



INGENIERÍA SÍSMICA • ARQUITECTURA ANCESTRAL

Sistemas de Protección Sísmica en el Lejano Oriente

¿Por qué las pagodas resisten los terremotos?

Polymetis – Diego Ramírez



Chūreitō • Fujiyoshida, Yamanashi

El Anillo de Fuego del Pacífico

Japón, China Oriental, Corea y Taiwán se ubican dentro del Anillo de Fuego, la zona sísmica más activa del planeta. Aquí converge la subducción de las placas del Pacífico, Filipina, Norteamericana y Euroasiática.



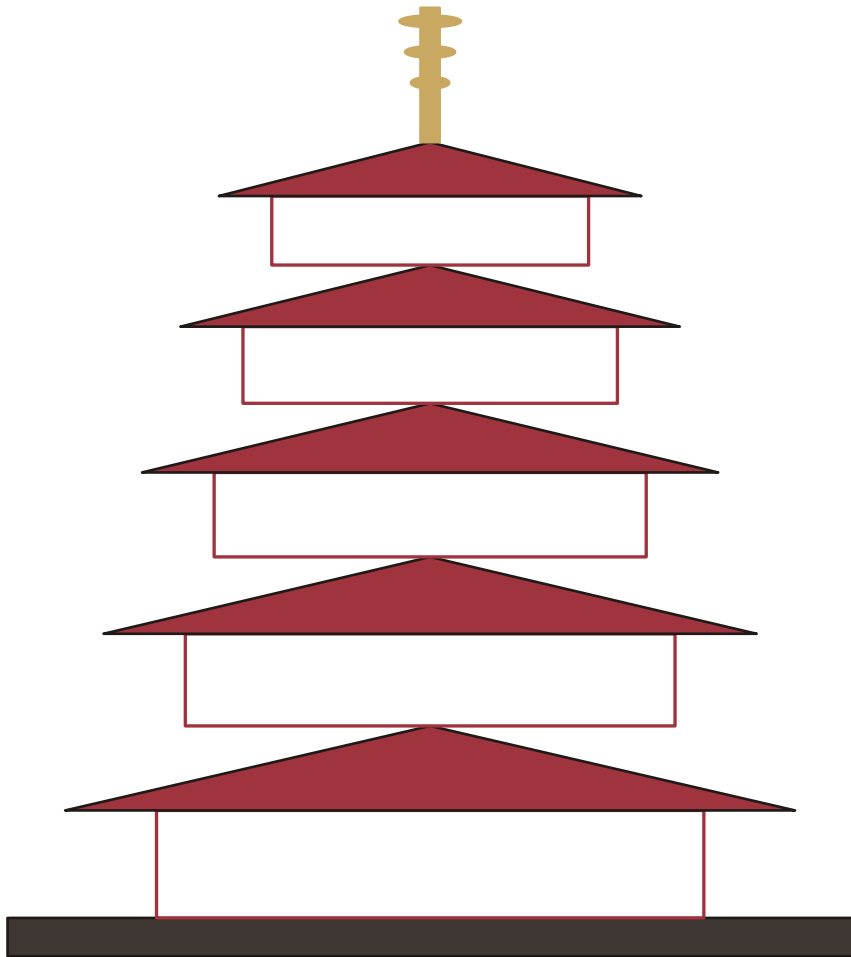
Durante milenios, sus constructores desarrollaron soluciones empíricas para convivir con esta realidad geológica: soluciones que hoy la ingeniería moderna redescubre y válida científicamente.

≈ 90% de los sismos mundiales ocurren en el Anillo de Fuego

1.500 sismos perceptibles al año solo en Japón

M 9,1 Tōhoku 2011: uno de los sismos más grandes registrados

Las pagodas: un milagro ingenieril



Sólo 2

pagodas colapsadas

por causa sísmica
en los últimos
1.400 años



Materia prima

Madera de ciprés japonés (hinoki) o alerce, materiales tenaces y flexibles.



Sin un solo clavo

Ensamblajes de espiga y caja (*mortise-and-tenon*) permiten deformación controlada.



Filosofía de diseño

"La blandura vence a la dureza": la estructura absorbe el sismo, no lo confronta.



CASO EMBLEMÁTICO • JAPÓN

Pagoda del Templo Hōryū-ji

Nara, Japón · La estructura de madera más antigua del mundo aún en pie



Año de construcción

≈ 607 d.C. (siglo VII)

Antigüedad del pilar central

Árbol talado en el año 594 d.C.

