilación natural sea suficientemente alta, en nuestro caso de 3,3 MHz. Por otro lado, el tamaño de las placas siempre debe de ser menor o igual a media longitud de onda, para que la sensibilidad del sensor se corresponda con las medidas tomadas, así pues, conociendo la velocidad de propagación de la onda transversal en el medio se pueden fijar las dimensiones de las placas del condensador.

Para el cálculo de las velocidades de propagación se emplearon las siguientes expresiones para el hormigón (1) y el mortero (2) respectivamente [6]:

$$V_T = \sqrt{\frac{E_d \cdot g}{\gamma} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \mu)}} = 2450 \frac{m}{s} \quad (1)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2\gamma(1+\nu)}} = 404,5 \frac{m}{s} \quad (2)$$

Como nuestras placas del condensador son de 6 cm de lado, la longitud de la onda transversal ha de ser como mucho de 12 cm. Así, obtenemos una frecuencia (3):

$$\lambda \cdot \nu \Rightarrow 2450 = 0.12 \cdot \nu \Rightarrow \nu = 20400 \text{ Hz} \quad (3)$$

que está dentro del rango de nuestro circuito oscilador.

Por último, la variación en la capacidad del transductor reproduce la deformación de la placa de mortero u hormigón, y esto genera a la salida del circuito auto-oscilante una señal modulada en frecuencia. La modulación en frecuencia es debida a la vibración transversal, por lo que añadiendo el circuito demodulador, se obtiene a la salida de éste una señal proporcional a la deformación transversal de la placa de mortero u hormigón en cada instante de tiempo. Dicha señal era recogida con la ayuda de un osciloscopio.

En la figura 4.6 se muestra la señal excitadora con una frecuencia de 10000 Hz. Para esta frecuencia se obtuvo la respuesta del sensor y el análisis en armónicos, donde se aprecian las diferencias existentes entre las planchas de hormigón (figura 4.7) y mortero (figura 4.8). Los datos para obtener el análisis en armónicos fueron tratados con ayuda de un software programado capaz de realizar transformadas discretas de Fourier, obteniendo así una representación en el dominio de la frecuencia, siendo la función original una función en el dominio del tiempo [7].

Fig. 4.6. Señal excitadora a frecuencia de 10000 Hz.

Fig. 4.7. Respuesta de la baldosa de hormigón. (a) Respuesta del oscilador; (b) Análisis dado en armónicos de la respuesta del sensor.

Fig. 4.8. Respuesta de la baldosa de mortero. (a) Respuesta del oscilador; (b) Análisis dado en armónicos de la respuesta del sensor.

Como se puede apreciar en las gráficas, la sensibilidad del sensor permite diferenciar las formas de transmisión del impacto entre los distintos materiales, siendo mayor ésta en el caso del hormigón que en el caso del mortero, lo cual estaba en concordancia con los cálculos teóricos realizados previamente. En este caso la respuesta del oscilador es constante al estar produciéndose un golpeo continuo sobre la cara superior de la plancha, contrariamente a lo que ocurría con el martillo que se producía un único impacto y se podía visualizar su atenuación.

4.4. Ensayo normalizado UNE.

Es conocido que el poliestireno expandido (EPS) es buen atenuador de ruidos de impacto y una solución óptima como capa desolidarizadora para evitar la transmisión de vibraciones. Es por ello, que en este trabajo se trató de validar el poliestireno elastificado (EEPS) como aislante acústico a ruido de impacto en sistemas de losa flotante. Para la realización de este ensayo fue necesario recurrir a un laboratorio de control de calidad [8], que pudiese llevar a cabo ensayos normalizados según marcan las normas UNE.

Dicho ensayo normalizado comienza por la construcción del suelo que va a formar parte de la losa flotante sobre un forjado base compuesto por una losa de hormigón armado de 15 cm de espesor (forjado normalizado según UNE-EN ISO 140-8). La muestra bajo ensayo consiste en un suelo flotante de 4,2 m por 3,3 m compuesto por una losa de hormigón armado (HA – 25, tamaño máximo del árido 20 mm, Ø 5 mm y malla de 15x15 cm) de 40 mm de espesor sobre planchas de EEPS de 20 cm de espesor y 20 Kg/m³ de densidad media (figura 4.9).

