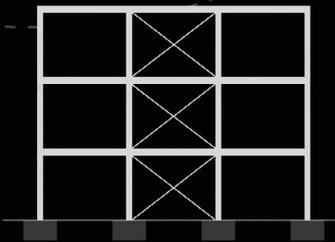
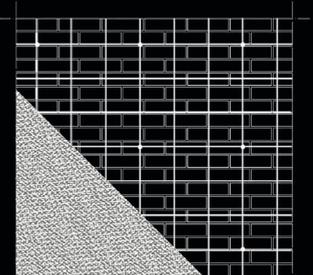
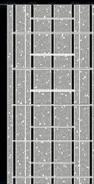
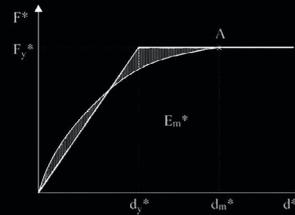
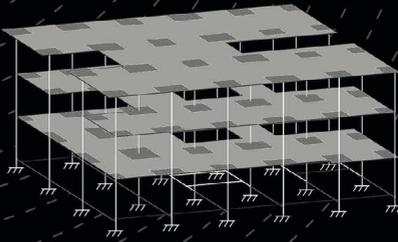
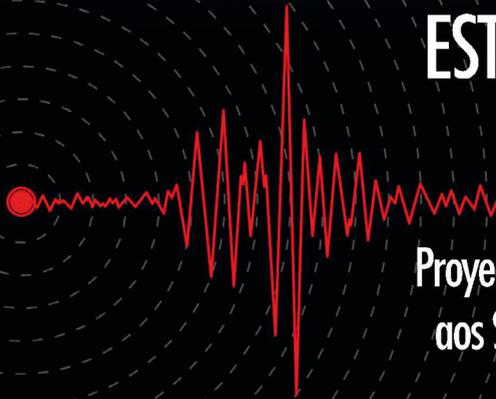


Beatriz Zapico Blanco
(coord.)

REHABILITACIÓN SÍSMICA ESTRUCTURAL DE COLEGIOS DE EDUCACIÓN PRIMARIA

Proyecto PERSISTAH (Projetos de Escolas Resilientes
aos SISMos no Território do Algarve e de Huelva)

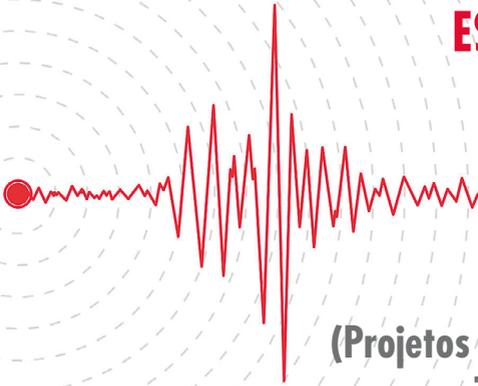


REHABILITACIÓN SÍSMICA ESTRUCTURAL DE COLEGIOS DE EDUCACIÓN PRIMARIA

INDICE

Beatriz Zapico Blanco (coord.)

REHABILITACIÓN SÍSMICA ESTRUCTURAL DE COLEGIOS DE EDUCACIÓN PRIMARIA



Proyecto PERSISTAH
(Projetos de Escolas Resilientes aos SÍSmos
no Território do Algarve e de Huelva)

Antonio Morales Esteban, Emilio Romero Sánchez,
Beatriz Zapico Blanco, María Victoria Requena García de la Cruz,
Jaime de Miguel Rodríguez y João Estêvão

UNIVERSIDAD DE SEVILLA
u eus
Editorial Universidad de Sevilla

Sevilla 2020

Colección Ediciones especiales

COMITÉ EDITORIAL

José Beltrán Fortes
(Director de la Editorial Universidad de Sevilla)
Araceli López Serena
(Subdirectora)

Concepción Barrero Rodríguez
Rafael Fernández Chacón
María Gracia García Martín
Ana Ilundáin Larrañeta
María del Pópulo Pablo-Romero Gil-Delgado
Manuel Padilla Cruz
Marta Palenque Sánchez
María Eugenia Petit-Breuilh Sepúlveda
José-Leonardo Ruiz Sánchez
Antonio Tejedor Cabrera

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito de la Editorial Universidad de Sevilla.

La presente obra se ha desarrollado en el marco del proyecto PERSISTAH, *Projetos de Escolas Resilientes aos Sismos no Território do Algarve e de Huelva* (0313_PERSISTAH_5_P), desarrollado conjuntamente por las universidades del Algarve y Sevilla y financiado por la Comisión Europea a través de la convocatoria EP - INTERREG V A España Portugal (POCTEP).



Diseño de cubierta: Emilio Romero Sánchez Edición

© Editorial Universidad de Sevilla 2020

c/ Porvenir, 27 - 41013 Sevilla
Tlf. 954 487 447; 954 487 451 - Fax 954 487 443
Correo electrónico: eus4@us.es
Web: <<https://editorial.us.es>>

© Beatriz Zapico Blanco (coord.) 2020

© Antonio Morales Esteban (Universidad de Sevilla), Emilio Romero Sánchez (Universidad de Sevilla), Beatriz Zapico Blanco (Universidad de Sevilla), María Victoria Requena García de la Cruz (Universidad de Sevilla), Jaime de Miguel Rodríguez (Universidad de Sevilla) y João Estêvão (Universidade do Algarve) 2020

ISBN-e: 978-84-472-3035-8
DOI: <http://dx.doi.org/10.12795/9788447230358>

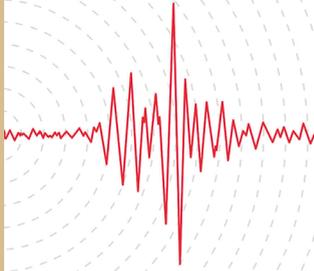
Maquetación y edición digital: Dosgraphic, S.L. (dosgraphic@dosgraphic.es)

