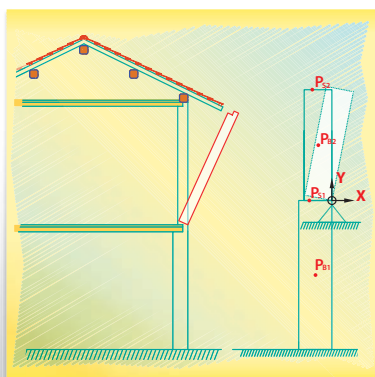


Sara Frumento – Alessandro Galasco

# ADEGUAMENTO E MIGLIORAMENTO SISMICO DEGLI EDIFICI IN MURATURA

## ANALISI SISMICA E CALCOLI STRUTTURALI

TESTO AGGIORNATO ALLE NTC 2008, ALLA CIRCOLARE ESPLICATIVA N. 617/2009  
ED ALLA REVISIONE DELLE NUOVE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI



### SOFTWARE INCLUSO

Demo del programma 3Muri® (calcolo sismico e statico delle strutture in muratura), documenti tecnici in materia di adeguamento e miglioramento sismico degli edifici ed utilità per approfondire gli argomenti esposti nel testo e per verificarne l'apprendimento



Sara Frumento – Alessandro Galasco

## ADEGUAMENTO E MIGLIORAMENTO SISMICO DEGLI EDIFICI IN MURATURA

Ed. I (2017)

ISBN 13 978-88-8207-875-1

EAN 9 788882 078751

Collana **Manuali** (202)

Frumento, Sara <1978->

Adeguamento e miglioramento sismico degli edifici in muratura /

Sara Frumento, Alessandro Galasco. – Palermo : Grafill, 2017.

(Manuali ; 202)

ISBN 978-88-8207-875-1

1. Edifici – Consolidamento – Zone sismiche.

I. Galasco, Alessandro <1975->.

624.1762 CDD-23

SBN Pa0291721

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Il volume è **disponibile anche in eBook** (formato \*.pdf) compatibile con **PC, Macintosh, Smartphone, Tablet, eReader**.

Per l'acquisto di eBook e software sono previsti pagamenti con c/c postale, bonifico bancario, carta di credito e PayPal.

Per i pagamenti con carta di credito e PayPal è consentito il download immediato del prodotto acquistato.

Per maggiori informazioni inquadra con uno Smartphone o un Tablet il Codice QR sottostante.



I lettori di Codice QR sono disponibili gratuitamente su Play Store, App Store e Market Place.

© **GRAFILL S.r.l.** Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313

Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail [grafill@grafill.it](mailto:grafill@grafill.it)

Finito di stampare nel mese di marzo 2017

presso **Officine Tipografiche Aiello & Provenzano S.r.l.** Via del Cavaliere, 93 – 90011 Bagheria (PA)

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

## SOMMARIO

➤	<b>RINGRAZIAMENTI</b> .....	p.	8
➤	<b>PREFAZIONE</b> .....	"	9
➤	<b>INTRODUZIONE</b> .....	"	13
<b>1.</b>	<b>LA RISPOSTA SISMICA DEGLI EDIFICI IN MURATURA</b> .....	"	17
1.1.	Introduzione.....	"	17
1.2.	Tipologie di muratura.....	"	18
1.2.1.	Muratura in pietra.....	"	18
1.2.2.	Muratura in mattoni.....	"	22
1.2.3.	Muratura in blocchi AAC.....	"	25
1.3.	Comportamento sismico degli edifici in muratura.....	"	25
1.4.	I meccanismi di primo modo ed il contesto ambientale.....	"	27
1.4.1.	Calcolo del moltiplicatore di collasso per un blocco rigido soggetto ad un'azione di ribaltamento.....	"	30
1.4.2.	Ribaltamento di una facciata per un edificio multipiano.....	"	31
1.4.3.	Instabilità di una parete tra due vincoli consecutivi.....	"	33
1.5.	Dall'osservazione del danno reale alla modellazione.....	"	41
1.5.1.	Modellazione a telaio equivalente.....	"	43
1.5.2.	Modellazione a mensole.....	"	44
1.5.3.	Modellazione Elementi Finiti (FEM).....	"	45
1.6.	Meccanismi di risposta dei pannelli murari (azioni nel piano).....	"	46
1.6.1.	Pressoflessione-ribaltamento (rocking).....	"	46
1.6.2.	Taglio-scorrimento.....	"	47
1.6.3.	Taglio-fessurazione diagonale.....	"	48
1.6.3.1.	Criterio di Turnsek Cacovik.....	"	48
1.6.3.2.	Criterio di Mann e Muller.....	"	50
<b>2.</b>	<b>NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI (NTC08) E POSSIBILI FUTURI AGGIORNAMENTI</b> .....	"	56
2.1.	Introduzione.....	"	56
2.2.	Peculiarità della progettazione antisismica.....	"	56
2.3.	Quadro normativo italiano.....	"	58
2.4.	Le Norme Tecniche 2008 e la Circolare n. 617/2009.....	"	61

2.4.1.	Vita nominale ( $V_N$ ), classe d'uso ( $C_U$ ) e periodo di riferimento per l'azione sismica ( $V_R$ ).....	p.	62
2.4.2.	Stati limite e relative probabilità di superamento .....	"	65
2.4.3.	Valutazione dell'azione sismica .....	"	66
2.4.4.	Combinazione dell'azione sismica con la altre azioni .....	"	71
2.4.5.	Progettazione di edifici (nuovi) in muratura ordinaria.....	"	72
2.4.5.1.	Requisiti statici.....	"	74
2.4.5.2.	Requisiti sismici.....	"	79
2.4.5.3.	Novità previste dalle nuove norme .....	"	85
2.4.6.	Definizione delle proprietà meccaniche della muratura.....	"	89
2.4.6.1.	Valutazione della resistenza a compressione.....	"	91
2.4.6.2.	Valutazione della resistenza a taglio .....	"	96
2.4.6.3.	Esempio calcolo analitico delle resistenze caratteristiche della muratura portante .....	"	97
2.4.6.4.	Moduli elastici.....	"	98
2.4.7.	Verifiche di sicurezza .....	"	98
2.4.7.1.	Verifiche di sicurezza in assenza di azione sismica (Capitolo di NTC08) .....	"	104
2.4.7.2.	Verifiche di sicurezza in presenza di azione sismica.....	"	115
2.4.8.	Modellazione strutturale .....	"	121
2.4.9.	Metodi di analisi strutturale alle azioni sismiche.....	"	123
2.4.9.1.	Analisi lineare premesse del metodo.....	"	124
2.4.9.2.	Analisi statica lineare .....	"	126
2.4.9.3.	Analisi dinamica lineare.....	"	129
2.4.9.4.	Analisi dinamica non lineare.....	"	130
2.4.9.5.	Analisi statica non lineare .....	"	131
2.4.10.	Edifici semplici .....	"	133
2.4.11.	Verifica edifici esistenti .....	"	137
2.4.11.1.	Approccio conoscitivo .....	"	137
2.4.11.2.	Verifiche di sicurezza .....	"	141
2.4.11.3.	Verifica dei meccanismi locali .....	"	142
2.4.11.4.	Verifica sismica globale.....	"	142
2.4.11.5.	Adeguamento sismico .....	"	144
2.4.11.6.	Miglioramento sismico.....	"	144
2.4.11.7.	Intervento locale.....	"	145
2.4.11.8.	Edificio semplice esistente .....	"	145
2.4.12.	Interventi di consolidamento di edifici in muratura .....	"	146
<b>3.</b>	<b>ESEMPI DI CALCOLO LINEARE.....</b>	"	148
3.1.	Introduzione.....	"	148
3.2.	Edificio semplice: esempio di calcolo lineare di un caso studio.....	"	148
3.2.1.	Verifica requisiti di semplicità ai carichi verticali.....	"	151
3.2.1.2.	Verifica della pressione media verticale.....	"	154
3.2.2.	Verifica requisiti di semplicità sismica.....	"	155