Las planchas se montaron a tope cubriendo toda la superficie del forjado normalizado, así como, el perímetro entre la pared del forjado y la losa flotante de hormigón. Previo al hormigonado de la losa se colocó una lámina de polietileno cubriendo el EEPS.

Fig. 4.9. Hormigonado y ejecución de la losa flotante para ensayo.

Los ensayos se realizaron en cámaras de transmisión vertical compuestas por una sala emisora y otra receptora (Ver apartado 3.4). La cámara receptora estaba constituida por un recinto exterior de hormigón de 20 cm de espesor y un recinto interior de hormigón de 10 cm de espesor desconectados mediante un sistema antivibratorio y una cámara de aire de 10 cm rellena de fibra de vidrio. La cámara emisora a su vez, se desplaza en sentido vertical alejándose de la cámara receptora para permitir la colocación de la muestra, cumpliendo con los requisitos de la norma UNE-EN ISO 140-1:1998.

La mejora del aislamiento a ruido de impactos de una muestra se caracteriza por la reducción del nivel de presión sonora de impactos (ΔL) [9]. Esta reducción del nivel de presión sonora e impactos se obtiene como la diferencia de los niveles de presión de ruido de impactos normalizado del forjado pesado normalizado sin y con muestra, según la ecuación (1):

$$\Delta L = L_{n,0} - L_n \text{ [dB]} \quad (1)$$

donde $L_{n,0}$ es el nivel de presión de ruido de impactos normalizado del forjado pesado normalizado, entre 100 y 5000 Hz, y L_n es el nivel de presión de ruido de impactos normalizado de la muestra sobre el forjado pesado normalizado, entre 100 y 5000 Hz.

El campo sonoro en la sala receptora se muestreó mediante un micrófono girando con un radio de un metro a una velocidad de 16 s/ciclo durante 32 segundos por cada medida. Además, el área de absorción sonora equivalente se evaluó con ayuda de la ecuación de Sabine a partir del tiempo de reverberación medido en la sala receptora, esto es:

$$A = 0,16 \cdot \frac{V}{T} \text{ [m}^2\text{]} \quad (2)$$

donde T es el tiempo de reverberación del recinto receptor, y V es el volumen del recinto receptor.

El tiempo de reverberación de la sala receptora se determinó empleando una posición de fuente y seis posiciones fijas de micrófono distribuidas cada 60° en el recorrido del micrófono. Además se midió el ruido de fondo de la sala receptora en cada tercio de octava entre 100 Hz y 5 kHz, verificando en cada momento antes y después de los ensayos el correcto funcionamiento de la cadena de medida.

La reducción del nivel de presión sonora de impactos, ΔL , en bandas de frecuencias de tercio de octava entre 100 y 5000 Hz, sobre el forjado normalizado UNE-EN ISO 140-8:1998 medido en laboratorio dio como resultado:

Reducción del nivel de presión sonora de impactos			
f (Hz)	L_n (dB)	$L_{n,0}$ (dB)	ΔL (dB)
100	66,6	65,4	- 1,2
125	61,0	60,1	- 0,9
160	60,9	66,9	6,0
200	52,9	65,8	12,9
250	49,3	66,4	17,1
315	43,5	65,4	21,9
400	39,7	66,1	26,4
500	39,0	68,1	29,1
630	38,7	68,8	30,1
800	36,6	70,2	33,6
1000	34,7	70,7	36,0
1250	34,3	71,6	37,3
1600	31,6	71,3	39,7
2000	29,3	71,1	41,8
2500	29,8	69,9	40,1
3150	34,7	69,2	34,5
4000	33,5	67,7	34,2
5000	23,3	65,7	42,4
$L_{n,w}$	51	77	
L_n (A)	53,2	80,7	

Tabla 4.1. Ensayo normalizado a ruido de impactos según UNE-EN 140-8.

De forma gráfica la figura 4.10 representa las condiciones del ensayo:

Volumen sala receptora:
64,7 m³

Área de la muestra:
13,86 m²

Masa superficial:
100 Kg/m²

Temperatura: 19,2 °C
Humedad relativa: 98%

Fig. 4.10. Condiciones del ensayo normalizado realizado.

Los datos de la tabla 4.1 se representan en forma de gráfica tal y como los describe el ensayo normalizado UNE (Figura 4.11).

