



GEOINGENIERÍA
Revista Ciencias de la Tierra

Autor de correspondencia

Emilio Romero-Sánchez. Investigador
eromero13@us.es
Universidad de Sevilla.
Departamento de Estructuras de
Edificación e Ingeniería del Terreno,
Sevilla, España.

Autores

Antonio Morales-Esteban
João M.C. Estêvão
M^a Victoria Requena-García-Cruz
M. Luisa Segovia-Vergel
Jaime de Miguel-Rodríguez

Artículo de investigación / Research Article

<https://doi.org/>



Análisis sísmico de un colegio de tipología lineal. Refuerzo sísmico mediante cruces de San Andrés.

Seismic analysis of a school of linear typology.
Seismic reinforcement by crossings of San Andrés.

Resumen

La actividad sísmica de la Península Ibérica es de baja a moderada y la mayor actividad se concentra en el sur. Este estudio se enmarca dentro del proyecto europeo PERSISTAH (Projetos de Escolas Resilientes aos SISMos no Território do Algarve e de Huelva, en portugués). El objetivo principal de este es la evaluación de forma cooperativa de la vulnerabilidad sísmica de colegios de educación primaria en el territorio de El Algarve (Portugal) y Huelva (España). Los colegios son edificios muy vulnerables ante el sismo, debido a su bajo ratio adulto/niño y por su configuración estructural. Sus estructuras son sencillas y repetitivas pero la mayoría de ellas fueron calculadas sin tener en cuenta la acción sísmica. En este estudio se ha analizado un colegio de tipología lineal, el cual tiene un mal comportamiento sísmico. El edificio no es seguro en la dirección contraria a los pórticos de carga, por tanto, es necesario incorporar un refuerzo que garantice su seguridad en caso de terremoto. En este sentido, se han analizado y comparados varios modelos de refuerzo sísmico mediante cruces metálicas. Por último, cabe destacar que los resultados obtenidos pueden ser extrapolados a otros edificios con una tipología similar.

Palabras Claves: Análisis estático no lineal; Vulnerabilidad de colegios; Refuerzo sísmico; Punto de desempeño; Curva de capacidad; Estados límite de daños.

Abstract

The Iberian Peninsula seismic activity is low-moderate and most of the activity is located in the south. This study is part of the European project PERSISTAH (Projetos de Escolas Resilientes aos SISMos no Território do Algarve e de Huelva, in Portuguese). The main objective of this project is to assess cooperatively the seismic vulnerability of primary schools located in the Algarve (Portugal) and Huelva (Spain). Primary schools buildings are vulnerable because of their low adult/child ratio and their structural configuration. These buildings have simple and repetitive structures but most of them were calculated without considering the seismic action. In this research, a linear building typology, which has a bad seismic behaviour, has been analysed. The structure is not safe in the direction perpendicular to the loading frames. Due to this, it is necessary to incorporate a seismic retrofitting, which guarantees the security of the school in case of an earthquake. In that sense, several seismic retrofitting models with steel braces have been analysed and compared. Finally, it should be noted that the results can be extrapolated to other buildings with similar typology.

Keywords: Nonlinear static analysis; School vulnerability; Seismic reinforcement; Performance point; Capacity curve; Damage limit states.

Introducción

La península ibérica (PI) se caracteriza por una sismicidad moderada (Morales-Esteban, Martínez-Álvarez, Scitovski, & Scitovski, 2014) y gran parte de ella se concentra en el sur. Esta zona se caracteriza por terremotos grandes ($M_w \geq 6$) con periodos largos de retorno. Esta sismicidad se debe a la convergencia entre las placas tectónicas Euroasiática y Africana y la proximidad de la falla Azores-Gibraltar (Amaro-Mellado, Morales-Esteban, & Martínez-Álvarez, 2017). La región del Algarve-Huelva se sitúa en el suroeste de la PI.

Esta zona está cercana a las fallas de San Vicente y la Herradura, las cuales han originado algunos de los terremotos más importantes que han afectado a la PI, como el terremoto de Lisboa de 1755 ($M_w=8,5$) y el terremoto de 1969 ($M_w=8$).

