

Salvatore Sbacchis

# Calcoli rapidi per le murature con Excel

**TEORIA E PRATICA PER IL CALCOLO E LA VERIFICA  
DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI NEGLI EDIFICI IN MURATURA**

- Calcolo semplificato di un edificio
- Le azioni di taglio sui setti (Turnsek-Cacovic)
- Architravi in acciaio e cemento armato
- Tirante in acciaio e legno in una capriata Palladio
- Sbalzo di tensione e capochiave nei tiranti
- Stabilità dei balconi in pietra
- Convertitore unità di misura
- AGGIORNATO ALLE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI

**SOFTWARE INCLUSO**

**ESEMPI APPLICATIVI IN EXCEL PER IL CALCOLO E LA VERIFICA DI STRUTTURE IN MURATURA**

GLI ESEMPI APPLICATIVI, COMPLETI DI INDICAZIONI DI CALCOLO, GUIDANO L'UTENTE ALL'INPUT DI DATI AL FINE DI GENERARE UN'APPLICAZIONE PERSONALIZZATA



# SOMMARIO

<b>PREFAZIONE</b> .....	p.	1
-------------------------	----	---

## PARTE PRIMA LA MURATURA

<b>1. L'EDIFICIO IN MURATURA</b> .....	"	5
1.1. L'elemento muratura.....	"	5
1.2. Il materiale muratura.....	"	5
1.3. Il modello strutturale.....	"	6
1.3.1. Il legame costitutivo del maschio murario.....	"	7
1.3.2. Le proprietà di calcolo del maschio murario .....	"	7
1.4. Gli edifici in muratura.....	"	7
1.5. I codici di calcolo.....	"	8
1.5.1. Il metodo di calcolo semplificato .....	"	9
1.5.2. Il codice di calcolo POR per azioni orizzontali .....	"	9
1.5.3. Duttilità della muratura .....	"	10
1.5.4. Il codice di calcolo FEM.....	"	11
<b>2. ELEMENTI STRUTTURALI DEGLI EDIFICI IN MURATURA</b> .....	"	14
2.1. Generalità.....	"	14
2.2. Le componenti strutturali.....	"	14
2.3. Le coperture: la capriata Palladio .....	"	15
2.4. Il solaio di interpiano .....	"	17
2.5. I muri di controvento .....	"	18
2.6. Verifiche sulla scatola muraria.....	"	18
2.7. La forma dei setti .....	"	18
<b>3. CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE DELLE MURATURE</b> .....	"	19
3.1. La malta .....	"	19
3.2. La muratura portante.....	"	19
3.2.1. La muratura con elementi di pietra naturale .....	"	20
3.2.2. Muratura con elementi in pietra non squadrata.....	"	21
3.2.3. Muratura con elementi in pietra listata .....	"	21
3.2.4. Muratura con elementi in pietra squadrata.....	"	21
3.2.5. La muratura con elementi di pietra artificiale .....	"	21

3.2.6.	Requisiti meccanici degli elementi artificiali.....	p.	22
3.3.	Lo spessore delle murature .....	"	22
3.4.	L'altezza degli edifici in muratura .....	"	22
3.5.	La limitazione dell'altezza in funzione della larghezza stradale.....	"	23
3.6.	Requisiti degli orizzontamenti.....	"	24
4.	<b>CARATTERISTICHE MECCANICHE DELLA MURATURA.....</b>	"	25
4.1.	La resistenza caratteristica delle murature.....	"	25
4.1.1.	La resistenza caratteristica delle pietre naturali .....	"	25
4.1.2.	La resistenza caratteristica delle pietre artificiali.....	"	25
4.1.3.	La resistenza a compressione.....	"	26
4.1.4.	La resistenza a taglio.....	"	27
4.2.	La tensione normale di riferimento dei maschi murari.....	"	28
4.3.	La resistenza caratteristica tangenziale dei maschi murari.....	"	29
4.3.1.	La resistenza caratteristica degli elementi artificiali.....	"	30
4.4.	Coefficiente di sicurezza dei materiali.....	"	30
5.	<b>INSTABILITÀ LATERALE DEI MURI.....</b>	"	31
5.1.	La snellezza dei muri .....	"	31
5.2.	La snellezza della muratura: il carico di punta .....	"	31
5.3.	La verifica dei corpi snelli .....	"	32
6.	<b>SFORZO NORMALE ECCENTRICO: LA POST-TRAZIONE.....</b>	"	35
6.1.	I tiranti verticali .....	"	36
7.	<b>CARATTERISTICA MECCANICA DEL SETTO MURARIO (TURNSEK-CACOVIC).....</b>	"	39
7.1.	Meccanismo di rottura .....	"	39
7.2.	Metodo Turnsek-Cacovic per azioni di taglio.....	"	39
7.3.	ESEMPIO 1 – Calcolo del taglio ultimo .....	"	44
7.4.	ESEMPIO 2 – Calcolo dello spostamento limite.....	"	44
7.5.	Il foglio di calcolo "portanza.xlsx".....	"	45

## ESEMPI APPLICATIVI PARTE PRIMA

–	<b>APPLICAZIONE N. 1</b> <i>Definire i valori caratteristici di resistenza per una muratura formata da blocchi di argilla espansa. ....</i>	"	47
–	<b>APPLICAZIONE N. 2</b> <i>Si vuole determinare per la muratura dell'applicazione precedente anche la resistenza caratteristica a taglio. ....</i>	"	47

–	<b>APPLICAZIONE N. 3</b>		
	<i>Definire il valore di resistenza di una muratura in laterizio (mattoni semi-pieni).</i>	p.	48
–	<b>APPLICAZIONE N. 4 (IL PROGETTO ANPAE)</b>		
	<i>Eeguire la verifica semplificata dell'edificio di seguito illustrato.</i>	"	48
–	<b>APPLICAZIONE N. 5</b>		
	<i>Per recintare un cortile interno si deve realizzare un muro di cinta in cotto e malta comune alto 2,5 m. La spinta esercitata dal vento è di 60 kg/m<sup>2</sup>.</i>	"	52
–	<b>APPLICAZIONE N. 6</b>		
	<i>Verificare l'appoggio su muratura di un profilato IPE 160 che scarica una reazione all'appoggio di <math>R_V = 1575</math> kg. La tensione del muro è di 25 kg/cm<sup>2</sup>. Le misure sono quelle della figura che segue.</i>	"	52

## PARTE SECONDA

**ELEMENTI STRUTTURALI DISTRIBUTIVI  
NEGLI EDIFICI IN MURATURA**

<b>8.</b>	<b>ARCHITRAVE</b>	"	57
8.1.	L'architrave	"	57
8.2.	Analisi dei carichi	"	57
8.2.1.	Il prisma murario	"	58
8.2.2.	Il carico del solaio	"	59
8.2.3.	Il carico concentrato	"	60
8.2.4.	Il peso proprio dell'architrave	"	60
8.3.	L'appoggio degli architravi	"	61
8.3.1.	L'appoggio degli architravi sui muri	"	61
8.3.2.	Cuscinetto d'appoggio dell'architrave	"	62
8.3.3.	L'architrave incastrato	"	63
8.4.	Verifica di stabilità degli appoggi	"	64
<b>9.</b>	<b>SISTEMI A SPINTA ELIMINATA: I TIRANTI</b>	"	65
9.1.	Generalità	"	65
9.2.	Statica degli archi	"	65
9.3.	I tiranti nelle strutture spingenti	"	67
9.3.1.	La verifica dei tiranti	"	67
9.3.2.	Collocazione dei tiranti metallici o catene	"	69
9.4.	Il pretensionamento delle catene	"	69
9.5.	Tiranti estradossali	"	70
9.6.	Rinfianchi cellulari e solette armate	"	71
9.7.	Messa in opera dei tiranti a caldo	"	72
9.7.1.	La variazione termica nei tiranti	"	72
9.7.2.	Determinazione della temperatura nel tiraggio a caldo	"	73

9.8.	Tiraggio della catena con l'uso di manicotto filettato.....	p.	73
9.9.	Messa in opere dei tiranti a freddo.....	"	74
9.10.	I tiranti per muri perimetrali .....	"	75
10.	<b>I CORDOLI</b> .....	"	76
10.1.	Generalità.....	"	76
10.2.	Calcolo e dimensionamento delle armature del cordolo .....	"	76
11.	<b>GLI SPORTI DEI CORNICIONI</b> .....	"	79
12.	<b>LE PIATTABANDE</b> .....	"	81
13.	<b>BALCONI IN PIETRA</b> .....	"	84
14.	<b>LE PUNTELLAZIONI</b> .....	"	86
14.1.	Generalità.....	"	86
14.2.	Caratteristiche ottimali di accettazione dei puntelli.....	"	86
14.3.	Azione localizzata dei puntelli.....	"	87
14.4.	Vincolo al piede del puntello .....	"	87
14.5.	Vincolo in testa del puntello .....	"	88
14.6.	Variazioni termiche e igrometriche.....	"	88
14.7.	Il ritiro nei puntelli di cemento armato .....	"	89
14.8.	Verifiche statiche.....	"	89
15.	<b>LA CENTINA</b> .....	"	92
16.	<b>I DISSESTI NELLE STRUTTURE MURARIE: CENNI</b> .....	"	93
17.	<b>ASPETTI NORMATIVI</b> .....	"	95
17.1.	Elenco norme nazionali .....	"	95
17.2.	La normativa europea .....	"	96
17.3.	La normativa nazionale.....	"	98
17.4.	La verifica semplificata.....	"	98
17.5.	La verifica estesa.....	"	98
17.6.	L'azione sismica.....	"	98
17.7.	Significato delle sigle UNI.....	"	101

## ESEMPI APPLICATIVI PARTE SECONDA

### – APPLICAZIONE N. 6

*Determinare la superficie d'appoggio che deve avere un architrave in ferro a doppio T che esercita sulla muratura d'appoggio in tufo un carico di*