Fig. 4.11. Ensayo normalizado a ruido de impactos según UNE-EN 140-8.

Además también se calculo el índice de reducción ponderada del nivel de presión sonora de impactos ΔL_w , según la norma UNE-EN ISO 717-2, utilizando la ecuación:

$$\Delta L_w = L_{n,r,0,w} - L_{n,r,w} = 78 \text{ dB} - L_{n,r,w} \text{ [dB]} \quad (8)$$

donde $L_{n,r,0,w}$ es el nivel normalizado ponderado de la presión sonora del suelo de referencia sin el recubrimiento bajo ensayo, y $L_{n,r,w}$ es el nivel normalizado ponderado de la presión sonora del suelo de referencia con el recubrimiento bajo ensayo.

En nuestro caso para la banda de 2 cm de EEPS se obtuvo un valor de $\Delta L_w = 23 \text{ dB}$ ensayado bajo condiciones

Frecuencia (Hz)

Evaluando los resultados obtenidos tras el ensayo, podemos ver como el tándem poliestireno expandido elastificado (EEPS) y solado de hormigón armado forman una buena combinación para disminuir la transmisión de vibraciones generadas como ruido de impacto, que a su vez tiene como ventaja respecto al poliestireno expandido (EPS) que sufre una menor deformación al trabajar en el estado plástico.

Además se puede ver que la eficacia de esta solución constructiva es mayor a altas frecuencias de vibración y menos efectiva para las bajas frecuencias, siendo incluso acentuadora del ruido de impacto en las frecuencias 100 y 125 Hz. Una posible solución para este fenómeno sería el empleo de resortes que desolidarizasen ambas partes del forjado evitando la transmisión directa.

4.5. Acelerómetro y baldosas.

Por otro lado, en este trabajo también se realizó un estudio acústico con diferentes materiales y geometrías para estudiar su comportamiento de cara a la transmisión de vibraciones ayudándose de un acelerómetro.

En primer lugar y para verificar que existían diferencias reales entre las baldosas de mortero y de hormigón, como se había constatado en el apartado 4.2 y 4.3 de este capítulo. Se decidió repetir el ensayo en el cual se empleaba el vibrador electromagnético como equipo de golpeo, pero esta vez capturando los datos con ayuda de un acelerómetro modelo CESVA© tal y como se realiza en los ensayos normalizados por la norma UNE-EN ISO 140 (figura 4.12), en tres posiciones diferenciadas.

Fig. 4.12. Ensayos con acelerómetro. (a) Diseño 3D equipo de golpeo; (b) Ejemplo de toma de medidas.

Para el caso de las baldosas de mortero y de hormigón de 50x50 cm se obtuvieron las siguientes diferencias.

Fig. 4.13. Baldosa de mortero M-A, Posición 2. Nivel de presión sonora respecto frecuencia.

Fig. 4.14. Mortero M - B, Posición 2.Nivel de presión sonora respecto a la frecuencia.

Fig. 4.15. Hormigón HM-20 I, Posición 2.Nivel de presión sonora respecto a la frecuencia.

Fig. 4.16. Hormigón HM-30 I, Posición 2.Nivel de presión sonora respecto a la frecuencia.

Como se puede apreciar, aunque los niveles máximos de presión sonora son similares entre ambos materiales, la transmisión dentro de los morteros es más homogénea, presentando las gráficas mayores simetrías para las diferentes frecuencias. En cambio en el caso del hormigón se hace más patente la diferencia entre ambas composiciones, para el caso del HM-20, la transmisión de los impactos se presenta más suave acorde con lo que se esperaba, ya que la composición de ésta tenía una consistencia más blanda y se pudo vibrar y distribuir mejor. Por otro lado, la baldosa de HM-30 presenta los mayores niveles de transmisión de ruido de impacto y las mayores diferencias entre las crestas de la onda, es puede ser debido a la porosidad más pronunciada del material ya que este tiene una composición más heterogénea y mayor cantidad de huecos internos.

Después se estudio la influencia entre las diferentes geometrías para un mismo tipo de aislante (EPS) en las baldosas de hormigón, obteniendo los siguientes:

Fig. 4.17. Tipología de aislantes con sus diferentes geometrías.

Fig. 4.18. HM – 20 II + Aislante Tipo I, Posición 2. Nivel de presión sonora respecto a la frecuencia.

