

SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PARA SISMOS



SISTEMAS CONSTRUCTIVOS PARA SISMOS

Alumna

Laura Sanz Esteban

Tutor

Sergio Vega Sánchez - DCTA

Aula 4 TFG

Coordinador: Jorge Sainz

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Índice

RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

INTRODUCCIÓN

- Fenómeno físico
- Efectos
- Actividad sísmica

OBJETIVO Y METODOLOGÍA DEL TRABAJO

1. ANÁLISIS DE CONDICIONANTES CONSTRUCTIVOS DERIVADOS DE LA NORMATIVA SÍSMICA
 - 1.1. Normativas existentes
 - 1.2. Análisis de condicionantes constructivos de cimentación
 - 1.3. Análisis de condicionantes constructivos de hormigón armado
 - 1.4. Análisis de condicionantes constructivos metálicos
 - 1.5. Análisis de condicionantes constructivos de fábrica resistente
 - 1.6. Análisis de condicionantes constructivos de cerramientos
2. LECCIONES APRENDIDAS DE TERREMOTOS PASADOS
 - 2.1. Terremoto de Lorca
 - 2.2. Terremoto de Amatrice
 - 2.3. Terremoto de Kobe
3. INNOVACIÓN
 - 3.1. Sistema de aislamiento de la base
 - 3.2. Amortiguador de masa integrado
 - 3.3. Amortiguador de líquido integrado

CONCLUSIONES

FUENTES

- Bibliografía
- Procedencia de las ilustraciones

Resumen y palabras clave

Los terremotos son peligros naturales que pueden llegar a causar desastres, cuya consecuencia principal son los daños o el colapso de edificios y otras estructuras hechas por el hombre.

El edificio debe ser diseñado de tal forma que asegure que él mismo tenga la fuerza adecuada, alta ductilidad, y permanezca como una unidad integral, incluso cuando está sometido a un terreno con grandes movimientos.

La experiencia ha demostrado que pueden llegar a construirse edificios completamente resistentes frente a sismo, cumpliendo con la normativa vigente en cada lugar y aplicando sistemas constructivos innovadores.

Tras un análisis de las soluciones exigidas por varias normativas representativas, se analizan las lecciones aprendidas de terremotos pasados. La combinación de ambas proporciona información de recursos aplicados de manera generalizada hasta el momento, además de la adecuación de éstas en situaciones reales para saber si realmente resultan útiles o si se aplican de manera adecuada. El siguiente análisis realizado es sobre los sistemas de innovación, cuya eficacia ha sido comprobada en casos reales, aunque todavía sólo se llevan a cabo en ocasiones determinadas.

Relacionando los conceptos anteriores, se llega a una serie de conclusiones en las que se determinan los aspectos que se están realizando satisfactoriamente hasta el momento y los que no, además de predecir los que se realizarán en un futuro.

Palabras clave

Terremoto

Sismo

Normativa sísmica

Construcción sísmica

Riesgos

Amortiguador

Introducción

Los terremotos son peligros naturales bajo los cuales los desastres son causados principalmente por el daño o colapso de edificios y otras estructuras hechas por el hombre. La experiencia ha demostrado que, para la nueva construcción, la protección contra daños causados por el terremoto se puede realizar estableciendo regulaciones resistentes a los terremotos.

Los daños causados por el terremoto dependen de muchos parámetros, incluido las características del movimiento del suelo por el terremoto (intensidad, duración y frecuencia del movimiento del suelo), las características del suelo (topografía, condiciones geológicas y del suelo), las características del edificio y la calidad de la construcción.

El diseño del edificio debe ser tal que asegure que él mismo tenga la resistencia y ductilidad adecuada, para permanecer como una unidad integral, incluso cuando está sometido a un terreno con grandes movimientos.

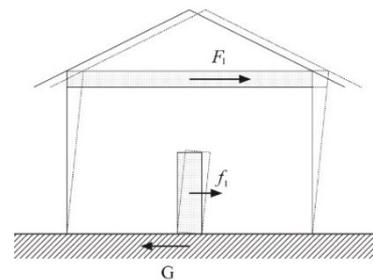
También son importantes los factores sociales y de otro tipo, como la densidad de población, la hora del día en que ocurre el terremoto y la preparación de la comunidad para la posibilidad de tal acontecimiento.

Sin embargo, se pueden mitigar los riesgos y reducir así el impacto del sismo siempre que se diseñen y construyan los edificios para minimizar las pérdidas basadas en el conocimiento previo de los daños que causan los sismos.

El estudio de los daños es un paso importante en la evolución de las medidas de mejora del comportamiento sísmico para los diferentes tipos de edificios.

Fenómeno físico

Los edificios sufren daños durante un terremoto principalmente por las secuencias de sacudidas horizontales y verticales que se ejercen sobre el mismo. Cuando el movimiento del suelo consigue mover la base del edificio en un sentido, el edificio se mueve hacia el sentido contrario respecto de la



o.1. Fuerza de inercia

base, como si estuviera empujado por una fuerza invisible a la que llamamos “*fuerza de inercia*”. Cada parte del edificio debe resistir su inercia.

Realmente, el proceso es mucho más complejo ya que el suelo se mueve simultáneamente en dos direcciones horizontales y verticales durante el terremoto.

Un factor importante en los daños que pueda provocar el terremoto es la posición del *epicentro*. La RAE define el epicentro como: “centro superficial del área de perturbación de un fenómeno físico, que cae sobre el hipocentro (punto del interior de la corteza terrestre donde tiene origen un terremoto)”. Cuanto mayor sea la proximidad del epicentro, mayores serán los daños.

Los terremotos pasados demuestran que las condiciones del lugar afectan perceptiblemente a los daños de los edificios. Los estudios de los terremotos han demostrado que la intensidad de un choque está directamente relacionada con el tipo de *estratos de suelo* bajo el edificio. Estructuras construidas sobre roca sólida y suelo firme frecuentemente funcionan mucho mejor que los edificios en suelo blando.

Las lecciones aprendidas de terremotos recientes demuestran que la *topografía* y la *geomorfología* de un lugar influye mucho en los daños. Los edificios en lugares con topografía plana y uniforme suelen ser menos dañados durante un terremoto que los edificios en crestas, en valles estrechos y en pendientes pronunciadas. Igualmente, la existencia de fallas y discontinuidades de los estratos, también pueden influir muy negativamente, como en el caso del terremoto de Lorca.

Otro aspecto importante es la manera en que se mide la magnitud de los terremotos, principalmente clasificados según la *escala de Richter*. La idea es: conociendo la distancia desde un sismógrafo (instrumento con el que se miden las sacudidas) a un terremoto y observando la amplitud de la señal máxima registrada por el sismógrafo, se puede hacer una clasificación cuantitativa del tamaño o la energía inherente del terremoto. O visto de una forma más sencilla, se puede considerar que se mide la cantidad de energía que se libera, recogida por un sismógrafo.

Las propiedades deseables del diseño resistente a terremotos incluyen los siguientes conceptos: *ductilidad*, *deformabilidad* y *robustez*. Por ello, se ha considerado importante describirlos.

Tal y como explica Yuji Ishiyama¹: “La ductilidad y la deformabilidad son conceptos interrelacionados, teniendo que ver con la capacidad de la estructura para admitir grandes deformaciones sin llegar al colapso. Esto es deseable porque significa que las estructuras pueden absorber más energía con menos daño, y porque permite que no colapsen bruscamente, permitiendo su evacuación y, en su caso, su estudio para posibles reparaciones. Una estructura dúctil redonda en un edificio más seguro para sus ocupantes. La robustez es también una cualidad deseable para la construcción, y se refiere a la capacidad de una estructura para sufrir daños sustanciales, sin colapso parcial o total.”

Efectos

Como se ha explicado en el apartado anterior, las secuencias de sacudidas provocadas por el terremoto generan movimientos tanto en horizontal como en vertical, en los dos sentidos. Estos movimientos que provoca el terremoto, conllevan una serie de efectos o consecuencias.

Hay cuatro causas básicas de los daños provocados por el terremoto: sacudida del terreno, falla en el terreno, tsunamis y fuego. Sin embargo, la causa principal del daño son las propias sacudidas derivadas del terreno. Los demás son desastres secundarios.

- *Sacudida del terreno.* A medida que la tierra vibra, todos los edificios responden a esa vibración en distintos grados. Las aceleraciones, velocidades y desplazamientos inducidos por terremotos pueden destruir un edificio, a menos que haya sido diseñado y construido o reforzado para ser resistente frente a sismo.



o.2. West Java, Indonesia, 2009

Por lo tanto, el efecto del movimiento de la tierra en los edificios es un área principal a considerar en el diseño de los edificios resistentes a terremotos.

Las cargas de diseño son extremadamente difíciles de determinar, debido a la naturaleza aleatoria de los movimientos del terremoto. Sin embargo, las experiencias de fuertes terremotos han demostrado que las prácticas

¹ ISHIYAMA, Yuji. *Guidelines for Earthquake Resistant Non-Engineered Construction*, 2012; 145 páginas.

razonables y prudentes pueden mantener un edificio seguro durante un terremoto.

- *Falla en el terreno.* Se ha observado en forma de ruptura del terreno a lo largo de la zona de falla, deslizamientos de tierra, asentamiento y licuefacción del suelo. La rotura del terreno a lo largo de una zona de falla puede ser muy limitada o extenderse a lo largo de cientos de kilómetros.



o.3. Nias, Indonesia, 2005

El desplazamiento de tierra puede ser horizontal, vertical o ambas, y puede medirse en centímetros o incluso en metros. Mientras que un deslizamiento de tierra puede destruir un edificio, el asentamiento solo puede dañarlo.

La licuefacción del suelo puede ocurrir en arenas saturadas de baja densidad de tamaño de grano relativamente uniforme y, especialmente en terrenos limosos. El fenómeno de la licuefacción es especialmente importante para las presas, puentes, tuberías subterráneas y los edificios que se colocan en tal terreno.

- *Tsunamis.* Se producen generalmente por un movimiento repentino del suelo del océano. A medida que las ondas del agua se aproximan a la tierra, su velocidad disminuye y su altura de subida aumenta a 5 – 8 m, o incluso más. Los tsunamis pueden ser devastadores para los edificios construidos en zonas costeras.



o.4. Great East Japan, 2011

- *Fuego.* Cuando comienza un incendio después de un terremoto, se hace difícil extinguirlo, ya que un fuerte terremoto es a menudo acompañado de la pérdida de suministro de agua y atascos de tráfico. Por esto, un incendio provocado por un terremoto se suma a los daños en edificios debido al sismo.



o.5. West Sumatra, Indonesia, 2009

Actividad sísmica

Se ha considerado importante tener una visión general de la actividad sísmica que existe en el panorama mundial. Por ello, se pretende dar información sobre algunas zonas relevantes por su actividad sísmica, así como los terremotos históricos que han tenido lugar en ellas.

América del norte

Según explica R. M. W. Musson²: “La sismicidad en América proporciona un contraste entre las áreas de alta sismicidad, principalmente a lo largo de los límites de la placa al oeste del Pacífico; y la menor sismicidad, en las regiones continentales estables de la zona oriental de América del Norte y del Sur.”

Los primeros datos registrados en el Archivo Global de la Historia de los Terremotos datan de 1663, con el terremoto de *Quebec*.

En 1906 se produjo el terremoto de *San Francisco*. Fue de una magnitud de 7,9 y rompió a 300 millas de la falla de San Andrés, que se deslizó hasta 20 pies en algunos lugares. Los historiadores estiman que más de 3.000 personas murieron en el terremoto y el fuego que siguió, por lo que es el terremoto más mortífero de la historia de Estado Unidos.



o.6. Terremoto de San Francisco, 1906

En 1933 tuvo lugar un terremoto de magnitud 6,3 en la escala de Richter en Long Beach, California. A pesar de su menor magnitud, el terremoto mató a 115 personas y dejó seriamente dañadas estructuras de mampostería no reforzada. Las lecciones del terremoto fueron incorporadas en el código de construcción del estado en los años siguientes.



o.7. Terremoto de Long Beach, California, 1933

² MUSSON, R. M.W. *Global Historical Earthquake Archive and Catalogue (1000-1903)*, 2013; 202 páginas.

En 1964 se registró un terremoto de magnitud 9,2 en la escala de Richter en *Alaska*. Este sismo causó un desplazamiento vertical del suelo de hasta 50 pies en algunos lugares. El tsunami resultante fue el que causó la mayor cantidad de muertes, siendo un total de 128 personas.



o.8. Terremoto de Alaska, 1964

La magnitud de un terremoto de 6,7 en la escala de Richter, sacudió en 1994 *Northridge* en California del Sur. Muchas de las 60 personas que perdieron la vida, fue debido a los edificios con bajos débiles, tales como aparcamientos para los edificios de apartamentos.

El terremoto más reciente ocurrió el 22 de diciembre del año 2003, en el *centro de California*. Fue un terremoto de una magnitud de 6,5 grados en la escala de Richter, causando 2 muertos y 40 heridos.

América del Sur

Durante el mes de septiembre de 1985 ocurrió un terremoto en *México* de magnitud 8,1 en la escala de Richter. Más de 1.000 personas murieron como consecuencia del terremoto, unas 30.000 personas resultaron heridas y se estima que 250.000 personas quedaron sin hogar. Más de 400 edificios co-



o.9. Terremoto de México, 1985

lapsaron y miles más fueron dañados. Al día siguiente, hubo una réplica de magnitud 7,5 en la escala de Richter que sacudió la región.

El 13 de enero de 1906 tuvo lugar un terremoto en la costa de *Ecuador*, de magnitud 8,8 en la escala de Richter. El terremoto emana del océano frente a Ecuador y Colombia, generando un tsunami que mató entre 500 y 1.500 personas a lo largo de la costa.

El terremoto más reciente en América del Sur es el de *Chile*, que ocurrió el 27 de febrero de 2010. Tuvo una magnitud de 8,8 en la escala de Richter. El sismo registrado durante la mañana, generó un tsunami en todo el Pacífico y costó la vida a 521 personas. Con más de 12.000 heridos y más de 800.000 personas se quedaron sin hogar, Chile se quedó tambaleando por la magnitud del desastre.

Japón

Se encuentra en la zona de colisión de al menos cuatro placas litosféricas: la placa de Eurasia, la placa de América del Norte, la placa de Filipinas y la placa del Pacífico. Los movimientos continuos de estas placas generan una gran cantidad de energía liberada de vez en cuando en los terremotos y tsunamis de diversa magnitud y efectos.

Japón combina una alta sismicidad con una larga historia de registro de terremotos. Como en muchos otros países, fue a finales del siglo XIX cuando se comenzaron a producir las primeras recopilaciones sismológicas de los terremotos históricos. En el caso de Japón, fue a raíz del gran terremoto de *Nobi* en 1891, de magnitud 8 en la escala de Richter.

En septiembre de 1923, la ciudad de Yokohama y Tokio se vieron afectados por un terremoto, hoy recordado como el *gran terremoto de Kanto*. Más de 99.000 personas murieron por el colapso de edificios.

En enero de 1995 la ciudad industrial de *Kobe* fue golpeada por un terremoto de magnitud 7,2 en la escala de Richter, el terremoto más fuerte en Japón desde 1923. Más de 6.000 personas murieron y más de 300.000 personas perdieron sus hogares.

