

# Sviluppo storico delle tipologie strutturali e tecniche costruttive

Introduzione

prof. Giuseppe Brandonisio

prof. Antonello DE LUCA

La muratura è un materiale bifase, non omogeneo, non isotropo né isoresistente (la resistenza dipende dalla sollecitazione applicata); esso non segue le leggi né della teoria dell'elasticità né di quella della plasticità, il che implica che gli strumenti di calcolo derivanti dalla teoria del De Saint Venant non sono strettamente applicabili agli edifici in muratura; l'uso che se ne fa - ammesso dalla norma - è quindi improprio.

Appunti di Riccardo Maria Polidoro  
riccardo.polidoro.org

La teoria dell'elasticità nasce nel '700 con lo sviluppo di nuovi materiali (tra cui l'acciaio), a valle di almeno 5000 anni di costruzioni in muratura:

3000 a. L. → Egizi

1833 d. L. → Navier

1973 d. L. → Nascita del primo programma FEM (SAP 2000)

L'analisi delle strutture è generalmente governata da equilibrio e congruenza; per la muratura si considera il solo equilibrio, prevedendo nell'analisi dei meccanismi di collasso la fessurazione nei catoli.

I criteri alla base delle costruzioni in muratura antiche seguono un empirismo costruttivo e le regole dell'arte del costruire, definite a seguito di crolli e spesso tramandate di costruttore in costruttore; dette regole sono di proporzionamento geometrico: la statica degli edifici nasce dalla geometria, a sua volta legata all'equilibrio (e NON alla congruenza!)

Nell'approcciare al materiale valgono diverse ipotesi semplificative, tra cui il ritenere che la muratura non abbia resistenza a trazione (il legame  $\sigma$ - $\epsilon$  è analogo a quello dello stress-block del CLS); secondo le correnti attuali lo studio delle strutture in muratura è moderato, tra la modellazione agli elementi finiti e l'analisi dell'equilibrio.

Nella Storia dello sviluppo degli studi sulla muratura (e in generale le strutture) ci sono due date importanti:

1638 → Discorsi di Galileo Galilei, nascita della Scienza moderna (non più legata all'empirismo: cambia il modo di studiare i fenomeni fisici e quindi la sicurezza strutturale);

1833 → Navier (e altri) coniano i metodi di calcolo alla base della Scienza delle Costruzioni.

Nell'Illuminismo però le pubblicazioni sul tema sono varie:

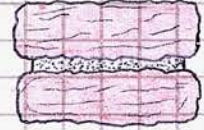
1671	Fabrizi	Scienziati che scrivono	1450	Alberti	Codificano in vari modi lo spessore di un arco in funzione della luce (con un rapporto minimo di circa $0,10 \div 0,12$ )
1716	Goussier	trattari sull'arte del	1490	Leonardo	
1729	Complet	costruire, raccogliendone	1570	Palladio	
1813	Belidor	le regole, di natura	1584	Serlio	
1829	Mascheroni	geometrica.			
1831	Rondelet	In queste regole geometriche è insita l'idea che le proprietà che conferiscono stabilità ad			
1833	Navier	una struttura valgono omoteticamente; ciò viene criticato da Galileo, che considera la			
1849	Breymann	resistenza del materiale e il suo effetto con la scala, ponendo come esempio la diversa fragilità			
1870	Dupuit	delle ossa di elefante con quelle umane.			

In base a recenti studi, tra cui quelli del Prof. Santiago Huerta, risulta che nelle strutture in muratura la regola della proporzionalità quadratica è valida: di fatti, nelle odierne teorie di statica delle costruzioni in muratura ci si occupa solo dell'equilibrio, non della congruenza; non si considera quindi la resistenza del materiale, valendo le ipotesi di Heyman (includse nelle attuali NTC, consentendo di trattare la muratura con le sole regole dell'equilibrio):

- 1) Resistenza a trazione nulla;
- 2) Resistenza a compressione infinita;
- 3) Assenza di meccanismi di collasso per taglio.

In una muratura, la malta serve solo ad apparecchiare la muratura, ovvero di disporre i singoli conci.