Fig. 4.19. HM – 20 II + Aislante Tipo II, Posición 2. Nivel de presión sonora respecto a la frecuencia.

Fig. 4.20. HM – 20 II + Aislante Tipo III, Posición 2. Nivel de presión sonora respecto a la frecuencia.

Fig. 4.21. HM – 20 II + Aislante Tipo IV, Posición 2. Nivel de presión sonora respecto a la frecuencia.

Fig. 4.22. HM – 20 II + Aislante Tipo V, Posición 2. Nivel de presión sonora respecto a la frecuencia.

Fig. 4.23. HM – 20 II + Aislante Tipo VI, Posición 2. Nivel de presión sonora respecto a la frecuencia.

110 dB

Fig. 4.24. HM – 20 II sin aislante, Posición 2. Nivel de presión sonora respecto frecuencia.

Como se puede ver en las graficas 4.18 – 4.24 el tipo de geometría que sustenta la base de la plancha de hormigón influye de cara a la transmisión de la vibración producida por impacto. Todos los aislantes aportan una disminución de 10 dB o superior con respecto a la plancha sin aislamiento, si bien es cierto, que los componentes armónicos son muy diferenciados para las distintas geometrías. El aislamiento tipo EPS-06 es el que mejor resultados deporta reduciendo en 15 dB la transmisión de ruido de impacto, quizá debido a la mayor compacidad de sus tetones y la distribución homogénea de las pirámides que sustentan la baldosa.

Por otro lado, como era de suponer para la misma geometría de aislante y distinta dosificación del hormigón la respuesta frente a la transmisión de ruido de impacto era diferente, como muestran las figuras 4.23 – 4.26.

116 dB

Fig. 4.25. HM – 30 II sin aislante, Posición 2. Nivel de presión sonora respecto a la frecuencia.

112 dB

Fig. 4.26. HM – 30 II + Aislante Tipo VI, Posición 2. Nivel de presión sonora respecto a la frecuencia.

En este caso se aprecia como para la dosificación de HM – 20 se produce una reducción en la transmisión de ruido de impacto de hasta 15 dB para el aislante tipo EPS-06, en cambio para ese mismo aislante y una dosificación de HM – 30 la reducción es tan solo de 4 dB. Luego para cada dosificación el tipo de geometría que permite un mayor aislamiento acústico es diferente.

A la vista de los resultados anteriores, se decidió comprobar la influencia del tamaño de la baldosa en la toma de resultados. Para ello se fabricaron de una misma amasada morteros con dosificación 1:3:0,5 (cemento/arena/agua) para planchas de 50 x 50 cm y de 30 x 30 cm, ambas con el mismo tipo de materiales y aisladas con una capa de 3 cm de EPS en su cara inferior, obteniendo los siguientes resultados.

118 dB

Fig. 4.27. Mortero M –AI (50x50 cm), Posición 2. Nivel de presión sonora respecto a la frecuencia.

96 dB

Fig. 4.28. Mortero MP – 2 (30 x 30 cm), Posición 2. Nivel de presión sonora respecto a la frecuencia.

Como se puede apreciar en las figuras 4.27 y 4.28, para la misma dosificación de mortero en baldosas de tamaño 50 x 50 cm la diferencia entre los valores máximos de transmisión a ruido de impacto y los menores es de casi 80 dB. En cambio, para baldosas de 30 x 30 cm esta diferencia es de 50 dB en los puntos más pronunciados, apreciándose una diferencia notable entre ambas, pudiendo inferenciar que en el mismo material las técnicas de medida deben ser diferentes y adaptarse su superficie.

Por último se realizó una comparativa entre dos tipos diferentes de aislantes, el poliestireno expandido (EPS) y el poliestireno expandido elastificado (EPS) para la misma dimensión de baldosas 30 x 30 cm y el mismo material base mortero con dosificación 1:3:0,5, obteniendo los resultados de las figuras 4.27 y 4.28.

113 dB

Fig. 4.29. Mortero MP-4 EPS (30x30 cm), Posición 2. Nivel de presión sonora respecto a la frecuencia.

Fig. 4.30. Mortero MP-12 EEPS (30 x 30 cm), Posición 2. Nivel de presión sonora respecto a la frecuencia.