Índice

Símbolos	11
Abreviaturas	13
Capítulo 1. Introducción	15
1.1. Objetivos del proyecto.....	17
1.2. La relevancia del proyecto.....	18
Capítulo 2. Peligrosidad sísmica de la región Algarve-Huelva	21
2.1. La región Algarve-Huelva.....	21
2.2. La influencia del suelo en la peligrosidad sísmica.....	24
2.3. La peligrosidad sísmica en España	24
2.3.1. Evolución temporal de la normativa sísmica en España.....	25
2.3.2. Normativa de aplicación en España.....	26
2.3.2.1. La norma de construcción sismorresistente (NCSE02)..	26
2.3.2.2. Actualización de los mapas de peligrosidad sísmica ...	32
2.3.3. Normativa recomendada: el Eurocódigo 8	34
2.3.3.1. Determinación del espectro de respuesta	35
2.3.3.2. Anexo Nacional español.....	37
2.4. La peligrosidad sísmica en Portugal.....	38
2.4.1. Normativa histórica sísmica: el Decreto Ley 235/83.....	38
2.4.1.1. Análisis probabilístico de la peligrosidad sísmica.....	38
2.4.1.2. Determinación de la acción sísmica.....	39
2.4.2. Normativa de aplicación: el Eurocódigo 8.....	39
2.4.2.1. Construcción del espectro de respuesta	40
2.4.2.2. El Anexo Nacional portugués	40
2.5. Comparación de peligrosidad en la región Algarve-Huelva	42
Capítulo 3. Caracterización de los colegios	47
3.1. Fuentes de información.....	47
3.1.1. Creación de la base de datos	48
3.1.2. Creación de fichas características de los edificios	48
3.1.3. Cuestionarios enviados a colegios	51

3.2. Proceso de caracterización de los edificios escolares	53
3.2.1. Clasificación según el sistema estructural y el año de construcción.....	53
3.2.2. Clasificación según geometría y volumetría	54
3.2.2.1. Edificios tipo compacto	55
3.2.2.2. Edificios tipo lineal.....	58
3.2.2.3. Edificios tipo intersección.....	60
3.2.2.4. Edificios tipo prisma.....	64
3.2.2.6. Edificios tipo yuxtaposición.....	64
3.2.3. Polideportivos	65
3.3. Caracterización de los edificios de muros de carga	65
3.4. Caracterización de los edificios de pórticos de hormigón armado ...	71
3.4.1. Fecha de construcción y normativas.....	71
3.4.2. Superficie y altura.....	73
3.4.3. Forjados	73
3.4.4. Pilares y vigas	74
3.4.5. Cerramientos	75
3.4.6. Irregularidades.....	76
3.4.7. Subtipos	76
3.4.7.1. Planta cuadrada.....	76
3.4.7.2. Planta rectangular	77
3.4.7.3. Intersección.....	79
3.4.7.4. Irregulares	80
Capítulo 4. Análisis de la seguridad estructural	81
4.1. Método.....	81
4.2. Análisis de la capacidad.....	82
4.3. Punto de desempeño	84
4.3.1. Método N2.....	84
4.3.1.1. Implementación en el programa PERSISTAH.....	85
4.3.2. Método del espectro de capacidad-demanda	91
4.3.2.1. Implementación en el programa PERSISTAH.....	93
4.4. Análisis del daño estructural.....	93
Capítulo 5. Programa PERSISTAH.....	99
5.1. Módulo colegios	100
5.1.1. Menú: colegio	100
5.1.2. Menú: edificios del colegio	103
5.1.3. Asimilación de curvas de capacidad.....	104

5.2. Módulo acción sísmica	104
5.3. Módulo de daño.....	106
5.3.1. Funcionamiento	106
5.3.2. Obtención del <i>School-score</i>	108
Capítulo 6. Medidas para el refuerzo sísmico.....	109
6.1. Contexto internacional.....	110
6.1.1. ATC-40	110
6.1.2. FEMA 356	113
6.1.3. EC8	115
6.1.3.1. Edificios de mampostería	116
6.1.3.2. Edificios de hormigón armado.....	119
6.1.3.3. Otros edificios	120
6.2. Edificios de mampostería.....	125
6.2.1. Estado del Arte	126
6.2.1.1. Mallas metálicas	128
6.2.1.2. Bandas de chapa de acero.....	129
6.2.1.3. Inyecciones.....	131
6.2.1.4. Elementos de hormigón armado.....	132
6.2.1.5. Fibra de carbono reforzada con polímeros (CFRP) ..	133
6.2.1.6. Recercados.....	134
6.2.2. Soluciones de refuerzo consideradas.....	136
6.3. Edificios de hormigón armado	138
6.3.1. Estado del arte.....	139
6.3.1.1. Arriostramiento	139
6.3.1.2. Sistemas de disipación de energía	140
6.3.1.3. Muros pantalla	141
6.3.1.4. Camisas de confinamiento	142
6.3.2. Soluciones de refuerzo consideradas.....	143
6.4. Índice de refuerzo sísmico	145
Capítulo 7. Ejemplo de rehabilitación sísmica.....	147
Referencias.....	153
Listado de tablas	159
Listado de figuras.....	161