Altura

32,5 m · 5 pisos

Material principal

Madera de hinoki (ciprés japonés)

Sismos soportados

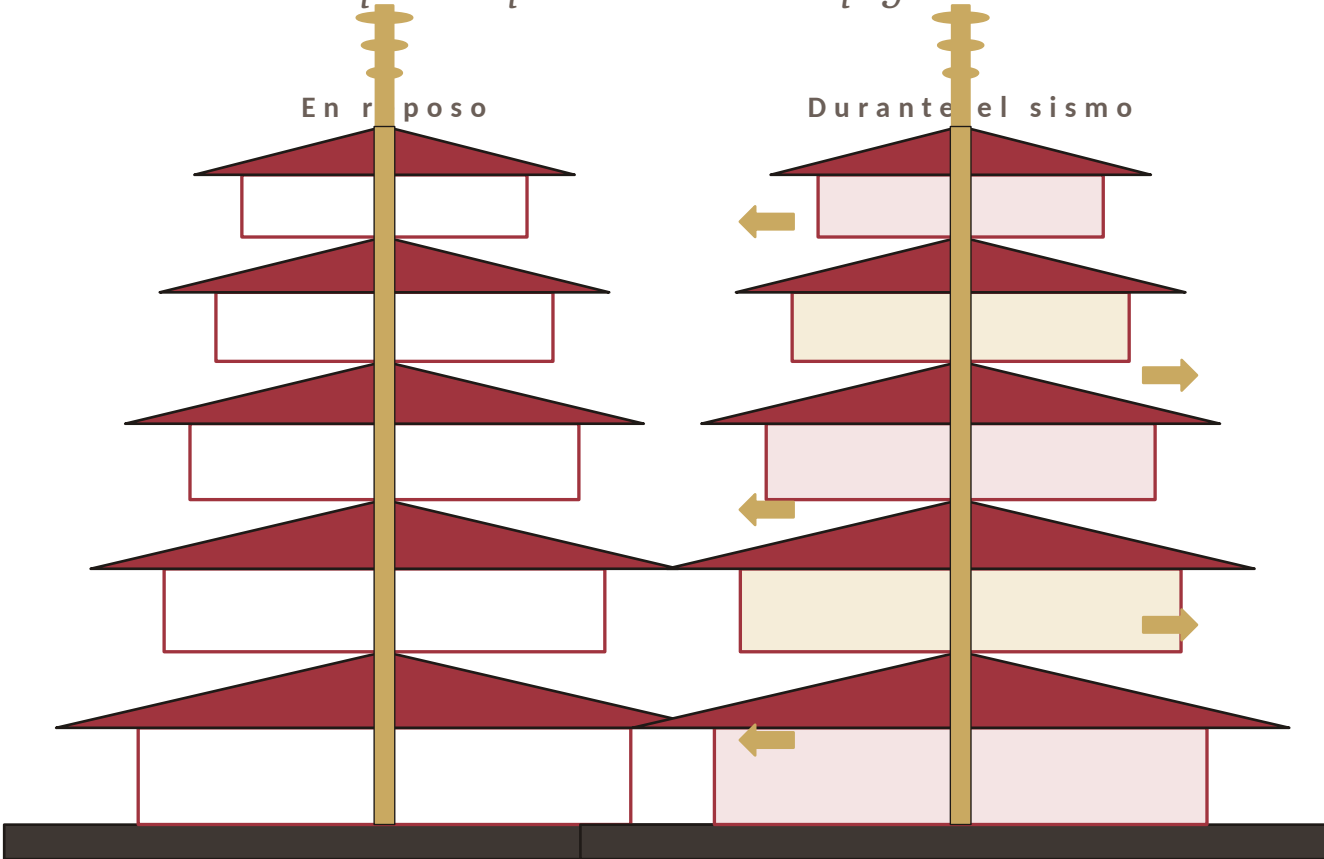
Innumerables, incl. Gran Sismo de Hanshin (1995)

“

Kobe 1995: la Pagoda de Tō-ji sobrevivió intacta, mientras autopistas y edificios modernos colapsaban.

El Shinbashira (心柱)

Pilar central: un péndulo pasivo dentro de la pagoda



¿Cómo funciona?

Columna central de hinoki

recorre toda la altura de la pagoda, sin conectarse rígidamente a los pisos.