El proyecto europeo PERSISTAH (Projetos de Escolas Resilientes aos SISMos no Território do Algarve e de Huelva, en portugués), se realiza conforme a los acuerdos de Hyogo 2005-2015 y Sendai 2015-2030 y tiene como objetivo principal el análisis de forma cooperativa de la vulnerabilidad sísmica de los colegios de educación primaria del Algarve (Portugal) y Huelva (España). En caso de terremoto ambas regiones se verían afectadas por igual.

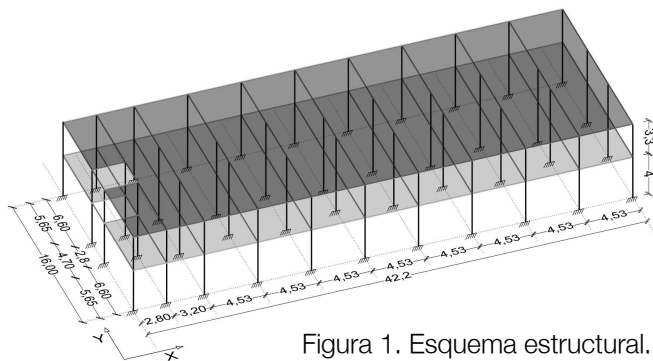


Figura 1. Esquema estructural.

Los colegios han sido elegidos por ser edificios muy vulnerables en caso de terremoto, debido a su bajo ratio adulto/niño y su configuración estructural. Generalmente, son edificios con tipologías simples y repetitivas, las cuales se diseñaron y calcularon con normativas antiguas, que no consideraban las acciones sísmicas.

Este estudio se centra en analizar el comportamiento sísmico de un colegio de tipología lineal y estructura de hormigón armado, y su posterior refuerzo sísmico. Para ello, las curvas de capacidad cizalle cortante y los puntos de desempeño de cada modelo de refuerzo se han

analizado y comparado gráfica y analíticamente. Además, se ha examinado la seguridad de la estructura en caso de terremoto, en función de los diferentes estados límites de daños.

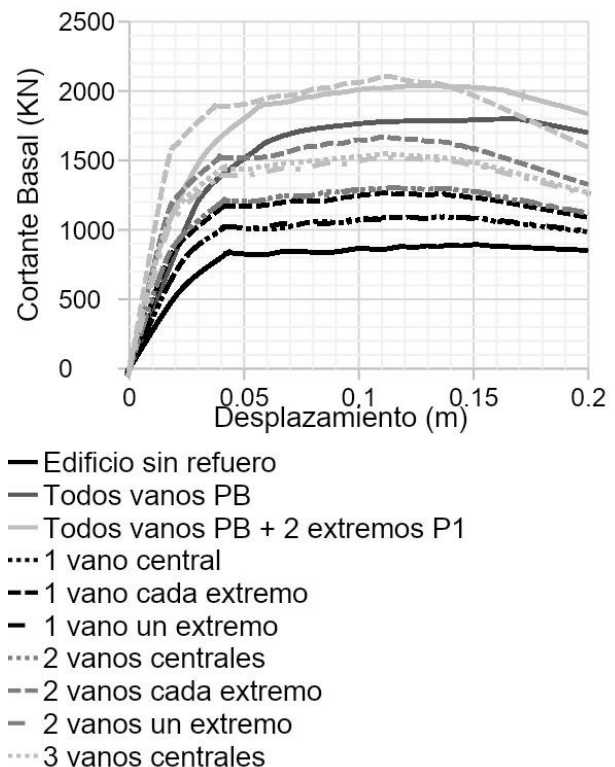


Figura 2. Curvas de capacidad. Dirección X.

Se analizan diferentes configuraciones de refuerzo sísmico mediante cruces de San Andrés metálicas, para obtener la más eficaz, que aporte mayor capacidad y mejor comportamiento sísmico a la estructura. Debido a que dicha tipología es una de las más comunes en la zona, el refuerzo sísmico analizado puede ser extrapolado a otros colegios con una tipología similar.

