

La revolución de las formas barrocas en zonas sísmicas

Roberta Fonti

Technische Universität München

Resumen

El proyecto de edificios de fábrica en zonas sísmicas requiere el empleo elementos constructivos, concebidos como dispositivos pasivos ocultos, para reducir los daños producidos por terremotos. Fue la necesidad básica de estas estructuras ocultas la que provocó una clara división entre «apariencia» y «estructura» en el proyecto de los edificios, y obligó a los proyectistas a llevar al límite sus conocimientos técnicos. Estos avances en la construcción de edificios son el tema central de este artículo. En particular, se analizará el uso de estos elementos en el proyecto de formas barrocas en zonas sísmicas entre los siglos XVIII y XX, elementos que quedaban ocultos por estucos y revestimientos. Se expondrá el caso del uso de «contrafuertes desconectados» contruidos contra las fachadas principales de las iglesias, que conducen a las fachadas cóncavas típicas de la arquitectura barroca, junto con el uso de lunetos de «arcos ciegos» para contrarrestar y redistribuir las acciones horizontales. Se presentarán algunos casos prácticos ilustrativos de México e Italia. Para explicar el uso de los lunetos de «arcos ciegos» y «contrafuertes desconectados» en el proyecto se hará tomando como referencia los tratados fundamentales de Borghini y Rondelet de la primera mitad del siglo XIX.

Palabras clave: Estructuras de fábrica; bóvedas; contrafuertes; lunetos; terremotos; elementos antisísmicos.

The revolution of Baroque forms in earthquake prone areas

Abstract

The design of masonry in seismic zones requires the use of construction elements, conceived as hidden passive devices, to reduce damage caused by earthquakes. It was the fundamental need for these hidden structures that led to a clear division between «appearance» and «structure» in building design, forcing designers to push their technical knowledge to the limit. These advances in building construction are the central theme of this article. In particular, the use of these elements in the design of Baroque forms in seismic zones between the 18th and 20th centuries will be analyzed, elements that were concealed by stuccos and cladding. The case of the use of «disconnected buttresses» built against the main façades of churches, which lead to the concave façades typical of Baroque architecture, will be presented, along with the use of «blind arch» lunettes to counteract and redistribute horizontal actions. Some illustrative case studies from Mexico and Italy will be presented. To explain the use of «blind arch» lunettes and «disconnected buttresses» in the design, reference will be made to the fundamental treatises by Borghini and Rondelet from the first half of the 19th century.

Keywords: Masonry structures; vaults; buttresses; lunettes; earthquakes; anti-seismic elements.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, se ha prestado cada vez más atención a las catástrofes recurrentes debidas a riesgos naturales. Esto se debe a la grave pérdida de vidas humanas y a los enormes daños causados al patrimonio cultural. Desde diferentes ámbitos científicos se han llevado a cabo importantes estudios sobre este tema, investigando nuevos enfoques y metodologías para reducir los riesgos de los desastres para el patrimonio arquitectónico.

Se ha prestado especial atención a las medidas destinadas a reforzar los edificios históricos para que resistan los terremotos. Esto se debe a que los edificios

históricos están contruidos en su mayor parte con fábrica y se considera que los terremotos, con secuencias de fuerzas cíclicas tridimensionales que poseen un mayor componente horizontal, afectan más a los edificios de fábrica.

Aunque se han logrado avances importantes, los estudios sobre cómo las construcciones históricas de fábrica resisten los terremotos siguen siendo escasos, lo que a veces conduce a refuerzos innecesarios. Esto se debe a que estos edificios ya no son un método de construcción habitual y los tratados históricos que contienen referencias sobre el tema son escasos. Además, en estos tratados, los terremotos no se estudian de forma directa. Sólo se encuentran referencias dispersas,

que están abiertas a interpretación debido al uso de los términos ambiguos como «urti» (golpes) y «scosse irregolari» (sacudidas irregulares), por ejemplo en el tratado de G. A. Borgnis (1781–1863) *Elementi di statica architettonica*.¹ Este tratado destaca por las referencias constructivas en relación con los terremotos. Servirá de referencia, junto al tratado de J. B. Rondelet (1743–1829),² a la discusión que sigue. Ambas obras son fundamentales para entender la construcción en los siglos XVIII y XIX, Figura 1.

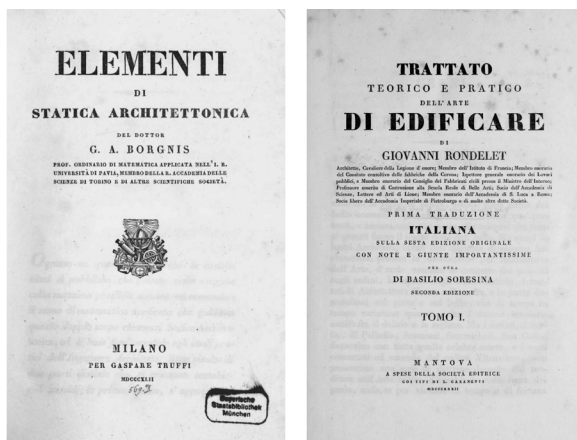


Figura 1. Portada de las ediciones italianas de los tratados de construcción de Borgnis (1842) y Rondelet (1832).

El uso extensivo de dispositivos pasivos en estructuras históricas, como tirantes de madera o metálicos (Figura 2), demuestra que era de conocimiento común que los terremotos pueden producir cargas horizontales adicionales que sacuden la fábrica.

Es bien sabido que los suelos y techos de madera, independientemente de sus condiciones estáticas y grados de libertad, durante los terremotos proporcionan a los muros de carga una acción horizontal adicional que los vuelca fuera del plano (Stellingwerff 1932, 95):

Dado que los tejados, al encontrarse en la parte más alta de los edificios, son los más expuestos a la intensidad de los movimientos sísmicos... Los tejados pueden dividirse, a grandes rasgos, en comunes y en apoyados sobre armaduras. Los que se apoyan sobre armaduras, normalmente, no dan lugar a empujes horizontales, ya que siempre hay, en la base de la cercha un tirante o algún

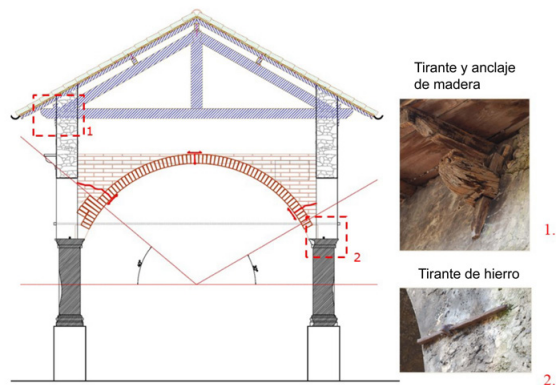


Figura 2. Castillo de Gagliano Aterno, L'Aquila, Italia. Estudio de los daños producidos tras el terremoto de L'Aquila de 2009, 2010 (Estudio de R. Fonti).

otro elemento cuya función es precisamente entrar en tracción para eliminar dichos empujes... pero, lamentablemente, la mayoría de los tejados no están sobre armaduras racionales: las vigas portantes se apoyan en las paredes sin apenas conexiones que anulen los empujes horizontales.³

Estas medidas preventivas pueden observarse tanto en estudios de casos prácticos como en normas y códigos para la reconstrucción de ciudades afectadas por terremotos (véase, por ejemplo, Vivenzio 1788). Las soluciones que se recogen en estos textos se basan en gran medida en observaciones de los daños y en las opiniones de los técnicos encargados de la reconstrucción (Figura 2).

Estas pueden ir desde soluciones dirigidas a añadir un número limitado de elementos a restricciones preventivas en las construcciones de fábrica para evitar «aperturas» durante los terremotos, hasta soluciones que permiten que la fábrica se comporte de manera dúctil.

Gino Zani (1883-1964): «Las viviendas anti-sísmicas construidas en Sicilia y Calabria pueden agruparse en tres categorías: chozas de madera; casitas de poca altura con muros ordinarios de gran espesor; y edificios con estructura de hormigón armado».⁴ (Zani 1925, p. 2) En este último caso se trata de una estructura porticada, un “esqueleto”, insertado en las paredes de fábrica (Figura 3), que plantea un problema ético sin precedentes en

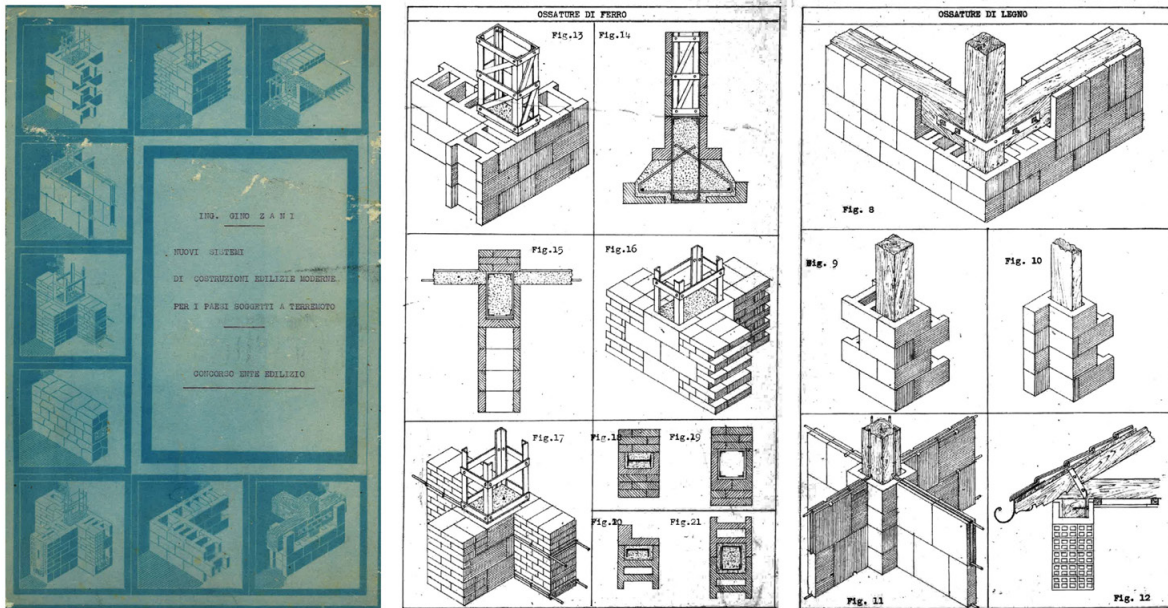


Figura 3. Diferentes tipos de esqueletos internos. (Zani 1925).

la construcción de edificios, que con el tiempo dio lugar al debate en torno a la denominada «autenticidad de las formas».⁵

Gustavo Giovannoni (1873-1947), figura clave de la historia de la construcción y de la arquitectura en Italia en la primera mitad del siglo xx, explica en *Questioni di Architettura* (1929) que la restauración de monumentos de importancia histórica situados en zonas propensas a terremotos exige «i sacrifici più gravi» (sacrificios más graves): «un contraste verdaderamente trágico entre su sistema constructivo original y la estructura porticada elástica que exigen las normas constructivas».⁶ (Giovannoni 1929, 137-138)

El debate en torno a la «autenticidad de las formas», aunque importante, no se investigará en este artículo. En su lugar, se centrará en las soluciones destinadas a permitir que las construcciones de fábrica resistan los terremotos sin la ayuda de ningún tipo de «esqueleto».

En este sentido, el decenio de 1980 marca un punto de inflexión en la comprensión y codificación de los daños causados por los terremotos en las construcciones históricas de fábrica. Antonino Giuffrè (1933-1997) llevó a cabo un estudio histórico que relacionaba el proyecto de las fábricas y su desviación de las normas técnicas recogidas en los tratados históricos,

con los mecanismos de daño y su comportamiento durante los terremotos. Basándose en observaciones directas de los patrones de agrietamiento causados por el terremoto de Avellino de 1980 en edificios históricos, pudo evaluar las características resistentes y los fallos típicos de los edificios de fábrica (Giuffrè 1991; Giuffrè y Carocci 1999).