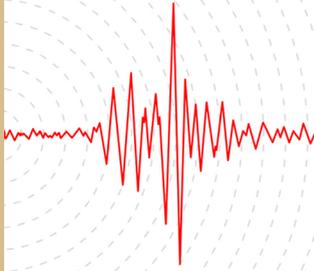
Símbolos

A	Coefficiente de dilatación térmica
A_I	Índice de impacto arquitectónico
a_b	Aceleración sísmica básica
a_{gR}	Aceleración pico de referencia
a_g	Aceleración del suelo en un terreno tipo A
a_r	Aceleración de referencia PGA ($T_R = 475$).
C	Coefficiente del terreno
C_I	Índice de coste
d	Desplazamiento equivalente sistema MDOF
d^*	Desplazamiento equivalente sistema SDOF
d_{D_i}	Desplazamiento medio para un estado de daño
d_{et}^*	Desplazamiento elástico SDOF
d_m^*	Desplazamiento formación mecanismo plástico
d_t	Desplazamiento objetivo sistema MDOF
d_t^*	Desplazamiento inelástico objetivo SDOF
$d_{t,D}^*$	Desplazamientos asociados a un estado límite de daño
d_u^*	Desplazamiento último sistema SDOF
d_y^*	Desplazamiento límite elástico SDOF
E	Módulo de deformación
E_b	Módulo de deformación del ladrillo
E_m^*	Energía de deformación para la formación del mecanismo plástico
E_I	Índice de eficiencia
F^*	Fuerza equivalente sistema SDOF
f_b	Resistencia a compresión del ladrillo
f_c^*	Resistencia característica del hormigón
F_i	Conjunto de fuerzas aplicadas MDOF
f_k	Resistencia característica a compresión de la fábrica
f_m	Resistencia del mortero
F_y	Límite elástico
F_u	Tensión de rotura mínima
F_y^*	Fuerza correspondiente al límite elástico SDOF

G	Módulo de cortante
K	Coefficiente de contribución
K_f	Constante en función del tipo de ladrillo y mortero (EC6)
k_m^*	Factor de rigidez curva bilineal
κ_ξ	Factor de modificación amortiguación
m^*	Masa equivalente sistema SDOF
m_i	Masas normalizadas de cada nivel MDOF
M_w	Parámetro magnitud momento
N	Nodo de libertad sistema MDOF
q	Factor de respuesta (Sistema estructura y ductilidad del mismo)
q_c	Resistencia en punta del penetrómetro estático
q_u	Resistencia compresión simple
R_i	Índice de refuerzo sísmico
S	Coefficiente de amplificación del terreno
$S_c(T)$	Espectro de respuesta elástica
T	Período de vibración de un sistema lineal con un grado de libertad.
T^*	Período sistema equivalente SDOF
T_A, T_B	Períodos característicos del espectro de respuesta (NCSE02)
T_B	Límite inferior del período del tramo de aceleración espectral constante (EC8-1)
T_C	Límite superior del período del tramo de aceleración espectral constante (EC8-1)
T_D	Valor que define el comienzo del tramo de respuesta de desplazamiento constante del espectro (EC8-1)
T_r	Período de retorno
t_0	Resistencia al corte
U	Coefficiente Poisson
V	Cortante Basal sistema MDOF
v_s	Velocidad de propagación de las ondas transversales o de cizalla
v_l	Velocidad de propagación de las ondas elásticas longitudinales
W	Densidad
α_1, α_2 y α_3	Factores de importancia índice de refuerzo sísmico
$\alpha(T)$	Valor del espectro normalizado de respuesta elástica
β_{D_i}	Desviación estándar del logaritmo del desplazamiento d_{D_i}
Γ	Factor de transformación MDOF-SDOF
η	Coefficiente de corrección del amortiguamiento
λ	Parámetro de carga fuerzas laterales MDOF
μ	Coefficiente de comportamiento por ductilidad
ξ_i	Amortiguación equivalente
ρ	Coefficiente adimensional de riesgo
Φ	Función de distribución acumulativa para la distribución normal
ϕ_i	Deformación de cada nivel MDOF
$\%S_c$	Porcentaje de aceleración espectral

Abreviaturas

CFRP	Fibra de carbono reforzada con polimeros
DL	Estado límite de limitación de daños
EC8	Eurocódigo 8
EC6	Eurocódigo 6
EC8-1	Eurocódigo 8, parte 1
EC8-3	Eurocódigo 8, parte 3
EMS	Escala Macrosísmica Europea
ERSTA	Estudio do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve
FRP	Fibras de polímeros reforzados
HA	Hormigón armado
IGN	Instituto Geográfico Nacional
IGM	Instituto Geológico y Minero de España
LNEG	Laboratorio Nacional de energía y geología de Portugal
MDOF	Sistema de multiples grados de libertad
NC	Estado límite de proximidad al colapso
NCSE02	Normativa de Construcción Sismorresistente Española de 2002
OP	Estado límite operacional
PERSISTAH	Projetos de Escolas Resilientes aos SISmos no Território do Algarve e de Huelva
PNRRC	Plataformas Nacionales para la Reducción de Riesgo de Catástrofes
PGA	Aceleración pico
PSHA	Análisis probabilístico de la peligrosidad sísmica
RSAEEP	Reglamento de Segurança e Acções para Estructuras de Edifícios e Pontes
SD	Estado límite de daños significativos
SIRCO	Simulador de Risco sísmiCO
SDOF	Sistema de un solo grado de libertad



Capítulo 1. Introducción

El presente documento tiene como objetivo la presentación del trabajo desarrollado en el proyecto europeo de investigación PERSISTAH (*Projetos de Escolas Resilientes aos SISMos no Território do Algarve e de Huelva*, en portugués), el cual se ha desarrollado de forma cooperativa por la Universidad de Sevilla (España) y la Universidad del Algarve (Portugal). Dicho proyecto de investigación se centra en el estudio y la valoración del riesgo sísmico de edificios de educación primaria en el territorio del Algarve (Portugal) y Huelva (España). Para ello se han tenido en cuenta los objetivos establecidos por las Plataformas Nacionales para la Reducción de Riesgo de Catástrofes (PNRRC) de las Comisiones Nacionales de Protección Civil de Portugal y de España.

