

P

INGENIERÍA ESTRUCTURAL · ARQUITECTURA MEDIEVAL

El esqueleto de piedra

Cómo las catedrales góticas inventaron el outrigger 800 años antes que el rascacielos

POLYMÉTIS — Diego Ramírez



Notre-Dame · Amiens · Beauvais —

EL PROBLEMA

Estás de pie a 40 metros bajo la piedra

Un techo de miles de toneladas flota sobre muros que son casi todo vidrio. ¿Qué lo sostiene?

01

Subir

La bóveda debe alcanzar la altura de un edificio de 13 pisos – el doble que una iglesia románica.

02

Aligerar

El muro debe desaparecer: sustituirlo por ventanales para que entre la luz divina.

03

Con un material terco

La piedra resiste a compresión, pero prácticamente nada a tracción. No admite flexión.

EL DILEMA ESTRUCTURAL

Más alto y **más ligero** significa bóvedas que empujan **hacia afuera**. Ese empuje horizontal volcaría el muro.

El Estilo gótico debe responder la siguiente pregunta:

¿Cómo soporto el empuje lateral?

EL MATERIAL

La piedra no admite tracción

En mampostería, el fallo no es por aplastamiento: es por inestabilidad. Y eso lo cambia todo.

Solo compresión

La fábrica de piedra transmite cargas por empuje puro. La flexión es inadmisibles: donde aparece tracción, la junta se abre.

Tensiones bajísimas

Los esfuerzos reales son una fracción mínima de la resistencia de la piedra. La resistencia sobra; lo que se juega es la estabilidad.

Falla por mecanismo

Si se forman suficientes rótulas, la estructura se convierte en un mecanismo y colapsa — aunque ninguna piedra se haya roto.

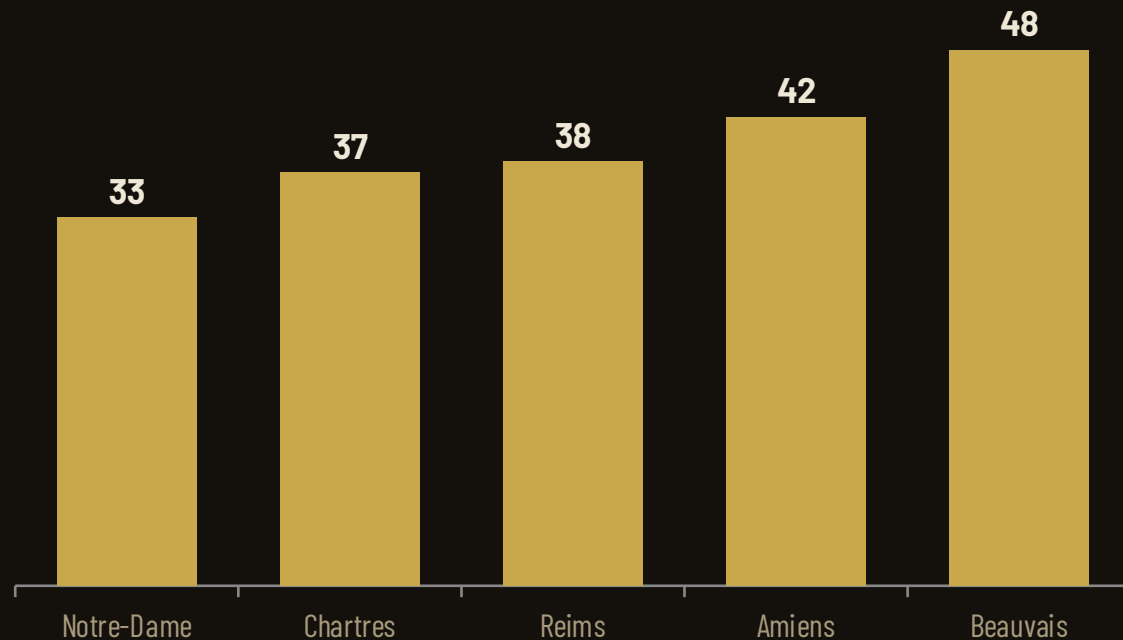
Consecuencia radical: *con un material que solo comprime, la geometría **es** la estructura. Diseñar es dar forma al recorrido de las fuerzas.*

Fuente: J. Heyman, "The Stone Skeleton", Int. J. Solids Structures, 1966.

DE LO ROMÁNICO A LO GÓTICO

La carrera hacia la luz

El románico dispersa las fuerzas; el gótico las concentra en un esqueleto para subir más y abrir el muro.