- 6.000 kg. Lo stato di pressione sulla muratura, vista l'elevata rigidezza, si consideri costante e si assuma per la muratura in tufo una tensione ammissibile di 5 kg/cm<sup>2</sup>. Lo spessore del muro è di 50 cm. .... p. 102
- **APPLICAZIONE N. 7**  
*Ad un cuscino in pietra sono assegnate le dimensioni di 50×30×40 cm. Verificare la superficie di contatto tra il blocco di pietra naturale che forma il cuscino e la sottostante muratura di tufo. Il peso sull'appoggio è di 6 t e si assuma per la muratura in tufo una tensione ammissibile di 5 kg/cm<sup>2</sup>. ....* " 103
- **APPLICAZIONE N. 8**  
*Per il sostegno della muratura sovrastante un vano si intende realizzare un'architrave composto da tre profilati in acciaio tipo IPE 200. L'architrave scarica sull'appoggio un carico complessivo di 12.000 kg. Si suppone che la muratura di appoggio sia realizzata in blocchi di tufo con una tensione massima di sicurezza di 5 kg/cm<sup>2</sup>. Lo spessore della muratura è di 50 cm. Verificare la superficie di appoggio dell'architrave. ....* " 104
- **APPLICAZIONE N. 9**  
*Per il sostegno della muratura sovrastante un vano si intende realizzare un'architrave composto da tre profilati in acciaio tipo IPE 200. L'architrave scarica sull'appoggio un carico complessivo di 12.000 kg. Si suppone che la muratura di appoggio sia realizzata in blocchi di tufo con una tensione massima di sicurezza di 5 kg/cm<sup>2</sup>. Lo spessore della muratura è di 50 cm. Verificare la superficie di appoggio dell'architrave. ....* " 105
- **APPLICAZIONE N. 10**  
*Si voglia determinare la dimensione da assegnare ad un'architrave da realizzare in calcestruzzo armato. I dati di carico sono quelli del progetto dell'architrave formato da profilati d'acciaio IPE dell'applicazione precedente. ....* " 110
- **APPLICAZIONE N. 11**  
*Determinare la dimensione da assegnare a un tirante con una perdita di tensione generata da un aumento della temperatura pari a 30 gradi. Si determinino anche le dimensioni da assegnare alla piastra di ancoraggio. La resistenza a schiacciamento del muro è di 10 kg/cm<sup>2</sup>. ....* " 114
- **APPLICAZIONE N. 12**  
*Verificare il tirante rappresentato nella figura seguente. ....* " 116
- **APPLICAZIONE N. 13**  
*Per eliminare la spinta orizzontale di 1400 kg trasmessa da un arco in muratura si vuole mettere in opera un tirante in ferro con madrevite, vincolato agli estremi con due piastre di ghisa. Calcolare il diametro del tirante, supponendo che possa verificarsi uno sbalzo di temperatura di 20 °C. La lunghezza del tirante è di 16 m. ....* " 117

- **APPLICAZIONE N. 14**  
*Calcolare il diametro da assegnare a un tirante in acciaio che deve assorbire una spinta di 8.000 kg trasmessa da una volta di luce 6 metri. Determinare inoltre lo sforzo che si manifesta nel tirante per effetto di un raffreddamento pari a -30 °C e verificare la sezione alla nuova situazione. ....* p. 118
- **APPLICAZIONE N. 15**  
*Un tirante dimensionato per assorbire uno sforzo di 300 kg è realizzato con due barre tonde unite tra di loro da un bullone. Le dimensioni del collegamento sono quelle riportate in figura. Verificare il collegamento. ....* " 120
- **APPLICAZIONE N. 16**  
*Per la realizzazione di un tirante in acciaio sottoposto a uno sforzo di trazione  $T = 2.400$  kg si devono usare due piatti di acciaio di 3 mm di spessore. Le barre dovranno essere unite per sovrapposizione con bulloni del diametro di 12 mm. Il sistema da verificare è quello rappresentato in figura. ....* " 121
- **APPLICAZIONE N. 17**  
*In un edificio in muratura portante il piano terreno è attraversato da archi in muratura a tutto sesto. Questo implica l'eliminazione della spinta esercitata sui muri maestri esterni al piano terra che dovrà essere assorbita dai tiranti. Determinare il valore della spinta in eccesso non assorbita dalla muratura che dovrà essere fatta assorbire ai tiranti. ....* " 122
- **APPLICAZIONE N. 18**  
*Verificare il collegamento tra puntone e catena in legno in una capriata Palladio. La catena in legno ha le dimensioni di 10 cm × 10 cm, e la resistenza del legno a scorrimento è di 10 kg/cm<sup>2</sup>. Per motivi tecnici la scarpa di trattenuta non può superare i 20 cm. ....* " 126
- **APPLICAZIONE N. 19**  
*La catena della capriata riportata in figura deve sostenere una trazione di 15.000 kg. Per eliminare tale spinta sul muro si vuole dotare la capriata di una catena metallica. Verranno adottati due pro-filati a L accoppiati di dorso tenuti assieme da un bullone d'acciaio del diametro di 10 mm. Determinare la sezione dei profilati da impiegare, sapendo che verrà usato acciaio tipo Fe 360 con una  $\sigma_{amm}$  di 1.600 kg/cm<sup>2</sup> e tenendo conto del foro per il bullone di 11 mm. ....* " 128
- **APPLICAZIONE N. 20**  
*Determinare la sezione e l'armatura necessaria per la realizzazione di un cordolo di coronamento di un torrino di scala a sezione quadrata di 3.00 m di lato. Si progetti per una forza sismica orizzontale equivalente stimata in 20.000 kg. Lo spessore della muratura è di 60 cm. Determinare la sezione dei barrotti di distribuzione del cordolo e della capriata in legno. ....* " 129

- **APPLICAZIONE N. 21**  
*Uno sporto di un cornicione è costituito da muratura in conci di tufo sagomata ed è sorretta da uno sbalzo in cemento armato. Determinare lo spessore e l'armatura necessaria per lo sbalzo del cornicione. ....* p. 131
  
- **APPLICAZIONE N. 22**  
*Determinare le dimensioni da assegnare alla piattabanda in cemento armato per porte e finestre di un fabbricato in muratura le cui dimensioni di massima sono quelle riportate in figura. Per motivi costruttivi la piattabanda deve avere uno spessore di 18 cm. ....* " 132
  
- **APPLICAZIONE N. 23**  
*Verificare il balcone in pietra rappresentato in figura con le caratteristiche di seguito elencate. ....* " 133

## PARTE TERZA

**TABELLE DEI VALORI SIGNIFICATIVI**

<b>TABELLE DEI VALORI SIGNIFICATIVI.....</b>	"	145
<b>INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE INCLUSO.....</b>	"	159
– Note sul software incluso.....	"	159
– Requisiti hardware e software.....	"	159
– Download del software e richiesta della password di attivazione.....	"	159
– Installazione ed attivazione del software.....	"	160



## PREFAZIONE

Tra le tipologie di costruzioni realizzate dall'uomo grande rilievo hanno avuto quelle in muratura.

Il palazzo, il baglio, la torre saracena, il casolare, il mulino o la masseria, sono solo alcuni dei tipi di costruzioni che hanno rappresentato uno spaccato unico di un modo di vivere e di costruire le città. Un modo di costruire quasi caduto in disuso dopo l'avvento di materiali da costruzione più moderni e redditizi come l'acciaio e il cemento armato. Malgrado ciò la muratura rimane pur sempre in natura, assieme all'acqua, il materiale allo stato naturale più diffuso sulla terra.

Ancora oggi, in particolare attraversando le splendide campagne e percorrendo i bei paesini dell'entroterra siciliano, lontani dalle grandi città non si può fare a meno di rimanere affascinati dalle superbe costruzioni tipicamente realizzate con questo materiale che nei secoli s'è raffinato sempre di più, regalandoci le più belle pagine di Storia dell'architettura. A ridosso delle piccole arterie stradali o immerse nel territorio, queste costruzioni sono rimaste inalterate nel tempo e si sono inserite perfettamente in un susseguirsi di paesaggi immersi in una natura a misura d'uomo. Un uomo che ha tuttavia avuto a disposizione millenni per abituarci a vivere e a lavorare la "pietra" e a scoprirne modi d'uso sempre nuovi.

Probabilmente i tempi rapidi delle esecuzioni, le forme inconsuete, le sezioni esili e resistenti del cemento armato e dell'acciaio, favoriti anche dai limiti costruttivi della pietra, hanno indotto a rendere superato il classico "mattoncino" a favore dei nuovi materiali moderni. Nell'epoca dell'industrializzazione e della velocità sembra proprio che non ci sia più spazio per quel fascino "romantico" della pietra naturale, che ha finito così per essere relegata nel passato tra materiali e tecniche costruttive di altri tempi o materia per archeologi.

Oggi, l'urbanistica con la sua particolare attenzione verso i centri storici interni e costieri, con la perimetrazione dei centri storici, le strategie sui paesaggi da salvaguardare e preservare, sembra avere riaperto il dibattito verso questo tipo di costruzioni. Una attenzione che però fa i conti con tecniche costruttive superate e dove anche nelle università i corsi dedicati alla muratura sono rari e confinati all'interno dei corsi di restauro. Nella professione poi, a parte qualche raro caso, lo si trova menzionato solo su alcuni libri tecnici di restauro, nell'archeologia industriale e nei progetti di riabilitazione strutturale.

Il problema più grande per gli edifici e le costruzioni in muratura esistenti, in particolare per quelli storici da recuperare o restaurare, è la scomparsa di figure legate alla filiera delle costruzioni in muratura. Quasi scomparse sono le maestranze specializzate della pietra assieme alle cave dove un tempo si coltivavano marmi, graniti e arenarie. Ad aggravare ciò, i regolamenti edilizi e talune norme tecniche che di fatto scoraggiano gli imprenditori ad usare questo materiale per le loro costruzioni, spingendoli viceversa verso materiali più "rapidi e redditizi" come il calcestruzzo e l'acciaio; materiali che consentono un rapporto cubatura-su-

perficie e tempi-costi di realizzazione molto più redditizi. Oltre alle cave, scomparsi sono pure gli scalpellini che lavoravano la pietra, i marmisti e i decoratori, i maestri d'ascia che realizzavano le centine per gli archi e i ponti, i fabbri ferrai che realizzavano tiranti per gli archi, nonché ceramisti e stuccatori. Senza contare poi tutta l'Arte applicata che ruotava attorno agli edifici in muratura rappresentata da mosaici, affreschi, sculture. In sostanza tutte quelle attività che hanno impreziosito volte e saloni durante l'epoca d'oro della Storia dell'Arte italiana. Una scomparsa di Ars e Faber che rende improponibile una rinascita in toto di questo modo di costruire e d'abitare.