En algunos casos cuelga desde la cúspide

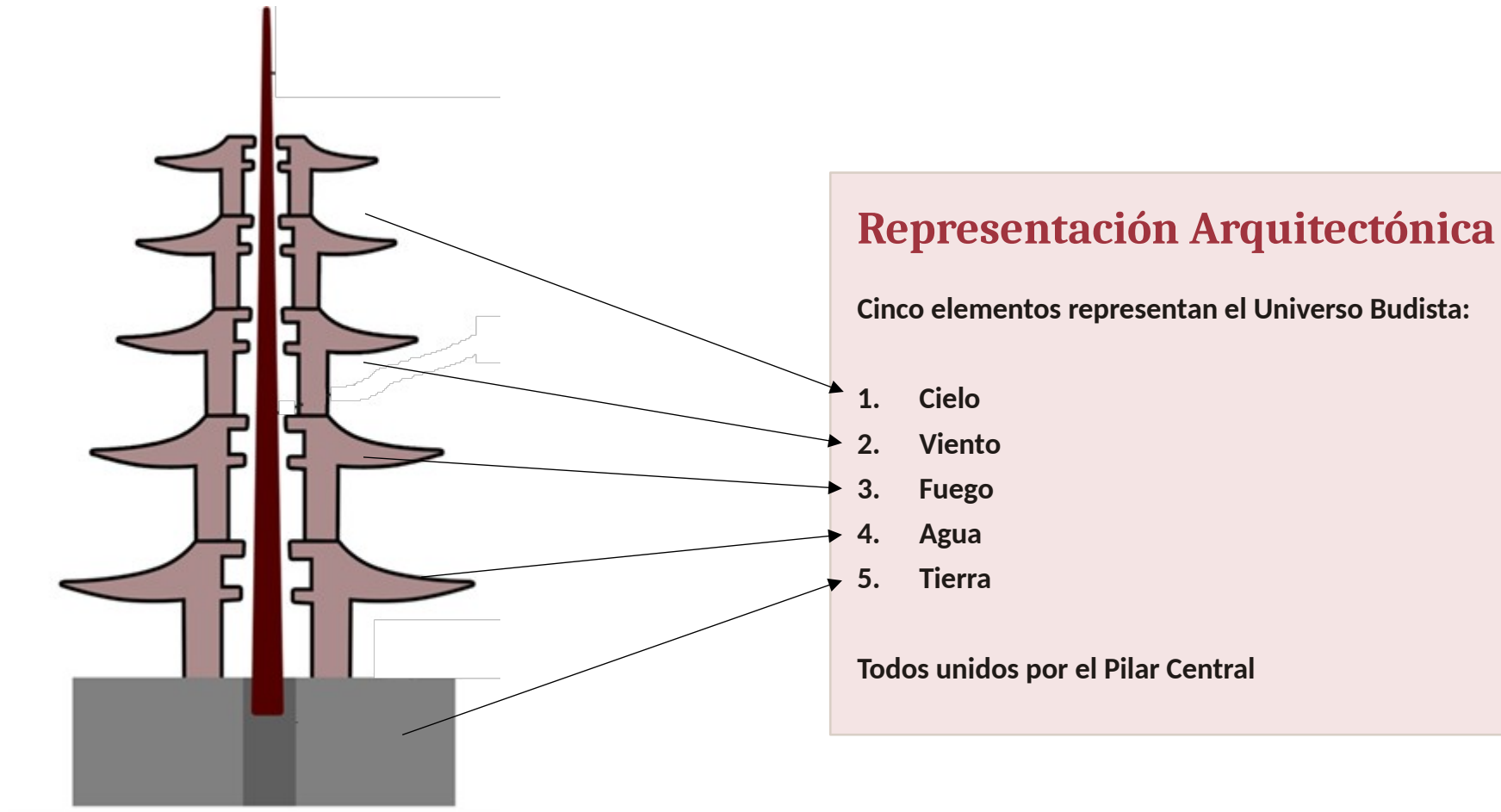
sin tocar el suelo, actuando como péndulo invertido.

Oscila en sentido opuesto

a los pisos: absorbe y disipa energía del sismo, como un amortiguador de masa afinada moderno.

El Shinbashira (心柱)

Pilar central: un péndulo pasivo dentro de la pagoda

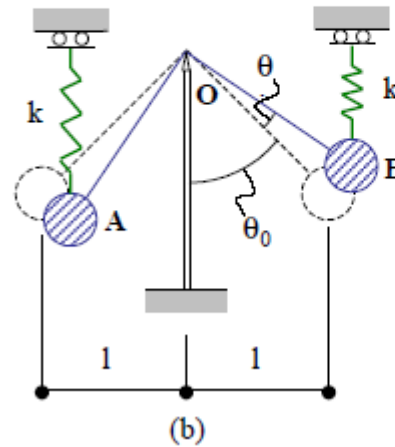
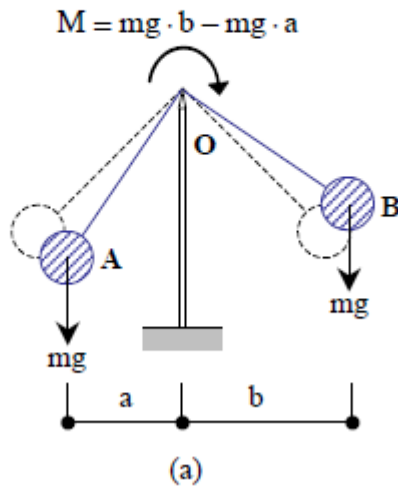


El Shinbashira (心柱)

Pilar central: un péndulo pasivo dentro de la pagoda

4.2.4 Balancing toy effect

A balancing toy is equilibrated stably by gravity. When the balancing toy is excited and begins to rotate, the restoring moment about the point O is applied as sketched in Figure. 7 (a). When a rotation angle θ is minute, the balancing toy effects are given by simple linear springs in the vertical direction as illustrated in Figure. 7 (b).



