

Pietro Lenza ~ Aurelio Ghersi
con la partecipazione di Bruno Calderoni



Dario Flaccovio Editore

Edifici in muratura

alla luce della nuova normativa sismica

Nel CD allegato: articoli scientifici, elaborati grafici e di calcolo, normativa e documentazione relativa ai casi studio illustrati



Compatibile Windows



- La muratura e gli elementi strutturali ✓
- Le pareti murarie, gli impalcati, le volte e gli archi ✓
- L'edificio ordinario nella condizione sismica e non sismica ✓
- Gli edifici speciali: chiese, palazzi e castelli ✓

Pietro Lenza, Aurelio Ghersi

con la partecipazione di
Bruno Calderoni

GLI EDIFICI IN MURATURA
alla luce della nuova normativa sismica

Dario Flaccovio Editore

Indice

| | |
|---|----|
| Premessa..... | 11 |
| Capitolo 1 | |
| L'EVOLUZIONE DEL PENSIERO SCIENTIFICO E DELLA NORMATIVA TECNICA ... | 17 |
| 1. Le murature e la Scienza delle costruzioni..... | 17 |
| 2. Evoluzione della normativa tecnica e dei metodi di analisi..... | 21 |
| 3. L'attuale quadro normativo nazionale..... | 24 |
| Capitolo 2 | |
| LE TIPOLOGIE STRUTTURALI | 27 |
| 1. Limiti e finalità di una possibile classificazione..... | 27 |
| 2. Gli edifici della prima classe..... | 29 |
| 3. Gli edifici della seconda classe. | 33 |
| 4. Edifici della 3° classe | 37 |
| 5. Verso l'edificio intelaiato in c.a..... | 40 |
| 6. Stratificazioni e variazioni tipologiche nel costruito storico | 41 |
| Capitolo 3 | |
| LA MURATURA E GLI ELEMENTI STRUTTURALI | 43 |
| 1. Un materiale antico di difficile modellazione | 43 |
| 1.1. Aspetti morfologici..... | 43 |
| 1.2. Aspetti strutturali..... | 44 |
| 1.3. Il legame costitutivo..... | 46 |
| 1.4. Le regole applicative della normativa..... | 46 |
| 2. Gli elementi strutturali | 50 |
| 2.1. Individuazione degli elementi | 50 |
| 2.2. Il pannello maschio: comportamento nel piano | 51 |
| 2.3. Il pannello maschio: comportamento fuori dal piano | 54 |
| 2.4. Valutazione della deformazione ultima | 55 |
| 2.5. Pannelli di fascia..... | 56 |
| 2.6. Zone nodali..... | 60 |

Capitolo 4

| | |
|---|----|
| LA PARETE MURARIA | 61 |
| 1. Definizione di parete..... | 61 |
| 2. La caratterizzazione della parete nelle diverse tipologie..... | 61 |
| 3. La modellazione strutturale della parete | 62 |
| 4. Il telaio equivalente nelle diverse tipologie | 67 |
| 5. Modellazioni agli elementi finiti..... | 69 |
| 6. Le modalità di analisi della parete..... | 70 |
| 7. Analisi lineare..... | 71 |
| 7.1. Analisi statica | 72 |
| 7.2. Analisi modale..... | 74 |
| 8. Analisi non lineare..... | 75 |
| 8.1. Analisi statica non lineare..... | 75 |
| 8.2. Analisi dinamica non lineare | 86 |

Capitolo 5

| | |
|---|----|
| GLI IMPALCATI | 87 |
| 1. La morfologia degli impalcati..... | 87 |
| 2. La funzione degli impalcati negli edifici in muratura..... | 87 |
| 3. La modellazione meccanica degli impalcati..... | 89 |

Capitolo 6

| | |
|---|-----|
| VOLTE ED ARCHI..... | 95 |
| 1. Morfologia ed antiche tecniche costruttive | 95 |
| 2. Analisi di archi e volte per carichi verticali..... | 97 |
| 2.1. Metodo speditivo per la valutazione delle spinte | 97 |
| 2.2. Il metodo grafico | 101 |
| 2.3. Modello membranale continuo | 103 |
| 2.4. Modello membranale agli elementi finiti..... | 108 |
| 2.5. Qualche considerazione conclusiva | 109 |
| 3. Le cupole..... | 110 |
| 4. Scale realizzate con voltine..... | 112 |
| 4.1. Geometrie strutturali | 112 |
| 4.2. Il funzionamento statico | 113 |
| 4.3. Modelli di calcolo..... | 114 |
| 5. Archi e volte soggette ad azioni orizzontali | 117 |

Capitolo 7

| | |
|--|-----|
| L'EDIFICIO ORDINARIO NELLA CONDIZIONE NON SISMICA..... | 119 |
| 1. Considerazioni generali | 119 |
| 2. L'analisi dei carichi verticali dell'edificio..... | 120 |
| 2.1. Le quantità in gioco | 120 |
| 2.2. L'analisi dei carichi sugli elementi | 121 |
| 3. Edifici della prima e della seconda classe..... | 122 |
| 4. Gli edifici della prima e seconda classe migliorati | 125 |

| | |
|--|-----|
| 5. Edifici della terza classe | 126 |
| 6. Edifici delle prime due classi “trasformati” in edifici della terza classe..... | 130 |

Capitolo 8

| | |
|--|-----|
| L'EDIFICIO ORDINARIO NELLA CONDIZIONE SISMICA | 133 |
| 1. Considerazioni generali | 133 |
| 1.1. Comportamento delle pareti fuori dal piano..... | 134 |
| 1.2. Comportamento delle pareti nel piano..... | 135 |
| 2. La modellazione dell'edificio..... | 138 |
| 3. L'analisi dei carichi verticali e la modellazione delle masse..... | 141 |
| 4. Metodi di analisi dell'edificio | 145 |
| 5. Le regole applicative per l'analisi sismica dell'edificio in muratura | 145 |
| 5.1. Generalità | 145 |
| 5.2. Le azioni e le possibili combinazioni | 146 |
| 5.3. Analisi statica | 148 |
| 5.4. Analisi modale..... | 149 |
| 5.5. Analisi statica non lineare..... | 150 |
| 5.6. Verifiche fuori dal piano | 153 |
| 5.7. Verifiche di resistenza | 157 |
| 6. Gli edifici misti..... | 157 |
| 7. Gli aggregati..... | 158 |
| 8. Gli edifici semplici..... | 158 |
| 9. Conclusioni riepilogative | 159 |

Capitolo 9

| | |
|---|-----|
| L'EDIFICIO ORDINARIO: ESEMPI APPLICATIVI..... | 163 |
| 1. Finalità del capitolo | 163 |
| 2. Caratteristiche dell'edificio e dei carichi..... | 163 |
| 3. Caratterizzazione sismica del suolo. | 166 |
| 4. Le possibili configurazioni strutturali | 167 |
| 4.1. L'edificio semi-ruderizzato (caso a) | 167 |
| 4.2. Edificio con impalcati inaffidabili ma croci di muro integre (caso b)..... | 170 |
| 4.3. Edificio con impalcato di deformabilità finita dotato di catene (caso c) | 173 |
| 4.4. Edificio con impalcato rigido e resistente (caso d)..... | 174 |
| 5. Analisi statica non lineare..... | 176 |

Capitolo 10

| | |
|---|-----|
| GLI EDIFICI “SPECIALI” | 181 |
| 1. Premessa | 181 |
| 2. Metodologie di analisi e quadro normativo..... | 182 |
| 2.1. Considerazioni generali | 182 |
| 2.2. Analisi cinematica lineare..... | 183 |
| 2.3. Analisi cinematica non lineare..... | 189 |
| 2.4. Analisi modale o modale semplificata (statica) | 191 |
| 2.5. Analisi statica non lineare..... | 191 |

| | | |
|------|---|-----|
| 2.6. | Analisi dinamica non lineare | 192 |
| 3. | Alcuni approfondimenti sull'analisi elastoplastica non lineare..... | 193 |
| 3.1. | Aspetti generali..... | 193 |
| 3.2. | Metodologie di analisi non lineare | 194 |
| 3.3. | La sperimentazione numerica su alcune fabbriche storiche..... | 195 |
| 3.4. | Sintesi dei risultati e conclusioni | 199 |

Capitolo 11

| | | |
|--|---|-----|
| GLI EDIFICI SPECIALI: CASI STUDIO..... | | 203 |
| 1. | La chiesa di S. Francesco delle Monache in Aversa | 203 |
| 1.1. | La fabbrica | 203 |
| 1.2. | L'aula..... | 205 |
| 1.3. | La cupola | 207 |
| 2. | La cupola della chiesa di S. Maria a Mare a Maiori (SA)..... | 209 |
| 3. | La chiesa di Ognissanti a Fondola di Formica (CE)..... | 213 |
| 3.1. | Descrizione della struttura..... | 213 |
| 3.2. | Analisi svolte..... | 215 |
| 4. | Chiesa del Carmine in Aversa (CE) alla via Abenevolo | 220 |
| 4.1. | Inquadramento territoriale. | 220 |
| 4.2. | Caratteristiche strutturali della fabbrica | 221 |
| 4.3. | Modalità di analisi della fabbrica..... | 225 |
| 4.4. | Risultati delle analisi..... | 227 |
| 4.5. | Provvedimenti di miglioramento..... | 229 |
| 4.6. | Valutazione dell'efficacia degli interventi di miglioramento | 230 |
| 4.7. | Sintesi delle analisi statiche non lineari..... | 231 |
| 5. | Il restauro del Castello di Castel Volturno | 233 |
| 5.1. | Inquadramento territoriale | 233 |
| 5.2. | Caratteristiche strutturali della fabbrica | 234 |
| 5.3. | Rilievo strutturale ed individuazione delle criticità..... | 238 |
| 5.4. | Analisi strutturale della fabbrica nello stato attuale..... | 238 |
| 5.5. | Opere previste in progetto e loro funzione di miglioramento sismico | 243 |
| 5.6. | Analisi strutturale della fabbrica nello stato di progetto..... | 245 |
| 5.7. | Risultati dell'analisi..... | 247 |
| 5.8. | Valutazione dell'efficacia degli interventi di miglioramento | 249 |
| 5.9. | Condizione non sismica | 250 |
| 5.10. | Considerazioni conclusive..... | 251 |