3.2.3.	Esempio in zona con blocchi semipieni in laterizio.....	p.	158
3.2.4.	Esempio in zona con blocchi rettificati (tipo tasca) e giunti sottili.....	"	159
3.2.5.	Esempio in zona con blocchi rettificati in AAC.....	"	161
3.3.	Esempio di calcolo lineare statico e sismico .....	"	163
3.3.1.	Descrizione del fabbricato in progetto e tecnologia costruttiva .....	"	164
3.3.2.	Analisi dei carichi .....	"	167
3.3.2.1.	Carichi gravitazionali .....	"	167
3.3.2.2.	Azione del vento .....	"	168
3.3.2.3.	Azione sismica .....	"	173
3.3.2.4.	Neve .....	"	176
3.3.3.	Combinazioni di carico .....	"	176
3.3.4.	Strategia di modellazione ed impostazione delle verifiche .....	"	178
3.3.5.	Controllo delle prescrizioni specifiche per le zone sismiche – Requisiti geometrici.....	"	186
3.3.6.	Calcolo delle masse.....	"	187
3.3.8.	Verifiche pressoflessione e taglio nel piano della parete.....	"	190
3.3.9.	Verifiche pressoflessione ed instabilità per azioni fuori piano .....	"	198
3.3.10.	Verifiche alle azioni sismiche.....	"	206
3.4.	Conclusioni .....	"	216
4.	<b>ANALISI CINEMATICA</b> .....	"	217
4.1.	Introduzione.....	"	217
4.2.	L'analisi dei meccanismi locali di collasso negli edifici esistenti in muratura.....	"	217
4.2.1.	Analisi cinematica lineare.....	"	219
4.2.2.	Analisi cinematica non lineare.....	"	221
4.2.3.	Verifiche di sicurezza e valutazione del livello di sicurezza.....	"	223
4.2.4.	Filtrazione dell'azione sismica.....	"	223
4.2.5.	Verifica allo stato limite di danno (SLD) .....	"	225
4.2.6.	Verifica allo stato limite ultimo secondo NTC08 (SLV).....	"	225
4.2.7.	Valutazione di $\tilde{\alpha}_u$ .....	"	227
4.3.	Esempi applicativi: presentazione dei casi studio.....	"	229
4.3.1.	Esempio 1: meccanismo locale di ribaltamento di un singolo blocco scarico.....	"	233
4.3.2.	Esempio 2: meccanismo di ribaltamento di un singolo blocco caricato .....	"	237
4.3.3.	Esempio 3: meccanismo di ribaltamento di un edificio a più livelli .....	"	241
4.3.3.1.	Ribaltamento di una parete muraria multipiano rispetto al piano di campagna ( $z = 0$ ) .....	"	243
4.3.3.2.	Ribaltamento di una parete muraria multipiano in quota ( $z \neq 0$ ) .....	"	247

4.3.4.	Esempio 4: meccanismo di ribaltamento ed inserimento di tiranti .....	p.	250
4.3.5.	Esempio 5: flessione intermedia di una parete muraria (senza il carico dei livelli superiori).....	"	255
4.3.6.	Esempio 6: flessione intermedia di una parete muraria (con il carico dei livelli superiori).....	"	258
4.3.7.	Esempio 7: flessione intermedia di una parete muraria (calcolo per iterazione).....	"	260
4.3.8.	Esempio 8: calcolo mediante cinematica non lineare .....	"	265
4.3.9.	Esempio 9: calcolo con livello di conoscenza 2 .....	"	270
4.3.10.	Considerazioni conclusive .....	"	274
<b>5.</b>	<b>ANALISI STATICA NON LINEARE .....</b>	"	275
5.1.	Introduzione .....	"	275
5.2.	Analisi statica non lineare.....	"	275
5.3.	Rappresentazione della struttura.....	"	284
5.4.	Caratteristiche meccaniche dei pannelli murari.....	"	286
5.5.	Capacità deformativa dei pannelli murari.....	"	290
5.6.	Curva di capacità, curva della domanda e definizione del performance point.....	"	292
5.7.	Distribuzione di forze .....	"	296
5.8.	Scelta del nodo di controllo .....	"	298
5.9.	Definizione degli stati limite sulla curva di capacità .....	"	305
5.10.	Valutazione diretta del coefficiente di struttura $q$ della curva di capacità.....	"	307
5.11.	Esempi di calcolo del dominio resistente di un maschio murario .....	"	309
5.11.1.	Esempio 1: Pannello murario esistente .....	"	310
5.11.2.	Esempio 2: Pannello murario di nuova progettazione .....	"	317
<b>6.</b>	<b>CALCOLO DELLA VULNERABILITÀ SISMICA</b>		
	<b>– RISPOSTA GLOBALE .....</b>	"	327
6.1.	Introduzione .....	"	327
6.2.	Descrizione del caso studio ed interventi applicati.....	"	327
6.3.	Parametri di calcolo .....	"	331
6.4.	Implementazione del modello numerico.....	"	332
6.5.	La verifica sismica secondo le NTC08 .....	"	337
6.5.1.	Curva di capacità derivante da un'analisi pushover.....	"	337
6.5.2.	La domanda sismica.....	"	344
6.5.3.	Quantificazione del livello di sicurezza .....	"	348
6.5.4.	La verifica a stato limite di danno .....	"	352
6.5.5.	Verifica secondo NTC08 .....	"	358
6.6.	Confronto tra lo stato di fatto e quello di progetto .....	"	364
6.7.	Strategie di consolidamento.....	"	374
6.7.1.	Inserimento cordolo sommitale.....	"	374

6.7.2.	Consolidamento delle muratura .....	p.	379
6.7.3.	Aumento del livello di conoscenza .....	"	383
6.8.	Conclusioni .....	"	388
<b>7.</b>	<b>ESEMPI PROGETTUALI E TIPOLOGIE DI INTERVENTI</b> .....	"	391
7.1.	Introduzione .....	"	391
7.2.	Impostazioni generali del progetto antisismico .....	"	392
7.2.1.	Riconoscimento qualitativo della tecnologia costruttiva prevalente .....	"	392
7.2.2.	Individuazione della classe d'uso ( $C_U$ ) .....	"	392
7.2.3.	Inquadramento tipologia di intervento .....	"	393
7.2.4.	Acquisizione delle informazioni preliminari .....	"	393
7.2.5.	Redazione di un modello numerico fedele all'edificio reale .....	"	395
7.2.6.	Analisi strutturale dell'edificio esistente (stato di fatto) .....	"	395
7.2.7.	Analisi strutturale dell'edificio esistente su cui sono stati applicati gli interventi (stato di progetto) .....	"	395
7.2.8.	Conclusioni e sintesi circa la strategia di intervento da eseguire .....	"	395
7.3.	Esempio di calcolo di miglioramento sismico .....	"	396
7.3.1.	Miglioramento: il recupero del sottotetto .....	"	396
7.3.2.	Analisi stato di fatto .....	"	405
7.3.3.	Analisi stato di progetto .....	"	415
7.3.4.	Compatibilità ai carichi verticali (statica) .....	"	424
7.4.	Esempio di edificio in schiera con parziale demolizione (adeguamento sismico) .....	"	426
7.4.1.	Il giunto sismico .....	"	447
7.5.	Esempio di intervento locale (cerchiatura di aperture) .....	"	450
7.6.	Esempio di compilazione di scheda della protezione civile e calcolo dei moltiplicatori di collasso .....	"	473
7.6.1.	Excursus normativo .....	"	473
7.6.2.	Esempio di compilazione scheda della Protezione Civile .....	"	478
7.6.3.	Calcolo degli indici di vulnerabilità .....	"	483
	<b>INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE INCLUSO</b> .....	"	500
-	Note sul software incluso .....	"	500
-	Requisiti hardware e software .....	"	500
-	Download del software e richiesta della password di attivazione .....	"	500
-	Installazione ed attivazione del software .....	"	501

## PREFAZIONE

Il volume è un'interessante riedizione, sotto una veste aggiornata, di *“Analisi sismica della strutture murarie”*: dal 2011, data di pubblicazione della precedente edizione, si sono succeduti eventi sismici, revisioni normative e problemi legati, ad esempio, all'interpretazione ed applicazione delle attuali norme tecniche delle costruzioni.

Recenti le sequenze sismiche del 24 agosto 2016, del 26 e 30 ottobre 2016 che hanno interessato l'Italia centrale, in particolare le Regioni Abruzzo, Molise, Lazio e Umbria. Territori ad alta e media sismicità, già oggetto di eventi sismici importanti (Umbria Marche 1997, L'Aquila 2009), caratterizzati da un consistente patrimonio esistente in muratura.

Al contempo sono in corso di revisione le Norme Tecniche delle Costruzioni, D.M. 14 gennaio 2008 (NTC08), e la Circolare esplicativa n. 617/2009. L'attuale bozza in discussione per le NTC08 si sta orientando verso la maggiore considerazione del carattere prestazionale della costruzione di nuova progettazione o esistente, prevedendo, nel caso della tecnologia costruttiva “muratura”, nuove soluzioni strutturali da tempo già applicate in Europa (è, ad esempio, il caso della muratura confinata o dei blocchi abbinati al giunto a tasca).

Questa nuova edizione costituisce quindi un ausilio efficace ed un riferimento chiaro per il professionista che intende affrontare il tema dell'analisi degli edifici in muratura, in particolare quelli esistenti.

