

Strutture e sostenibilità per l'edilizia storica

Paolo SPINELLI

L'articolo che segue, è il risultato di una sintesi di due interventi dell'autore tenuti ai due convegni:

"Città storica e sostenibilità", a cura di Maurizio De Vita, Palazzo Vecchio, Firenze 17 Marzo 2009

"La cultura umanistica e tecnica per la conservazione degli edifici storici e monumentali", Collegio degli Ingegneri della Toscana, Palazzo Pitti, Firenze 12 Giugno 2009.

Il tema delle strutture a servizio dell'edilizia storica e monumentale è un tema senza dubbio affascinante e difficile. L'obiettivo dovrebbe consistere nella fruttuosa combinazione delle conoscenze del restauro con quelle nel campo strutturale e della sicurezza, sì da ottenere un passo in avanti importante non solo da un punto di vista culturale ma anche tecnico scientifico.

Ma per l'ingegnere delle strutture, le problematiche legate ad interventi di restauro non sono irrilevanti. Ha infatti da mutarsi parecchio l'atteggiamento progettuale dell'ingegnere delle strutture per poter prendere conoscenza dell'ambito diverso e speciale dell'intervento strutturale nell'ambito del restauro.

Questo necessario cambio di atteggiamento, non sta solo nel dovuto "rispetto" dell'opera monumentale in quanto eredità storica ed artistica, ma sta in qualcosa di più sottilmente legato alla stessa ingegneria delle strutture. In effetti, nel caso delle strutture per l'edilizia storica l'ingegnere deve procedere non più con l'obiettivo del "minimo costo" delle strutture ma con l'obiettivo della "minima perturbazione" e questo è una consapevolezza raggiunta solo da qualche decennio in qua nel campo dell'ingegneria delle strutture. Tra guardare l'obiettivo della "minima perturbazione", non è solo finalizzato al rispetto dell'opera monumentale, ma anche e soprattutto al fatto che l'intervento nuovo non perturbi l'equilibrio ed i modi del funzionamento statico strutturale dell'antica struttura. Da questo discende la necessità che il nuovo si "sposi" per così dire al vecchio adattandosi alla rigidità, alla resistenza, ed alla duttilità dell'opera antica.

Ancora l'ingegnere deve avere a disposizione la conoscenza del metodo di costruire e progettare delle strutture in pietra antiche. Le costruzioni monumentali in pietra, infatti, non funzionano come le costruzioni moderne. E il modo di costruire, progettare, dimensionare le strutture, è radicalmente diverso fra le strutture attuali e le strutture in pietra. Jacques Heyman nel suo "The stone skeleton" [1] ha ben messo in evidenza la differenza delle due concezioni strutturali. In effetti attualmente l'attenzione dell'ingegnere delle strutture è orientata ai tre criteri fondamentali del progetto: di resistenza (il materiale non si deve rompere), rigidità (la struttura non si deve deformare troppo), stabilità (la struttura non deve subire grandi spostamenti per instabilità o ribaltamento). Nelle strutture antiche invece, il solo requisito importante è quello della stabilità (essendo i tassi di lavoro nella pietra degli edifici monumentali di

basso livello) mentre sia la resistenza che la deformabilità non sono rilevanti ai fini progettuali.

Come fatto notare da Jacques Heyman [1], per rendersi conto della limitat importanza dello stato tensionale può essere più efficace e convincente pensare non tanto al livello delle tensioni raggiunto ma alla massima altezza fino a cui può essere costruita una colonna prismatica prima che si rompa sotto al suo peso. Questa altezza per una pietra arenaria è dell'ordine di 2 Km e per un granito o marmo resistente può arrivare fino a 10 Km. Ora, ad esempio, la cattedrale gotica ha altezza media dell'ordine dei 50 m e, anche tenendo conto della concentrazione dei carichi sulle colonne centrali della cattedrale, i livelli di tensione non arrivano mai che a valori dell'ordine di 1/10 o 1/100 della resistenza dei materiali.