Capitolo 12

| | | |
|--|--|-----|
| GLI INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO SISMICO..... | | 253 |
| 1. | Scopo e limiti del capitolo | 253 |
| 2. | Descrizione dei singoli interventi..... | 254 |
| 3. | Il progetto strutturale di miglioramento | 256 |
| 4. | La valutazione analitica del miglioramento | 260 |

Capitolo 13

IL PROBLEMA DEGLI EDIFICI ESISTENTI IN ZONA SISMICA NELLE

| | |
|--|-----|
| APPLICAZIONI PROFESSIONALI | 263 |
| 1. Premessa | 263 |
| 2. La conoscenza dell'edificio | 264 |
| 3. La verifica sismica di un edificio esistente con l'analisi lineare | 276 |
| 4. La verifica sismica con l'analisi statica non lineare | 288 |
| 5. Gli aggregati edilizi | 298 |
| 6. La valutazione della vulnerabilità sismica di un edificio esistente | 304 |

Capitolo 14

LE NUOVE COSTRUZIONI IN MURATURA

| | |
|---|-----|
| 1. Premessa | 321 |
| 2. L'edificio in muratura previsto dall'attuale normativa | 324 |
| 2.1. La concezione strutturale | 324 |
| 2.2. I requisiti geometrici generali | 325 |
| 2.3. I criteri di progetto sismico | 327 |
| 2.4. I limiti dimensionali specifici per le pareti e le regole di dettaglio | 328 |
| 2.5. Le prescrizioni per i materiali | 329 |
| 3. La verifica dell'edificio per i carichi verticali e per le azioni sismiche | 330 |
| 3.1. La verifica semplificata per l'edificio "semplice" | 331 |
| 3.2. La verifica sismica per l'edificio non semplice | 335 |

Capitolo 15

LE MURATURE IN TUFO GIALLO NAPOLETANO

| | |
|--|-----|
| 1. Evoluzione delle tecniche di muro post-medievali nell'areale del tufo giallo napoletano | 341 |
| 2. Sperimentazione: legame σ - ϵ | 342 |
| 3. Realizzazione dei macromodelli | 343 |
| 4. I materiali: tufo e malta | 347 |
| 5. La muratura | 351 |
| 5.1. Legame σ - ϵ | 360 |
| 5.2. Utilizzo della curva σ - ϵ | 361 |
| 6. Discussione dei risultati | 363 |
| 7. Conclusioni | 366 |
| Bibliografia | 367 |

Capitolo 16

LE FASCE DI PIANO

| | |
|--|-----|
| 1. Introduzione | 369 |
| 2. Le diverse possibili configurazioni della fascia di piano | 370 |
| 3. L'attività sperimentale | 376 |
| 3.1. Attrezzatura di prova | 376 |
| 3.2. Realizzazione dei modelli in scala | 377 |
| 3.3. Risultati delle prove sperimentali | 377 |

| | |
|--|-----|
| 4. Considerazioni: la resistenza a taglio dei pannelli di fascia | 382 |
| 5. Analisi numeriche | 387 |
| 6. Modello del “puntone ad arco” | 392 |
| 7. Conclusioni | 398 |
| Bibliografia..... | 399 |

Capitolo 17

| | |
|---|-----|
| ANALISI STRUTTURALE DI UN EDIFICIO STORICO NAPOLETANO | 401 |
| 1. Premessa | 401 |
| 2. Cenni storici: stratificazione di palazzo “Petrucci” | 401 |
| 3. Analisi morfologica dell’edificio. | 405 |
| 4. Definizione del modello strutturale | 405 |
| 5. Analisi lineari..... | 409 |
| 5.1. Verifiche di resistenza | 409 |
| 5.2. Valutazione della vulnerabilità sismica | 416 |
| 6. Analisi non lineari | 417 |
| 7. Conclusioni | 427 |
| Bibliografia..... | 428 |

In memoria di Michele Pagano

Premessa

Diverse ed articolate sono le motivazioni che hanno spinto gli autori a scrivere un libro sugli edifici in muratura e sembra opportuno richiamarle in questa premessa per una migliore comprensione del testo e delle sue finalità.

Una prima motivazione nasce dalle estese modifiche apportate dal 2003 al 2008 alla normativa tecnica, che hanno dato luogo ad un periodo di turbolenza e di incertezza in questo settore che sembra finalmente essersi concluso con l'emanazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 14/1/2008 (NTC 08). Le innovazioni consolidate riguardano l'applicazione prevalente del metodo semiprobabilistico agli stati limite, la valorizzazione del concetto di duttilità che affianca quello tradizionale della resistenza e, infine, l'estensione delle zone sismiche praticamente a tutto il territorio nazionale.

Una ulteriore motivazione nasce dal continuo ripetersi in Italia di eventi sismici, anche drammatici come quello recente dell'Aquila, che hanno reso evidente come il patrimonio edilizio da recuperare, o da salvaguardare con opere di prevenzione, sia per una percentuale notevole costituito da edifici in muratura. Tale percentuale sfiora il 100% se ci si riferisce al patrimonio architettonico storico.

Una particolare motivazione nasce infine dal desiderio di ricordare agli operatori tecnici l'insegnamento di Michele Pagano, scomparso nel 2007, comune maestro degli autori e, indirettamente, di tutti coloro che hanno dato un contributo alla realizzazione del testo. L'insegnamento di Pagano sugli edifici in muratura è ancora valido ed attuale e pertanto merita di essere ricordato e sviluppato anche per le nuove generazioni di ingegneri ed architetti. Pagano iniziò ad occuparsi di strutture murarie già prima degli anni '60, quando l'interesse della comunità scientifica era quasi monopolizzato dal cemento armato e dall'acciaio, ed ebbe un ruolo determinante nella stesura della prima normativa nazionale sulla muratura (D.M. del 1987). Subito dopo il terremoto campano-lucano del 1980, nel quale maturò profonde esperienze umane, professionali e scientifiche, il suo interesse per gli edifici in muratura trovò un nuovo slancio che coinvolse, senza più abbandonarli, anche gli autori del libro (allora giovani ingegneri). Le

tematiche da lui affrontate e vissute si confermano come fondamentali anche nell'attuale scenario. Questo testo vuole quindi anche essere un modo per celebrarne la memoria, in una forma diversa dalle cerimonie ufficiali in uso nel mondo accademico e che forse egli stesso, per il suo particolare carattere, non avrebbe gradito.

Il lettore che procederà nella lettura del testo si renderà presto conto di come la conoscenza della tecnica delle costruzioni murarie sia oggi (paradossalmente) meno consolidata rispetto alle altre fondamentali moderne tecniche costruttive (cemento armato ed acciaio). I fattori di incertezza sono più estesi e la ricerca scientifica deve ancora dare conferme e risposte a molti problemi. Questa situazione rischia di comunicare, ove ci si limitasse solo ad indicare le problematiche aperte, un messaggio scoraggiante per chi deve operare in questo settore con la conseguenza, deleteria, di spingere in direzione di un acritico empirismo. Questo testo invece, senza rinunciare ad indicare le incertezze scientifiche, cercherà di dare le risposte possibili "qui ed ora", sulla base delle attuali conoscenze. Gli autori sono i primi ad augurarsi quindi che il loro libro "invecchi" presto per i nuovi apporti che la ricerca scientifica in atto potrà dare, nella convinzione però che esso avrà comunque svolto un ruolo utile per una consapevole e responsabile attività tecnica in questo settore.

Il testo tratta delle strutture in muratura operando una distinzione tra gli edifici ordinari, destinati alla funzione abitativa e costituenti l'edilizia di tessuto, e gli edifici speciali, costituenti quelle emergenze architettoniche che hanno in genere funzione di rappresentanza (civile o religiosa). Naturalmente il confine tra le due categorie non è sempre netto e preciso ma la separazione dei due temi sembra comunque opportuna.

Il libro è articolato in diciassette capitoli. Dopo una introduzione che evidenzia l'evoluzione del pensiero scientifico e della normativa tecnica (capitolo 1) viene subito affrontato il tema della classificazione degli edifici (capitolo 2), aspetto che si ritiene fondamentale perché proprio da una corretta classificazione parte la comprensione del comportamento fisico globale degli edifici in muratura nei confronti dei carichi gravitazionali e delle azioni sismiche.

Seguono due capitoli (capitolo 3 e 4) che affrontano la descrizione e la valutazione del comportamento della muratura, degli elementi strutturali che costituiscono l'edificio e della parete muraria nel suo insieme ed altri due (capitolo 5 e 6) che esaminano elementi specifici, quali gli impalcati, le volte e gli archi.

I capitoli 7, 8 e 9 esaminano poi il comportamento dell'edificio ordinario, nel suo complesso, nei confronti sia delle azioni verticali che di quelle orizzontali, fornendo concrete indicazioni sulla modellazione e sui tipi di analisi da usare. I capitoli 10 e 11 trattano gli edifici "speciali" (chiese, castelli, etc.) che, per le loro caratteristiche particolari rispetto a quelle degli usuali edifici per abitazione, presentano aspetti specifici di cui tener conto nella modellazione e nell'analisi.