È noto come la costruzione in muratura sia caratterizzata da un comportamento sismico complesso dovuto ad una serie di fattori: la geometria degli elementi strutturali (spesso irregolare e frutto di trasformazioni nel tempo), la tecnica esecutiva della muratura (difficile da rappresentare con modelli meccanici perché materiale composito debolmente resistente a trazione). La risposta sismica è quindi fortemente non lineare e i metodi di analisi devono inevitabilmente fare i conti con questa realtà.

Il problema è complesso ed utilizzare strumenti troppo semplificati e non capaci di descrivere adeguatamente i fenomeni non è possibile per diverse ragioni:

- a) la verifica diventa puramente convenzionale;
- b) si perde il controllo fisico del risultato e il professionista non è in grado di giudicare il risultato;
- c) nel caso di edifici esistenti, gli interventi rischiano di risultare troppo invasivi e, in molti casi, inefficaci o addirittura tali da peggiorare il comportamento.

Nella normativa italiana l'analisi della risposta sismica delle costruzioni in muratura esistenti viene eseguita con un metodo di analisi non lineare a collasso fin dal lontano 1981, quando venne introdotto l'uso del cosiddetto metodo POR. Esso è certamente più semplice rispetto a quanto richiesto dalle NTC08, in quanto non si richiede la modellazione dell'intera costruzione ma solo quella di ogni singolo piano. Tuttavia anche il POR, di fatto, costringeva a ricorrere a codici di calcolo numerico. Le drastiche ipotesi di base (infinita rigidezza dei solai



e degli architravi) hanno, per contro, imposto una strategia di consolidamento sismico che si è rivelata nella stragrande maggioranza dei casi negativa; molti dei danni osservati a seguito del terremoto che ha colpito l'Umbria e le Marche nel 1997 sono riconducibili al rifacimento degli originali solai in legno con rigide e pesanti solette in c.a. e all'inserimento di cordoli in breccia nella muratura. Purtroppo a distanza di quasi vent'anni, si è riscontrata ancora questa tipologia di danni. Ad Amatrice e negli altri centri storici colpiti dalla crisi sismica del 2016 si sono osservati danni catastrofici in edifici di muratura in pietra irregolare con pesanti tetti latero-cementizi.

L'approccio a telaio equivalente, adottato dalle NTC08, consente di modellare l'edificio in muratura nelle sue condizioni originarie, tenendo conto della flessibilità dei solai, della deformabilità e limitata resistenza delle fasce di piano, della redistribuzione delle azioni di compressione sui singoli maschi murari (al crescere dell'azione sismica). Una migliore comprensione del reale comportamento è condizione imprescindibile per un progetto di intervento efficace e tale da privilegiare al massimo la conservazione.

Per quanto riguarda la sicurezza strutturale richiesta nel consolidamento sismico del costruito esistente, le NTC prevedono tre tipologie di intervento:

- 1) l'adeguamento;
- 2) il miglioramento;
- 3) la riparazione o intervento locale.

Questa classificazione consente di rimuovere alcuni vincoli concettuali e fraintendimenti che erano insiti nella precedente alternativa tra le sole due tipologie dell'adeguamento e del miglioramento. Nonostante la definizione di questi interventi sia presente nella norma tecnica di riferimento, a livello operativo spesso si pongono problemi interpretativi per i quali è necessario un confronto con l'ufficio territoriale competente.

La dicotomia tra adeguamento e miglioramento sismico ha origine proprio dall'obbligo o meno di effettuare una verifica di sicurezza: con il D.M. '96, l'unico strumento di calcolo per le costruzioni in muratura era il POR, che imponeva l'esecuzione di interventi non conservativi e di dubbia efficacia, i progettisti hanno spesso cercato di aggirare i vincoli dell'adeguamento, scegliendo la strada del miglioramento. Ciò ha in molti casi portato ad interventi corretti e condivisibili, ma ritengo molto discutibile accettare di non conoscere la sicurezza della costruzione sulla quale si è intervenuti, avendo verificato, a volte solo qualitativamente, che l'intervento ha semplicemente migliorato la situazione preesistente.

Il vecchio miglioramento sismico prevedeva infatti *«l'esecuzione di una o più opere riguardanti i singoli elementi strutturali dell'edificio, con lo scopo di conseguire un maggiore grado di sicurezza senza peraltro modificarne in maniera sostanziale il comportamento globale»*. Questa impostazione era debole, non solo perché si accettavano interventi senza sapere il grado di sicurezza che questi erano in grado di assicurare, ma anche perché portava a considerare che un intervento fosse efficace solo se non si modificava il comportamento originale; invece ci sono molti casi nei quali esistono carenze evidenti nel sistema strutturale, magari prodotte dalla successive trasformazioni, e non si capisce per quale ragione non dovrebbe essere possibile intervenire migliorando il comportamento, pur senza dover necessariamente arrivare all'adeguamento.

Nelle NTC 2008 il miglioramento lo consente, ovvero l'unica differenza rispetto all'adeguamento è che non viene a priori fissato un livello di sicurezza da raggiungere.

Quello che prima veniva eseguito all'interno del miglioramento sismico continua invece ad essere possibile nella terza classe di interventi: la riparazione o intervento locale. Appartengono a questa tipologia i piccoli interventi (inserimento di catene, ma anche apertura di varchi nelle pareti portanti), che possono in questo modo essere eseguiti senza l'obbligo di dover eseguire un calcolo della sicurezza sismica dell'intera costruzione.

Il miglioramento sismico rappresenta quindi, per gli edifici esistenti in muratura, un'opportunità in più. È però necessario disporre di affidabili strumenti di calcolo per le costruzioni in muratura, anche complesse, che consentano di comprendere il funzionamento originario e stimare l'efficacia di interventi di consolidamento sismico.

Sul tema della modellazione non lineare delle costruzioni in muratura, la ricerca in Italia è da molti anni all'avanguardia a livello internazionale, proprio perché nel nostro Paese l'attenzione verso le problematiche della conservazione del costruito è più sentita che altrove. Tra i molti modelli proposti, in questo libro viene utilizzato il codice di calcolo Tremuri, sviluppato originariamente presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale, Università di Genova, e successivamente continuamente aggiornato da Andrea Penna, Alessandro Galasco, Serena Cattari e dal sottoscritto. Questo programma consente di analizzare edifici tridimensionali complessi, secondo lo schema a telaio equivalente, considerando i solai flessibili e attraverso analisi statiche non lineari (pushover) o dinamiche non lineari (con accelerogramma alla base). Tale codice è stato implementato anche nel software commerciale 3Muri<sup>®</sup>, che consente al professionista di modellare anche edifici complessi in muratura con relativa facilità, di controllare il modello ed i risultati in modo efficace (al fine di una loro validazione, come richiesto nel Capitolo 10 delle NTC 2008), di comprendere a fondo il funzionamento strutturale e decidere conseguentemente la migliore strategia di intervento.

Nel testo viene descritto l'intero percorso da seguire per la verifica sismica di un edificio esistente secondo quanto prescritto dalle NTC 2008, a partire dalla definizione dei parametri meccanici dei materiali, basati sul livello di conoscenza acquisito.

La comprensione del meccanismo di collasso sismico è molto utile per la scelta del più opportuno intervento di consolidamento; grazie ad una modellazione accurata è possibile mirare l'intervento solo agli elementi, o alle parti della struttura, maggiormente vulnerabili.

Il confronto tra i risultati ottenuti dall'analisi statica lineare e da quella non lineare evidenzia una certa concordanza tra i risultati dai due metodi, ma l'analisi statica non lineare resta lo strumento consigliato per gli edifici esistenti in muratura. Il modello di calcolo proposto nel libro è in grado di eseguire anche analisi dinamiche non lineari; questa possibilità presenta certamente maggiori insidie dal punto di vista teorico e numerico, ma essendo più accurata consente di verificare la sicurezza anche in casi in cui l'edificio non risulta verificato con gli altri metodi di analisi.

Il programma Tremuri, utilizzato nel presente volume per la redazione dei casi studio proposti, prevede anche la possibilità di modellare le costruzioni miste muratura c.a., in quanto sono implementati non solo i maschi e le fasce in muratura ma anche altri elementi non lineari, in grado di simulare travi, pilastri e setti in c.a.; questa tipologia è molto diffusa in Italia, in quanto interessa sia le costruzioni realizzate in un certo periodo storico (prima metà del XX secolo) sia molti edifici trasformati con sopraelevazioni o ampliamenti in pianta. Fino ad ora tale problematica è stata poco investigata sul piano della ricerca, ma le NTC 2008 indicano che per la loro verifica è opportuno fare riferimento all'analisi statica non lineare con modelli a telaio equivalente.