Ciò perché in assenza di malta il contatto tra blocchi, attese le loro asperità, sarebbe puntuale e comporterebbe un trasferimento degli sforzi concentrato in pochi punti, portando a spaccare i conci; la malta invece distribuisce le compressioni.



Per essendo vero che le malte hanno una certa resistenza a trazione, atteso il loro ruolo nella muratura e considerato il fatto che esse si degradano si considera a vantaggio di sicurezza che la resistenza delle murature a trazione è nulla.

Per quanto riguarda la resistenza a compressione, come è noto essa risulta dalla combinazione tra la resistenza della malta e quella del mattone, cui si aggiungono contributi legati a come sono apparecchiare le murature; ciò nonostante l'ipotesi di resistenza a compressione infinita, evidentemente a svantaggio di sicurezza, è stata utilizzata per secoli prima della codifica di Heyman, portando ad edifici tutt'ora esistenti. Per definire degli ordini di grandezza:

Acciaio	30000-50000 kg/cm <sup>2</sup> 300-500 MPa (N/mm <sup>2</sup> )	7850 kg/m <sup>3</sup> 78,5 kN/m <sup>3</sup>
CLS-A	2000-4000 kg/cm <sup>2</sup> 20-40 MPa	2500 kg/m <sup>3</sup> 25 kN/m <sup>3</sup>
Muratura	20-30 kg/cm <sup>2</sup> 2-3 MPa	16000-20000 kg/m <sup>3</sup> 16-20 kN/m <sup>3</sup>
	Resistenza a compressione	γ

Un edificio in muratura costruito nel rispetto delle regole dell'arte (trasmesse di padre in figlio e codificate nei trattati dell'800) hanno geometrie tali da garantire che le  $\sigma$  di lavoro siano inferiori a  $1/10$  della resistenza a compressione del materiale.

Heyman negli anni '60 formalizza le ipotesi sulla muratura ancora oggi valide e che giustificano le regole di proporzionalità geometrica:

1. La muratura non presenta resistenza a trazione → trasmette solo sforzi di compressione;
2. La muratura ha resistenza a compressione infinita → ipotesi non irrealistica in virtù del tasso di lavoro, generalmente del 10%;
3. Assenza di meccanismi di collasso a taglio → alto ingranamento e attrito, unici cinematismi ammessi davanti a cerniere.

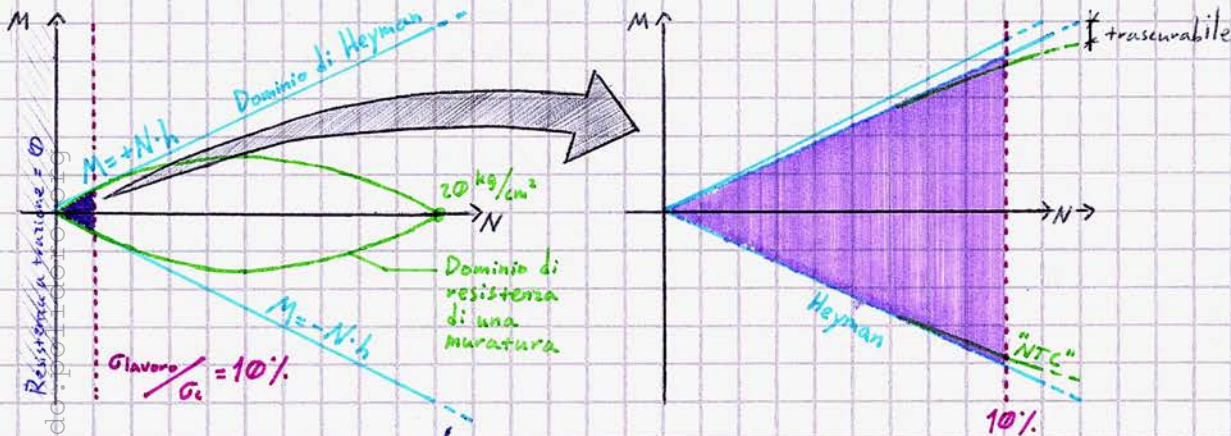
Nei casi in cui le ipotesi di Heyman sono verificate, si può valutare l'assetto della muratura con semplici equazioni di equilibrio, senza programmi di calcolo; la statica delle murature è così generalmente legata alla geometria.