Il capitolo 12 richiama sinteticamente i possibili interventi di miglioramento sismico, evidenziando come questi debbano essere sempre legati al comportamento della struttura, colto da uno studio morfologico oltre che dalle analisi numeriche svolte. Il capitolo 13 ripercorre, con immagini e brevi commenti, i temi trattati nel testo con riferimento agli edifici ordinari e con un taglio professionale, presentando in maniera sintetica il materiale tratto dal corso di aggiornamento sugli edifici in muratura tenuto in più occasioni da uno degli autori. Il capitolo 14 fornisce indicazioni concettuali ed operative per le nuove costruzioni in muratura.

Concludono il volume tre capitoli che approfondiscono in maniera monografica alcuni argomenti specifici. Il capitolo 15 è dedicato alla caratterizzazione meccanica delle murature storiche dell'area napoletana, ad esemplificare come l'assortimento delle murature esistenti è praticamente sconfinato e come quindi sia necessario approfondire, di volta in volta, le caratteristiche di quella in esame. Il capitolo 16 è dedicato alle fasce di piano, elemento strutturale poco conosciuto e studiato e di conseguenza poco e male disciplinato dalla normativa tecnica. Esso è indicativo di quel processo in corso di consolidamento delle conoscenze scientifiche che non si esaurirà in tempi brevi. Il capitolo 17 è dedicato ad un edificio storico napoletano, Palazzo Petrucci, emblematico perché si colloca sul confine tra l'edificio ordinario e quello speciale, che si è cercato invece di trattare separatamente, e presenta problematiche che sono comunque ricorrenti nella pratica professionale.

Al volume è allegato un CD che contiene un'ampia raccolta di articoli scientifici, elaborati grafici e di calcolo relativi agli edifici esaminati nel testo, normativa ed altro materiale divulgativo, che potrà risultare utile per il lettore che ama gli approfondimenti.

Questo libro nasce sulla scia del lavoro svolto in precedenza da due degli autori (Aurelio Ghersi e Pietro Lenza) per un libro sugli edifici antisismici in cemento armato ed ha origine soprattutto da una precisa idea e dal tenace impegno di Pietro Lenza. Il coinvolgimento di Bruno Calderoni, legato agli altri autori dalla comune origine universitaria e da tante collaborazioni scientifiche, è avvenuto in una fase già abbastanza avanzata del lavoro, ma il confronto e le discussioni comportano sempre un arricchimento, del quale anche il libro si è giovato. Numerosi sono i giovani che hanno partecipato e che partecipano alle attività di ricerca degli autori e da queste collaborazioni è scaturito il coinvolgimento di Emilia Angela Cordasco e Gaetana Pacella, che hanno scritto i capitoli finali del libro. Nel testo si fa riferimento anche alle tesi di laurea di Ilio Pisaturo, Antonio Carpentieri ed Armando Fazzari, riportate per esteso nel CD allegato.

Infine, un ringraziamento particolare da Bruno Calderoni agli ingegneri Luciano Migliaccio e Maurizio Cirella che, anche nell'ambito della loro attività

professionale, hanno partecipato, con spirito critico e propositivo, allo sviluppo delle valutazioni di vulnerabilità sismica e dei progetti di miglioramento, di cui in parte si riferisce nel testo e che, dato l'argomento trattato, possono considerarsi come vera e propria attività scientifica applicativa. E, da parte di Aurelio Gherzi, un pensiero speciale alla moglie Lia, che è sempre un saldo punto di riferimento, ed ai genitori Adolfo e Clara, perché "se io sono quello che sono è anche grazie all'insegnamento ed all'esempio quotidiano che ho avuto da loro, fin da bambino".

Pietro Lenza, Aurelio Gherzi, Bruno Calderoni

Capitolo 1

L'EVOLUZIONE DEL PENSIERO SCIENTIFICO E DELLA NORMATIVA TECNICA

Pietro Lenza, Aurelio Ghersi

1. Le murature e la Scienza delle costruzioni

Non si possono studiare e comprendere le strutture in muratura senza qualche riflessione di carattere storico. Quando con Galileo nasce la scienza moderna, basata sul metodo analitico deduttivo, le costruzioni in muratura hanno già da molti secoli dato prova della loro capacità strutturale ed architettonica. Le grandi realizzazioni murarie, dall'antichità fino al rinascimento, furono realizzate sulla base di conoscenze empiriche (regole dell'arte) che testimoniano una profonda sensibilità strutturale nell'utilizzo del materiale ma non erano assistite da un supporto razionale e scientifico. Anche i grandi trattatisti dell'antichità classica come Vitruvio riconducevano le regole del costruire a criteri formali e filosofici. La Scienza comincia quindi con difficoltà a cercare di razionalizzare attraverso la meccanica le forme strutturali esistenti per orientare le costruzioni dell'epoca, ma in realtà il dibattito scientifico sembra svolgersi nell'atmosfera rarefatta dei circoli accademici senza significativi effetti pratici sull'attività delle costruzioni. Gli scienziati dell'epoca non potevano immaginare che stavano trattando il materiale strutturale più difficile! Il percorso scientifico (peraltro ancora in corso) si rivelerà lungo e faticoso. Il lettore che abbia curiosità di approfondire questo iter storico può trovare nell'opera di Edoardo Benvenuto "La Scienza delle costruzioni ed il suo sviluppo storico" il riferimento bibliografico fondamentale. Una trattazione dell'argomento è riportata anche nella tesi di laurea di Antonio Carpentiero archiviata sul CD allegato a questo testo.

Ci limitiamo qui ad indicare sommariamente le tappe di questo percorso che vede i primi due secoli (il '600 ed il '700) impegnati sostanzialmente a stu-

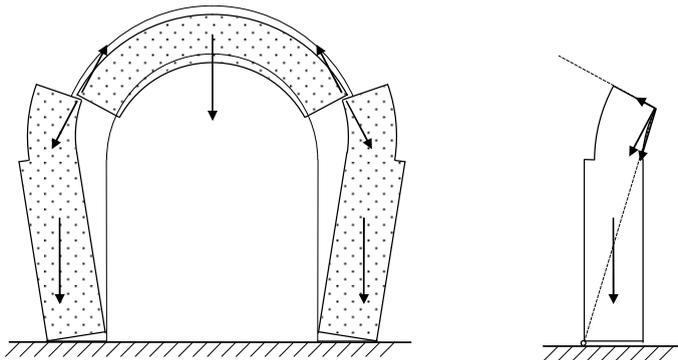


Fig. 1. L'equilibrio limite del portale secondo De la Hire

diare lo schema strutturale dell'arco sostenuto da due piedritti. Dapprima il portale veniva esaminato scomponendolo in conci "lisci". Questa ipotesi consente a De la Hire (1640-1718) di dimensionare le sezioni dell'arco a seconda della forma d'intradosso, giungendo però a conclusioni non convincenti. L'equilibrio limite del portale viene esaminato prefigurando la rottura lungo le sezioni a 45 gradi, sempre senza considerare l'attrito (Fig. 1). Il peso dell'intero arco centrale veniva scomposto in una componente lungo la congiungente lo spigolo interno della predefinita sezione di disconnessione e quello esterno della base del piedritto ed una ortogonale tendente a ribaltare il piedritto. Si può facilmente riconoscere in questa impostazione l'idea di cuneo e di leva.

La "svolta" avviene con Coulomb (1773) che introducendo l'attrito perviene a risultati sicuramente più veritieri. Dobbiamo comunque riflettere come in questi due primi secoli il materiale strutturale interviene senza che la sua resistenza e la sua deformabilità vengano prese in considerazione, il che necessariamente implica che ci si riconduca a schemi isostatici per i quali le equazioni dell'equilibrio sono sufficienti.

L'attenzione della comunità scientifica non trascurava sistemi strutturali tridimensionali come le cupole. Sia pure a livello intuitivo la concezione strutturale di una cupola era chiara fin dall'epoca romana: essa si caratterizzava come un insieme di archi meridiani collegati da cerchi paralleli. È proprio la funzione dei paralleli a differenziare il comportamento della cupola da quella di un insieme di archi meridiani scollegati. Oggi è ben noto dalla Scienza delle Costruzioni che per la condizione di carico da peso proprio si manifestano sforzi di trazione nei paralleli più bassi; ma tale problema era sicuramente intuito sin dall'antichità se, come nel caso del Pantheon (Fig. 2), ci si orientava ad aumentare lo spessore della cupola emisferica alle latitudini più basse.

Una prima razionalizzazione del problema si ottenne con l'opera del matematico Lorenzo Mascheroni (Bergamo 1750 – Parigi 1800) dal titolo "Nuove ricerche sull'equilibrio delle volte", pubblicata nel 1785, ove si concepì la cupola

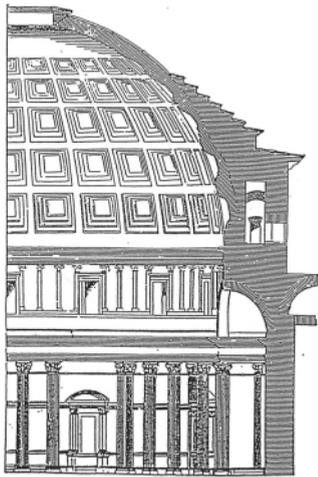


Fig. 2. La sezione del Pantheon evidenzia l'aumento dello spessore della cupola alle basse latitudini

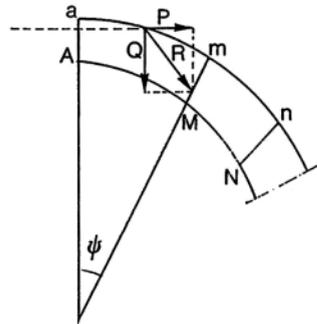


Fig. 3. Il criterio della “maggior pendenza” di Mascheroni per assicurare assenza di trazione nei paralleli

come un insieme di spicchi meridiani in cui la componente di taglio presente in ogni sezione fosse equilibrata dall'azione di contrasto svolta dai paralleli. Egli quindi approfondì un criterio per il calcolo delle cupole in muratura. A differenza dell'arco in cui, nell'ipotesi di assenza di attrito, gli sforzi di compressione dovevano essere ortogonali ai letti di malta tra i conci, nella cupola è sufficiente che la risultante R tra la spinta orizzontale in chiave P e il peso della parte sovrastante Q , pur obliqua al giunto, cada “con maggior pendenza”, cioè che essa tenda verso l'interno della cupola e quindi crei compressione negli anelli (Fig. 3). In sostanza deve verificarsi che

$$\frac{Q}{P} > \tan \psi$$

e questo poteva appunto ottenersi aumentando lo spessore e quindi il peso della struttura alle basse latitudini.