$$k \approx \frac{mg \cos \theta_0}{l \sin \theta_0}$$

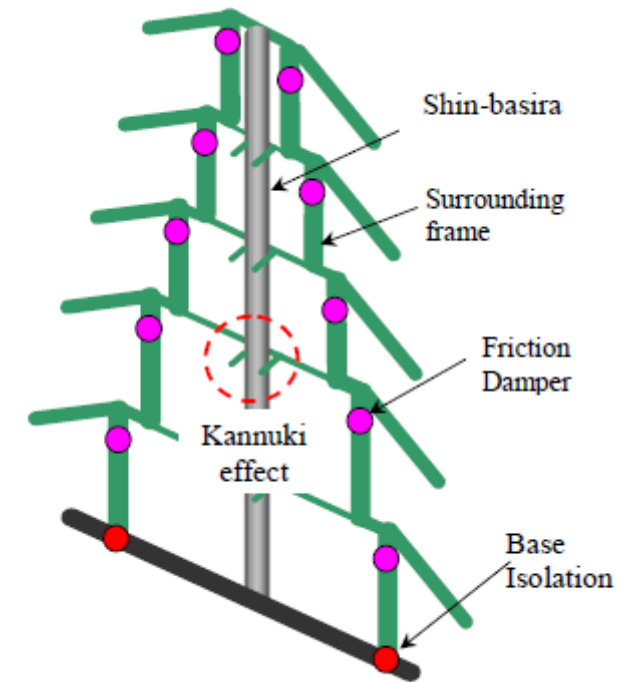


Figure . 4: Analysis model of the pagoda

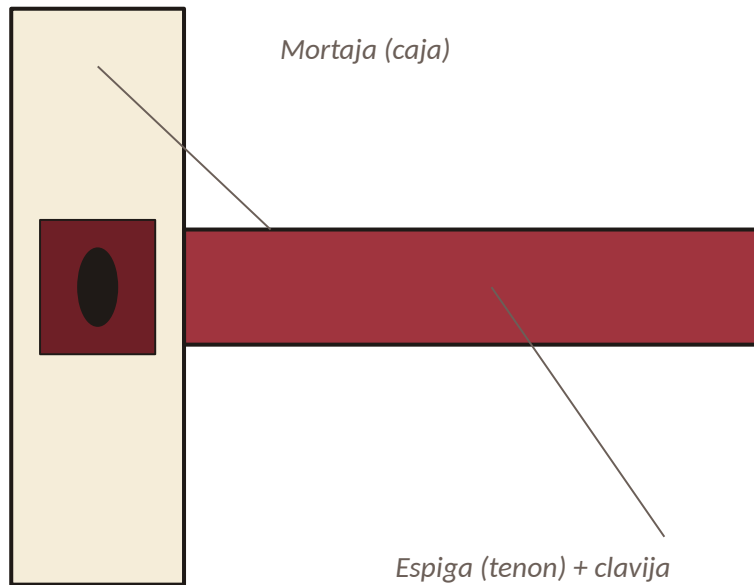


PRINCIPIO 2 DE 3

Uniones de espiga y caja

Disipación por fricción y deformación controlada · sin un solo clavo

UNIÓN MORTISE & TENON



Flexibilidad controlada

La madera cede sin romperse; las juntas admiten pequeños desplazamientos.



Amortiguamiento por fricción

El roce entre espiga y caja disipa energía sísmica como calor, sismo tras sismo.

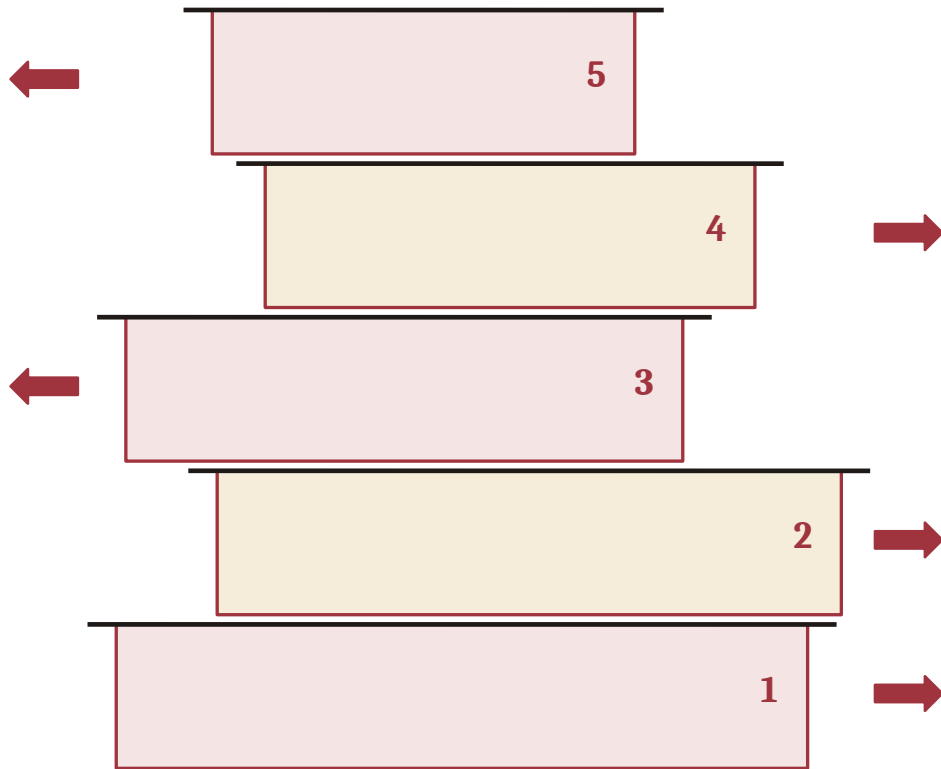


Redundancia estructural

Miles de uniones distribuyen esfuerzos; ninguna concentra carga crítica.