Giuffrè también observó que los muros contruidos desviándose de las buenas prácticas de la construcción oscilarían bajo una fuerza reducida, tanto al comienzo como en el límite del colapso, independientemente de su forma (Figura 3). Además, planteó la hipótesis de que los muros de fábrica pueden oscilar sobre puntos situados en las grietas y desplazarse hacia atrás con respecto al límite externo de un muro definido por sus parámetros geométricos, por lo que poseen dimensiones finitas (Giuffrè 1991, 2):

Si no se respetan las reglas de la buena construcción, a medida que aumenta la fuerza horizontal, las conexiones internas deficientes fallan y el muro se derrumba antes de alcanzar su valor umbral. Una vez que el movimiento cinemático comienza mediante desplazamientos internos, la resistencia del muro se degrada más rápidamente que debido a la reducción natural del momento

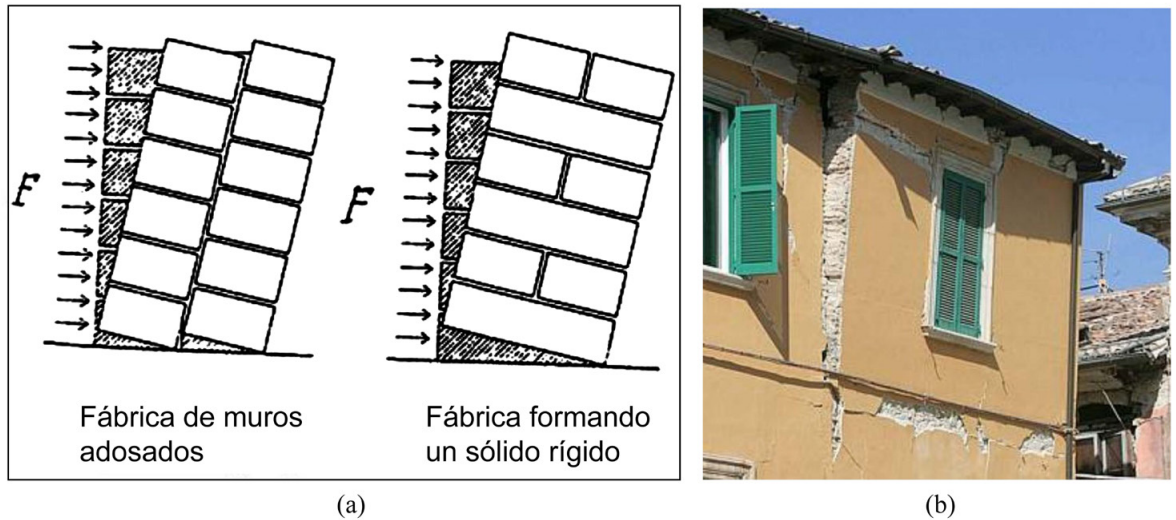


Figura 4. (a) Vuelco fuera de plano de un macizo de fábrica. Bocetos teóricos de Antonino Giuffrè (1991) reelaborados por Fonti. (b) Daños fuera del plano de un edificio, centro histórico de L'Aquila, terremoto de 2009. (R. Fonti).

estabilizador. Por lo tanto, el diagrama fuerza-desplazamiento del muro monolítico debe corregirse... [el muro] se pone en movimiento por una fuerza inferior a la necesaria para mover un muro monolítico de igual peso y espesor y, sobre todo, a medida que avanza el desplazamiento, las desconexiones internas hacen que parte del peso descanse sobre la parte trasera y no participe en el momento estabilizador. La fuerza horizontal necesaria para el equilibrio disminuye y el diagrama revela, con su mayor pendiente, un mecanismo de degradación adicional al reconocido para el cuerpo rígido.⁷

Esta idea de Giuffrè sobre los cuerpos semi-rígidos también se vio respaldada por ensayos de laboratorio.

Para distinguir entre los muros de fábrica capaces de comportarse como cuerpos rígidos y aquellos que se comportarán como semi-rígidos, Giuffrè exploró la dimensión histórica del debate en torno a las normas de construcción de muros en los tratados históricos. Además, estableció parámetros específicos para una «lectura» de las características mecánico-construccionales de los muros históricos de fábrica, Figura 5). Giuffrè comparó sus levantamientos con muros encontrados en construcciones tradicionales y observó una desviación progresiva del proyecto de muros de

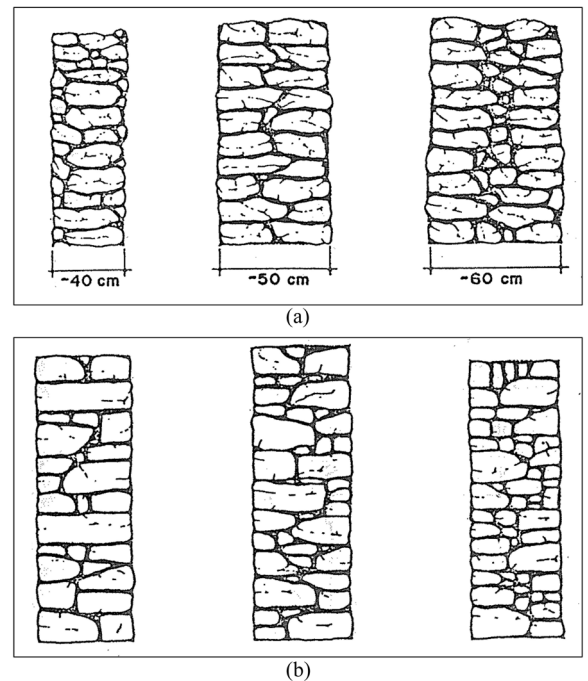


Figura 5. Lectura mecánico-constructiva de muros de fábrica. (a) Castelvete sul Calore, Campania (b) Ortigia, Siracusa (Giuffrè 1991).

fábrica respecto a las normas recogidas en los tratados históricos. Relacionó este hecho con su rendimiento y comportamiento durante los terremotos (Fonti et al. 2016, Fonti 2013).

A este respecto, vale la pena recordar las palabras de Borgnis (1842, p. 194) quien remarcó la práctica tradicional de un entrelazamiento mecánico entre las caras ocultas de las piedras para resistir los terremotos:

En algunas construcciones que deben resistir impactos y temblores irregulares, los antiguos solían dejar la cara interior de las piedras sin labrar, de manera que encajaran entre sí y se encadenaran mutuamente sin necesidad de pernos, pasadores o cementos.⁸

Pude demostrar experimentalmente esta observación investigando el caso de una fábrica de fábrica irregular situada en el centro histórico de L'Aquila, Italia. Al someter a prueba muros fuera del plano, se detectó una resistencia añadida al vuelco (Fonti 2013). Esto define un modo específico de comportamiento al vuelco (fuera del plano) que puede considerarse típico de los patrones de fábrica bien trabada (Figura 3).

El interés por la construcción correcta de los muros y el entrelazamiento de las piedras para conseguir una buena traba y mejorar su funcionamiento mecánico aparece también en tratados coetáneos del de Borgnis, como el Cavalieri San-Bertolo *Istituzioni di architettura statica e idraulica*, Figura 6.

Por otra parte, Borgnis explica que no sólo el aparejo, sino que también la labra interna de las caras de piedra es crucial para la resistencia de la fábrica a las cargas verticales. Observa que una redistribución regular de las tensiones sobre toda la superficie permitirá que la fábrica soporte mejor las altas tensiones de compresión. La fábrica puede fallar bajo cargas verticales cuando estas se concentran en puntos específicos debido a la falta de contacto en las caras internas. También señala que esto va acompañado de defectos de ejecución agravados por la mala práctica de corregir las irregularidades de la labra con el uso de una gran cantidad de mortero o cuñas de madera. En un espacio de tiempo relativamente corto, dice Borgnis, esto provocará daños notables debidos a concentraciones de tensión en puntos específicos, bien sea al deterioro de las juntas de mortero o a la presencia de cuñas de madera ocultas. Con frecuencia, lo anterior se suma

la mala práctica de labrar perfectamente el borde exterior de las piedras mientras que las juntas internas presentan una concavidad. Las piedras se asentaban sobre delgadas cuñas de madera y, después, el mortero se introducía en el hueco interior. El texto de Borgnis (1842, 193) explica con detalle el problema:

Es evidente que cuanto mayor sea el número de puntos en los que las piedras superpuestas encajen perfectamente, mayor será su capacidad para resistir una fuerte presión sobre ellas y, por el contrario, si estos puntos son pocos, aumentará la probabilidad de que se produzca una rotura. Cabe señalar a este respecto que, lamentablemente, ha prevalecido en general la mala costumbre de trabajar con inexactitud las caras de las piedras que quedan ocultas, en la suposición de que el mortero remedia el corte defectuoso; suposición errónea, ya que la resistencia que se produce en los puntos sostenidos por el simple cemento es muy diferente de la que se produce en los demás puntos en los que las piedras en contacto encajan entre sí. A los efectos negativos causados por esta práctica viciosa se suma otro uso poco recomendable, que es el de terminar completamente el trabajo de las caras visibles de las piedras antes de colocarlas. Siendo así, los albañiles se esfuerzan por colocar las piedras de manera que estas caras encajen con precisión y que las juntas sean poco visibles. Para lograr este doble objetivo, trabajan con delicadeza los bordes externos, pero dejan cóncavas y rugosas las caras que deben combinarse internamente; luego, al colocar las piedras, introducen entre ellas pequeñas cuñas de madera dura y, por último, rellenan los huecos con cemento. En el método moderno indicado, las juntas quedan subordinadas a las caras externas; por el contrario, los antiguos subordinaban las caras externas a las juntas; y para que esta práctica, favorable a la solidez, no perjudicara en absoluto la bella apariencia exterior, dejaban las caras visibles en bruto, teniendo cuidado al colocarlas de hacer sobresalir un poco las piedras, que luego se cortaban en el lugar con toda exactitud una vez terminada la obra.⁹

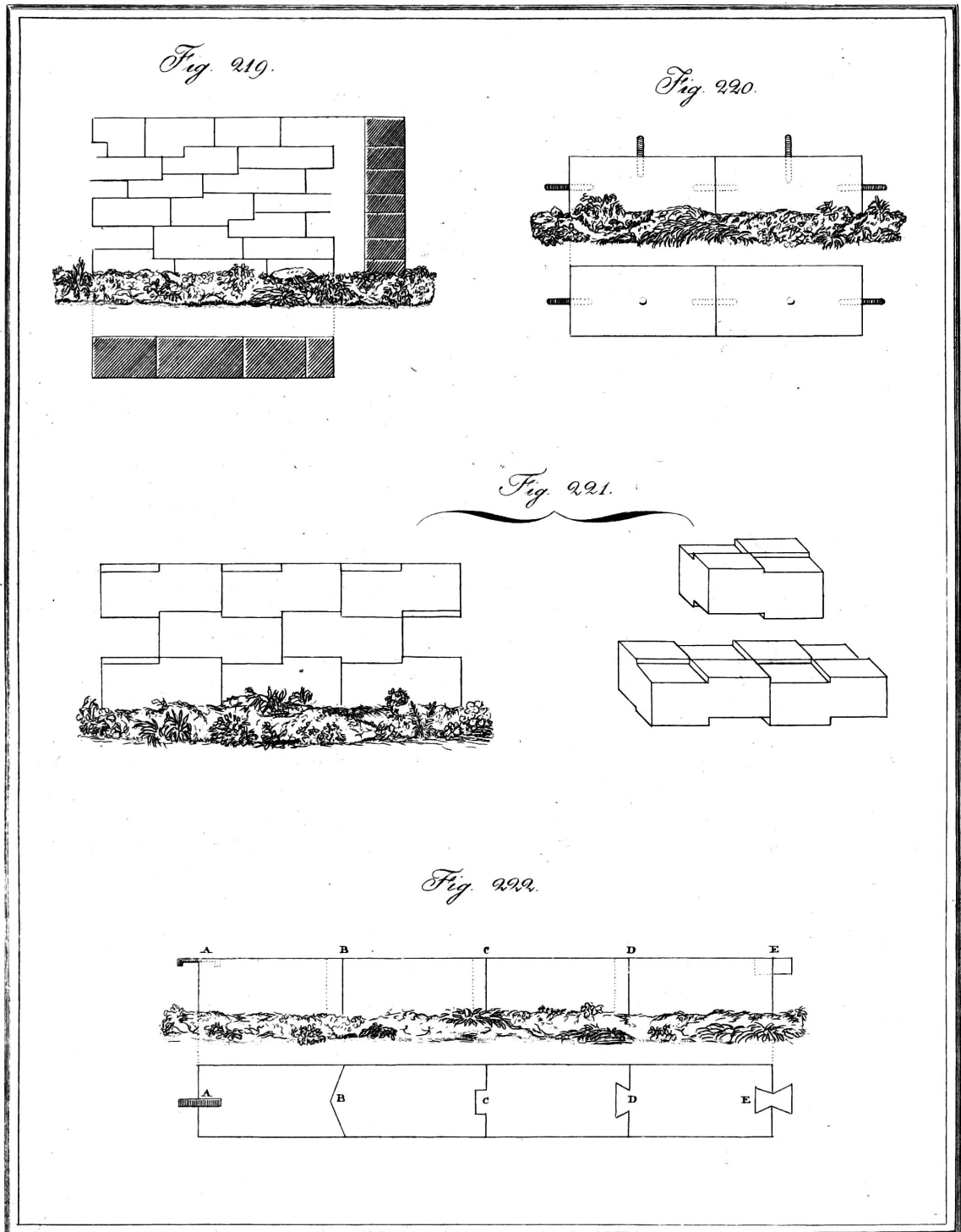


Figura 6. Ilustración de los dos métodos principales para unir mecánicamente las caras internas de las piedras presente en varios tratados italianos del siglo XIX (Cavalieri San-Bertolo 1831).