Grazie a Mascheroni si potette dimostrare con precisione, data la forma d'intradosso ed assunto costante lo spessore, a quale livello di latitudine si inverte il segno dello sforzo nei paralleli ed incomincia a manifestarsi la trazione. In linea con la cultura settecentesca l'obiettivo era quello di definire le forme strutturali più idonee piuttosto che conoscere lo stato di sollecitazione. Questa teoria dimostrò infatti che le cupole ogivali risentono meno degli effetti negativi dovuti alla trazione.

Nell'800 la meccanica delle strutture assume l'assetto della moderna Scienza delle Costruzioni. Nomi di studiosi ottocenteschi, come Navier, De Saint Venant e Clapeyron, ricorrono nei libri sui quali studiano gli attuali ingegneri.

Intanto entrano in campo i nuovi materiali strutturali quali la ghisa, l'acciaio e, successivamente, il cemento armato. La Scienza delle costruzioni si dedica ai nuovi materiali (più docili alla trattazione teorica) dimenticandosi della muratura. Fa eccezione Castellano (1876) che compie lo sforzo di comprendere meglio questo materiale tradizionale definendolo come *imperfettamente elastico* per la sua sostanziale non resistenza a trazione. Nella sua opera si trovano spunti di grande interesse quale ad esempio la ricerca per tentativi della parte reagente della struttura, non schematizzabile quindi con la sua linea d'asse ed anche la non unicità della soluzione. Il pensiero di Castellano non trova purtroppo immediati successori così il nuovo secolo ('900) si caratterizza con importanti sviluppi dell'ingegneria strutturale dedicata solo alle costruzioni realizzate con i nuovi materiali (il cemento armato diventa intanto protagonista delle costruzioni italiane). La teoria dell'elasticità viene estesa ai sistemi bidimensionali, tridimensionali e curvi ed al calcolo elastico si affianca quello a rottura.

La snellezza delle membrature delle strutture moderne consente di modellare gli schemi strutturali a "filo di ferro" ovvero sia con linee prive di spessore. Nella figura 4 il moderno ponte in cemento armato (Fig. 4a), nel quale la struttura resistente si identifica con la linea d'asse delle esili membrature, viene messo a confronto con una costruzione muraria massiccia (Fig. 4b) in cui le linee delle pressioni (ben diverse dalle linee d'asse) indicano solo una delle possibili configurazioni resistenti, non indipendente peraltro dal carico considerato.

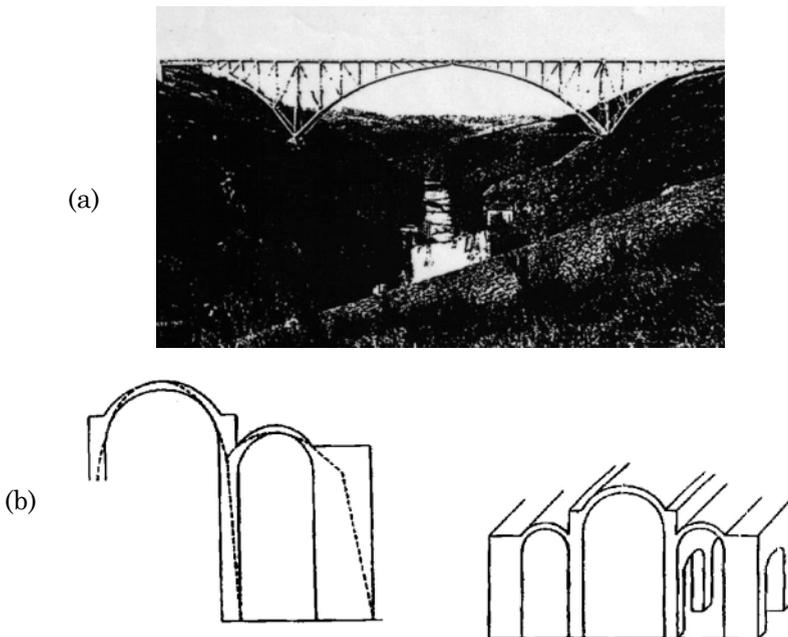


Fig. 4. Una moderna struttura in c.a. a confronto con una antica struttura in muratura



Fig. 5. Circa 50 anni separano il ponte ferroviario in muratura dal ponte autostradale in c.a. realizzato nel 1960 circa (Salerno, foto di P. Lenza)

L'immagine di figura 5, che mostra l'uno dietro l'altro due ponti realizzati a circa 50 anni di distanza, simboleggia il rapido passaggio tra le due tecnologie.

Le strutture in muratura sembrano completamente dimenticate dagli studiosi fino a quando (anni 70 e successivi del '900) gli eventi sismici hanno costretto a considerare che, essendo il patrimonio edilizio largamente costituito da edifici in muratura, era necessario riprenderne attivamente lo studio. Persino la normativa tecnica intanto si era dimenticata delle murature e dobbiamo aspettare il 1987 perché veda la luce la prima normativa specifica.

Allo stato attuale quindi noi soffriamo del problema di dovere spesso adattare alle antiche strutture in muratura teorie e modellazioni nate per le strutture moderne. Questa difficoltà di comprensione peraltro penalizza anche la realizzazione di nuove costruzioni in muratura, di fatto condannate dalle attuali normative a ruoli marginali mentre sicuramente meriterebbero di riconquistare il ruolo ed il peso che loro competono.

2. Evoluzione della normativa tecnica e dei metodi di analisi

Per i motivi che abbiamo illustrato nel precedente paragrafo la normativa tecnica, intesa come un codice che disciplini la realizzazione delle costruzioni, nasce all'inizio del '900 con il D.M. 10/1/1907, con riferimento al cemento armato, le cui capacità consentono nuove forme strutturali ed il cui impiego destava allarme nella società al punto da sentire la necessità di disciplinarne l'uso. L'impie-

go plurisecolare della muratura sembrava invece non determinare una analoga necessità. Dobbiamo attendere l'emanazione della legge 64 nel 1974 perché si preannunci uno specifico decreto ministeriale dedicato alle costruzioni in muratura che avrebbe dovuto essere emanato nei successivi sei mesi. Passano invece tredici anni perché solo nel 1987 vede la luce l'atteso decreto il cui contenuto, sia in termini di principi che di regole applicative, sopravvive anche nell'attuale normativa (Norme Tecniche per le Costruzioni 2008, ovvero NTC 08).

Se però una normativa specifica sulle murature vede la luce così in ritardo, le costruzioni in muratura erano state oggetto di attenzione nei provvedimenti e raccomandazioni emanati nelle zone sismiche da oltre due secoli, in generale a seguito di dolorosi eventi sismici. Tali provvedimenti erano destinati infatti a tutte le costruzioni all'epoca, prevalentemente in muratura. Ai provvedimenti più antichi, che sono probabilmente quelli del 28 marzo 1784, emanati dal Governo borbonico dopo il terremoto che devastò la Calabria nel 1783, ne seguirono numerosi altri fino all'inizio del ventesimo secolo: regolamento pontificio edilizio per la città di Norcia, 1860; prescrizioni edilizie per l'isola d'Ischia, 1883; norme per la costruzione ed il restauro degli edifici nei comuni liguri danneggiati dal terremoto del 22 febbraio 1887; norme per la costruzione ed il restauro degli edifici danneggiati dal terremoto nelle province calabresi ed in quella di Messina, 1906.

Tutte queste norme si limitavano, però, a prescrizioni costruttive e limitazioni dell'altezza degli edifici. Solo dopo il terremoto di Messina del 28 dicembre 1908 venne promulgata una norma (R.D. 18 aprile 1909, n. 193) che prevedeva esplicitamente la necessità di tenere conto nei calcoli di stabilità e resistenza delle costruzioni di “azioni dinamiche dovute al moto sismico ondulatorio, rappresentandole con accelerazioni applicate alle masse del fabbricato”¹. L'entità delle massime accelerazioni prodotte da un terremoto era, all'epoca, oggetto di discussione. La scala sismica proposta dal giapponese Omori considerava possibili accelerazioni massime superiori a 4 m/s^2 (0.4 g, indicando con g l'accelerazione di gravità) e questo valore veniva posto a base dei calcoli da alcuni autori. Ciò nonostante, la commissione incaricata di predisporre le norme del 1909 sottolineò le incertezze esistenti su tale punto e l'improponibilità di usare tali accelerazioni nel progetto, perché esse avrebbero portato “a risultati praticamente inattendibili a cagione delle eccessive dimensioni che ne scaturirebbero adottando gli abituali carichi di sicurezza datici dalla scienza della resistenza dei materiali da costruzione”. Si decise quindi di “dedurre direttamente per determinati tipi di fabbriche, di cui si sia constatata l'incolumità in un numero abbastanza grande di casi, quali siano le forze massime che ... avrebbero potuto essere sopportate dall'edificio, per servirsene poi nel calcolo di fabbricati nuovi”.

