

i terremoti prima in Italia e nell'

del Mille area mediterranea

a cura di Emanuela Guidoboni

ING



ed. SGA Storia - Geofisica - Ambiente Bologna 1989

STORIA
ARCHEOLOGIA
SISMOLOGIA

terremoti e architetture antiche: le cupole del Pantheon e di Santa Sofia

Robert Mark

La costruzione di edifici monumentali con soffitti a volta e cupole di grandi dimensioni è stata facilitata sul volgere del I secolo d.C. dall'adozione da parte dei Romani del calcestruzzo compresso da costruzione (*caementa*), una tecnica che era stata sviluppata lungo i due secoli precedenti, ma applicata prima di allora solo nell'edilizia non monumentale. Il Pantheon, costruito tra il 118 e il 128 d.C. ca. con muri massicci di calcestruzzo e con mattoni a vista e una grande cupola di calcestruzzo ricoperta di bronzo del diametro di 43 m, è l'edificio più rappresentativo di questa nuova architettura.

Per meglio comprendere la struttura del Pantheon abbiamo usato una tecnica computerizzata nota come modellazione a elementi finiti (cfr. Mark e Hutchinson 1986). Una prima serie di prove è stata effettuata ipotizzando che il calcestruzzo si comporti come un monolitico e non subisca incrinature. Si sono così trovate ampie zone di sforzo di trazione circolare nei muri e nella cupola, ma il livello massimo di compressione era piuttosto basso, dell'ordine di 1 kg/cm^2 . Un risultato sorprendente di queste prove è stato che, rimuovendo gli anelli a gradoni vicini alla base della cupola, i valori di compressione al cerchio massimo diminuivano di circa il 20 per cento. Evidentemente questi anelli non avevano il salutare effetto di rinforzo che è stato generalmente loro attribuito (cfr., per es., Salvadori 1980, pp. 230-33).

Il calcestruzzo romano è simile all'attuale cemento di Portland quanto alla resistenza, alla compressione e alle proprietà idrauliche. Ciò nonostante, esso presenta due cruciali differenze rispetto alla costruzione in cemento armato. Anzitutto, la consistenza dell'amalgama dell'attuale calcestruzzo è fluida e omogenea, cosa che consente di versarlo in forme e di compimerlo in una massa densa. Nell'edilizia romana, invece, il calcestruzzo era denso e veniva applicato manualmente a strati attorno a grandi pezzi di materiale. In secondo luogo, l'integrazione di ferro rinforzante conferisce alle strutture in cemento armato una grande resistenza elastica. Nessun rinforzo di questo tipo era utilizzato nelle costruzioni romane. Di conseguenza, è stata effettuata una seconda serie di prove basata su ipotesi conformi alla moderna teoria ingegneristica. Questa afferma infatti che l'antico calcestruzzo non rinforzato non poteva resistere ad alcuno sforzo di trazione. Come ci si poteva attendere, il modello della cupola e del muro di sostegno ora indicava un'ampia incrinatura longitudinale, poiché la cupola agiva come un guscio al di sopra dell'incrinatura e come una serie circolare di archi a forma di cuneo al di sotto di essa. In questo caso il carico supplementare degli anelli a gradoni aiuta a mantenere i segmenti di archi in compressione — analogamente all'effetto del sovrappeso della pietra tagliata posta sopra il quarto degli archi romani. Inoltre, l'estensione calcolata dell'incrinatura, prevista di 54 gradi al di sopra del piano orizzontale della base della cupola, si accorda quasi esattamente con il rilievo delle lesioni dell'attuale cupola fatte all'inizio di questo secolo (Terenzio 1934). Il Pantheon si comporta come una cupola che lavora in compressione al di sopra dell'incrinatura e come una serie di archi al di sotto; così la regione inferiore con gli archi può essere liberamente suddivisa in porzioni radiali.

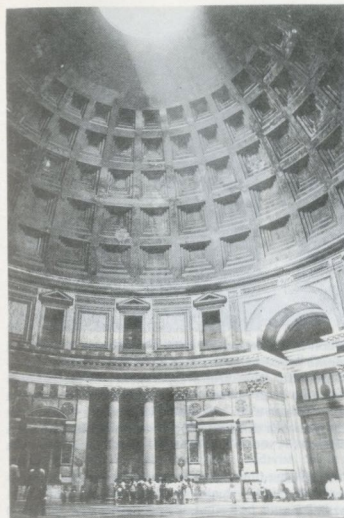
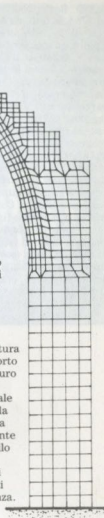


fig. 128 Roma. Il Pantheon ha rappresentato un ardito esperimento che ha superato i limiti delle costruzioni delle cupole in muratura, fornendo ai costruttori antichi e ai loro successori insegnamenti che solo ora sono stati compresi. L'altezza della cupola, equivalente a un edificio di 14 piani, è maggiore di qualsiasi altra, eccetto un piccolo numero di cattedrali gotiche. In questa veduta dell'interno, la sola fonte luminosa è l'*oculus*, un'apertura di 8 m di diametro al centro dell'emisfero. Il modello geometrico dei cassettoni, gioca un ruolo di gran lunga meno significativo di quanto un tempo si pensasse nel ridurre il peso della cupola (foto R. Mark).