Pisos independientes: la "pila de cajas"

Cada nivel apoya sobre el anterior sin columnas verticales continuas



Movimiento oscilatorio alterno de cada nivel

Como un juego de bloques...

Las pagodas tradicionales no tienen columnas que atraviesen toda su altura. Cada piso es un módulo estructural completo apoyado sobre el anterior.

Desacople dinámico

Cada nivel puede oscilar con su propia frecuencia natural.

Aleros profundos

Actúan como contrapesos ("efecto balancín") que estabilizan al piso.

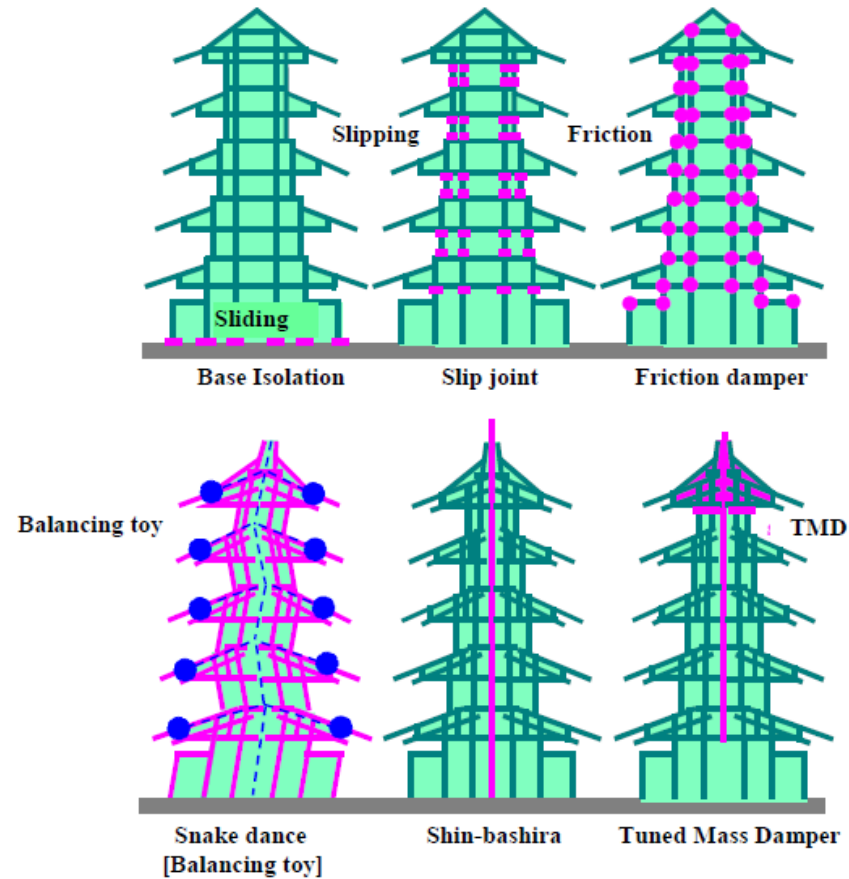
Deslizamiento controlado

Ante sismos fuertes las uniones ceden antes de romperse.

Sin resonancia global

El sistema no amplifica una única frecuencia sísmica dominante.

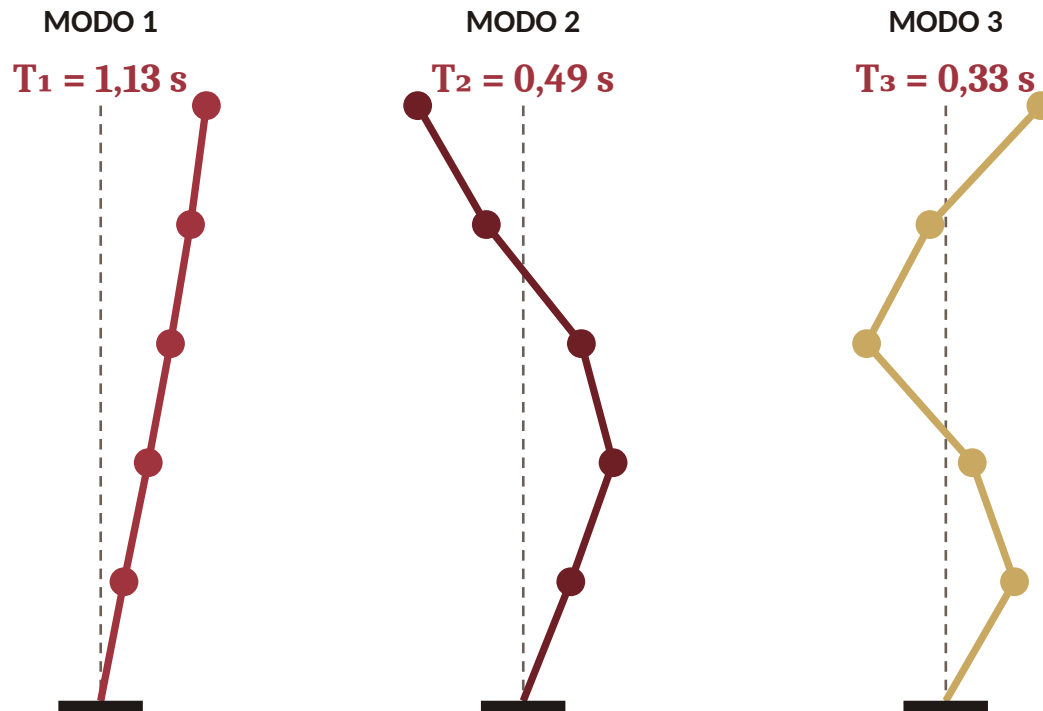
Pisos independientes: la "pila de cajas"