¹ Tutte le citazioni sono tratte dalla “Relazione della Commissione incaricata di studiare e proporre norme edilizie obbligatorie per i comuni colpiti dal terremoto del 28 dicembre 1908 e da altri anteriori” pubblicata sul Giornale del Genio Civile, 1909.

Gli studi svolti portarono alla conclusione che “le forze convenzionali da introdurre nei calcoli ... corrisponderebbero ad una accelerazione di 700 ad 800 mm per secondo al quadrato” (cioè 0.07-0.08 g). Si propose quindi di utilizzare forze orizzontali pari a “1/12 dei rispettivi pesi per le strutture dei piani inferiori”, aumentate a “1/8 per quelle del piano superiore²” per tener conto del fatto che “l'ampiezza delle oscillazioni provocate dai terremoti negli edifici aumenta dai piani inferiori ai superiori”. C'era comunque la consapevolezza che “un edificio calcolato per l'accelerazione sopra indicata, secondo gli ordinari carichi di sicurezza, si dovrà considerare come resistente in buone condizioni ad una scossa di accelerazione doppia, la quale non dovrebbe provocarvi tensioni unitarie superiori ai limiti pratici di elasticità dei rispettivi materiali, e darà garanzia contro il pericolo di uno sfasciamento disastroso anche per scosse di intensità quattro o cinque volte più grandi”.

Il terremoto di Messina del 1908 rivelò in particolare la vulnerabilità degli edifici in muratura con solai in legno o ferro semplicemente appoggiati alle murature, per il collasso delle pareti fuori dal proprio piano. Ne seguì la disposizione (1937) che vietò tali tipologie, imponendo l'impalcato in c.a. con cordoli di incatenamento inseriti tra gli ordini delle murature. La normativa sismica, comunque, continuava ad ignorare la possibilità di effettuare una verifica numerica delle strutture in muratura soggette a sisma. Solo dopo il terremoto dell'Irpinia del 1980 furono emanate norme (D.M. 2 luglio 1981 n. 593 e Circolare 30 luglio 1981 n. 21745) che fornivano prescrizioni in tale senso, anche se la loro applicazione era limitata alla riparazione ed al rafforzamento degli edifici danneggiati dal sisma.

Come si vede, fin dalle prime normative risalenti all'inizio del secolo scorso erano presenti, in nuce, i concetti base dell'analisi sismica: comportamento elastico lineare per terremoti deboli, comportamento non lineare per terremoti più forti, uso di forze statiche per simulare gli effetti del reale comportamento dinamico. Solo dopo la metà del ventesimo secolo il progresso teorico e la disponibilità di nuovi mezzi di calcolo consentirono una migliore comprensione, anche dal punto di vista numerico, del problema. L'analisi della risposta sismica di oscillatori elastoplastici mostrò che una progettazione basata su un'analisi lineare con forze ridotte può garantire una sufficiente sicurezza nei confronti del collasso solo se la struttura possiede un'adeguata duttilità. Le normative più recenti, come l'Eurocodice 8, hanno quindi previsto criteri per conferire un buon comportamento globale (*capacity design*, o criterio di gerarchia delle resistenze) e hanno indicato dettagli costruttivi per incrementare la duttilità locale.

L'applicazione attenta di questi principi, tradotti in regole applicative precise, permette quindi una facilitazione nel calcolo strutturale consentendo una analisi lineare convenzionale con azioni orizzontali ridotte. Tutto questo però è

² La norma proposta prevedeva che fossero consentiti al massimo due piani.

vero per le nuove costruzioni, generalmente in cemento armato, ma nel caso delle murature ci troviamo ad esaminare quasi sempre il comportamento di strutture esistenti realizzate secondo criteri generalmente non conosciuti. Ne consegue che nel campo che stiamo esplorando trovano maggiore spazio le analisi più sofisticate ed avanzate rispetto a quelle semplificate.

Sono stati proposti negli ultimi anni metodi caratterizzati dal valutare il comportamento ultimo della struttura basandosi sulle deformazioni o meglio, in maniera sintetica, sugli spostamenti. È stato così introdotto il concetto di *displacement based design*, contrapposto all'approccio tradizionale che era basato sulla valutazione dell'effetto di forze statiche e che pertanto è stato ribattezzato *force based design*. In generale questi metodi scindono il problema in due fasi: valutazione degli spostamenti "disponibili", cioè sopportabili dalla struttura, mediante una analisi statica non lineare (analisi *pushover*); valutazione degli spostamenti "richiesti", cioè che cimenteranno la struttura durante il sisma, a partire da spettri di risposta. Il confronto tra spostamenti richiesti e disponibili consente di esprimere il giudizio sulla capacità della struttura di sopportare il sisma senza collassare. Tale strumento appare oggi il più idoneo a valutare la capacità sismica degli edifici in muratura. È proprio questo strano intreccio tra antico e moderno l'aspetto che conferisce oggi allo studio degli edifici in muratura un fascino particolare.

3. L'attuale quadro normativo nazionale

Com'è noto a tutti gli operatori del settore la normativa tecnica nazionale che si occupa di costruzioni in muratura si incardina nella legge 64 del 1974 che disciplina tutte le costruzioni ed in particolare quelle in zona sismica. In base ad essa il Ministero dei LL.PP. è chiamato ad emanare ed aggiornare specifiche normative tra cui quella sugli edifici in muratura ed in generale quella che disciplina tutte le costruzioni in zona sismica. Più recentemente questa legge è stata recepita dal Testo Unico per l'Edilizia, emanato con il Decreto del Presidente della Repubblica del 6 giugno 2001, n. 380 (DPR 380/01), che contiene i principi fondamentali e generali e le disposizioni per la disciplina dell'attività edilizia.

Fa da sfondo al recente riassetto della normativa nazionale la maturazione degli Eurocodici, che rappresentano il tentativo (sofferto) di unificare a livello dell'Unione Europea la normativa di settore. Lo sviluppo di tali documenti ha costituito un importante momento di incontro di diverse tradizioni e culture tecniche. In questo processo di unificazione è prevalsa la linea di pensiero che considera il metodo agli stati limite come unico criterio di verifica della sicurezza. Esso è quindi alla base sia delle norme relative ai singoli materiali strutturali (per la muratura l'Eurocodice 6) che delle norme specificamente rivolte alla progettazione sismica (Eurocodice 8).

Il XXI secolo si è aperto con un periodo di forte instabilità normativa. L'Ordinanza 3274 del marzo 2003 ha subito rilevanti integrazioni e modifiche, fino ad una versione finale costituita dalla OPCM 3431 del maggio 2005. Al di là degli aspetti formali tanto criticati, dovuti al mancato rispetto della struttura normativa innanzi citata, è importante sottolineare le innovazioni sostanziali introdotte da queste Ordinanze. Ancor più che l'obbligo di utilizzare il metodo degli stati limite, appare importante il diverso peso dato alle azioni sismiche ed ai carichi verticali e la maggiore attenzione alla duttilità della struttura. È inoltre importante sottolineare che esse hanno recepito la crescente consapevolezza del rischio sismico, portando ad una classificazione del territorio nazionale che vede tutta l'Italia come zona sismica, sia pure con limitate aree a bassissima sismicità. Si evidenzia, infine, l'attenzione nei riguardi della verifica delle costruzioni esistenti, alle quali è dedicato un ampio capitolo.

Un primo tentativo di "ripristinare la legalità", ovvero di ridare al Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti il compito di emanare norme tecniche, è stato fatto col D.M. 14/9/05, redatto con l'obiettivo di fornire "un Testo Unitario che abbia caratteristiche di coerenza, chiarezza, univocità, sinteticità e sia improntato al più moderno indirizzo di normazione prestazionale, piuttosto che prescrittiva". Anche queste norme hanno suscitato forti critiche perché, pur accettando l'impostazione agli stati limite, introducevano aspetti concettuali e formali non ben in linea con l'impostazione europea degli Eurocodici.

Si è così giunti alle Norme Tecniche per le Costruzioni emanate col D.M. 14/1/08, che costituiscono la versione più aggiornata della norma tecnica nazionale. Il decreto ribadisce la scelta del metodo agli stati limite come riferimento di base per la verifica della sicurezza strutturale. L'uso del metodo delle tensioni ammissibili è infatti consentito solo per "le costruzioni di tipo 1 e 2 e classe d'uso I e II, limitatamente ai siti ricadenti in Zona 4" (punto 2.7), ovvero per edifici ordinari (cioè con normale affollamento e non rilevanti per funzioni pubbliche e strategiche) ubicati in zone a bassissima sismicità. È inoltre importante evidenziare che le norme "definiscono i principi per il progetto, l'esecuzione e il collaudo delle costruzioni, nei riguardi delle prestazioni loro richieste in termini di requisiti essenziali di resistenza meccanica e stabilità" e consentono, relativamente alle indicazioni applicative per l'ottenimento delle prescritte prestazioni, di riferirsi "a normative di comprovata validità e ad altri documenti tecnici" (punto 1). Il dibattito tra *norme prescrittive* e *norme prestazionali* è stato molto forte in questi anni. La classica impostazione prescrittiva delle norme tecniche italiane, nelle quali la singola indicazione di dettaglio doveva essere sempre rigorosamente seguita, cozzava con la chiara distinzione, presente negli Eurocodici, tra principi (inderogabili) e regole applicative (che possono essere sostituite da criteri che garantiscano ugualmente il raggiungimento degli obiettivi). A partire dall'Ordinanza 3274 tutte le norme italiane hanno cercato di se-

guire questo nuovo indirizzo: strada indubbiamente faticosa ma che restituisce al progettista strutturale quel diritto a ragionare e decidere che, se sapientemente amministrato, può portare ad opere realmente e sostanzialmente (e non solo formalmente) sicure.