El 11 de marzo de 2011, el terremoto más fuerte jamás registrado en Japón provocó un enorme tsunami a lo largo de la costa del Pacífico al noroeste de Japón. Es conocido como el *Gran Terremoto del Este de Japón*, ya que el terremoto y posterior tsunami particularmente mató a casi 20.000 personas y causó un accidente nuclear en la central eléctrica de Fukushima.



o.10. Terremoto de Kobe, 1995

Europa

El 1 de noviembre de 1755 tuvo lugar un terremoto en *Lisboa* de magnitud 8,7 en la escala de Richter. La destrucción casi total de Lisboa y la muerte de una cuarta parte de la población de la ciudad fueron causadas por un terremoto, seguido de un tsunami y el fuego, que se sintió en el norte de África, Francia y el norte de Italia. Este terremoto supuso un impacto enorme.

En el año 1908 tuvo lugar uno de los terremotos más destructivos en la historia europea registrada, golpeando el estrecho de *Messina*, en el sur de Italia. El terremoto causó la muerte de unas 100.000 personas. Fue particularmente costoso en

términos de vidas humanas, ya que se produjo a las 5:20 de la mañana y sin previo aviso, por lo que la mayoría de la gente se encontraba en sus casas y murieron al colapsar los edificios. El choque principal, con una magnitud estimada de 7,5 grados en la escala de Richter, causó un devastador tsunami. Las dos principales ciudades de ambos lados del estrecho tenían un 90% de sus edificios destruidos. Sicilia y Calabria se conocen como “la tierra del baile” debido a la actividad sísmica periódica que afecta a la región.



0.11. Terremoto de Messina, Italia, 1908

El terremoto más reciente ocurrido en España fue el 11 de mayo del año 2011 en la localidad de *Lorca*, con una magnitud de 5,1 en la escala de Richter. Causó 9 víctimas. El terremoto presentó violentas sacudidas en un escaso periodo de tiempo. Además, el terreno de la zona es



0.12. Terremoto de Lorca, España, 2011

muy heterogéneo, y está muy afectada por la denominada Falla de Lorca, por lo que podrían haberse dado distinta intensidad en función del tipo de suelo.

El terremoto de *Amatrice* (centro de Italia) se produjo en distintas secuencias, siendo el primer movimiento el 24 de agosto de 2016. Las siguientes réplicas se producen en septiembre y octubre. Los movimientos registrados en la última réplica, que tuvo lugar el 30 de octubre, se estima que fueron más débiles que los del 24 de agosto. El epicentro se situaba alrededor de unos 10 km del municipio. La magnitud del terremoto es de 6,2 en la escala de Richter. Se han registrado cerca de 300 víctimas mortales.



0.13. Terremoto de Amatrice, Italia, 2016

Objetivo y metodología del trabajo

Objetivo

El objetivo del trabajo consiste en determinar cuáles son los sistemas constructivos más eficientes para construir edificios resistentes frente a sismo. Resulta importante destacar que realmente no es necesario realizar edificios completamente resistentes a terremotos en todo el mundo, sino en las zonas donde exista una fuerte actividad sísmica y fuertes riesgos de que ocurra una catástrofe.

Es por esto que se ha considerado relevante determinar estos aspectos constructivos, muchas veces, en función del lugar donde vayan a ser aplicados.

Se pretende analizar las soluciones que se han llevado a cabo hasta ahora de manera generalizada, así como aquellas que formen parte de las soluciones que se puedan llegar a usar en un futuro.

Metodología

La respuesta que se ha dado tradicionalmente a los sistemas constructivos resistentes frente a sismo, es crear una normativa cada vez más exigente. Con esto, se pretende minimizar los daños tanto como sea posible con la tecnología y los avances de cada momento.

Este método nos ha llevado a conseguir importantes avances, y a lograr cada vez edificios más resistentes a los terremotos. No obstante, esta solución no deja de ser estática, ya que no existe un sistema para aprender de los terremotos más importantes.

Es cierto que algunos de los terremotos históricos más importantes han supuesto grandes cambios en las normativas actuales, pero esto no es siempre así.

Estas son las razones que han determinado el método de trabajo, que presenta los siguientes pasos:

- Primero, se realiza un análisis comparativo de tres normativas que se han considerado representativas: España, Estados Unidos y Japón. La Normativa de Estados Unidos y de Japón se han escogido debido a la gran actividad sísmica de ambos lugares, lo que ha llevado a desarrollar dos de las normativas más avanzadas del mundo. La primera se ha considerado importante ya que es realmente la que nos afecta, y resulta importante saber cómo se encuentra respecto a las otras dos normativas.
- Seguidamente, se lleva a cabo un análisis de terremotos pasados considerados relevantes por distintas razones. Se pretende analizar los problemas detectados que han causado daños en los edificios o que han llegado a provocar su colapso, de los cuales se pueden sacar lecciones aprendidas. Esta idea parte de la consideración de las normativas como estáticas, donde en muchos casos no se aplican las lecciones aprendidas de terremotos pasados. Es por esto que se considera importante su análisis.
- Después, se realiza un estudio de varios sistemas innovadores que han sido aplicados, comprobando su eficacia frente a sismos, y que podrían llegar a ser las soluciones que se apliquen en un futuro de manera generalizada.
- Finalmente, se pretende relacionar todos los conceptos anteriores en las conclusiones finales, para así poder determinar los aspectos que se están realizando satisfactoriamente hasta el momento y los que no, además de poder determinar los que se realizarán en un futuro.

1 Análisis de condicionantes constructivos derivados de la Normativa Sísmica

1.1 Normativas existentes

Las distintas normativas sísmicas tienen por objeto asegurar que las estructuras puedan llegar a resistir adecuadamente las fuerzas sísmicas durante los terremotos. Los cambios o adiciones a las normativas sísmicas provienen de muchas fuentes diferentes, incluyendo los nuevos resultados de la investigación y documentación de la actuación en terremotos pasados.

Se ha considerado relevante estudiar las grandes normativas, así como las que pueden ser más representativas, no por tener gran relevancia en las normativas a nivel mundial, sino debido a lo que nos pueda afectar en España.

La normativa de Japón es una de las más avanzadas hasta el momento. En el año 1950 se creó la “Ley Estándar de Construcción” en Japón, en la que se establecen las medidas mínimas que se deben tomar en función del lugar, la estructura, las instalaciones y el uso al que se deben dedicar los edificios con el fin de proteger la vida de los ciudadanos.

En el año 1995, tras el terremoto de Kobe, se realizó una revisión de esta ley. En el año 2000 se realizó otra revisión en la que se introdujo la garantía de 10 años contra defectos. En 2006 se hicieron más estrictos los certificados e inspecciones de construcción. En el año 2016 se realizaron las últimas modificaciones de la normativa de Japón, por lo que es la más actualizada hasta el momento.

Estados Unidos también tiene una fuerte actividad sísmica, concentrada principalmente en la zona de California. Debido a su experiencia, ha desarrollado una de las normativas más avanzadas del mundo, recogida en: “International Building Code”. Su última actualización fue en el año 2009. Es por esto que, aunque sea una de las normativas más avanzadas del mundo junto con la de Japón, esta última se encuentra más actualizada y es probable que por ello sea más avanzada actualmente.

Chile es un país con una fuerte actividad sísmica, en el cual han ocurrido tres terremotos durante los últimos 5 años de magnitud superior a 8 en la escala de Richter. Actualmente, el país se encuentra entre los países con las tecnologías antisísmicas más avanzadas del mundo. El gran terremoto ocurrido en el año

2010, hizo que se reforzara la normativa y ayudó a mejorar la tecnología y los estándares de seguridad.

En España, los mayores riesgos derivados de la actividad sísmica se concentran al sur este del país. Existe una Normativa Sismorresistente que se debe aplicar en función de la zona y los riesgos sísmicos que ésta tenga. La última actualización es del año 2009, después de la que probablemente se esté realizando una revisión tras el terremoto ocurrido en Lorca en 2011.

La norma antisísmica en Italia es muy similar a la de España, con la diferencia de que se trata de un país con una actividad sísmica mucho mayor, donde se producen terremotos que han llegado a provocar grandes catástrofes. Un ejemplo de ello es el terremoto de Amatrice, ocurrido en el año 2016, que causó un gran número de víctimas y la localidad quedó destrozada. Es por esto que, aunque su normativa similar a la de España, las condiciones del país son distintas.

Se han escogido tres normativas de las expuestas anteriormente para realizar un análisis de distintos condicionantes constructivos, apoyados en una serie de tablas comparativas. Estas normativas son: la de España (ya que es la que se aplica en nuestro país y es importante conocer cómo se encuentra respecto a otras), la de Japón (por ser una de las normativas más avanzadas del mundo, además de ser la más actualizada) y la de Estados Unidos (siendo también una de las más avanzadas del mundo).

1.2 Análisis de condicionantes constructivos de cimentación

A partir de la información obtenida de las normativas expuestas anteriormente se ha realizado una tabla comparativa, analizando los distintos condicionantes constructivos de la cimentación.

Este análisis pretende dar información acerca de lo que puedan tener en común las tres normativas estudiadas, así como en lo que puedan diferenciarse.

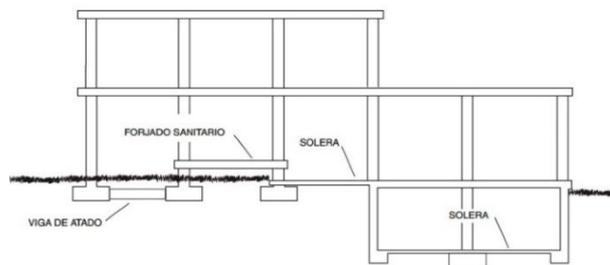
ELEMENTO CONSTRUCTIVO		NORMATIVA		
		ESPAÑA	EEUU	JAPÓN
<i>Necesidad de atado de zapatas</i>		Es necesario (estando al mismo nivel)	Es necesario (estando al mismo nivel)	-
<i>Elementos de atado</i>		Dispositivos de atado	Colocar un tablón de madera sobre el hormigón, y anclarlo mediante tornillos o chapas metálicas	-
			Tirantes (uniendo zapatas)	
<i>Pilotes</i>	<i>Armadura desde la cabeza del pilote</i>	Extensión: 4 veces por debajo de la zona crítica más profunda	-	-
	<i>Armadura longitudinal</i>	6 Ø 12 / 20 cm		
	<i>Armadura transversal</i>	Ø 6 Extensión: toda la longitud de la armadura longitudinal		
<i>Refuerzo de muros bajos</i>		-	Es necesario	-
<i>Sistema de aislamiento de la base</i>		-	Se ha intentado aplicar	Es aconsejable

Tal y como puede apreciarse en la tabla anterior, la Normativa Sismorresistente en España y la Normativa en EEUU tienen varios aspectos en común, mientras que la normativa de Japón es la que mayores diferencias presenta.

Esto es debido a la falta de información que existe en la Normativa de Japón respecto a los elementos constructivos expuestos en la tabla, exceptuando el sistema de aislamiento de la base. No quiere decir que los sistemas constructivos expuestos tanto en la Normativa de España como en la Normativa de EEUU no se empleen en Japón, simplemente es que actualmente en Japón se opta por sistemas más innovadores que puedan tener una fuerte repercusión en el futuro.

Respecto a las diferencias entre la Normativa de España y la Normativa de EEUU, se analizan los siguientes puntos:

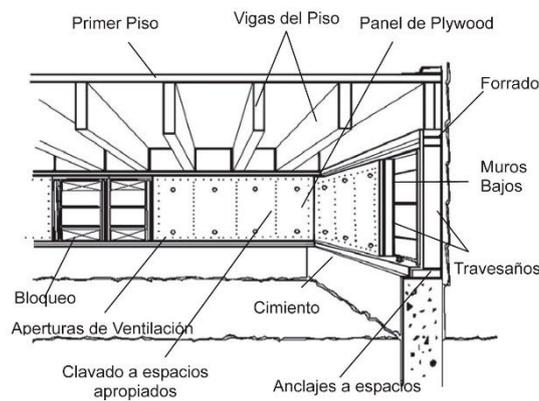
- Los elementos de atado son fundamentales y necesarios en ambos casos, aunque en el caso de EEUU se opte por soluciones concretas de atado mientras que en el caso de España se expone de una manera general que se deben emplear dispositivos de atado.



1.1. Elementos de atado

- La cimentación para pilotes únicamente se nombra en la Normativa de España, aunque esto no quiera decir que no se emplee este sistema de cimentación en EEUU, puede suponerse que es algo menos frecuente.

- El refuerzo de muros bajos únicamente se nombra como necesario en la Normativa de EEUU, ya que este elemento estructural es típico en la forma de construir estadounidense. Hay presencia de muros bajos cuando los edificios, o más bien viviendas, son construidos sobre cimentación exterior y se crea un espacio bajo la planta principal.



1.2. Muros bajos

El sistema de aislamiento de la base es algo que todavía no se exige en la Normativa de Japón, pero sí es aconsejable. Se trata de un sistema que no se puede exigir que sea de aplicación en muchos de los edificios existentes, ya que implicaría el cambio de su cimentación actual, lo cual supone un gasto muy elevado. Se ha aplicado en algunos edificios de nueva construcción en Japón, y ha dado buenos resultados.

Este sistema se ha intentado aplicar en EEUU, aunque de una manera más rudimentaria, lo cual no quiere decir que no estén abiertos al avance y al progreso. Puede ser que en un futuro se aplique en EEUU de la misma manera que se ha aplicado en algunos edificios de nueva planta en Japón.

Es un tema de gran interés para este trabajo, por lo que se analizará más adelante en el apartado de innovación.

Las conclusiones parciales del análisis de las distintas normativas respecto de los condicionantes constructivos de cimentación, son las siguientes:

- La normativa de Japón carece de algunos datos que se exponen tanto en la Normativa de España como en la Normativa de EEUU, aunque plantea como aconsejable el sistema de aislamiento de la base, algo que ya se ha empleado en algunos edificios de nueva planta en Japón. Esta puede ser una vía de desarrollo futura y por ello se tratará en el apartado de innovación.
- La Normativa en España y la Normativa en EEUU tienen en común la necesidad de emplear elementos de atado, mientras que se diferencian en la información dada sobre la cimentación para pilotes y el refuerzo de muros bajos. La primera, únicamente se nombra en la Normativa de España, lo cual no quiere decir que no se emplee en la normativa de EEUU sino que puede ser algo menos frecuente. La segunda, se considera necesaria en la Normativa de EEUU y esto se debe a que es un sistema constructivo principalmente empleado en EEUU.
- El sistema de aislamiento de la base se ha intentado aplicar en EEUU, por lo que resulta importante abarcar este tema más en profundidad.

1.3 Análisis de condicionantes constructivos de hormigón armado

De la misma manera que se ha realizado en los apartados anteriores, se ha llevado a cabo un análisis de los condicionantes constructivos derivados de la normativa sísmica, relativos a las construcciones de hormigón armado.