En este caso se aprecia como para un mismo espesor de 2 cm de aislante el EEPS proporciona mayores valores de aislamiento acústico que el EPS en planchas de la misma dimensión. Para nuestro caso concreto con una baldosa de 30 x 30 cm esta diferencia es de prácticamente 10 dB.

4.6. Acelerómetro y losa bajo dos equipos de golpeo.

Como ensayo complementario, se trató de corroborar si el equipo de golpeo regulable (vibrador electromagnético) era capaz de reproducir resultados semejables a los del equipo normalizado UNE EN 140-3 sobre la losa de 1,20 x 0,80 x 0,20.

Fig. 4.31. Grafico 3D: Tiempo de reverberación de la losa HM - 30.

La figura 4.31 muestra el tiempo de reverberación de la losa y el nivel de presión sonora para las distintas frecuencias vibración. En él se puede apreciar como estos valores disminuyen conforme se incrementa la frecuencia de vibración.

Por otra parte, en las figuras 4.32 y 4.33 se muestra la respuesta del acelerómetro sometido a un golpeo continuado en su superficie bajo el equipo normalizado y bajo el equipo de diseño propio con el vibrador.

Fig. 4.32. Respuesta de la losa bajo equipo normalizado UNE EN 140-3.

Fig. 4.33. HM – 20 II sin aislante, Posición 2. Nivel de presión sonora respecto frecuencia.

En este caso, se puede ver como existe una similitud entre las respuestas de ambos equipos de golpeo, siendo inferior el nivel de presión sonora alcanzado para el caso del vibrador. Estos resultados validan la hipótesis que bajo una buena calibración del equipo se pueden obtener resultados similares y más económicos que los tradicionales.

Bibliografía

- [1] Nagy, A. Determination of E-modulus of young concrete with nondestructive method. J. Mater. Civ. Eng. 1997, 9, 15–20.
- [2] EHE – 08. Instrucción de Hormigón Estructural. Ministerio de Fomento de España, 2010.
- [3] Fernández Cánovas, M. (2007). “*HORMIGÓN*”. Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 8ª Edición, Octubre 2007.
- [4] UNE EN ISO 140-8: 1998 Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 8: Medición en laboratorio de la reducción de ruido de impactos transmitido a través de revestimientos de suelos sobre un forjado normalizado pesado (ISO 140-8: 1997).
- [5] Paul A. Tipler & Gene Mosca. “*FÍSICA, para la ciencia y la tecnología. Vol. 2*”, Editorial Reverte, 5ª Edición, Mayo 2005.
- [6] Álvaro García Meseguer, Francisco Morán Cabré, Juan Carlos Arroyo Portero. “*Jiménez Montoya. HORMIGÓN ARMADO*”, Editorial GUSTAVO GIL, 15ª Edición, 2011.
- [7] Éric Félice. “*Perturbaciones Armónicas*”, Editorial PARANINFO, 1ª Edición, 2001.
- [8] UNE EN ISO 140-6: 1999 Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 6: Medición en laboratorio del aislamiento acústico de suelos al ruido de impactos. (ISO 140-6: 1998).
- [9] CTE DB – HR. Protección Frente al Ruido, Septiembre 2009.

CAPÍTULO 5**CONCLUSIONES****CONCLUSIONES**

Una vez realizado el análisis e interpretación de los resultados obtenidos en el trabajo experimental desarrollado, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- El transductor desarrollado en este trabajo es capaz de apreciar variaciones de frecuencia con independencia del mecanismo de golpeo implementado.
- El equipo de golpeo implementado mediante un vibrador electromagnético y estructura auxiliar es capaz de producir vibraciones medibles y controlables.
- El análisis del contenido en armónicos de la respuesta del sensor bajo una misma señal excitadora, produce respuestas bien diferenciadas entre el hormigón y el mortero. En este caso, se ha obtenido además, que la frecuencia de respuesta del hormigón es mayor que la del mortero, en concordancia con las predicciones teóricas.
- En ensayo normalizado UNE EN 140 – 7 muestra que el empleo del EEPS como material atenuador del ruido de impacto ofrece buenas prestaciones para su implantación en obra.
- Tras la medición sobre las baldosas con el acelerómetro se puede apreciar que los ensayos acústicos a ruido de impacto son muy sensibles a la dosificación del hormigón y el mortero, siendo este por tanto, un factor imprescindible de controlar.