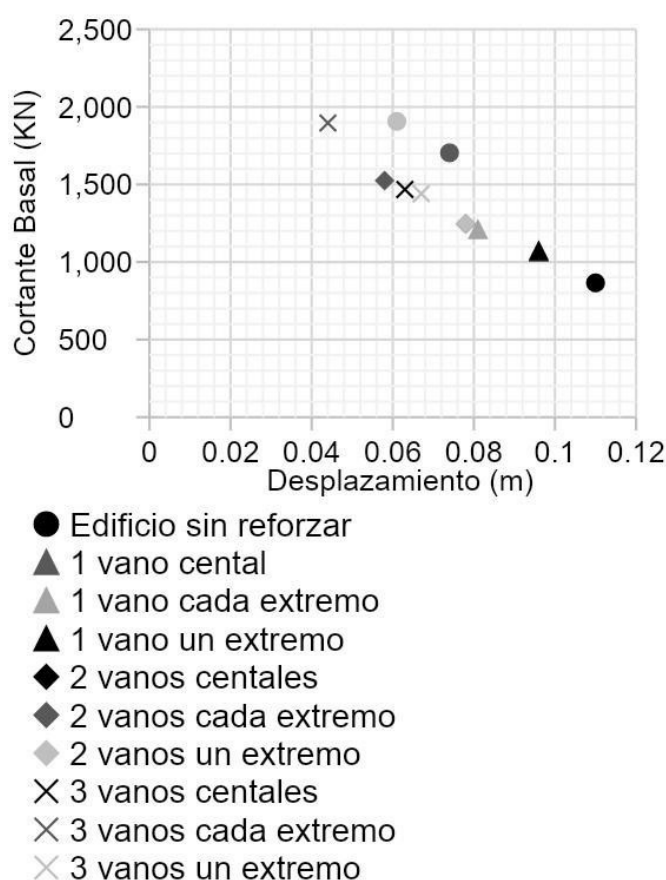


Figura 3. Puntos de desempeño. Dirección X

Metodología

En este estudio se ha utilizado el método de capacidad-espectro de demanda (Freeman, 2004), para el análisis del comportamiento sísmico del edificio propuesto. Para aplicar este método, es necesario obtener el espectro de respuesta y la curva de capacidad del edificio. La curva de capacidad se obtiene a través de un análisis estático no lineal o "Pushover", en las dos direcciones ortogonales del edificio. Este consiste en aplicar a la estructura una carga horizontal conforme a un patrón de fuerzas, e ir incrementando su valor hasta que se obtenga el colapso de la misma. Para ello, se ha utilizado el programa comercial SAP2000. Para simular el comportamiento no lineal de la estructura, se han introducido rótulas plásticas en ambos extremos de los elementos estructurales (vigas y pilares), de acuerdo con la norma ASCE-41-13 (American Society of Civil Engineers, 2014). Se introduce un patrón de carga con una distribución lineal, en forma de triángulo invertido. El nodo de control se sitúa en el centro de masas del

forjado del último nivel. Con esto se obtienen las curvas de capacidad (figuras 2 y 4), las cuales representan gráficamente la relación entre el cortante basal y el desplazamiento en el último nivel (nodo de control)

El espectro elástico de respuesta se ha obtenido según el EC-8, parte 1 (European Union, 2004). El tipo de suelo y la aceleración básica del edificio afectan significativamente a dicho espectro. En este caso, el edificio se encuentra en Huelva, con un tipo de suelo tipo D -según el EC-8-, y una aceleración básica de 0,12g -de acuerdo con la normativa española (Spanish Ministry of Public Works [Ministerio de Fomento de España], 2012)

El punto de desempeño representa la máxima respuesta de la estructura se obtiene con la intersección de la curva de capacidad y el espectro de respuesta, ambos en coordenadas espectrales. Para ello se ha aplicado el método N2 (Fajfar & Gaspersic, 1996) y el método propuesto en el anexo B del Eurocodigo 8 (EC-8) parte 1 (European Union, 2004).