Nel passato quindi l'unico aspetto rilevante per le costruzioni lapidee era quindi quello della stabilità. E l'unico stato limite importante da verificare era pertanto il ribaltamento e la perdita di equilibrio delle strutture. La legge fisica regolatrice era quindi la semplice regola della leva.

La legge della leva, dice Plutarco nelle "Vite parallele" è stata intuita da Archimede attorno al 250 a.C (fig.1), e si basa sulla semplice regola della proporzionalità fra bracci e pesi. In fig. 2 si illustra l'interessante dimostrazione della regola con l'attrezzatura di De la Hire (1695). Si dimostra, osservando la configurazione finale, che il peso P resta in equilibrio con il peso 2P, con bracci rispetto al fulcro pari rispettivamente uno il doppio dell'altro. Dato appunto che la legge della leva è basata sulla semplice regola della proporzionalità fra bracci e pesi, è evidente che se si riducono in scala bracci e pesi l'equilibrio è verificato. Pertanto le regole costruttive dell'architettura antica, quelle delle proporzioni, tanto care ai trattatisti fino al Vignola [2] (fig. 3), trovano la loro ragione profonda nelle verifiche di stabilità e nella legge della leva. Si capisce quindi come il "progetto strutturale" degli antichi poteva avvenire davvero semplicemente usando modelli in scala, ovvero ampliando via via le dimensioni di costruzioni realizzate in esempi con dimensioni più piccole. Lo stesso Brunelleschi, prima della cupola di S. Maria del Fiore aveva sperimentato le modalità di costruzione nella cupola a scala più piccola di S. Jacopo in Oltrarno, che ancorché non rappresentativa delle difficoltà costruttive della ben più impegnativa cupola del Duomo, testimonia tuttavia il ricorso ai modelli come percorso progettuale dell'ingegnere del tempo.

Un ulteriore aspetto che richiede una "messa a punto" dell'atteggiamento dell'ingegnere delle

“... Una volta Archimede scrisse a re Gerone, suo parente e amico, che qualsiasi carico poteva essere mosso da una data forza, e giunse anzi al punto di affermare che sarebbe stato in grado di smuovere anche la Terra, se solo avesse potuto appoggiarsi da qualche altra parte.”
Plutarco - Vite parallele