BEAUVAIS · EL LÍMITE

~48 m la bóveda más alta jamás intentada.

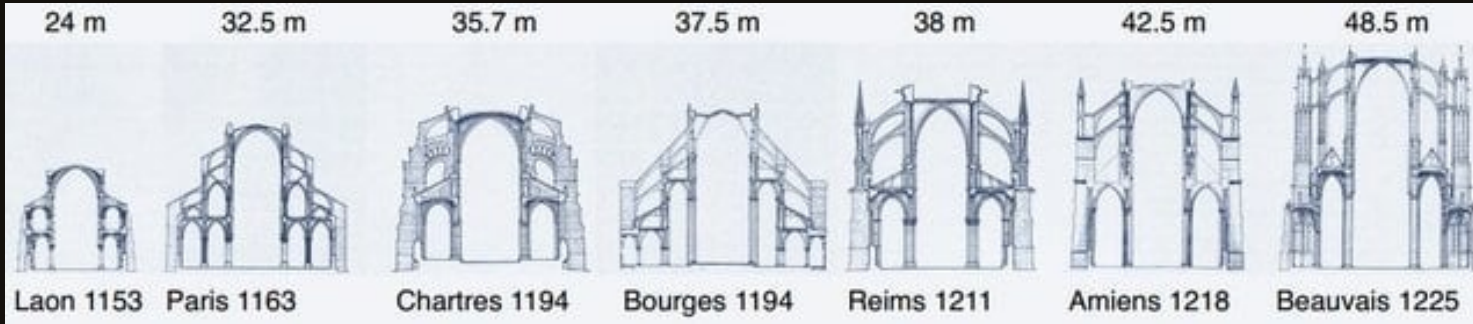
Su coro se derrumbó parcialmente en 1284: el gótico había encontrado el borde de lo posible.

1140 St-Denis · 1163 Notre-Dame · 1220 Amiens · 1284 colapso de Beauvais

Alturas de bóveda de valor comúnmente citado. Cronología según Heyman (1966).