Se presentará la metodología y la normativa sísmica aplicada en el análisis de la vulnerabilidad y el posterior refuerzo sísmico de los edificios escolares. Dicha metodología dará respuesta a los objetivos e ideas principales del proyecto. A continuación, se presenta la peligrosidad sísmica de la zona del Algarve y de Huelva, así como la acción sísmica utilizada en cada región para el análisis sísmico. Además, se muestra la caracterización y la clasificación tipológica de los edificios escolares realizada para su posterior análisis sísmico. Por último, se desarrollan las diferentes técnicas de refuerzo sísmico propuestas por las diferentes normativas, así como las diferentes técnicas estudiadas en el proyecto.

Los terremotos se encuentran entre los desastres naturales que causan un mayor número de víctimas y pérdidas económicas. En este contexto, numerosos estudios establecen la importancia del estudio del riesgo sísmico de los edificios, con objeto de estimar y valorar los posibles daños que puede provocar una acción sísmica, con la finalidad de minimizar las pérdidas humanas y los bienes materiales y económicos. Los terremotos han causado históricamente daños y pérdidas humanas destacadas en Europa. Además, los terremotos ocurridos en Europa a principios del siglo XX han costado alrededor de 29 mil millones de euros y han causado 19 000 bajas (Battarra *et al.*, 2018). El potencial destructivo de un terremoto depende del daño producido, de la preparación y de la resiliencia de la población.

La actividad sísmica en la península ibérica es moderada (Morales-Esteban *et al.*, 2014). Sin embargo, en el sur se concentra la mayor actividad, caracterizada por grandes terremotos ($M_w \geq 6$), con periodos de retorno largos (Morales-Esteban *et al.*, 2014), lo que hace que la población no tenga conciencia del peligro existente. Esta actividad es debida a la convergencia entre las placas tectónicas euroasiática y africana y a la proximidad de la falla Azores-Gibraltar (Morales-Esteban *et al.*, 2014). La región del Algarve-Huelva se sitúa al suroeste de la península ibérica. Dicha zona está cerca de las fallas de Marqués de Pombal, San Vicente y la Herradura, las cuales han originado algunos de los terremotos más importantes que han afectado a la península ibérica, como el terremoto-maremoto de Lisboa de 1755 ($M_w = 8,7-9,0$) y el terremoto de 1969 ($M_w = 8$). Asimismo, el primero es el evento sísmico documentado más grande que ha afectado a Europa, que causó la muerte de 100 000 personas. La intensidad sísmica máxima de esta región en base los terremotos pasados es alta en el Algarve (IX-X) y Huelva (VII-VIII) (Teves-Costa *et al.*, 2019). A pesar de que existe un riesgo sísmico importante, hay una falta de estudios sísmicos de la zona, ya que la mayoría de los estudios sísmicos de la península ibérica se concentran en el este y sureste.

La vulnerabilidad sísmica de los edificios de la región se ha evaluado mediante métodos de estimación, como han sido SIRCO (Simulador de Risco sísmiCO) (Fazendeiro Sá *et al.*, 2016) o ERSTA (Estudio do Risco Sísmico e de Tsunamis do Algarve) (Autoridade Nacional de Protecção Civi [ANPC], 2010). Estos concluyen que es posible reducir el riesgo sísmico mejorando la prevención y los planes de emergencia. En este sentido, análisis de vulnerabilidad rigurosos sobre los edificios existentes y la implementación de soluciones de refuerzo apropiadas pueden ayudar a reducir los niveles de daños físicos, de pérdidas humanas y el impacto económico de eventos sísmicos futuros.

El comportamiento sísmico de los edificios juega un papel clave en el potencial destructivo de un terremoto. La vulnerabilidad de los edificios existentes ha sido el foco de intereses europeos en los últimos años. Esto se debe a los daños producidos por terremotos recientes, como los terremotos de L'Aquila (Italia) de 2009, Lorca (España) de 2011 y Amatrice (Italy) de 2016 (Ruiz-Pinilla *et al.*, 2016; Del Gaudio *et al.*, 2017; Fiorentino *et al.*, 2018). Una gran parte de los edificios de estas ciudades sufrió daños graves durante estos terremotos. Por lo tanto, la mejora del rendimiento sísmico de los edificios se ha convertido en una preocupación importante (Mazzoni *et al.*, 2018), la cual se puede lograr mediante la implementación de técnicas de refuerzo sísmico.

Los edificios escolares se han elegido en el proyecto PERSISTAH como objeto de estudio por ser los edificios más vulnerables en caso de terremoto, debido a una serie de aspectos: la dificultad de evacuación del edificio en caso

de emergencia, su bajo ratio adulto/niño y su alta concentración de personas en un espacio reducido. En caso de terremoto no solo las construcciones serían dañadas, sino que afectarían notablemente a los niños. En este sentido, diversos estudios han demostrado el efecto psicológico grave en los niños que han sufrido los efectos de un sismo y las ventajas de la preparación (UNICEF, 2011). Asimismo, los colegios pueden ser utilizados como refugio tras una catástrofe, debido a su carácter público. Generalmente son edificios con tipologías simples y repetitivas, las cuales fueron diseñadas y calculadas con normativas antiguas, sin tener en cuenta la acción sísmica. El 50%, aproximadamente, fueron diseñados con hormigón armado de dos o tres plantas, con la existencia de elementos débiles sísmicamente como los pilares cortos. Este tipo de edificios fueron dañados considerablemente durante el terremoto de Lorca de 2011 (Ruiz-Pinilla *et al.*, 2016). Además, el área se caracteriza por la presencia de estratos blandos superficiales, que pueden amplificar los efectos de los terremotos. Todo ello hace imprescindible comprobar y garantizar su estabilidad estructural frente a un terremoto.