- Se puede apreciar a su vez como, bajo un mismo tipo de aislante las diferentes geometrías de sustentación, permiten obtener diferentes grados de aislamiento acústico, aun siendo todas del mismo espesor. De las gráficas se desprende que prima la continuidad de los apoyos frente a la separación.
- Las diferencias de dosificación también influyen en el aislamiento acústico aún si se emplea la misma tipología de aislante. En nuestro caso, se puede apreciar cómo para hormigones de baja calidad se produce un nivel de aislamiento mayor que para hormigones de resistencia mayor, empleando en ambos caso el mismo tipo de aislante de EPS.
- Por otra parte, el tamaño de la plancha de hormigón dentro de una misma dosificación también influyen en los niveles de presión acústica. Tras este resultado cabe esperar que la nueva metodología que trata de desarrollar la norma ISO/CD 16251-1, para medición de ruido de impacto con ejemplares de menor tamaño, de resultados dispares a los de la actual norma UNE EN 140, siendo por tanto necesario estudiar el factor de correlación entre ambas tipologías de ensayos.
- Para una misma tipología de mortero, el aislamiento acústico mediante EEPS se comporta mejor que el EPS, teniendo ambos el mismo espesor. Por tanto, conviene trabajar con materiales comprendidos dentro del periodo elástico para atenuación de vibraciones.
- Gracias a la toma de medidas bajo la losa elaborada de dimensiones reguladas por la norma ISO/CD 16251-1, se puede apreciar que existe similitud entre los resultados obtenidos empleando el equipo de golpeo alternativo basado en el vibrador electromagnético y el equipo UNE EN 140-3. Es por ello, que se puede decir que el sistema propuesto en este trabajo puede ser empleado como sistema de precertificación de losas de forjado.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Como futuras líneas que permitan continuar con el trabajo desarrollado en la presente tesis se pueden citar:

- Implementar el transductor en un circuito de segundo orden para obtener así una respuesta más sensible del sensor, además, mejorar la calidad del amplificador de potencia construido.

- Validar el empleo del sensor diseñado para losas de forjado prefabricadas de dimensiones mayores.
- Relacionar los resultados obtenidos en las mediciones del sensor con los parámetros físicos propios del hormigón y el mortero, estudiando así la forma de desarrollar un posible método que permita obtener resultados similares a los que se obtienen mediante la aplicación de los ensayos regulados.
- Establecer una correlación entre los niveles de aislamiento acústico mediante el uso de EEPS aplicando el ensayo normalizado UNE EN 140, y empleando la losa elaborada en este trabajo ISO/CD 16251-1.
- Trabajar con diferentes dosificaciones y tipologías de áridos hasta obtener una composición que permita reducir al máximo los niveles de transmisión de ruido de impacto.

DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Algunas partes de este trabajo han sido publicadas durante la realización del mismo. A continuación, se muestra una relación en orden cronológico, de los diferentes congresos y artículos aceptados hasta la fecha que guardan relación con el contenido de esta tesis.

Artículos en revistas

1. Morón, C. García, A. Ferrández, D. (2015). “*New System for Measuring Impact Vibration on Floor Decking Sheets*”. *Sensors* 2015, Vol. 15, pp. 635-641; doi: 10.3390/s150100635, ISSN 1424-8220.
2. Morón, C. García, A. Ferrández, D. Blanco, V. (2015). “*Transmission of Impact Vibration on Concrete and Mortar Sheets*”. *Shock and Vibration*, Volume 2015, Article ID 184648, pp. 1-6; <http://dx.doi.org/10.1155/2015/184648>

Congresos internacionales

1. Morón, C. García, A. Ferrández, D. (2014). “*New System for Measuring Impact Vibration on Floor Decking Sheets*”. *International Electronic Conference on Sensors and Applications*, Junio 2014, pp. 1-6; www.mdpi.com/journal/sensors.
2. Morón, C. García, A. Ferrández, D. (2015). “*Learning process of the vibration generation by impact on floor used in building engineering students*”.

International Technology, Education and Development Conference, INTED 2015, Marzo 2015, pp. 4469 – 4475. ISBN: 978-84-606-5763-7.