DE LO ROMÁNICO A LO GÓTICO

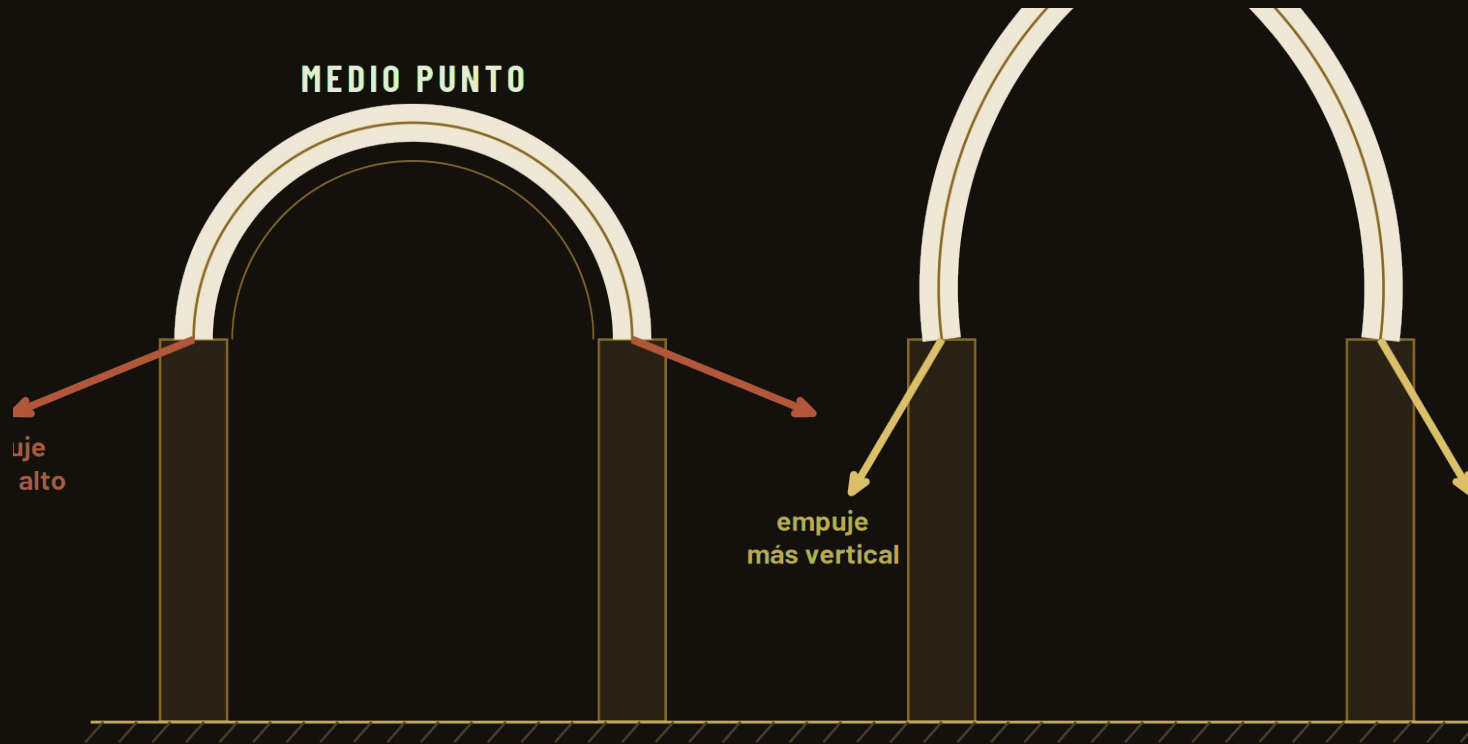
La carrera hacia la luz



A nonlinear approach to the wind strength of Gothic Cathedrals: The case of Notre Dame of Paris – Vanucci, et. al.

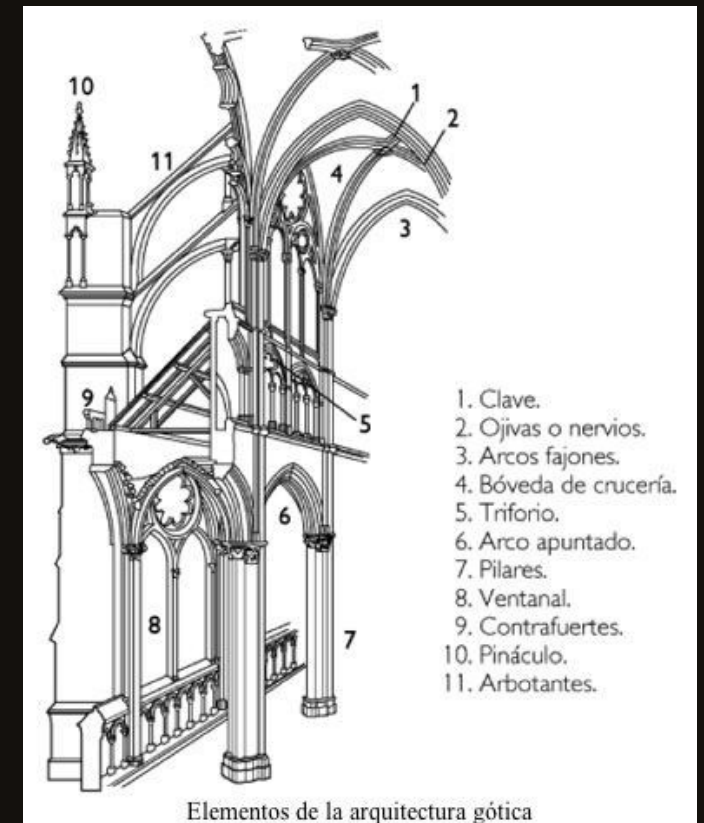
El arco apuntado

La misma luz, menos empuje lateral: el arco ojival inclina la resultante hacia la vertical.



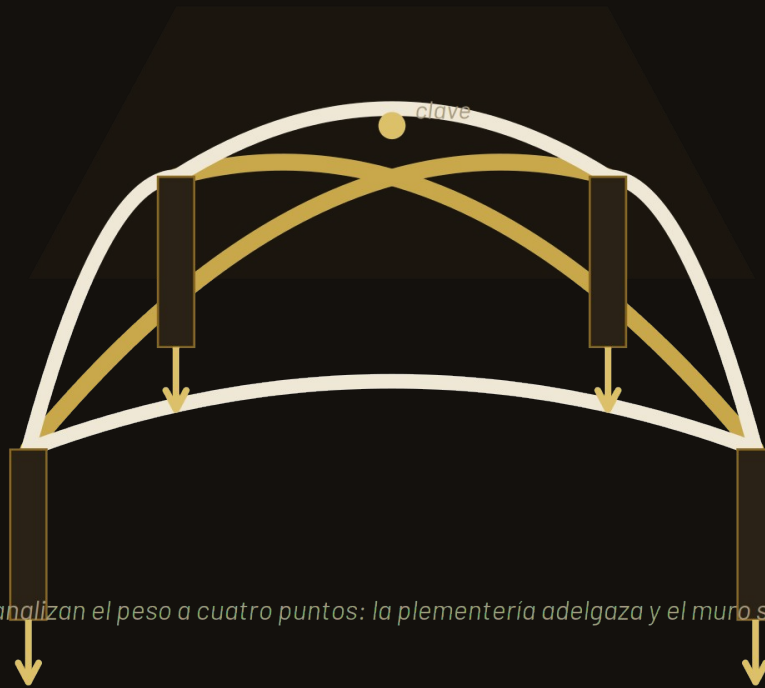
A igual luz, el arco apuntado inclina la resultante: menor empuje lateral que descargar y contener