In conclusione, ritengo che questo volume possa aiutare a comprendere i diversi aspetti della verifica sismica degli edifici in muratura, mettendo in evidenza tanto gli aspetti teorici di base quanto le implicazioni numeriche, al fine di una consapevole applicazione delle indicazioni contenute nelle Norme Tecniche.

Prof. Sergio Lagomarsino  
*Ordinario di Tecnica delle Costruzioni*  
*DICAT – Università di Genova*

## INTRODUZIONE

Lo scorso 24 agosto 2016, e poi successivamente, il 26 ed il 30 ottobre l'Italia centrale è stata nuovamente sede di eventi sismici (magnitudo 6.0) di notevoli proporzioni e gravità che hanno ulteriormente spronato il legislatore ad accelerare la revisione normativa inerente le Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008) e la complementare Circolare Ministeriale 2 febbraio 2009, n. 617. La revisione della norma tecnica accentua ulteriormente il carattere prestazionale della calcolo della sicurezza degli edifici, siano essi di nuova costruzione o esistenti. Nel caso della tecnologia costruttiva “*muratura*” la revisione recepisce le nuove soluzioni strutturali già da tempo applicate in Europa, adeguandole al costruito italiano ed alla sua zonazione sismica.

Per la sua situazione geodinamica il territorio italiano è frequentemente soggetto a terremoti e la sismologia storica conferma che gli eventi sismici si ripetono nei secoli e nelle stesse regioni. Pur non potendo prevedere con precisione temporale il verificarsi di un terremoto è consolidata una valutazione della sicurezza nei confronti dell'azione sismica legata alla probabilità di occorrenza di un dato evento. Tutto questo ha portato ad una progettazione più consapevole ma più complessa rispetto a quanto accadeva in passato, richiedendo ai professionisti una maggior preparazione.

Gli Autori, svolgendo attività sia di ricerca scientifica sia sul campo, hanno maturato un'esperienza specialistica sugli edifici in muratura, argomento di quest'opera.

Nell'ambito dei gruppi di ricerca con cui hanno collaborato (sia a Genova con il Prof. Sergio Lagomarsino, sia a Pavia con il Prof. Guido Magenes), è stata approfondita, a volte in modo critico, la metodologia di analisi proposta in normativa. Inoltre, in ambito professionale, si sono misurati con l'applicazione pratica dei metodi di calcolo previsti e con l'attività di rilievo del danno post sisma.

La muratura, come sarà esaurientemente descritto nell'opera, è un materiale composito caratterizzato dal comportamento fortemente non lineare (tanto da richiedere, già con le normative passate, una metodologia di calcolo ad hoc quale il metodo POR) e pertanto la risposta strutturale di un edificio diviene il risultato di molti fattori difficilmente controllabili mediante un calcolo manuale.

La scelta di un buon programma di analisi strutturale fra le molte proposte commerciali non è semplice. Soprattutto è spesso difficile capire (e gestire) le ipotesi ed i metodi di calcolo adottati dal software.

Uno degli autori, Ing. Alessandro Galasco, ha partecipato allo sviluppo del software 3Muri<sup>©</sup>; tale esperienza permette sia di sfruttarne al meglio le potenzialità per esporre i principi di calcolo previsti dalla norma sia di modellare particolari situazioni progettuali (quali, ad esempio, edifici in aggregato, miglioramenti sismici).

Quest'opera non è peraltro un manuale di 3Muri<sup>©</sup> ma i concetti esposti possono essere validi anche per colleghi che utilizzano altri programmi commerciali basati sul modello di calcolo a telaio equivalente non lineare (come indicato nella normativa).

Nel **Capitolo 1**, dopo un breve excursus inerente le tipologie murarie più frequenti sul territorio nazionale, sono presentati i fondamenti teorici relativi ai diversi meccanismi di danno che interessano le murature, distinguendo tra quelli di primo (fuori piano) e di secondo modo (nel piano della parete).

Nel **Capitolo 2** sono descritte, invece, le norme tecniche (NTC08) abbinata alla Circolare esplicativa n. 617/2009, con particolare riferimento alle strutture in muratura.

Tali norme seguono l'iter progettuale a partire dalla definizione dei carichi e delle azioni di progetto, proseguendo con il calcolo vero e proprio, distinto per le diverse tecnologie costruttive (cemento armato, acciaio, strutture miste, legno e muratura) fino al collaudo. Nell'impianto normativo non si affronta solo il calcolo di edifici di nuova costruzione ma anche la valutazione della sicurezza delle costruzioni esistenti. Quest'ultimo aspetto è particolarmente delicato poiché un fabbricato già in essere possiede una propria storia deformativa, fatta di interventi di consolidamento operati per svariati motivi, strutturali e non. Una particolare attenzione alla modalità di intervento su edifici esistenti sarà maggiormente approfondita nei casi studio presentati nell'ultimo capitolo.

In virtù della revisione in corso delle norme tecniche, gli Autori effettuano una disamina sui nuovi contenuti introdotti sia per le costruzioni nuove, per cui sono previste nuove tecnologie costruttive (ad esempio la muratura confinata) sia per quelle esistenti.

Il **Capitolo 3** è dedicato al calcolo lineare, strumento che può essere impiegato ed applicato a tutte le tecnologie costruttive (acciaio, calcestruzzo, legno e muratura) ed in ambito geotecnico, adottando opportune semplificazioni. La dicitura «calcolo lineare» sottintende l'applicazione di un procedimento che prevede proporzionalità fra azioni e sollecitazioni corrispondenti e per cui è consentita una sovrapposizione degli effetti, espressa mediante una risoluzione che coinvolge la struttura nel suo complesso (comportamento costruttivo riconducibile ad un semplice telaio) o i suoi elementi costituenti. Nel capitolo in questione saranno presentati due esempi riconducibili uno, ad un edificio semplice (sia staticamente sia sismicamente) ed una costruzione non riconducibile ad una configurazione sismicamente semplice.

Nel **Capitolo 4** si presenta l'analisi cinematica lineare (e non lineare) che permette di individuare i potenziali meccanismi di danno di primo modo che possono verificarsi a seguito di carenze strutturali intrinseche all'edificio. Sono proposti diversi esempi in cui è svolto il calcolo del moltiplicatore critico dei carichi ( $\alpha$ ) e la successiva verifica di sicurezza. È di fondamentale importanza, per il tecnico, individuare i potenziali meccanismi che potrebbero compromettere la risposta globale dell'edificio, anticipando il collasso di una parte di esso; la norma, infatti, propone la metodologia ma lascia al progettista il riconoscimento delle probabili labilità del sistema. Da questo deriva l'importanza di saper leggere ed interpretare la tecnologia muraria.

Individuate le carenze strutturali è possibile ipotizzare una serie di interventi strutturali volti a migliorare il comportamento di insieme della costruzione scongiurando tali meccanismi. Questo rappresenta il primo passo verso una buona progettazione; il successivo corrisponde nel calcolare la risposta strutturale di insieme ad un evento sismico.

Lo strumento più efficace, a tal scopo, è l'analisi statica non lineare, descritta in dettaglio nel **Capitolo 5**, da condursi su un modello numerico che simuli il comportamento meccanico della costruzione, cogliendo appieno il comportamento anelastico della muratura. Il principio su cui si basa il software di appoggio è quello di ricondurre la struttura muraria ad un telaio equivalente tridimensionale, composto essenzialmente da tre elementi fondamentali: i pannelli murari

verticali (maschi), le fasce e gli elementi di collegamento tra i primi due detti nodi rigidi che, nella pratica, corrispondono alle aree di muratura dove difficilmente si attuano meccanismi di danno. In linea con la vigente normativa, questo software consente di restituire la risposta strutturale in termini di spostamento e taglio alla base (curva di capacità) e di effettuare le verifiche di sicurezza per gli stati limite prestazionali previsti.

Il **Capitolo 6** prende in esame, passo passo, lo studio della risposta sismica di un edificio esempio. Dopo aver presentato il calcolo, commentando tutti i singoli passaggi, si esaminano diverse modalità di consolidamento (alcune descritte all'interno della stessa Circolare), atte a raggiungere la soglia di sicurezza richiesta e a scongiurare meccanismi fragili che inibiscono lo sviluppo della risposta globale della struttura.

Nel **Capitolo 7** si presentano diverse esperienze progettuali di calcolo di vulnerabilità sismica a completamento di quanto già mostrato in precedenza: si approfondiscono alcune situazioni di intervento frequenti nella pratica, ovvero casi di miglioramento, adeguamento sismico ed intervento locale, cercando di fornire un criterio per la loro distinzione.