Il riferimento normativo nazionale oggi è quindi costituito dalle Norme Tecniche per le Costruzioni, che dedicano in particolare alle costruzioni in muratura le seguenti sezioni:

- cap. 4, Costruzioni civili e industriali, paragrafo 4.5;
- cap. 7, Progettazione per azioni sismiche, paragrafo 7.8;
- cap. 8, Costruzioni esistenti;
- cap. 11, Materiali e prodotti per uso strutturale, paragrafo 11.10.

Assume particolare importanza la sezione dedicata alle costruzioni esistenti, che costituiscono il tema prevalente per l'attività tecnica sulle costruzioni in muratura. In realtà proprio questa sezione appare poco dettagliata rendendo necessario attingere alle "Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008" emanate con Circolare 2/2/09, n. 617 dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Queste istruzioni, sostanzialmente ispirate all'Ordinanza 3431, assumono sul tema specifico un ruolo improprio di integrazione oltre che di chiarimento. In particolare sono di fondamentale importanza le appendici alle predette istruzioni, quali la C8A.2. (Tipologie e relativi parametri meccanici delle murature), C8A.3. (Aggregati edilizi) e C8A.4. (Analisi dei meccanismi di collasso in edifici esistenti in muratura).

Nel caso, frequente, di edifici appartenenti al patrimonio storico sarà necessario anche tener conto delle linee guida contenute nella Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri "Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni". Di tale direttiva è stata emanata una prima versione il 12/10/07 (G.U. n. 24 del 29/01/08), successivamente aggiornata alle NTC 08 con la versione del 9 febbraio 2011 (G.U. n. 47 del 26/02/11).

In questo libro non viene esposto sistematicamente il contenuto della normativa, preferendo richiamare di volta in volta le singole indicazioni nel corso dei diversi capitoli, cercando peraltro di discernere sempre tra i principi e le regole applicative. Nel CD allegato al volume il lettore potrà trovare il testo completo della NTC 08 e della Circolare, nonché altra documentazione che fa particolare riferimento alle costruzioni in muratura.

Capitolo 2

LE TIPOLOGIE STRUTTURALI

Pietro Lenza, Aurelio Ghersi, Bruno Calderoni

1. Limiti e finalità di una possibile classificazione

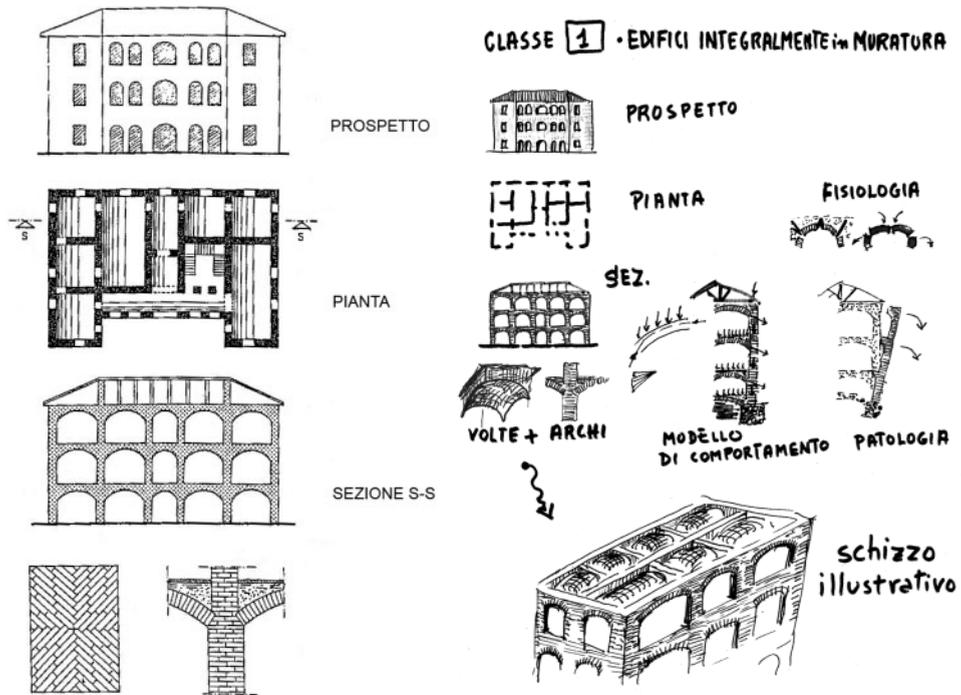
C'è preliminarmente da chiedersi se sia possibile proporre una classificazione semplice che comprenda costruzioni realizzate dall'antichità fino quasi ai nostri giorni. La risposta può sorprendentemente essere positiva a condizione di limitare tale classificazione solo alla cosiddetta edilizia ordinaria, destinata cioè al soddisfacimento della normale esigenza abitativa. Infatti anche a distanza di secoli tale esigenza si è espressa con caratteristiche geometriche (come le dimensioni ed altezze dei vani) non troppo diverse nel tempo. Diverso è il caso degli edifici speciali, destinati a funzioni religiose o civiche, che, come si commenterà nel capitolo 10, si sottraggono a tale possibilità.

Precisata questa limitazione e con riferimento quindi esclusivamente all'edilizia di tessuto ci si chiede quali possano essere i criteri di classificazione, se le possibili classi debbano necessariamente corrispondere ad una rigorosa successione storica o debbano riferirsi a diverse tecniche costruttive o ancora ad un diverso comportamento strutturale.

A parere degli autori e nonostante i numerosi anni trascorsi, la classificazione più efficace sembra essere quella proposta da Pagano¹ che considera solo tre classi di edifici in muratura. Questa classificazione ha il pregio di essere particolarmente semplice e seppure non intenda rigorosamente tracciare l'evoluzione delle tecniche costruttive esprime, nella successione delle tre classi, anche una schematica evoluzione storica.

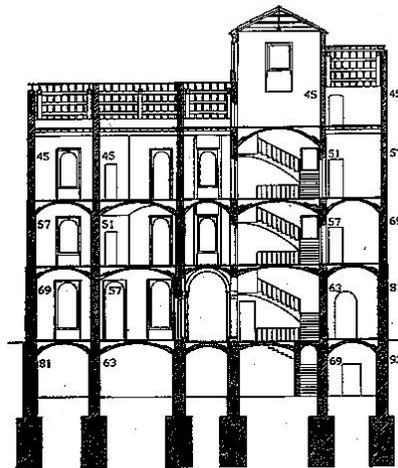
Come fattore classificante viene assunto il comportamento strutturale dell'edificio nel suo complesso sotto l'azione dei carichi verticali ma, a parere degli

¹ M.Pagano, Teoria degli edifici, vol. 1, Edifici in muratura, Liguori Editore, Napoli, 1968.



a) aspetti morfologici generali e particolari

b) uno schizzo di Pagano che ne sintetizza le caratteristiche e le criticità



c) una possibile sezione strutturale

Fig. 1. Edifici della prima classe; la figura b) è tratta da M. Pagano, *Costruire in muratura*, Liguori Editore, Napoli, 1990

autori, la classificazione proposta risponde bene anche ad una rilettura doverosamente aggiornata, che consideri anche il comportamento sotto azioni orizzontali.

Sciolta quindi la riserva sulla possibilità c'è da porsi l'interrogativo circa la sua utilità. Una classificazione basata sul comportamento generale dell'edificio permette di evidenziare, seppure qualitativamente, per ciascuna classe le specifiche criticità, cioè i problemi strutturali sia per carichi verticali che orizzontali che ne determinano la vulnerabilità. Questo risulta particolarmente utile nell'attività professionale. Se pensiamo ad esempio alle ricognizioni, necessariamente speditive, che si compiono nei centri storici dopo un evento sismico, "classificare" l'edificio consente di ricordare l'intera lista di problemi tipici di quella classe. La classificazione, operazione di per sé culturalmente pericolosa, sembra nel caso specifico particolarmente utile per una comprensione del comportamento dell'edificio e delle sue criticità e per formulare un primo giudizio sulla sua vulnerabilità.

In questo capitolo si ripropone quindi la classificazione di Pagano, apportando ad essa solo modesti contributi di approfondimento legati alla necessità di riproporla anche in chiave sismica.

Per sottolineare ulteriormente questa paternità si propongono nel testo anche schizzi illustrativi tratti da testi o dispense dello stesso Pagano ed inoltre si cercherà di conservarne l'impostazione originaria di tipo intuitivo e con l'uso estremamente limitato di formule, in modo da rendere questo capitolo agevolmente comprensibile anche da chi non abbia compiuti studi specifici in materia.

2. Gli edifici della prima classe

Sono edifici interamente in muratura con impalcati costituiti da sistemi voltati (Fig. 1). La varietà delle diverse forme di volte verrà approfondito nel successivo capitolo 6 mentre in questa sede è sufficiente rimarcare il carattere spingente di questi sistemi. Le pareti verticali, continue dalle fondazioni alla copertura, presentano le aperture dei vani sormontate da archi, anch'essi spingenti.

Le fondazioni di questo edificio sono generalmente "a tela" nel senso che riproducono sul piano fondale la trama della scatola muraria con un ulteriore sensibile ringrosso per adeguare le pressioni nella muratura a quelle sopportabili dal terreno. In qualche caso venivano realizzati in corrispondenza degli incroci murari dei "pozzi" di grosso diametro, antesignani degli attuali pali, riempiti di pietrame legato debolmente da malta; tra i pozzi si impostavano arconi sui quali venivano erette le pareti continue (Fig. 2). In entrambi i casi non vi è quella discontinuità tra il sistema fondale e la costruzione in elevazione tipica degli edifici in c.a. od in acciaio; si può affermare in definitiva che tutto l'edificio sia fondazione di se stesso. Ne deriva una grande sensibilità del fabbricato ai cedimenti fondali che perciò si manifestano con quadri fessurativi estesi su tutta la verticale.