Il modello di Heyman della muratura prevede che il momento massimo in un elemento murario di spessore  $t$  generato da uno sforzo normale  $N$  è pari a:

$$M_{\max} = N \cdot e_{\max} = N \cdot h = t/2$$

Nelle volte, il rapporto  $t/L$  è generalmente di 0,10-0,12.

Ne risulta il seguente dominio di resistenza:



il dominio non si chiude mai in virtù dell'ipotesi di resistenza a compressione infinita, valida solo per un tasso di lavoro del 10% in cui i diagrammi sono sovrapposti.

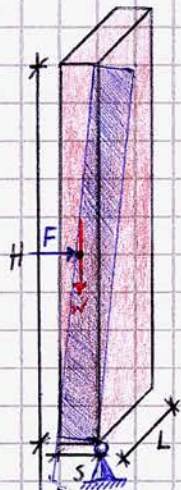
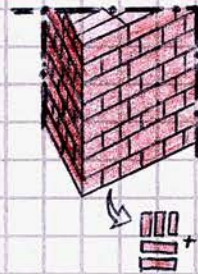
Le ipotesi di Heyman derivano da studi su archi in muratura sotto carico, sono state recepite dalla circolare esplicativa del 2019 sulle NTC 2018, al capitolo 8, nella applicazione dei metodi di analisi.

Lo studio dell'equilibrio di un corpo in muratura (⚠️ eseguito secondo le regole dell'arte: se il corpo è fessurato il modello non è valido) viene condotto con le ipotesi di Heyman, associate all'ipotesi di blocco rigido (applicazione PLV o condizioni di equilibrio come metodi).

Nel calcolo plastico (studia il collasso, è stato elaborato una volta osservate le prime incongruenze con la teoria dell'elasticità) si impiegano il teorema statico e il teorema cinematico (Lancene cinematiche), applicazioni del PLV.

**Esempio**

Si consideri un blocco murario di spessore  $s$ , altezza  $H$  e lunghezza  $L$  ben apparecchiata



$$H = 5\text{ m}$$

$$s = 0,5\text{ m}$$

$$L = 1\text{ m}$$

$$\gamma_{mur} = 20\text{ kN/m}^3 = 20000\text{ kg/m}^3$$

$$\sigma_n = 2\text{ MPa} = 20-30\text{ kg/cm}^2$$

$$W = \gamma(s \cdot H \cdot L) = 20000 \cdot 5 \cdot \frac{1}{2} = 50000\text{ kg}$$

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{\gamma \cdot s \cdot h \cdot L}{s \cdot L} \Rightarrow \sigma = \gamma \cdot H$$

In base ai meccanismi di collasso, Rondelet definisce dei valori di riferimento per la snellezza  $\lambda = s/H$  delle murature:

$$\frac{h}{s} = 8 \div 10 \div 12$$

↳ piccola  
 ↳ media  
 ↳ grande stabilità nei confronti del ribaltamento

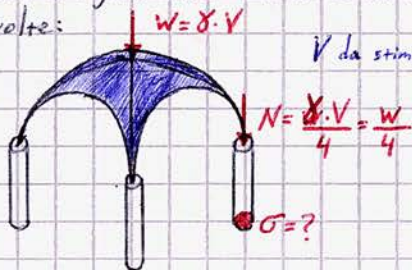
Osservando che  $s/H = 0,10$ , valutiamo  $\sigma$ :

$$\sigma = \gamma \cdot h = 20000\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 5\text{ m} = 100000\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 1\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \Rightarrow \frac{\sigma_{lavoro}}{\sigma_{ultimo}} = \frac{1}{20} = 5\%$$