Además, se ha analizado la seguridad de la estructura en caso de terremoto, comparando el punto de desempeño con el estado límite de daño significativo ($d_{sd}=S_{d3}$), según el EC-8, parte 3 (European Union, 2005). En HAZUS 99 (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1999) y en RISK UE (Mouroux & Le Brun, 2006) se definieron cuatro estados de daño: leve, moderado, significativo y completo. Dichos estados límites de daño se han calculado a partir de la representación bilineal de la curva de capacidad, en función del desplazamiento de fluencia (d_y) y colapso (d_u) de la estructura (Barbat, Pujades, & Lantada, 2008). A continuación, se definen las ecuaciones que definen los desplazamientos de los cuatro estados de daño.

$S_{d1}=0,7d_y$	Leve
$S_{d2}=d_y$	Moderado
$S_{d3}=d_y+0,25(d_y+ d_u)$	Significativo
$S_{d4}=d_u$	Completo

En el estado de daño significativo (S_{d3}), la estructura queda seriamente dañada con una mínima resistencia lateral y rigidez a cortante. Además, la reparación de la misma no es rentable.

El edificio escolar elegido en este estudio es de tipología lineal con estructura porticada de hormigón armado. Fue construido en el año 1985. Es una de las tipologías más comunes en los colegios de la zona (31% del total). Como consecuencia, el modelo de refuerzo analizado puede ser extrapolado a otros colegios de tipología similar. En cuanto a la distribución del mismo, dispone de

un pasillo central con clases a ambos lados. Las zonas comunes de acceso, aseos y escaleras se sitúan en uno de los extremos. La planta baja dispone de un porche exterior cubierto, con lo cual la mayoría de los pilares son exentos en dicho nivel.

El edificio tiene una estructura porticada de hormigón armado de 2 plantas de altura (Fig. 1). La planta baja tiene una altura de 3,75m y la primera planta 3,30 m. La dimensión total del edificio es de 42,2x16 metros, el cual tiene 10 vanos en la dirección X y 3 vanos en la dirección Y. La separación entre pilares en la dirección X es (2,80m(1)-3,20m(1)-4,53m(8)) y en la dirección Y es (6,6m(1)-2,8m(1)-6,6m(1)/5,65m(1)-4,7m(1)-5,65m(1)).

Además, contiene forjados unidireccionales de hormigón armado con entrevigado de hormigón de 25 cm de canto. Los pilares son de sección rectangular de 30x40cm, las vigas de carga planas de 25x40cm y las de atado de 25x25cm. En cuanto a los materiales, el hormigón es H-175 y el acero es AEH-400.

El principal punto débil de la estructura son los pilares aislados de planta baja, los cuales no se encuentran arriostrados por cerramientos como en la planta superior. En caso de terremoto estos podrían sufrir grandes deformaciones en ambos extremos. En el terremoto de Lorca de 2011 (Ruiz-Pinilla, Adam, Pérez-Cárcel, Yuste, & Moragues, 2016) muchos edificios fueron dañados por este problema (planta débil).

Se ha propuesto un refuerzo mediante cruces metálicas. Este sistema mediante barras metálicas es uno de los más eficientes para el refuerzo de edificios con estructura porticada de hormigón armado. Aportan al edificio un incremento de la rigidez y de la resistencia, evitando la deformación excesiva de las plantas débiles. Se han

estudiado varias configuraciones en función del incremento de la capacidad y de la reducción de la probabilidad de daños en la estructura

Resultados

Los resultados obtenidos se han representado y comparado gráficamente. El análisis de la curva de capacidad, del punto de desempeño y de los estados límite de daños se muestran y se analizan en función de la mejora del comportamiento sísmico de la estructura.

El edificio presenta una mayor capacidad en la dirección Y, con un cortante basal de 2.105[kN] para un desplazamiento de 0,054m. En dirección X, presenta un cortante basal de 865[kN] y un desplazamiento de 0,11[m]. Esto puede ser debido a que en la dirección Y, se encuentra la dirección de los pórticos de carga, y la orientación de mayor inercia de los pilares, por tanto, la estructura es más rígida en ese sentido.