El arco apuntado desacopla, además, la altura de la luz: distintos vanos pueden alcanzar la misma cota.



La bóveda de crucería

Los nervios recogen el peso y lo llevan a cuatro puntos: el muro queda libre para volverse vidrio.



Los nervios canalizan el peso a cuatro puntos: la plementería adelgaza y el muro se abre en vidrio

■ **Concentración**

Las cargas viajan por los nervios a los pilares de esquina, no por toda la superficie.

■ **Plementería ligera**

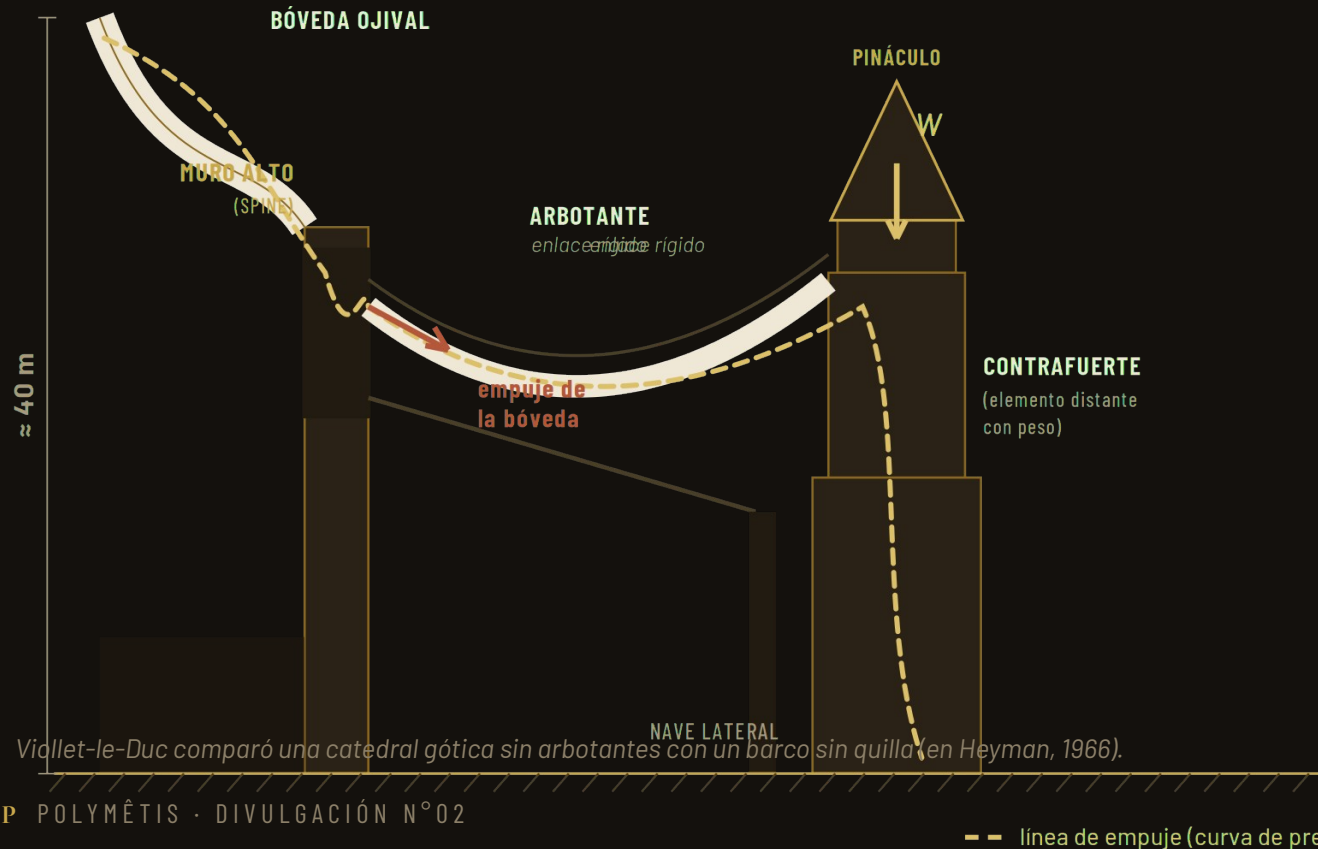
Entre nervios, el relleno adelgaza: la bóveda pesa y empuja menos.