La firma modal de la pagoda

Períodos naturales medidos en Hōryū-ji: riqueza modal en lugar de un modo dominante



El Modo 3 es la "danza de serpiente": pisos adyacentes en contrafase

¿Por qué importa?

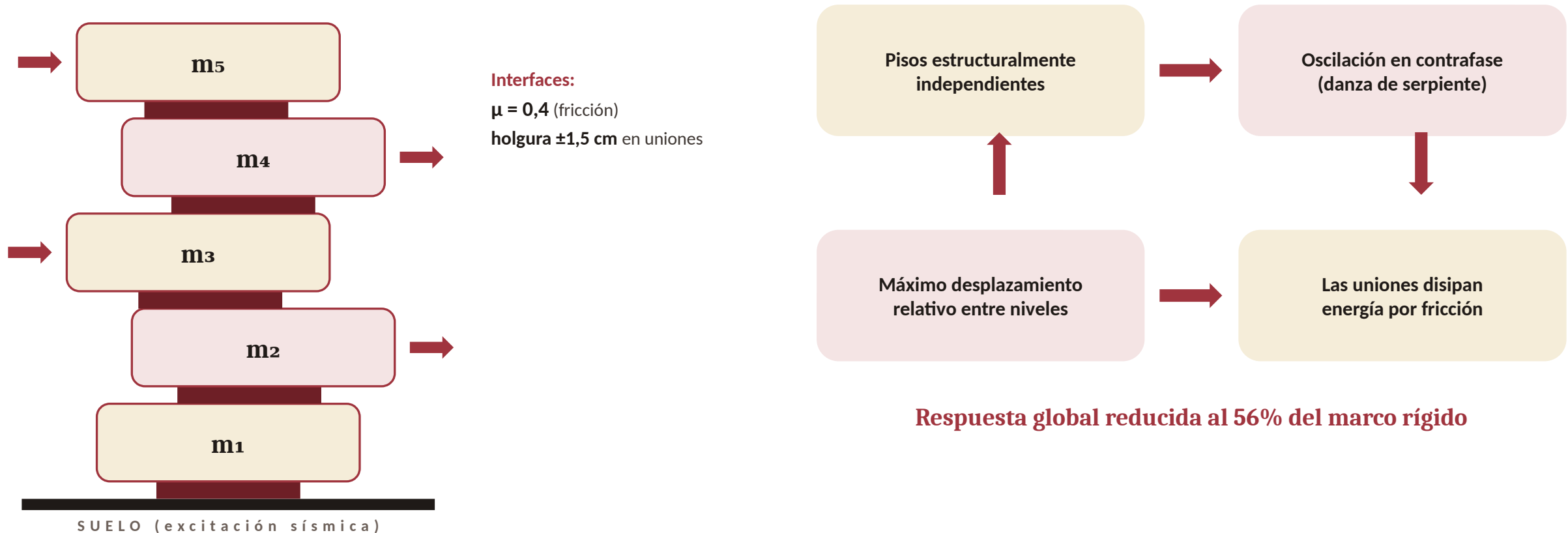
Edificio rígido convencional: el 1er modo concentra típicamente más del 80% de la masa participante. La estructura responde como un solo péndulo: si esa frecuencia coincide con el sismo, hay resonancia global.

Pagoda: la masa participante se reparte entre los tres primeros modos (factores de participación significativos en los 3, según Nakahara et al.). Ningún modo único captura la respuesta: **no hay talón de Aquiles frecuencial**.

Amortiguamiento medido: 4% del crítico (Uchida et al., microtremor) — alto para una estructura histórica, gracias a la fricción distribuida en miles de uniones.

Una cadena de osciladores débilmente acoplados

Aislamiento sísmico distribuido en altura — mil años antes del aislamiento basal moderno





CASO EMBLEMÁTICO • CHINA

Pagoda de Madera de Yingxian

Shanxi, China · La pagoda de madera más alta y antigua del mundo (Dinastía Liao, 1056 d.C.)



