



Construcciones antisísmicas y sismorresistentes. Principios de funcionamiento y análisis de los aciertos y falencias de los modelos analógicos usados en la enseñanza

ANTI-SEISMIC AND EARTHQUAKE-RESISTANT STRUCTURES. HOW THEY WORK AND DISCUSSION ABOUT THE SUCCESSES AND FAILURES OF THE RELATED EDUCATIONAL ANALOG MODELS

JOSÉ SELLÉS-MARTÍNEZ

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS GEOLÓGICAS, FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS, UNIVERSIDADE DE BUENOS AIRES, BUENOS AIRES, ARGENTINA.

E-MAIL: PEPE@GL.FCEN.UBA.AR

Abstract: This contribution outlines the elementary physical concepts related to seismic waves and how they affect the terrain and the constructions built on it as a function of the displacements related to the seismic shake. The main strategies developed in anti-seismic construction (distributed throughout the building) and seismic-resistant design systems (placed in strategic points) developed to minimize the effects of earthquakes are presented. These strategies may be based on one or more of the following techniques: reinforcement of the structure, damping of displacements, dissipation of seismic energy, mechanical isolation of the structure from the substrate. A set of models and activities that are simple to assemble and carry out, of low cost and which allow visualization of how those strategies and systems work are afterwards described. A discussion of the strengths and weaknesses of each model is incorporated.

Resumen: Se reseñan los conceptos físicos elementales acerca de las ondas sísmicas y cómo las mismas afectan al terreno y a las construcciones asentadas en él en función de los desplazamientos que tienen lugar. Se presentan las principales estrategias desarrolladas en la construcción antisísmica (distribuida en todo el edificio) y también los sistemas de diseños sismorresistentes (colocados en puntos estratégicos) para minimizar los efectos de los sismos utilizando alguna o varias de las siguientes opciones: refuerzo de la estructura, amortiguación de los desplazamientos, disipación de la energía sísmica, aislamiento mecánico de la construcción con relación al sustrato. Finalmente, se describe una serie de modelos y actividades, sencillos de montar y realizar y de bajo costo, que permiten visualizar cómo funcionan las estrategias y sistemas mencionados. En todos los casos se incluye una discusión acerca de los aciertos y falencias que cada modelo presenta.

Citation/Citação: Sellés-Martínez, J. (2021). Construcciones antisísmicas y sismorresistentes. Principios de funcionamiento y análisis de los aciertos y falencias de los modelos analógicos usados en la enseñanza. *Terraè Didática*, 17(Publ. Continua), 1-15, e021022. doi: 10.20396/td.v17i00.8665273.

Keywords: Earth Sciences Teaching, Earthquakes, Seismic hazards, Analog Models.

Palabras clave: Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, Terremotos, Riesgo sísmico, Modelos analógicos.

Manuscript/Manuscrito:

Received/Recebido: 15/04/2021

Revised/Corrigido: 16/05/2021

Accepted/Aceito: 13/06/2021



Introducción

Un enfoque contemporáneo de la enseñanza de las ciencias de la Tierra implica poner de manifiesto tanto su relación con otras disciplinas científicas (física, química, etc.) como los aspectos que las vinculan con la sociedad. El caso de los riesgos naturales de origen geológico es paradigmático a este respecto, ya que no sólo importan las causas y mecanismos de los procesos geológicos que constituyen peligros, sino que es también de fundamental importancia establecer tanto la forma en que estos peligros afectan vidas y bienes como el modo en que pueden ser previstos, prevenidos y mitigados. El uso de modelos didácticos, que facilitan la comprensión de conceptos, procesos o dispositivos que, por razones de escala y/o de complejidad, no

pueden ser abordados en forma directa, es una herramienta de invaluable valor pedagógico que debería estar siempre presente en el desarrollo de estos temas, pero su uso no puede ser ingenuo, sino que deben tenerse en cuenta sus limitaciones para evitar malos entendidos en quienes aprenden. En una contribución previa (Sellés-Martínez, 2020a), el autor analiza los modelos didácticos asociados con las causas de los terremotos y con la forma en que la energía liberada por estos se propaga a través de los materiales, en esta presentación se hará lo propio con los modelos que se utilizan para amortiguar los efectos de los sismos en las estructuras de edificios, comentando tanto aquello que los modelos muestran adecuadamente como sus limitaciones y los posibles errores a los que estas pueden inducir.

En la primera parte se analizan las características de las ondas sísmicas que afectan a las construcciones, en qué modo cada una de ellas actúa sobre las partículas del suelo y como interactúa éste con dichas construcciones, de modo de mejor entender las estrategias de protección. Se definen algunos términos que hacen a la comprensión de las estrategias de abordaje del problema y de los diferentes dispositivos creados, algunos de los cuales serán analizados a continuación en su formato de modelos didácticos. Se ha considerado conveniente incluir una breve revisión de las estrategias “históricas” de construcción antisísmica o sismo-resistente previas al desarrollo de las estrategias constructivas y los dispositivos actuales con el propósito de poner de relieve cuáles son las características que deben reunir las construcciones para soportar, con el menor daño posible, el paso de las ondas sísmicas. Luego de desarrollar el tema central de la contribución, el análisis de los modelos, se presentan y comentan algunos recursos disponibles en la Internet, para concluir con algunas reflexiones respecto a la importancia de la enseñanza de los métodos de construcción antisísmica como parte de la educación ciudadana para la prevención y la resiliencia frente a un evento sísmico.

Las ondas sísmicas y sus efectos en el terreno

La bibliografía disponible sobre el tema es muy amplia, tanto a nivel de libros técnicos como de texto y también en trabajos de índole académica publicada en revistas dedicadas a la Geología y la Geofísica y a su enseñanza. Entre las contribuciones más recientes en lengua castellana dirigidas al área de la enseñanza pueden destacarse: los artículos incluidos en los volúmenes monográficos de la revista *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* 13 (1) del año 2005 dedicado a los tsunamis y 19 (3) del año 2011, dedicado a los terremotos y los trabajos más recientes de Morcillo Ortega et al. (2006), González & Juan (2008), González et al. (2010), Silva & Rodríguez-Pascua (2018), Peláez et al. (2018), como así también Sellés-Martínez & Bonán (2000) y Sellés-Martínez (2020b).

En principio debe señalarse que la llegada “del sismo” a un determinado punto está constituida, en realidad, por la llegada de un conjunto de ondas con diferentes características que, además, no lo hacen en forma sincrónica. Las características y

los efectos de cada tipo de ondas son diferentes, pudiendo separárselas en a) *ondas de cuerpo*, originadas en el foco sísmico (ondas **P** y **S**), que son las primeras en llegar y b) *ondas de superficie*, originadas como consecuencia del cambio en las propiedades mecánicas del suelo y la atmósfera (Ondas **Raleigh** y **Love**), se desplazan a menor velocidad que las ondas P y S, llegan luego que ellas y son las de mayor poder destructivo.

Desplazamientos debidos a las ondas de cuerpo

Las ondas P son las primeras en llegar. Se trata de ondas de presión, en las que el movimiento de las partículas se realiza en la misma dirección de propagación de la onda y genera espacios de “rarefacción” y de “compresión” de las partículas del terreno. Contrariamente a lo que se representa en la mayoría de los esquemas incluidos en los artículos de divulgación referidos a los efectos de las ondas sísmicas en el terreno, las ondas P no se desplazan paralelamente a la superficie terrestre sino que llegan a esta con ángulos elevados, siendo perpendiculares en el epicentro. Es importante recordar que el movimiento de las partículas al paso de las ondas P es imperceptible en un material confinado, como es el caso de su transmisión en el interior de la corteza. Esto se demuestra con la experiencia de transmisión del impulso a través de una hilera de bolas inelásticas (véase por ej. Sellés-Martínez, 2011, 2020), en la que se ve claramente que los únicos elementos que sufren un desplazamiento macroscópico son la primera bola (que origina la perturbación) y la última, dado que a continuación de ella sólo hay aire y éste no opone resistencia a su movimiento. El desplazamiento macroscópico del terreno debido a la incidencia de las ondas P sólo se produce en las áreas muy cercanas al hipocentro en el caso de sismos no demasiado profundos, dado que la amplitud de estas ondas se atenúa rápidamente con la distancia al foco y en general se expresa como un movimiento de ascenso y descenso leve del terreno.