Per valutare la massima azione sismica tollerabile dal pannello prima che ribalti, è sufficiente impostare, atteso che l'azione si applica nel baricentro, la seguente condizione di equilibrio (essendo la parete un blocco rigido per ipotesi):

$$\frac{F_{max} \cdot h/2}{M_{ribaltante}} \leq \frac{W \cdot s/2}{M_{stabilizzante}} \Rightarrow F_{max} = W \cdot \frac{s}{h} = 5000\text{ kg}$$

Negli sviluppi del corso, le tipiche applicazioni prevederanno di valutare le tensioni agenti alla base di edifici monumentali, ad esempio sotto volte:



V da stime manuali o modelli 3D → noto

In sismica è importante il rapporto  $F_{max}/W$ , che confronta la massima accelerazione applicabile all'elemento prima del collasso con la accelerazione di gravità; risulta in definitiva che:

$$\frac{F_{max}}{W} = \frac{m \cdot a_{max}}{m \cdot g} = \frac{a_{max}}{g} \leq \frac{s}{h} = 0,1$$

↳ sicurezza sismica  
 ↳ Rondelet

**La Muratura: materiale e cenni di evoluzione**

La muratura è composta da materiali eterogenei assemblati insieme:

• Malta: anch'essa un materiale lapideo, presenta una ridotta resistenza a trazione;

- Pietre
  - artificiali
  - naturali, di dimensioni
    - regolari
    - irregolari

Nel ragionare su una muratura, è fondamentale immaginare che essa sia a scuo: la malta consente solo una distribuzione degli stati tensionali!

La malta consente una distribuzione degli stati tensionali di compressione tra i mattoni così da non determinare localizzazioni nei contatti, che possono determinare l'insorgenza di stati di flessione nel singolo mattone (che genera trazione). Ne segue che la resistenza a trazione di una muratura si assume nulla: la malta non è una colla ed esistono strutture a secco!

Trilita: massima espressione della trave, è di dimensioni considerevoli così da poter lavorare a flessione, in virtù del proprio spessore significativo. Rappresenta l'origine delle strutture in muratura (strutture megalitiche).

La muratura è fatta di pietre avvolte di malta (se muratura trilitica, di pietre a secco); sin dall'epoca romana a ciò si aggiunge un altro elemento fondamentale: l'apparecchiatura muraria.

Apparecchiatura muraria (bond pattern, in inglese): definisce l'ammorsamento dei singoli elementi. Il motivo per cui l'architettura romana si diffonde nel mondo e con essa la tecnologia costruttiva è che le opere romane sono realizzate col mattone, piccolo e maneggevole (in terra cruda o cotta) che, se ben apparecchiato, si comporta come un blocco unico in ragione dell'apparecchiatura muraria.

L'apparecchiatura muraria gioca sull'attrito per mantenere l'integrità del pannello; essendo proporzionale al peso, per avere un attrito significativo è importante il peso della struttura sovrastante; ne segue che il peso proprio della muratura costituisce una sorta di precompressione utile per garantire l'integrità dell'elemento.

La muratura quindi richiede essenzialmente 3 requisiti:

- Dimensione minima degli elementi lapidei; no sabbia
- Peso minimo dei singoli elementi; no polistirolo
- Coefficiente di attrito significativo. no stere di acciaio

La tridimensionalità degli edifici monumentali è data dall'assemblaggio di elementi bidimensionali.

In teoria, più un elemento lapideo è grande, meglio è: è monoblocco, ha un grande peso e quindi incrementa l'attrito.

I Romani erano inoltre capaci di realizzare malte particolarmente resistenti (molto a compressione, resistenza significativa a trazione), il che ha consentito la realizzazione di muri a cassetta pur collegando sempre le due facce.