Las opiniones de Borgnis están muy influidas por el texto de Rondelet al que se ha aludido anteriormente. En el tomo II de la primera edición de su tratado dedica un apartado a “Vice des constructions modernes en pierre de taille”, los vicios de las construcciones modernas de sillería (Rondelet 1804, 2: 26), en el que afirma:

El vicio de la mayoría de las construcciones modernas de sillería no viene del hecho de que estén colocadas con mortero, sino del poco cuidado que se pone en la talla de las hiladas y en su colocación en la mayoría de las construcciones de este tipo.¹⁰

Tras describir el caso del Panteón Francés, con el empleo de tiradas exteriores bien labradas y juntas internas cóncavas, concluye (Rondelet 1804, 2: 29):

Este método absurdo, que reúne todos los defectos posibles, solo pudo haber sido imaginado por los malos obreros o los contratistas avariciosos, que solo buscan aumentar sus beneficios a expensas de la solidez de la obra.¹¹

Sus dibujos de los daños en los pilares del Panteón Francés, debidos a esta mala práctica, han sido reproducidos ininidad de veces en tratados posteriores. Para un estudio detallado de los problemas mecánicos véase Heyman (1983).

Borgnis explica que, en el pasado, los antiguos solían labrar las piedras «al revés», dejando las caras externas en bruto, con aspecto de roca (un «almohadillado»), pero cortando y ajustando perfectamente las caras internas de las piedras. Esta práctica fue empleada ya por griegos y romanos, que además dejaban protuberancias o tetones para atar las cuerdas para la elevación de las piedras; usualmente, este almohadillado

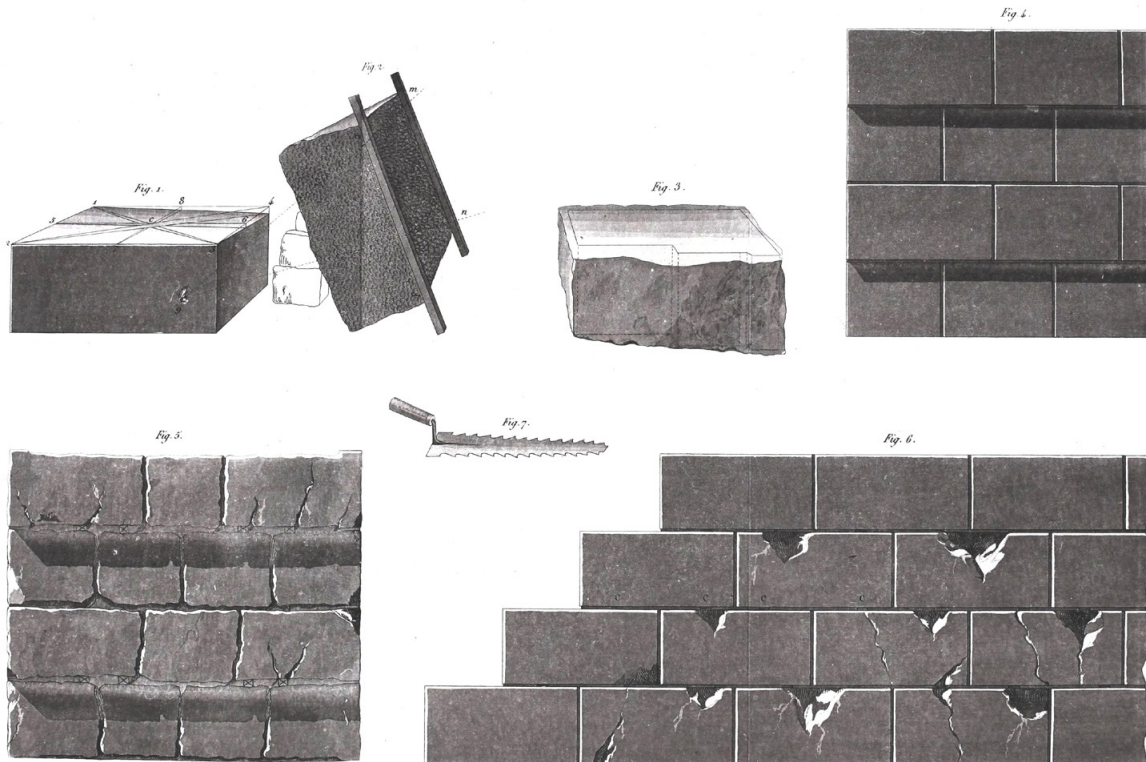


Figura 7. Daños en las piedras de los pilares del Panteón Francés por el mal corte de las piedras y el empleo de cuñas en la tirada exterior de las juntas (Rondelet 1804).

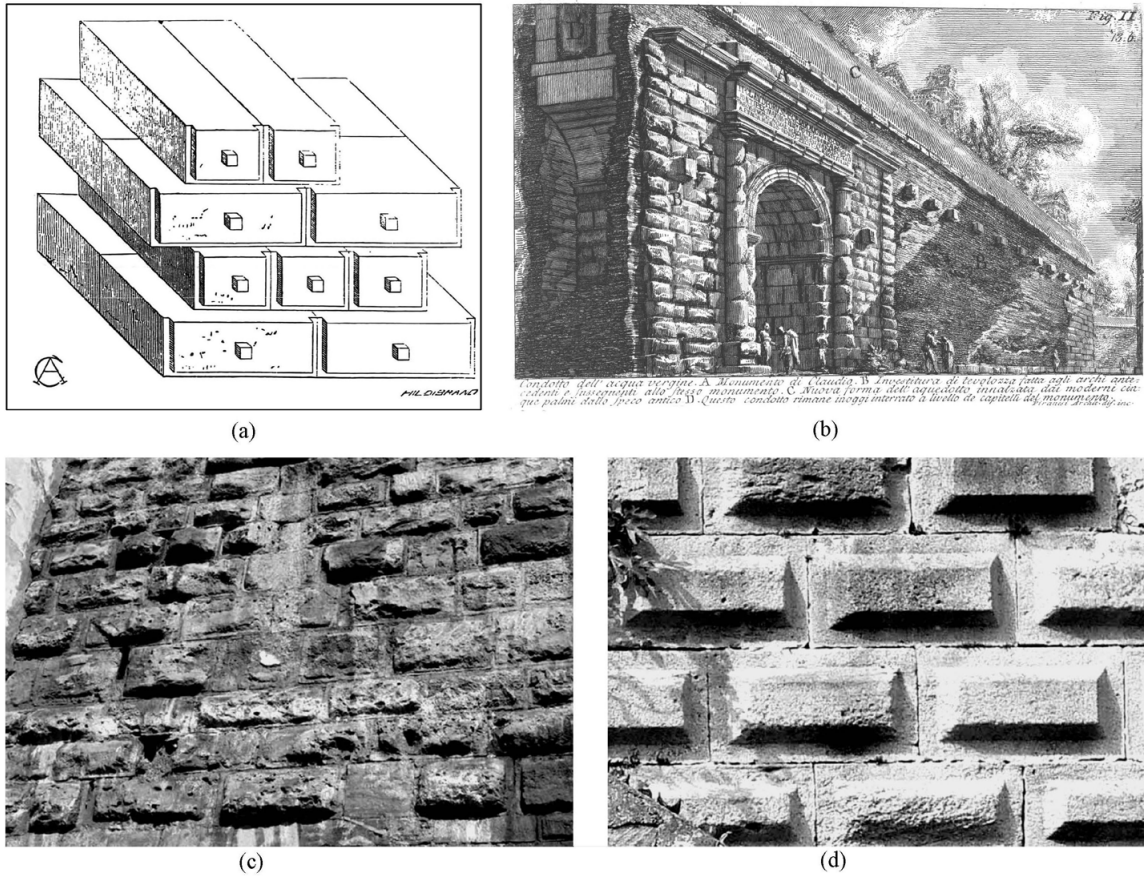


Figura 8. Ejemplos de obras con fachada de piedra con almohadillado. (a) Fortificaciones del Pireo (Choisy 1873). (b) Arco de Claudio (Piranesi 1784). (c) Pottendorf, Baja Austria, primera mitad del siglo XIII (Foto: Th. Danzl). (d) Hainburg, Baja Austria, puerta húngara, ca. 1260. (Foto: Th. Danzl).

se eliminaba tras el asiento de las piedras para dejar un paramento liso. En algunas obras romanas se dejó visto, como en el Arco Claudio de Roma. En la Edad Media sólo se emplea el almohadillado en murallas y fortificaciones. A partir del Renacimiento se convierte en un motivo decorativo (Figura 8).

El colapso de los muros fuera de su plano Rondelet, Borgnis, Giuffrè

El tratado de Rondelet que, como se ha dicho, influyó decisivamente en Borgnis y muchos otros tratadistas del siglo XIX, dio pie hacia los años 1990 al estudio de un fenómeno que, si bien es corriente en los edificios sujetos a terremotos, apenas había sido estudiado hasta entonces.

La idea nace de un apartado del tratado de Rondelet sobre «De la stabilité relative aux murs» (Rondelet 1805, 3: 189), sobre la estabilidad de los muros de fábrica, Figura 9. Rondelet da reglas de proporción para su proyecto, y examina los distintos mecanismos de colapso por vuelco por la acción de una fuerza normal a su plano: el muro aislado girará sin romperse alrededor de una arista (fig. 21 en la Figura 9), pero si el muro está trabado con muros perpendiculares —uno o dos en sus extremos— su resistencia será mucho mayor, y el colapso implica la fractura del muro por una suerte de «líneas de rotura» que forman un mecanismo cinemáticamente admisible en forma de «V» (figs. 22, 23 en la Figura 8). Rondelet llega a este resultado tras ensayos realizados sobre pequeños muros. Intenta después Anotnino Giuffrè quien primero se dio

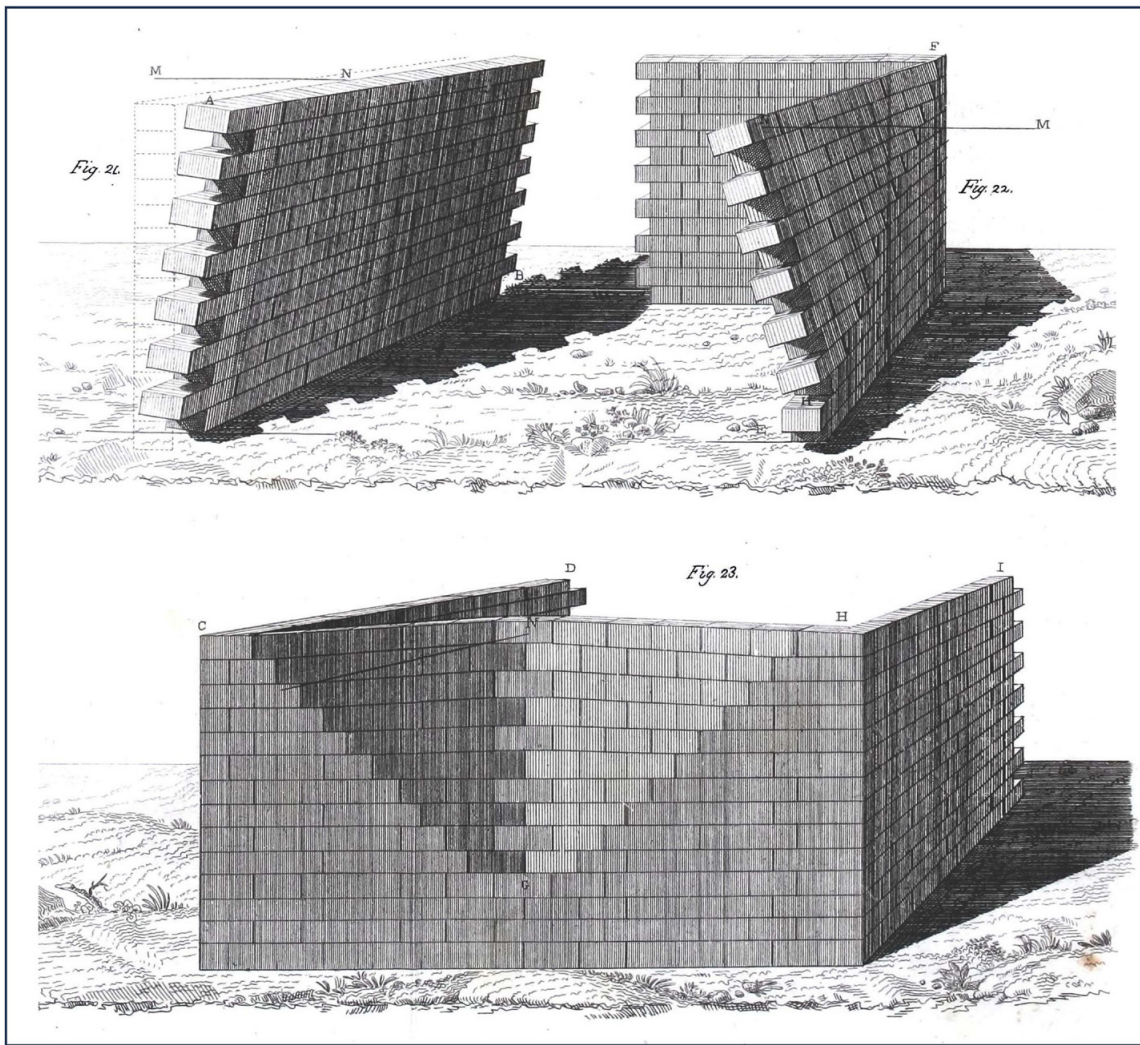


Figura 9. Estudios de colapso de muros fuera del plano (Rondelet 1805). Las líneas NM , perpendiculares al muro, muestran el punto y la dirección de aplicación de la fuerza.

cuenta de la importancia de los ensayos de Rondelet e incluyó su estudio en su libro *Lettura sulla Meccanica delle Murature Storiche* de 1991. Este libro ha ejercido una enorme influencia en los estudios posteriores sobre colapsos de muros en terremotos. Así, durante la recuperación de la ciudad de L'Aquila tras el terremoto, pude reflexionar detenidamente sobre las observaciones de Giuffrè con respecto a los estudios de Rondelet y pude observar el patrón de grietas en «V», Figura 10.