De forma paralela, y durante la realización de esta tesis, se realizaron otras publicaciones como consecuencia de la actividad investigadora del doctorando en otras materias. Separadas en dos ramas, e igualmente ordenadas cronológicamente, los resultados obtenidos son:

Publicaciones en materia de educación

1. Ferrández, D. Morón, C. García, A. (2015). *“Study of the difficulties presented by teenagers regarding the translation of problems into algebraic language”*. International Technology, Education and Development Conference, INTED 2015, Marzo 2015, pp. 6808 – 6813. ISBN: 978-84-606-5763-7.
2. Blanco, V. Morón, C. Ferrández, D. García, A. (2015). *“A proposal of an alternative model of teaching English in Spain”*. International Conference on Education and New Learning Technologies, EDULEARN 2015, Julio 2015, pp. 2585 – 2590, ISBN: 978-84-606-8243-1.
3. Ferrández, D. Morón, C. Calderari, C. García, A. (2015). *“New proposal for the development of competences and work of the contents on the course of Plastic and Visual Education”*. International Conference on Education and New Learning Technologies, EDULEARN 2015, Julio 2015, pp. 2604 – 2610, ISBN: 978-84-606-8243-1.
4. Morón, C. García, A. Ferrández, D. Blanco, V. García-Fuentevilla, L. (2015). *“How to improve teaching of Mathematics through Technical Drawing”*. International Conference of Education, Research and Innovation, ICERI 2015, Noviembre 2015, pp. 143 – 151, ISBN: 978-84-608-2657-6.
5. Morón, C. Ferrández, D. García, A. Payán, A. (2015). *“Attention Deficit Hyperactivity Disorder (ADHD). Another way of teaching is possible”*. International Conference of Education, Research and Innovation, ICERI 2015, Noviembre 2015, pp. 166 – 174, ISBN: 978-84-608-2657-6.
6. Morón, C. Ferrández, D. Ramos, M. P. Dorado, M. G. (2016). *“The importance of educational guidance at every stage of the education system”*. International Technology, Education and Development Conference, INTED 2016, Marzo 2016, pp. 632 – 638, ISBN: 978-84-608-5617-7.

7. Morón, C. Ferrández, D. Díaz, J. P. Ramos, M. P. (2016). “*Learning and knowledge technologies in professional training*”. International Technology, Education and Development Conference, INTED 2016, Marzo 2016, pp. 700 – 706, ISBN: 978-84-608-5617-7.
8. Morón, C. Blanco, V. Ferrández, D. Payán, A. Ramos, M. P. (2016). “Sleeping habits at adolescence and its influence on learning”. International Conference on Education and New Learning Technologies, EDULEARN 2016, Julio 2016, ISSN: 2340-1117.
9. Ferrández, D. Morón, C. Ramos, M. P. Saiz, P. Díaz, J. P. (2016). “*Mindfulness in Vocational Training Education*”. International Conference on Education and New Learning Technologies, EDULEARN 2016, Julio 2016, ISSN: 2340-1117.
10. Sanjuan, R. Ferrández, D. Ramos, M. P. Morón, C. (2016). “*Iniciación a la programación con Arduino mediante aprendizaje colaborativo*”. XVIII Simposio Internacional de Informática Educativa, SIIE 2016, Salamanca, España, Septiembre 2016.

Publicaciones en materia de energías y eficiencia energética.

1. Morón, C. García, A. Ferrández, D. Hosokawa, K. (2015). “*Passive conditioning of a building in Sierra of Madrid*”. Anales de Edificación, Vol. 1, 1, 7-15 (2015). ISSN: 2444-1309.
2. Morón, C. Díaz, J. P. Ferrández, D. Pardo, A. Abu Alhassan, Y. (2016). “*Estudio comparativo entre el captador solar de placa plana y el captador solar de tubos de vacío*”. Congreso Internacional de Innovación Tecnológica en Edificación, CITE 2016, Madrid, España. ISBN: 978-84-16397-28-0.
3. Ferrández, D. Morón, C. Díaz, J. P. Osorio, T. (2016). “*Protocolo para la evaluación técnica de una instalación solar térmica*”. Congreso Internacional de Innovación Tecnológica en Edificación, CITE 2016, Madrid, España. ISBN: 978-84-16397-28-0.
4. Morón, C. Ferrández, D. Díaz, J. P. Ramos, M. P. (2016). “*Mechatronic prototype of parabolic solar tracker*”. Sensors 2016, 2º revision. ISSN 1424-8220.