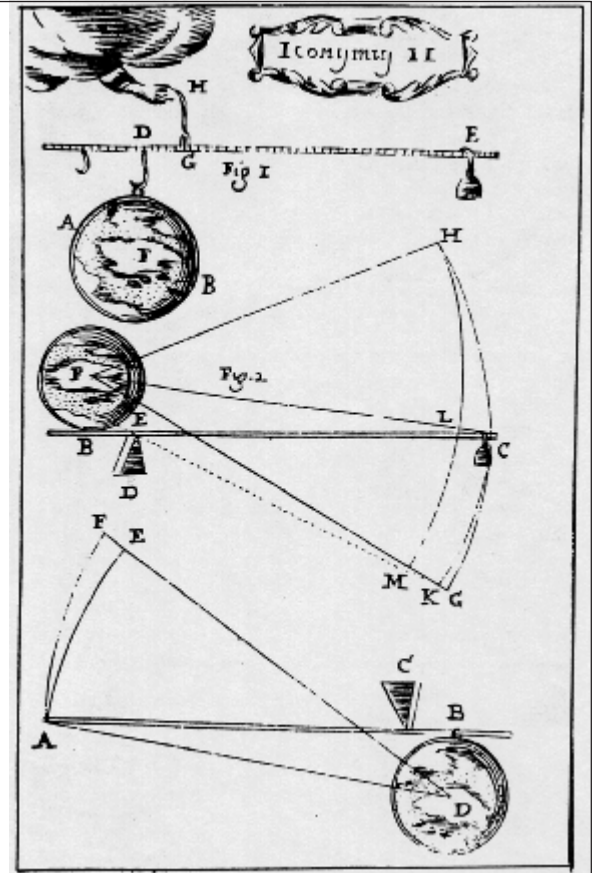


Fig. 1 - Citazione da Plutarco, Vite Parallele

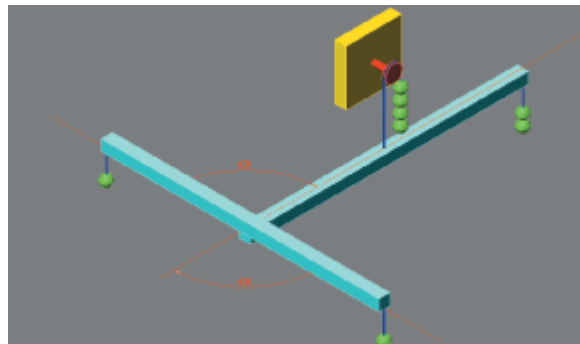


Fig. 2 - Philippe De la Hire: Attrezzatura utilizzata per dimostrare la legge della leva

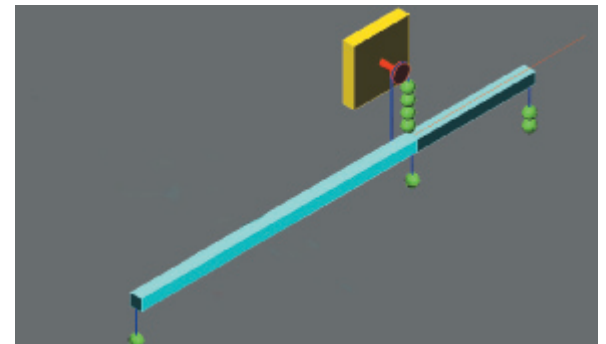


Fig. 3 - Giacomo Vignola, Regola delli cinque ordini d'architettura [2]

strutture sta nel fatto che in una costruzione in pietra lo stato effettivo delle tensioni interne non si può conoscere con certezza. Non solo, il livello tensionale puntuale che si verifica, non è affatto indice della vicinanza al collasso della struttura e in generale del suo stato di salute. In effetti, se si può conoscere con precisione l'andamento della curva delle pressioni e le tensioni conseguenti all'interno in un arco, è da sottolineare però che minimi, imprevisi ed imprevedibili cedimenti vincolari o difetti geometrici possono cambiare sostanzialmente lo stato tensionale all'interno della struttura. Quindi, data la impossibilità di conoscere con assoluta precisione la geometria e lo stato dei vincoli, ne consegue la indeterminatezza dello stato interno delle tensioni. E quindi occorre anche qui cambiare atteggiamento. Occorre verificare le strutture in pietra con le tecniche dell'analisi limite, ovvero immaginare un comportamento a rottura, immaginare la formazione di un meccanismo della struttura, che corrisponde a perdita di equilibrio, e verificare quanto attualmente ne siamo lontani. I due approcci metodologici, uno legato alla conoscenza dello stato tensionale e l'altro attento invece alla determinazione del meccanismo che porta al collasso la struttura, possono essere ben rappresentati da questi due disegni di due illustri geni toscani, Leonardo da Vinci e Galileo Galilei.

In fig. 4a il disegno di Leonardo (Codici di Madrid, 1519) che schematizza il comportamento a rottura di un arco. È attento, Leonardo, al ribaltamento concio su concio, non certo alla resistenza del materiale. In fig. 4b il disegno emblematico del problema che si pone Galileo nei "Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze" [3] (1638). A riguardo del tronco di legno incastrato nel muro si domanda Galileo quale sia

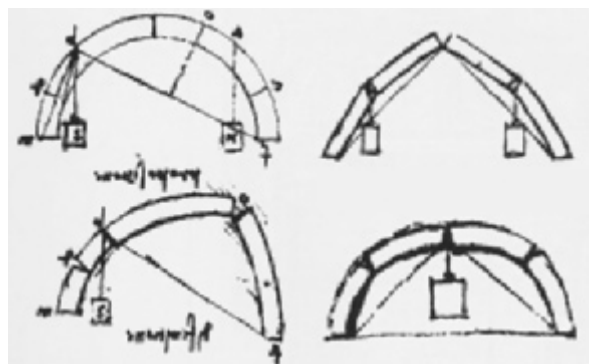


Fig. 4a - Da: I Codici di Madrid - Leonardo da Vinci (1519)