ELEMENTO CONSTRUCTIVO		NORMATIVA		
		ESPAÑA	EEUU	JAPÓN
Vigas	Ancho de descuelgue	0,25 m	-	$9 \sqrt{235}/F$
	Uniones	Deben solaparse	Deben solaparse al menos dos estribos en cada extremo	-
	Armadura superior	Dentro soporte (2 Ø 16)	Debe reforzarse (1 Ø 12)	$\Sigma 2.5 \alpha Aw + \Sigma 0.7 \alpha Ac = Z AiWi$ Aw: armadura longitudinal Ac: armadura transversal
	Armadura inferior	Deben solaparse (2 Ø 16)	Debe reforzarse (1 Ø 12)	
	Estribos	Separados entre sí 0,10 m	Separados entre sí h/4	Separados entre sí 0,10 m
Pilares	Secciones óptimas	Cuadrada	Cuadrada	$9.5 \sqrt{235}/F$
	Disposición de armaduras	Solape entre armaduras de soporte y las esperas	Armadura continua	Armadura continua
		Nudos intermedios: armadura de fuste se prolonga en el superior	Armadura continua	Armadura continua
	Armadura longitudinal	8 Ø mínimo	8 Ø 16	$\Sigma 2.5 \alpha Aw + \Sigma 0.7 \alpha Ac = Z AiWi$
	Armadura transversal	Ø 16 cada 0,15 m Ø 14 cada 0,10 m Se debe estribar incluso en el canto de las vigas	Preferible en espiral (cada 0,10 m)	

<i>Forjados</i>	<i>Unión con un soporte extremo</i>	Debe cumplir las condiciones de viga	Se debe reforzar	-
<i>Pantallas de rigidización</i>	<i>Espesor mínimo</i>	0,15 m y > h/20	-	-
	<i>Armadura base</i>	Dos mallas (Intervalo < 0,15 m)	-	-
	<i>Parte baja bordes de pantalla</i>	Disponer cercos	-	-
<i>Elementos prefabricados</i>		Deberán estar armados y zunchados	-	-

Tal y como puede apreciarse en la tabla anterior, existe gran cantidad de información referente a las construcciones realizadas en hormigón armado. Los aspectos que presentan mayores diferencias debidas a la falta de información acerca de determinados elementos constructivos en alguna de las tres normativas estudiadas, son los siguientes: las pantallas de rigidización y los elementos prefabricados.

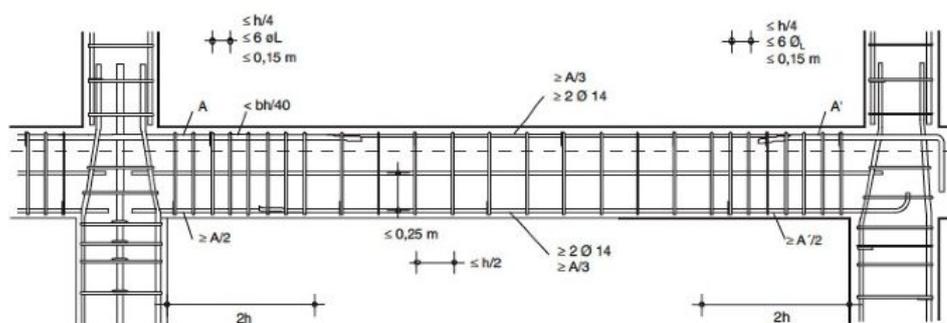
Estos dos elementos constructivos se encuentran presentes únicamente en la Normativa Sismorresistente en España, aunque esto no quiere decir que no sean elementos constructivos aplicados en EEUU o Japón, simplemente no se establecen reglas para ellos.

A continuación, se realiza un análisis en función de los elementos constructivos principales y las distintas características que éstos deben cumplir en función de cada normativa estudiada:

- *Vigas*. Respecto al ancho de descuelgue únicamente se establecen restricciones en la Normativa de España y en la Normativa de Japón, aunque resulta difícil determinar cuál es más restrictiva a simple vista, ya que cada una tiene diferentes criterios.

Tanto en la Normativa de EEUU como en la de España, se dice que las uniones deben solaparse, por lo tanto, es algo importante a tener en cuenta, ya que es una información que coincide en ambas. Además, en EEUU se establece la medida en la que debe realizarse, por lo que en este aspecto esta normativa puede ser algo más restrictiva que la de España.

Cuando se refiere a las armaduras, existen distintas restricciones en cada normativa. En la de Japón se utiliza un sistema que se puede considerar distinto al de las otras dos normativas. Tanto en España como en EEUU, se da información acerca del número de redondos y el diámetro de éstos. La diferencia está en la manera de expresarlo: en España se expresa la armadura que se debe colocar, mientras que en EEUU se determina únicamente la armadura con la que se debe reforzar (sin especificar cuál es la armadura base). De todos modos, no se puede determinar cuál de las tres normativas es más restrictiva en lo que se refiere a las armaduras.

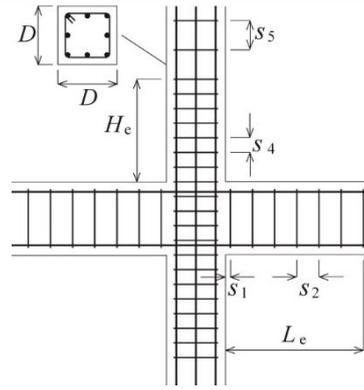


1.3. Viga de hormigón armado, según Normativa Sismorresistente en España

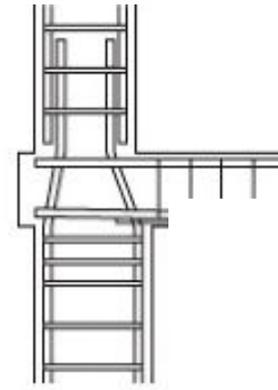
La colocación de los estribos se dice, tanto en la Normativa en España como en Japón, que deben separarse entre sí 0,10 m (misma restricción). En EEUU la restricción se expresa de manera distinta, en función del canto de la viga. Por lo tanto, no se puede decir que alguna de las tres normativas sea más estricta en lo que respecta a los estribos.

- *Pilares*. Se habla de la forma que debe tener la sección de un pilar para que sea lo más óptima posible. En España y en EEUU coinciden en que debe ser cuadrada, mientras que en Japón se utiliza un criterio distinto. En este caso tampoco se podría determinar cuál de las tres normativas es más restrictiva, por lo que se puede considerar que emplean criterios similares.

Respecto a la disposición de las armaduras, hay una discrepancia importante entre las normativas de EEUU y Japón con respecto a la española. Estos dos primeros determinan que esta disposición se debe



1.4. Disposición armaduras de un pilar, según Normativa en EEUU



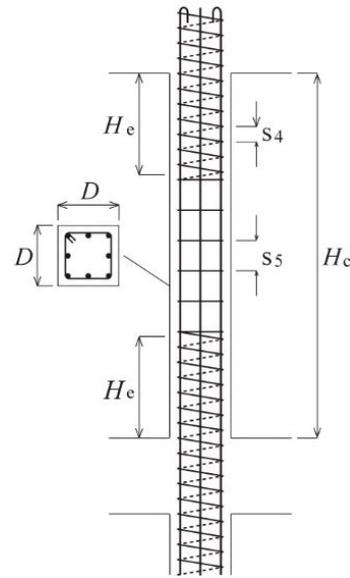
1.5. Disposición armaduras de un pilar, según Normativa en España

realizar de manera continua, mientras que en España se dice que se deben realizar solapes. Es cierto que es prácticamente imposible realizar una armadura completamente continua a lo largo de toda la altura del edificio, por lo que se puede suponer que esta diferencia se debe a la forma en la que se realiza este "solape". Se podría suponer que la armadura continua de la que se habla en las dos normativas, es la que se realiza por soldadura, que resulta más resistente que la realizada por solape. La disposición de las armaduras, según la Normativa Sismorresistente en España, se realizaría por solape, y este solape tendría una mayor longitud de solape que la tipo, para resistir la actividad sísmica. De este modo, las normativas de EEUU y Japón resultan más restrictivas en lo que respecta a la disposición de las armaduras en pilares.

Tanto la armadura transversal como la longitudinal presentan distintas formas de restricciones comparando la Normativa de Japón con las otras dos normativas estudiadas. Por lo tanto, al emplear distintos criterios ésta sobre las otras dos, resulta complicado compararlas para saber cuál de las tres es más estricta. Es por esto que se van a comparar únicamente la Normativa en España y la Normativa en EEUU, suponiendo la Normativa de Japón no menos restrictiva, sino que aplica criterios diferentes.

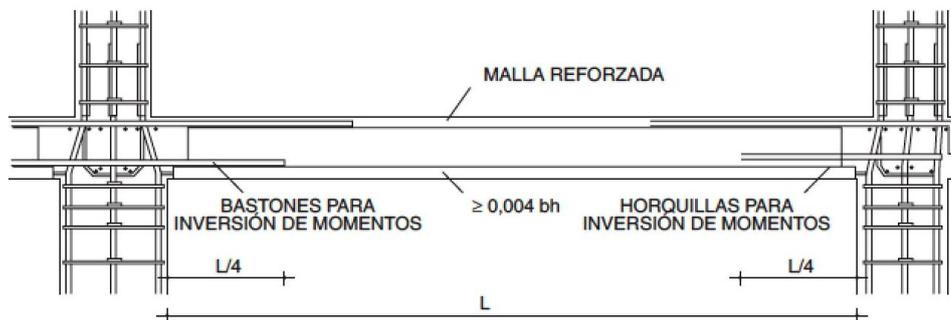
La armadura longitudinal, según la Normativa de España y de EEUU, debe tener al menos 8 redondos. Además, en EEUU se establece que estos redondos deben ser de 16 mm de diámetros. En España no se establece un diámetro mínimo para ello, por lo que se puede decir que en EEUU la normativa es más restrictiva.

Respecto a la armadura transversal, la Normativa de España y de EEUU coinciden en que el espaciado debe ser 0,10 m. En España, además se añade información sobre el tipo de redondo que se debe utilizar para ese espaciado, información de la que carece la Normativa en EEUU. Otro aspecto interesante en la Normativa en EEUU es que se añade la premisa de que la armadura transversal es preferible que sea en espiral. Esto es algo de lo que no se habla en la Normativa Sismorresistente en España, y por lo que se puede considerar más restrictiva la Normativa en EEUU en lo que respecta a la armadura transversal. Además, es importante disponer estribos en los pilares incluso en el canto de las vigas para el mejor comportamiento a compresión en estas zonas y mitigar el riesgo de rótulas plásticas.



1.6. Detalle armadura pilar en espiral, según Normativa en EEUU

- *Forjados.* Se especifica sobre los puntos de unión con un soporte extremo tanto en la Normativa española como en la estadounidense. En ambos casos se emplean criterios distintos, aunque pueden tener algo en común. En EEUU se dice que se debe reforzar, mientras que en España se dice que se deben cumplir las condiciones de viga. Es cierto que cumplir las condiciones de viga puede llevar implícito la idea de reforzar, por lo que ambas normativas pueden considerarse igual de restrictivas. Aunque la Normativa de Japón no hable de ello, esto no quiere decir que no se aplique.



1.7. Detalle forjado, según Normativa Sismorresistente en España

Después del análisis realizado, las conclusiones obtenidas son las siguientes:

- La Normativa de Japón, de manera general, emplea métodos de restricción distintos a los aplicados en España y EEUU. Esto puede verse en los siguientes elementos constructivos: ancho de descuelgue y armadura de las vigas, así como en las secciones óptimas y las armaduras de los pilares. Esto no implica que sea más restrictiva en estos aspectos, sino que se emplean distintas técnicas para establecer limitaciones.
- La Normativa de España aporta información sobre las pantallas de rigidización y los elementos prefabricados, algo que no aparece en las otras dos normativas estudiadas. Esto no quiere decir que no sean elementos constructivos aplicados en EEUU o Japón, simplemente no se establecen reglas para ellos.
- Por regla general, la Normativa de EEUU es bastante similar a la de España ya que coinciden en muchos aspectos, aunque es cierto que en determinados casos en EEUU es algo más restrictiva. Se determina que es más restrictiva porque, aunque coincidan ambas normativas, en algunos casos en EEUU se añaden más condiciones que en España. Estos casos son los siguientes: las uniones de las vigas y las armaduras de los pilares.
- Es importante destacar la preferencia de la Normativa en EEUU y en Japón sobre la armadura continua o solape “por soldadura” frente al solape habitual de las armaduras en España. Estas dos primeras normativas proponen una solución más resistente, y por lo tanto a tener en cuenta.

1.4 Análisis de condicionantes constructivos metálicos

La siguiente tabla comparativa analiza información extraída de las tres normativas escogidas como objeto de estudio, relativa a las construcciones con elementos metálicos.

ELEMENTO CONSTRUCTIVO		NORMATIVA		
		ESPAÑA	EEUU	JAPÓN
Vigas	Perfiles empleados	-	Perfiles en C (2 formando un perfil en I)	-
	Luz	-	508 - 305 cm	12 m
Pilares	Altura	-	305 - 203 cm	-
Uniones	Soldaduras	No soldaduras de penetración parcial entre elementos críticos	Diámetro nominal fuste: 3 mm	-
	Uniones atornilladas	Suponer que el fallo no será por rotura de los tornillos	Diámetro arandela: 1,52 mm máximo	Suponer que el fallo no será por rotura de los pernos de anclaje
Pórticos	Disposición ejes barras	En un mismo plano	-	-
	Nudos	Continuidad en la chapa traccionada	-	No deben romper cuando los tirantes empiecen a ceder
		Garantía no abolladura chapa comprimida	-	
Arriostramiento		Simetría	Simetría	-
Dimensiones	Altura libre máxima	-	-	13 m
	Altura total por planta	-	-	500 m ²

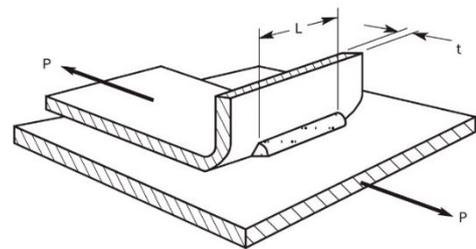
Después de ver la anterior tabla comparativa, se puede deducir que por lo general los elementos constructivos metálicos presentan mayores diferencias en función de las distintas normativas analizadas. Esto puede verse evidenciado comparándolo con el anterior apartado, donde en su tabla comparativa se aprecia cómo existe información que puede ser comparable en la mayoría de sus elementos constructivos.

Respecto a la información obtenida acerca de vigas y pilares, la normativa que da una información más completa de ello es la de EEUU. Los datos proporcionados son principalmente los relativos a medidas de los perfiles y al tipo de perfil que se debe emplear. La Normativa de Japón también da algo de información sobre esto, de la limitación de luz de las vigas en concreto. Dado que la mayoría de los datos los proporciona la Normativa de EEUU, se puede deducir que es la que presenta mayores limitaciones.

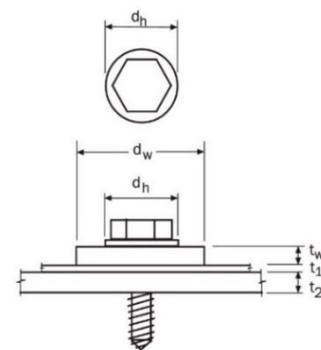
De todos modos, puede verse la diferencia entre la luz de las vigas permitida en EEUU y en Japón. Por ello, no debe suponerse como válida una u otra, ya que cada una puede emplear distintos sistemas o criterios que, aunque no se nombren puedan influir a la hora de ser válidos para resistir las acciones sísmicas.