■ **Muro liberado**

Sin muro portante continuo, el paño se abre en grandes ventanales.

El arbotante

Un arco que salta la nave lateral y entrega el empuje de la bóveda a un contrafuerte exterior con peso.

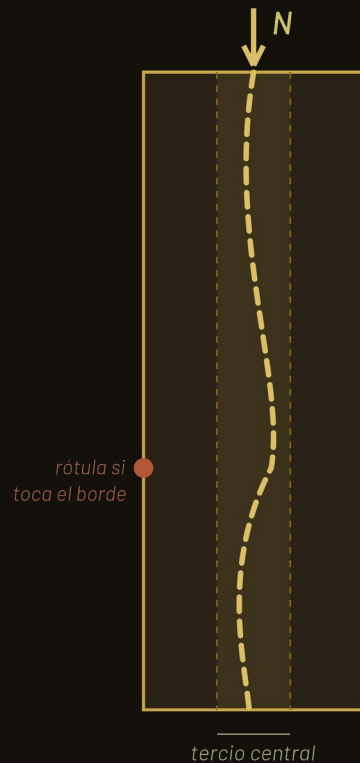


EL RECORRIDO DE LA FUERZA

- 1 Bóveda** empuja hacia afuera en el arranque.
- 2 Arbotante** cruza sobre la nave lateral y capta ese empuje.
- 3 Contrafuerte** lo recibe; el pináculo lo carga y encamina la resultante hacia abajo.
- 4 Suelo** la fuerza baja contenida dentro de la piedra.

La línea de empuje

Todo el sistema persigue una sola cosa: mantener la curva de presiones dentro de la piedra.



REGLA DEL TERCIO CENTRAL

Si la línea de empuje se mantiene dentro del tercio central de la sección, **no aparece tracción**: la mampostería trabaja solo a compresión, que es lo único que la piedra sabe hacer.

TEOREMA DE SEGURIDAD

Basta con encontrar **una sola** línea de empuje en equilibrio contenida en la fábrica para garantizar que la estructura es estable — no hace falta que sea la real.

Fuente: J. Heyman (1966), a partir de la regla del tercio central de la ingeniería de fábrica.

Estabilidad, no resistencia

Como la resistencia sobra, la seguridad de una fábrica se mide con geometría, no con tensiones.

FACTOR DE SEGURIDAD GEOMÉTRICO

Es cuánto **más gruesa** es la sección real que la mínima capaz de contener una línea de empuje en equilibrio.

El fallo llega cuando se forman suficientes **rótulas** para convertir la estructura en un mecanismo — no cuando la piedra se aplasta.

EL TEOREMA DE LOS 5 MINUTOS

“

Si al descimbrar un arbotante éste se sostiene cinco minutos, se sostendrá quinientos años.

Que aguante ya es prueba experimental de que existe una línea de empuje admisible dentro de la piedra. La estabilidad no depende del tiempo.

FUNCIÓN DISFRAZADA DE ORNAMENTO

El pináculo no es (solo) decoración

Ese remate afilado sobre el contrafuerte hace un trabajo estructural muy concreto.

01

Añade peso vertical

La masa del pináculo carga la cabeza del contrafuerte justo donde llega el arbotante.

02

Endereza la resultante

Sumado al empuje que baja del arbotante, dirige la resultante hacia la vertical del pilar.

03

Mantiene el empuje dentro

Así la línea de empuje no se escapa por el borde: el contrafuerte no vuelca.



Lo levantaron sin calcularlo

No hay memorias de cálculo góticas. El método era otro: proporción, cimbra y prueba con la obra misma.

Proporción

Reglas geométricas (relaciones como $\sqrt{2}$) fijaban espesores y alturas a partir de la planta, sin teoría de fuerzas.

Cimbra

Encofrados de madera (la cimbra) sostenían arcos y bóvedas hasta cerrar la clave — la pieza clave del oficio.

Prueba y error

Se avanzaba experimentando con modelos y con la propia fábrica; los colapsos recalibraban las reglas.