67,31 m

de altura total

1.056 d.C.

año de construcción

7.400 t

peso estructural

54

tipos distintos de dougong (ménsulas)



Ha sobrevivido más de 40 sismos

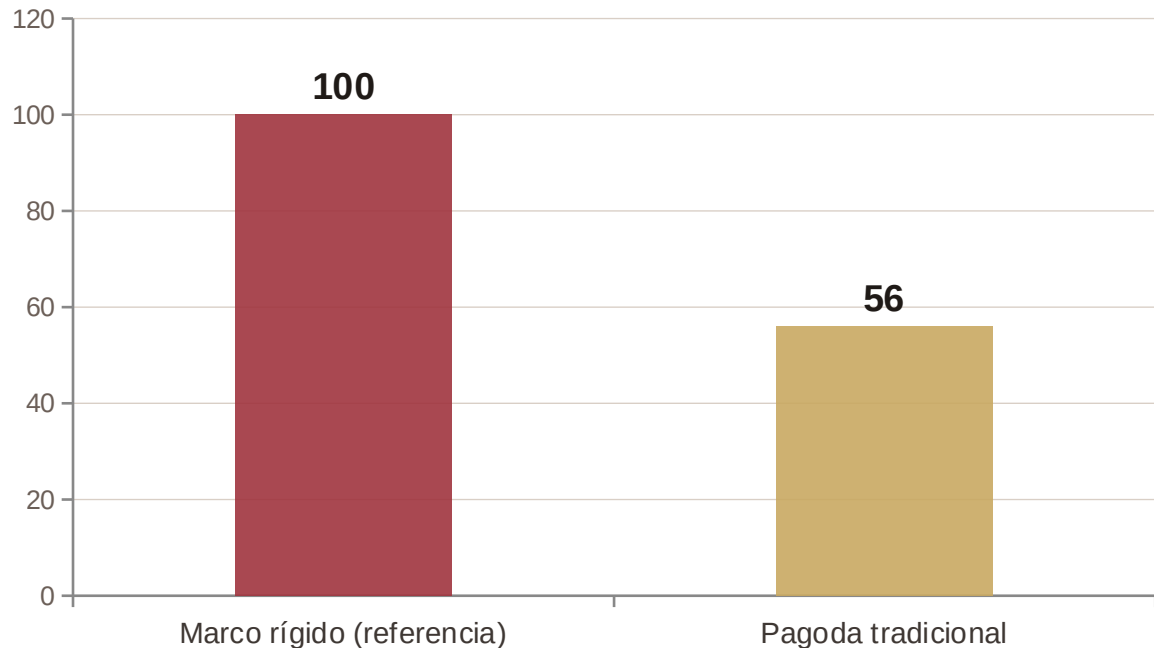
en casi 1.000 años — construida sin un solo clavo, solo con ensambles y ménsulas dougong.



Lo empírico se vuelve ciencia

Ensayos en mesa vibratoria y modelos numéricos confirman lo que 14 siglos ya demostraban

Respuesta sísmica máxima
(modelo Hōryū-ji vs. marco rígido equivalente)



Ensayo Tsukuba, Japón (2004)

- **Modelo a escala 1:5**
de la pagoda de Hōryū-ji sometido a un sismo simulado de magnitud 6+.
- **Oscilación contraria del shinbashira**
respecto a los pisos, confirmando el efecto amortiguador.
- **Reducción de respuesta al 56%**
respecto a un modelo de marco rígido equivalente.
- **Período fundamental medido: 1,1 s**
sistema flexible, muy alejado del rango peligroso de resonancia.



LEGADO CONTEMPORÁNEO

Del templo al rascacielos

El principio del shinbashira aplicado a la ingeniería contemporánea

TRADICIÓN

Pagoda Hōryū-ji

Siglo VII • 32,5 m



- Shinbashira de madera de hinoki
- Oscilación por péndulo pasivo
- Disipación por fricción en uniones

APLICACIÓN MODERNA

Tokyo Skytree (2012)

La torre más alta de Japón • 634 m



- Núcleo central de hormigón armado
- Actúa como amortiguador de masa afinada
- Diseño explícitamente inspirado en el shinbashira

1.400 años de sabiduría estructural, ahora a 634 metros de altura.

LEGADO CONTEMPORÁNEO • CHINA

Jin Mao Tower • Shanghái

1999 • 421 m • La pagoda hecha rascacielos por SOM (Adrian Smith / William Baker)



421 m

altura total

88

pisos (número auspicioso • 发)

200 km/h

resistencia a tifones

PRINCIPIOS DE PAGODA TRADUCIDOS AL RASCACIELOS

- Núcleo octagonal de hormigón armado
(*shinbashira moderno*) • 16 tramos escalonados 1/8 más cortos
(*proporciones de pagoda*) • Piscina en el piso 57 = amortiguador pasivo (*TMD hídrico*)



MÁS ALLÁ DE LA INGENIERÍA

Simbolismo y Geomancia

La pagoda como puente entre lo terrenal y lo sagrado

ICONOGRAFÍA

Buda y fusión sino-budista

Imágenes de Shakyamuni y Gautama Buda en abhaya mudra (gesto de no-temor). Wu Hung documentó cómo, en el arte Han, el simbolismo budista se fusiona con tradiciones autóctonas chinas en un sistema propio.