Los estudios de Giuffrè se basan en análisis de equilibrio o en el de mecanismos compatibles de colapso (Giuffrè 1986, 1991) y son completamente correctos dentro del Moderno Análisis Límite de estructuras de fábrica desarrollado por el Prof. Heyman desde los años 1960 (Heyman 1966).

Giuffrè tuvo el gran mérito de introducir modelos simplificados de análisis para la evaluación de la vulnerabilidad de las construcciones históricas de fábrica frente a la actividad sísmica, lo que permite la simulación numérica de los mecanismos de daño

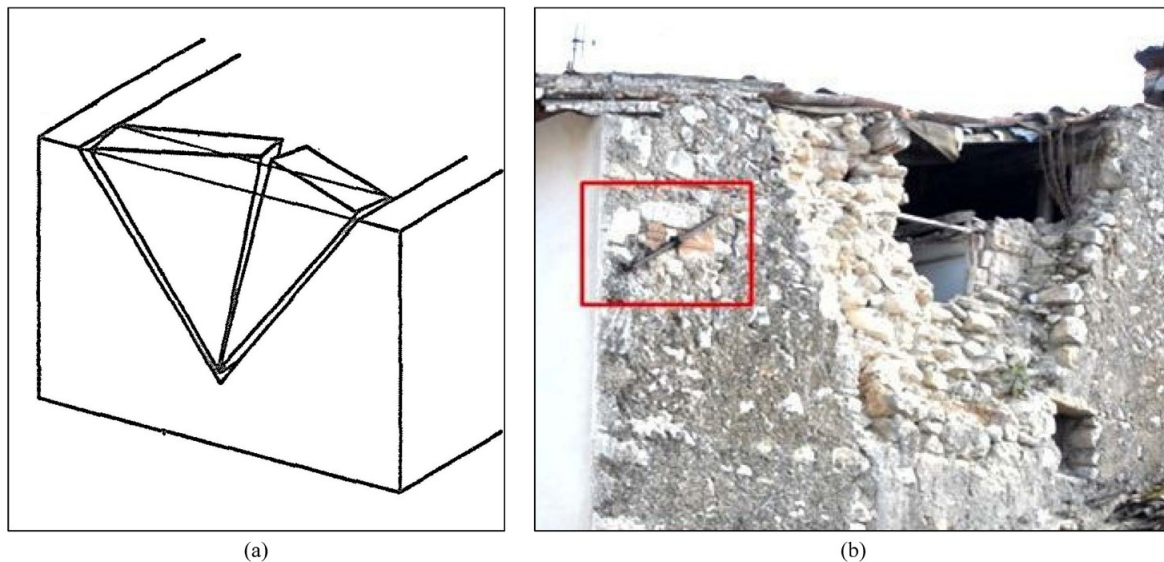


Figura 10. (a) Colapso en «V» de un muro según Giuffrè (1991). (b) Colapso similar en el terremoto de l'Aquila de 2009 (Foto: R. Fonti).

observados en la práctica y debidos a los terremotos. Aquí se describe una correspondencia entre las fuerzas estáticas y dinámicas para evaluar la vulnerabilidad de las construcciones históricas de fábrica a su componente horizontal.

El debate en torno a la resistencia de las construcciones de fábrica a las fuerzas horizontales, ya sean estáticas o dinámicas en comparación con las estáticas, incide en el debate sobre el proyecto de las construcciones abovedadas. Partiendo de esta observación básica, he investigado la forma en que se reconstruyeron los edificios de fábrica en zonas propensas a los terremotos tras los daños desproporcionados causados a las construcciones por los terremotos. Se ha elegido el ejemplo de Italia como caso de estudio ilustrativo dentro del periodo comprendido entre la primera mitad del siglo XVIII y principios del siglo XX.

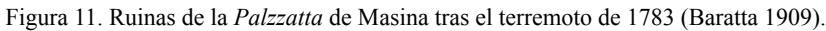
EL USO DEL ESTILO BARROCO TARDÍO EN ZONAS SÍSMICAS

En este estudio se ha seleccionado Italia por ser una de las zonas sísmicas más activas de Europa. Por ejemplo, en la zona de Mesina hubo dos grandes terremotos en 1783 y 1908 que produjeron enormes destrucciones.

En el primero hubo cerca de 8.000 muertos; en el segundo la cifra de muertos alcanzó los 80.000. La ciudad en ambos casos quedó devastada y hubo de ser reconstruida (Baratta 1909 y 1910; Vivenzio 1788; Fabrizio 1933; Pessò 1876), Figura 11.

Otro terremoto anterior, el de Val de Noto en 1693 resulta pertinente para este estudio. Escenario de catástrofes naturales entre las más desastrosas de la historia de la humanidad, aquí observé un uso peculiar del estilo barroco tardío en la reconstrucción posterior al terremoto de las ciudades del Valle de Noto (Val di Noto) tras el terremoto de 1693. Las ciudades de Noto, Ragusa, Siracusa, Catania y Modica quedaron devastadas. De esta fecha no quedan testimonios gráficos fiables, pero un grabado de la época refleja bien el ánimo tras la destrucción, Figura 12.

Su recuperación tras el terremoto duró casi un siglo (1700-1780), utilizando el barroco como estilo dominante en una época en la que el renacimiento clásico de las formas ya dominaba los estándares estéticos y la retórica de muchas ciudades italianas (Blunt 1968). Además, se trata de un ejemplo único del uso del barroco en una región que no había experimentado el barroco más que en forma vernácula hasta el inicio de esta reconstrucción. Los arquitectos sicilianos contaban con ejemplos eminentes de obras arquitectónicas



Parece, pues, que las construcciones históricas situadas en zonas sísmicas se edificaron siguiendo ciertas pautas específicas que les permiten resistir los terremotos. Este es el caso de Sicilia durante la reconstrucción posterior al terremoto de 1693 de las ciudades de Val di Noto y de L'Aquila tras el terremoto de 1703, en una época en la que el barroco tardío aún competía con el recién concebido renacimiento de las formas clásicas. También fue el caso de Messina tras el ya citado terremoto de 1908.

Al observar las fachadas de las iglesias barrocas de las ciudades de Val di Noto y de l'Aquila, resulta difícil evaluar sus características de resistencia a los terremotos debido al uso de majestuosos frontales independientes con alturas que no cumplen con los estándares modernos de ingeniería sísmica ¿Cuáles eran las normas de ingeniería sísmica en la época barroca?



Figura 12. El terremoto de 1693 en Sicilia (Zahn 1696).

Los arquitectos barrocos utilizaron diversos métodos y sistemas. Por ejemplo, contrariamente a la ortodoxia imperante, las fachadas de las iglesias reconstruidas en estilo barroco tardío no se construyeron como un revestimiento, simplemente adosadas, que durante un terremoto pueden volcarse fácilmente fuera del plano. Veamos algunos casos. En la Figura 13 (a) se observan los años en la fachada de una iglesia tras el terremoto de L'Aquila de 2009. Es evidente el vuelco rígido de la fachada principal como un solo cuerpo construido aparte. En la Figura 13 (b), la iglesia de S. Giorgio en Modica quedó casi completamente destruida por el terremoto de 1693, y finalmente se

reconstruyó con una fachada cóncava, que resiste las fuerzas horizontales. Finalmente, en la Figura 13 (c) la iglesia de S. Maria del Suffragio de L'Aquila no presenta daños en la fachada debido a diseño convexo barroco. La cúpula, sin embargo, colapsó parcialmente por el avanzado estado de degradación de los anillos de madera situados en su base.

Al investigar el caso de Messina tras el terremoto de 1908, algunos arquitectos emplearon formas barrocas o medievales, pero las reconstrucciones se vieron limitadas por el Real Decreto del 18 de abril de 1909 «Contenente le norme tecniche ed igieniche



(a)



(b)



(c)

Figura 13. (a) Daños en la fachada de una iglesia tras el terremoto de L'Aquila de 2009. (b) Iglesia de S. Giorgio en Modica tras su reconstrucción en 1702. (c) Iglesia de S. Maria del Suffragio de L'Aquila. (Fotos R. Fonti).

obbligatorie per le riparazioni, ricostruzioni e nuove costruzioni degli edifici pubblici e privati» afectados por el terremoto. En el Art. 7 de este decreto se especifica:

Los edificios deben ser construidos con sistemas que contengan un esqueleto de elementos de

madera, hierro, cemento armado o mampostería armada, capaz de resistir simultáneamente a sollicitaciones de compresión, tracción y cizallamiento... que incorpore en su entramado el material de los muros o esté embebido en ellos.¹²

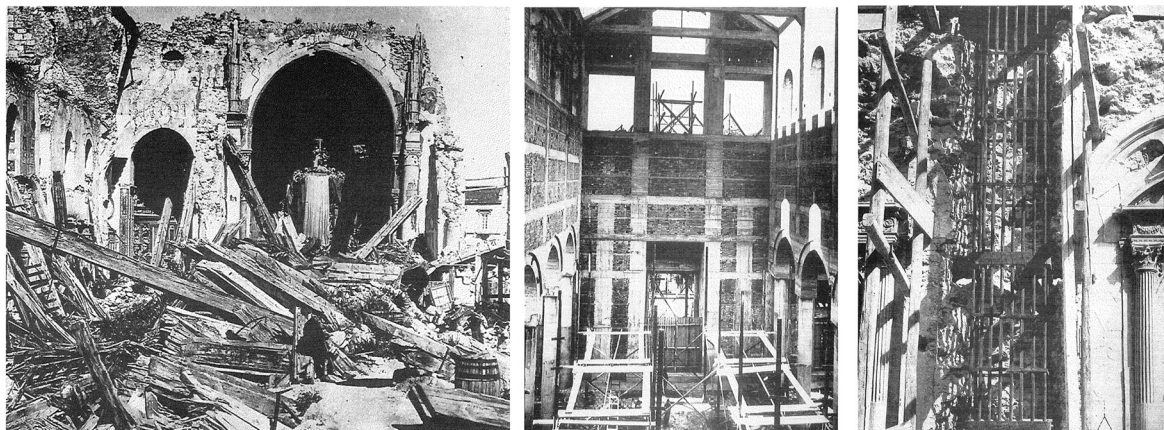


Figura 14. Destrucción del Duomo de Messina en 1908 y su reconstrucción por F. Valenti incorporando pórticos y elementos de hormigón armado. (Pugliatti 1991).

Siguiendo principios análogos se reconstruyó el Duomo de Messina por Francesco Valenti (1868–1953). En la Figura 14 se muestra la destrucción y el empleo de pórticos de hormigón armado embebidos en los muros. La obra se llevó a cabo, desde el proyecto hasta su terminación entre 1911 y 1929.

Gustavo Giovannoni observó que la reconstrucción de monumentos históricos requeriría el empleo de estructuras de hormigón armado ocultas en la obra de fábrica, a fin de cumplir con las normas de seguridad de los códigos y recomendaciones modernos aplicados tras los terremotos de Messina de 1908. Esto le pareció a Giovannoni (1929, 173) ilógico e inapropiado, lo que provocó una cuestión ética sin precedentes vinculada al debate en torno al principio teórico de la autenticidad de las formas en el diseño de la arquitectura:

Lo del estilo, al fin y al cabo, es ante todo un problema de ambientación, al que a veces el sentimiento... se añade con una fuerza irrefrenable más allá de todas nuestras teorías. Así ocurre con fuerza incoercible más allá de todas nuestras teorías que los edificios históricos sean restaurados. Así ocurre ahora en Messina, donde toda la población ha querido que la catedral derrumbada se reconstruyera «donde estaba y como estaba», aunque esto deba realizarse de la manera más ilógica e insincera desde el punto de vista constructivo, mediante estructuras antisísmicas ocultas bajo el revestimiento copiado del antiguo.¹³

Esta observación fue acompañada del uso de modelos barrocos por parte de Giovannoni y Cesare Bazzani (1873-1939) en la Italia moderna y, especialmente, en las zonas propensas a los terremotos (Figuras 15 y 16).