fig. 129 In questa sezione elaborata al computer del modello tridimensionale a «elementi finiti» usato per simulare la struttura della cupola del Pantheon, il muro di supporto è omogeneo ed è alquanto più sottile del muro attuale, che contiene ampie aperture. L'altezza del muro interno cilindrico è uguale al raggio di 21,5 m della parte inferiore della cupola. Perciò una sfera che incorporasse la superficie della cupola sarebbe perfettamente contenuta all'interno dell'edificio. Il modello della cupola non considera alcun effetto indotto dai cassettoni, ma tiene conto degli anelli a gradoni, che sono stati poi eliminati dal modello per determinare la loro influenza.

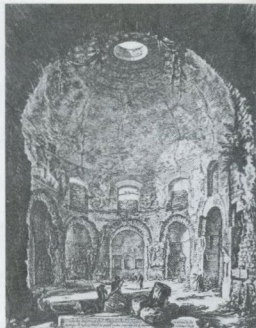


La coincidenza del comportamento predetto dalla seconda serie di prove con quello della struttura effettiva indica che, per scopi pratici, non si poteva fare affidamento sul calcestruzzo romano di pozzolana per esibire alcuna resistenza elastica. In quanto tale, il calcestruzzo romano non offriva alcun vantaggio strutturale rispetto a una tradizionale costruzione in muratura di mattoni o pietre. La decisione di utilizzare calcestruzzo nell'architettura romana di grandi dimensioni sembrerebbe quindi derivare da considerazioni di ordine edilizio, anziché di ordine strutturale. La posa del calcestruzzo, verosimilmente effettuata da schiavi non specializzati, era senza dubbio meno costosa rispetto alla precisione richiesta dalla costruzione in mattoni o in pietra tagliata.

Questa concezione «revisionista» delle costruzioni romane di grandi dimensioni è anche di grande importanza per ulteriori studi analitici riguardanti la risposta ai terremoti da parte delle costruzioni antiche. Per formulare modelli dinamici si deve tener conto non solo dell'effettivo stato di fessurazione di queste strutture ma anche dell'esistenza di campi di sforzo esistenti prodotti dai pesi morti statici all'inizio di un terremoto; perciò prima di intraprendere un'analisi dinamica, si dovrebbero effettuare analisi statiche di questo tipo insieme con studi archeologici dettagliati che consentano di stabilire gli appropriati modelli analitici.

fig. 130 Roma. Nel disegno di Giambattista Piranesi del 1764, la rotonda del tempio della Tosse, del III secolo d.C., mette in evidenza le spaccature molto di più di quanto sia stato sperimentato dal suo più grande prototipo, il Pantheon. Piranesi disegnò un insieme di lesioni lungo i meridiani nella parte inferiore della cupola che sono in accordo con quanto prevede il modello del Pantheon. Le spaccature non si prolungano fino alla parte superiore della cupola intorno all'oculus, dove il modello indica che il calcestruzzo è in compressione.

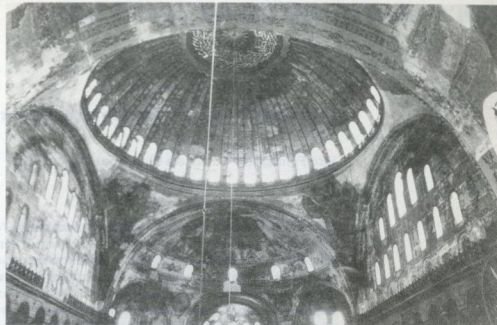
fig. 131 Costantinopoli. La base della cupola in mattoni di Santa Sofia, consacrata nel 537 d.C., è circondata da finestre, che danno l'impressione che la cupola stessa fluttui liberamente sopra l'ampio spazio sottostante. Come risulta dal modello del Pantheon, anche le finestre hanno aiutato a salvare la base della cupola da spaccature, interrompendo una linea di sforzi tensionali circolari che altrimenti avrebbero potuto esserci. Il profilo originario della cupola, che crollò alla metà del VI secolo, dopo una serie di terremoti, era 6 m più basso della cupola attuale (foto R.Mark).