Las ondas S llegan en segundo lugar. Son ondas de corte, que imprimen movimientos laterales a las partículas desplazándolas en sentido perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Las vibraciones están contenidas en un plano de polarización que puede tener cualquier inclinación, pero es siempre paralelo a la dirección de propagación de

la onda y habitualmente las ondas S se desdoblan para su análisis en una componente vertical (S_v) y una componente horizontal (S_h). Como en el caso de las ondas P alcanzan la superficie terrestre con una dirección de propagación muy oblicua al plano horizontal. Los esquemas a y b de la Figura 1 ilustran los comportamientos descriptos.

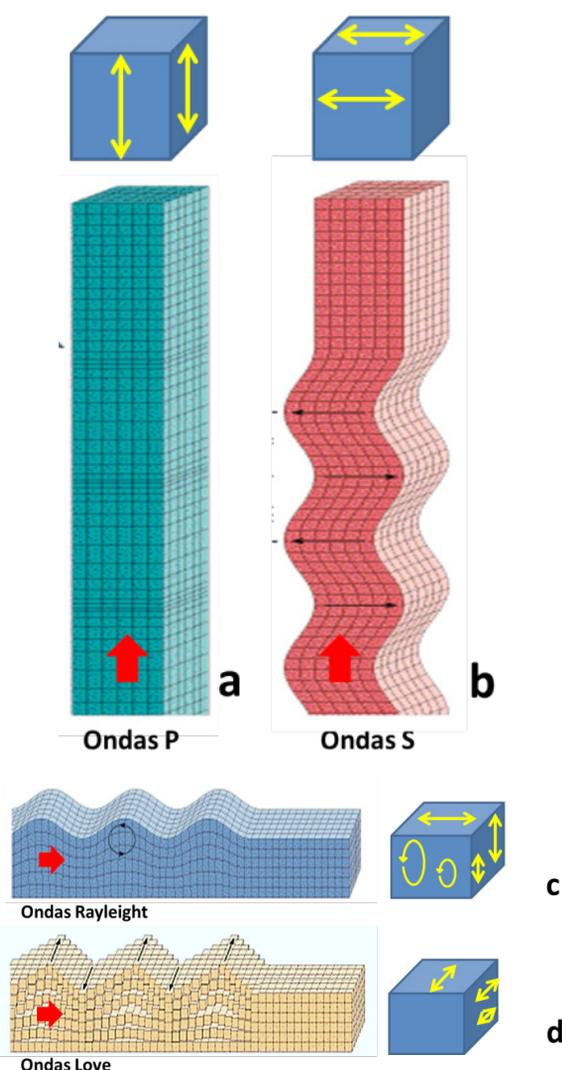


Figura 1. Desplazamientos de las partículas en la porción más somera del material bajo la superficie al paso de las ondas de cuerpo. Las flechas rojas señalan la dirección de propagación de las ondas (muy oblicuas a la superficie en el caso de ondas P y S, subparalelas en el caso de las R y L) y las flechas amarillas la trayectoria de la oscilación de las partículas del suelo para cada tipo de onda. Debe tenerse en cuenta que el desplazamiento real de las partículas del suelo es el resultado de la suma de los efectos de todas las ondas que la alcanzan en un determinado momento

Desplazamientos debidos a las ondas superficiales

Contrariamente a las ondas P y S, las superficiales no se generan en el foco del terremoto sino que, como se ha adelantado, surgen como respuesta de los terrenos superficiales al impulso energético proporcionado por las ondas de cuerpo, dando lugar a nuevas ondas de carácter más complejo, que imprimen al terreno desplazamientos macroscópicos que resultan más peligrosos para la estabilidad de los edificios que los causados por las ondas P y S. Las ondas Rayleigh y Love se propagan paralelamente a la superficie. En la figura 1c se ilustra la acción de las ondas Rayleigh, en las que las partículas se acercan y se alejan entre sí, pero en su desplazamiento macroscópico no recorren una trayectoria rectilínea microscópica, sino que describen un círculo cuyo radio es macroscópico. En la figura 1d se representa el desplazamiento asociado a las ondas Love, que causan el desplazamiento lateral de las partículas, pero las más cercanas a la superficie lo hacen en mayor grado que las que se encuentran a mayor profundidad. La diferencia entre el efecto de estas ondas y el de las ondas S_h es que ya no se trata de oscilaciones a nivel microscópico sino de desplazamientos macroscópicos.

En Universidad de Alicante (2021) se muestran animaciones del movimiento de las partículas en cada caso. Es importante recalcar que el conjunto de ondas no llega simultáneamente a un determinado punto, sino que una estructura en particular vibrará primero como consecuencia de la llegada de las ondas P, poco tiempo después lo hará por la llegada de las ondas S y luego sufrirá desplazamientos más importantes vinculados a las ondas Rayleigh y Love, que son las que pueden producir más daño, tanto en el terreno como en las construcciones.

Efectos de las ondas en las estructuras construidas

La llegada de las ondas sísmicas a una construcción somete a la misma a una serie de esfuerzos originados por el desplazamiento brusco de sus cimientos, que son solidarios con los desplazamientos que sufre el suelo. Las construcciones, que en ausencia del impulso sísmico se encuentran “en reposo”, al ser afectadas por las vibraciones provenientes del suelo responden generando sus propias vibraciones. Su “frecuencia natural de

Tabla 1. Definiciones de algunos términos utilizados en el artículo

Concepto	Descripción	Observaciones
<i>Oscilación</i>	Es el movimiento repetido de un lado a otro en torno a una posición central de equilibrio	Corresponde a un cambio de posición del sistema Ejemplo: el rolido de una embarcación o el movimiento en una mecedora
<i>Movimiento periódico</i>	Es aquél que se repite cíclicamente	El período de tiempo empleado en cada ciclo es siempre el mismo
<i>Armónico</i>	Es un movimiento periódico cuya representación geométrica es una senoide	Ejemplo: el movimiento de un péndulo
<i>Vibración</i>	Es la deformación periódica de un sistema mecánico	Corresponde a una deformación introducida en el sistema
<i>Vibración libre</i>	Es la resultante de separar un sistema de su posición de equilibrio y liberarlo	Ejemplo: un trampolín luego del salto, una campana que ha sido tañida
<i>Frecuencia</i>	Es la cantidad de veces que algo ocurre en un determinado período de tiempo La frecuencia es la inversa del período	La cantidad de veces que un sismo de una determinada intensidad ha ocurrido a lo largo de un siglo
<i>Período</i>	Es el tiempo que transcurre entre dos eventos similares El período es la inversa de la frecuencia	El período de recurrencia de un sismo de intensidad determinada en un cierto contexto geológico
<i>Frecuencia natural</i>	Es la frecuencia a la que vibra un sistema bajo vibración libre	
	Sistemas simples	Tienen una única frecuencia natural Ejemplo: el diapasón que usan los músicos
	Sistemas complejos	Tienen varias frecuencias naturales de vibración
<i>Resonancia</i>	Se produce cuando a un sistema que está vibrando en su frecuencia natural se le aplica, periódicamente, una fuerza externa con una frecuencia igual o muy próxima a ella.	Resulta en un importante aumento de la amplitud de las oscilaciones Ejemplo: el empuje reiterado a un niño en una hamaca o columpio hace que su desplazamiento aumente
<i>Amortiguación</i>	Es el fenómeno natural o inducido por el cual la amplitud de las oscilaciones de un sistema disminuye con el tiempo	Ejemplo: la disipación de energía en forma de calor
<i>Inercia</i>	Es la propiedad de permanecer en un determinado estado, ya sea reposo o movimiento	Ejemplo: al frenar bruscamente un vehículo la inercia hace que sus ocupantes se desplacen hacia adelante

vibración” está vinculada a sus materiales, dimensiones y diseño. En la Tabla 1 se presentan algunas definiciones de interés para la comprensión de los conceptos involucrados en la respuesta de las estructuras al paso de las ondas sísmicas y en los diseños sismorresistentes y antisísmicos.