Vale la pena mencionar que estos elementos de refuerzo, contrafuertes, no estaban destinados a soportar cargas ni a servir de apoyo a la fábrica portante: funcionan como tirantes pasivos, verticales y horizontales, a menudo sin conexión entre sí (Fonti 2017, Faggiano et al. 2018; Milani 1920).

Además, llama la atención la semejanza entre las iglesias de Nuestra Señora de los Ángeles (1808-90), Figura 16 (a), en la Ciudad de México con la de la iglesia del Carmine (1926-31), Figura 16 (b), en Messina, de C. Bazzani.

A principios del siglo xx, la ciudad de Asmara (Eritrea) se vio sacudida por una serie de fuertes terremotos, que posteriormente fueron estudiados por Giuseppe Mercalli y publicados en un libro, junto con su investigación sobre los terremotos de Messina (Mercalli 1897, 1908, 1913). En los mismos años de la reconstrucción de Messina, Ugo Nebbia, uno de los historiadores del arte y conservacionistas italianos más importantes de Palermo de la época, escribió un artículo de revisión especialmente para el patrimonio mexicano en el que informaba de diseños similares y proponía un paralelismo entre Italia y México con respecto al estilo arquitectónico colonial español (Nebbia 1929). También proporcionó a los lectores



Figura 15. Iglesia de Santi Angeli Custodi, Roma 1924-25. Arquitecto: Gustavo Giovannoni. La iglesia tiene un diseño estructural barroco —una fachada cóncava típica— con algunos elementos clásicos simplificados que decoran la fachada. (Foto: R. Fonti).

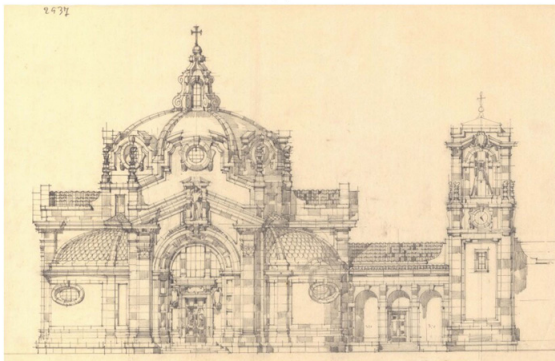
algunas observaciones agudas sobre el impacto político y social de la arquitectura colonial en las técnicas de construcción tradicionales locales con respecto a los edificios monumentales. Giuseppe Stellingwerff, en su libro sobre *Costruzioni Antisismiche* (1932), presenta el caso de Italia en comparación con México, confirmando cómo se percibía a México en la cultura de la época como un modelo a seguir (Stellingwerff 1932, 95):

Nuestra Italia, aunque estando bien lejos de ser sometida a las conjunciones telúricas de extraordinaria violencia que con frecuencia sacuden lejanas regiones, cuales el Japón las Antillas y el México la California... tiene por desgracia en Europa un triste primado sísmico.¹⁴

Desde el Renacimiento (1504) hasta la unificación de Italia (1861), el sur de Italia fue administrado por España y se unió a América bajo el imperio colonial español. España no es una zona propensa a los



(a)



(b)

Figura 16. (a) Santuario de Nuestra Señora de los Ángeles (1808-90), Ciudad de México (Reyes Valerio-CNMH 1928). (b) Iglesia del Carmine, Messina, Sicilia, (1926-31) de Cesare Bazzani (Archivio di Stato Trento, CFLR).

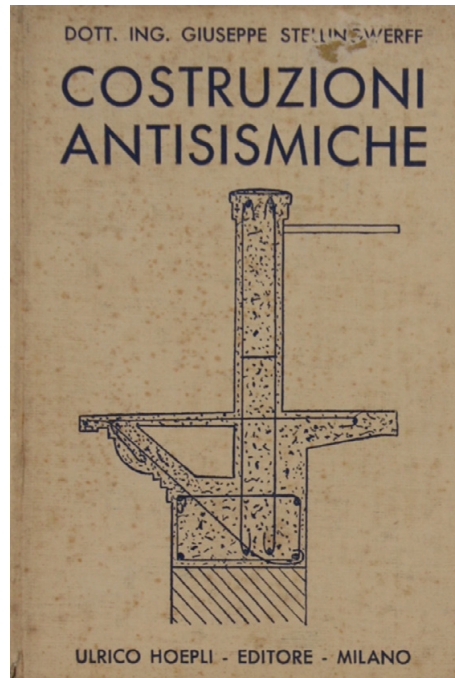


Figura 17. Portada del libro de Stellingwerff (1932) en la que se muestra claramente el uso del hormigón armado en la restauración de monumentos.



(a)



(b)

Figura 18. Lunetos de doble curvatura en Ciudad de México. (a) Iglesia de Nuestra Señora de Loreto (1806-1821), Ciudad de México. (b) Nuestra Señora de los Ángeles (1808-90). (Foto: R. Fonti).

terremotos, pero sus territorios de ultramar se vieron afectados por terremotos recurrentes y violentos. En particular, México, la llamada Nueva España, sufrió catástrofes naturales extremas. Aquí postulo que existe

una historia común que vincula Sicilia y México con España y los terremotos en lo que respecta a la historia de la construcción.

Existe un legado común de conocimientos no escritos en la construcción de edificios que une estrechamente a España e Italia. Puede considerarse parte de un concepto mucho más amplio de globalización de las tradiciones locales en la construcción de edificios en la época imperialista, posteriormente redescubierto y reutilizado por C. Bazzani y G. Giovannoni para la supervivencia de los terremotos.

El objetivo de este estudio es recuperar estos conocimientos no escritos y olvidados del pasado en la construcción de edificios, con el fin de evitar obras de conservación y restauración inútiles y, en ocasiones, perjudiciales para los edificios patrimoniales situados en zonas propensas a los terremotos. Para recuperar este conocimiento no escrito y distinguir los requisitos técnicos de la propaganda y las cuestiones teológicas, investigué el uso de lunetos de doble curvatura y los contrafuertes desconectados, que aquí se consideran características distintivas de la arquitectura barroca en zonas propensas a los terremotos.

LUNETOS DE DOBLE CURVATURA Y CONTRAFUERTE DESCONECTADOS COMO CARACTERÍSTICAS DISTINTIVAS DE LA ARQUITECTURA BARROCA EN ZONAS PROPENSAS A LOS TERREMOTOS

Los lunetos son elementos en forma de media luna que se cruzan con las bóvedas en su trasdós (Figura 20), mientras que los contrafuertes separados son muros adicionales que, en la arquitectura barroca, se colocan en las fachadas para dotarlas de su característico diseño cónico (Figura 21), al tiempo que se oponen a las cargas inclinadas procedentes de las bóvedas de la cubierta. La investigación sobre los lunetos se llevó a cabo llevando la dimensión histórica del uso de estos elementos más allá del conocimiento común de los lunetos como fuentes de iluminación, teniendo en cuenta su función como inhibidores del vuelco fuera del plano, lo que, según mi hipótesis, era responsable de un proyecto mucho más esbelto de los muros de soporte, y del uso de contrafuertes desconectados para contrarrestar el balanceo durante los terremotos. Esta idea nueva sobre el efecto protector de estos característicos elementos barrocos se

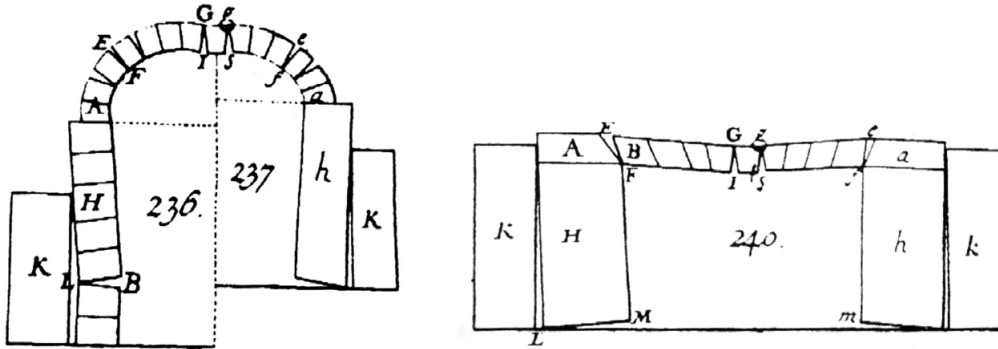


Figura 19. Mecanismos de agrietamiento de los muros de soporte contrarrestados por contrafuertes desconectados. Ensayos de Danyzy ([1732] 1778).

ha planteado como un cambio de paradigma en la evaluación de la vulnerabilidad de las construcciones de fábrica ante los terremotos. Como muestra claramente Danyzy en sus dibujos, existe una relación directa entre la reducción del espesor transversal de los muros

de soporte y la limitación de su capacidad de desplazamiento en los arranques, lo que supongo que puede evitar el derrumbe de las estructuras arqueadas durante los terremotos debido a la pérdida de contacto entre las dovelas (Figura 19).



Figura 20. Badia Morronese, Sulmona (Italia) tras el terremoto de L'Aquila de 2009. (Foto: R. Fonti).

CONTRIBUCIÓN DE LOS LUNETOS A LA ESTABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS ABOVEDADAS BAJO FUERZAS HORIZONTALES

Luneto es un término derivado de la palabra francesa *lunette*: «pequeña luna». Estos elementos se encuentran entre los muros de soporte y la parte central de la bóveda, manteniéndola en su posición. Por lo general, son de dos tipos diferentes: (a) elementos de una sola curvatura que funcionan como una ventana; y (b) elementos de doble curvatura fusionados con el arranque de fábrica (Figuras 18 y 20).

Dependiendo de su tamaño, los lunetos desempeñan un papel en la estática de las estructuras abovedadas, destinados a rigidizar las bóvedas y aumentar su capacidad para soportar cargas. A nivel local, redistribuyen las tensiones a lo largo de los muros dirigiendo las cargas inclinadas a puntos específicos, al tiempo que proporcionan a las estructuras abovedadas un equilibrio traslacional adicional.

Si bien su contribución suele descuidarse en la evaluación estructural de las construcciones de fábrica con el fin de obtener predicciones más conservadoras, aquí se considera que los lunetos desempeñan un papel clave en la protección de los edificios contra las acciones sísmicas.

Es evidente que el uso de lunetos en bóvedas de cañón conduce a una reducción global de las masas de fábrica concentradas en la parte superior de los muros, junto con sus empujes y desplazamientos. Esta reducción de peso produce una disminución de la carga inclinada en los arranques, que favorece una reducción del multiplicador de colapso con respecto a las bóvedas de cañón sin lunetos. Durante los terremotos, las estructuras abovedadas proporcionan a los muros de soporte una carga horizontal adicional fuera del plano, de ahí su efecto beneficioso para reducir los empujes en sus apoyos.

Esta reducción del peso total de las bóvedas, junto con una redistribución de las tensiones en los puntos específicos donde los lunetos tienen apoyo, es responsable de un diseño más esbelto de los muros de soporte. Debido a esto, las partes de los muros enmarcadas por lunetos son franjas descargadas que solo soportan su propio peso, por lo que quedan libres dentro de la obra de fábrica. La falta de restricción en su parte

superior hace que estos elementos sean extremadamente vulnerables a fuerzas horizontales adicionales, como las producidas por los terremotos.

A este respecto, Rondelet (1832) observó muy acertadamente cómo las iglesias italianas presentan unas proporciones sorprendentemente extremas de esbeltez en sus elementos de soporte, ya sean pilares o muros, que superan las que él mismo observó en los edificios patrimoniales más importantes de París.

En la catedral de Milán, donde las naves laterales dobles son muy elevadas, el diámetro de los pilares, que forman un conjunto de ocho columnas, es un tercio de su distancia tomada de centro a centro, y la sexta parte de la anchura de la nave mayor. Pero los muros de cerramiento, incluyendo los semipilares y los contrafuertes, solo tienen un tercio de la anchura de la nave central; mientras que en Notre-Dame de París, los muros de las capillas tienen un grosor superior a la mitad de la anchura de la gran nave. En la catedral de Florencia (Santa María del Fiore), los pilares que separan la nave central de las naves laterales están muy alejados entre sí y los muros exteriores son muy delgados. Su grosor, que solo es la séptima parte de la anchura de la nave, sería insuficiente para soportar el empuje de las bóvedas de crucería, que son muy elevadas, si no estuviera sujeto por tirantes dobles de hierro que atraviesan la nave central a la altura de cada pilar, y por fuertes armaduras de madera colocadas sobre las bóvedas de los laterales, con arcos de piedra que no se ven desde el exterior.¹⁵

Rondelet sugiere que el uso de elementos de refuerzo de hierro ocultos permite que las paredes y los pilares soporten los empujes estáticos procedentes de las bóvedas y las cúpulas. Sin duda, se trata de un argumento convincente. Sin embargo, las razones para elegir paredes delgadas siguen sin estar claras, especialmente en una época en la que no era habitual reforzar la fábrica con hierro. Además, Rondelet destaca el uso de estructuras arqueadas y contrafuertes ocultos a la vista del observador. La catedral de Florencia no muestra ningún contrafuerte saledizo y Rondelet se basa en elementos estructurales ocultos que ayudan a la construcción a reducir el grosor de la sección transversal de las paredes.