Se la struttura del Pantheon non fu rivoluzionaria nello stesso senso in cui lo fu l'introduzione del moderno cemento armato alla fine del XIX secolo, per la sua gigantesca mole fu comunque il prodotto di un ardito esperimento di costruzione. L'osservazione del suo comportamento (o di quello di altre grandi cupole di forma simile che seguirono il Pantheon) condusse a sua volta allo sviluppo di nuove forme strutturali. L'introduzione della sequenza di finestre poste attorno alla base della cupola di Santa Sofia a Costantinopoli (VI secolo d.C.) illustra questo progresso nella costruzione.

A causa delle sue numerose ricostruzioni, dei molti terremoti occorsi, la questione di Santa Sofia è più complessa. Tuttavia valgono le stesse considerazioni. In questo caso l'iniziale modellizzazione statica (effettuata prima dell'analisi dinamica) deve spiegare gli effetti di lungo periodo, incluse le deformazioni significative, associati con le ricostruzioni effettuate nel corso della sua storia. Si è pensato che la concezione architettonica della grande chiesa costruita dall'imperatore Giustiniano — oggetto di grande ammirazione per i suoi effetti di luce diffusa, che creano l'immagine di una immensa cupola (33 m di diametro) che «fluttua» sullo spazio interno — sia stato motivato soltanto dagli effetti visivi. Ciò poteva apparire ragionevole prima che fosse intrapreso lo studio del Pantheon per mezzo di modelli, tranne per il fatto che le finestre alla base della cupola di Santa Sofia sono in una zona in cui ci si sarebbero aspettati gli sforzi di trazione circolare più critici. Dopo lo studio del Pantheon è diventato chiaro che se la base della cupola fosse rimasta solida, sarebbe stata soggetta a incrinature longitudinali simili a quelle sperimentate dal Pantheon; e, come per il Pantheon, la parte più bassa della cupola poteva essere liberamente segmentata. Gli antichi architetti non godevano dei benefici dei nostri strumenti di analisi, ma chiaramente, utilizzando i precedenti edifici come modelli, erano portati a conclusioni simili alle nostre.

Si afferma spesso che Antemio e Isidoro, i principali 'progettisti' di Santa Sofia, conoscitori rispettivamente anche come geometra e scienziato naturale, abbiano elaborato nuove forme strutturali a partire dalla teoria matematica (Krautheimer 1979, p.215). Eppure non c'è alcuna prova che la meccanica bizantina dell'epoca fosse



abbastanza avanzata da permettere anche la più elementare analisi teorico-strutturale. È quindi particolarmente interessante il fatto che la cupola originale insieme ai suoi pennacchi (i segmenti triangolari e sferici al di sotto della cupola) formava una superficie emisferica di scala simile a quella del Pantheon (46 m di diametro interno contro i 43 m del Pantheon). Il suo profilo era circa 6 m più basso dell'attuale, che ha ancora una struttura eretta nel 558, successiva al crollo della cupola originale provocato da un terremoto. La loro approssimativa coincidenza di dimensioni smentisce l'opinione comunemente condivisa che la scala della cupola del Pantheon sia stata eguagliata solo molto più tardi, nel Rinascimento, dalla cupola di Brunelleschi a Firenze, che fu completata nel 1436, e poi da quella di S. Pietro a Roma, finita nel 1590. Si noti anche che i massicci supporti che stanno dietro i pennacchi della cupola di Santa Sofia danno sostegno allo stesso modo in cui gli anelli a gradoni e i muri spessi 6 m, lo fornivano alla parte più bassa della cupola del Pantheon. Inoltre, le aperture delle finestre che circondano la base della cupola originale di Santa Sofia furono verosimilmente portate a più di 50 gradi al di sopra del piano orizzontale della base (cfr. Conant 1939). Si può quindi concludere che la concezione della cupola di Santa Sofia fu derivata dalla risposta a interessi strutturali aperti dall'esperimento del Pantheon e che il meraviglioso effetto di luce può essere stato il fortuito sottoprodotto di una forma fondata sull'osservazione del comportamento strutturale di cupole precedenti.

bibliografia

- Conant K.J. 1939, 'The First Dome of the Hagia Sophia and its Rebuilding', *American Journal of Archaeology* 43, pp.589-91.
 Krautheimer R. 1979, *Early Christian and Byzantine Architecture*, New York, 3a ed.
 Mark R. e Hutchinson P. 1986, 'On the Structure of the Roman Pantheon', *Art Bulletin* 68, pp.24-34.
 Salvadori M. 1980, *Why Buildings Stand Up*, New York.
 Terenzio A. 1934, 'La Restauration du Pantheon de Rome', in *La conservation des monuments d'art et d'histoire*, Paris, pp.280-85.