Altro caso frequente ed affrontato nel presente libro corrisponde all'edificio in aggregato; questa tipologia edilizia è ricorrente soprattutto nei centri storici, dove la struttura muraria è il risultato di un accrescimento e di demolizioni parziali avvenuti nel tempo. Pertanto non è semplice individuare un'unità strutturale (US, come definito nelle NTC08) su cui condurre le analisi tenendo però conto delle interazioni che si instaurano con i volumi circostanti.

Infine è proposto, a conclusione del Capitolo 7, l'esempio di compilazione della Scheda di II Livello della Protezione Civile inerente a un edificio sensibile/strategico e il calcolo di vulnerabilità richiesto per la compilazione delle schede predisposte dalla protezione civile (Scheda – DPCLiv1-2 DM 2008).

## LA RISPOSTA SISMICA DEGLI EDIFICI IN MURATURA

### 1.1. Introduzione

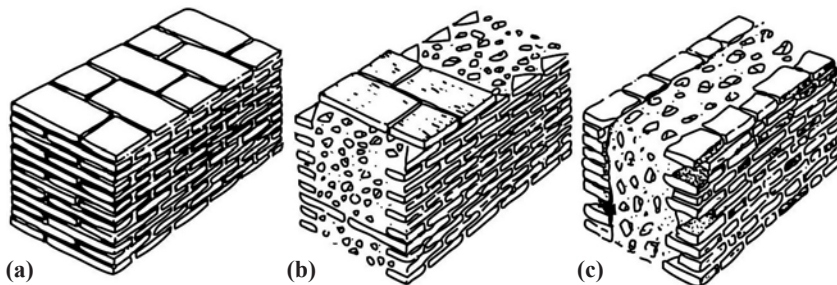
Le strutture in muratura rappresentano probabilmente una delle più antiche forme di costruzione: a partire dal neolitico, con l'avvento dell'agricoltura, nasce l'esigenza di vivere stabilmente in uno stesso luogo; vengono così edificati i primi nuclei abitativi costituiti per lo più da case in pietra. La prima soluzione adottata prevedeva l'impiego di pietre naturali a cui poi, in epoche successive, si affiancarono o si sostituirono i mattoni crudi o cotti.

Le costruzioni murarie costituiscono così un elemento cardine nella storia dell'architettura.

Le tipologie costruttive sviluppate nei secoli furono diverse, ma tutte possedevano un comune denominatore: la presenza di paramenti verticali capaci di proteggere dalle azioni esterne e di sopportare elevate entità di carico.

Una prima distinzione tipologica può essere operata tra una muratura a secco e ed una con giunti riempiti di malta. In entrambi i casi è prevista una vasta gamma di soluzioni relative alla tessitura muraria adottata (Fig. 1.1).

Una buona tessitura può conferire una certa stabilità all'elemento verticale anche nel caso di murature disordinate, ovvero costituite da elementi di varia pezzatura e disposti senza un particolare un criterio costruttivo; in questo caso talvolta si cerca di regolarizzare il paramento inserendo o delle zeppe in pietra o delle listature in mattoni disposte ad intervalli più o meno costanti.



**Figura 1.1.** (a) muratura regolare; (b) muratura a secco con elementi trasversali di collegamento; (c) muratura a secco (Drysdale et al., 1999)

Alle strutture verticali in muratura sono storicamente abbinate o solai lignei o superfici voltate (in pietra o in mattoni). Gli edifici murari così concepiti sono idonei a sopportare i carichi verticali e flessionali, nonostante la limitata resistenza a trazione tipica della tecnologia costruttiva.

Un evento sismico induce, invece, anche azioni orizzontali rispetto a cui le pareti murarie possono non risultare efficienti. Il loro comportamento in questo caso è tutt'altro che banale; intervengono, infatti, numerosi fattori che influiscono direttamente sulla risposta strutturale quali,

ad esempio, la tipologia di solaio (rigida o flessibile), la compagine muraria e l'ammorsamento tra gli elementi verticali ed orizzontali.

Il sistema resistente più corretto cui si dovrebbe mirare, per limitare eventuali danni strutturali, ma soprattutto salvaguardare le vite umane, è il cosiddetto comportamento scatolare in cui le pareti risultano efficacemente collegate agli orizzontamenti, in modo che questi ultimi possano ripartire adeguatamente le azioni indotte dal sisma.

Gli accorgimenti strutturali, atti a garantire ciò, devono essere presenti ovviamente sugli edifici di nuova progettazione, ma possono anche essere inseriti in quelli esistenti. Valutare la vulnerabilità sismica per questi ultimi è, a volte, molto oneroso poiché, nella maggior parte dei casi, l'edificio in questione non conserva nel tempo le dimensioni e le tecnologie originarie, subendo ampliamenti planimetrici, demolizioni, sopraelevazioni e unioni ad altri volumi di diversa fattura e natura strutturale, con l'aggravante che raramente sono documentati i vari passaggi.

## **1.2. Tipologie di muratura**

Sebbene le tipologie costruttive possano essere molto differenti (a seconda, ad esempio, del sito di costruzione) il principio su cui si basano è sempre il medesimo, ovvero resistere a carichi anche elevati di compressione agenti nel piano della parete.

L'impiego del mattone o della pietra ha origini antiche: il mattone ad esempio è già presente in alcuni manufatti romani, mentre la pietra (anche abbinata ad altri materiali) era utilizzata sia nelle costruzioni rurali più modeste sia, opportunamente lavorata, nei grandi edifici monumentali (ad esempio archi di trionfo ed anfiteatri).

Il mattone meglio si presta ad una tessitura regolare, mentre la pietra a seconda sia della sua lavorazione sia delle capacità delle maestranze di metterla in opera, può avere una tessitura più o meno di ordinata.

La lettura del paramento murario è poi tutt'altro che semplice: infatti non sempre si ha omogeneità nella tessitura pertanto è errato soffermarsi alla sola indagine conoscitiva dei prospetti esterni, ma occorre investigare lo spessore murario al fine di riscontrare, ad esempio, l'eventuale presenza di un nucleo vuoto fra i paramenti esterni o uno strato di materiale incoerente o di scarsa qualità meccanica posto tra essi che non consente il collegamento trasversale (Fig. 1c).

### **1.2.1. Muratura in pietra**

Gli elementi costituenti la muratura sono essenzialmente due: le singole unità (pietra, blocco o mattone) ed il legante (assente nel caso di murature a secco).

Solitamente i muri in pietra (a secco o con malta) sono caratterizzati da spessori elevati (che nei piani più bassi possono anche superare il metro), compresi indicativamente tra 0,50 m e 1,20 m.

Il peso della muratura dipende, oltre che dalla presenza del legante, dalla natura del concio impiegato e dalla regolarità dei blocchi: più sono regolari, meno spazio vuoto resta, quindi la muratura risulta molto più compatta; l'intervallo in cui varia il peso specifico è abbastanza ampio e corrisponde a 1.900-2.300 kg/m<sup>3</sup>.

Per quel che concerne la resistenza, invece, i valori ricorrenti sono compresi fra 1 e 3 N/mm<sup>2</sup> (resistenza media a compressione). Tale parametro è legato alla qualità degli elementi costituenti: l'uso di blocchi regolari porta ad un significativo incremento della resistenza, in media superiore a 6 N/mm<sup>2</sup>, fino ad arrivare anche a 10 N/mm<sup>2</sup>.



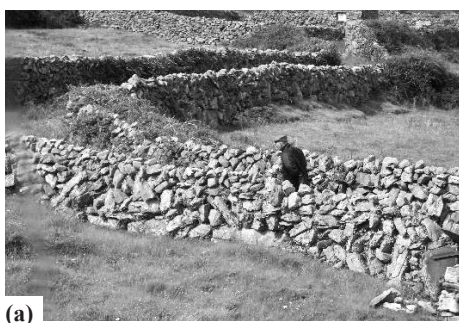
La presenza o meno di giunti orizzontali e verticali di malta permette di distinguere due macro tipologie di muratura: in pietra a secco e ordinaria in pietra.



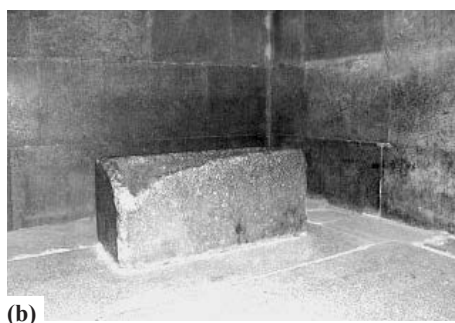
**Figura 1.2.** Esempio di muratura in pietra abbinata all'uso del mattone (Gubbio, foto di Sara Frumento)

La prima è caratterizzata dall'assenza del legante nei giunti orizzontali e verticali, pertanto è solo l'ingranamento dei conci che garantisce il comportamento monolitico della parete. Questa peculiarità è assicurata sia dalle capacità dell'esecutore sia dalla qualità del materiale.