Secreto de logia

El saber vivía en las logias de canteros; casi con certeza no sabían resolver ni un paralelogramo de fuerzas.

Fuente: J. Fitchen, "The Construction of Gothic Cathedrals"; J. Heyman (1966).

DE LA INTUICIÓN A LA CIENCIA

La ingeniería moderna les da la razón

Fotoelasticidad, análisis límite y modelos numéricos confirman lo que el oficio ya sabía — y revelan al viento como carga clave.

Fotoelasticidad

Robert Mark (Princeton) cargó modelos plásticos de catedrales y visualizó las trayectorias de tensión: el flujo real de fuerzas, hecho visible.

Análisis límite

Heyman llevó la teoría plástica de pórticos a la fábrica: teoremas de seguridad y colapso que formalizan la intuición medieval.

Modelos numéricos

El método de los elementos finitos (p. ej. Roca et al., Catedral de Barcelona) reproduce empujes y mecanismos con la geometría real.

Fuentes: R. Mark, "Experiments in Gothic Structure" (rev. Condit, 1983); Heyman (1966); Roca et al., SAHC (1998).

El viento: lo que el arbotante ya resistía

El análisis no lineal moderno confirma qué elemento decide la supervivencia de la catedral en un temporal.

VIENTO CRÍTICO · NOTRE-DAME

222 km/h

la ráfaga (a 10 m del suelo) que llevaría a Notre-Dame al colapso — cerca de **375 km/h** en la cubierta.

*El mayor viento jamás medido en Francia (360 km/h) fue en alta montaña: **el colapso por viento es muy improbable.***

EL MECANISMO DE FALLA

El colapso empieza cuando el viento **daña los arbotantes**. Solo entonces el muro alto rota —con cuatro rótulas en la bóveda y su base— y la bóveda cae.

***El arbotante es** el sistema que resiste la carga lateral: exactamente el papel que hoy cumple un outrigger frente al viento en una torre.*

El viento sí es una amenaza real: la tormenta Egon (2017, 146 km/h) destruyó el rosetón de la catedral de Soissons.

Fuente: Vannucci, Masi & Stefanou (2018), FEM no lineal 3D de la no-tracción, Notre-Dame de París.

¿Qué es un outrigger?

“ Estructuras horizontales rígidas que mejoran la rigidez y resistencia al volcamiento de un edificio conectando su núcleo con columnas distantes.

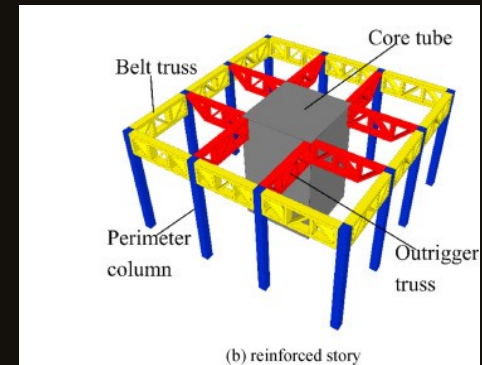
— definición del CTBUH, Outrigger Working Group (2012)

El principio tiene milenios. Los outriggers más antiguos son los brazos que unen el casco de una canoa polinesia a su flotador lateral (ama): un pequeño elemento distante, apalancado, impide que la nave estrecha vuelque. Mismo truco, en el mar.

Fuente: CTBUH, “Outrigger Design for High-Rise Buildings” (2012).

LA MISMA IDEA, 800 AÑOS ANTES

El arbotante es un outrigger medieval



Núcleo/espina = muro alto · **Enlace rígido** = arbotante / outrigger · **Elemento distante** = contrafuerte / columna perimetral

LEGADO CONTEMPORÁNEO

Del templo al rascacielos

El sistema outrigger es hoy el esquema preferido de las torres supertall.