Perché un libro sulle murature allora?

Intanto perché il modellare la pietra e i suoi elementi strutturali era, è, e sarà sempre un lavoro di pazienza, di tempi lunghi e lenti, di invenzioni che da sempre hanno rappresentato la vera sfida del mondo dell'Architettura. Si pensi ai grandi archi romani, alle alte e temerarie cattedrali gotiche, agli eleganti scaloni barocchi, agli ambienti neoclassici, all'ingegneria dell'architrave e della capriata, all'ingegno di Michelangelo in San Pietro. Architetture non certo sorte per mezzo di un semplice e brutale tocco di cemento armato stagionato e collaudato solo dopo 28 giorni.

Il libro tratta la rivisitazione di questo modo di costruire. Affronta il funzionamento degli elementi strutturali, ne analizza le cause e gli effetti, i pesi e i contrappesi, analizza come il carico partendo dalla copertura passi sapientemente concio dopo concio, pressione dopo pressione, attraverso i muri portanti per arrivare infine in fondazione. Un riappropriarsi dell'architettura dei conventi, delle basiliche e delle opere che da secoli sostengono le più importanti opere della nostra civiltà.

Questo paziente lavoro vuole essere un omaggio verso un'arte del costruire e ai suoi grandi artefici. Uno stimolo verso il progettista moderno, affinché avvicinandosi alla complessa "macchina" muratura ne apprezzi ancora di più le arditezze costruttive del passato con l'augurio di poterne inventarne di nuove.

*Salvatore Sbacchis*

## L'EDIFICIO IN MURATURA

### 1.1. L'elemento muratura

Il tessuto murario costituente un edificio in muratura, muratura intesa come “materiale”, è un elemento di difficile modellazione. Ciò in quanto la muratura non è un materiale naturale e non è riconducibile a nessuna delle ipotesi formulate dalla scienza e dalla tecnica delle costruzioni per altri materiali quali l'acciaio e il cemento armato.

La muratura è un materiale inventato attraverso la pietra.

La muratura è un “materiale realizzato dall'unione di singoli elementi lapidei legati fra di loro con correnti di malta o “a secco”. La muratura, dunque, non rientra tra i materiali a carattere omogeneo e continuo come l'acciaio o il legno. La sua messa in opera quindi comporta l'uso sapiente del mattone o della pietra in modo interrotto e per il suo perimetro servito da corsi di malta. L'apparato murario in pietra, per la sua grande inerzia, non possiede un comportamento isotropo e tanto meno elasto-lineare. Non consente apprezzabili deformazioni e rientra tra i materiali cosiddetti fragili.

Nella tecnica costruttiva, allora si è inteso idealizzare il comportamento di questo tipo di costruzioni attraverso elementi formati da un materiale “ideale” denominato “muratura”.

Solo in questo modo è stato possibile attribuire alle costruzioni in pietra caratteristiche meccaniche alla stregua degli altri materiali classici, quali, il legno o l'acciaio.

In questo modo, la pietra divenuta muratura può entrare a pieno titolo tra i materiali da costruzione e attraverso il calcolo prevederne il comportamento.

A questo punto ci si trova di fronte a una “pietra di progetto”, il muro, al quale vengono attribuite le caratteristiche della pietra. Gli viene dato peso specifico, modulo elastico, caratteristiche di resistenza, proprietà inerziali, capaci di mantenersi costanti nel tempo e anche in grado di interagire con gli altri elementi strutturali.

### 1.2. Il materiale muratura

A differenza degli altri materiali, la “muratura” di progetto presenta un legame costitutivo altamente non lineare e caratterizzato fortemente dal segno delle sollecitazioni. Infatti, risulta avere un comportamento di tipo abbastanza duttile in presenza anche di elevati sforzi di compressione ma altamente fragile e debole rispetto alla sollecitazione per trazione. Di fronte alla presenza di carichi ciclici come i terremoti, la muratura è fatta rientrare nella famiglia dei materiali non resistenti a trazione, per via che la vibrazione sismica, alternando trazione e compressione danneggia il muro presentando la classica fessurazione sismica a forma di “X”.

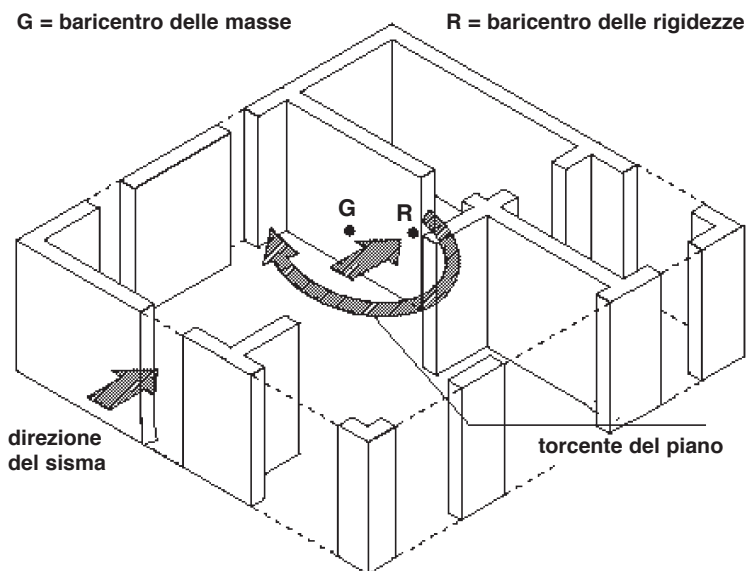
Fessurazioni comunque da valutare caso per caso, in quanto a differenza degli altri materiali, le lesioni subite dalla muratura, quando modeste, possono essere riparate restituendo la muratura alla sua antica funzione.

### 1.3. Il modello strutturale

Per la muratura il caso più ricorrente di calcolo nella pratica tecnica è quello della previsione del grado di sicurezza degli edifici.

Nei calcoli di verifica si ipotizza che l'intero peso verticale dell'edificio sia affidato tutto a elementi verticali portanti detti *maschi murari* ai quali è affidato il compito di trasferire i carichi verticali verso la fondazione. Come pure hanno il compito di assorbire i carichi orizzontali provenienti dalla forza sismica o dalla pressione del vento.

Come modello di calcolo l'edificio è rappresentato da una serie di maschi murari collegati da tra di loro ai quali attribuire le quantità numeriche necessarie ai fini del calcolo. Le forze verticali sono applicate nei baricentri dei maschi murari. Le forze orizzontali nel baricentro delle masse  $G$  dell'impalcato. Le qualità inerziali nel baricentro di rigidezza  $R$  (**Fig. 1.1**).



**Figura 1.1.** Maschi murari sottoposti a taglio e torcente di piano

Se i due baricentri non coincidono si genera un momento torcente di piano attorno a  $R$  che genera ulteriori tensioni tangenziali sulla sommità dei maschi murari. La verifica va fatta sommando assieme le tensioni tangenziali dovute alla traslazione con quelle dovute alla torsione. Secondo la tecnica anche col collasso di un solo pannello l'intero edificio è da dichiarare crollato.

La sicurezza di un edificio in "muratura" è raggiunta quando non viene superato lo stato limite ultimo dei maschi murari. Considerando le azioni di taglio da parte delle forze planari al solaio e quelle a schiacciamento dovuto ai carichi verticali, nonché ad azioni localizzate di presso-flessione agenti sulle pareti portanti.

La muratura è un elemento tridimensionale. Per cui all'interno della muratura possono presentarsi punti particolarmente critici in cui le tensioni principali possono raggiungere i limiti di rottura secondo i cerchi di Mohr.

### 1.3.1. *Il legame costitutivo del maschio murario*

Ovviamente la risposta del *maschio murario*, sollecitato da una serie di forze complanari in testa (sisma, vento, ecc.) e dal carico verticale fisso (carichi permanenti e di esercizio), dipende da vari fattori dipendenti dal tipo di vincolo, dal modello costitutivo che descrive il comportamento del materiale *muratura*, il modulo di elasticità, il peso specifico, la forma e la resistenza meccanica, i coefficienti di sicurezza, ipotesi di calcolo, ecc.

Per conoscere la risposta di un edificio in muratura ai carichi bisognerà quindi rappresentare il modello “muratura” attraverso i tre pilastri della Scienza delle Costruzioni. Vale a dire la conoscenza del modello statico (EQU) per l'equilibrio, il modello Costitutivo (COS) per il comportamento del materiale, il modello geometrico (COM) sul suo comportamento nello spazio. A differenza degli altri materiali “lineari” il comportamento “fragile” del maschio murario è rappresentato dal modello della rigidità secante e dalla sua duttilità attraverso la legge di Hooke applicata in laboratorio ai materiali non resistenti a trazione.

### 1.3.2. *Le proprietà di calcolo del maschio murario*

In generale è possibile ipotizzare che per un singolo *maschio murario* soggetto ad un carico normale fisso ed una forza orizzontale, siano possibili due tipi differenti di collasso:

- 1) Collasso con fessurazione diagonale del pannello (POR classico) che avviene quando nel centro del pannello la tensione principale massima supera la resistenza a trazione generalizzata in un punto qualunque per romboizzazione: formule di Frocht, Turnsek-Cacovic (D.M. 2 luglio 1981). Ovvero per scorrimento a taglio: formule ad attrito per edifici di nuova costruzione (D.M. 20 novembre 1987).
- 2) Collasso per schiacciamento della base del setto (in fondazione), per effetto combinato dello sforzo normale costante e del momento variabile dovuto alle forze di taglio in testa, nonché al meccanismo di collasso per ribaltamento rigido del setto attorno ad uno spigolo di base.