Nelle costruzioni più semplici difficilmente si riesce a delineare un corso orizzontale, e la muratura appare disordinata; talvolta per creare una certa regolarità sono inserite zeppe di riempimento o listature in mattoni nel paramento esterno (Fig. 1.3).



(a)



(b)

**Figura 1.3.** L'estrema varietà delle soluzioni in muratura a secco: (a) isole Aran, Irlanda; (b) interno delle piramidi di Giza, Egitto

La tessitura disordinata è limitata alla costruzione di muri di sostegno e di delimitazione (ad esempio, i «terrazzamenti» liguri), meno diffuso nelle costruzioni di abitative (Figg. 1.3a e 1.4). L'uso di pietre estremamente regolari (finemente lavorate) disposte in corsi perfettamente regolari, seppur privi di malta, è invece frequente nell'architettura monumentale antica (Fig. 1.3b).

## **NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI (NTC08) E POSSIBILI FUTURI AGGIORNAMENTI**

### **2.1. Introduzione**

Il capitolo si propone, dopo una breve introduzione sull'evoluzione normativa in materia sismica e sulle strategie di modellazione, di presentare l'impianto di verifica statica e sismica previsto dalla vigente normativa per un edificio in muratura portante.

Saranno qui riportati i passi salienti delle Norme Tecniche (D.M. 14 gennaio 2008) unitamente ai contenuti della Circolare esplicativa (Circolare 2 febbraio 2009, n. 617/C.S.LL.PP.) e i potenziali futuri aggiornamenti previsti dalle norme, al momento, in fase di revisione

A soli tre anni, infatti, dall'uscita della Circolare, la Commissione Redattrice intraprende un processo di revisione delle NTC08 e, nel luglio 2012, c'è per la prima volta un'apertura e un confronto con il mondo professionale che deve applicare in prima persona i contenuti delle norme, procedendo di fatto a una prima revisione.

Nell'ottobre 2012 si assiste a un primo tentativo di approvazione che si conclude con un nulla di fatto. Il 14 novembre 2014 si ha l'approvazione da parte del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici della bozza delle nuove norme tecniche.

Il 22 ottobre 2014 la nuova bozza è stata presentata dal Presidente Reggente del Consiglio dei Lavori Pubblici, Massimo Sessa, al 50° SAIE a Bologna. Due giorni dopo c'è stata l'approvazione previa votazione nell'Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Attualmente è in corso la stesura della revisione della Circolare applicativa, è ragionevole e auspicabile immaginare l'emanazione congiunta dei due documenti.

### **2.2. Peculiarità della progettazione antisismica**

In primo luogo bisogna tenere ben presente che è differente progettare (e verificare) un edificio soggetto a un'azione sismica piuttosto che analizzarne la risposta ai soli carichi verticali. Progettare ai carichi verticali significa dimensionare una costruzione capace di sopportare una combinazione di forze statiche: l'eventuale superamento dell'effettiva resistenza ultima provocherebbe il danneggiamento e il conseguente collasso della struttura.

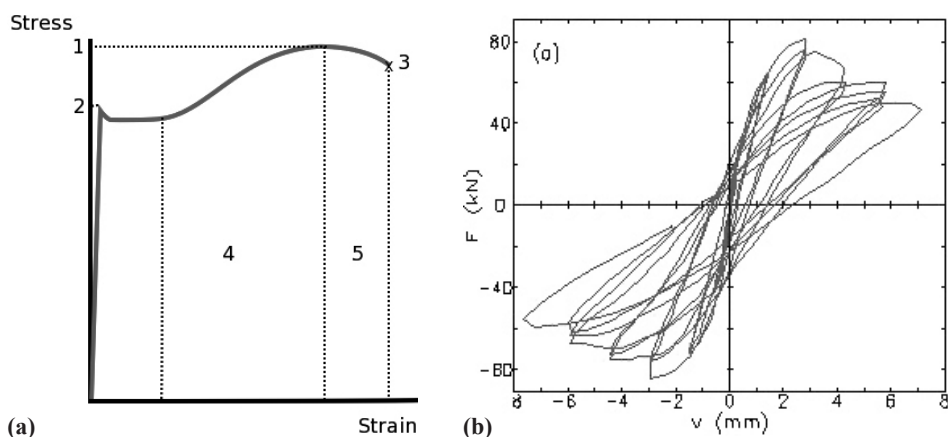
Basti pensare alle prove sui materiali comunemente previste nella pratica progettuale: ad esempio, sia la prova di trazione eseguita sulle barre di armatura sia quella di compressione condotta sui cubetti di calcestruzzo terminano con la rottura del materiale, a causa del raggiungimento della sua massima resistenza. Del resto è noto che i valori di progetto assunti nei calcoli siano inferiori rispetto a quelli di rottura (peraltro nel calcolo i valori resistenti sono ottenuti dal rapporto tra la corrispondente resistenza caratteristica e un opportuno coefficiente di sicurezza superiore all'unità).

L'azione sismica, invece, è una sollecitazione dinamica che induce uno stato deformativo nell'edificio, dovuto alla vibrazione del suolo indotta a sua volta dall'energia rilasciata dal terremoto.

Se nell'approccio elastico – lineare la forza e lo spostamento ( $F-u$ ) sono accoppiati da relazioni biunivoche (ad esempio la formulazione del calcolo della freccia in una trave elastica soggetta ad una distribuzione di carico statico può essere indifferentemente usata per determinare il carico, fissata la freccia, oppure la freccia noto il carico) in campo anelastico impone una distribuzione di forze o di spostamenti è significativamente diverso.

Se si considera il comportamento di un metallo duttile si osserva, superato il limite elastico (snervamento), come vi sia un ulteriore aumento di resistenza (incrudimento) fino al raggiungimento del massimo valore di tensione sopportabile. Oltre tale limite si ha un'ulteriore deformazione con la conseguente riduzione di tensione.

La muratura ha certamente una duttilità ben diversa dai metalli, tuttavia il raggiungimento del massimo valore di resistenza non corrisponde, in generale, alla massima deformazione sopportabile, che risulta invece maggiore. A titolo di esempio si considerino le risultanze sperimentali, espresse in termini di forza – deformazione (Fig. 2.1b), ottenute da una prova ciclica di compressione taglio condotta su un pannello in muratura in mattoni. Raggiunto il massimo valore di taglio sopportabile, il pannello è ancora in grado di sopportare incrementi di spostamento, pur rispondendo con una forza orizzontale inferiore (*softening*).



**Figura 2.1.** *diagramma tipico di una prova di trazione su metalli duttili* (tratta da Wikipedia: **1** indica la resistenza massima, **2** la forza di snervamento, **3** la rottura e **4** l'incremento di resistenza oltre snervamento-incrudimento, **5** la perdita di resistenza e rottura); **(b)** *prova ciclica di compressione-taglio su muratura in mattoni* (tratta da Anthoine et al., 1995)

La capacità di deformarsi, una volta raggiunta e superata la resistenza massima del materiale, è una caratteristica fondamentale della muratura. Questa proprietà, numericamente, può essere espressa attraverso il rapporto tra lo spostamento corrispondente alla rottura e lo spostamento relativo al raggiungimento del limite elastico. Questo parametro, detto duttilità, è fondamentale per la progettazione antisismica.

Progettare una costruzione in modo che la sua risposta permanga in fase elastica anche con gli stati deformativi indotti da un sisma raro, è una soluzione onerosa e generalmente eccessiva.

Il terremoto rilascia una grande quantità di energia e gli stati fessurativi indotti dal danneggiamento contribuiscono significativamente a dissiparne una parte. Un obiettivo ragionevole è

quello di consentire all'edificio di deformarsi coerentemente con l'input sismico, garantendo la sicurezza dei suoi occupanti.

La progettazione antisismica è, quindi, da affrontare possibilmente come calcolo agli stati limite, con particolare attenzione alla capacità deformativa.

Nel tradizionale calcolo elastico, l'azione sismica è modellata attraverso una distribuzione di forze inerziali significative dell'azione che il terreno trasferisce alla struttura: per tener conto della capacità deformativa anelastica dell'edificio, la forza di progetto è calcolata riducendo la forza che competerebbe a un sistema infinitamente elastico secondo il cosiddetto fattore di struttura  $q$ . L'azione del terremoto sarà pertanto rappresentata dall'azione combinata di forze orizzontali e verticali calcolate mediante opportuni spettri di risposta forniti dalle normative in vigore (nel calcolo potrà intervenire il citato fattore di struttura a ridurre le azioni) che dovranno combinarsi opportunamente ai carichi verticali presenti.