Tra le regole base della muratura figura la snellezza, direttamente connessa all'Acciaio:

$$\text{Acc: } \lambda = \frac{L_0}{P} = \frac{L_0}{\sqrt{IA}} \begin{cases} 300 \rightarrow \text{struttura molto snella} \\ 50 \rightarrow \text{struttura molto tozza} \end{cases}$$

In un pannello murario,  $L_0$  è l'altezza  $H$ ;  $p = \sqrt{\frac{I}{A}} \stackrel{L=1}{=} \sqrt{\frac{bt^3/12}{bt}} = \sqrt{\frac{t^2}{12}} = \frac{t}{3,42}$ . Ne segue che:

$$\lambda = 3,42 \frac{h}{t} \quad \text{in cui la snellezza } 300 \text{ coincide con un } \frac{h}{t} \text{ di circa } 25 \text{ (corrispondente a } \lambda_{acc}).$$

$$\frac{E_{mur}}{f_{ck,mur}} = 30000 \Rightarrow \sqrt{\frac{E}{f_{ck}}} = 31 \quad (\lambda_{acc})$$

osserva quindi come  $h/t$  sia parente di  $L_0/p$

Le murature in passato venivano progettate secondo la regola dell'amatetia, basandosi sulla tradizione precedente fino al 1800.

Prima di Eulero si considerava comunque la snellezza, con un rapporto  $h/t$  mediamente pari a 10 (valevano tre classi: 8  $\rightarrow$  tozze; 10  $\rightarrow$  normali; 12  $\rightarrow$  snelle); si

⚠ Una muratura a 3 teste ben apparecchiata, alta 4,5 m e spessa 30 cm è snella; un'equivalente parete non ben apparecchiata presenta un  $h/t$  molto maggiore: lo spessore della muratura deve comunque corrispondere all'apparecchiatura.

La muratura funziona prevalentemente a compressione (solo a compressione se a secco); la malta è utile per realizzare strutture regolari.

L'architettura greca presenta un interesse di  $1,5D$ , con  $D$  diametro dei pilastri  $\rightarrow$  le architravi lavorano su luci ridotte.

Misure di un mattone standard in laterizio:

$$5,5 \times 12 \times 25 \text{ cm}$$

$\rightarrow$  "Testa" (unità di misura dello spessore di una muratura)

Peso standard  $\sim 2 \text{ kg}$

Tutte le murature prive di apparecchiatura non hanno comportamento a blocco; inoltre l'apparecchiatura serve in piano e in spessore!

Un mattone di tufo non ha delle dimensioni standard: poiché resiste a  $10-20-30 \text{ kg/cm}^2$  (massimo 60), richiede uno spessore maggiore.

La resistenza di una muratura però non coincide con quella del materiale lapideo del blocco: dipende dall'apparecchiatura muraria e dall'attrito (se è presente malta, anche dalla resistenza della malta).

Dimensionamento: passa per la verifica (A MANO) a carichi verticali, la valutazione dei percorsi di carico, la definizione delle azioni e delle resistenze del materiale.

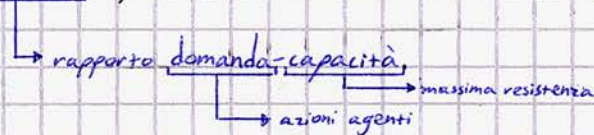
Quasi tutti i crolli delle strutture in muratura sono dovuti a una sofferenza da carico verticale: nel tempo le murature vengono ridotte di spessore (anche per pratiche abusive), rendendo fondamentale la verifica anche puntuale degli elementi costruttivi.

Le regole per le costruzioni antiche erano essenzialmente di proporzionamento, con regole di emetria basate sui rapporti pieni su vuoti (su una pianta di  $100 \text{ m}^2$ , il 20% è costituito da muratura), adottando la stessa proporzione per costruzioni analoghe (ad esempio con la stessa altezza).

Con Navier nel 1800 vengono definite le resistenze dei diversi materiali; si osserva però che la resistenza della pietra è molto diversa dalle tensioni medie ammissibili nella muratura: ciò perché le flessioni locali che si tentano di ridurre (ad esempio con la malta) non si possono eliminare; parallelamente, la malta non può che incidere sulla resistenza della muratura, evidentemente più bassa.

Nell'Ottocento, si affidavano alla muratura coefficienti di sicurezza di  $10:20$ .

Coefficiente di sicurezza: misura della sicurezza, rispetto al collasso



Nel CLS, materiale controllato, il coefficiente di sicurezza nei confronti della pura compressione è di circa 5!

La muratura ha un coefficiente di sicurezza iniziale di 5 (nelle norme italiane attuali), che aumenta con correttivi addizionali arrivando anche a 10.