Nel caso la “muratura” rappresenti anche la fondazione, allora la rigidità viene ridotta tenendo conto della rotazione alla base della fondazione, in funzione della costante di Winkler del terreno che trasforma l'incastro al piede in una cerniera elastica.

## 1.4. **Gli edifici in muratura**

Un edificio in muratura portante a prescindere dalla sua distribuzione in pianta e in alzata, deve essere ipotizzato, al fine di una verifica globale, come un organismo in grado di interagire in modo tridimensionale (*nello spazio*) alle sollecitazioni a cui è sottoposto. In questo modo tutti gli elementi resistenti individuati risulteranno idonei se capaci di trasmettere in modo efficiente, verso le strutture di fondazione, le sollecitazioni verticali trasmessi dai carichi verticali (peso dell'edificio) e orizzontali (sisma, vento, ecc.). Un edificio in muratura è caratterizzato da molteplici gradi di libertà alcuni dei quali difficilmente controllabili dal punto di vista del calcolo strutturale. Per cui le tipologie che si sono evolute nel tempo hanno mantenuto pressoché invariate le caratteristiche costruttive durante i secoli. Il trilito, l'arco, il sistema spingente si è mantenuto invariato fino ai giorni nostri. Nei secoli si è passati a un modo di costruire alla “maniera” rinascimentale a elaborazioni sofisticate grazie all'uso degli elaboratori elettronici pur tuttavia non facendo variare i metodi costruttivi del passato.

Anche se la muratura è costituita dall'elemento più abbondante ed economica in muratura, la pietra, ha finito con l'essere sorpassata da materiali più moderni, redditizi e con potenzialità meccaniche maggiori. Il cemento armato, soprattutto, ha rivoluzionato tutto il modo di costruire dal 1900 ad oggi. Via via sempre più alti, i grattacieli si sono sostituiti alle basse costruzioni in pietra, creando nuovi simboli rispetto alle cattedrali gotiche e ai castelli medievali. Alterando il paesaggio ma anche l'uomo, il suo modo di pensare, di vivere e di trarre comfort dal suo stesso costruito durante i secoli. Del massiccio uso che si è fatto della muratura oggi rimangono solo le cave sparse e abbandonate un po' ovunque, a testimonianza di un modo di vivere e di costruire oggi non più ai passi con la cultura contemporanea. Oggi non si costruisce più in muratura, se non in posti isolati e lontani dai centri abitati. E con la scomparsa delle cave sono scomparse pure le maestranze. Quelle che realizzarono assieme a Michelangelo la poderosa cupola di San Pietro a Roma. Dal Romanico al Gotico fino all'Ottocento, la pietra rappresentò per lungo tempo il modo di abitare dei popoli ma è stata anche quella che meglio di qualsiasi altro materiale abbia rappresentato i vari simboli a memoria delle generazioni precedenti. Dalle piramidi di Egitto, ai templi greci, ai castelli medievali, agli ultimi edifici palladiani costruiti nella nuova America prima dell'avvento della tecnologia e delle invenzioni tecnologiche moderne.

### 1.5. I codici di calcolo

I codici di calcolo maggiormente usati per il calcolo della resistenza dei maschi murari sviluppati negli ultimi decenni sono di due tipi: quelli basati sul metodo del continuo, e quelli basati sugli elementi finiti.

La scelta tra i due approcci di calcolo dipende dal numero degli elementi studiati e dal tipo di conoscenza di risposta che si vuole avere della struttura:

#### – *Metodo del continuo*

Fanno parte il “metodo semplificato” usato sin dal 1987 per la verifica a schiacciamento delle parti verticali, il “metodo esteso” per le verifiche a presso-flessione delle pareti, il codice di calcolo POR per le azioni orizzontali di taglio.

#### – *Metodo degli elementi finiti*

Fanno parte tutti i programmi di calcolo computerizzati basati sui codici tipo SAP che contengono un algoritmi computerizzati adatti allo studio di pressoché infiniti elementi che rappresentano lo studio degli edifici complessi.

La differenza sostanziale tra i due tipi di codici di calcolo, tra un codice di calcolo basato sul metodo POR e uno basato sui codici SAP, sta nel numero di discretizzazioni necessarie per la rappresentazione dell'edificio in muratura. Maggiori, però, sono gli elementi che si studiano, maggiore sarà il numero di equazioni necessarie per ottenere la previsione di stabilità dell'edificio, senza contare la gran mole di dati da analizzare.

L'informatica è ciò che ha aperto una nuova frontiera nel mondo del calcolo. Grazie ai sempre più potenti microprocessori e algoritmi di calcolo è possibile eseguire un gran numero di operazioni di calcolo complesse e in un brevissimo tempo. Programmi capaci attraverso

i CAD di restituire in forme grafiche interattive, lo stato fessurativo, le lesioni e gli spostamenti dell'organismo sottoposto anche a contemporanee condizioni di carico e variabili come il tempo come pure l'invecchiamento e la perdita di portanza.

Qualunque calcolo, comunque, rimane un calcolo. Una previsione.

Una simulazione limitata nelle sue varianti che non possono comprendere le infinite iterazioni. Ciò porta a concludere che per sapere se tutte le ipotesi di calcolo sono esatte e l'edificio non crolla, bisognerà aspettare che sull'edificio venga messa la sua ultima pietra.

### 1.5.1. Il metodo di calcolo semplificato

Prima di accennare ai due metodi di calcolo più diffusi per la verifica degli edifici in muratura è importante sottolineare ciò che la normativa italiana indica per il calcolo di piccoli edifici aventi alcune caratteristiche particolari per il quale è possibile adottare il *metodo di verifica semplificato*.

È possibile operare con il metodo semplificato e quindi ridurre il numero degli elementi in esame quando il progetto presenta le seguenti limitazioni:

- a) l'edificio deve essere costituito da non più di tre piani entro e fuori terra;
- b) la planimetria dell'edificio deve risultare inscritibile in un rettangolo con rapporti fra lato minore e lato maggiore non inferiore a 1/3;
- c) la snellezza della muratura non deve superiore il valore di 12;
- d) l'area della sezione di muratura resistente alle azioni orizzontali, espressa in percentuale rispetto alla superficie totale in pianta dell'edificio sia non inferiore al 4% nelle due direzioni principali escluse le parti aggettanti; non sono da prendere in considerazione, ai fini della percentuale di muratura resistente, i muri di lunghezza  $L$  inferiore a 50 cm, misurata al netto delle aperture. La formula è una sola e la più semplice al mondo.

Per dichiarare questo tipo di edifici verificati, per la normativa italiana, sarà sufficiente che risulti:

$$\sigma = \frac{N}{0,65 \cdot A} \leq \bar{\sigma}_c$$

dove:

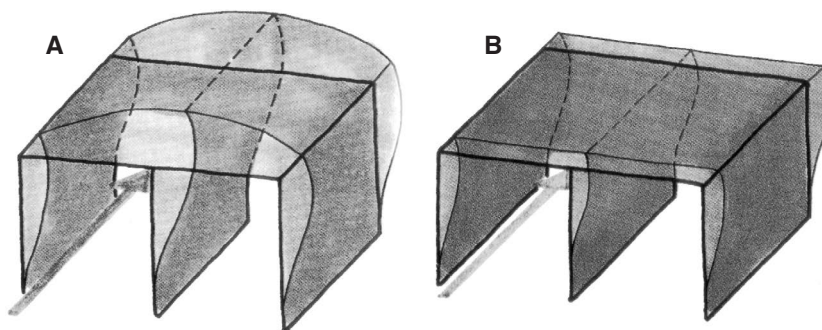
- $\sigma$ , tensione di verifica a compressione;
- $N$ , carico verticale totale alla base del piano più basso dell'edificio;
- $A$ , superficie d'appoggio della base dei muri portanti;
- $\bar{\sigma}_c$ , tensione massima ammissibile a compressione alla base della muratura.

### 1.5.2. Il codice di calcolo POR per azioni orizzontali

Il metodo di calcolo detto POR è un codice di calcolo sviluppato per l'analisi in zona sismica dei carichi orizzontali in edifici multipiano in muratura adottato per la prima volta nel terremoto del Friuli col D.M. 2 luglio 1981.

La verifica all'azione sismica orizzontale è eseguita ricorrendo alla *teoria degli stati limite* secondo il metodo sviluppato da Tomazevic nel 1978.

In questo codice di calcolo l'edificio in muratura viene schematizzato in una serie di mensole detti *maschi murari* collegati fra di loro da impalcati infinitamente rigidi nel loro piano rappresentati da solai. Il loro comportamento dipende dalla rigidità dei solai (**Fig. 1.2**).



**Figura 1.2.** *Comportamento dei maschi murari con solaio elastico (A) e con solaio rigido (B)*

I vari piani rigidi che comprendono i pesi dei solai, cordoli, scale, balconi, poggiano su elementi resistenti verticali in muratura prevalentemente di forma rettangolare, detti *maschi murari*. I setti facenti parte la scatola muraria, risultano controventati nella direzione a loro perpendicolare da altri setti. I setti si trovano poi rigidamente collegati tra di loro in alzato attraverso un nodo rigido rappresentato dal solaio di piano.

Nel calcolo statico, oltre a tenere conto delle singole rigidzze delle murature e dei carichi orizzontali e verticali, il metodo POR tiene anche conto del momento torcente di piano per la eccentricità ( $e$ ) tra il baricentro delle masse ( $G$ ) e il baricentro delle rigidzze ( $R$ ). Un momento torcente che se notevole genera delle forze di taglio aggiuntive in testa ai setti murari che sommate a quelle dei carichi orizzontali fanno aumentare le tensioni portando a rottura con conseguente crollo della struttura (v. **Fig. 1.1**).

$$M_t = F_H \cdot e = F_H \cdot \overline{GR}$$

dove:

- $M_t$ , momento torcente di piano;
- $F_H$ , forza orizzontale (sisma, vento, ecc.);
- $e$ , eccentricità data dal segmento  $\overline{GR}$ ;
- $G$ , baricentro delle masse (carichi);
- $R$ , baricentro delle rigidzze (maschi murari).