SUERTE ACADÉMICA

Pagodas y exámenes imperiales

Se creía que rezar en una pagoda daba suerte en los exámenes imperiales (科举). Cuando la pagoda de Yihuang colapsó en 1210, los locales lo atribuyeron al fracaso de los candidatos. La reconstrucción de 1223 grabó los nombres de los aprobados para revertir la mala fortuna.

NUMEROLOGÍA

Siempre un número impar

Las pagodas tradicionales tienen 3, 5, 7 o 9 pisos: números impares considerados yang (masculino, activo, celestial). La única excepción notable: la pagoda orientalista de Sir William Chambers en Kew Gardens, Londres (s. XVIII), con 10 pisos.

SŌRIN · 相輪

El pináculo que atrapa demonios

El sōrin (aguja ornamental de la cúspide) atraía rayos: la tradición interpretó esto como que "atrapaba demonios". Hoy muchos sōrin están conectados a tierra: la superstición milenaria se convirtió en pararrayos.

La Pagoda Xumi (Hebei, 636 d.C. · Dinastía Tang) ejemplifica esta síntesis: geometría, geomancia y estructura como una sola disciplina.

Cuando la cultura pop honra a la ingeniería

Mil años de mecánica estructural, disfrazados de juguete y de videojuego

弥次郎兵衛 · YAJIROBE

El juguete del equilibrio



Juguete tradicional japonés

de madera. Su estructura — pesos laterales apoyados en un solo punto — es un péndulo pasivo estable frente a perturbaciones.

En sismología estructural:

el paper de Nakahara et al. (Takenaka Corp.) lista el **"Balancing Toy Effect" (efecto Yajirobe)** entre los 7 mecanismos oficiales de resistencia sísmica de la pagoda Hōryū-ji.

Bonus otaku: también es el samurái compañero de Goku en Dragon Ball Z — bautizado en homenaje al mismo juguete.



ポケットモンスター · SPROUT TOWER

La Torre Bellsprout



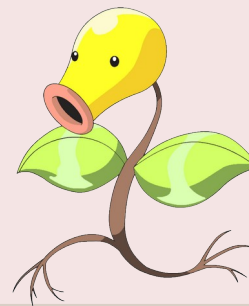
Pokémon Oro/Plata (1999), Ciudad Violet.

Una pagoda de tres pisos que oscila constantemente porque un Bellsprout gigante recorre su eje central.

En términos de ingeniería:

es una traducción literal del **shinbashira** al lenguaje del videojuego. El brote gigante es el pilar central; su movimiento es la disipación pasiva de energía.

Inspiración real: los diseñadores de Game Freak modelaron la torre a partir de las pagodas budistas de Kioto y Nara.



CONCLUSIONES

Lecciones ancestrales para la ingeniería sísmica

01

La flexibilidad supera a la rigidez

Frente al sismo, las estructuras que oscilan y disipan energía resisten mejor que las que resisten frontalmente.

02

El aislamiento de base ya existía

Uniones flexibles, apoyos deslizantes en piedra e independencia entre pisos son formas ancestrales de aislamiento sísmico.

03

El TMD tiene un origen milenario

El shinbashira anticipa en 14 siglos el concepto moderno de Tuned Mass Damper hoy usado en rascacielos.

04

Aprender del patrimonio es innovar

Estudiar estructuras antiguas no es arqueología: es investigación aplicada a la ingeniería sísmica contemporánea.



Referencias

Hong, N. K., & Hong, S. G. (2017). Parametric simulation of multi-level rigid blocks under horizontal excitations (Paper N° 4594). En Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, Chile.

Menon, A., Shukla, S., Samson, S., Aravaind, N., Romão, X., & Paupério, E. (2017). Field observations on the performance of heritage structures in the Nepal 2015 earthquake (Paper N° 2465). En Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, Chile.

Nakahara, K., Hisatoku, T., Nagase, T., & Takahashi, Y. (2000). Earthquake response of ancient five-story pagoda structure of Horyu-ji Temple in Japan (Paper N° 1229). En Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Auckland, Nueva Zelanda.

Wood, R. L., Mohammadi, M. E., Barbosa, A. R., Kawan, C. K., Shakya, M., & Olsen, M. J. (2017). Structural damage assessment of a five tiered pagoda style temple in Nepal (Paper N° 2915). En Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, Chile.

Xiong, H. B., Wu, L., Zhou, M. H., & Zheng, Q. S. (2017). Static behavior of Chuandou wooden frames under lateral load (Paper N° 3941). En Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, Chile.



INGENIERÍA SÍSMICA • ARQUITECTURA ANCESTRAL

Sistemas de Protección Sísmica en el Lejano Oriente

¿Por qué las pagodas resisten los terremotos?

Polymetis – Diego Ramírez



Chūreitō • Fujiyoshida, Yamanashi

EXPLORA LA PLATAFORMA

53 aplicaciones de ingeniería estructural y sísmica

Cálculo estructural, análisis sísmico y validación numérica –
directo desde el navegador. Uso libre y sin registro.

NCh 2369 · 433 · 2745

ACI 318 / 350

AISC 341 / 360

ASCE 7 / 41

polymetis.cl
VISITA · DESCARGA · COMPARTE