Los elementos constructivos que presentan mayor grado de semejanza, según las tres normativas estudiadas, son: las uniones entre elementos constructivos metálicos. Éstas se pueden dividir en dos tipos:

- *Soldaduras.* Tanto en la Normativa de España como en la de EEUU se habla de ellas, aunque es cierto que se aplican distintos criterios. Esta es la razón por la que no se puede determinar cuál de ellas es más restrictiva. Aunque no se trate el tema de las soldaduras en la Normativa de Japón, esto no quiere decir que no se empleen.
- *Uniones atornilladas.* Las tres normativas hablan de ello. Tanto en la Normativa de España como en la de Japón, se plantean alternativas similares. Éstas consisten en suponer que no habrá fallo por rotura en los anclajes. Por lo tanto, las limitaciones de ambas normativas se pueden considerar



1.8. Detalle soldadura, según Normativa en EEUU



1.9. Detalle unión atornillada, según Normativa en EEUU

con el mismo grado de limitación. En la Normativa de EEUU, se establece un diámetro máximo de arandela. Este es un criterio distinto al aplicado en las dos normativas anteriores, por lo que no se puede decir que sea más o menos restrictiva que éstas.

Respecto a los pórticos, la mayor cantidad de información obtenida proviene de la Normativa de España. Es cierto que la información relativa a los pórticos se puede dar en otros apartados tales como los analizados anteriormente, por lo que esto no quiere decir que no haya datos sobre este tema en las otras dos normativas, sino que se incluyan en otros apartados.

Tanto en la Normativa en España como en la de EEUU se determina que los arriostramientos deben ser simétricos, así que aunque esta información no se da en la Normativa de Japón no quiere decir que también se aplique este criterio.

En lo referente a las dimensiones, únicamente se habla de ello en la Normativa de Japón. Es esta la razón por la que se puede considerar más restrictiva en este aspecto. El hecho de que no existan datos en las otras dos normativas quiere decir que no existen limitaciones, por lo que se deben tener en cuenta las consideraciones que se llevan a cabo en Japón.

Una vez realizado el análisis de los distintos condicionantes constructivos de elementos metálicos, las conclusiones parciales son las siguientes:

- Existen criterios distintos en función de cada normativa relativos a las medidas que se deben aplicar a cada elemento constructivo. Esta es la razón por la que resulta difícil determinar, en la mayoría de los casos, la normativa más restrictiva.
- Las uniones entre elementos metálicos, tanto soldadas como atornilladas, son los condicionantes constructivos de los que se puede decir que tienen más criterios en común entre las tres normativas. Los criterios a seguir en las uniones atornilladas según la Normativa de España y la de Japón, coinciden. En la Normativa de EEUU también se realizan limitaciones, aunque aplican un criterio distinto. Por ello, no se puede determinar cuál de las tres normativas es más restrictiva en este tema, aunque sí decir que tienen algunos aspectos en los que coinciden.
- Los arriostramientos deben de disponerse de manera simétrica, ya que en ello coinciden la Normativa de España y la de EEUU. La Normativa de Japón no

presenta datos sobre este tema, aunque esto no quiera decir que no se deba aplicar la misma limitación.

- Las restricciones acerca de dimensiones únicamente se establecen por la Normativa de Japón. Esto es algo importante a tener en cuenta, ya que en este caso sí se puede considerar más restrictiva esta normativa respecto de las otras dos.

1.5 Análisis de condicionantes constructivos de fábrica resistente

Tal y como se ha realizado en los apartados anteriores, se ha llevado a cabo un análisis de los condicionantes constructivos derivados de la normativa sísmica, relativos a las construcciones de fábrica resistente.

ELEMENTO CONSTRUCTIVO		NORMATIVA		
		ESPAÑA	EEUU	JAPÓN
<i>Disposición de los muros resistentes</i>		En las dos direcciones principales en planta, de la manera más uniforme y simétrica posible	En las dos direcciones principales en planta, de la manera más uniforme y simétrica posible	En las dos direcciones principales en planta, de la manera más uniforme y simétrica posible
<i>Altura</i>		-	4ot (t: espesor muro)	20 m
<i>Espesor muros</i>		24 cm	19 cm	19 – 22 cm
<i>Huecos</i>	<i>Distribución</i>	Lo más regular posible	Centrados	-
	<i>Distancia entre huecos</i>	> 60 cm	> 60 cm	> 45 cm
	<i>Distancia hueco - esquina</i>	> 80 cm	> 60 cm	> 45 cm
<i>Uniones a forjados</i>		Deberán atarse a los muros	-	-
<i>Refuerzo</i>	<i>Verticales</i>	< 5m	0,5 – 0,7 m	< 0,45m
	<i>Horizontales</i>	< 5m	< 0,5m	< 0,45m
	<i>Armadura longitudinal</i>	4 Ø 10	Ø 16	Ø 16
	<i>Armadura transversal</i>	Altura: 15cm mínimo 4 Ø 6	Altura: 15cm mínimo Ø 6	Ø 16

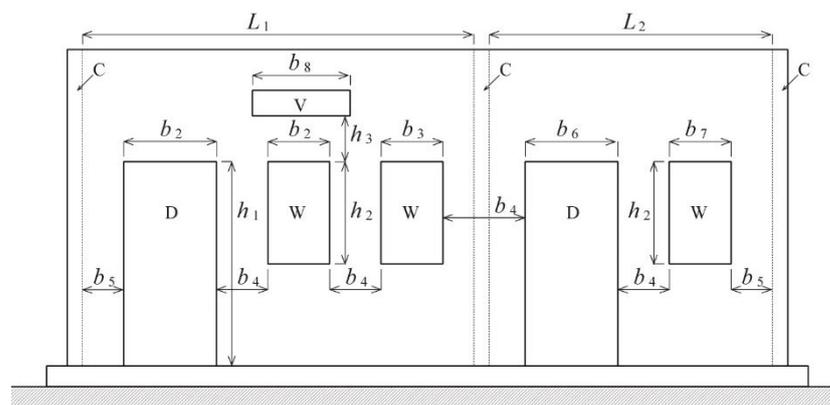
Tras la anterior tabla comparativa, se puede deducir que existe gran cantidad de información sobre las construcciones realizadas en fábrica resistente en las tres normativas estudiadas. A continuación, se realiza un análisis con la intención de poder dar con los puntos comunes de las normativas, así como de los temas en los que se diferencian y poder ver cuál de ellas es más restrictiva.

Respecto a la disposición de los muros resistentes, la solución constructiva es unánime en las tres normativas, por lo que es algo que parece ser aplicado de la misma manera.

Los datos proporcionados acerca de la altura de los muros se obtienen de la Normativa en EEUU y en Japón. Se aplican criterios diferentes para cumplir la norma, ya que en Japón se fija una cifra máxima expresada en metros, mientras que en EEUU se expresa esta cifra en función del espesor del muro. De todos modos, al tener el dato del espesor del muro, se puede deducir una altura máxima aproximada en EEUU. Ésta es menor que la permitida en Japón, por lo que la Normativa de EEUU es más restrictiva en este caso. Que sea más restrictiva no quiere decir que sea más válida o que sea la que se deba aplicar, ya que, dependiendo de los sistemas constructivos empleados en Japón, es posible que se haya conseguido aumentar esta cifra y las estructuras sean tan resistentes como en EEUU.

El mayor espesor de muros exigido se encuentra en España, con una cifra de 24 cm. Por lo tanto, la Normativa en España es más restrictiva en este aspecto. Los valores proporcionados por las otras dos normativas son similares, aunque la de Japón añade un intervalo con valores más cercanos a los exigidos en la Normativa de España.

Los huecos se dice que deben ser distribuidos regularmente, según la Normativa en España, y centrados, según la Normativa en EEUU. Estas dos características se pueden considerar como similares, y por lo tanto aplicables en todo caso. La Normativa de Japón no aporta datos sobre esto, por lo que se deberán tener en cuenta las consideraciones anteriores, que resultan más restrictivas.



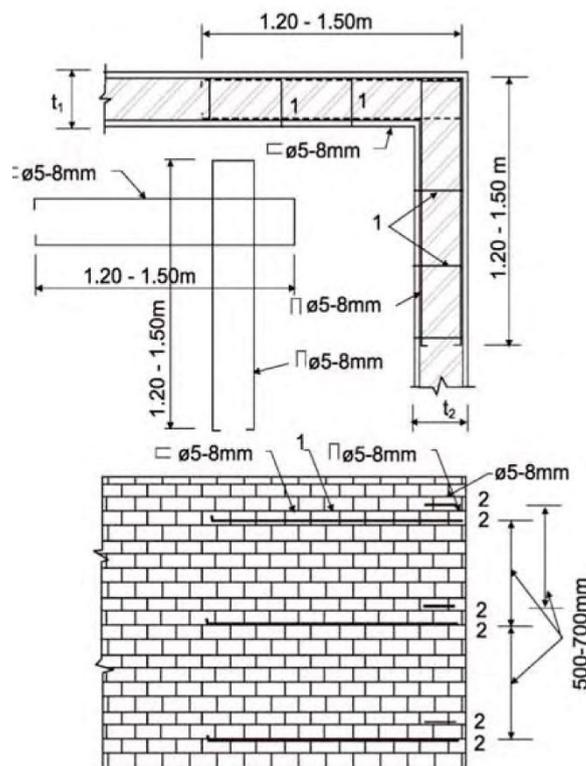
1.10. Disposición de los huecos en un muro de fábrica resistente, según Normativa en EEUU

La distancia entre huecos se establece de manera similar en la Normativa de España y de EEUU, aunque en Japón se exigen medidas menores, y por lo tanto, más estrictas. Ésta última normativa es la que resulta ser más restrictiva en este aspecto. Además, es algo que puede tener que ver con la cuestión expuesta anteriormente, y que además lo ratifica: la limitación de altura de las construcciones realizadas con fábrica resistente en Japón puede que sea mayor porque se exijan sistemas constructivos mucho más resistentes.

De las uniones de los forjados únicamente se habla en la Normativa Sismorresistente en España, por lo que resulta complicado determinar la solución constructiva que se debe emplear. Por un lado, al no existir otros datos sobre este tema, se podría suponer que ésta es la normativa más restrictiva en este aspecto y por lo tanto la que se debe aplicar. Por otro lado, si no se nombra en las otras dos normativas, puede que esta medida realmente no sea necesaria o que se deba realizar de otra manera.

Sobre los refuerzos para las construcciones realizadas con fábrica resistente, las tres normativas exponen gran cantidad de información, sintetizada en la tabla comparativa. Las medidas a tomar respecto a los refuerzos se expresan de manera distinta en la Normativa de España respecto a las otras dos, aunque se puede hacer una comparación.

Es cierto que las distancias entre refuerzos, tanto horizontales como verticales, son mucho menores en la Normativa de EEUU y Japón, aunque esto guarda relación con la forma en la que se expresa su armadura. En estas dos se expresa el diámetro del redondo que se debe colocar según la distancia dada, mientras que en España se dice que se deben colocar cuatro redondos según la distancia exigida. Por lo tanto, puede parecer una diferencia exagerada la de las distancias entre refuerzos según cada normativa, pero realmente la diferencia no es tanta ya que se coloca un mayor número



1.11. Detalle refuerzos en fábrica resistente, según Normativa en EEUU

de redondos. De todos modos, teniendo en cuenta esta relación, la Normativa de Japón es la más restrictiva.

Una vez realizado el análisis de los distintos condicionantes constructivos, se llega a las siguientes conclusiones sobre las construcciones de fábrica resistente:

- Las tres normativas coinciden en la manera de disponer los muros resistentes, que debe ser en las dos direcciones principales de la planta y de la manera más simétrica posible. Por lo tanto, esto es algo que se debe aplicar con seguridad.
- La Normativa de Japón permite una altura mayor, debido a que exige soluciones constructivas más resistentes que las propuestas por las otras dos normativas. Esto se puede ver evidenciado tanto en la disposición de los huecos, como en los refuerzos del muro. Es por esto que se puede considerar la normativa más restrictiva, por regla general, respecto a las construcciones de fábrica resistente.

1.6 Análisis de condicionantes constructivos de cerramientos

La siguiente tabla comparativa analiza información extraída de las tres normativas escogidas como objeto de estudio, relativa a los condicionantes constructivos de cerramientos.

ELEMENTO CONSTRUCTIVO	NORMATIVA		
	ESPAÑA	EEUU	JAPÓN
<i>Paños</i> <i>Particiones interiores</i> <i>Falsos techos</i>	Deben enlazarse correctamente a los elementos estructurales (para evitar el desprendimiento de las piezas durante las sacudidas sísmicas)	Elementos de techo y suelo: Deben estar unidos entre sí	Elementos de techo y suelo: Deben estar unidos entre sí (Las particiones interiores deben ser reforzadas con malla de fibra)
<i>Uniones</i>	Deben permitir desplazamientos (sin rotura) Diseño cuidadoso de los anclajes	-	Deben ser diseñadas para absorber la energía sísmica
<i>Carpinterías exteriores</i>	Gran altura con grandes superficies acristaladas: Ventanas deben tener capacidad de absorber los movimientos de la carpintería	Deberán unirse a los elementos estructurales	-
<i>Revestimientos y aplacados (fijación)</i>	Con materiales de alta durabilidad	Con materiales de alta durabilidad	Se han diseñado paneles hechos con amortiguadores viscosos instalados en las paredes para absorber la energía sísmica
	Mediante técnicas que eviten el desprendimiento de piezas en caso de sismo	Superficies acabadas con materiales que proporcionen estabilidad	

La Normativa de España determina que tanto los paños, como las particiones interiores y los falsos techos, deben enlazarse a los elementos estructurales. Las otras dos normativas coinciden en la idea de que los elementos de techo y suelo deben estar unidos entre sí, algo similar a la medida anterior, pero en la que no se especifica que estos elementos deban ser estrictamente estructurales. Esto no determina que sea más restrictiva una solución que otra. Además, en la Normativa de Japón se añade que las particiones interiores deben ser reforzadas con malla de fibra, una premisa que no se encuentra en EEUU. Es por ello que se puede considerar más restrictiva, en este aspecto, la Normativa de Japón respecto a la de EEUU.

Las uniones únicamente se describen en la Normativa de España y la de Japón. Los criterios empleados en cada una de ellas son distintos, aunque es cierto que pueden ser conceptos relacionados, resulta complicado determinar la normativa más restrictiva respecto a las uniones.

Los revestimientos y aplacados se dice, tanto en España como en EEUU que los materiales deben ser de alta durabilidad, proporcionando estabilidad al conjunto. La Normativa de Japón es más innovadora, en la que se dice que se han diseñado paneles hechos con amortiguadores viscosos instalados en las paredes para absorber la energía sísmica. Al ser una medida tan innovadora, esta última se encuentra muy por delante de las otras dos.

Tras el análisis, se ha llegado a las siguientes conclusiones parciales:

- La Normativa de Japón incluye una innovación que se encuentra muy por delante de las propuestas en las otras dos normativas para revestimientos y aplacados. Es por esto que, se deben tener en cuenta las consideraciones realizadas por estas dos últimas, pero intentando aplicar la innovación de Japón.
- Los elementos de cerramiento tales como paños, particiones interiores y falsos techos, deberán estar unidos entre sí. En esta cuestión coinciden la Normativa de EEUU y de Japón, que se diferencian de la de España en que esta última añade la premisa de que se debe unir a elementos estructurales. Ya que dos de las normativas más avanzadas del mundo coinciden, se considerará esa medida la que se debe llevar a cabo. No por esto resulta menos válida la medida que se sigue en España, ya que es un país con una actividad sísmica menor y puede que sea por esto que se deba aplicar otra medida.