### 1.5.3. Duttività della muratura

Dal punto di vista meccanico, ogni setto murario viene sottoposto a due tipi di legge costitutiva:

- **1ª FASE:** fase elastica lineare in cui cessata l'azione del carico la muratura ritorna allo stato iniziale con irrilevanti fessurazioni.
- **2ª FASE:** fase plastica costante dove i pannelli risultano visibilmente lesionati ma ancora recuperabili con tecniche di riabilitazione statica.

Il procedimento POR calcola la capacità portante a taglio dell'edificio facendolo passare via via dallo stato elastico, a quello di fessurazione e fino al collasso che avviene per cedimento del pannello più debole. In regime di spinta sismica, anche se questa non porta



al collasso, viene fatta crescere progressivamente fino a quando non cede il primo pannello ricavando così il coefficiente di sicurezza per la struttura.

In base all'entità dell'azione della forza orizzontale (sisma, vento, ecc.) si possono verificare i seguenti tre casi.

- 1) **Tutti i pannelli risultano in fase elastica.** In questo caso l'edificio è dichiarato verificato in fase elastica. Successivamente la struttura viene fatta passare per lo stato plastico e poi a collasso. In questo modo è possibile ricavare il moltiplicatore ultimo, ovvero, quel valore che ci dice quanto deve essere grande il sisma per mandare a collasso la struttura. Chiaramente maggiore risulta il moltiplicatore ultimo e maggiore risulterà la sicurezza dell'edificio.
- 2) **Un solo pannello è in fase plastica.** In questo caso, l'edificio risulta lesionato ma ancora recuperabile. Come al precedente punto 1, la struttura viene sottoposta a un carico crescente fino a portarla a collasso determinando il moltiplicatore ultimo.
- 3) **Un solo pannello risulta in collasso.** Per la normativa se un solo pannello ricade nella fase di collasso la struttura è dichiarata non collaudata. Il moltiplicatore ultimo risulterà inferiore all'unità. Il procedimento del codice di calcolo POR è ampiamente descritto nel D.M. 2 luglio 1981.

#### 1.5.4. Il codice di calcolo FEM

Il metodo della modellazione in elementi finiti, detto FEM, è legato all'uso di programmi per l'analisi computerizzata per via del gran numero di elementi in cui è suddivisa la struttura. Il più noto tra questi programmi sono quelli che usano programmi basati sul metodo SAP.

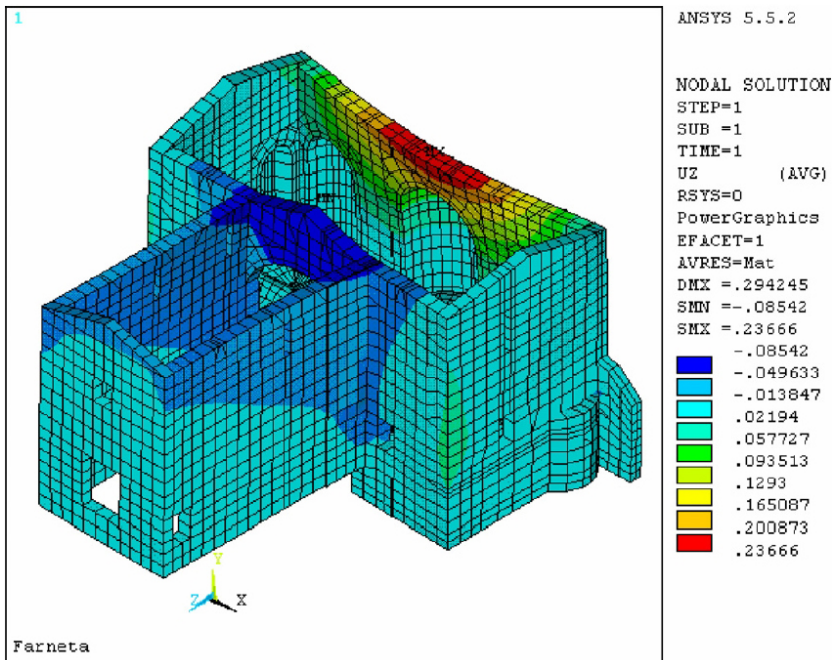


Figura 1.3. Rappresentazione computerizzata agli elementi finiti (Vignoli, 2008)

Nel procedimento di calcolo agli elementi finiti lo schema di calcolo è più libero, ogni elemento viene trattato nella propria collocazione spaziale, l'organismo può assumere una qualunque forma e materiale. Ciò è reso possibile grazie alla capacità di appositi algoritmi di calcolo studiati per poter trattare grandi quantità di dati e che consentano di potere discretizzare la struttura in un maggior numero di elementi.

È chiaro che di fronte alla gran mole di dati da trattare e il necessario ricorso a una gran mole di dati, questo codice di calcolo si rende necessario solo quando si vogliono ottenere dati più completi e particolari sull'organismo strutturale da analizzare soprattutto nel restauro.

Questo modo "digitale" di fare analisi strutturale, va diffondendosi sempre di più fra gli strutturisti, grazie alla disponibilità sul mercato di sofisticate ed economiche piattaforme di calcolo e alla grande disponibilità di software tecnico dotati di potenti e sofisticati *pre- e post-processor* grafici, veri e propri aiuti CAD dedicati all'analisi e al calcolo delle strutture.

### ***I pre-processor***

In particolare, consentono al progettista di interagire con il modello strutturale sui monitor, di modellare e assemblare in tempo reale gli elementi strutturali e che compongono la parte geometrica dell'edificio.

### ***I post-processor***

Sono anch'essi dei CAD, restituiscono, una volta assemblata e calcolata la struttura "virtuale", restituiscono i risultati di calcolo attraverso un linguaggio grafico (diagrammi, mappe di colori, istogrammi, animazioni, ecc.), certamente di più immediata interpretazione rispetto ai copiosi e ingombranti tabulati alfanumerici di un tempo. È qui che ha riscosso successo la *prototipazione virtuale*, ovvero, la simulazione animata di edifici o di impianti tecnologici sottoposti a varie sollecitazioni statiche e dinamiche. Grazie ai quali è possibile "animare" il progetto includendo una variabile da sempre ignorata nelle costruzioni: il tempo.

L'alta velocità di esecuzione dei calcoli permette, poi, lo studio e l'osservazione di effetti sull'organismo strutturale quando è sottoposto a varie combinazioni di carico: forze statiche e dinamiche; analisi modale o con spettro di risposta; stato di pressione di qualunque tipo quali vento, liquidi, gas; variazioni termiche; cedimenti; rigidzze particolari; ecc..

Grazie anche alla versatilità e alla facilità di collegamento alle stazioni di calcolo delle periferiche (stampanti, plotter, file, animazione, internet, ecc.) è notevolmente maggiore e varia la mole di informazioni acquisibili del modello.

Appare ovvio, di fronte a queste nuove e interessanti opportunità offerte dall'informatica nelle procedure di progetto delle strutture che più saranno fedeli alla realtà gli "input", più realistici e quindi applicabili saranno gli "output".

Non a caso il nome scelto per il programma più usato per il calcolo agli elementi finiti prende il nome di SAP (stupido). Questo modo di "fare" calcolo, infatti, richiede al calcolista una buon grado di alfabetizzazione riguardo le procedure di calcolo che in regime di libera circolazione del sapere spetta essenzialmente alle università.

Il codice di calcolo SAP, pur apprezzandone le capacità computazionali, non si può fare a meno di rilevarne anche i limiti che si evincono dalla scheda pro-contro che segue.

<b>TABELLA COMPARATIVA PROGRAMMI DI CALCOLO A ELEMENTI FINITI</b>	
<b>PRO ELEMENTI FINITI</b>	<b>CONTRO ELEMENTI FINITI</b>
Il risultato finale è molto accurato. È possibile valutare lo stato di tensione e di deformazione su ogni punto della struttura e, se necessario, ripetere il calcolo ottenendo un affinamento dei risultati. Si possono risolvere modelli complessi modellando anche eventuali irregolarità locali.	Anche se l'uso dei programmi diventa sempre meno pesante grazie soprattutto all'assistenza "grafica", il calcolo richiede una certa conoscenza di base dei fondamenti del metodo e degli algoritmi e dei programmi, per non dover trovarsi a lavorare a "scatola chiusa".
È possibile eseguire, oltre a quelle statiche, analisi di natura dinamica del tipo: a spettro di risposta o con sovrapposizione modale. È possibile avere contemporaneamente varie condizioni di carico.	La determinazione dei parametri di taglio, sforzo normale e, soprattutto, dei momenti flettenti per i vari setti è piuttosto laboriosa e va fatta analizzando puntualmente le reazioni ai nodi della struttura. Una volta determinati tutti i parametri suddetti, bisogna poi fare le dovute verifiche per constatare se i dati rispettano o no le norme tecniche locali.
La rappresentazione dei risultati con le mappe a colori di isotensione e/o di isosforzo e con le deformate fornisce una rappresentazione globale in cui si può subito apprezzare sia il comportamento globale della struttura, sia quello locale.	La mole dei risultati prodotti è enorme anche per modelli relativamente semplici. Anche se si hanno a disposizione dei potenti pre- e post-processor l'operazione di controllo dei dati è sempre delicata e laboriosa.
<p><i>Si conclude facendo notare che per i casi in cui la struttura abbia uno schema statico riconducibile a modelli di calcolo che usano i metodi dell'algebra convenzionale, l'utilizzo degli elementi finiti, specie se abbinato all'analisi sismica dinamica, non fa bene all'economia di calcolo.</i></p> <p><i>Il metodo elementi finiti risulta utile e indispensabile invece nelle indagini e nelle prospezioni del comportamento statico in situazioni particolari come in archeologia, nel recupero e nel restauro.</i></p> <p><i>Nello studio comportamentale della produzione edilizia storica realizzata senza il calcolo scientifico moderno.</i></p>	

## ELEMENTI STRUTTURALI DEGLI EDIFICI IN MURATURA

### 2.1. Generalità

Sia che venga adottato il codice di calcolo semplificato per gli edifici semplici, o il metodo POR per azioni orizzontali, sia il codice SAP per uno studio più approfondito della struttura in muratura, il calcolo di verifica dei maschi murari segue quello della verifica degli elementi costruttivi elementari oggetto del presente libro.