La verifica consisterà nell'accertarsi che tali forze generino nella struttura sollecitazioni quanto meno inferiori alla resistenza dei materiali. Questo metodo, pur consolidato da decenni di applicazioni, ha un'evidente lacuna nella non correlazione delle forze agenti con il danno. La duttilità complessiva, infatti, è assunta a priori in ragione della tipologia strutturale e della duttilità locale degli elementi e solo al termine dell'analisi si procede ad un controllo sugli spostamenti presenti, per verificare la coerenza delle ipotesi eseguite inizialmente.

Tutto ciò, però, non corrisponde ad una reale valutazione dello stato di danno.

Questa progettazione non permette, quindi, di sfruttare con consapevolezza le risorse del materiale, né di prevedere con precisione gli effetti di un dato evento sismico. Successivamente è stata proposta una metodologia progettuale mirata all'effettiva valutazione della capacità di spostamento in relazione alle prestazioni richieste alla costruzione. Partendo dalla progettazione strutturale agli stati limite è stato sviluppato un approccio prestazionale che prevede la consapevole scelta di un livello accettabile di danno determinato in base ad aspetti di tipo sociale, funzionale (destinazione d'uso, importanza per la collettività, ecc.) e al contempo statistici (pericolosità sismica).

Per edifici di importanza strategica (ospedali o luoghi di raccolta in caso di calamità), quindi, si dovrà garantire la funzionalità della costruzione anche per eventi sismici importanti a cui è attribuito un elevato periodo di ritorno mentre, per gli edifici civili, la priorità progettuale corrisponderà alla salvaguardia ed alla sopravvivenza dei suoi occupanti durante il sisma.

Per terremoti più frequenti (e quindi meno forti) poi l'intenzione è di evitare un danno eccessivo che implicherebbe spese importanti per il ripristino dell'edificio.

Il **metodo prestazionale** si basa su un uso più intuitivo e controllato delle risorse deformative anelastiche della costruzione, adottando modelli locali e globali, capaci di cogliere il comportamento non lineare del materiale: la muratura, infatti, presenta un comportamento complessivo marcatamente non lineare, associato a fenomeni difficilmente riconducibili a modelli elastici (a differenza di acciaio e calcestruzzo armato). Questo fatto ha prodotto, nel corso degli anni, lo sviluppo di molteplici metodologie di analisi non lineare (ad esempio il metodo POR).

### 2.3. Quadro normativo italiano

Il quadro normativo in materia antisismica ha subito, nell'ultimo decennio, un'accelerazione legislativa e, più recentemente, una revisione della zonazione sismica attraverso una mappatura

## ESEMPI DI CALCOLO LINEARE

### 3.1. Introduzione

Il calcolo lineare è uno strumento che può essere impiegato ed applicato a tutte le tecnologie costruttive (acciaio, calcestruzzo, legno e muratura) ed in ambito geotecnico, adottando opportune semplificazioni.

La dicitura «*calcolo lineare*» sottintende l'applicazione di un procedimento che prevede proporzionalità fra azioni e sollecitazioni corrispondenti e per cui è consentita una sovrapposizione degli effetti, espressa mediante una risoluzione che coinvolge la struttura nel suo complesso (comportamento costruttivo riconducibile ad un semplice telaio) o i suoi elementi costituenti.

Solitamente il calcolo lineare è applicato nell'ipotesi di un legame costitutivo corrispondente ad un modello elastico lineare, ovvero sussiste una proporzionalità diretta tra stato di tensione ( $\sigma$ ) e quello corrispondente di deformazione ( $\epsilon$ ), espressa attraverso un parametro di elasticità (modulo di Young,  $E$ ).

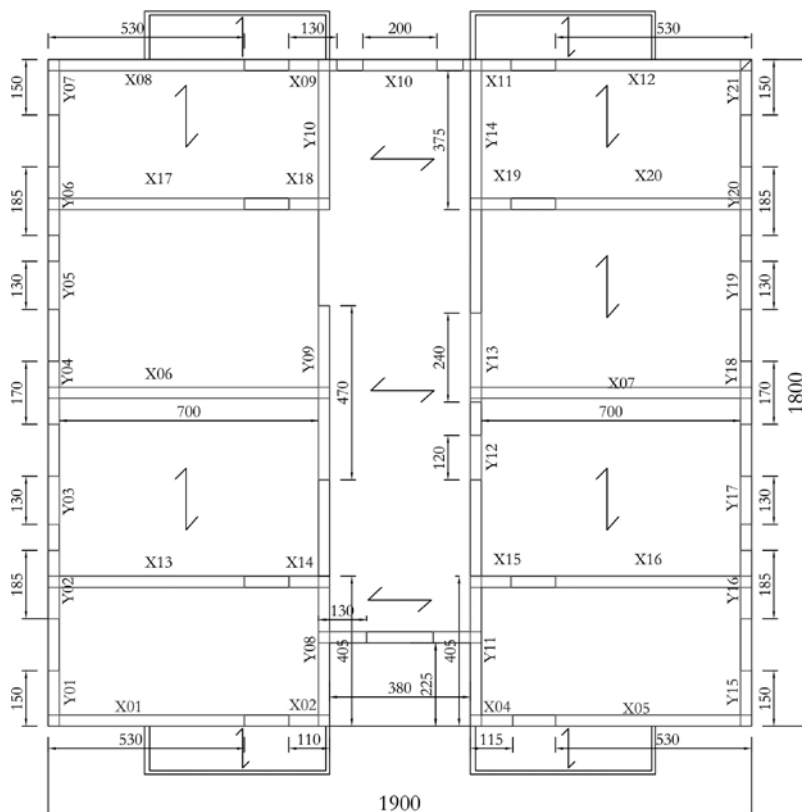
Di per sé la considerazione che un materiale sia elastico non implica che offra tassativamente una risposta di tipo lineare, bensì si assume la sua capacità intrinseca di tornare alla configurazione fondamentale, una volta rimosso il carico che ha perturbato il suo stato di quiete. La condizione di materiale costruttivo avente un legame costitutivo ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) elastico lineare rappresenta la condizione più semplice che può verificarsi. È il caso, ad esempio, dell'acciaio in cui si può osservare una proporzionalità diretta tra tensione e deformazione e, a meno che non sia raggiunta la sua tensione di snervamento, un comportamento elastico sia in compressione che in trazione. Nel caso, invece, della muratura o del calcestruzzo armato assimilare la risposta ad un andamento elastico lineare rappresenta spesso una notevole forzatura. L'ipotesi elastico-lineare è alla base delle formulazioni usate dalla scienza delle costruzioni per la soluzione dei sistemi strutturali: mediante la teoria dell'elasticità sono stati sviluppati modelli matematici capaci di determinare la deformazione (ed eventualmente il moto) che un dato corpo elastico subisce sotto l'azione di un campo di forze esterne rispettando condizioni di equilibrio e di congruenza. Il calcolo elastico-lineare può essere applicato alla muratura tenendo tuttavia presente la non linearità intrinseca del materiale che rende tale approccio più «forzato». Nel capitolo saranno presentati due casi studio applicativi del calcolo lineare manuale (senza l'ausilio di software di calcolo dedicato):

- edificio semplice (§ 3.2) in termini di requisiti sia statici sia sismici;
- costruzione che non può essere ricondotta al cosiddetto «edificio semplice».

### 3.2. Edificio semplice: esempio di calcolo lineare di un caso studio

Il primo caso studio corrisponde ad una costruzione residenziale atta ad ospitare bilocali per villeggiatura. La planimetria (Fig. 3.1) si mantiene costante a tutti i livelli della struttura che in questo caso consta di due piani fuori terra e la cui copertura è adibita a lastrico solare (copertura

praticabile). La forma della costruzione è inscritta (al netto dei balconi) in un rettangolo avente larghezza (L) pari a 18 m ed una profondità (B) uguale a 19 m.



**Figura 3.1.** Planimetria edificio semplice a due piani

La tecnologia costruttiva è riconducibile ad una muratura portante (spessore murario = 30 cm), gli orizzontamenti sono in latero-cemento (spessore solaio al finito = 30 cm) confinati da un cordolo strutturale in cemento armato (come prescritto dalle NTC08, § 4.5.4) e l'altezza interna dei vani è pari a 2,70 m ( $h_0$ ), pertanto l'altezza di interpiano è pari a 3,00 m.

Si sottolinea inoltre che la muratura disposta al di sopra e al di sotto delle bucaure è non portante, pertanto l'altezza massima dei pannelli murari eguaglia la luce libera di inflessione  $h_0$ .