2 Lecciones aprendidas de terremotos pasados

A lo largo de la historia, han tenido lugar una gran cantidad de catástrofes provocadas por la actividad sísmica. Tras cada una de estas catástrofes naturales, es preciso realizar un análisis de los elementos afectados y de la manera en la que éstos se han visto dañados. Esta es una de las formas de aprender de la historia, y es algo que ayuda al desarrollo de las normativas sísmicas.

Es por esto que se han escogido tres terremotos para analizar las lecciones aprendidas de cada uno de ellos, y poder ver las carencias que han podido tener cada una de las normativas aplicadas. A continuación, se explicarán cada uno de ellos y se analizarán los daños causados por cada terremoto en las edificaciones. La idea principal es que esto ayude a determinar si las cosas se están realizando bien o si, por el contrario, todavía queda mucho por mejorar e innovar.

2.1 Terremoto de Lorca

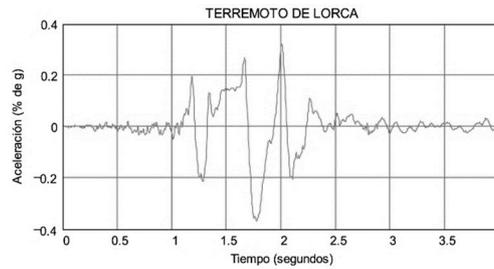
La localidad de Lorca se sitúa el suroeste de Murcia. Se trata de un término municipal muy extenso, con una población de más de 92.000 personas. Se sitúa parcialmente en una ladera, desarrollándose en pendiente fundamentalmente continua. El terremoto tuvo lugar en el año 2011, con una magnitud de 5,1 en la escala de Richter. Causó 9 víctimas.

Descripción del terremoto

Según los datos publicados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), los terremotos principales del día 11 de mayo de 2011 fueron dos, cuyo epicentro se situaba a 2 km al noreste de Lorca. Esta distancia es bastante reducida, y por ello provocó gran cantidad de daños.

Además de la cercanía del epicentro, otro aspecto fundamental es la profundidad: unos 2.000 m. Este dato también contribuyó al incremento de los daños. Realmente, en términos de magnitud no es un terremoto devastador, aunque su efecto en superficie es muy determinante.

Se alcanzaron valores alrededor del 36% de la aceleración de la gravedad. Estos valores son tres veces los previstos por la normativa vigente en España, para edificios normales. Esto no quiere decir que realmente fuera 3 veces peor de lo previsto.



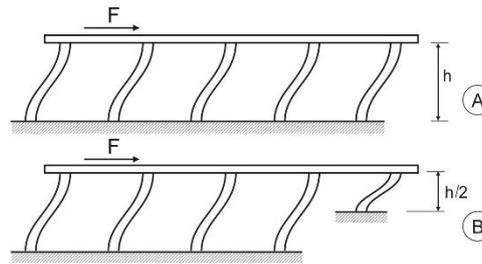
2.1. Gráfica de la aceleración del terreno durante el terremoto de Lorca

El terremoto presentó violentas sacudidas en un escaso periodo de tiempo. Además, el terreno de la zona es muy heterogéneo, con una falla conocida como Falla de Lorca, por lo que podrían haberse dado distinta intensidad en función del tipo de suelo.

Problemas detectados

A continuación, se analizarán problemas constructivos detectados en los edificios afectados por el terremoto de Lorca:

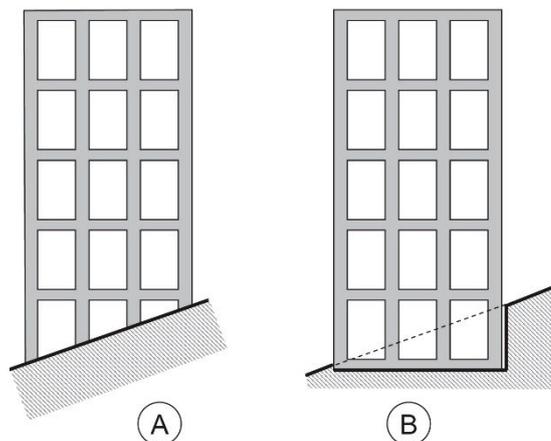
- *Pilares cortos.* Si se encuentra presente algún pilar que es más corto que los demás, éste soportará mayor cantidad de carga. Esto es debido a que la rigidez de un pilar ante un desplazamiento lateral es proporcional a la tercera potencia de su longitud.



2.2. Pilares cortos

Por lo tanto, un pilar que tiene menos longitud (más corto), es más rígido ante un desplazamiento lateral e impide en menor medida el desplazamiento.

Esto se ha producido en las fachadas de los semi-sótanos, cuyo uso habitual es el de estacionamiento. La alineación de la fachada comienza desde un muro de sótano perimetral, cuya cota se encuentra a pie de calle y por lo tanto no llega hasta la cota superior (como sería lógico desde el punto de



2.3. Disposición de pilares cortos

vista estructural). Es por esto que se generan pilares de pequeñas y distintas alturas entre ellos. (Caso A)

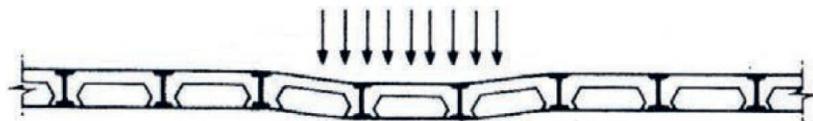
Esto también ocurre en el caso de que se construyan todos los pilares con la misma cota y se dispongan adyacentes al muro de sótano. (Caso B)

En estos pilares, se produce la rotura a cortante debido a la mayor cantidad de cortante que deben soportar. Por ello, tienen mayor probabilidad de romper que un pilar normal y es una solución que no se debe llevar a cabo.

- *Atado horizontal.* Resulta fundamental el atado horizontal en los muros estructurales con estructuras de barras, así como el de las vigas con las cabezas de los pilares.

La solución constructiva de forjados más empleada en Lorca es la unidireccional de viguetas y bovedillas. En gran cantidad de los edificios inspeccionados en Lorca, sus forjados no contaban con capa de compresión, por lo que no se podía movilizar el denominado “efecto diafragma”, muy conveniente para garantizar el comportamiento conjunto de la estructura y mejorar su estabilidad. Esto provoca también algunos síntomas menores, como puede ser la apertura de juntas entre baldosas del solado.

En las viviendas unifamiliares se detectaron mayores síntomas, tales como: la deformación del forjado o el desplazamiento relativo de las viguetas. Estos forjados solían ser de madera, sin conexión con la estructura resistente. Al parecer, se trataba de estructuras muy precarias sin presencia de algún técnico en su diseño.



2.4. Deformación del forjado (falta de capa de compresión)

También se han encontrado casos de vigas metálicas sin conexión con el forjado, en las que el forjado que soportan se ha visto desplazado.

- *Reducción de la capacidad estructural.* Ello no quiere decir que no haya estructura, pero sí que haya ausencia de estructura de manera parcial en la dirección horizontal principalmente.



2.5. Unión de viga metálica con pilar de hormigón

Es frecuente encontrar el siguiente caso: la unión de vigas metálicas con pilares de hormigón armado, los cuales tienen el armado visto con una parte del recubrimiento que ha desaparecido (la que recubría el armado). Esta solución, por el tipo de unión, puede presentar una rigidez menor.

Como este caso, se pueden encontrar otros ejemplos con reducción de su capacidad estructural. El problema principal es la pérdida de rigidez de la estructura, que también será mucho más vulnerable a los movimientos sísmicos.

- *Disposición inadecuada de masas.* Se habían colocado depósitos de grandes dimensiones en edificios convencionales, debido a las exigencias relacionadas con los locales comerciales de almacenar cierta cantidad de agua. Esto supone un riesgo que no se puede permitir en una zona sísmica.



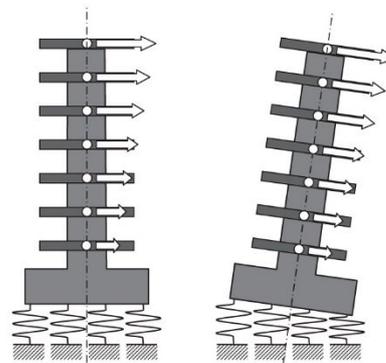
2.6. Sobrecarga debida a la colocación de un depósito no previsto

También es importante destacar la sobrecarga causada por rellenos en los forjados de espesores grandes.

- *Disposición inadecuada de las pantallas.* La solución constructiva basada en la utilización de pantallas aparece en la Normativa Sismorresistente en España, y por lo tanto resulta válida frente a un sismo.

El armado de las pantallas observadas en Lorca era inferior al que hubiera sido necesario para soportar la actividad sísmica.

Además, las pantallas deben disponer de una cimentación rígida y de grandes dimensiones para ser capaz de transferir al terreno las muy altas tensiones resultantes de la acción sísmica. Si esto no es así, la cimentación puede girar y junto a ella la pantalla. Esta acción provoca la pérdida de rigidez de la estructura.



2.7. Giro de la cimentación

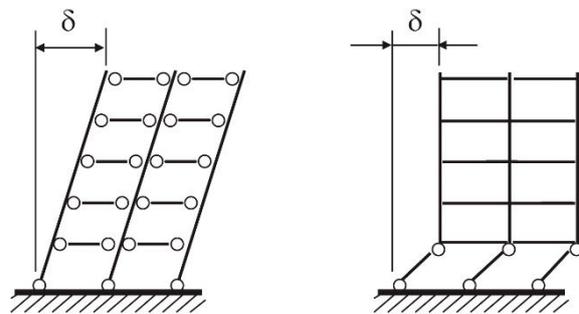
Es cierto que las pantallas son válidas frente a sismo, aunque resulta una solución constructiva con dificultades para llevar a cabo de tal manera que funcione bien, además de ser poco económica.

- *Juntas entre las estructuras de los edificios.* Las juntas entre distintos edificios son inexistentes generalmente en Lorca. Normalmente, se suelen disponer placas de poliestireno entre uno edificio y otro.

Este problema supone un riesgo muy serio en las estructuras de los edificios, ya que podrían llegar a colapsar, aunque no lo hubieran hecho tras el terremoto.

Especialmente conflictivas y de alto riesgo pueden resultar en el caso de edificios con juntas de dilatación insuficientes y con forjados de distinta altura, donde el impacto de una estructura con la otra puede seccionar los pilares y provocar el colapso de las estructuras.

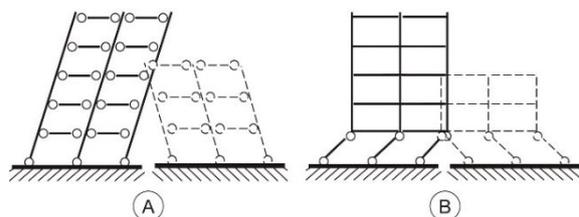
- *Plantas blandas.* Los puntos críticos en las llamadas “plantas blandas” se encuentran en los extremos de los pilares. El método de cálculo habitual no tiene en cuenta estas cuestiones. En gran cantidad de ocasiones, la presencia de plantas blandas ha provocado el colapso del edificio.



2.8. Comportamiento de un edificio normal y comportamiento de un edificio con planta blanda

Suponen cierto riesgo ante el sismo. Las plantas blandas suelen darse en casos donde la altura libre de las plantas bajas, dedicadas a locales comerciales, se exige que sea mayor que la de las plantas superiores.

Otro aspecto importante tiene que ver con el choque que se produce entre edificios con plantas blandas (caso B), que normalmente se suele producir en las plantas más altas. En este caso, el choque se produce a lo largo de toda la altura del edificio (caso A).



2.9. Choque entre edificios

De todos modos, las plantas blandas se vuelven más peligrosas en terremotos menos próximos que el de Lorca, y con una duración mayor. Es por esto que se han encontrado escasos daños debido a este problema.

- *Escaleras.* Según la NCSE: “Las vías generales de evacuación, especialmente los núcleos verticales de comunicación como las escaleras, estarán dotadas de resistencia y ductilidad adicional para facilitar su utilización, aún en caso de sismos importantes”.

En muchos casos, lo citado anteriormente no se cumple. Es por esto que el colapso de las escaleras supone un daño muy grave para el conjunto del edificio, modificando su rigidez.



2.10. Fallo en la estructura resistente escalera

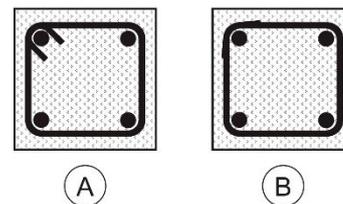
- *Prácticas constructivas inadecuadas.* Se han detectado algunos defectos debido a fallos en su ejecución.

Un ejemplo de estos fallos en ejecución es la falta de estribos en los cantos de los forjados, o, la separación entre ellos era mayor de 20 cm con un recubrimiento de hormigón escaso. La distancia máxima exigida por normativa es de 10 cm, por lo que no cumple con las exigencias.

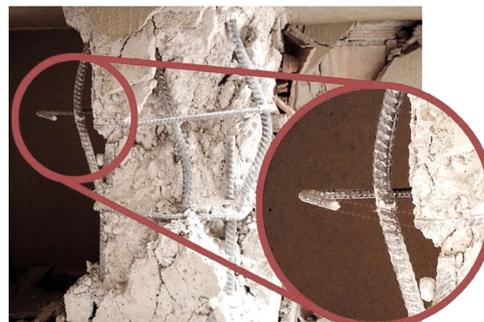


2.11. Recubrimiento escaso de hormigón

Otro ejemplo de ejecución inadecuada es a la hora de anclar los estribos. La normativa exige que los estribos se anclen doblando a 135° cuando se trata de zona sísmica (caso A), en lugar de realizar el solape de la manera tradicional (caso B).



2.12. Solape de los estribos



2.13. Defectos de ejecución del solape de los estribos

- *Derrumbamiento de cerramientos y petos.* Uno de los grandes daños que se produjeron en Lorca tras el terremoto, fue debido al derrumbamiento de cerramientos y petos por falta de ductilidad de las fábricas, al ir sin armaduras de ningún tipo. Una de las víctimas murió tras el derrumbe de una fachada sobre ella.



2.14. Una de las víctimas, aplastada tras el derrumbe de una fachada

Conclusiones parciales

Además de tener en cuenta los daños descritos anteriormente, resulta importante destacar algunas de las ideas sacadas acerca de las lecciones aprendidas tras el terremoto de Lorca:

- Importancia de los elementos no estructurales, tales como cerramientos y particiones. Se aconseja disminuir la rigidez de los estos elementos no estructurales y aumentar la de los elementos estructurales, o separar ambos.

Esto es algo que ya se ha comentado al ver la tabla comparativa de cerramientos. La Normativa de Japón no aporta datos al respecto, por lo que es probable que lo que realmente se esté haciendo es separar dichos elementos de la estructura.

- Escaso grado de cumplimiento de la normativa. Es cierto que muchas de las construcciones son anteriores a la normativa vigente, aunque también es cierto que muchos de los edificios no cumplirían la normativa que se debería haber aplicado en su momento.
- Las solicitaciones del terremoto previstas por la normativa resultan insuficientes, ya que, en Lorca, edificios que cumplían con la normativa, sufrieron daños. Esto quiere decir que la normativa actual debería prever unas solicitaciones mayores que las previstas hasta el momento.