A questa categoria appartengono quegli elementi strutturali semplici, quali: scale, archi, volte, solai, capriate, architravi, piattabande, ballatoi, tiranti, ecc. che presenti nell'organismo murario svolgono la loro funzione di utilità (pavimentazione, salita, protezione, ecc.) con vita statica autonoma rispetto l'organismo murario soprattutto per via della differenza di rigidità tra i diversi materiali. Scale in cemento armato, ad esempio, e muri in pietra.

Elementi, forgiati in varia natura ma con duplice compito. Quello funzionale, dovendo asservire ad uno scopo ben preciso (arco, finestra, balcone, scala, ecc.) e uno statico, ovvero quello di convogliare con materiali diversi i carichi che dalla copertura, si sommano e scendendo lungo i maschi murari diramandosi sugli elementi strutturali e raggiungendo infine la struttura di fondazione.

Nella trattatistica, lo studio del comportamento statico di questi elementi strutturali viene considerato in modo autonomo dal complesso murario proprio per la diversità di materiale.

Ciò consente di alleggerire e semplificare la procedura di calcolo di verifica generale rivolta poi ai soli maschi murari, permettendo inoltre di intervenire nel tempo alla loro manutenzione, riparazione, sostituzione, rinforzo, verifica, collaudo, ecc..

Conoscere il comportamento statico della muratura, ovvero, il funzionamento di un arco, una piattabanda, un cordolo, un tirante, consente, a chi si occupa di costruzioni, al progettista come al restauratore, di operare con oculatezza laddove l'elemento strutturale semplice assume un ruolo ben preciso in un sistema complesso di forze, dove il dosaggio dell'*azione* svolge un altrettanto importante ruolo rispetto a quello delle *reazioni*. La muratura è un elemento che va fatto lavorare a compressione.

### 2.2. Le componenti strutturali

In un edificio in muratura bisogna ben distinguere due parti con funzioni differenti: quella portante rappresentata dalla muratura portante e quella degli elementi strutturali che dal punto di vista statico hanno una vita autonoma tanto da non influire sull'organismo murario rappresentato dai maschi murari se non in alcune eccezioni.

Vanno distinti dunque:

- 1) La struttura portante vera e propria, ovvero, quella definita dai maschi murari da trattare con il (POR) o con gli elementi finiti (FEM): gli unici ai quali è affidato, oltre il

compito principale di convogliare i carichi verso la fondazione, quello di offrire quella *firmitas* necessaria all'intero organismo murario che può così bene e con sicurezza assolvere alla sua funzione di palazzo, chiesa, mulino, abitazione, ecc..

- 2) Le parti, che pur non essendo chiamate a partecipare alla rigidità globale della struttura, come è invece per i maschi murari, costituiscono organismi strutturali comunque da sottoporre a verifiche e a collaudi secondo i metodi propri della scienza delle costruzioni come: architravi, cordoli, piattabande, scale, balconi e sbalzi, tiranti, eccetera. Queste parti, necessitano di uno studio a parte, per via della loro rigidità differente da quella della scatola muraria rappresentata da maschi murari composti dallo stesso materiale.

È opportuno, quindi, che il professionista abbini alle conoscenze sul comportamento delle murature, anche quello degli altri materiali quali: cemento armato (solai, scale e coperture), del legno (capriate, scale e solai), dell'acciaio (tiranti, capriate, solai, architravi), pietre di varia natura (architravi, piattabande, archi, fondazioni, sordino).

Gli esempi applicativi riportati nel libro ed i programmi ad essi collegati vogliono mettere in luce, appunto, la possibilità di potere trattare i singoli elementi strutturali di completamento di un organismo in muratura attraverso procedure automatiche di calcolo rivolte allo studio e alla soluzione degli aspetti *costitutivi* dei materiali, di *compatibilità* dei limiti geometri, di *equilibrio*, che sono i tre pilastri della Scienza delle costruzioni.

---

**Gli esempi applicativi riportati nel libro sono stati sviluppati in Microsoft Excel e sono disponibili nel software allegato alla presente pubblicazione**

Il programma Excel è un foglio di calcolo composto da celle interattive all'interno delle quali possono essere introdotti valori e formule. Questo programma permette di gestire attraverso un algoritmo di calcolo gran parte di lavoro del calcolista. I programmi allegati al presente libro offrono l'esecuzione di alcuni algoritmi di calcolo che pur nella loro semplicità affrontano i vari problemi legati ad elementi strutturali isolati quali la verifica degli architravi, lo studio dei tiranti, il calcolo di portanza dei maschi murari.

---

### 2.3. Le coperture: la capriata Palladio

Essendo l'elemento strutturale più in alto e a contatto diretto con l'esterno la copertura (solaio o capriata) è chiamato ad assolvere più funzioni di quante ne assorba un solaio di interpiano. Il solaio di copertura infatti oltre a reggere i carichi di copertura è chiamato assieme ai muri perimetrali a proteggere il vano sottostante dagli agenti esterni.

Essenzialmente i carichi da individuare per una copertura sono stabiliti, oltre che dalla tipologia del fabbricato, anche dal grado protettivo che si vuole nei confronti della pioggia, dalla neve, isolamento termico, acustico, valore estetico, ecc..

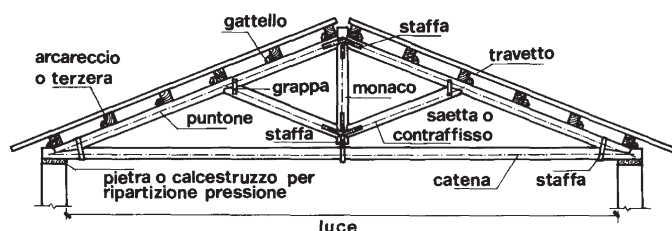
Le tipologie di copertura variano, da regione a regione, da situazioni economiche, reperibilità dei materiali, raggiungibilità delle scorte, maggiore disponibilità di alcuni materiali rispetto ad altri, "l'arte" della lavorazione della pietra, i regolamenti locali.

La normativa italiana, al fine della valutazione dei pesi da considerare per il calcolo e la verifica dei solai di copertura e di interpiano, ha formulato apposite tabelle che nella maggior

parte dei casi soddisfano la richiesta di pesi regolamentari da adottare per l'analisi dei carichi rivolta alle coperture, così come per ogni altro elemento strutturale.

Tra i vari tipi di copertura che la tecnica costruttiva contempla per gli edifici in muratura, lo schema più comune è quello della capriata detta *Palladio* di cui si riporta oltre alla descrizione dei vari elementi una tabella per il dimensionamento di massima degli elementi che la compongono. Il passaggio tra i due materiali, quello della capriata in legno, e quello della muratura in pietra è rappresentato dall'appoggio rappresentato da un blocchetto di pietra di altra natura.

Nel **software incluso** è presente il foglio di calcolo **capriata-palladio.xlsx** per la verifica ed il progetto di massima, ad esempio, dei tiranti in legno e in acciaio.



**Figura 2.1.** Capriata Palladio poggiante su muratura  
(Prontuario per il calcolo di elementi strutturali, Le Monnier)

**Tabella 2.1.** Tabella per il predimensionamento della capriata "Palladio"

Dist. fra le capriate	Per coperture leggere ( $120 \div 130 \text{ kg/m}^2$ ) di peso portato alla capriata <sup>1</sup>					Dist. fra le capriate	Per coperture medie ( $160 \div 180 \text{ kg/m}^2$ ) di peso portato alla capriata <sup>1</sup>				
	Elementi	Luce $m$					Elementi	Luce $m$			
		7÷8	9÷10	11÷12	13÷14			7÷8	9÷10	11÷12	13÷14
m 3,00	Puntoni	13×16	15×18	16×19	18×21	m 2,50	Puntoni	14×16	15×19	16×20	18×22
	Saette e monaco	12×12	12×14	14×14	15×15		Saette e monaco	12×12	12×14	14×15	15×16
	Catena	15×17	16×20	18×20	20×22		Catena	15×18	17×20	17×22	20×24
m 3,50	Puntoni	14×16	16×18	16×21	18×23	m 3,00	Puntoni	14×18	16×20	17×22	19×24
	Saette e monaco	12×13	12×15	15×15	15×16		Saette e monaco	12×14	13×15	14×16	15×18
	Catena	16×18	16×21	18×22	20×24		Catena	16×19	16×22	18×23	20×25
m 4,00	Puntoni	14×18	16×20	17×22	19×24	m 3,75	Puntoni	15×19	17×21	19×22	21×25
	Saette e monaco	12×14	13×15	14×16	15×18		Saette e monaco	12×16	14×15	15×16	16×19
	Catena	16×19	17×22	18×23	20×25		Catena	17×20	18×23	20×24	22×26
m 5,00	Puntoni	15×19	17×21	19×22	21×25	m 4,50	Puntoni	15×20	18×22	20×24	22×26
	Saette e monaco	12×16	14×15	15×16	16×19		Saette e monaco	13×16	14×16	15×18	17×20
	Catena	17×20	18×23	20×24	22×26		Catena	17×21	19×24	21×25	24×28

<sup>1</sup> I carichi totali considerati comprendono la media e la piccola orditura, il materiale di copertura e un sovraccarico accidentale di circa  $70 \text{ kg/m}^2$ .

## 2.4. Il solaio di interpiano

I solai di interpiano hanno il compito di sostenere i carichi di esercizio e di trasmetterne talune sollecitazioni verso i muri portanti che, a loro volta, scaricano tramite i maschi murari direttamente verso le fondazioni, o prima verso elementi come archi, colonne, architravi, ecc..

Devono essere in grado di subire modeste deformazioni elastiche e questo perché devono rispondere in maniera idonea alla destinazione d'uso a cui sono chiamati; un solaio troppo elastico, infatti, risulterebbe inadatto al suo scopo proprio per una sua eccessiva elasticità. Questo impone una duplice verifica per i solai: una verifica di resistenza per determinare i parametri di rottura e una verifica di stabilità, al fine di collaudarne le qualità “funzionali” dipendenti dalla *elasticità/rigidezza* del solaio.