Al examinar los dibujos de Danyzy (Figura 19) ya se puede ofrecer una interpretación de la observación de Rondelet sobre el uso de contrafuertes ocultos. Antes de dar una interpretación clara al dibujo de Danyzy, se debe señalar que, en la argumentación a favor de los lunetos, Rondelet proporcionó a sus lectores un comentario adicional.

Ya hemos notado que estas bóvedas de crucería góticas no están formadas, como las bóvedas regulares, por partes de bóvedas de cañón intersecantes, sino por la unión de muchos arcos, cuyos espacios intermedios están provistos de fábrica, dispuesta de la forma más adecuada para fortalecerlos y formar un conjunto uniforme. Dado que el centro de los lunetos nunca forma una línea recta horizontal, sino una curva, se deduce que las fuerzas no recaen únicamente sobre los pilares, y que una parte es sostenida por las partes de los muros intermedios: de ahí que estas bóvedas, debido a su ligereza y solidez, sean más ventajosas que las bóvedas regulares.¹⁶

Rondelet observa que, a diferencia de las bóvedas de crucería estándar, las bóvedas con lunetos no intersecan sus elementos mediante el cruce de bóvedas de cañón. Los italianos dieron forma a los lunetos con un perfil de doble curvatura, redistribuyendo así los esfuerzos en dos direcciones, haciendo que los elementos funcionen como un todo. De hecho, al examinar las palabras de Rondelet, es evidente cómo el uso de lunetos de doble curvatura proporciona a las porciones de fábrica enmarcadas por los lunetos una estabilidad adicional contra posibles mecanismos locales de colapso al cargar la fábrica en su parte superior en puntos específicos. Esta última observación de Rondelet responde parcialmente a nuestra pregunta, proporcionándonos la idea de una fábrica concebida para resistir un posible vuelco adicional como un elemento unido de la cubierta y su caja inferior.

A la luz de esto, parece evidente que la vulnerabilidad debida a una reducción de los espesores en los muros de soporte tiene que ser, de alguna manera, beneficiosa para la estabilidad global de las estructuras abovedadas. En particular, una reducción de los espesores de la sección transversal en los muros conlleva una limitación de los desplazamientos en los arranques, evitando que estas estructuras colapsen

debido a una pérdida de contacto entre las dovelas. De hecho, los muros, que se reconocen como bloques rígidos (Heyman 1966) o semirrígidos, vuelcan bajo acciones sísmicas con una capacidad de desplazamiento que se corresponde con los espesores de los muros (Giuffrè 1991). Su desplazamiento máximo es igual a la mitad del espesor en el centro de masas, y a toda la longitud de la sección transversal en su parte superior (Figura 4, más arriba). De manera similar, los bloques semirrígidos pueden volcar con desplazamientos reducidos debido a su condición de cuerpos rígidos imperfectos, lo que se debe a una degradación de los contactos entre los componentes de fábrica antes y durante los terremotos (Giuffrè 1986; Doherty et al. 2002; Fonti 2013).

PROYECTO DE FÁBRICAS DE PIEDRA Y RESISTENCIA AL VUELCO FUERA DEL PLANO

Giuffrè observó que los muros de fábrica oscilan con fuerzas muy reducidas bajo movimiento horizontal. Postuló que esto puede ser debido a una desviación en el diseño de los muros de fábrica respecto a las buenas prácticas de ingeniería. A este respecto, (Milizia 1785, 3: 147) observó que no es raro construir edificaciones débiles con cimientos estables y materiales de alta calidad debido a la negligencia en la disposición de los componentes de la construcción.

La solidez de un muro no depende solo de cimientos sólidos y materiales de alta calidad, sino también de la forma en que se colocan estos materiales. De hecho, no es raro construir estructuras débiles con bases estables y materiales de alta calidad. Esto se debe a la ignorancia y negligencia en el asiento de los componentes de la construcción.¹⁷

De hecho, la fábrica se considera un material compuesto. Y, debido a su naturaleza compuesta intrínseca, puede cambiar su comportamiento de respuesta a los terremotos según su disposición. A este respecto, Milizia y Borgnis reportan dos observaciones importantes.

Borgnis (1842, 192) afirma que un muro no es un monolito y, debido a esto, su resistencia al movimiento es limitada. Sin embargo, los albañiles intentan diseñar los muros para que se acerquen lo más posible a la condición límite de un monolito. Por ello, las piedras se cortan y colocan para encajar unas con otras y hacer que trabajen como un todo.

Un muro tendría la máxima solidez si fuera un monolito. Sin embargo, dado que esto no es factible, para acercarse lo más posible a este límite, es necesario que todas las piedras encajen y se correspondan entre sí de tal manera que formen una masa única.¹⁸

Más adelante, Borgnis explica que cuando un muro actúa como un monolito, su cohesión es tan alta que bajo una fuerza lateral volcará rompiéndose en su base. Por el contrario, un muro que oscila con una cohesión limitada volcará fuera del plano describiendo un patrón de fisuración que se mueve progresivamente desde su base debido a su reducida cohesión, Borgnis (1842, 129):

El fallo de una obra de fábrica depende del momento del empuje (thrust). Este vuelca el muro alrededor de un punto de pivote posicionado en su base, en el borde externo, mediante un movimiento de rotación. Al vuelco se oponen el momento de las fuerzas verticales y las fuerzas cohesivas... Si las fuerzas cohesivas fueran muy altas, entonces, la línea de rotura coincidiría con la base... pero a medida que éstas se reducen la línea de rotura se alejará de la base.¹⁹

Esta observación se pudo demostrar durante una campaña de ensayos realizada entre 2010 y 2014 en muros históricos de fábrica existentes incluidos en un programa de demolición.²⁰

Además, Milizia (1785, 3: 149) explica que el espesor de un muro depende, por supuesto, del empuje y los impactos que deba resistir. Sin embargo, esto también depende del tipo de piedra y labra utilizada para construir los muros. Si la sillería se proyectara en «pietre vive» (piedras cortadas toscamente), esta debería ser mucho más gruesa ya que las irregularidades de la fábrica la hacen inestable y frágil debido a la falta de contacto entre los elementos:

Conviene saber calcular el impacto y el empuje para oponer una resistencia adecuada, ya que de ello depende el espesor de los muros... Sin embargo, si los muros se construyen con piedras toscamente cortadas, estos deben hacerse bastante gruesos, mucho más gruesos que el ripio irregular e inestable que se utiliza en su construcción.²¹

Estas observaciones acompañan una nota de Federica Scibilia (2015, 75), quien investigó la reconstrucción de la ciudad de Palermo después del terremoto de 1726. Los recursos de archivo que ella reporta presentan razones para el daño a las construcciones de fábrica. En particular, se observó que los muros que sostenían estructuras arqueadas eran de tamaño insuficiente y, de forma similar a lo reportado por Milizia, había imprecisiones en la colocación de las piedras.

...Las fuentes de la época relativas a los daños causados por el terremoto de 1726 [Palermo] muestran... un cuadro alarmante. Los daños en las cúpulas afectan tanto a la cáscara, a menudo afectada por profundas grietas, como a los muros inferiores, lo que revela un dimensionamiento insuficiente... Los criterios para una reconstrucción adecuada contemplaban la colaboración de los materiales lapídeos con otros materiales, siendo el hierro el fundamental, como instrumento esencial para conferir solidez y resistencia a los edificios... El nuevo material lapídeo, preparado en la cantera, permitía elegir la «piedra justa para el lugar justo», tanto para el engrosamiento de los muros (también mediante revestimientos estructurales) como para la realización de aparejos murarios considerados «antisísmicos».²²

En efecto, para enmendar estos defectos de ejecución, se propuso, entre otras soluciones, colocar de manera selectiva las piedras en los sitios precisos y aumentar el espesor de los muros. Esto último se logró mediante adosando muros adicionales a un lado y otro de los muros originales. Es interesante observar cómo el uso de muros adicionales entra en la categoría de «contrafuertes desconectados», contrarrestando los desplazamientos en su desconexión (Figura 19).

Por lo tanto, se puede concluir que la resistencia de un muro al movimiento horizontal fuera del plano depende estrictamente de su espesor en la sección



Figura 21. Tlayacapan (México), Ex-Convento de San Juan Bautista (1530). (Foto: R. Fonti).

transversal y de la disposición y labra de las piedras. Esto podría ayudar a explicar la observación de Rondelet. Sin embargo, Rondelet no tenía una comprensión del concepto de «cuerpo semirrígido», lo que significa que evaluó la resistencia a las cargas inclinadas considerando los muros como cuerpos rígidos, monolíticos.

En ese caso, ¿Por qué los proyectistas italianos reducirían los espesores de los muros al erigir edificios monumentales en una zona altamente vulnerable a los terremotos, aumentando su vulnerabilidad a las acciones sísmicas? En contraste con las teorías clásicas, aquí considero que una reducción de los espesores en los muros portantes es beneficiosa para la estabilidad global de las estructuras abovedadas de fábrica cuando están sujetas a acciones sísmicas. Esto se basa en su papel como «reductores de desplazamiento». Esta observación básica se encuentra en la base del proyecto de fachadas cóncavas, típicas de la arquitectura barroca, y se puede observar en su apariencia inicial, sin adornos, en el antiguo monasterio de San Juan Bautista Tlayacapan en México (1530) (Figura 21), que ha sobrevivido a terremotos devastadores.

Además, el uso de lunetos de doble curvatura contrarresta parcialmente los empujes provenientes de la bóveda principal, induciendo una reducción adicional de la componente horizontal de los empujes en los arranques, mientras aleja las juntas de rotura de los arranques.

Este concepto novedoso de los lunetos de doble curvatura como reductores del empuje, junto con su papel de suavizar las juntas de rotura, encontró validación en las palabras de Borgnis (1842). En particular, Borgnis observó el uso de lunetos en bóvedas de cañón tenía tanto un papel estético como técnico.

Algunos autores han comentado el efecto desagradable de los lunetos. En particular Milizia (1785, 3: p. 171) afirma:

Estas bóvedas [de cañón] a menudo consiguen un aspecto grave, serio, oscuro; por lo tanto, muy apropiadas para lugares de tal carácter. Tienen su mérito cuando son continuas, y sin esos lunetos que cortan de manera informe los riñones de la bóveda, y forman en ella curvas irregulares. Para obtener luz, es mejor practicar en la clave de la bóveda una abertura cuadrada o rectangular, según la planta del edificio, y levantar sobre ella una linterna (o lucernario) acristalada en cuyo techo se restituya la parte quitada a la bóveda.²³

Por lo tanto, el uso de lunetos en bóvedas de cañón aparentemente no puede asociarse exclusivamente a propósitos estéticos o una mejor iluminación. Además, los lunetos de doble curvatura se ubican comúnmente sobre ventanas majestuosas, funcionando así como elementos estructurales (Figura 17).

Borgnis finaliza proporcionando a sus lectores dos observaciones clave extraídas tanto de la práctica de la ingeniería como de la arquitectura. Primero, observó que la acción de dos o más empujes, que apuntan al mismo soporte, con fuerza equivalente y direcciones opuestas, se cancelan mutuamente, transfiriendo solo cargas verticales a los elementos de soporte. Esto se debe a las direcciones opuestas de las componentes horizontales de los empujes (Borgnis 1842, p. 269):

Es evidente, en efecto, que cuando un pilar resiste simultáneamente la acción de dos o más empujes iguales y directamente opuestos, estos

se contrarrestan entre sí, y el soporte meramente resiste la acción vertical del peso de las porciones correspondientes de las bóvedas.²⁴

Este conocido principio teórico puede aplicarse fácilmente a los lunetos que intersecan bóvedas que, debido a sus contornos de doble curvatura, redistribuirán los esfuerzos provenientes de la bóveda principal tanto en la dirección de los muros de soporte como en paralelo a ellos. De manera similar a lo que observó Borgnis, las componentes horizontales de los empujes que apuntan en una dirección paralela a los muros de soporte serán anuladas por el diseño continuo y progresivo de los lunetos. Solo la porción del empuje distribuida en la dirección de los muros de soporte debe ser contrarrestada por estos.

Esto, por un lado, permitirá a los muros de fábrica colocados bajo lunetos de doble curvatura recibir una carga vertical adicional en su parte superior, lo que estabiliza porciones de muros que a veces pueden ser muy esbeltas. Por otro lado, las cargas provenientes de la coronación y el relleno de los lunetos contrarrestarán el empuje muy limitado proveniente de los lunetos de doble curvatura, mientras centran las cargas.