Es importante resaltar que en caso de terremoto ambas regiones se verían igualmente afectadas. Uno de los objetivos del proyecto es mejorar el conocimiento de la realidad de cada país, en particular sobre las normas sísmicas y las prácticas constructivas. En este sentido, la normativa sísmica, las técnicas constructivas, las políticas de protección civil y las estrategias para la reducción del riesgo sísmico de ambos países se han comparado. Además, se ha desarrollado una base de datos con fichas de información de cada colegio de primaria (142 en el Algarve y 138 en Huelva), teniendo en cuenta las especificaciones de cada región.

En el proyecto se han identificado las tipologías principales de los colegios de primaria. Luego, se ha desarrollado un inventario de las características constructivas y estructurales de cada edificio. Con dicha información se ha analizado la vulnerabilidad de cada colegio a través de un análisis estático no lineal o *pushover* con el que se ha obtenido la curva de capacidad. Finalmente se ha realizado una clasificación del comportamiento sísmico de cada colegio, a través del *School-Score* (un sistema de jerarquización del riesgo sísmico de los edificios escolares). El comportamiento sísmico se ha evaluado en función del peligro, de la vulnerabilidad y de la exposición de cada edificio.

1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El proyecto europeo PERSISTAH tiene como objetivo principal el estudio y la valoración de la vulnerabilidad sísmica de los colegios de educación primaria del Algarve (Portugal) y Huelva (España), cooperativamente. Para ello se han

tenido en cuenta los objetivos establecidos por las Plataformas Nacionales para la Reducción de Riesgo de Catástrofes (PNRRC) de las Comisiones Nacionales de Protección Civil de Portugal y de España.

El proyecto PERSISTAH se basa en las siguientes ideas y objetivos principales:

- Una parte significativa de las fuentes sísmicas conocidas en el entorno del Algarve y Huelva tendrían un impacto transfronterizo.
- El conocimiento del peligro existente y de la vulnerabilidad sísmica de los edificios es fundamental para una respuesta eficaz en caso de emergencia.
- Estudiar en las escuelas la aplicación de medidas de mitigación ante un evento sísmico posible.
- Un punto importante es el desarrollo de material educativo y la comunicación del riesgo sísmico a estudiantes y profesores.
- La realización de recomendaciones de rehabilitación orientadas a los técnicos vinculados a la construcción.
- Otro factor importante es la creación de vínculos de cooperación en cuanto a la labor de mitigación de riesgo entre estas dos regiones vecinas.

1.2. LA RELEVANCIA DEL PROYECTO

18

El proyecto de investigación PERSISTAH presenta una serie de aspectos esenciales, los cuales han sustentado su aportación en la formación de una sociedad más resiliente a los sismos. Dichos aspectos son los siguientes: las singularidades de la sismicidad de esta zona geográfica, el interés en la tipología de edificios escolares y el análisis de su vulnerabilidad sísmica, la elaboración de una metodología de refuerzo sísmico, la cual ha sido aplicada en dos colegios piloto de Huelva y el Algarve, la comunicación del riesgo sísmico a la comunidad escolar, y finalmente, la cooperación internacional para la reducción de riesgos.

En primer lugar, el análisis de la vulnerabilidad sísmica de los edificios escolares, los cuales son edificios muy vulnerables al sismo. Además, por su composición y su carácter público pueden ser adaptados como refugio tras una catástrofe. Estos juegan un papel fundamental en la vida de los niños, los cuales son los más vulnerables en este tipo de eventos. Tras una catástrofe ellos se sienten seguros con la vuelta a la escuela, lo que significa una vuelta a la normalidad.

Dicho análisis de la vulnerabilidad sísmica se ha realizado a través de una metodología de evaluación integrada. Esta metodología se basa en el análisis de la vulnerabilidad a través de la curva de capacidad del edificio, la cual se usa para obtener el punto de desempeño estructural del mismo. Con todo esto se obtienen las diferentes probabilidades de daño del edificio escolar.

Esta metodología ha sido implantada en un *software* nuevo (Estêvão, 2019; Estêvão, 2020), el cual tiene implementadas la adaptación de un conjunto de rutinas informáticas previamente desarrolladas en los programas *EC8spec* (Estêvão, 2016) y *SIMULSIS* (Estêvão y Oliveira, 2012). En este contexto, se creó una nueva base de datos de colegios con la colaboración de todos los miembros del equipo. La finalidad de este programa informático es la obtención del *School-score*, el cual depende de la probabilidad de daño y de otros parámetros, como la vulnerabilidad de los elementos no estructurales, el número de estudiantes, los aspectos que inciden en la evacuación, etc. Son aspectos esenciales a tener en cuenta en el estudio de la vulnerabilidad sísmica del edificio escolar. Un valor elevado de este parámetro indica que el colegio es más vulnerable a los terremotos. Se ha elaborado una lista con la clasificación de los colegios en función de este parámetro, y el cual se tendrá en consideración para futuras intervenciones de refuerzo sísmico en los edificios. Además, se han realizado una serie de actividades formativas a técnicos sobre los aspectos de la metodología aplicada y las particularidades del proyecto de rehabilitación sísmico, con el fin de reducir el riesgo estructural y no estructural de los edificios.