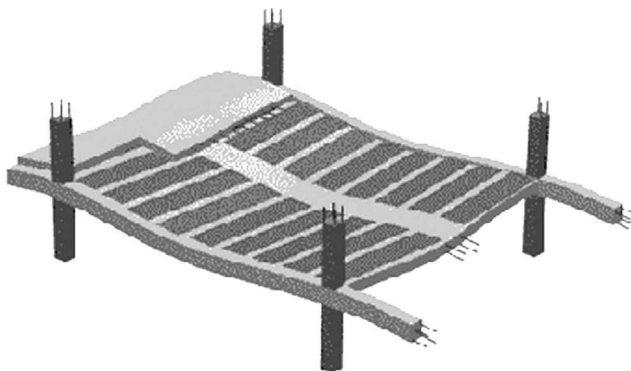
I solai possono essere realizzati in varie maniere:

- a trave (1/250 della luce);
- a piastra (1/300 della luce) nel caso di realizzazioni in cemento armato.

Per assegnare gli spessori ai solai devono essere operati calcoli specifici atti a determinarne la sezione resistente e la eventuale quantità di armatura necessaria nel caso di quelli in cemento armato.

Il passaggio delle sollecitazioni dal solaio al muro portante dipende dalla rigidezza del solaio e dal tipo di vincolo realizzato tra solaio e muro.

È necessario che il solaio sia piuttosto rigido per distribuire i carichi in maniera proporzionale alla diversa rigidezze dei muri portanti. I setti murari al contrario dei pilastri in cemento armato non offrono altrettanta rigidezza in quanto non è possibile realizzare il nodo incastro tra solaio e muratura necessario a trasferire il carico. Il sistema statico solaio-muro, allora, si riduce a un *nodo cerniera*.



**Figura 2.2.** Deformazione elastica amplificata in un solaio in cls alleggerito

Particolare attenzione deve essere rivolta, inoltre, all'aggancio dei solai alla muratura tramite barrotti d'acciaio annegati nel cordolo di coronamento poggiato sulla muratura portante.

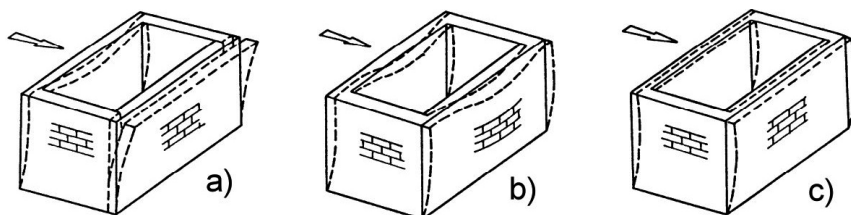
Se i solai non sono in grado di assicurare un sufficiente incatenamento delle pareti, si deve ricorrere a tiranti orizzontali dall'esterno delle pareti medesime bloccati con piastre per evitare eccessivi spostamenti relativi della murature sottostanti.

## 2.5. I muri di controvento

Ai muri di controvento, quelli disposti parallelamente alle forze, è affidato il compito di assorbire i fenomeni di taglio.

In presenza di forature lungo le pareti, la rigidezza a taglio è offerta dai soli maschi murari ovvero dalle mensole in muratura che partendo dallo spiccato delle fondazioni s'innalzano tra le aperture senza soluzione di continuità fino alla quota più alta.

Considerando inoltre un sistema di forze tridimensionale, dove le sollecitazioni (carico sismico, vento, terreno) si alternano oltre che sul loro piano anche verso le due direzioni ortogonali ad esse, le pareti verticali siano esse maestre o di collegamento, assumono un ruolo alternato di muro portante e muro di controvento secondo la direzione da cui proviene il complesso delle forze orizzontali.



**Figura 2.3.** *Comportamento muri di controventato: a) solaio elastico senza cordolo; b) solaio elastico con cordolo; c) solaio rigido con cordolo*

## 2.6. Verifiche sulla scatola muraria

Le principali verifiche che riguardano le azioni sulle murature riguardano le sollecitazioni orizzontali (vento, sisma, ecc.) capaci di produrre sollecitazioni diverse dallo schiacciamento per carichi verticali, quali:

- verifica delle pareti ortogonali all'azione orizzontale normale al loro piano;
- verifica di pareti parallele all'azione orizzontale e tangenti al loro piano.

In particolare quando le pareti di collegamento sono sottoposte a pressione esterna come nel caso del vento, sono verificate anche a presso-flessione. Come pure tutte le pareti che presentano riseghe in corrispondenza dei piani d'appoggio dei solai o una rastremazione dello spessore del muro al variare della sua altezza.

In generale, i muri portanti sono prevalentemente sottoposti a presso-flessione mentre i muri di controvento a taglio.

## 2.7. La forma dei setti

Per la realizzazione dei vani abitabili vengono usati i setti stessi. Per raggiungere il duplice scopo, quello funzionale e quello portante i setti si intersecano agli incroci. L'ammorramento dei muri agli incroci produce allora forme geometrie particolari. Allo stesso modo di una trave normale il baricentro della sezione e la risultante dei carichi verticali può non coincidere per cui si producono fenomeni di presso-flessione o di flessione deviata.



## CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE DELLE MURATURE

La realizzazione di una parete in muratura avviene tramite l'unione del materiale lapideo attraverso un legante, di solito una malta.

Particolare importanza va assegnata alla scelta dei due materiali, in quanto dalla loro collaborazione dipende la resistenza globale dell'edificio.

### 3.1. La malta

La malta pur non collaborando direttamente alla statica degli elementi, costituisce un elemento importate ai fini della coesione e stabilità dei vari elementi della muratura.

Questa, riduce le imperfezioni tra le facce a contatto e offre un idoneo letto di posa per gli altri elementi (mattoni, forati, cordoli, architravi, solai, ecc.).

Lo spessore delle malte ordinariamente è di 5-15 mm. I valori di resistenza accettabili in cantiere, in assenza di dati dedotti da indagini specifiche di laboratorio, sono quelli richiamati dalla normativa e riportati nella seguente tabella.

**Tabella 3.1.** Classe e tipo di malta in base al dosaggio degli elementi costituenti la malta

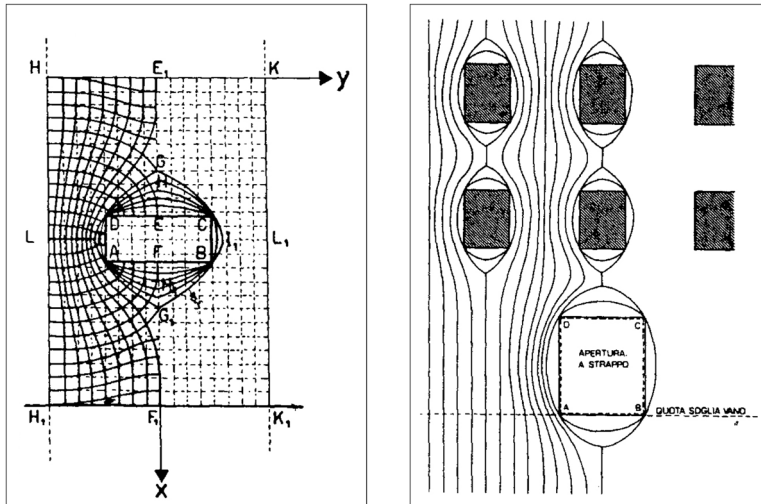
Classe	Tipo di Malta	Composizione				
		Cemento	Calce area	Calce idraulica	Sabbia	Pozzolana
M4	Idraulica	–	–	1	3	–
M4	Pozzolana	–	1	–	–	3
M4	Bastarda	1	–	2	9	–
M3	Bastarda	1	–	1	5	–
M2	Cementizia	1	–	0,5	4	–
M1	Cementizia	1	–	–	3	–

**Tabella 3.2.** Resistenza meccanica della malta desunta dalla tabella del D.M. 20 novembre 1987

12	N/mm <sup>2</sup>	[120 Kgf/cm <sup>2</sup> ]	per l'equivalenza alla malta M1
8	N/mm <sup>2</sup>	[80 Kgf/cm <sup>2</sup> ]	per l'equivalenza alla malta M2
5	N/mm <sup>2</sup>	[50 Kgf/cm <sup>2</sup> ]	per l'equivalenza alla malta M3
2,5	N/mm <sup>2</sup>	[20 Kgf/cm <sup>2</sup> ]	per l'equivalenza alla malta M4

### 3.2. La muratura portante

Ha il compito di trasmettere i carichi verso le fondazioni. Può essere priva di aperture (cieca) o forata (vani porta, finestre, archi, ecc.). In presenza di forature il flusso dei carichi verticali tende a concentrarsi verso le parti laterali delle aperture per poi ridistribuirsi totalmente sul piano di fondazione.



**Figura 3.1.** *Linee di flusso dei carichi sulle murature*  
(M. Mastrodicasa, *Dissesti statici*)

In figura 3.1 sono rappresentate:

- linee di flusso in una parete portante interessata da un'apertura;
- linee di flusso in una parete dovute alla presenza di aperture d'ingresso e ai piani superiori.

La struttura portante che forma l'organismo in muratura può essere realizzata in:

- elementi di muratura naturali;
- elementi di muratura artificiali.

### 3.2.1. *La muratura con elementi di pietra naturale*

In questo caso l'elemento resistente è prelevato da cave e presenta caratteristiche fisico-meccaniche variabili a secondo la cava di provenienza e ai metodi di lavorazione usati. Laddove è presente, l'uso di questi elementi è caratterizzato dalla presenza di finiture irregolari dipendenti per lo più dalla lavorazione a cui sono soggetti che non consente, se non in rari casi particolari, di ottenere elementi eccezionalmente squadrate.



**Figura 3.2.** *Tipologia delle murature in pietra naturale*  
(AA.VV., *Il progetto*, AMPAE)

### 3.2.2. Muratura con elementi in pietra non squadrata

Il tipo in pietra non squadrata è composto da pietrame grossolanamente lavorato ed è molto adatto nelle costruzioni di notevoli sezioni.