Las fuerzas originadas sobre las estructuras son proporcionales a la aceleración (que es función de la energía transportada por las ondas) y al peso del edificio. El vector fuerza puede tener

cualquier orientación en el espacio pero, para dar mayor sencillez a las interpretaciones se lo disocia en una componente horizontal y otra vertical. Las componentes verticales, salvo casos muy especiales, suelen ser bastante menores que las horizontales y su acción puede compararse con los efectos del arranque y la detención de un ascensor en forma brusca, que produce la sensación de que el cuerpo se estira y se contrae en la vertical. Los movimientos horizontales se asemejarían a una

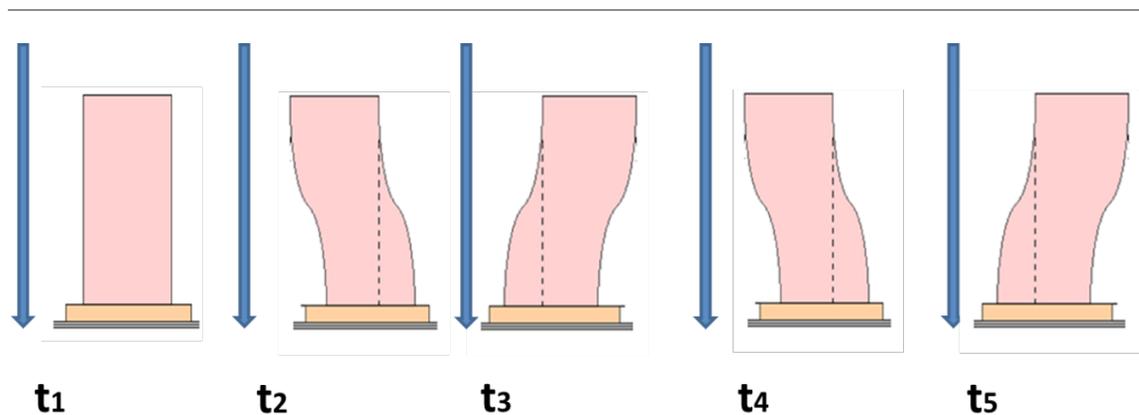


Figura 2. La inercia hace que la parte superior del edificio se demore en desplazarse con respecto a la parte inferior, que se mueve solidariamente con el suelo. En t1 el edificio se encuentra en reposo; en t2 su base es desplazada hacia la derecha de la figura mientras el techo permanece aún en reposo; en t3 la base ha invertido la dirección de desplazamiento mientras el techo aún está desplazándose hacia la derecha. La situación se repite en forma simétrica en t4 y t5

secuencia de aceleraciones y detenciones bruscas de un automóvil, que producen reiteradas desviaciones del cuerpo desde la vertical hacia adelante y hacia atrás. En aquellos edificios cuyo centro de masa está alejado de su eje de simetría se desarrollan esfuerzos de torsión que pueden resultar fatales para la estructura, por lo que es un factor que se trata de minimizar al máximo en el diseño sismorresistente. Esta situación puede equiparse con lo que ocurre en un vehículo de transporte público cuando una persona que viaja de pie está tomada de un pasamanos algo alejado. Cuando el vehículo acelera o frena, la persona es inducida a girar alrededor del punto de sujeción, generándose esfuerzos de torsión.

La existencia de numerosos pisos en las construcciones supone la existencia de vigas transversales y la aparición de nodos en las uniones de vigas y columnas. Esto hace que aparezcan frecuencias de vibración para cada conjunto de alturas (un piso, dos pisos, tres pisos), frecuencias que se superponen y fuerzan aún más la estructura, ya que el edificio vibra simultáneamente con diferentes longitudes de onda y períodos.

La inercia, en este caso la resistencia a abandonar la posición de reposo, hace que la parte superior del edificio no se mueva sincrónicamente con la base, que es la que primero se desplaza, ya que el sistema de cimientos hace que lo haga solidariamente con el suelo. Esto genera un patrón complejo de desplazamientos laterales de unos niveles con respecto a otros y que aumentan los esfuerzos de corte sobre las columnas del edificio. En la figura 2 se ilustra esta situación en forma muy simplificada.

Las construcciones sismorresistentes y los dispositivos antisísmicos

La resistencia del edificio frente al impulso sísmico está condicionada por *razones geométricas* (forma, dimensiones y proporciones); por *las propiedades mecánicas de los materiales* (elasticidad, resistencia a la tracción y al corte) y por *las técnicas constructivas* utilizadas (la disposición de los materiales y elementos en la estructura). En las áreas en las que la actividad sísmica es frecuente, la arquitectura tradicional desarrolló, por el proceso intuitivo de “prueba y error”, estrategias de construcción que optimizan el uso de los materiales naturales disponibles (rocas, tierra, troncos, cañas, etc.). Entre estas estrategias que mejoran la respuesta de los edificios se destaca el uso combinado de ladrillos, mampuestos o adobes, con elementos vegetales (troncos, cañas) que actúan como esqueleto y como refuerzos flexibles de la estructura (Fig.



Figura 3. Casa de cañas y madera que ha sobrevivido a muchos terremotos (Bahía de Ceráquez, Ecuador). Fuente: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/04/160422_ecuador_terremoto_problemas_construcciones_arquitectura_ab

3). Las técnicas constructivas sismorresistentes más modernas adoptan y adaptan estas estrategias tradicionales y las asocian al uso de dispositivos antisísmicos. Es importante señalar que si bien en el uso cotidiano suele utilizarse como sinónimos “sismorresistente” y “antisísmico”, ambas palabras no son equivalentes en la jerga técnica y de hecho suele combinarse la *construcción sismorresistente* (distribuida en toda la estructura) con *dispositivos antisísmicos* (localizados en puntos clave), ya que ambas estrategias son complementarias.

a. Construcciones sismorresistentes: Este tipo de construcción debe resistir los esfuerzos provocados por el sismo en la estructura (aunque se produzcan daños menores). Incorpora en su diseño un sobredimensionamiento de vigas y columnas con el respecto a los valores necesarios para un edificio que se encuentra en reposo con el fin de que su resistencia a la tensión, la flexión y la torsión sean mayores que los esfuerzos que se originan cuando la construcción es afectada por un sismo. La decisión con respecto a la magnitud máxima que la estructura puede resistir (y que se utilizará en el cálculo ingenieril) es un factor crítico en el diseño y se adopta en base a criterios como la historia sísmica de la región (frecuencia y magnitud de los eventos sísmicos), el uso que se dará a la construcción, los daños potenciales que puede causar su colapso, etc. La tendencia a construir edificios lo más simétricos posible (las formas cilíndrica y tronco-cónica resultan las mejores), aislados entre sí por distancias prudentes o bien ligados por juntas elásticas, sin voladizos suspendidos en el aire y con una distribución interna de cargas lo más homogénea y cercanas posible al eje del edificio, es el resultado de la experiencia acumulada en las últimas décadas de construcción sismorresistente.