Per questo motivo, ancora oggi, le tensioni di lavoro nella muratura sono entro  $1/10$  della resistenza della sola pietra, ovvero circa  $1/5$  della resistenza della muratura stessa.

## Come effettuare una ricerca bibliografica

Wikipedia e Google sono strumenti utili perché parenti dell'enciclopedia britannica.

Research Gate, Academia e Google Scholar sono invece caratterizzati da scarsa terzietà: in precedenza, un buon libro era tale perché vendeva molto, a fronte di un investimento dell'editore: era possibile valutare l'autorità di una pubblicazione analizzando chi era l'editore, quante edizioni erano state pubblicate e chi erano gli autori; a ciò si aggiungeva anche l'impatto della pubblicazione (parametro anch'esso oggi monetizzato), ovvero quanto la ricerca è usata e ha impatto sul mondo.

Oggi come allora, la ricerca va effettuata dal generale al particolare, ragionando per parole chiave (es. punto topico dell'architettura, chiesa monumentale, Quattrocento) e iniziando con la consultazione di libri di Storia dell'Architettura generalisti o focalizzati sul periodo di riferimento (Brunelleschi / '400 / Rinascimento)

Editori di riferimento:  
Mc Graw Hill  
Oxford University Press

Come in un'indagine poliziesca, in una ricerca bibliografica bisogna conoscere "interesse, ragione, motivo", partendo da un campo largo per poi affinarlo passando per le citazioni.

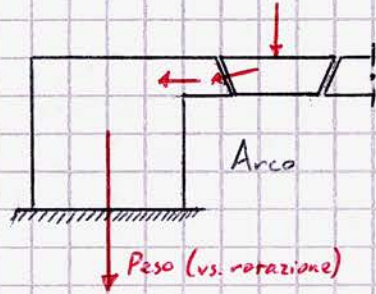
Fonti bibliotecarie utili:  
Biblioteca Gallica  
Libreria francese  
Centri di ricerca (a Firenze, ad es.)  
American Institute of Art

Banister Fletcher

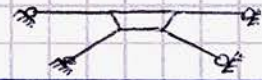


Note alla revisione del 17/05



Per Breyman l'arco non è tale in virtù della propria forma ma per la sua natura spingente: ovunque una forza verticale si trasforma in spinte orizzontali tramite attrito si parla di archi.



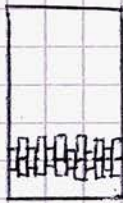
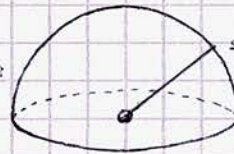
Galatrana nel suo ponte a Venezia infittisce le sezioni trasversali per realizzare uno dei rari esempi in cui si cammina su una struttura ad arco (senza riempimento).



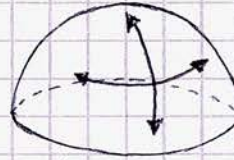
Volta → curva traslata, ha un comportamento 2D

Cupola di rivoluzione: ha un comportamento 3D (solitamente , non  di cattedra).

La cupola più classica è quella sferica, in cui si instaura un meccanismo ad arco, a giacitura POPPIA: sia nei meridiani che nei paralleli.



→ centino un arco, gli altri li realizzo andando a sbalzo



doppio arco

Una volta piccola in taglio può essere realizzata senza centinatura in virtù della piccola resistenza a trazione della malta, che con un po' di gesso diventa a presa rapida.

Nelle volte di maggior dimensione è invece necessaria l'apparecchiatura muraria per evitare la caduta dei mattoni.

Il lungo periodo di costruzione della cupola di Santa Maria del Fiore ha determinato la sua possibilità di assestarsi durante la costruzione, sbalzando tramite l'apparecchiatura muraria.

Nel gotico, le murature erano a secco (arte del taglio delle pietre di Frazier).

14.06.2024 - Fine

Sviluppo Storico delle Tipologie Strutturali e Tecniche Costruttive  
 prof. Antonello De Luca

19.06.2024 - 30L