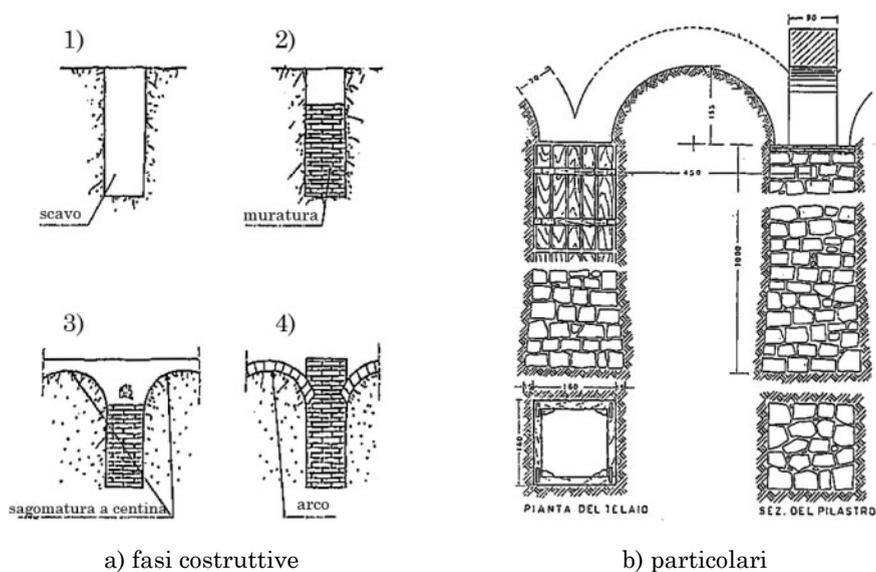


Fig. 2. Fondazioni "a pozzo"

La copertura infine è generalmente a tetto anche per la non disponibilità all'epoca di realizzazione di questi edifici di idonei sistemi di impermeabilizzazione.

La presenza di volte e archi condiziona il comportamento della struttura sotto carichi verticali. Le spinte delle volte sostanzialmente si bilanciano nei nodi interni della scatola muraria mentre esercitano un'azione ribaltante sulle pareti perimetrali; anche l'effetto spingente degli archi posti al di sopra delle aperture con funzione di piattabanda, di più modesta entità, si bilancia in corrispondenza dei vani interni mentre aggiunge un contributo ribaltante verso l'esterno alle estremità. L'insieme di questi effetti tende ad aprire verso l'esterno la scatola muraria; a tale cinematismo offrono resistenza le pareti trasversali, sempre che siano efficacemente ammorsate in quelle perimetrali. Nel tempo, l'eventuale progressiva rottura delle croci di muro tende ad aumentare la pericolosità del fenomeno, al quale si poneva rimedio mediante la realizzazione di barbacani esterni di sostegno o l'inserimento di catene scorrevoli.

A tale criticità per carichi verticali occorre sommare quelle dovute alle azioni sismiche orizzontali, tra cui la prima e fondamentale è il possibile ribaltamento delle pareti fuori del piano. Nella tipologia in esame, la mancanza di un impalcato capace di distribuire l'azione sismica tra i diversi elementi resistenti in proporzione alla loro rigidità fa sì che ciascuna parete debba sopportare direttamente le accelerazioni indotte dal sisma. Particolarmente gravosa diventa in tal caso l'azione ortogonale al piano della parete. Il rischio di ribaltamento può essere mitigato dalla possibilità di ricondurre le azioni

orizzontali sismiche alle pareti ortogonali mediante un arco di scarico contenuto nello spessore del muro. Ovviamente lo spessore ridotto della muratura comporta una modesta freccia dell'arco e determina quindi forti azioni spingenti, proporzionali al quadrato della dimensione dei vani. Queste azioni si bilanciano nei nodi interni mentre producono all'estremità azioni che difficilmente possono essere assorbite dalle pareti ortogonali e rendono quindi necessaria la presenza di catene tensoresistenti disposte lungo la parete o in prossimità di essa. Catene sono necessarie anche nelle pareti parallele all'azione del sisma, per sostenere la trazione risultante dall'azione sismica nella parete il cui ribaltamento viene impedito.

Al di là dei problemi legati al ribaltamento, una sia pur modesta capacità distributiva potrebbe comunque essere riconosciuta all'impalcato, immaginando presenti puntone diagonali che irrigidiscono le singole celle della scatola muraria. Il puntone può essere costituito dal masso che sovrasta la volta vera e propria o dalla volta stessa che si configura come un arco diagonale estensionalmente irrigidito da possibili archi di scarico che si formino nella superficie voltata in direzione ortogonale. Anche in questo caso le azioni sismiche vengono ricondotte alle pareti di controvento, parallele al sisma, generando sforzi di trazione lungo quelle trasversali e rendendo ancor una volta necessaria la presenza di catene disposte lungo di esse. L'argomento sarà comunque approfondito nel successivo capitolo 5.

Per quanto riguarda, invece, l'effetto dell'azione sismica nel piano delle pareti, le forze orizzontali potrebbero essere fronteggiate da un sistema di puntone compressi che riportano le azioni in fondazione (Fig. 3 a). La mancanza di elementi tensoresistenti orizzontali impedisce però di riportare in fondazione le forze agenti nelle zone triangolari alte della parete, determinando così una elevata vulnerabilità sismica di tali zone (Fig. 3 b). Prive di questo aiuto, le pareti

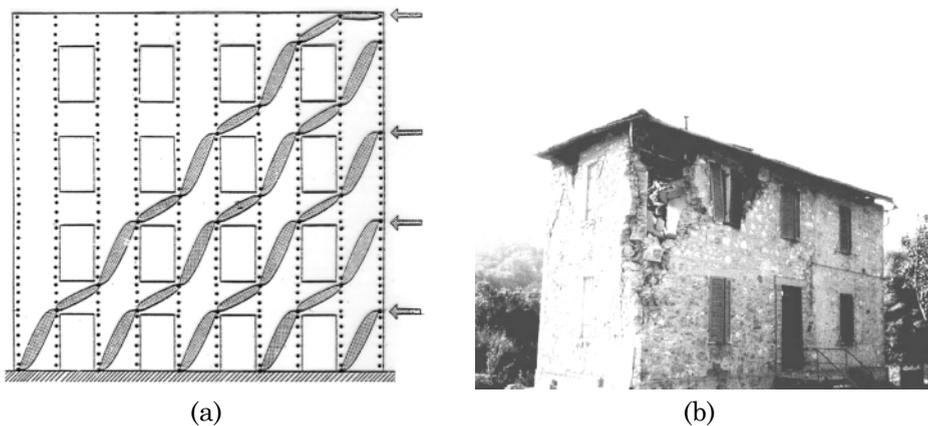
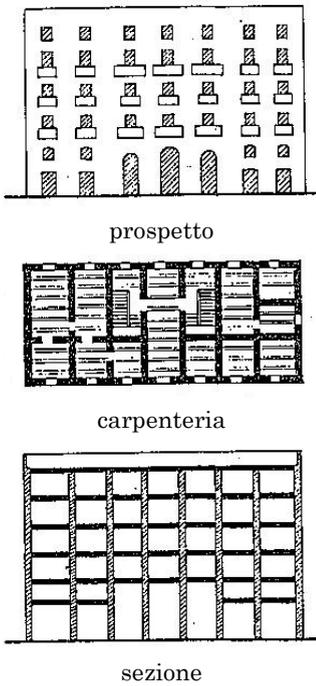
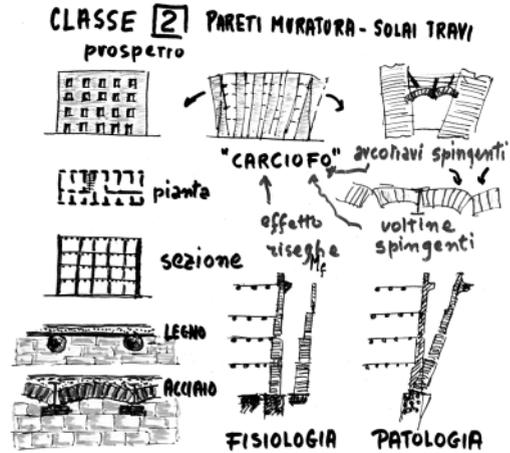


Fig. 3. Insieme di puntone che riconducono forze orizzontali alla fondazione

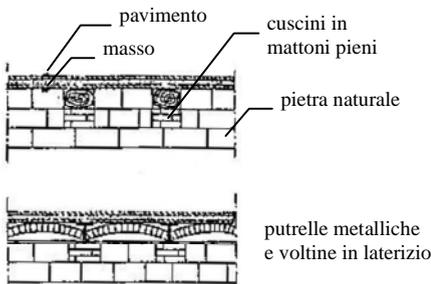
si comportano in sostanza come un sistema di mensole, ciascuna indipendente dall'altra, poiché le fasce di piano non assicurano apprezzabile capacità di accoppiamento che possa prefigurare un comportamento a telaio della parete.