Fig. 4b - Da: Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze, Galileo Galilei (1638) [3]

il massimo cemento sopportabile dal materiale, ovvero introduce sia pure in maniera non consapevole il concetto di tensione interna. In fondo proprio dal quesito rappresentato da questo disegno si è sviluppata nel '700, nell'800 e fino ai giorni nostri la Scienza e la Tecnica delle costruzioni. Esse partono in fondo dal disegno di Galileo, cercano lo stato tensionale e deformativo, "certo" "esatto" all'interno di una struttura. E invece, per la verifica di costruzioni lapidee monumentali occorre tornare un po' prima di Galileo, a Leonardo e rinunciare per così dire alla certezza ed unicità della soluzione, accontentandosi solamente di identificare i meccanismi limite del funzionamento delle strutture.

E infine un'ultima osservazione: c'è un'ulteriore differenza sottile ma sostanziale fra i due disegni di Leonardo e di Galileo e sta nel ruolo del "peso proprio". Se nel disegno di Leonardo è evidente il ruolo e l'importanza del peso proprio dei conci dell'arco che dal mutuo contrasto si sorreggono, nel disegno di Galileo il peso sollecitante è aggiunto alla trave in legno. In altre parole il peso proprio della trave in legno non viene considerato. È appunto questo che occorre osservare: che nelle costruzioni monumentali il peso proprio è una risorsa per la stabilità di una struttura. L'esempio dei pinnacoli (v. fig. 5 ripresa da Jacques Heymann) che con il peso proprio impediscono la rottura alla base di archi rampanti ne è un esempio. Ora nelle strutture attuali, il peso proprio è sì considerato, ma è visto alla stregua di un avversario da battere, non come una risorsa da sfruttare. È tipico il concetto di carico utile, ovvero dell'effettivo carico che la struttura può sopportare oltre il peso proprio, ritenuto quasi una zavorra inutile, ovvero anche la ricerca della "leggerezza" strutturale, del minimo spessore dei gusci incemento armato, in quanto lo spessore è legato al peso proprio da sopportare. A dir la verità però anche nell'ingegneria strutturale moderna si possono vedere alcuni importanti controesempi. Come il ponte Alamillo a Siviglia (v. fig. 6) di Santiago Calatrava che sfrutta il peso proprio della pila per il sostegno del ponte. La pila infatti non possiede stralli di ammarro e solo grazie al proprio peso fa da "contrappeso" alla travata orizzontale. Quindi il peso proprio della pila è per così dire sfruttato in senso positivo, e non tollerato come inutile fardello. Può costituire un'interessante suggestione quella di sovrapporre lo schema del ponte allo schema indicato da Leonardo, nel codice Atlantico, con "l'uomo con il manubrio" (v. fig. 7) che indica la posizione di un uomo che si sporge e fa equilibrio al proprio peso sorreggendosi ad un "manubrio" sostenuto da cavi a terra. Le due immagini sono quasi sovrapponibili, suggerendo un parallelo del pensiero strutturale attraverso la storia.

Si può dire alla fine che la sfida dell'ingegnere delle strutture moderno che si accinge a mettere mano su edifici esistenti anche monumentali, sta nel riuscire ad interpretare il comportamento statico della struttura, conoscendo le tecniche costruttive e le metodologie "progettuali" del tempo, intervenendo quindi in armonia con le tecniche del passato, ed in questo senso con interventi rispettosi, appropriati e, in una parola, sostenibili.

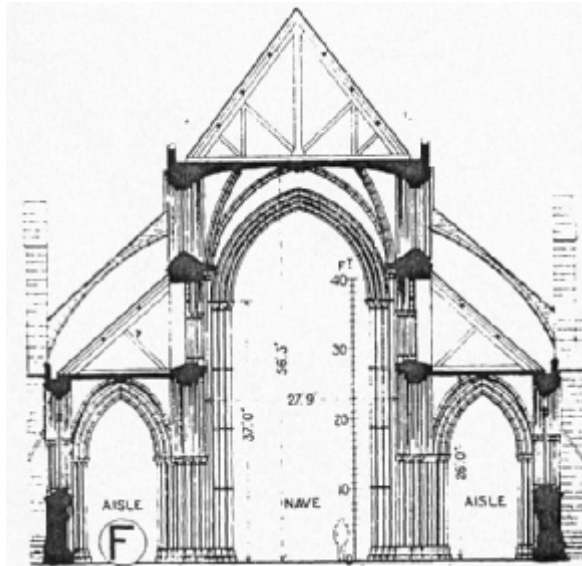


Fig. 5 - La funzione strutturale del pinnacolo [1]