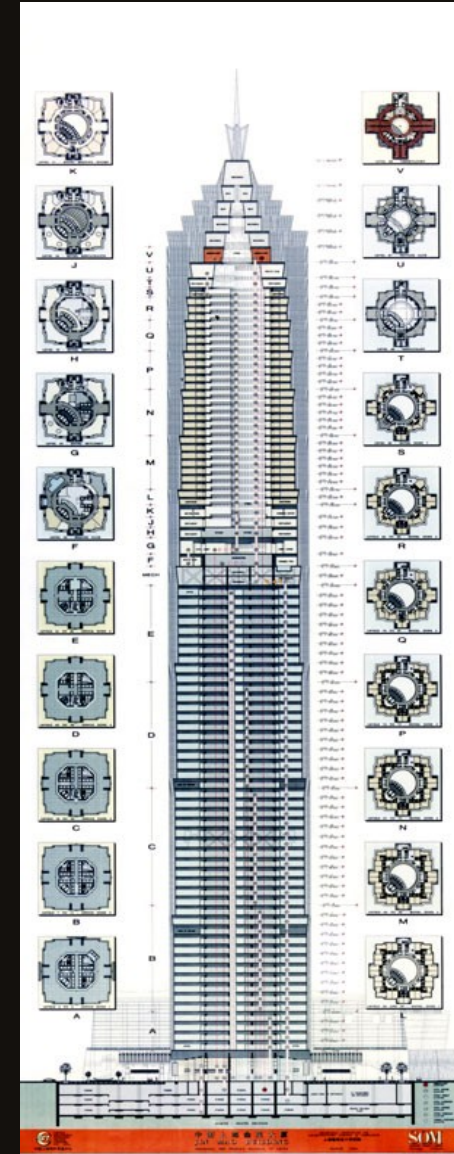
SHANGHÁI · 1999

Jin Mao

421 m

Ménsulas de outrigger que atan el núcleo a las mega-columnas perimetrales.

https://old.skyscraper.org/EXHIBITIONS/CHINA_PROPHECY/jin_mao.php



LEGADO CONTEMPORÁNEO

Del templo al rascacielos

El sistema outrigger es hoy el esquema preferido de las torres supertall.

TAIPÉI · 2004

Taipei 101

508 m

Outriggers en varios niveles y un amortiguador de masa de 660 toneladas.