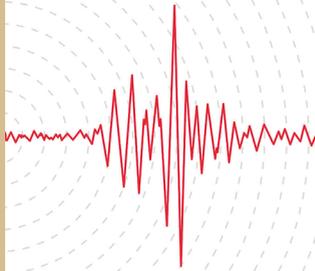
Otro de los factores fundamentales en este proyecto, es la importancia y la necesaria cooperación internacional entre países para la reducción del riesgo sísmico, ya que ambas regiones, las cuales presentan unas condiciones geográficas muy similares, serían afectadas por igual en caso de terremoto.

Por último, otro aspecto relevante del proyecto, es la formación y la comunicación del riesgo sísmico a la comunidad educativa. Los niños juegan un papel vital y son el futuro de nuestra sociedad. Un evento sísmico provoca en ellos un gran impacto psicológico y es fundamental la educación y la comunicación del peligro existente. Esta formación se ha llevado a cabo a través de una serie de actividades formativas realizadas en los colegios tanto para los maestros, como para los alumnos. En estas se trataron temas relacionados con la identificación de los riesgos, tanto dentro como fuera del propio edificio escolar, y se realizaron ejercicios de simulación. Esta acción es clave para incrementar la conciencia sobre el riesgo sísmico y para aprender a actuar en caso de terremoto. Además, se han desarrollado una serie de recursos pedagógicos para su uso por la comunidad educativa. Estos materiales presentan una serie de actividades prácticas para que los niños aprendan sobre estos aspectos de una forma divertida. Además, se presentan una serie de acciones fáciles para llevar a cabo antes y después de un evento sísmico.

Listado de tablas

Tabla 1.	Terremotos históricos sentidos en la Península Ibérica (Silva y Rodríguez Pascua, 2014)	22
Tabla 2.	Clasificación y coeficiente del terreno	27
Tabla 3.	Tipos de terreno. Valores geotécnicos característicos	27
Tabla 4.	Valores de la aceleración sísmica básica a_b de los municipios de la provincia de Huelva	30
Tabla 5.	Valores PGA ($T_R = 475$) de los municipios de la provincia de Huelva	33
Tabla 6.	Clasificación tipos de terreno.....	36
Tabla 7.	Valores de los periodos T_B , T_C y T_D y el coeficiente de suelo S según el tipo de espectro.....	37
Tabla 8.	Coeficientes de importancia (γ_I)	40
Tabla 9.	Valores de T_B , T_C y T_D y S para cada tipo de espectro de respuesta 41	
Tabla 10.	Aceleración máxima de referencia a_{gR} (m/s^2) en varias zonas sísmicas.....	42
Tabla 11.	Listado de los parámetros básicos para determinar la aceleración sísmica según cada código.....	43
Tabla 12.	Apartados incluidos en la base de datos	49
Tabla 13.	Ficha característica de un edificio para el cálculo del modelo estructural	51
Tabla 14.	Cuestionario enviado a la dirección de los colegios	52
Tabla 15.	Características comunes de los edificios de muros de carga de fábrica de ladrillo	66
Tabla 16.	Parámetros mecánicos de la fábrica de ladrillo	69
Tabla 17.	Clasificación de las tipologías de vulnerabilidad para edificios de muros de carga	70
Tabla 18.	Evolución de las propiedades mecánicas y criterios constructivos para edificios de hormigón armado según normativa.....	72

Tabla 19. Propiedades mecánicas de los edificios de pórticos de hormigón armado, según documentación proyectual disponible	72
Tabla 20. Características de los pilares y vigas de los edificios de pórticos de hormigón armado	74
Tabla 21. Propiedades de los edificios de pórticos de hormigón armado y planta cuadrada	77
Tabla 22. Propiedades de los edificios de pórticos de hormigón armado y planta rectangular	78
Tabla 23. Propiedades de los edificios de pórticos de hormigón armado con intersecciones.....	79
Tabla 24. Propiedades de los edificios de pórticos de hormigón armado con intersecciones.....	80
Tabla 25. Ecuaciones para la determinación del desplazamiento objetivo. Anexo B, EC8, parte 1.....	88
Tabla 26. Estrategias de adecuación sísmica de la norma ATC-40.....	111
Tabla 27. Estrategias de rehabilitación la norma FEMA 356.....	114
Tabla 28. Tipos de intervención. Eurocódigo 8, parte 3	116
Tabla 29. Estrategias de refuerzo Eurocódigo 8, parte 3. Anexo C: Edificios de fábrica.....	117
Tabla 30. Estrategias de refuerzo Eurocódigo 8, parte 3. Anexo A: Edificios de hormigón armado	119
Tabla 31. Estrategias de refuerzo globales Eurocódigo 8, parte 3, Anexo B: Estructuras de acero y mixtas	121
Tabla 32. Estrategias de refuerzo locales, Eurocódigo 8, parte 3. Anexo B: Estructuras de acero y mixtas	122
Tabla 33. Estrategias de refuerzo sísmico local en edificios de muros de carga	126
Tabla 34. Estrategias de refuerzo sísmico general en edificios de muros de carga	127