b. Dispositivos antisísmicos: Este tipo de elementos mecánicos se encargan de reducir la cantidad de energía transmitida desde el suelo a la construcción y/o de minimizar su desplazamiento y también de acortar el período de tiempo en que el edificio permanece vibrando luego de concluido el episodio sísmico. Sus principios de funcionamiento son en general simples y no sólo pueden colocarse antes de la construcción de una estructura nueva, sino que han sido colocados bajo estructuras preexistentes para

mejorar su respuesta ante los terremotos. Son de diferentes tipos:

Aisladores: Consisten en apoyos deformables ya sea cilindros o cubos de polímeros elásticos (a veces en multicapas y que pueden o no tener un eje central de plomo) o conjuntos de resortes que se colocan entre los cimientos y las columnas del edificio y cuyo efecto es disminuir la aceleración transmitida a la estructura (existen dispositivos que pueden reducirla entre un 50% y un 70%). Estos aisladores logran desplazar la frecuencia de vibración natural del edificio lo más posible con respecto a las frecuencias de las ondas sísmicas, para evitar el desastroso efecto de resonancia ya mencionado recientemente. En Hasegawa Mokei (2021) puede verse una maqueta que ilustra con claridad la acción de estos elementos aisladores. La figura 4 ilustra un ejemplo de empleo de este tipo de aisladores.

Disipadores/amortiguadores: Estos aparatos absorben y dispersan la energía recibida desde el terreno a través de las estructuras asentadas en él. Tienen la particularidad de que oponen muy baja resistencia a los movimientos lentos (como podrían ser las dilataciones de los materiales vinculadas con los cambios de temperatura) pero actúan con gran eficacia ante los movimientos bruscos, en forma similar a como funciona un cinturón de seguridad en un vehículo. En la figura 5 se ilustra un ejemplo de disipador instalado en el subsuelo de un edificio. Puede apreciarse que su estructura y funcionamiento es similar al de un amortiguador.

Una interesante estrategia de dispersión y amortiguación consiste en colocar enormes pesos



Figura 4. Aisladores sísmicos instalados en la base de un edificio. Fuente: <https://larepublica.pe/sociedad/1319871-recomiendan-instalar-aisladores-sismicos-cimientos-hospitales/>

que se cuelgan en la parte superior del edificio y se conectan a la estructura mediante amortiguadores hidráulicos y disipadores de energía, recibiendo el conjunto la denominación de “Amortiguadores de masa afinados” o también “sintonizados”, refiriéndose el adjetivo a que su masa, la longitud del cable y los dispositivos adicionales están calculados para trabajar en conjunto de modo de igualar el período de ambos elementos y sincronizar sus desplazamientos en direcciones opuestas, de modo de anularlos o, al menos, reducir la amplitud de las oscilaciones del edificio. El más famoso de estos TMD, por sus iniciales en inglés (*Tuned Mass Damper*), y uno de los pocos visitables por el público, es el del edificio denominado Taipei 101 (Taipei, Taiwán), que al finalizar su construcción en 2004 era el más alto del mundo (101 pisos elevándose hasta 508m sobre el nivel de la calle). Cuando aún se encontraba en construcción la estructura fue sacudida por uno de los sismos más importantes en la historia reciente de Taiwán (21 de Septiembre 1999, terremoto de Chichi, magnitud 7,3) y el desplome de una de las grúas utilizadas en la construcción provocó la muerte de cinco personas, situación que casi paraliza el proyecto. El amortiguador utilizado en el Taiwan 101 es una esfera de acero que pesa 660 toneladas métricas y que representa el 0,24% del peso total del edificio aproximadamente. Cabe aclarar aquí para advertir al lector desprevenido que en muchas publicaciones el peso figura como 728 toneladas sin aclarar que se refiere a la medida de uso en los EEUU que se denomina ton pequeña tonelada y equivale a 2000 libras. La esfera de hierro, cuya masa ha sido calculada en función de la fuerza inercial necesaria, se encuentra suspendida mediante cables a la altura del piso 87 (Fig. 6a) y vinculada a la estructura del edificio mediante 8 amortiguadores que reducen la magnitud de los desplazamientos y actúan también como disipadores de energía (Fig. 6b). Su acción reduce en aproximadamente un 40% la amplitud de las oscilaciones y se estima que el dispositivo puede amortiguar sin mayores inconvenientes los efectos de terremotos de magnitud inferior a 7 en la escala de Richter. El sistema actúa también frente al empuje de los vientos, pudiendo ser efectivo contra vientos de hasta 450 km/h. Un sistema adicional de protección, diseñado para situaciones extremas, limita aún más la amplitud de las oscilaciones y está constituida por otros 8 amortiguadores/disipadores que limitan el desplazamiento de un anillo que limita el desplazamiento de un tope ubicado en el



Figura 5: Disipador viscoso instalado en posición horizontal vinculando el muro y la estructura que se encuentra a la izquierda de la fotografía. El elemento permite absorber tanto desplazamientos de acortamiento o extensión en la horizontal como verticales (obsérvese que las fijaciones tienen un eje de rotación horizontal). Fuente <https://www.cec.uchile.cl/~dicesco/aislacion.html>

“polo sur” de la esfera. Este sistema no actúa en condiciones de vientos o terremotos que pueden ser considerados “normales” en el área. Poon et al. (2004) ofrecen una de las descripciones más sencillas y completas de las características constructivas del Taipei 101, en la que se incluyen los detalles del mecanismo de amortiguación.

En Pulsa X Alexander (2011) puede vérselo en acción ante un terremoto y en Storcillo (2014) como actúa frente a un huracán. Es importante tener en cuenta que en estas filmaciones sólo es visible el desplazamiento de la masa de acero con respecto a la estructura del edificio, a la que se encuentran fijadas las personas y las cámaras de registro. El desplazamiento real del péndulo no se registra, como tampoco la oscilación del edificio ya que no hay puntos de referencia externos en ninguna de las dos filmaciones.

En CDC (2018) se presenta una explicación de las características de un sistema de amortiguación similar instalado en el edificio de la Cámara de la Construcción de Chile.

Análisis de los modelos analógicos didácticos

Como se ha señalado al inicio de esta contribución, el uso de modelos didácticos, si bien es altamente recomendado para facilitar la comprensión de conceptos, procesos o dispositivos que, por razones de escala y/o de complejidad, no pueden ser abordados en forma directa, no puede ser ingenuo, ya que los mismos no son reproducciones exactas ni fieles del proceso o fenómeno que se pretende modelar, sino que deben tenerse en cuenta sus limitaciones para evitar malos entendidos en quienes aprenden. En los siguientes

tes párrafos se presentan algunos de los modelos más habituales utilizados y, continuando con la metodología empleada en Sellés-Martínez (2020), se discuten sus falencias y se sugieren formas de enmendarlas. Es importante destacar, a modo de advertencia preliminar, que todos estos modelos deben ser ensayados y puestos a punto antes de ser utilizados en clase. La variedad de propiedades de los materiales utilizados, las diferentes longitudes posibles para los péndulos, las variaciones en la adherencia de los materiales puestos en contacto, las diferentes amplitudes y frecuencias en los impulsos que son impuestos a cada modelo hacen imposible brindar una única “receta” segura para cada caso. La realización de ensayos previos y la adecuación a los materiales de que se dispongan son imprescindibles y, si el docente cuenta con el

tiempo necesario y considera que puede hacerlo, estos ajustes o “afinamientos” de los modelos y de la forma de realizar cada experiencia pueden ser discutidos y analizados con los alumnos. Lo que no se recomienda es improvisar la experiencia directamente a partir de la lectura de los párrafos siguientes pues para la mayoría de los casos expuestos se auguran problemas.