La estructura no es segura en caso de una acción sísmica en la dirección X (tabla 1). Además, los modelos en los que solo se refuerza un vano, mejoran levemente el comportamiento sísmico del edificio, pero sigue siendo inseguro. En las demás configuraciones de refuerzo es seguro en todas ellas.

Por el contrario, la estructura es segura en la dirección Y (tabla 2). Sin embargo, esta se encuentra muy por encima del estado límite de daño S_{d2} , en el cual el edificio presentaría daños moderados. Además, se encontraría muy próxima al límite S_{d3} . En este caso, con todos los modelos de refuerzo, la estructura es segura, se reduce el desplazamiento (d_t) y se aumenta el cortante basal (F_t).

Dirección X	Desplazamientos Estados Límite de daño (m)					Punto de Desempeño	
	S_{d1}	S_{d2}	S_{d3}	S_{d4}	$S_{d3} \geq d_t$	d_t (m)	F_t (kN)
Modelo Refuerzo Sísmico	0,034	0,048	0,086	0,200	INSEGURA	0,110	865
Edificio sin reforzar	0,034	0,048	0,086	0,200	INSEGURA	0,110	865
1 vano central	0,030	0,043	0,082	0,200	INSEGURA	0,096	1.061
1 vano cada extremo	0,028	0,040	0,080	0,200	INSEGURA	0,081	1.208
1 vano un extremo	0,030	0,043	0,082	0,200	INSEGURA	0,096	1.071
2 vanos centrales	0,027	0,039	0,079	0,200	SEGURA	0,078	1.246
2 vanos cada extremo	0,027	0,038	0,079	0,200	SEGURA	0,058	1.524
2 vanos un extremo	0,027	0,039	0,079	0,200	SEGURA	0,078	1.247
3 vanos centrales	0,025	0,036	0,077	0,200	SEGURA	0,063	1.467
3 vanos cada extremo	0,026	0,037	0,078	0,200	SEGURA	0,044	1.895
3 vanos un extremo	0,027	0,039	0,079	0,200	SEGURA	0,067	1.440
Todos los vanos PB	0,039	0,056	0,092	0,200	SEGURA	0,074	1.703
Todos los vanos de PB + 2 extremos en P1	0,034	0,048	0,086	0,200	SEGURA	0,061	1.906

Tabla 1. Estados límites de daño. Puntos de desempeño. Seguridad de la estructura. Dirección X

Dirección Y Modelo Refuerzo Sísmico	Desplazamientos Estado Límite de Daño (m)					Punto de desempeño	
	S_{d1}	S_{d2}	S_{d3}	S_{d4}	$S_{d3} \geq d_t$	d_t (m)	F_t (kN)
Edificio sin reforzar	0,029	0,042	0,081	0,200	SEGURA	0,054	2.105
1 pórtico cada extremo	0,029	0,042	0,070	0,200	SEGURA	0,041	2.384
1 pórtico cada extremo + 1 central	0,029	0,041	0,081	0,200	SEGURA	0,036	2.438
2 pórticos centrales	0,030	0,043	0,082	0,200	SEGURA	0,042	2.353
2 pórticos cada extremo	0,030	0,042	0,082	0,200	SEGURA	0,031	2.558
2 pórticos un extremo	0,027	0,039	0,079	0,200	SEGURA	0,046	2.199
3 pórticos centrales	0,029	0,041	0,081	0,200	SEGURA	0,037	2.434
3 pórticos un extremo	0,027	0,039	0,079	0,200	SEGURA	0,041	2.312
Todas la zonas posibles	0,029	0,042	0,081	0,200	SEGURA	0,027	2.643

Tabla 2. Estados límites de daño. Puntos de desempeño. Seguridad de la estructura. Dirección Y

Las figuras 2 y 4 muestran las curvas de capacidad para las diferentes configuraciones de refuerzo sísmico propuestas en las direcciones X e Y, respectivamente. Las figuras 3 y 5, representan los puntos de desempeño en ambas direcciones.