Listado de figuras

Figura 1.	Convergencia entre las placas tectónicas euroasiática y africana.	21
Figura 2.	Mapa de fallas activas cuaternarias en la península ibérica con magnitud de los terremotos (elaboración propia).....	23
Figura 3.	Espectro de respuesta elástica para diferentes valores de C y K (NCSE-02).....	29
Figura 4.	Espectro de respuesta elástica de tipo 1 (a) y 2 (b) para cada tipo de suelo.....	37
Figura 5.	Zonificación sísmica de Portugal (Decreto Ley nº. 235/83).	39
Figura 6.	Zonificación sísmica anexo tipo 1 (a) y tipo 2 (b).....	41
Figura 7.	Municipios considerados en el estudio.....	44
Figura 8.	Comparación de los espectros de respuesta para cada código sísmico para un escenario de terremoto lejano (tipo 1) (a) y un terremoto cercano (tipo 2) (b).....	45
Figura 9.	Colegios según el número de edificios en los que se dividen....	47
Figura 10.	Clasificación de los colegios según su sistema estructural.	53
Figura 11.	Clasificación de los edificios según la fecha de construcción y el sistema estructural (sin considerar los edificios para los que no se conoce el sistema estructural).....	54
Figura 12.	Clasificación de los edificios según sus características geométricas y volumétricas.	55
Figura 13.	Clasificación volumétrica. Colegio S084. Edificio: 2. Tipo: Compacto. Subtipo: sin patios.	55
Figura 14.	Clasificación volumétrica. Colegio S006. Edificio: 1. Tipo: compacto. Subtipo: forma de H.....	56
Figura 15.	Clasificación volumétrica. Colegio S050. Edificio: 1. Tipo: compacto. Subtipo: compacto.....	56
Figura 16.	Clasificación volumétrica. Colegio S026. Edificio: 1. Tipo: compacto. Subtipo: con patios.....	57

Figura 17. Clasificación volumétrica. Colegio S076. Edificio: 1. Tipo: compacto. Subtipo: simétrico.	57
Figura 18. Clasificación volumétrica. Colegio S109. Edificio: 2. Tipo: lineal. Subtipo: pequeño.....	58
Figura 19. Clasificación volumétrica. Colegio S096. Edificio: 2. Tipo: lineal. Subtipo: mediano.....	58
Figura 20. Clasificación volumétrica. Colegio S039. Edificio: 1. Tipo: lineal. Subtipo: largo.....	59
Figura 21. Clasificación volumétrica. Colegio S057. Edificio: 1. Tipo: lineal. Subtipo: forma de L.....	59
Figura 22. Clasificación volumétrica. Colegio S067. Edificio: 1. Tipo: lineal. Subtipo: varios.....	60
Figura 23. Clasificación volumétrica. Colegio S112. Edificio: 1. Tipo: intersección. Subtipo: volúmenes.....	60
Figura 24. Clasificación volumétrica. Colegio S071. Edificio: 1. Tipo: intersección. Subtipo: irregular.....	61
Figura 25. Clasificación volumétrica. Colegio S109. Edificio: 1. Tipo: intersección. Subtipo: fusión.....	61
Figura 26. Clasificación volumétrica. Colegio S058. Edificio: 1. Tipo: intersección. Subtipo: forma de E.....	62
Figura 27. Clasificación volumétrica. Colegio S117. Edificio: 1. Tipo: intersección. Subtipo: nexos.....	62
Figura 28. Clasificación volumétrica. Colegio S108. Edificio: 1. Tipo: intersección. Subtipo: múltiple.....	63
Figura 29. Clasificación volumétrica. Colegio S077. Edificio: 1. Tipo: intersección. Subtipo: aspa.....	63
Figura 30. Clasificación volumétrica. Colegio S013. Edificio: 1. Tipo: prisma.....	64
Figura 31. Clasificación volumétrica. Colegio S020. Tipo: yuxtaposición..	64
Figura 32. Clasificación volumétrica. Colegio S025. Tipo: polideportivo...	65
Figura 33. Sección tipo de fábrica de un pie (a) y un pie y medio (b) de ladrillo.	66
Figura 34. Sección tipo forjado unidireccional sanitario (a) y planta tipo (b).....	67
Figura 35. Sección tipo de forjado sanitario (a), forjado unidireccional (b) y bidireccional (c).....	73
Figura 36. Sección cerramientos tipo (a) y división interior (b).....	75
Figura 37. Curva de capacidad de un sistema equivalente a un sistema de múltiples grados de libertad. Software PERSISTAH.....	82

Figura 38. Curva de capacidad bilineal. Sistema equivalente SDOF. Anexo B, EC8, parte 1.....	85
Figura 39. Diagrama de flujo del algoritmo desarrollado para el método iterativo N2 (Estêvão, 2019).....	86
Figura 40. Curva de capacidad del sistema estructural elástica perfectamente plástica siendo $d_{ti}^* = d_m$	87
Figura 41. Determinación del desplazamiento objetivo para un sistema equivalente SDOF para periodos cortos (a) y largos (b). Anexo B, EC8, parte 1.....	88
Figura 42. Curva de capacidad del sistema estructural elástica perfectamente plástica siendo $d_{ti}^* < d_m$	89
Figura 43. Curva de capacidad del sistema estructural elástica perfectamente plástica siendo $d_{ti}^* > d_m$	90
Figura 44. Interfaz método N2 en el programa PERSISTAH.....	91
Figura 45. Esquemas método del espectro de capacidad–demanda (Estêvão, 2019).....	92
Figura 46. Proceso iterativo del espectro de capacidad–demanda (Estêvão, 2019).....	93
Figura 47. Curva de capacidad y estados límites de daño. Programa PERSISTAH.....	95
Figura 48. Curva de rendimiento. Programa PERSISTAH.....	96
Figura 49. Curvas de fragilidad. Programa PERSISTAH.....	98
Figura 50. Esquema de funcionamiento del programa PERSISTAH. Obtención del <i>School-Score</i>	100
Figura 51. Base de datos colegios. Programa PERSISTAH.....	101
Figura 52. Menú para georreferenciación de los colegios. Imagen aérea.....	101
Figura 53. Caracterización general del colegio.....	102
Figura 54. Exportación de la localización de los colegios en Google Earth. Programa PERSISTAH.	102
Figura 55. Base de datos de los colegios. Programa PERSISTAH.....	103
Figura 56. Módulo de introducción de las curvas de capacidad.....	103
Figura 57. Base de datos colegios. Programa PERSISTAH.....	104
Figura 58. Módulo de acción sísmica. Espectro de respuesta.....	105
Figura 59. Acción sísmica correspondiente a un escenario sísmico.....	105
Figura 60. Clasificación de los colegios en función del <i>School-Score</i> . Software PERSISTAH.....	106
Figura 61. Punto de desempeño. Método N2.....	107
Figura 62. Curvas de fragilidad.....	107