### 3.2.3. Muratura con elementi in pietra listata

La muratura listata è ottenuta alternando la posa di elementi squadrati ed elementi non squadrati.

### 3.2.4. Muratura con elementi in pietra squadrata

La muratura in pietra squadrata è composta da parallelepipedi posti in opera dall'andamento regolare nelle due direzioni in alzato e per lungo.

### 3.2.5. La muratura con elementi di pietra artificiale

In questa categoria rientrano le numerose e svariatissime produzioni industriali di mattoni. Questo tipo di elementi, grazie al suo elemento base di cui sono fatti, possono assumere svariate forme, consentono la massima libertà espressiva e godono di metodi di verifica semplificativi basati sulla alta capacità di risposta alle sollecitazioni di compressione.

Di forma regolare dovuta alla produzione di serie, gli elementi vengono posti in opera in strati di spessore costante e sono collegati usando miscele di malta con spessori variabili tra i 5 e 15 mm. Per i mattoni pieni l'UNI ha stabilito la misura standard di centimetri (5,5×12×25) con sottoprodotti speciali che assumono a secondo del loro "taglio" la denominazione di: *intero*, *mezzo lungo*, *mezzo corto*, *tre quarti*, *quartino*.

Se l'elemento artificiale (laterizio normale, alleggerito, in pasta, calcestruzzo normale o alleggerito) presenta forature, secondo la percentuale di tale foratura è denominato: *pieno*, *semipieno*, *forato*.

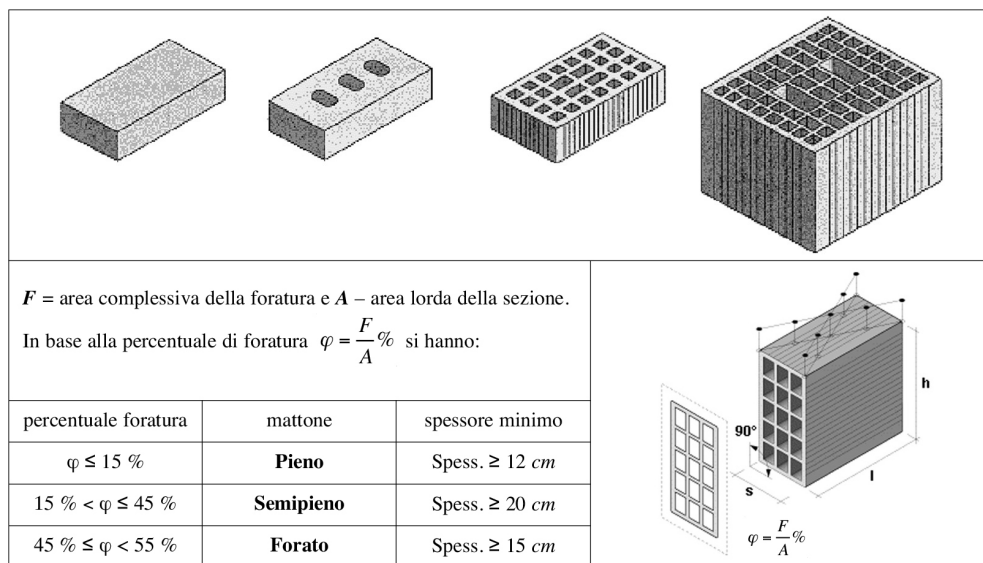


Figura 3.3. Classificazione dei mattoni in base alla loro foratura

Rientrano nella categoria delle pietre artificiali anche gli elementi costruttivi quali le tavole e i tavelloni.

### 3.2.6. *Requisiti meccanici degli elementi artificiali*

La resistenza caratteristica a compressione  $f_{bk}$  degli elementi artificiali deve risultare non inferiore ai seguenti valori:

- 70 kg/cm<sup>2</sup> per elementi pieni;
- 50 kg/cm<sup>2</sup> per elementi semipieni nella direzione dei carichi verticali;
- 15 kg/cm<sup>2</sup> per elementi semipieni nella direzione ortogonale ai carichi verticali e nel piano della muratura.

### 3.3. Lo spessore delle murature

Indipendentemente dal tipo di verifica che si vuole fare e della destinazione d'uso della costruzione, le sezioni minime, di norma, da adottare per le costruzioni in murature sono, in base al punto 4.5.4. delle NTC, D.M. 14 gennaio 2008:

- *Per gli edifici in pietra naturale:*
  - a) muratura di pietra non squadrata cm 50
  - b) muratura listata cm 40
  - c) muratura di pietra squadrata cm 24
  
- *Per gli edifici in pietra artificiale:*
  - a) muratura in elementi resistenti artificiali forati cm 24
  - b) muratura in elementi resistenti artificiali semipieni cm 20
  - c) muratura in elementi resistenti artificiali pieni cm 15

### 3.4. L'altezza degli edifici in muratura

Dopo gli ultimi avvenimenti tellurici, susseguitesesi nel territorio nazionale, la legislazione nazionale ha ritenuto opportuno, relativamente ai nuovi edifici, anche in muratura, entrare nel merito della altezza degli stessi.

L'altezza degli edifici in muratura, in particolare quelli nuovi, era stabilita dal Decreto 16 gennaio 1996 (*Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche* – pubblicato sulla *Gazzetta Ufficiale* n. 29 del 5 febbraio 1996) che, nella Tabella 2, riportava le altezze consentite relative ad ogni tipologia costruttiva. Questo punto del Decreto si è reso necessario principalmente per motivi di sicurezza: avere vie di fuga idonee per la popolazione in caso di immediata evacuazione dei centri abitati.

L'altezza dei nuovi edifici, e per altezza si intende la massima differenza di livello fra il piano di copertura più elevato ed il terreno, ovvero, ove esista, il piano stradale o del marciapiede nelle immediate vicinanze degli edifici stessi, sono quelle normate dal punto 7.2.2. delle NTC del D.M. 14 gennaio 2008. Di regola non deve superare negli edifici il limite riportato nella seguente tabella.

**Tabella 3.3.** Altezze consigliate degli edifici in base al grado di sismicità di zona (Tabella 2 del Decreto 16 gennaio 1996)

Tipo di struttura	Altezza Massima (m)		
	S = 6	S = 9	S = 12
Legno	10	7	7
Muratura ordinaria	16	11	7,5
Muratura armata	25	19	13
Pannelli portanti	32	25	16
Intelaiatura	nessuna limitazione		

In alcuni casi particolari, nel caso di copertura a tetto, detta altezza va misurata dalla quota d'imposta della falda e, in presenza di falde con imposte a quote diverse, dalla quota d'imposta della più alta. Sono esclusi dal computo delle altezze gli eventuali torrioni delle scale e degli ascensori.

Nel caso di edifici con un piano cantinato o seminterrato la differenza di livello (misurata sulla stessa verticale) tra il piano più elevato di copertura (o la quota d'imposta delle falde) e quello di estradosso delle strutture di fondazione, può eccedere di non più di quattro metri i limiti stabiliti dalla precedente tabella.

Nelle strade o nei terreni in pendio le altezze massime di cui alla precedente tabella possono essere incrementate di 1,50 m purché la media generale delle altezze di tutti i fronti rientri nei limiti stabiliti nella tabella stessa.

Per le costruzioni in legno è ammessa la realizzazione di uno zoccolo in muratura e malta cementizia o in calcestruzzo semplice o armato, la cui altezza non può superare i quattro metri. In tal caso i limiti di cui alla precedente tabella 3.3 vanno riferiti alla sola parte in legno.

### 3.5. La limitazione dell'altezza in funzione della larghezza stradale

Con l'entrata in vigore delle nuove norme, quando un edificio, con qualsivoglia struttura sia realizzato, prospetta su spazi nei quali sono comprese o previste strade, fermi restando i limiti fissati nella precedente tabella e fatte salve le eventuali maggiori limitazioni previste nei regolamenti locali e nelle norme di attuazione degli strumenti urbanistici, la sua altezza  $H$ , per ciascun fronte dell'edificio verso strada, valutata con i criteri di cui al punto C.2 del decreto, non può superare i seguenti valori espressi in metri:

- per  $L \leq 3$     *porre*     $H = 3$
- per  $3 < L \leq 11$     »     $H = L$
- per  $L > 11$     »     $H = 11 + 3(L - 11)$

Indicando con "L" la minima distanza tra il *contorno dell'edificio* e il *ciglio* opposto della *strada*, compresa la carreggiata.

Agli effetti del presente punto deve intendersi:

- a) per *contorno dell'edificio* la proiezione in pianta del fronte dell'edificio stesso, escluse le sporgenze di cornici e balconi aperti;
- b) per *strada* l'area di uso pubblico aperta alla circolazione dei pedoni e dei veicoli, nonché lo spazio inedificabile non cintato aperto alla circolazione pedonale;

- c) per *ciglio* la linea di limite della stese stradale o dello spazio di cui al punto b);
- d) per *sede stradale* la superficie formata dalla carreggiata, dalle banchine e dai marciapiedi.

Negli edifici in angolo su strade di diversa larghezza è consentito, nel fronte sulla strada più stretta e per uno sviluppo, a partire dall'angolo, pari alla larghezza della strada su cui prospetta, una altezza uguale a quella consentita dalla strada più larga.

Nelle zone a bassa sismicità ( $S = 6$ ) di cui all'articolo 18 della legge 2 febbraio 1974, n. 64, devono essere rispettate solo le limitazioni previste nei regolamenti locali e nelle norme di attuazione degli strumenti urbanistici.

Le strutture secondarie e gli elementi non strutturali che si trovano al di sopra dei piani di copertura devono essere efficacemente ancorati alla struttura principale.

### **3.6. Requisiti degli orizzontamenti**

Le strutture costituenti gli orizzontamenti, comprese le coperture di ogni tipo, non devono essere spingenti. Eventuali spinte orizzontali, comprese quelle esercitate, ad esempio da archi, devono essere opportunamente eliminate tramite cordolature, tiranti o altri mezzi ugualmente idonei comprese le opere provvisionali.