En la dirección X (figuras 2 y 3), los modelos con el mismo número de vanos reforzados, en los que cambia la localización de los mismos, presentan una capacidad y un desplazamiento similares. Las configuraciones que tienen mayor capacidad son las de “3 vanos en cada extremo” y “Todos los vanos de PB + 2 extremos en P1”. Sin embargo, la primera reduce más el desplazamiento de la estructura ($d_t=0,044m$).

En la dirección Y (figuras 4 y 5), los modelos que producen una mayor capacidad son “2 pórticos en cada extremo” y “Todas las zonas posibles”. La capacidad aumenta en función del número de pórticos reforzados. En el caso de las configuraciones con el mismo número de pórticos reforzados, tienen mayor capacidad y menor desplazamiento, aquellos donde el refuerzo se incorpora en la zona central.

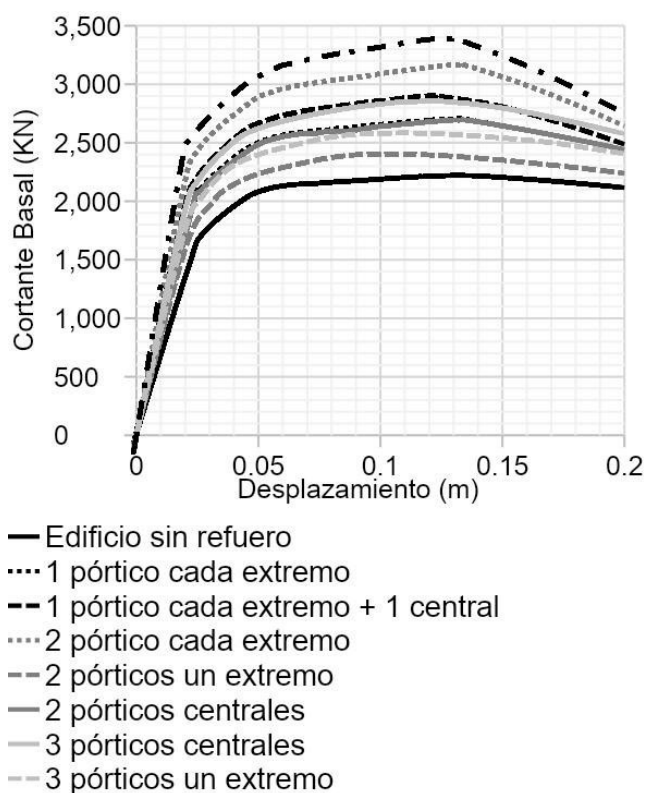


Figura 4. Curvas de capacidad. Dirección Y

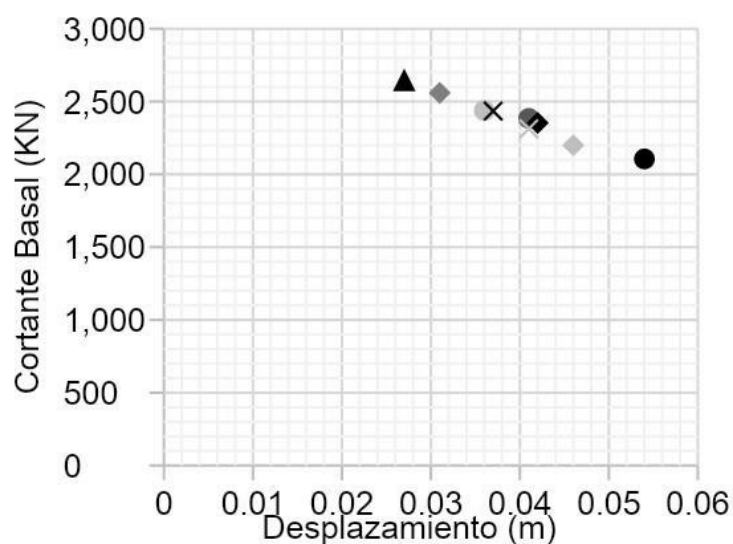
Conclusiones

La tipología de colegio con estructura de hormigón armado es una de las más comunes en la zona. Tras un primer análisis se obtiene que el edificio es vulnerable al sismo, siendo inseguro en la dirección X. Por tanto, es necesario incorporar un refuerzo que mejore su comportamiento y garantice su seguridad en caso de terremoto.