2.2 Terremoto de Amatrice

La localidad de Amatrice se sitúa en la zona centro de Italia, con una población de 2.646 habitantes.

Descripción del terremoto

El terremoto de Amatrice se produjo en distintas secuencias, siendo el primer movimiento el 24 de agosto de 2016. Las siguientes réplicas se producen en septiembre y octubre.

Los movimientos registrados en la última réplica, que tuvo lugar el 30 de octubre, se estima que fueron más débiles que los del 24 de agosto. Tras el terremoto se produjo en agosto, muchas de las edificaciones únicamente experimentaron pequeños daños, aunque en las siguientes réplicas llegaron a colapsar.

El epicentro se situaba alrededor de unos 10 km del municipio. La magnitud del terremoto es de 6,2 en la escala de Richter. Se han registrado cerca de 300 víctimas mortales.

Problemas detectados

A continuación, se analizarán aspectos estructurales detectados en los edificios afectados por el terremoto de Amatrice:

- *Daños en elementos no estructurales.* Éstos provocan inestabilidad en la parte superior de los pilares. Se detectaron fallos en los paños de relleno entre pilares de hormigón. Éstos no se llegaron a producir en la primera sacudida, pero sí en las siguientes.
- *Fallos en las uniones viga - pilar.* Debido a las múltiples sacudidas, se produce el desprendimiento de hormigón, dejando visto el armado. También puede observarse cómo el pilar presenta fallo a pandeo. Esto es debido a un refuerzo transversal inadecuado, es decir, insuficiente. Lo que no se



2.15. Daños en paños de relleno



2.16. Unión viga - pilar

puede determinar es si realmente cumplía la normativa o si, aún cumpliéndola, también resultaba insuficiente.

- *Orientación de los pilares metálicos.* En uno de los edificios dañados, con una dirección principal en planta de mayor longitud, se observó una traslación a lo largo de esta dirección. Esto es debido a que los ejes de los pilares de acero se encontraban alineados con el eje corto.

Por lo tanto, resulta importante la colocación de los ejes de los pilares metálicos en la dirección principal (más larga).

- *Grietas diagonales en muros de fábrica resistente.* Es cierto que se observan grietas, aunque cabe destacar que el refuerzo de armado en las esquinas mitigó los daños y el posible colapso. Por lo tanto, esto se puede tener en cuenta como un punto a favor, ya que el edificio tuvo daños pero podría haber sido mucho peores y hasta incluso haber llegado al colapso.



2.17. Grietas diagonales en muros de fábrica resistente

Se han dado otros casos en los que, en una primera sacudida la mampostería presentaba daños menores, y después de una segunda sacudida se produjo el colapso parcial de la fábrica de ladrillo.



2.18. Daños menores tras una primera sacudida



2.19. Colapso parcial tras una segunda sacudida

Conclusiones parciales

Además de tener en cuenta los daños descritos anteriormente, resulta importante destacar algunas de las ideas sobre las lecciones aprendidas tras el terremoto de Amatrice:

- Las estructuras de hormigón armado no experimentaron el aumento desproporcional de daños entre una sacudida y la siguiente, mientras que en los edificios de mampostería se detectaron grandes cambios. Estos cambios fueron tales que, en el primer terremoto de agosto, se produjeron daños menores, mientras que después de las siguientes réplicas, muchos de estos edificios colapsaron.
- Algunos de los edificios con estructura de fábrica de ladrillo resistente, tuvieron un comportamiento al sismo mejor de lo esperado, debido a los refuerzos de los que disponían en sus esquinas.
- La escuela de Amatrice había sido reestructurada para adecuarse a la normativa 4 años antes del terremoto, y pese a esto, colapsó. Con este caso puede verse cómo la normativa resulta insuficiente.

Es cierto que se trató de un terremoto con varias réplicas, y es probable que esto no se haya previsto en la normativa. Puede que lo que realmente haya que revisar en la normativa sea la intensidad prevista para los sismos, ya que es una zona con una actividad sísmica importante.

- El campanario de Amatrice, edificio histórico, resistió el primer terremoto. Se sabe que tenía zapatas más profundas que muchos de los edificios de la localidad construidos, además de contar con vigas de atado.

Aunque pudo resistir al terremoto, se derrumbó unos meses más tarde debido a réplicas del sismo. Se trata de un edificio de mampostería, los cuales tuvieron un buen comportamiento en un principio, pero fueron degradándose tras las sacudidas de septiembre y octubre.



2.20. Campanario de Amatrice

2.3 Terremoto de Kobe

La ciudad de Kobe se sitúa al sur de Japón, con 1,5 millones de habitantes. Se trata de la sexta ciudad más poblada del país.

Se trata de un terremoto relativamente “antiguo” comparado con los descritos anteriormente, aunque al ser un terremoto histórico que marcó un antes y un después en la historia de los sismos, se ha considerado relevante. Este terremoto implicó una gran reforma en la Normativa Sismorresistente de Japón, por lo que muchas de las lecciones aprendidas tras él, se han aplicado en la normativa actual de uno de los países más desarrollados en soluciones frente a sismos.

Descripción del terremoto

El terremoto de Kobe se produjo el 17 de enero de 1995, con una magnitud de 7 en la escala de Richter. Se registraron más de 6.500 víctimas mortales. La causa de un número tan elevado de muertes fueron los incendios posteriores al terremoto. Fue el terremoto de mayor intensidad registrado hasta aquel momento en Japón. El epicentro se situaba a 20 km al suroeste de la ciudad de Kobe.

Las fuertes sacudidas provocaron el derrumbamiento de edificios e infraestructuras primero, y desprendimientos posteriormente. En pocos minutos se provocaron gran cantidad de incendios como consecuencia del sismo.



2.21. Imagen tras el terremoto de Kobe

Problemas detectados

Cabe destacar que la mayoría de las estructuras japonesas son metálicas, por lo que los daños se han detectado fundamentalmente en ellas. A continuación, se analizarán aspectos estructurales detectados en los edificios afectados por el terremoto de Kobe:

- *Daños en pilares metálicos.* La mayoría del daño causado fue debido a la unión con las vigas. Uno de los motivos del fallo se produjo debido al pandeo de los pilares en su zona más elevada.
- *Daños en arriostramiento.* Se observaron una menor cantidad de daños, concentrados fundamentalmente en las conexiones con vigas y pilares. Se pudo comprobar que se produjeron menores daños en los elementos con secciones pequeñas, tales como varillas.

También se detectaron daños en la conexión entre diagonales, donde los pernos se habían fracturado.

- *Bases de los pilares.* La mayor cantidad de daños observados en las bases de los pilares fue en las conexiones de la placa base, concretamente en los pernos de anclaje.
- *Conexiones viga – pilar.* Se detectaron dos tipos de roturas. El primero, fue en el que las vigas y las columnas se unían con una soldadura de poco espesor. El segundo, se detectó en las uniones con “soldadura de ranura de penetración completa”.
- *Secciones transversales.* En la siguiente tabla se puede ver los tipos de secciones que funcionaron mejor o peor durante el terremoto.

En los pilares, la sección en forma de H es la que menos aguanta debido a la escasa rigidez a torsión. Le sigue la sección cuadrada con doblado en frío, aunque el número de fallos es la mitad, debido a que este tipo de doblado tiene espesores muy finos, lo cual provoca más fallos. La sección con forma de rectángulo se realiza por laminado,

	Sección Transversal	Total
Columna	□ (Doblado en frío)	235 (212)
	○	8
	H	409
	▭ Formada	70
	Desconocido	288

2.22. Secciones en pilares, en función de los fallos

Las uniones son con soldadura mucho más dúctiles y por lo tanto más resistentes. Esto puede verse evidenciado en el bajo número de fallos registrados en los empalmes por soldadura, con mucha diferencia respecto a otras soluciones de unión.

Empalme de viga	Tipo de conexión	Total
	Soldadura	12
	Perno	397
	Desconocido	457

2.23. Uniones, en función de los fallos

En los arriostramientos, el problema fundamental suele ser el pandeo. Aunque la sección en forma de H funcione peor para los pilares, en el caso del arriostramiento tiene un comportamiento más satisfactorio. Esto es debido a que en el arriostramiento no se produce el fallo por torsión, presentando un buen comportamiento a tracción y compresión.

Diagonales	Sección Transversal	Total
	Varilla	77
	Ángulo	44
	Placa horizontal	44
	○	42
	H	8
	□	6
	Canal	4
	Desconocido	227

2.24. Arriostramiento, en función de los fallos

Conclusiones parciales

Al tratarse de un terremoto del que ya han pasado más de 20 años, se han realizado gran cantidad de análisis y se ha podido aprender de todo ello. Es por esto que realmente las lecciones aprendidas en Kobe se han aplicado a la normativa japonesa.

Se han sintetizado una serie de ideas que se llevaron a cabo tras el terremoto de Kobe. El código de construcción japonés realizó los siguientes cambios:

- Utilización de nuevos metales, mejorando la ductilidad de las estructuras. Esto es algo que puede ayudar en gran medida a conseguir soluciones de acero más resistentes frente a sismos.
- Determinadas propiedades exigidas para los materiales. En Japón, se desarrolló un tipo de acero completamente nuevo, siendo mucho más resistente a la rotura.
- Técnicas de diseño para las placas base de los pilares.
- Recomendaciones en soldaduras. Se recomienda el empleo de electrodos de una resistencia mayor, además un control mayor de la temperatura durante la ejecución.

3 Innovación

Una vez hecho el análisis de lo que se ha realizado hasta el momento acerca de los sistemas constructivos para sismos, se pretende dar un paso más para poder mirar hacia el futuro.

Es cierto que se ha avanzado mucho, las normativas cada vez se encuentran más actualizadas y se ha aprendido de todas las lecciones que nos han dado los daños causados por los terremotos sufridos.

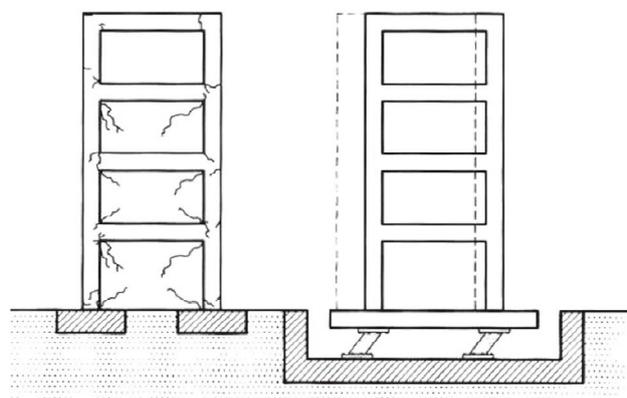
Pero también es cierto que todavía existen fallos, ya sea porque los edificios no se adecúan a las normativas o porque éstas siguen siendo insuficientes, al menos en algunos aspectos.

Es por esto que se pretende analizar varias técnicas de innovación, y así poder ver qué sistemas constructivos se pueden llegar a aplicar en un futuro de manera regular. Algunos de ellos ya han sido aplicados, aunque no se utilizan de manera generalizada.

3.1 Sistema de aislamiento de la base

El objetivo principal del sistema de aislamiento de la base es proteger las estructuras de las acciones destructivas que pueden provocar en ellas los sismos. Atenúan el efecto de los daños causados por los terremotos, reduciendo la aceleración y aumentando el periodo de la vibración de la estructura, para poder evitar tanto el daño para elementos estructurales como para elementos no estructurales.

Este sistema reduce los movimientos del edificio, causando una menor sensación de movimiento a las personas que se encuentran dentro del edificio durante las sacudidas. La idea fundamental es la de causar el menor daño posible a la estructura de los edificios, para poder volver a la normalidad tras el sismo.



3.1. Sin aislamiento de la base / Con aislamiento de la base

Para edificios simples, el aislamiento por fricción de la base puede lograrse reduciendo el coeficiente de fricción entre la estructura y la cimentación, o bien colocando una conexión flexible entre ellas.



3.2. Aislamiento de la base tradicional (Sukabumi, Indonesia)

Para la reducción de la fricción entre la estructura y la cimentación, surgió una técnica que consiste en colocar dos capas de membrana de plástico de buena calidad entre ellas, de modo que las capas de plástico puedan deslizarse una sobre otra.

Las conexiones flexibles entre la estructura y la cimentación son difíciles de lograr con una base permanente. Una técnica que se ha utilizado durante generaciones ha sido construir una casa sobre postes cortos, los cuales descansan sobre piedras grandes, de modo que bajo movimientos del terremoto, los postes son eficaces ya que se encuentran conectados en la parte superior e inferior y la estructura puede oscilar de un lado a otro. Tiene la ventaja de reducir las fuerzas laterales, aislando eficazmente la estructura de movimientos de alta frecuencia.

Desafortunadamente, las aplicaciones tradicionales de esta técnica no tienen en cuenta los desplazamientos ocasionales grandes. Se puede llegar a producir el colapso cuando los desplazamientos laterales alcanzan un cierto punto debido a los terremotos de gran intensidad.

Se han expuesto las soluciones que se han empleado tradicionalmente, ya que se pueden considerar como precedentes a las técnicas que se han desarrollado más adelante. A continuación, se expondrán distintas soluciones, más avanzadas, que han sido aplicadas en lugares como Estados Unidos o Japón.

Tipos de aislamiento de la base y su aplicación

Se han desarrollado distintos sistemas de aislamiento de la base, todos parten de la misma idea, pero lo realizan con distintos mecanismos. Además, se ha considerado relevante explicar en cada uno de ellos dónde han podido ser aplicados, ya que al

poder ver su aplicación se puede deducir la repercusión que pueden llegar a tener éstos en un futuro.

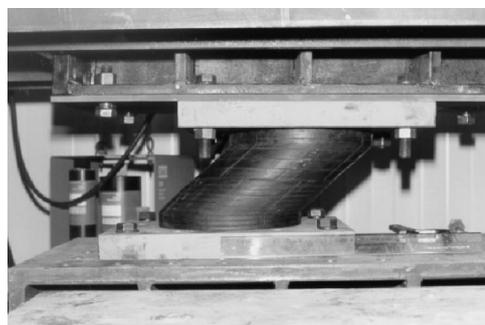
- *Aislamiento básico con sistemas de aislamiento pasivo.* Se trata de uno de los métodos más utilizados en América. Un ejemplo de este tipo de aisladores es: el sistema de péndulo de fricción utilizado para el aislamiento de la ciudad de Pasadena.

El edificio del Ayuntamiento en California fue rehabilitado para tener una mejor respuesta frente a sismos. Se retiró el sótano original y se instalaron 240 “fricciones de péndulo” entre la nueva cimentación y el nuevo sótano, hechas de placas cóncavas superiores e inferiores y un sistema de deslizamiento interior. Se redujo una importante reducción en el coste del proyecto, ya que el montaje es simple y puede ejecutarse más rápido. Este es el llamado “sistema de péndulo de fricción”.



3.3. Sistema de péndulo de fricción

- *Apoyos de neopreno.* Como explica Caesar³: “Es un dispositivo en el que láminas de neopreno y placas de acero se laminan alternativamente. Su rigidez horizontal es baja, pero la rigidez vertical es alta.”