Identificación de las aceleraciones inducidas en los cuerpos

- Actividad 1: Acerca de frenadas, aceleraciones y torsiones bruscas.

Descripción: Esta actividad tiene como objetivo la visualización de los efectos de las aceleraciones horizontales y verticales y de las torsiones que son impuestas a un edificio por una perturbación externa.

Materiales y metodología: Los materiales necesarios son una placa de madera y una maqueta realizada con bloquitos de madera, tal como se ilustra en la figura 7. La experiencia se realiza en una secuencia de pasos que se describen a continuación. Paso 1: Se coloca la maqueta sobre la placa, que se encuentra apoyada sobre una superficie horizontal y se imprime a esta un movimiento horizontal en cualquier dirección, que se frena también bruscamente. Se observa qué ocurre. Paso 2a: Se reconstruye la disposición inicial del conjunto y se eleva y sostiene la placa en el aire, con ambas manos y en forma horizontal. Se le imprime un movimiento brusco de descenso, sin desviarse de la vertical, que es también frenado súbitamente. Se observa que ocurre en este caso. Paso 2b: Se repite el paso 2 pero desviando el conjunto de la vertical al realizar el descenso. Paso 3: Se vuelve a reconstruir la posición inicial y con la placa apoyada sobre la superficie horizontal se imprime a la misma un movimiento de rotación que se inicia y detiene bruscamente. Se observa qué ocurre. Paso 4: Para finalizar la experiencia se modifica la simetría constructiva del modelo de edificio (desplazando las estructuras altas hacia uno de sus lados, por ejemplo) y se repiten las tres situaciones descritas, observando nuevamente qué ocurre y cómo influye la introducción de la asimetría.

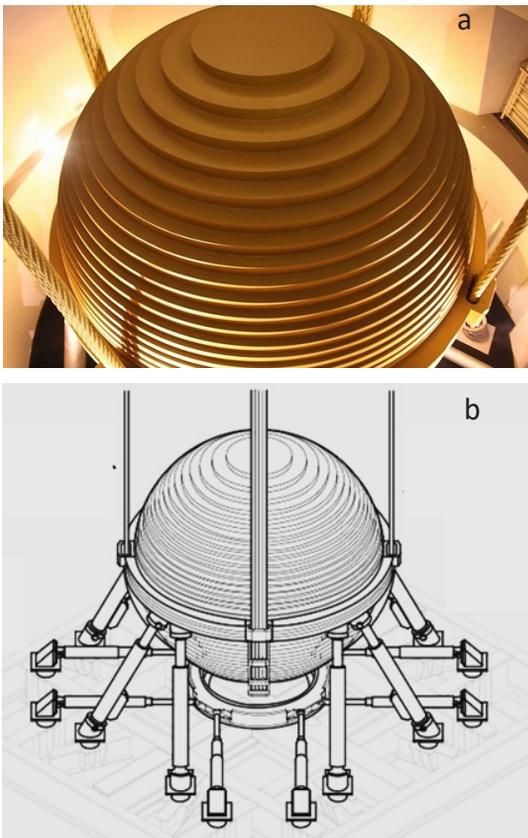


Figura 6. El péndulo utilizado para amortiguar las oscilaciones en el edificio Taipei 101 (a) y esquema de su vinculación con la estructura del edificio mediante cuatro cables y 8 amortiguadores/disipadores de energía que se encuentran colocados en posición diagonal desde el anillo ecuatorial de la bola de acero a la plataforma inferior en la cual se afirman también los amortiguadores del anillo que actúa en caso de oscilaciones excesivamente amplias del péndulo (b). Fuente: <https://english.cw.com.tw/article/article.action?id=2374>

Análisis de la experiencia y vinculación al proceso real

Paso 1: Puede verse que, como resultado de la inercia, los bloques que constituyen la maqueta continúan su movimiento aún luego de detenerse el soporte, por lo que el edificio se derrumba. Paso 2a: De acuerdo a las características del modelo y a cuán vertical sea el desplazamiento de bajada, el edificio puede “estirarse”, con bloques que quedan un instante suspendidos en el aire, pero que luego, al caer, recuperan su posición en la maqueta. Paso 2b: En esta situación es mucho más probable que la maqueta se derrumbe, al no recuperar los bloques a sus posiciones iniciales luego de la caída. Paso 3: Puede verse que en forma similar a lo ocurrido en el primer paso, la parte superior de la maqueta continúa desplazándose aunque la base se haya detenido. Paso 4: En estos casos puede verificarse que la asimetría del modelo facilita su desmoronamiento.

Aspectos que son reproducidos aceptablemente:

El modelo reproduce aceptablemente la acción de la inercia al detenerse bruscamente un móvil o al invertir la dirección de su desplazamiento (como ocurre cuando algo vibra). Por otra parte, la asimetría del modelo (su planta es rectangular), hace que se comporte en forma diferente según la dirección en que se produce el desplazamiento, resultando más estable a movimientos que se producen en la dirección del eje mayor del rectángulo que a los transversales al mismo. La cuestión de la simetría es, como se ha señalado, uno de los factores preponderantes en el diseño sismorresistente.

Aspectos en los que el modelo no es fidedigno:

Naturalmente al estar el modelo realizado con bloques sueltos su resistencia a los esfuerzos de tracción es mucho menor que en el caso real. Esto es particularmente notable en el desplazamiento vertical, ya que está claro que los pisos superiores de un edificio que es impulsado hacia arriba por el paso de las ondas sísmicas no quedan suspendidos en el aire, desconectándose de la parte inferior al detenerse el movimiento, como puede ocurrir con los bloques. Sin embargo, la situación ilustra claramente que en las construcciones que no presentan discontinuidades en su estructura (columnas y vigas unidas entre sí), la situación producirá esfuer-

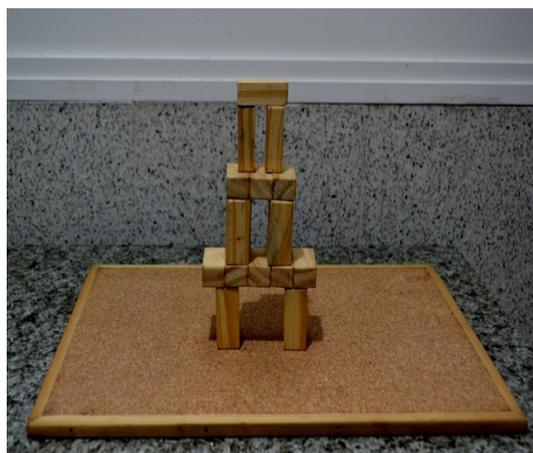


Figura 7. Edificio construido con bloques de madera para observar los efectos de las aceleraciones y la torsión sobre una construcción

zos de extensión en esos puntos de unión, los que podrán generar pequeñas fracturas que son amplificadas en cada vibración y generan daños importantes en la estructura.

La vibración de los edificios

- Actividad 2: Edificios que cantan en diferentes tonos

Descripción: Esta experiencia resulta muy efectiva para motivar a los estudiantes a reflexionar acerca de la “contra-intuitividad” de muchos fenómenos naturales. Se trata de analizar el comportamiento de un conjunto de “edificios” de diferentes alturas pero con similares características constructivas o bien de iguales alturas pero con diferentes características constructivas, frente a la acción de sismos que hacen vibrar el terreno con diferentes frecuencias.