Figura 63. Ejemplo de exportación de los resultados filtrados para Google Earth.....	108
Figura 64. Esquemas de sistemas de rigidización de diafragmas horizontales: a) Losa de hormigón armado sobre forjado existente; b) Placa metálica sobre forjado existente; c) Aumento del canto mediante capa de madera contrachapada (Forjados de madera); d) Arriostramiento bajo forjado existente.....	112
Figura 65. Esquemas sistemas de rigidización mediante contrafuertes: a) Hormigón armado; b) Perfiles de acero	113
Figura 66. Esquemas sistemas de rigidización: (a) Pórticos triangulados; (b) Muros pantalla.....	115
Figura 67. Ferrocemento. Esquema y detalle constructivo.....	128
Figura 68. Malla de redondos de acero cubierta por hormigón proyectado. Esquema y detalle constructivo.....	129
Figura 69. Bandas de acero externas. Esquema y detalle constructivo.....	130
Figura 70. Malla rectangular de bandas de acero. Esquema y detalle constructivo.....	130
Figura 71. Sistema de atado tridimensional. Esquema y detalle constructivo.....	130
Figura 72. Inyección de lechada o resina epoxi. Esquema y detalle constructivo.....	131
Figura 73. Inyección de lechada o resina epoxi en grietas. Esquema y detalle constructivo.	131
Figura 74. Actuación general con elementos de hormigón armado. (a) núcleo rígido y (b)confinamiento con pilares y vigas de HA. Esquemas y detalles constructivos.....	132
Figura 75. Esquemas configuraciones de refuerzo mediante bandas de CFRP.	134
Figura 76. Recercado metálico en hueco. Esquema en alzado y sección....	135
Figura 77. Sistemas de refuerzo analizados: malla de acero (a), malla de CFRP (b) y recercados de acero (c).....	136
Figura 78. Esquemas tipo de sistemas de rigidización mediante pórticos triangulados.....	139
Figura 79. Sistema de rigidización. Pantalla de hormigón armado.....	141
Figura 80. Sistema de rigidización. Pantallas metálicas.....	141
Figura 81. Esquemas de sistemas de mejora de la capacidad de deformación mediante la adición de confinamiento: a) Camisa de hormigón armado; b) Camisa de acero; c) Camisa de acero continua; d) Camisa de FRP.....	143

Figura 82. Planta baja. C.E.I.P. Los Llanos, Almonte (Huelva).....	147
Figura 83. Planta primera. C.E.I.P. Los Llanos, Almonte (Huelva).....	148
Figura 84. Alzado Norte. C.E.I.P. Los Llanos, Almonte (Huelva).	149
Figura 85. Alzado Sur. C.E.I.P. Los Llanos, Almonte (Huelva).....	149
Figura 86. Alzado Este. C.E.I.P. Los Llanos, Almonte (Huelva).....	150
Figura 87. Alzado Oeste. C.E.I.P. Los Llanos, Almonte (Huelva).....	150
Figura 88. Detalles constructivos. Proyecto de refuerzo sísmico del colegio C.E.I.P. Los Llanos, Almonte (Huelva).....	152

El presente documento tiene como objetivo la presentación del trabajo desarrollado en el proyecto europeo de investigación PERSISTAH (*Projetos de Escolas Resilientes aos SISMos no Território do Algarve e de Huelva*, en portugués), desarrollado de forma cooperativa entre la Universidad de Sevilla (España) y la Universidad del Algarve (Portugal). Dicho proyecto tiene la finalidad principal de contribuir a una sociedad más resiliente a los sismos a través del entorno escolar. Para lograr el objetivo propuesto, el proyecto ha seguido dos caminos paralelos: por un lado, estudiar y evaluar el riesgo sísmico de edificios de educación primaria en el territorio del Algarve (Portugal) y Huelva (España). Por otro lado, se pretende aumentar la conciencia del riesgo sísmico de la comunidad educativa.

El proyecto sustenta su relevancia en los siguientes aspectos esenciales: la singularidad sísmica de esta zona geográfica, el interés en la tipología de edificios escolares y el análisis de su vulnerabilidad sísmica, la gran necesidad de una metodología de refuerzo sísmico específica, la cual ha sido aplicada en dos colegios piloto de Huelva y el Algarve, la comunicación del riesgo sísmico a la comunidad escolar, y finalmente, la cooperación internacional para la reducción de riesgos.

La presente guía se centra en los aspectos más técnicos del proyecto, presentándose en ella primero la metodología y la normativa sísmica aplicada en el análisis de la vulnerabilidad y el posterior refuerzo sísmico de los edificios escolares. A continuación, se describe la peligrosidad sísmica de la zona del Algarve y Huelva, así como la acción sísmica utilizada para el análisis sísmico en función de las distintas normativas sísmicas en cada región. Después, se exponen la caracterización y clasificación tipológica de los edificios escolares estudiados, así como su posterior análisis sísmico. Por último, se proponen diferentes técnicas de refuerzo sísmico basadas en las diferentes normativas y estudiadas en el proyecto.

Los aspectos relacionados con la comunicación del riesgo sísmico y las medidas de autoprotección a la comunidad educativa quedan recogidos en las guías *¿Por qué se mueve el suelo?* y *Guía práctica para un colegio resiliente a los sismos* de esta misma editorial.