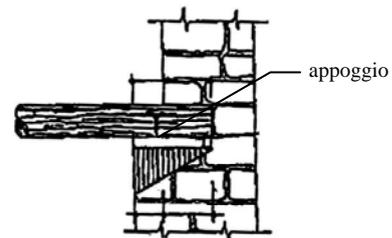
a) un possibile edificio della seconda classe



b) uno schizzo di Pagano che ne sintetizza le caratteristiche e le criticità



c) particolare dei solai con travi lignee o metalliche



d) particolare dell'appoggio della trave in legno di un solaio

Fig. 4. Edifici della seconda classe; la figura b) è tratta da M. Pagano, Costruire in muratura, Liguori Editore, Napoli, 1990

3. Gli edifici della seconda classe.

Sono caratterizzati da pareti verticali continue in muratura con impalcati costituiti da solai piani isostatici, costituiti da travi semplicemente appoggiate in asole della muratura (Fig. 4). Le piattabande sui vani sono generalmente costituite da archi ribassati (architrave) ad intradosso piano fatti con mattoni messi di coltello o semplicemente con tavole in legno appoggiate per pochi centimetri sulle spalle dei vani. Alla fine dell'ottocento le travi in legno furono sostituite da quelle in ferro senza però modificare nella sostanza l'assetto strutturale dell'edificio né eliminare le sue criticità.

La presenza di un impalcato piano elimina il problema delle spinte delle volte e di conseguenza è usuale trovare in questa tipologia uno spessore dei muri più contenuto e/o un numero maggiore di piani. Il comportamento globale dell'edificio è tuttavia ancora caratterizzato dalla tendenza della scatola muraria ad aprirsi "a carciofo" (Fig. 5) a causa di una serie di fenomeni tutti concorrenti a generare effetti per così dire spingenti orizzontali. Innanzitutto l'eccentricità dei muri perimetrali che, per mantenere verticale il paramento esterno, risegano solo verso l'interno; ne consegue l'insorgere di momenti ribaltanti ver-

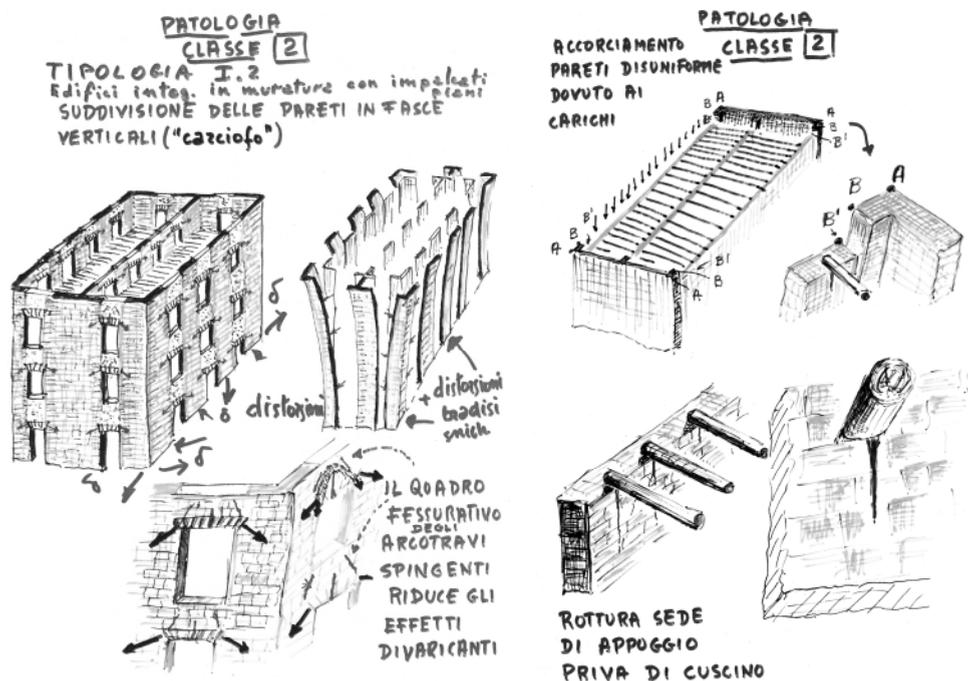


Fig. 5. Edifici della seconda classe: morfologia generale, particolari e criticità (da M. Pagano, *Costruire in muratura*, Liguori Editore, Napoli, 1990)

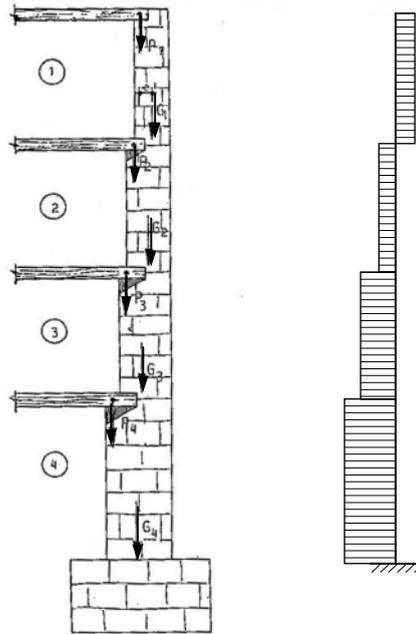


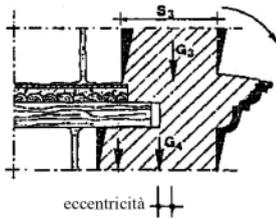
Fig. 6. Eccentricità degli sforzi trasmessi dai solai (stabilizzante) ed eccentricità del peso proprio della parete (ribaltante) con riseghe asimmetriche ed il relativo diagramma dei momenti che evidenzia anche in questo caso il prevalere degli effetti ribaltanti

so l'esterno dovuti all'eccentricità del peso delle murature rispetto ai sottostanti ordini murari (Fig. 6 e Fig. 7a,b). Ulteriori spinte sono dovute all'effetto arco delle piattabande dei vani (Fig. 7c); anche queste spinte che si bilanciano sostanzialmente all'interno dell'edificio, tendono ad aprire la scatola muraria. Infine, anche le voltine dei solai con putrelle metalliche esercitano piccole spinte, sbilanciate lungo il perimetro.

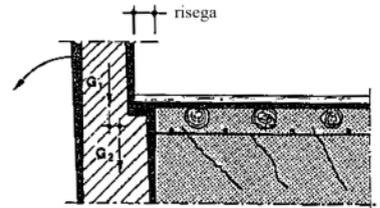
Il contenimento del fenomeno di apertura dell'edificio è affidato all'integrità delle croci muro che consentono di "agganciare" le pareti perimetrali a quelle trasversali. Sono quindi da considerare come ulteriori criticità tutti quei fenomeni che insidiano tale integrità. Tra questi dobbiamo ricordare l'impossibilità di caricare uniformemente tutti i muri dell'edificio a causa dell'assetto monodirezionale dei solai piani. In genere si aveva la cura di alternare la direzione dei solai su ciascuna verticale, ma se questo criterio non è ben rispettato il diverso accorciamento dei muri determina in corrispondenza degli incroci una incongruenza deformativa che può risolversi con l'apertura di una lesione di distacco.

Anche gli effetti termici, amplificati dall'inserimento in questi vecchi edifici di impianti di riscaldamento, giocano un ruolo sfavorevole. Riscaldando le pareti interne dell'edificio rispetto alla cortina esterna, queste tendono a dilatarsi in verticale generando, nelle sezioni di contatto con quelle perimetrali, sollecitazioni

(a) particolare della risega



(b) lesioni di richiamo nei muri trasversali



(c) particolare architravi

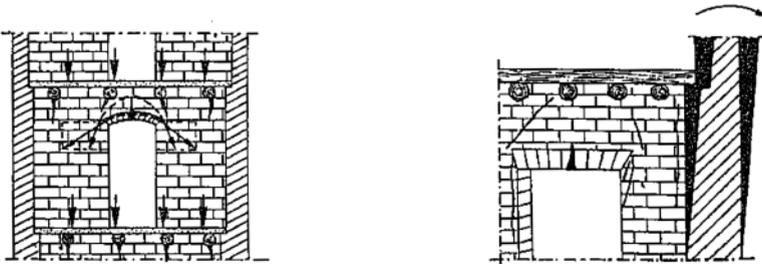


Fig. 7. Particolari degli edifici della seconda classe che ne evidenziano le criticità

taglianti che tendono a lesionare le croci di muro. Questo fenomeno è sicuramente da addebitare anche alla classe precedente ma in essa il maggiore spessore dei muri e la minore altezza del fabbricato rendono il problema meno grave.

La vulnerabilità di questi edifici alle azioni sismiche orizzontali (in mancanza di catene diffuse disposte lungo le pareti nelle due direzioni) è evidente perché le pareti esterne sono esposte al ribaltamento fuori dal proprio piano; infatti le travi in legno o in ferro dei solai, di per se tensoresistenti e quindi potenzialmente ottime catene, venivano semplicemente appoggiate in asole della muratura. Rari e di dubbia efficacia erano i radicamenti delle travi in legno, ancoraggi realizzati con collari e zanche metalliche annegate in malta di calce aerea, peraltro aggressiva sotto il profilo dell'ossidazione. Non risultano agli autori analoghi provvedimenti per le travi metalliche la cui introduzione non ha quindi alcun effetto migliorativo dal punto di vista sismico. Tutte le pareti perimetrali sono esposte ai meccanismi fuori dal proprio piano ma quelle caricate dal solaio presentano maggiore stabilità a causa del maggiore carico verticale ed alla sua posizione spostata verso l'interno e quindi in opposizione alle eccentricità dovute alla forma delle pareti stesse. Tristemente conosciuta è la foto che documenta il terribile scenario di danno conseguente al terremoto di Messina del 1908 (Fig. 8). L'edilizia era costituita essenzialmente da edifici di questa classe ed è evidente il crollo sulla strada di pareti perimetrali non caricate da solai, che anzi in molti casi appaiono ancora in sede.