Materiales y metodología: Se necesitan: un listón de madera suficientemente rígido; tres esferas huecas del mismo tamaño (pueden ser bolitas de las usadas como adorno en los árboles navideños) e hilo para colgar las bolitas del listón de madera (Fig. 8). Para llenar las bolitas en los casos necesarios se necesita también algo de agua o arena. La experiencia se realiza en cuatro pasos. Paso 1a: Al comenzar y con mucha precaución (es bueno ensayarlo antes para no perder el impacto de lo inesperado al realizar la experiencia) el docente imprime un movimiento oscilatorio al conjunto desplazando hacia delante y atrás el listón. Si la frecuencia es lo suficientemente alta, el péndulo

más largo será el que presente las menores oscilaciones, dejando estupefactos a los espectadores que ven como el “edificio de menor altura” se sacude nerviosamente. Paso 2: Se interrumpe el movimiento y se pregunta cuál es la razón por la que esto ocurre y también si la longitud del hilo es el único control del movimiento. Alguien seguramente preguntará qué podría pasar si el sistema se hace vibrar con una frecuencia más baja, en caso de que no ocurra puede introducirse la pregunta ¿Qué creen ustedes que puede ocurrir si cambiamos la frecuencia con que hacemos vibrar al sistema? Antes de hacerlo se pide que cada uno de los presentes haga un pronóstico. Se imprime a la tablilla un movimiento de vaivén más lento que en el caso anterior. “Sorprendentemente”, la situación se invierte y el edificio más elevado es ahora el que oscila con mayor amplitud. Paso 2: Todas las bolitas se encuentran a la misma distancia del listón. Se imprime al sistema una vibración en forma similar al primer paso. Se repite la pregunta y se observa lo que ocurre al sacudir el sistema con diferentes frecuencias. Paso 3: Las bolitas cuelgan nuevamente a la misma distancia del listón, pero una de ellas está vacía, otra medio llena y otra completamente llena de agua o arena. Se repiten la pregunta y la acción y nuevamente se observan los resultados del cambio introducido con respecto al comportamiento del sistema en los pasos anteriores. Paso 4: Las bolitas vacía, medio llena y completamente llena de agua cuelgan a diferentes distancias del listón. Se repiten la pregunta, los impulsos a diferentes frecuencias y las observaciones.

Análisis de la experiencia y vinculación al proceso real: En el caso del Paso 1 (péndulos de diferente longitud, impulsos de diferente frecuencia) puede verse que se cumplen las leyes de la Física que indican que el período de oscilación es función de la longitud del péndulo y de la frecuencia del impulso. En el segundo paso puede verificarse que, siendo todas las bolitas iguales y estando todas a la misma distancia del listón (edificios iguales en altura y diseño) todas oscilan con la misma amplitud frente a un impulso de similares características. En el tercer paso se verifica que la frecuencia de la oscilación es independiente de la masa, mientras que en el cuarto puede verse nuevamente que no es la masa sino la longitud del péndulo (altura del edificio) la que controla



Figura 8. La relación entre la altura del edificio y la amplitud de su oscilación en relación con la frecuencia de vibración impuesta por el sismo puede ejemplificarse utilizando péndulos de diferente longitud

cuál será el que oscile con mayor amplitud frente a cada frecuencia de impulso en particular. Esta experiencia permite, por lo tanto, explicar algo que muchas veces resulta aparentemente paradójico en los sismos reales, cuando no son los edificios más altos los que sufren los peores daños sino los de alturas intermedias o más bajas. Es imprescindible aclarar aquí que esto ocurre así siempre que se trate de edificios de calidades constructivas semejantes, si un edificio de determinada altura no es de calidad comparable a otro más o menos alto, el razonamiento anterior no es aplicable y la destrucción estará vinculada también a la calidad y no solo a la altura.

Aspectos que son reproducidos aceptablemente: Se reproduce adecuadamente la relación de la frecuencia vibratoria con la amplitud de oscilación y altura del edificio.

Aspectos en los que el modelo no es fidedigno: Se ha señalado anteriormente que en muchos casos, las ondas superficiales producen movimientos complejos del suelo, con trayectorias que trazan curvas en tres dimensiones, y no un simple desplazamiento de ida y vuelta sobre una línea recta, como es el caso del modelo.

Comentario: Es interesante señalar que si se organiza un conjunto de cuatro a seis bolitas, colgando del listón con diferentes longitudes de hilo, con muy poca práctica puede lograrse que la amplitud máxima vaya desplazándose de una bolita a la siguiente en función del aumento pausado de la frecuencia con que se hace oscilar el soporte. Otras variantes de esta actividad, realizadas con globos o con varillas, se encuentran descripta en *Shaked but not stirred? How earthquakes*

affect buildings (ELI, 2021).

Las estrategias de refuerzo de la estructura

- Actividad 4: Estructuras reforzadas para evitar fracturas

Descripción: Se trata de construir dos tipos de edificación, uno de carácter común que se simulará con bloques del tipo de los juegos de construcción más sencillos, sin ningún tipo de ligazón entre ellos, similar al utilizado en la Actividad 1, y otro de carácter antisísmico, en el que las uniones entre bloques han sido reforzadas, utilizándose para ellos bloques encastrables entre sí, del tipo Rasti o similares (Fig. 9). Se colocan ambos modelos sobre la tabla y se imprime un movimiento de vaivén a la base que sustenta todo el conjunto.

Análisis de la experiencia y vinculación al proceso real: Las diferencias en el comportamiento de las construcciones como consecuencia de las mejores prácticas constructivas y al uso de sistemas de amortiguación de la energía sísmica que alcanza a las mismas son claramente visibles. En el ejemplo en particular vemos que la existencia de vinculación entre los paneles horizontales y verticales modifican radicalmente el comportamiento de la estructura, que adquiere mucha mayor estabilidad al existir éstos.

Aspectos que son reproducidos aceptablemente: La sacudida de las obras civiles que son alcanzadas por el conjunto de ondas (P, S y superficiales) que genera el sismo y los métodos de protección son reproducidos con bastante similitud.

Aspectos en los que el modelo no es fidedigno: Es evidente que los edificios contemporáneos no se diferencian por estar contruidos con bloques sueltos o con bloques ensamblados. Lo que el modelo simula es una mayor o menor solidez o robustez en los puntos en los que se unen vigas y columnas. En edificios más antiguos, contruidos con piedras superpuestas sin mortero entre ellas o en las construcciones de ciertas áreas rurales, en las que muchas veces se usa barro (o una mezcla de barro con fibras vegetales) como mortero para ligar las piedras o los ladrillos hechos con el mismo material de barro y fibras (llamados “adobes”), la fragilidad del mortero hace que las construcciones se desmoronen con mucha facilidad.



Figura 9. Modelo que permite ilustrar la importancia de la calidad de la construcción en la estabilidad de los edificios

Estrategias que amortiguan los efectos de las ondas

- Actividad 5: Soportes muy muelles para que la casa pueda reposar sin sobresaltos

Descripción: Se trata de una experiencia sencilla e ilustrativa acerca del uso de materiales que se deforman como modo de amortiguar el impulso sísmico. Puede realizarse con muelles plásticos o metálicos de los que comúnmente se venden en las jugueterías.

Materiales y metodología: Una primera parte de la actividad puede realizarse simplemente colocando el muelle en posición vertical sobre la palma de la mano y observar que ocurre al mover ésta rápida y repetidamente hacia derecha e izquierda. Puede verse que la parte superior del muelle reacciona con demora al movimiento de la palma de la mano y el muelle se deforma, inclinándose el eje del cilindro con respecto al plano de la palma de la mano. Si se desea puede fijarse el muelle a una tabla (con cinta adhesiva), como se ilustra en la figura 10 y ver qué ocurre cuando se imprime un movimiento de vaivén a la tabla.