Por lo tanto, contrariamente a la comprensión común de los lunetos como elementos que simplemente dividen los empujes, aquí considero los lunetos de los dos siguientes tipos diferentes:

1. Elemento de simple curvatura capaz de disminuir parcialmente los empujes debido a una reducción de las masas de fábrica y utilizado para redirigir las cargas inclinadas a puntos específicos.
2. Elemento de doble curvatura que actúa como reductor y redistribuidor de empujes debido a su contorno de doble curvatura y más allá del ahorro proporcionado por una reducción en la cantidad de fábrica utilizada durante la construcción. La redistribución de empujes hará que las bóvedas, junto con sus muros de soporte, reaccionen como un todo durante los terremotos, garantizando el llamado «comportamiento de caja».

A este respecto, es interesante observar que durante la reconstrucción posterior al terremoto (1726) de la ciudad de Palermo (Italia), los pisos de madera dañados fueron regularmente sustituidos por bóvedas

de piedra y a las que se añadieron nervios en las aristas, que soportan muretes para soportar los pisos (Scibilia 2015, p. 76):

Entre las numerosas intervenciones atestiguadas por las fuentes de archivo, se puede analizar, a modo de ejemplo, la llevada a cabo en el Palacio Senatorial, donde se previó la construcción de una bóveda de piedra real (dammuso) en sustitución de un forjado plano de madera dañado... también se previó la construcción en el extradós (cara superior) de seis «cofolari» (una especie de muretes de piedra) con losas de piedra superpuestas, sobre las cuales se colocaba el pavimento de ladrillo «de Termini».²⁵

¿Por qué cambiaron pisos ligeros de madera por bóvedas pesadas y posiblemente productoras de empuje? Esto se debe a la preferencia por utilizar elementos que hacían que las estructuras funcionaran como un todo, redistribuyendo los esfuerzos por todas partes, en lugar de elementos unidireccionales (vigas de madera) que son incapaces de sostener los muros durante los terremotos. De hecho, los pisos de madera durante los terremotos extraen la fábrica al aumentar drásticamente su vulnerabilidad fuera del plano. Como se muestra en la Figura 1, en la zona de L'Aquila fue posible observar el diseño de elementos de madera para acomodar anclajes que funcionaban como dispositivos pasivos durante los terremotos.

La segunda y última observación proporcionada por Borgnis se refiere al papel de los lunetos como «modificadores» de juntas de rotura. Borgnis observó que las estructuras de arco se agrietan en puntos específicos, es decir, en las juntas de rotura, y se ubican ya sea en los arranques o debajo. Para evitar esto, observó en la práctica el uso de estructuras de arco completamente abarcadas equipadas con lunetos o nervios en su extradós y provistas de equilibrio de traslación mediante el uso de gravas encerradas en patrones de hormigón romano en el arranque (Borgnis 1842, p. 276):

Puesto que la experiencia nos enseña que las bóvedas se rompen bien en los riñones o bien por debajo, es aconsejable reforzarlas en esos puntos con la fábrica apropiada para contrarrestar este efecto nocivo. Algunos constructores propusieron reemplazar la fábrica continua en el trasdós de las bóvedas por muros paralelos, de un tercio

del ancho de la bóveda y aproximadamente un décimo de la distancia entre ellos. Los espacios entre los muros debían llenarse con escombros y cubrirse con una capa significativa de mortero... También se sugirió otro método para evitar la sobrecarga de las bóvedas de fábrica, el cual consiste en diseñar una serie de lunetos cerradas a distancias iguales entre sí en la parte superior del trasdós.²⁶

Esta solución concuerda bien con el caso antes mencionado de la reconstrucción del Palazzo Senatorial en Palermo. Además, Borghini se refiere específicamente a los lunetos como cerrados, tapiados, diferenciándolos así de los lunetos que funcionan como ventanas. Hizo hincapié en la práctica de instalar lunetos en bóvedas, en lugar de nervios, con el objetivo de hacer que las estructuras fueran menos pesadas. Por lo tanto, además de la teoría que define los lunetos como un elemento de rigidez, planteo la hipótesis de que los lunetos permiten a las bóvedas cambiar la posición de las juntas de rotura respecto a las configuraciones características de un arco de tres articulaciones, encontrando disposiciones más favorables para resistir los terremotos.

Notas

- 1 “... In alcune costruzioni soggette ad urti e scosse irregolari, gli antichi usavano alcune volte d’intagliare le faccie interne combaciantisi delle pietre vive, in modo che si concatenassero scambievolmente anche senza il sussidio né degli arpioni né de’ perni, né pur anche de’ cementi.” (Borghini 1842, 194).
- 2 El tratado de J. B. Rondelet es probablemente el más influyente. Desde la primera edición de 1802 tuvo numerosas ediciones y traducciones (Nègre 2009). El estudio definitivo es el Middleton y Baudouin-Matuszek (2007).
- 3 “Dato che i tetti, trovandosi nella parte più alta degli edifici, sono i più soggetti alla intensità dei movimenti sismici... I tetti possono essere, grossolanamente, divisi in comuni ed in appoggiati su incavallature. Quelli su incavallature, normalmente, non danno luogo a spinte orizzontali, in quanto vi è sempre, alla base dell’incavallatura, una catena o qualche altro organo che ne fa le veci e la cui funzione è appunto quella, entrando in tensione, di eliminare tali spinte... ma purtroppo la maggioranza de tetti non è su razionale incavallatura: le travi portanti sono appoggiate ai muri, spesso senz’altro, con scarsissimi collegamenti, senza che siano comunque annullate le spinte orizzontali.”

- 4 “Le abitazioni asismiche costruite in Sicilia ed in Calabria possono raggrupparsi in tre categorie: baracche di legno; cassette di piccola altezza con muri ordinari di forte spessore; edifici con ossatura di ferro-cemento.”
- 5 El principio teórico de la autenticidad de las formas se refiere a la idea de liberar la arquitectura italiana de decoraciones inútiles para crear una unidad entre la estructura y la apariencia que satisfaga los nuevos estándares estéticos y de vida de las sociedades modernas. En palabras del racionalista Giuseppe Pagano esto se expresa de la siguiente manera: “Questo atto di ribellione è dovuto all’incapacità di certe scuole... è in relazione diretta con quella costante confusione che molti scrittori di architettura fanno tra architettura strutturale e decorativa; cioè tra elementi necessari e sufficienti alla Statica e alla funzionalità, e quelle licenze estetiche richieste dai bisogni dell’armonia e della proporzione (confusioni che giungono al risultato di classificare l’architettura dalle diverse mode di foggare e di distribuire gli ornati). Mi spiego. Esiste oggi... un atteggiamento di assoluta incomprensione per tutto il pleonismo decorativo derivato dall’arte classica. Questo è un fatto sempre più evidente e innegabile. Gli ‘Ordini’, siano essi strutturali o addossati, non parlano più un linguaggio esteticamente e tecnicamente comprensibile.” (Pagano 1934, 2-3)
- Según Giovannoni, los edificios de hormigón armado no debían ser esqueletos de cuerpos hechos de piedra y decorados de tal manera que reflejaran una apariencia estética que se desprendiera de su lenguaje estructural y reflejara el de las construcciones de fábrica portantes, forjando las generaciones contemporáneas y futuras. A continuación, desarrolla aún más la teoría de la autenticidad de las formas, teniendo plenamente en cuenta el problema estructural en el debate.
- 6 “per tali monumenti tuttavia il contrasto è veramente tragico tra il loro sistema costruttivo originario e quello a struttura elastica intelaiata che verrebbe richiesto per le norme asismiche; poiché qui, di contro al dinamismo rivoluzionario del terremoto, l’equilibrio di risorsa poco conta, e spesso la sicurezza rende necessari, appena temperati dagli espedienti, i sacrifici più gravi.”
- 7 “Se la regola dell’arte non è stata rispettata, al crescere della forza orizzontale vengono meno le precarie connessioni interne e il muro cede prima che quel valore sia raggiunto. Iniziato poi il cinematismo a prezzo di scorrimenti interni, la resistenza del muro degrada più rapidamente di quanto non avvenga per il naturale ridursi del momento stabilizzante. Il diagramma forza-spostamento della parete monolitica deve essere quindi corretto. ... esso si mette in moto per una forza minore di quella necessaria a muovere una parete monolitica di ugual peso e spessore, e soprattutto, col progredire dello spostamento, le sconnessioni interne fanno sì che una parte del peso si adagi sul lato posteriore e non partecipi a costituire momento stabilizzante. La forza orizzonta-

- le richiesta per l'equilibrio diminuisce ed il diagramma denuncia con la sua maggior pendenza un meccanismo di degrado aggiuntivo rispetto a quello riconosciuto al corpo rigido."
- 8 "In alcune costruzioni soggette ad urti e scosse irregolari, gli antichi usavano alcune volte d'intagliare le faccie interne combaciantisi delle pietre vive, in modo che si concatenassero scambievolmente anche senza il sussidio né degli arpioni né de' perni, né pur anche de' cementi."
 - 9 "è evidente cosa, che quanto maggiore sarà il numero de' punti né quali le pietre sovrapposte si combaceranno esattamente, tanto maggiore sarà la loro attitudine a resistere ad una forte pressione sovra incumbente, ed all'opposto, se pochi saranno questi punti, s'aumenterà la probabilità che seguire debba rottura. È da notarsi a questo riguardo che purtroppo è prevalso generalmente l'uso vizioso di lavorare con inesattezza le facce delle pietre vive che rimangono nascosta, nella supposizione che il cemento rimedia al taglio difettoso; supposizione erronea, poichè ben diversa è la resistenza che ha luogo nei punti sostenuti nel semplice cemento da quella prodotta dagli altri punti in cui le pietre a contatto si combaciano. Ad accrescere i pessimi effetti cagionati di questa pratica viziosa concorre un altro uso poco commendevole, ed è quello di terminare compiutamente il lavoro delle faccie apparenti delle pietre prima di metterle in opera. Ciò essendo, i muratori procurano con ogni diligenza di porre le pietre in modo che queste faccie s'accordano con precisione, e di farsi che le commessure siano poco visibili. Per ottenere questo doppio intento, lavoranzi con finetezza gli spigoli esterni, ma lascianzi concave e scabbre le facce che devono internamente combinarsi; poi nel mettere a segno le pietre s'introducano tra di esse de' piccoli cunei di legno duro, e per ultimo riempionsi di cementi i vani. Nell'indicato metodo moderno le commessure restano subordinate alle faccie esterne; all'opposto gli antichi subordinavano le faccie esterne alle commessure; ed acciocchè tal pratica, favorevole alla solidità, non pregiudicasse punto alla bella apparenza esteriore, lasciavano grezze le faccie visibili, avendo cura nel metterle in opera di far sporgere all'infuori un mediocre sopravanzo di pietre da tagliarsi poi sul luogo con tutta esattezza dopo terminata la muratura".
 - 10 "Le vice de la plupart des constructions modernes en pierres de taille, ne vient pas de ce qu'elles sont posées avec du mortier, mais du peu de soin qu'on met à la taille des lits et à la pose dans la plupart des constructions de ce genre."
 - 11 "Cette méthode absurde, qui réunit tous les défauts possibles, n'a pu être imaginée que par les mauvais ouvriers ou les entrepreneurs avides, qui ne cherchent qu'à augmenter leurs bénéfices aux dépens de la solidité de l'ouvrage."
 - 12 "Gli edifici debbono essere costruiti con sistemi tali da comprendere una ossatura di membrature di legno, di ferro, di cemento armato o di muratura armata, capaci di resistere contemporaneamente a sollecitazioni di compressione, trazione e taglio, ... contenga nelle sue maglie, il materiale formante la parete, o vi sia immersa."
 - 13 "Quello dello stile, del resto, è anzitutto problema di ambientamento, a cui talvolta il sentimento ... si aggiunge con forza incoercibile al di là di tutte le nostre teorie. Così avviene con forza incoercibile di là di tutte le nostre teorie che edifici storici vengono restaurati. Così avviene ora a Messina, ove tutta la popolazione ha rivoltato il duomo crollato "dov'era e com'era", anche se questo dovrà essere eseguito nel modo costruttivamente più illogico ed insincero mediante le strutture asismiche nascoste sotto la veste ricopiata dall'antico."
 - 14 "La nostra Italia, pur essendo ben lungi dall'essere sottoposta alle congiunzioni telluriche di straordinaria violenza che di frequente sconvolgono lontane regioni, quali il Giappone le Antille e il Messico la California ed altre Monte ha purtroppo in Europa un triste primato sismico."
 - 15 "... Nella Cattedrale di Milano, ove le doppie navate laterali sono elevatissime, il diametro dei piloni, formanti un fascio di otto colonne, è il terzo della loro distanza presa da un mezzo all'altro, ed il sesto della grandezza della grande navata. Ma i muri di cinta, comprendendovi i mezzi piloni ed i contrafforti, non hanno che il terzo della larghezza delle navate di mezzo; mentre in quella di Nostra Signora di Parigi i muri delle cappelle oppongono uno spessore maggiore della metà della larghezza della grande navata. Nella cattedrale di Firenze (Santa Maria del Fiore), i piloni che separano la grande navata dalle laterali sono estremamente allontanati gli uni dagli altri, ed i muri esterni sottilissimi. Il loro spessore, che non è che la settima parte della larghezza della navata, sarebbe insufficiente per sostenere la spinta delle volte a crociera elevatissime, se tale spinta non fosse distrutta dai doppi tiranti di ferro che attraversano la navata di mezzo su ciascun pilone, e da forti armature di legno poste al di sopra delle volte navate laterali con 'archi di pietra a contrafforti, che non appaiono all'esterno." (Rondelet 1802-1807, 3: p. 329)
 - 16 "Nous avons déjà remarqué que ces voûtes d'arête gothiques ne sont pas, comme les voûtes régulières, le résultat de parties de voûte en berceau qui se croisent; c'est l'assemblage de plusieurs ares, dont les intervalles sont garnis de maçonnerie légère, disposée de la manière la plus propre à les maintenir et à former un ensemble régulier. Comme le milieu des lunettes ne forme jamais une ligne droite horizontale, mais une courbe, il en résulte que tout l'effort ne tombe pas seulement sur les piedroits, et qu'une partie est soutenue par les parties