3.4. Apoyos de neopreno

El dispositivo fue desarrollado en Francia en la década de 1970. A finales de los años 70 fue aplicado a edificios y centrales nucleares en Francia, Sudáfrica, Nueva Zelanda, Estados Unidos, etc. En Japón se utilizó en una casa en 1983. Después de esto, fue desarrollado en institutos técnicos de investigación de las principales empresas constructoras de Japón.

La eficacia del sistema de aislamiento de la base, aunque no en la zona gravemente afectada, se demostró en el terremoto de Hyogo-ken-nanbu.

³ CAESAR. *Meishin (Seismic Isolation) Bridges in Japan*, Japón, 2014; 266 páginas.

Conclusiones parciales

Tras haber visto las aplicaciones que este sistema ha tenido, se pretende sacar una serie de conclusiones que puedan ayudar a la visión de este sistema en un futuro:

- Se trata de un sistema que, tradicionalmente, ha sido empleado de una manera muy básica y que actualmente se ha desarrollado en gran medida la tecnología de los sistemas de aislamiento de la base. Estos sistemas siguen en constante desarrollo, hasta el punto en que se puedan llegar a aplicar a un número de edificios más elevado.
- Es un sistema que ha sido aplicado en lugares como Estados Unidos, Japón, Francia, Sudáfrica, Nueva Zelanda... Y además de ser aplicado, se ha podido comprobar su eficacia durante un sismo. Es por esto que se puede considerar un sistema completamente válido y realmente interesante.
- Se puede aplicar en rehabilitación de edificios, por lo que puede ser un sistema que ayude a adaptar edificios actualmente poco resistentes frente a sismo.
- Minimiza los daños que el sismo puede provocar en los edificios, así como el daño que puede causar a los usuarios. Este sistema puede permitir volver a la normalidad más rápido tras fuertes sacudidas.
- Su montaje es simple y puede ejecutarse más rápido, por lo que abarata los costes del proyecto.

3.2 Amortiguador de masa integrado

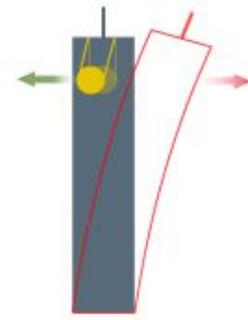
La idea principal del sistema de amortiguador de masa es la siguiente: al producirse un movimiento en el edificio, el péndulo se activa debido a éste. El movimiento relativo del péndulo produce una fuerza horizontal que se opone al movimiento del edificio.

El amortiguador de masa integrado, se demostró práctico y exitoso para edificios de gran altura, tal y como pudo comprobarse en los siguientes edificios: Citicorp Center en Nueva York y John Hancock Tower en Boston, a finales de los años 70.

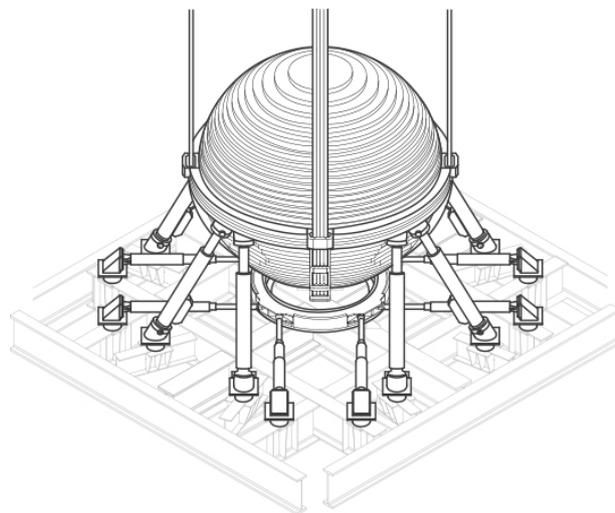
El propósito de este sistema es reducir el movimiento del edificio causado por fuertes vientos y terremotos, mejorando la incomodidad humana y resolviendo los problemas estructurales.

Según Richar Lourenco⁴: “Es el amortiguador más exitoso para edificios contra el viento, así como para contrarrestar los movimientos provocados por la actividad sísmica. Este sistema está pensado para ser aplicado en un edificio de gran altura. Se necesita una gran masa y un gran espacio para su instalación, que tendrá lugar en la planta superior del edificio, causando costes adicionales de producción y problemas de espacio.”

La aplicación del sistema a las estructuras de los edificios en Japón comenzó en las torres de observación en la década de 1980. Fue desarrollada rápidamente en edificios de gran altura en la década de 1990. Existen varios tipos de amortiguadores: pasivos, activos, semiacivos e híbridos. Actualmente, la mayoría de los edificios de gran altura terminados después de 1990 en Japón tienen un amortiguador de masas



3.5. Funcionamiento amortiguador de masa integrado



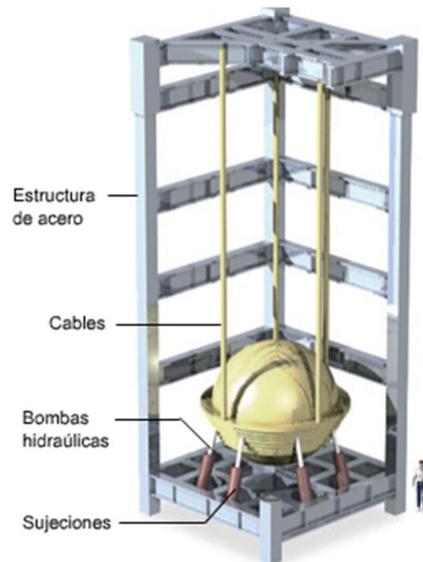
3.6. Amortiguador de masa integrado, edificio Taipei 101

⁴ LOURENCO, Richar. *Design, Construction and Testing of an Adaptive Pendulum Tuned Mass Damper*, Canadá, 2011; 125 páginas.

para disminuir el movimiento del edificio. Existe un claro ejemplo de la aplicación del amortiguador de masa integrado: el edificio *Taipei 101*, situado en Taiwan. Se trata de un rascacielos con un sistema de amortiguador de masa integrado en su parte superior, en forma de péndulo. El péndulo es de 5,5 m de diámetro y pesa 660 toneladas. Es un mecanismo para resistir las fuerzas de viento y de sismo, que puedan afectar al edificio.

El sistema funciona de la siguiente manera: al desplazarse en una dirección el edificio el péndulo se desplaza en la dirección contraria, absorbiendo la energía y limitando el movimiento de la estructura. El péndulo se encuentra suspendido por cables en el piso 92, estabilizando el edificio.

Se han realizado registros de tifones observados en los edificios con el amortiguador del péndulo, los cuales demuestran que aumenta la amortiguación del edificio de 1% a 4% y disminuye la vibración del edificio en un 50%.



3.7. Amortiguador de masa integrado, edificio Taipei 101

Conclusiones parciales

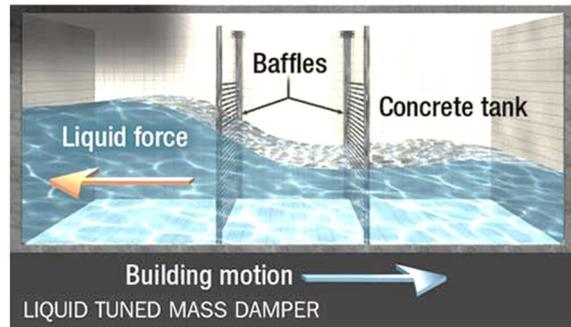
Una vez descrito el sistema de amortiguador de masa integrado, se han deducido las siguientes conclusiones:

- Es un sistema cuya eficacia frente a sismo ha sido comprobada, por lo que se trata de una solución que puede ser aplicada con total garantía de seguridad.
- Está especialmente preparado para edificios de gran altura, por lo que es una alternativa que puede tener gran aplicación en ciudades de Japón o Estados Unidos, donde hay una actividad sísmica importante y gran cantidad de rascacielos.
- La idea anterior también puede llegar a suponer una limitación, ya que para edificios de poca altura este sistema puede que no sea el más indicado. Es por esto que el campo de aplicación se reduce.

3.3 Amortiguador de líquido integrado

El amortiguador de líquido integrado es similar al concepto de aislamiento de masa, siendo el primero el que imparte una amortiguación indirecta al sistema y por lo tanto una mejora al rendimiento estructural.

Según Tadashi Nagase⁵: “Este sistema absorbe energía estructural por medio de acciones viscosas del líquido y de la rotura de la ola, lo que significa que el líquido en el contenedor rígido oscila para absorber y disipar la energía vibratoria. Principalmente la rotura de la ola en la superficie libre, conduce a la disipación.”



3.8. Funcionamiento amortiguador de líquido integrado



3.9. One Rincon, San Francisco

Este tipo de sistema ya ha sido puesto en práctica con éxito, por lo que es un sistema que, aunque se trate de un sistema innovador, podría ser usado de manera generalizada en los edificios de gran altura.

La frecuencia natural en este sistema depende solamente de la profundidad del fluido debido a que las dimensiones del tanque están fijas.

Estudio de casos

Se han escogido una serie de ejemplos en los que se ha podido comprobar la eficacia del amortiguador de líquido integrado:

- *Sea Hawk Hotel & Resort*. Un terremoto golpeó el edificio el 19 de octubre de 1996. La magnitud del terremoto fue de 7 en la escala de Richter. Los desplazamientos observados fueron entre 2,3 cm (en un extremo de la azotea) y 5,6 cm (en el otro extremo de la azotea, donde se encontraba el amortiguador de masas).

La unidad del tanque de agua de 30 toneladas se utiliza como servicio de agua del edificio y el amortiguador de masa.

⁵ NAGASE, Tadashi. *Earthquake Records Observed in Tall Buildings with Tuned Pendulum Mass Damper*, 2000; 15 páginas.

Tras el terremoto, se pudo confirmar que el amortiguador de masas puede reducir rápidamente la vibración de la torre después del choque principal del sismo.

- *Gold Tower*. Situado en Japón, donde se instalaron en el nivel 158 10 toneladas (aproximadamente el 1% del peso de la torre) de amortiguadores de líquido en 16 unidades. La respuesta estructural se ha visto mejorada entre un 50% y un 60% de la respuesta antes de disponer de la instalación del amortiguador de líquido integrado.
- *Crystal Tower*. Fue golpeado por un pequeño terremoto en septiembre de 1990. La aceleración observada en la planta superior del edificio era mucho mayor que la de la planta baja.

A partir del análisis, se concluyó que con el amortiguador de masa se puede amortiguar el movimiento lateral del edificio rápidamente después del sismo, lo cual es particularmente notable para edificios de gran altura.

El amortiguador de este tipo no necesita más masa ni espacio, por lo que es muy económico. De hecho, el costo del amortiguador es aproximadamente el 0,2% en *Crystal Tower* y 0,03% en *Sea Hawk Hotel & Resort* del coste de construcción de todo el edificio.

Conclusiones parciales

Al tratarse de un sistema similar al explicado anteriormente (amortiguador de masa integrado), algunas funciones son muy parecidas:

- Se trata de un sistema que ya ha sido aplicado en varios edificios, en el que ha podido comprobarse su eficacia. Por lo tanto, es un sistema seguro frente a sismo.
- Está especialmente preparado para edificios de gran altura, por lo que el campo de aplicación se reduce a estos. No está pensado para aplicar este sistema de manera generalizada.
- Presenta una ventaja frente al amortiguador de masa integrado: no necesita más masa ni espacio, por lo que es muy económico. Esta puede ser la razón por la que el sistema de amortiguador de líquido integrado sea más recomendable.

Conclusiones

Una vez concluido el análisis y correlación de toda la información reunida en el desarrollo del trabajo, y tras la oportuna discusión de los resultados y de las conclusiones parciales obtenidas, se pueden extraer las siguientes conclusiones principales:

- *Normativas más restrictivas debido a la experiencia.* La Normativa de Japón es la más desarrollada hasta el momento, debido a su experiencia y a la gran actividad sísmica que sufre. Esto ocurre también con la Normativa de Estados Unidos, donde han tenido lugar terremotos de gran relevancia y esto puede verse reflejado en las restricciones que exige su normativa.

En el caso de España, es cierto que la normativa es menos restrictiva, aunque es algo que debe ir en relación con los riesgos reales de que pueda llegar a ocurrir una catástrofe. España es un país con una baja actividad sísmica, concentrada principalmente en la zona sur-este, y puntualmente en otras zonas de España.

Es por esto que realmente no merece la pena invertir el dinero en que todos los edificios sean completamente resistentes frente a sismos, como pueden serlo en lugares como Japón o Estados Unidos.

- *Escaso cumplimiento de la normativa en los edificios afectados.* En el análisis de las lecciones aprendidas de terremotos pasados se ha podido comprobar la falta de cumplimiento de la normativa en los edificios que han sufrido daños o han llegado a colapsar.

Es por esto que se puede pensar que, si realmente todos los edificios cumplieran con la normativa sísmica de manera estricta, los daños hubieran sido mucho menores.

Con un cumplimiento más estricto de la normativa, se podrían llegar a minimizar los daños y a conseguir una mayor ductilidad en los edificios. Esto supondría un mayor comportamiento frente a sismo, y por lo tanto conseguir edificios mucho más seguros frente a las sacudidas de un terremoto.

Lo que ha ocurrido en muchos de los casos es que algunos edificios son antiguos, que en su momento puede que cumplieran la normativa vigente, pero

ésta con el paso de los años se ha actualizado siendo cada vez más estricta, y actualmente no cumplen la normativa.

Por ello, resulta importante desarrollar técnicas que faciliten la rehabilitación de edificios para aproximarlos al cumplimiento de las normativas.

- *Aplicación de los sistemas de innovación.* Los sistemas de innovación estudiados pueden suponer un gran cambio en la construcción de edificios resistentes frente a sismos. Por ello, es importante qué posibles aplicaciones pueden tener en un futuro.

El sistema de aislamiento de la base ya ha sido utilizado con éxito en lugares como Estados Unidos, Japón, Francia, Sudáfrica o Nueva Zelanda. Puede ser empleado de manera generalizada, para todo tipo de edificios, lo cual es un punto importante a su favor.

Dicho sistema puede aplicarse en rehabilitación de edificios, por lo que puede ser un sistema que ayude a adaptar edificios que actualmente no cumplan con la normativa sísmica.

Los sistemas de amortiguador de masa integrado o de líquido integrado están pensados para edificios en altura, así que su campo de aplicación es más reducido.

Deben emplearse cada vez sistemas más innovadores en zonas con alta actividad sísmica, ya que se ha podido comprobar la eficacia de muchos de ellos en situaciones reales frente a sismo, además de que muchos de ellos consiguen reducir los costes de la construcción de edificios resistentes frente a sismos.