Análisis de la experiencia y vinculación al proceso real: La existencia de la inercia tiene como consecuencia que no todo el sistema se desplace en forma sincrónica con la aparición de la fuerza que lo desplaza. De este modo y como consecuencia de la facilidad con que el material se deforma la parte superior ve retardada su respuesta y disminuida la amplitud de su desplazamiento. En el caso real, en razón de que la masa del edificio es una mucho mayor que la sola parte superior del resorte y por lo tanto su inercia es significativamente más alta,

se refuerza el proceso de diferenciación entre los desplazamientos inducidos por el suelo a la base del resorte y la respuesta de la construcción por encima del mismo.

Aspectos que son reproducidos aceptablemente: La relación entre el modelo y la realidad es en este caso fundamentalmente de escala y de intensidad, pero la vinculación conceptual es bastante estrecha. La deformación del muelle de juguete y de los muelles que se usan en algunos casos reales es equivalente, lo que cambian son las dimensiones y propiedades físicas del muelle y detalles de diseño que aumentan la efectividad del sistema antisísmico.

Aspectos en los que el modelo no es fidedigno: Como en todos los casos analizados, el conjunto de ondas que alcanza a las construcciones (P, S y superficiales) es mucho más complejo que el movimiento de vaivén que se imprime al modelo.

- Actividad 6: Para que todo marche sobre rodillos cuando ocurra el sismo

Descripción: En este caso se trata de simular la tecnología basada en el desacople mecánico entre el suelo y el edificio.

Materiales y metodología: La construcción es similar al modelo de la actividad precedente, pero en lugar de apoyar la estructura sobre los muelles se la coloca sobre un conjunto de pequeños rodillos de madera (lápices, por ejemplo) o bien sobre tubos plásticos (sorbetes) (Fig. 11a). Puede realizarse la experiencia también utilizando pequeñas esferas (*bolitas, canicas* o bien cuentas de collar) que son colocadas dentro de una bandeja con un pequeño reborde para evitar que se dispersen durante la experiencia (Fig. 11a b). Si se ensayan ambas posibilidades es interesante comparar los resultados que se obtienen en cada caso cuando las oscilaciones se realizan primero de derecha a izquierda y luego de adelante hacia atrás.

Análisis de la experiencia y vinculación al proceso real: La relación entre el modelo y la realidad es en este caso fundamentalmente de escala y de intensidad, pero la vinculación conceptual es bastante estrecha. Como en el caso del muelle de juguete, la función de las bolas o rodillos que se usan en los casos reales es equivalente, lo que cambian son las dimensiones y propiedades



Figura 10. Modelo de absorción de la energía de un sismo utilizando un muelle que se deforma

físicas. Debe notarse que en el caso de usarse rodillos, estos serán muy eficientes si el impulso proviene de una dirección perpendicular a su eje, pero inútiles si la dirección es paralela a él. Este problema no existe si se utilizan pequeñas esferas.

Aspectos que son reproducidos aceptablemente: Como en el caso anterior las diferencias en el comportamiento de las construcciones como consecuencia de las mejores prácticas constructivas y al uso de sistemas de amortiguación de la energía sísmica que alcanza a las mismas son claramente visibles.

Aspectos en los que el modelo no es fidedigno: Como en el caso anterior el conjunto de ondas que alcanza a las construcciones (P, S y superficiales) es mucho más complejo que el movimiento de vaivén que se imprime al modelo.

- Actividad 7: Un péndulo en el interior reduce las oscilaciones

Descripción: En este caso se trata de simular la acción de una masa cuya inercia se opone a los desplazamientos de la estructura y cuya frecuencia de oscilación puede afinarse para que se contraponga a la del edificio.

Materiales y metodología: Se necesitan una placa de madera, un par de botellas de plástico transparente, una plomada (o una bolita navideña llena de arena o agua), un trozo de cordel y un pedazo de alambre delgado (puede ser un clip de sujetar papeles) que se doblará en forma de “M” para sostener el péndulo centrado en la botella desde su pico. Las botellas se cortan transversalmente y a una de las mitades se le



Figura 11. Modelos de absorción de la energía de un sismo utilizando un conjunto de rodillos (a) o de esferas (b) que facilita su desacople mecánico con el sustrato

realizan tres o cuatro pequeños cortes longitudinales que permitan encastrar luego una mitad dentro de la otra (Fig. 12). Para colocar el péndulo en su sitio es necesario pasar el cordel por su enganche y luego, por el pico de la botella, fijándose al mismo y centrándolo con ayuda de la “M” metálica (la existencia de unas pequeñas ranuras verticales que vienen en el sector roscado ayuda a realizar este centrado y mantener fijo el alambre). Se colocan ambos elementos (la botella con péndulo y la otra sin él) sobre la tabla de madera y se sacude ésta con diferentes frecuencias, observándose el comportamiento de las botellas frente a diferentes frecuencias y amplitudes de desplazamiento de la base. Puede ser necesario (como se ilustra en la figura 12b) reforzar la adherencia del plástico de las botellas a la base de madera utilizando algunos elementos (arena, pequeñas piedras, etc.) para dar más peso a las mismas y un paño para cubrir la madera, de lo contrario puede ocurrir que la base de se desacople de las botellas y éstas permanezcan en su lugar, como consecuencia de su inercia.

Análisis de la experiencia y vinculación al proceso real: Es imprescindible tener en cuenta que la influencia del péndulo puede ser tanto positiva

como negativa según sean sus características, su disposición y la frecuencia de la vibración impuesta y eso se hará visible también al accionar el modelo. Es por eso que en las construcciones reales tanto la masa del péndulo (que controla su inercia) como la longitud del mismo (que controla su frecuencia/período) deben ser cuidadosamente calculadas para las frecuencias de las ondas sísmicas que son más esperables. Por otra parte en la construcción real los péndulos no oscilan libremente, como en el modelo, sino que están unidos a la estructura mediante elementos que actúan como disipadores de energía y contribuyen a moderar los desplazamientos relativos entre el péndulo y el edificio que, como se ha dicho, oscilan con diferentes períodos. En la figura 6b pueden verse claramente estos elementos de vinculación entre el péndulo y la estructura.

Aspectos que son reproducidos aceptablemente: Se reproduce aceptablemente la vinculación entre la frecuencia del estímulo sísmico y la amplitud de vibración del edificio y la influencia que un péndulo colocado en su cima puede tener en el desplazamiento del mismo. Puede señalarse