Los análisis de los diferentes modelos de refuerzo en ambas direcciones revelan las siguientes conclusiones. En general, el refuerzo mediante cruces metálicas aumenta la rigidez y la resistencia de la estructura. En todas las configuraciones mejora el comportamiento sísmico de la estructura, aumentando su capacidad y reduciéndose sus desplazamientos.

En la dirección X, la capacidad no varía con la situación de los refuerzos (zona central o extremos). Por lo tanto, la capacidad aumenta en función del número de vanos reforzados. Las mejores configuraciones son las que tienen 2 y 3 vanos reforzados en ambos extremos de la estructura. Estas mejoran el comportamiento sísmico del edificio y son las que menos interfieren con la configuración y el uso del edificio.

número de vanos reforzados. Las mejores configuraciones son las que tienen 2 y 3 vanos reforzados en ambos extremos de la estructura. Estas mejoran el comportamiento sísmico del edificio y son las que menos interfieren con la configuración y el uso del edificio.



En la dirección Y, la capacidad aumenta más en los modelos donde los pórticos reforzados se encuentran en la zona central, aunque tengan el mismo número de zonas reforzadas. En este caso, la configuración más eficaz es la “2 pórticos en cada extremo”, ya que es una de las que aporta mayor capacidad a la estructura y, además, es la que mejor se integra en el edificio. Esto se debe a que el refuerzo se integra en las zonas con cerramiento y particiones sin huecos, con lo cual no interfiere en la configuración y uso del edificio.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al programa INTERREG-POCTEP España-Portugal y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) el apoyo económico al proyecto 0313_PERSISTAH_5_P.

Figura 5. Puntos de desempeño. Dirección Y

Bibliografía

- Amaro-Mellado, J. L., Morales-Esteban, A., & Martínez-Álvarez, F. (2017). Mapping of seismic parameters of the Iberian Peninsula by means of a geographic information system. *Central European Journal of Operations Research*. doi:10.1007/s10100-017-0506-7.
- American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 41-13: Seismic evaluation and retrofit of existing buildings (2014). Reston, United States.
- Barbat, A. H., Pujades, L. G., & Lantada, N. (2008). Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: Application to Barcelona. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(10–11), 851–865. doi:10.1016/j.soildyn.2007.10.006.
- European Union. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (2004). Brussels.
- European Union. Eurocode-8: Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings (2005). Brussels. Truy vấn từ <http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/en.1998.3.2005.pdf>
- Fajfar, P., & Gaspersic, P. (1996). the N 2 Method for the Seismic Damage Analysis of Rc Buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 25(October 1994), 31–46.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA), W. D. C. (1999). HAZUS 99, Earthquake Loss Estimation Methodology Earthquake. Technical Manual, 1.
- Freeman, S. A. (2004). Review of the development of the capacity spectrum method. *ISSET Journal of Earthquake Technology*, 41(1), 113.
- Morales-Esteban, A., Martínez-Álvarez, F., Scitovski, S., & Scitovski, R. (2014). A fast partitioning algorithm using adaptive Mahalanobis clustering with application to seismic zoning. *Computers and Geosciences*, 73, 132–141. doi:10.1016/j.cageo.2014.09.003.
- Mouroux, P., & Le Brun, B. (2006). Presentation of RISK-UE project. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(4), 323–339. doi:10.1007/s10518-006-9020-3.
- Ruiz-Pinilla, J. G., Adam, J. M., Pérez-Cárcel, R., Yuste, J., & Moragues, J. J. (2016). Learning from RC building structures damaged by the earthquake in Lorca, Spain, in 2011. *Engineering Failure Analysis*, 68, 76–86. doi:10.1016/j.engfailanal.2016.05.013.
- Spanish Ministry of Public Works [Ministerio de Fomento de España]. Update of the seismic hazard maps [Actualización de mapas de peligrosidad sísmica de España] (2012). Spain.