Bibliografía

- ATC-20-1. *Field Manual: Postearthquake Safety Evaluation of Buildings*, 2005; 85 páginas.
- ATC-40. *Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings. Basic Procedures Manual*, Federal Emergency Agency, 1999; 104 páginas.
- CAESAR. *Meishin (Seismic Isolation) Bridges in Japan*, Japón, 2014; 266 páginas.
- CARREÑO, Martha. *Comportamiento Sísmico de los Edificios en Lorca*, Barcelona: Electa, 2012; 26 páginas.
- FEMA-274. *NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, 1997; 273 páginas.
- FEMA-506. *Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings. Basic Procedures Manual*, Federal Emergency Agency, 1999; 104 páginas.
- INGV. *Secondo Rapporto di Sintesi sul Terremoto di Amatrice ML 6.0 del 24 agosto (Italia Centrale)*, 2016; 33 páginas.
- ISHIYAMA, Yuji. *Guidelines for Earthquake Resistant Non-Engineered Construction*, 2012; 145 páginas.
- ISHIYAMA, Yuji. *Introduction to Earthquake Engineering and Seismic Codes in the World*, 2011; 115 páginas.
- KATAYAMA, Tsuneo. *Earthquake disaster risk mitigation before and after the 1995 Kobe earthquake*, Canadá, 2004; 21 páginas.
- LOURENCO, Richar. *Design, Construction and Testing of an Adaptive Pendulum Tuned Mass Damper*, Canadá, 2011; 125 páginas.
- MINISTERIO DE FOMENTO. *EAE Instrucción de Acero Estructural*, España, 2011; 74 páginas.
- MINISTERIO DE FOMENTO. *EAE Instrucción de Hormigón Estructural*, España, 2008; 85 páginas.
- MINISTERIO DE FOMENTO. *Norma de Construcción Sismorresistente: Parte general y edificación (NCSE-02)*, España, 2003; 96 páginas.
- MINISTERIO DE FOMENTO. *Norma de Construcción Sismorresistente: Puentes (NCSP-07)*, España, 2008; 136 páginas.
- MINISTERIO DE LA VIVIENDA. *Código Técnico de la Edificación. Documento Básico Seguridad Estructural: Acciones en la edificación*, España, 2009; 67 páginas.
- MUSSON, R. M.W. *Global Historical Earthquake Archive and Catalogue (1000-1903)*, 2013; 202 páginas.

- NAGASE, Tadashi. *Earthquake Records Observed in Tall Buildings with Tuned Pendulum Mass Damper*, 2000; 15 páginas.
- PETRINA, Bogdan. *Seismic Isolating Systems classification, properties and utilization*, 2011; 15 páginas.
- RODRIGUEZ, Raúl. *El terremoto de Lorca: efectos en los edificios*, Madrid: Nilo Industria Gráfica, 2012; 233 páginas.
- SALCEDO, José Carlos. *Experiencias constructivas del terremoto de Lorca*, Alicante, 2012; 32 páginas.
- ZIMMARO, Paolo. *Engineering Reconnaissance Following the October 2016 Central Italy Earthquakes*, 2017; 323 páginas.

Procedencia de las ilustraciones

INTRODUCCIÓN

Fenómeno físico.

- o.1. Fuerza de inercia. Tomado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002290/229059e.pdf>; consultado el 26/05/2017.

Efectos.

- o.2. West Java, Indonesia, 2009. Tomado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002290/229059e.pdf>; consultado el 26/05/2017. Imagen retocada.
- o.3. Nias, Indonesia, 2005. Tomado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002290/229059e.pdf>; consultado el 26/05/2017. Imagen retocada.
- o.4. Great East Japan, 2011. Tomado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002290/229059e.pdf>; consultado el 26/05/2017. Imagen retocada.
- o.5. West Sumatra, Indonesia, 2009. Tomado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002290/229059e.pdf>; consultado el 26/05/2017. Imagen retocada.

Actividad sísmica.

- o.6. Terremoto de San Francisco, 1906. Tomado de <https://www.wired.com/2008/11/gallery-deadly-earthquake/>; consultado el 30/05/2017. Imagen retocada.
- o.7. Terremoto de Long Beach, California, 1933. Tomado de <https://www.wired.com/2008/11/gallery-deadly-earthquake/>; consultado el 30/05/2017. Imagen retocada.
- o.8. Terremoto de Alaska, 1964. Tomado de <https://www.wired.com/2008/11/gallery-deadly-earthquake/>; consultado el 30/05/2017. Imagen retocada.
- o.9. Terremoto de México, 1985. Tomado de <http://www.yaonic.com/musica-y-temblor-a-31-anos-del-terremoto-de-1985/>; consultado el 30/05/2017. Imagen retocada.
- o.10. Terremoto de Kobe, 1995. Tomado de <https://japonenunatazadete.wordpress.com/2008/02/20/terremotos-2/>; consultado el 30/05/2017. Imagen retocada.
- o.11. Terremoto de Messina. Italia, 1908. Tomado de <http://scirokko.it/28-dicembre-1908-un-destino-si-compie/>; consultado el 30/05/2017. Imagen retocada.
- o.12. Terremoto de Lorca, España, 2011. Tomado de <http://www.lavozdegalicia.es/noticia/espana/2015/02/23/terremoto-escala-5-albacete/00031424708838313485703.htm>; consultado el 30/05/2017. Imagen retocada.
- o.13. Terremoto de Amatrice, Italia, 2016. Tomado de http://www.lespanol.com/mundo/europa/20160824/150235971_o.html; consultado el 30/05/2017. Imagen retocada.

1 ANÁLISIS DE CONDICIONANTES CONSTRUCTIVOS DERIVADOS DE LA NORMATIVA SÍSMICA

Análisis de condicionantes constructivos de cimentación.

- 1.1. Elementos de atado. Tomado de <https://www.fomento.gob.es/MFOM.CP.Web/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=BN0222>; consultado el 01/06/2017.

- 1.1. Elementos de atado. Tomado de <https://www.fomento.gob.es/MFOM.CP.Web/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=BN0222>; consultado el 01/06/2017.
- 1.2. Muros bajos. Tomado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002290/229059e.pdf>; consultado el 01/06/2017.

Análisis de condicionantes constructivos de hormigón armado.

- 1.3. Viga de hormigón armado, según Normativa Sismorresistente en España. Tomado de <https://www.fomento.gob.es/MFOM.CP.Web/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=BN0222>; consultado el 01/06/2017.
- 1.4. Disposición armaduras de un pilar, según Normativa en EEUU. Tomado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002290/229059e.pdf>; consultado el 01/06/2017.
- 1.5. Disposición armaduras de un pilar, según Normativa en España. Tomado de <https://www.fomento.gob.es/MFOM.CP.Web/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=BN0222>; consultado el 01/06/2017.
- 1.6. Detalle armadura pilar en espiral, según Normativa en EEUU. Tomado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002290/229059e.pdf>; consultado el 01/06/2017.
- 1.7. Detalle forjado, según Normativa Sismorresistente en España. Tomado de <https://www.fomento.gob.es/MFOM.CP.Web/handlers/pdfhandler.ashx?idpub=BN0222>; consultado el 01/06/2017.

Análisis de condicionantes constructivos metálicos.

- 1.8. Detalle soldadura, según Normativa en EEUU. Tomado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002290/229059e.pdf>; consultado el 01/06/2017.
- 1.9. Detalle unión atornillada, según Normativa en EEUU. Tomado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002290/229059e.pdf>; consultado el 01/06/2017.

Análisis de condicionantes constructivos de fábrica resistente.

- 1.10. Disposición de los huecos en un muro de fábrica resistente, según Normativa en EEUU. Tomado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002290/229059e.pdf>; consultado el 01/06/2017.
- 1.11. Detalle refuerzos en fábrica resistente, según Normativa en EEUU. Tomado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002290/229059e.pdf>; consultado el 01/06/2017.

2 LECCIONES APRENDIDAS DE TERREMOTOS PASADOS

Terremoto de Lorca.

- 2.1. Gráfica de la aceleración del terreno durante el terremoto de Lorca. Tomado de http://es.groupmekanosteel.com/PERSONAL/LORCA/Libro_terremoto_Lorca.pdf; consultado el 03/06/2017.
- 2.2. Pilares cortos. Tomado de http://es.groupmekanosteel.com/PERSONAL/LORCA/Libro_terremoto_Lorca.pdf; consultado el 03/06/2017.
- 2.3. Disposición de pilares cortos. Tomado de http://es.groupmekanosteel.com/PERSONAL/LORCA/Libro_terremoto_Lorca.pdf; consultado el 03/06/2017.
- 2.4. Deformación del forjado (falta de capa de compresión). Tomado de http://es.groupmekanosteel.com/PERSONAL/LORCA/Libro_terremoto_Lorca.pdf; consultado el 03/06/2017.

- 2.5. Unión de viga metálica con pilar de hormigón. Tomado de http://es.gro upmekanosteel.com/PERSONAL/LORCA/Libro_terremoto_Lorca .pdf; consultado el 03/06/2017. Imagen retocada.
- 2.6. Sobrecarga debida a la colocación de un depósito no previsto. Tomado de http://es.gro upmekanosteel.com/PERSONAL/LORCA/Libro_terremoto_Lorca .pdf; consultado el 03/06/2017. Imagen retocada.
- 2.7. Giro de la cimentación. Tomado de http://es.gro upmekanosteel.com/PERSONAL/LORCA/Libro_terremoto_Lorca .pdf; consultado el 03/06/2017.
- 2.8. Comportamiento de un edificio normal y comportamiento de un edificio con planta blanda. Tomado de http://es.gro upmekanosteel.com/PERSONAL/LORCA/Libro_terremoto_Lorca .pdf; consultado el 03/06/2017.
- 2.9. Choque entre edificios. Tomado de http://es.gro upmekanosteel.com/PERSONAL/LORCA/Libro_terremoto_Lorca .pdf; consultado el 03/06/2017.
- 2.10. Fallo en la estructura resistente de la escalera. Tomado de http://es.gro upmekanosteel.com/PERSONAL/LORCA/Libro_terremoto_Lorca .pdf; consultado el 03/06/2017. Imagen retocada.
- 2.11. Recubrimiento escaso de hormigón. Tomado de http://es.gro upmekanosteel.com/PERSONAL/LORCA/Libro_terremoto_Lorca .pdf; consultado el 03/06/2017. Imagen retocada.
- 2.12. Solape de los estribos. Tomado de http://es.gro upmekanosteel.com/PERSONAL/LORCA/Libro_terremoto_Lorca .pdf; consultado el 03/06/2017.
- 2.13. Defectos de ejecución del solape de los edificios. Tomado de http://es.gro upmekanosteel.com/PERSONAL/LORCA/Libro_terremoto_Lorca .pdf; consultado el 03/06/2017. Imagen retocada.
- 2.14. Una de las víctimas, aplastada tras el derrumbe de una fachada. Tomado de http://www.huffingtonpost.es/2014/01/21/lorca-estres-terremoto_n_4636299.html; consultado el 03/06/2017. Imagen retocada.

Terremoto de Amatrice.

- 2.15. Daños en paños de relleno. Tomado de http://www.geerassociation.org/administrator/components/com_geer_reports/geerfiles/GEER_2017_Report_Ver_2.pdf; consultado el 05/06/2017. Imagen retocada.
- 2.16. Unión viga - pilar. Tomado de http://www.geerassociation.org/administrator/components/com_geer_reports/geerfiles/GEER_2017_Report_Ver_2.pdf; consultado el 05/06/2017. Imagen retocada.
- 2.17. Grietas diagonales en muros de fábrica resistente. Tomado de http://www.geerassociation.org/administrator/components/com_geer_reports/geerfiles/GEER_2017_Report_Ver_2.pdf; consultado el 05/06/2017. Imagen retocada.
- 2.18. Daños menores tras una primera sacudida. Tomado de http://www.geerassociation.org/administrator/components/com_geer_reports/geerfiles/GEER_2017_Report_Ver_2.pdf; consultado el 05/06/2017. Imagen retocada.
- 2.19. Colapso parcial tras una segunda sacudida. Tomado de http://www.geerassociation.org/administrator/components/com_geer_reports/geerfiles/GEER_2017_Report_Ver_2.pdf; consultado el 05/06/2017. Imagen retocada.
- 2.20. Campanario de Amatrice. Tomado de http://www.lespanol.com/mundo/europa/20160824/150235971_o.html; consultado el 30/05/2017. Imagen retocada.

Terremoto de Kobe.

- 2.21. Daños en paños de relleno. Tomado de <https://japonenunatazadete.wordpress.com/2008/02/20/terremotos-2/>; consultado el 30/05/2017. Imagen retocada.
- 2.22. Secciones en pilares, en función de los fallos. Tomado de [http://www.pci.org/uploadedFiles/Site root/Publications/PCI_Journal/1995/DOI_Articles/jl-95-july-august-4.pdf](http://www.pci.org/uploadedFiles/Site%20root/Publications/PCI_Journal/1995/DOI_Articles/jl-95-july-august-4.pdf); consultado el 28/05/2017.
- 2.23. Uniones, en función de los fallos. Tomado de [http://www.pci.org/uploadedFiles/Site root/Publications/PCI_Journal/1995/DOI_Articles/jl-95-july-august-4.pdf](http://www.pci.org/uploadedFiles/Site%20root/Publications/PCI_Journal/1995/DOI_Articles/jl-95-july-august-4.pdf); consultado el 28/05/2017.
- 2.24. Arriostramiento, en función de los fallos. Tomado de [http://www.pci.org/uploadedFiles/Site root/Publications/PCI_Journal/1995/DOI_Articles/jl-95-july-august-4.pdf](http://www.pci.org/uploadedFiles/Site%20root/Publications/PCI_Journal/1995/DOI_Articles/jl-95-july-august-4.pdf); consultado el 28/05/2017.

3 INNOVACIÓN

Sistema de aislamiento de la base.

- 3.1. Sin sistema de aislamiento de la base / Con sistema de aislamiento de la base. Tomado de ftp://ceres.udc.es/Doctorado/Estructuras2/analisis_no_lineal/proceso_constructivo_pushover_dinamico/varios/Aislamiento_de_la_base.pdf; consultado el 03/06/2017.
- 3.2. Aislamiento de la base tradicional (Sukabumi, Indonesia). Tomado de <http://iisee.kenken.go.jp/net/members/iaee/NonEngMainA4Er.pdf>; consultado el 03/06/2017. Imagen retocada.
- 3.3. Sistema de péndulo de fricción. Tomado de <https://www.bpa.gov/news/newsroom/Pages/BPAs-ground-shaking-research-could-better-protect-power-transformers-in-quake.aspx>; consultado el 03/06/2017. Imagen retocada.
- 3.4. Apoyos de neopreno. Tomado de https://www.researchgate.net/figure/230260632_fig2_Figure-2-Shear-compression-test-of-1-scale-laminated-rubber-bearing-8; consultado el 03/06/2017. Imagen retocada.

Amortiguador de masa integrado.

- 3.5. Funcionamiento amortiguador de masa integrado. Tomado de <http://documents.tips/documents/taipei-55ef413e52445.html>; consultado el 04/06/2017.
- 3.6. Amortiguador de masa integrado, edificio Taipei 101. Tomado de <http://www.taipei-101.com.tw/en/index.aspx>; consultado el 04/06/2017.
- 3.7. Amortiguador de masa integrado, edificio Taipei 101. Tomado de <http://www.taipei-101.com.tw/en/index.aspx>; consultado el 04/06/2017. Imagen retocada.

Amortiguador de líquido integrado.

- 3.8. Funcionamiento amortiguador de líquido integrado. Tomado de <https://www.ukessays.com/essays/engineering/the-technologys-advances-modern-civil-engineering-engineering-essay.php>; consultado el 04/06/2017. Imagen retocada.
- 3.9. One Rincon, San Francisco. Tomado de <https://www.ukessays.com/essays/engineering/the-technologys-advances-modern-civil-engineering-engineering-essay.php>; consultado el 04/06/2017. Imagen retocada.