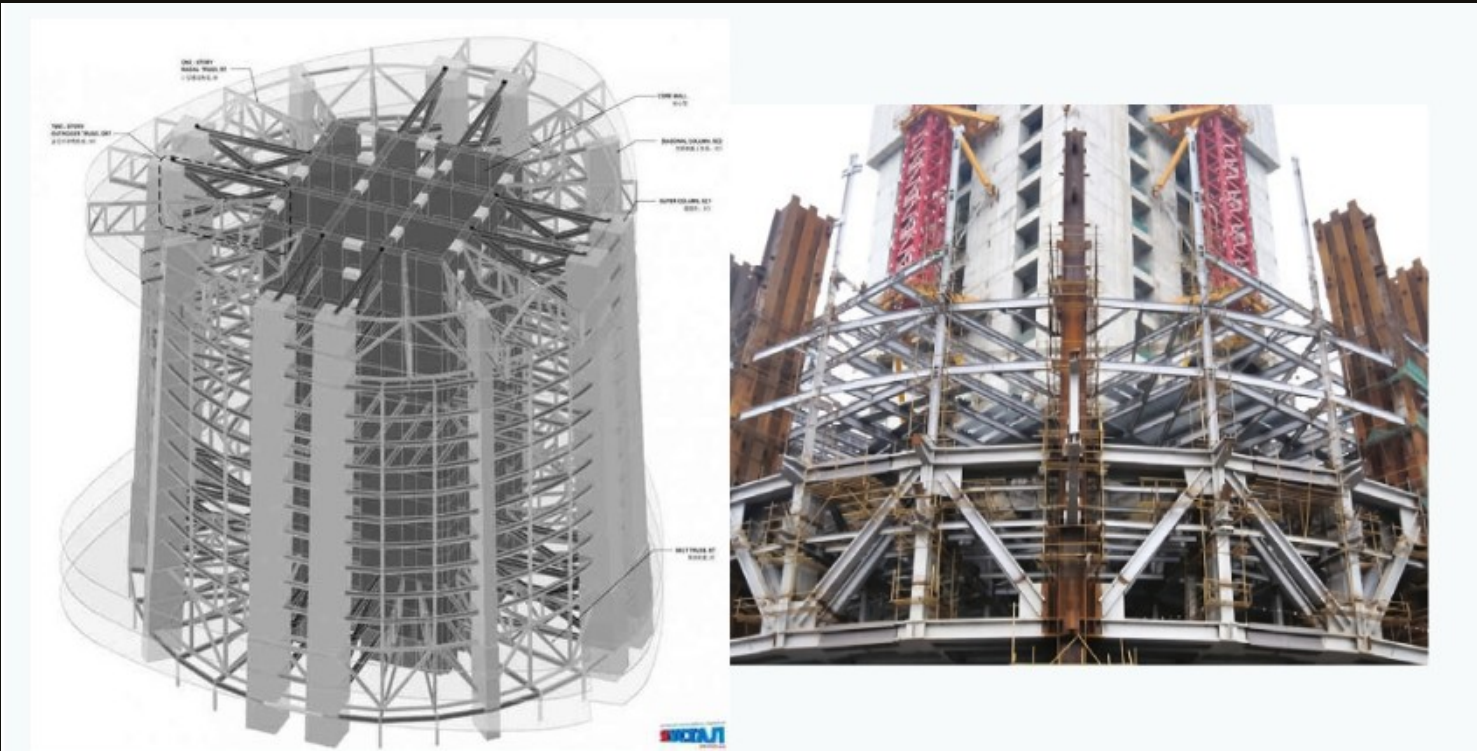


Outrigger Structural System for High Rise Buildings -> <https://www.youtube.com/watch?v=N-PHoBwYK4I>

LEGADO CONTEMPORÁNEO

Del templo al rascacielos

El sistema outrigger es hoy el esquema preferido de las torres supertall.



SHANGHÁI · 2015

Shanghai Tower

632 m

Outriggers y cinturones de celosía tejen el núcleo con ocho mega-columnas.

<https://koerstue.nl/koersief/online/general/shanghaitower>

El “núcleo arriostrado” — buttressed core

El edificio más alto del mundo lleva, literalmente, un contrafuerte gótico en su nombre estructural.



*Cada ala arriostra a las otras contra el núcleo central:
un contrafuerte gótico llevado a planta*

“Buttressed core”: término empleado por los proyectistas (SOM) para el sistema estructural del Burj Khalifa.

BURJ KHALIFA · Dubái · 2010 · **828 m**

Su ingeniero (SOM / William Baker) llamó ***“buttressed core”***— núcleo arriostrado — a su planta en Y: tres alas donde **cada una hace de contrafuerte de las otras** contra un núcleo central.

*El mismo verbo que sostenía Amiens y Beauvais nombra hoy la estructura de la torre más alta jamás construida.
Ochocientos años, una sola idea.*

CONCLUSIONES

Lecciones de piedra para la ingeniería de hoy

01

La forma sigue a la fuerza

Arco, bóveda, arbotante y pináculo no son adorno: son el recorrido dibujado de las cargas.

02

La geometría es la estructura

Con un material sin tracción, la seguridad se mide con geometría — dónde cae la línea de empuje.

03

El outrigger tiene 800 años

Atar un elemento distante con un enlace rígido para no volcar es medieval antes que moderno.

04

Estudiar el patrimonio es innovar

Leer estructuras históricas no es arqueología: es investigación aplicada a la ingeniería actual.

REFERENCIAS

Fuentes

- Heyman, J. (1966). The Stone Skeleton. *International Journal of Solids and Structures*, 2(2), 249-279.
- Fitchen, J. (1961). *The Construction of Gothic Cathedrals*. University of Chicago Press.
- Mark, R. (1982). *Experiments in Gothic Structure*. MIT Press. (Reseña: Condit, C. W., *Technology and Culture*, 24(2), 1983.)
- Vannucci, P., Masi, F. & Stefanou, I. (2018). A nonlinear approach to the wind strength of Gothic Cathedrals: the case of Notre Dame of Paris.
- Roca, P., Pellegrini, L., Oñate, E. & Hanganu, A. (1998). *Analysis of the Structure of Gothic Cathedrals – Application to Barcelona Cathedral*. SAHC, CIMNE, Barcelona.
- Choi, H., Ho, G., Joseph, L. & Mathias, N. (2012). *Outrigger Design for High-Rise Buildings*. CTBUH, Chicago.
- Takva, Y., Takva, Ç. & İlerisoy, Z. Y. (2023). Effect of outrigger system in high-rise buildings on structural behavior and cost.
- ArchAdemia (2025). *Breaking Down a Gothic Cathedral: Structural Features You Need to Know*.

AVISO *Material de divulgación con fines educativos. Simplifica el comportamiento estructural y no constituye una guía de diseño ni sustituye la normativa vigente ni el juicio de un profesional. Las cifras son indicativas. POLYMÊTIS no asume responsabilidad por usos derivados de este contenido.*

P

INGENIERÍA ESTRUCTURAL · ARQUITECTURA MEDIEVAL

El esqueleto de piedra

Cómo las catedrales góticas inventaron el outrigger 800 años antes que el rascacielos

POLYMÉTIS — Diego Ramírez



Notre-Dame · Amiens · Beauvais —

EXPLORA LA PLATAFORMA

+90 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