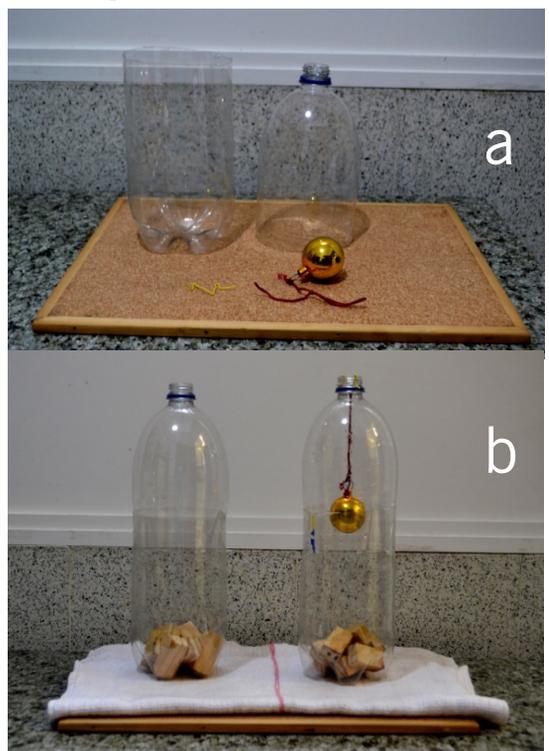


Figura 12. Modelo de amortiguación de las oscilaciones de la estructura mediante un péndulo suspendido en su parte superior. a) Los materiales necesarios. b) El montaje del testigo y el modelo amortiguado

aquí que, con el primer impulso y con el retraso correspondiente a la inercia propia de la parte más alta del edificio, ésta se pone en movimiento y, al hacerlo “tira” del péndulo, que no ha recibido el impulso porque se encuentra aislado del suelo y que por lo tanto permanece e intenta permanecer en su sitio por efecto de su propia inercia. Es así que ese primer movimiento funciona como el primer impulso que, en la Actividad 2 se da a los péndulos e induce a los mismos a ponerse en movimiento a vibrar con una frecuencia que es función de la longitud del elemento de sostén y una amplitud que es función de la frecuencia con que se repite el impulso, como ya se ha señalado. A partir de ese momento inicial la situación se complica porque ambos elementos (edificio y péndulo) influyen uno sobre el otro. Esas influencias a veces pueden ser positivas (reduciendo la amplitud del desplazamiento del edificio) o negativas (aumentándolo).

Aspectos en los que el modelo no es fidedigno: El modelo carece de los sistemas de amortiguación de los desplazamientos y de disipación de energía que complementan la labor del péndulo. La experiencia como en todos los otros casos sólo toma en consideración movimientos en una única dirección horizontal y no incorpora desplazamientos verticales, lo cual es norma en la realidad.

Comentario: En la segunda mitad del video disponible en <https://www.pesmedia.com/science-behind-tuned-mass-damping-sandvik-coromant-edd-china/> puede verse el funcionamiento de un modelo que ilustra el funcionamiento del TMD del Taipei 101 calculado y realizado con sumo detalle, el que, naturalmente, no presenta los inconvenientes del propuesto en esta contribución.

Reflexiones finales

Si bien los sistemas de construcción antisísmica y de amortiguación de la amplitud de las oscilaciones son sencillos en cuanto a los principios físicos en los que se basan, la complejidad de los impulsos generados por el sismo (diferentes tipos de ondas con diferentes períodos actuando al unísono), la complejidad de las respuestas de las estructuras construidas (función de las técnicas, materiales y diseños) hacen que la construcción de maquetas

que reproduzcan los comportamientos reales resulte poco sencilla y, en todos los casos, sea necesario realizar ensayos previos y ajustes para lograr buenos resultados al realizar la práctica en clase. Esto puede ser aprovechado, sin embargo y cuando es posible, para fomentar el desarrollo de capacidades de análisis, vinculación de conceptos y discusión de los alumnos, animándolos no sólo a predecir lo que podrá ocurrir, sino también a explicar por qué las cosas no han ocurrido como se esperaba cuando estas situaciones tienen lugar.

En una próxima contribución, última de la serie comenzada en Sellés-Martínez (2020a), se desarrollarán en detalle los efectos que los sismos tienen en las propiedades mecánicas de los materiales particulados (suelos, sedimentos no consolidados) cuando estos se encuentran saturados por fluidos y como los procesos de soliflujión, fluidización y licuefacción pueden ser simulados en el aula. Quienes estén interesados en promover el análisis crítico de la bibliografía de estudio entre los alumnos pueden encontrar una descripción de errores frecuentes en las ilustraciones referentes a los efectos del pasaje de las ondas sísmicas sobre el terreno y sobre las construcciones en Sellés-Martínez 2020b.

Agradecimientos

El autor agradece a la Dra. Patricia Alvarado por las correcciones y sugerencias oportunamente realizadas al manuscrito inicial y al equipo responsable y colaboradores de ELI por su desinteresada contribución al mejoramiento de la enseñanza de las Ciencias de la Tierra.

Referencias

- CDC (2018). URL: <https://www.youtube.com/watch?v=faZM2ypyx4Q>. Acceso 25.05.2021.
- González, M. & Juan, X. (2008). Aula Virtual: Herramientas de Comunicación. La gestión de los riesgos naturales: Recursos en la red. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 16(1), 99-106. URL: <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/120992/166507>. Acceso 17.06.2020.
- Earth Learning Idea (ELI). (2021). *Earthlearningidea*. UK. URL: http://www.earthlearningidea.com/PDF/112_Shaken_not_stirred.pdf. Acceso 25.05.2021.
- González, M, Alfaro, P. & Brusi, D. (2010). *Recursos para trabajar los terremotos “mediáticos” en el aula*. XVI Simposio de Enseñanza de la Geología (Teruel), Actas, 137-152.
- Hasegawa Mokei (2021). Modelo de aislamiento sísmico

- co. URL: https://www.youtube.com/watch?list=PLDA769E717D6B2764&time_continue=8&v=wrHxfqmFSc&feature=emb_logo. Acceso 25.05.2021.
- Morcillo Ortega, J. G., García García, E., López García, M. & Mejías Tirado, N. E. (2006). *Los terremotos: Un laboratorio virtual. Su utilización con alumnos de la F. de Educación*. XIV Simposio sobre Enseñanza de la Geología (Aveiro), Actas, 355-360.
- Peláez, J. A., del Pozo, G. & García, A. J. (2018). La “máquina” o “generador” de terremotos en un laboratorio universitario. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 26(2), 186-196, URL: <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/338611/429563>. Acceso 17.06.2020.
- Poon, D.C., Shieh, S., Joseph, L., & Chang, C. (2004). *Structural Design of Taipei 101, the World's Tallest Building*. Council of Tall Buildings and Urban Habitat. CTBUH 2004 (Seoul-Korea) Conference Proceedings, ps. 271-278. URL: <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/1650-structural-design-of-taipei-101-the-worlds-tallest-building.pdf>. Acceso 10.04.2021.
- Pulsa X Alexander (2011). URL: https://www.youtube.com/watch?v=ohKqE_mwMmo. Acceso 25.05.2021.
- Sellés-Martínez, J. (2020a). Acertos e deficiências dos modelos analógicos associados a terremotos usados no ensino. *Terræ Didática*, 16(Publ. Contínua), e020029. 10.20396/td.v16i0.8658592
- Sellés-Martínez, J. (2020b). Desenvolvimento de habilidades de análise crítica baseadas na identificação de erros em diagramas associados aos efeitos das ondas sísmicas. *Terræ Didática*, 16(Publ. Contínua), 1-11, e020029. doi: 10.20396/td.v16i0.8660373
- Sellés-Martínez, J. (2005). ¿Qué nos cuentan las ondas sísmicas? *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 13(1), 20-36. URL: <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/89020/133472%20>. Acceso 10.04.2021.
- Sellés-Martínez, J. (2011). *Merry waves all year round. Modelling how the energy of seismic waves is transmitted*. Earth Learning Idea. URL: http://www.earthlearningidea.com/PDF/121_Merry_waves.pdf. Acceso 08.01.2021.
- Sellés-Martínez, J. & Bonán, L. (2000). Problemas de enseñanza-aprendizaje del tema mecanismos focales. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 8(1), 54-61. URL: <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/88654/132728>. Acceso 11.04.2021.
- Storcillo (2014). Taipei 101 Damper movement. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=STfgObnYdOE>. Acceso 25.05.2021.
- Universidad de Alicante (2021). URL: <https://web.ua.es/es/urs/divulgacion/propagacion-de-ondas-sismicas.html>. Acceso 25.05.2021.