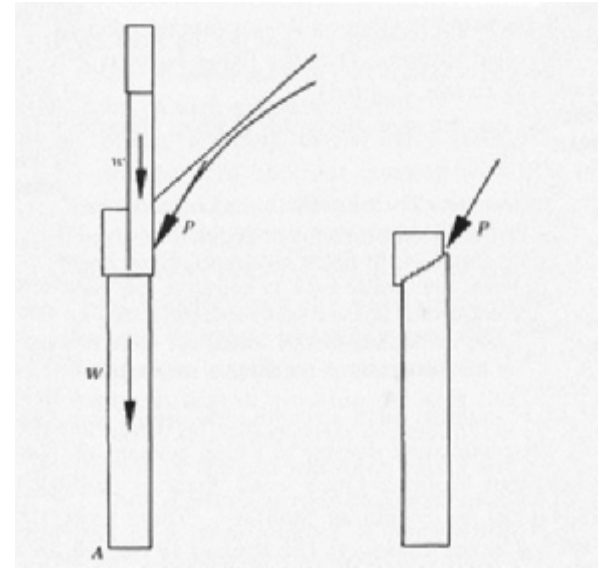


Fig. 6 - Santiago Calatrava, Ponte Alamillo, Siviglia,

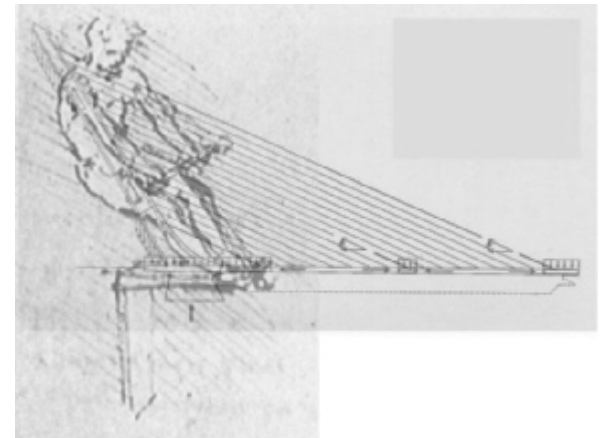
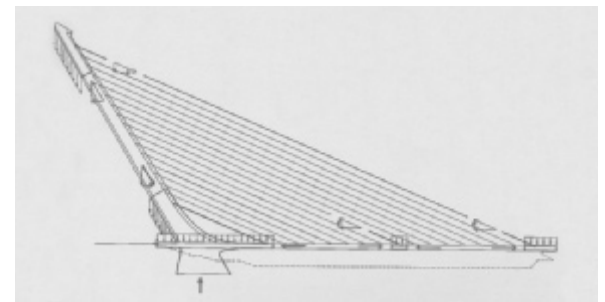


Fig. 7 - Uomo con manubrio, Leonardo da Vinci, Codice Atlantico

Paolo SPINELLI, nato nel 1950 a Firenze, si è laureato in Ingegneria presso la Facoltà dell'Università fiorentina dove attualmente è Professore Ordinario in Tecnica delle Costruzioni; è Presidente dell'Ordine degli Ingegneri di Prato; è Direttore del bollettino ingegneri e si occupa di strutture in c.a., in acciaio e degli effetti del vento nelle costruzioni.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Jacques Heyman, The stone skeleton, Cambridge University Press, Cambridge, 1997
- [2] Giacomo Vignola, Regola delli cinque ordini d'architettura, Stamperia del Longhi, Bologna, 1695
- [3] Galileo Galilei, Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze, Elsevier, Leida, 1638