- de murs intermédiaires; c'est pourquoi ces voûtes, pour la légèreté et la solidité, ont l'avantage sur les voûtes régulières." (Rondelet 1802-1807, 3: p. 330)
- 17 "La forza de' muri dipende non solo dà solidi fondamenti, e dagli scelti materiali, ma anco dalla materia d'impiegare essi materiali. Non è già raro, che con fermi fondamenti, e con materiali ottimi si facciano fabbriche debolissime per ignoranza o per trascuratezza nella disposizione."
- 18 "Un muro avrebbe la massima solidità se fosse monolitico, ma siccome ciò non è praticabile, per accostarsi il più possibile a questo limite è uopo che tutte le pietre siano talmente aderenti le une alle altre, e talmente si combacino da formare una sola massa."
- 19 "La rottura de' massi dipende dal momento della spinta, per opera della quale sono poi rovesciati con moto rotatorio intorno allo spigolo esteriore della base de' massi medesimi, in allora alla rottura e dal rovesciamento s'oppongono il momento delle pressioni verticali e quello della coesione... Se poi la coesione fosse grandissima sarebbe in questo caso la linea di rottura coincidente con la base. ... man mano che C (il coeff. della coesione) diminuisce κ aumenterà e la linea di rottura s'allontanerà sempre più dalla base."
- 20 Los detalles de los ensayos se pueden consultar en Fonti (2013).
- 21 "Convien saper calcolare l'urto e la spinta per opporre una resistenza conveniente: da ciò dipende la grossezza de' muri ... Ma se v'entrassero pietre vive, converrebbe fare i muri più grossi, e tanto più grossi, quanto più il pietrame, che s'impiega, è irregolare e fragile."
- 22 "Le Fonti del tempo in merito ai danni causati dal terremoto del 1726 [Palermo] restituiscono ... un quadro allarmante. I dissesti nelle cupole riguardano sia la calotta, spesso interessata da profonde lesioni, che le strutture murarie sottostanti le quali rivelano la loro inadeguatezza, per lo più dovuta a un loro insufficiente dimensionamento... I criteri individuati per un adeguata ricostruzione erano quelli che vedevano la collaborazione dei lapidei con altri materiali primo fra tutti appunto il ferro, identificato quale essenziale strumento per conferire solidità e resistenza agli edifici. ... Il nuovo materiale lapideo, approntato in cava, poteva avvantaggiarsi nella scelta della 'pietra giusta al posto giusto', sia per l'ispessimento di pareti murarie (anche a mezzo di fodere con finalità strutturali) sia per la realizzazione di apparecchi murari ritenuti 'antisismici'".
- 23 "Queste volte a botte riescono d'un aspetto grave, serio, oscuro; ben convenienti perciò a luoghi di tal carattere. Elleno hanno il loro merito, quando son piene, e senza quelle lunette che tagliano informemente i reni della volta, e vi formano delle curve irregolari. Per prendere il lume, meglio è praticare alla chiave della volta un'apertura quadrata o rettangola secondo la pianta dell'edificio, e sopra inalarvi una lanterna a giorno nel di cui soffitto restituire la parte levata alla volta."
- 24 "E d'altronde evidente che quando un piedritto sopporta simultaneamente l'azione di due o più spinte uguali e direttamente opposte, queste si elidono, ed il sostegno non soffre che l'azione verticale del peso delle porzioni di volte che gli corrispondono."
- 25 "Tra i numerosi interventi testimoniati dalle fonti archivistiche, può essere analizzato, a titolo di esempio, quello attuato nel Palazzo Senatorio, dove fu prevista la realizzazione di una volta in pietra reale (dammuso) in sostituzione di un solaio piano in legno danneggiato ... era inoltre, prevista la costruzione sull'estradosso di sei 'cofolari' (una sorta di muretti in pietra) con soprastanti lastre lapidee, sulle quali veniva collocato il pavimento in mattoni 'di Termini'."
- 26 "Giacchè la sperienza insegna che le volte si rompono od alle reni od al di sotto, conviene per opporsi a questo effetto nocivo rinforzarle in quel luogo con opportuna muratura. Alcuni costruttori proposero di sostituire alla muratura continua sul dorso delle volte alcuni murelli paralleli, distanti tra loro d'un terzo della larghezza della volta, e grossi quant'è all'incirca la decima parte della distanza tra loro. Gli spazi poi tra i muriccioli dovrebbero essere ripieni di pietrame e coperti d'un buono strato di cemento. ... Fu pure suggerito un altro metodo per non troppo sopraccaricare le volte di muratura, il quale consiste nel formare al di sopra dell'estradosso alcune lunette chiuse disposte regolarmente a distanze uguali."

LISTA DE REFERENCIAS

- Baratta, M. 1909. Il terremoto calabro-siculo del 28 dicembre 1908, Messina. *Bollettino della Società Geografica Italiana* 10: 852-882, 980-1019.
- Baratta, M. 1910. *La catastrofe sismica Calabro-Messinese (28 Dicembre 1908)*. Roma: Società Geografica Italiana.
- Blunt, A. 1968. *Sicilian Baroque*. New York: Macmillan.
- Borgnis, G.A. 1842. *Elementi di Statica Architettonica*. Milan: Gaspare Truffi.
- Cavalieri San-Bertolo, N. 1831. *Istituzioni di architettura statica e idraulica*. Mantova: Presso i Fratelli Negretti.
- Choisy, A. 1873. *L'art de bâtir chez les Romains*. Paris: Ducher. (Trad. esp.: *El arte de construir en Roma*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, 1999).

- Danyzy, A. A. H. (1732) 1778. Méthode générale pour déterminer la résistance qu'il faut opposer à la poussée des voûtes. *Histoire de la Société Royale des Sciences établie à Montpellier* 2: 40–56.
- Doherty, K., M. C. Griffith, N. T. K. Lam y J. L. Wilson. 2002. Displacement-based seismic analysis for out-of-plane bending of unreinforced masonry walls. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 31: 833–850. <https://doi.org/10.1002/eqe.126>
- Fabrizio, A. 1933. *I terremoti e i diversi sistemi di costruzioni antisismiche*. Benevento: Tipi De Martini.
- Faggiano, B., R. Fonti y R. Landolfo. 2018. The damage assessment of the monumental travertine façade of the banco di Napoli palace in via Toledo in Naples. En: F. M. Mazzolani et al., (eds.), *3rd International Conference on Protection of Historical Constructions (PROHITECH 17)*, Lisbon 2017. Lisboa: Tecnico Press.
- Fonti, R. 2013. *La Statica delle Murature in pietra grezza*. Ph.D. Thesis, University of Naples Federico II.
- Fonti, R. 2017. Investigating modern concrete buildings by the work of Gino Zani: the case of Messina and Reggio Calabria. En: C. Tsitouras y T. Simos (eds.), *International Conference of numerical analysis and applied mathematics (ICNAAM 17)*, Thessaloniki, Griechenland 2017. AIP Conference Proceedings. <https://doi.org/10.1063/1.5044057>
- Fonti, R. 2024. *Marcello Piacentini Restauratore. The structural honesty of forms, the use of passive skeletons and the aesthetic of the Simplified Neoclassicismus*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Giovannoni, G. 1929. *Questioni di architettura nella storia e nella vita*, Rome: Società Editrice d'Arte Illustrata.
- Giuffrè, A. 1986. *La meccanica nell'architettura. La statica*. Roma: La Nuova Italia Scientifica.
- Giuffrè, A. 1991. *Lettura sulla Meccanica delle Murature Storiche*. Rome: Kappa.
- Giuffrè, A. y C. Carocci. 1999. *Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione del centro storico di Palermo*. Roma: Laterza.
- Heyman, J. 1966. The stone skeleton. *International Journal of Solids and Structures* 2: 249–279. (Trad. esp. en Heyman 2015, vol. I: 1–34). [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(66\)90018-7](https://doi.org/10.1016/0020-7683(66)90018-7)
- Heyman, J. 1983. Chronic Defects in Masonry Vaults: Sabouret's Cracks. *Monumentum* 26: 131–141. (Trad. esp. en Heyman 2015, vol. I: 279–286)
- Heyman, J. 2015. *Teoría, historia y restauración de Estructuras de Fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera. 2vols.
- Mercalli, G. 1897. I terremoti della Calabria meridionale e del messinese. *Memorie della Società Italiana delle Scienze (detta dei XL)*, s. III, 11: 117–266.
- Mercalli, G. 1908–1909. Sul terremoto calabrese del 23 ottobre 1907. *Bollettino della Società sismologica italiana* 13: 9–15.
- Mercalli, G. 1913. *I recenti terremoti dell'Asmara*. Torino: Tip. S. Giuseppe degli artigianelli.
- Middleton, R. y M. N. Baudouin-Matuszek. 2007. *Jean Rondelet. The architect and technician*. New Haven and London: Yale University Press.
- Milani, G. B. 1920. *L'Ossatura Murale. Studio statico-costruttivo ed estetico proporzionale degli organismi architettonici, con speciale riferimento alle strutture elastiche nelle loro varie e moderne applicazioni pratiche: I. La Stabilità*. Torino: Artistiche C.Crudo&c.
- Milizia, F. 1785. *Principi di Architettura Civile*. Bassano: a spese Remondini di Venezia, tom. 3.
- Nebbia, U. 1929. Vecchie chiese messicane. *Emporium*, v. 69, n. 412: 209–226.
- Nègre, V. 2009. Some Considerations on Traité de L'Art de Bâtir by Rondelet and the Technical Literature of his Time. *Proceedings of the Third International Congress on Construction History, Cottbus, 20–24 May 2009*. Cottbus: Chair of Construction History and Historical Preservation of the Brandenburg University of Technology: 1089–1097.
- Pagano, G. 1934. L'insegnamento degli Antichi. *Casabella*, n. 08 agosto: 2–3.
- Pesso, L. 1876. Sul consolidamento delle fabbriche nella Calabria contro i danni dei terremoti. *L'ingegneria civile e le arti industriali*, 136–139.
- Piranesi, G. B. 1784. *Le Antichità Romane. Vol. 1*. Roma: Nella Stamperia Salomonì.
- Pugliatti, T. 1991. Francesco Valenti e il restauro come ricostruzione integrale. *Archivio Storico Messinese* 58: 99–158.
- Rondelet, J. B. 1802–1807. *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*. Paris: chez l'auteur.

- Rondelet, J. B. 1832–1835. *Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare*. Traducido por Basilio Soresina. Primera traducción italiana. Mantova: A spese della Società editrice.
- Scibilia, F. 2015. *Terremoto e architettura storica. Palermo e il sisma del 1726*. Palermo: Edizioni Caracol.
- Stellingwerff, G. 1932. *Costruzioni Antisismiche*. Milan: Hoepli.
- Vivenzio, G. 1788. *Istoria de' tremuoti avvenuti nella provincia di Calabria Ulteriore, e nella città di Messina nell'anno 1783, e di quanto nelle Calabrie fu fatto per il suo risorgimento fino al 1787. Preceduta da una teoria, ed istoria generale de' tremuoti*. Napoli: Nella Stamperia Regale.
- Zahn, J. 1696. *Specula physico-mathematico-historica notabilium ac mirabilium sciendorum. Tomus II. Norimbergae: sumptibus Joannis Christophori Lochner bibliopolae*.
- Zani, G. 1925. *Nuovi sistemi di costruzioni edilizie moderne per i paesi soggetti a terremoto*, Technical Report.

La doctora Roberta Fonti, trabaja en Facultad de Arquitectura de la Technische Universität München. Investiga sobre ingeniería estructural y conservación de edificios patrimoniales.

Citar como: Fonti, Roberta. 2025. La revolución de las formas barrocas en zonas sísmicas. *Revista de Historia de la Construcción* 5: 73-99. <https://doi.org/10.4995/rdhc.2025.25105>.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5617-3950>

Copyright: 2025 SEDHC. Este artículo es de acceso abierto y se distribuye bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.