---

La geometria delle pareti resistenti al sisma, deve rispettare i requisiti indicati nella Tabella 7.8.II, in cui  $t$  indica lo spessore della parete al netto dell'intonaco,  $h_0$  l'altezza di libera inflessione della parete come definito al § 4.5.6.2,  $h'$  l'altezza massima delle aperture adiacenti alla parete,  $l$  la lunghezza della parete (§ 7.8.1.4).

---

Per semplicità di trattazione saranno analizzati in sede preliminare tutti i requisiti di semplicità che risultano indipendenti dal sito, in modo da sviluppare prototipi ripetibili della stessa costruzione.

Negli esempi si omettono le verifiche relative alle fondazioni, che potranno comunque essere svolte in modo semplificato secondo quanto previsto al § 7.8.1.9.

Nelle Tabelle 3.1 e 3.2 sono riportati i carichi verticali permanenti e variabili considerati per ciascun tipo di orizzontamento, una volta verificati i requisiti per il riconoscimento di «*costruzione semplice*» ai sensi delle NTC08 e quindi resa possibile la procedura semplificata di verifica, rispettivamente in condizioni statiche e sismiche.

**Tabella 3.1.** *Analisi carichi permanenti strutturali e non strutturali*

Solaio	Tipo di carico		Valore caratteristico [kN/m <sup>2</sup> ]	Totale [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_G$
Di piano	G <sub>1</sub>	Solaio latero-cemento	3,50	2,70	1
		Travi			
	G <sub>2</sub>	Pavimento	0,40		
		Letto di malta	0,40		
		Sottofondo	0,50		
		Intonaco	0,20		
	Tramezze § 3.1.3.1	1,20			
Copertura praticabile / Balcone	G <sub>1</sub>	Solaio latero-cemento	3,50	2,6	1
		Travi			
	G <sub>2</sub>	Pavimento lastrico	0,40		
		Letto di malta	0,40		
		Sottofondo	0,50		
		Guaina impermeabilizzante	0,20		
		Isolamento termico	0,80		
	Intonaco	0,30			

**Tabella 3.2.** *Analisi carichi variabili funzione della destinazione d'uso del solaio corrispondente*

Solaio	$Q_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\gamma_Q$	$\psi_0$	$\psi_2$	
Di piano	Cat. A – Ambiente uso residenziale	2,00	1	0,7	0,3
Copertura piana praticabile	Cat. H2 – Coperture praticabili di edifici residenziali	2,00	1	0,0	0,0
	Azione neve (§ 3.4) (*)	Dipende dal sito	1	0,5	0,2

(\*) Nel caso studio la costruzione sorgerà in siti prossimi alla costa ligure, pertanto questo carico non sarà dimensionante ai fini costruttivi, ovvero considerato non concomitante al carico corrispondente al normale utilizzo del lastrico solare calpestabile.

Se saranno verificate le condizioni di edificio semplice sarà possibile contemplare le seguenti combinazioni di carico:

- *Semplicità ai carichi verticali* (eq. 2.5.2):

$$\begin{aligned}
 (\text{SLU} = \text{SLE}) \quad & \gamma_{G1} G_1 + \gamma_{G2} G_2 + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \psi_{0j} Q_j \\
 & = \dots \text{edificio semplice} \dots = \\
 & G_1 + G_2 + Q_1 + \psi_{0j} Q_j
 \end{aligned}$$

## ANALISI CINEMATICA

### 4.1. Introduzione

Le NTC08, solo per le costruzioni esistenti in muratura, prevedono, in aggiunta alle verifiche globali, la verifica dei meccanismi locali: occorre cioè individuare le risposte indipendenti che potrebbero pregiudicare il comportamento scatolare. Questa verifica può essere condotta mediante l'analisi cinematica secondo quanto indicato nella Circolare 617.

In questo capitolo, l'attenzione sarà quindi rivolta alla verifica dei cinematismi locali che possono innescarsi, riprendendo le tipologie di meccanismo presentate nel Capitolo 1.

---

«Negli edifici esistenti in muratura spesso avvengono collassi parziali per cause sismiche, in genere per perdita dell'equilibrio di porzioni murarie; la verifica nei riguardi di questi meccanismi, secondo le modalità descritte nel seguito, assume significato se è garantita una certa monoliticità della parete muraria, tale da impedire collassi puntuali per disgregazione della muratura. Meccanismi locali si verificano nelle pareti murarie prevalentemente per azioni perpendicolari al loro piano, mentre nel caso di sistemi ad arco anche per azioni nel piano. Le verifiche con riferimento ai meccanismi locali di danno e collasso (nel piano e fuori piano) possono essere svolte tramite l'analisi limite dell'equilibrio, secondo l'approccio cinematico, che si basa sulla scelta del meccanismo di collasso e la valutazione dell'azione orizzontale che attiva tale cinematismo.

L'applicazione del metodo di verifica presuppone quindi l'analisi dei meccanismi locali ritenuti significativi per la costruzione, che possono essere ipotizzati sulla base della conoscenza del comportamento sismico di strutture analoghe, già danneggiate dal terremoto, o individuati considerando la presenza di eventuali stati fessurativi, anche di natura non sismica; inoltre andranno tenute presente la qualità della connessione tra le pareti murarie, la tessitura muraria, la presenza di catene, le interazioni con altri elementi della costruzione o degli edifici adiacenti» (§ C8A.4, Circolare 617).

---

### 4.2. L'analisi dei meccanismi locali di collasso negli edifici esistenti in muratura

Le inadeguate o assenti connessioni tra elementi verticale-verticale o verticale-orizzontale sono spesso fonte di instabilità ascrivibile ai cosiddetti meccanismi di primo modo (risposta fuori del piano della parete muraria); l'approccio corretto, quando si affronta una riabilitazione strutturale di una costruzione in muratura, prevede di contrastare, mediante opportuni interventi di consolidamento, l'eventuale comportamento singolare dei singoli pannelli murari rispetto alla risposta dell'intera struttura.

Le regole dell'arte prevedono soluzioni strutturali in grado di contrastare tali meccanismi «fragili», fornendo all'edificio un comportamento monolitico o di insieme, quali ad esempio:

- inserimento di catene e cerchiature;
- uso di architravi con adeguata rigidezza, affinché si abbia una migliore ripartizione del carico;



- inserimento di contrafforti;
- buona qualità della tecnologia muraria, ovvero ammorsamento tra le pareti verticali ortogonali.

La presenza o meno di tali dispositivi, da accertare in sede di sopralluogo, può essere utile alla comprensione della concezione strutturale e all'individuazione di possibili dissesti.

Gli edifici esistenti, infatti, sono spesso il frutto di trasformazioni, accrescimenti e/o demolizioni; ciò implica, il più delle volte, l'eterogeneità sia della compagine muraria sia della tecnologia costruttiva, coerente con l'epoca d'intervento e ma non con il corpo di fabbrica preesistente.

Le discontinuità nel paramento murario possono quindi provocare potenziali perdite di equilibrio, il che si traduce nell'instabilità di alcune porzioni strutturali

Questa osservazione consente di introdurre le ipotesi utili all'adozione del metodo cinematico che prevedono:

- **infinita resistenza a compressione**: il meccanismo che si analizza è conseguenza diretta di una labilità del sistema e non di una perdita di resistenza dell'elemento. L'assunzione di infinita resistenza è quindi accettabile, tuttavia può comunque essere fissata una soglia di resistenza e la posizione delle cerniere, in quel caso, deve essere adeguatamente arretrata rispetto allo spigolo della sezione in questione;
- **resistenza nulla a trazione** del pannello murario, prevedendo così una parzializzazione della sua sezione;
- **assenza di scorrimento tra i blocchi** oppure, nel caso più realistico, presenza di attrito tra i blocchi, laddove sia possibile valutare un valore coerente del coefficiente di attrito ( $\mu$ );
- **presenza di eventuali catene metalliche lasche o attive**;
- nel caso di **doppio paramento** si assumono **paramenti scollegati**: si esclude la presenza di elementi trasversali (diatoni o blocchi di notevoli dimensioni) e quindi la risposta unitaria della parete. Tale ipotesi è sicuramente a favore di sicurezza, soprattutto nel caso in cui le indagini in situ sugli elementi verticali siano limitate o comunque inadeguate ad identificare la corretta compagine muraria.

Queste ipotesi riguardano tutte le pareti strutturali portanti su cui si intende eseguire la verifica del potenziale meccanismo locale.

La Circolare 617 al § C8A.4 (ovvero Appendice al Capitolo C8) indica il metodo da applicare a ciascun elemento che si intende verificare:

- 
- trasformazione di una parte della costruzione in un sistema labile (catena cinematica), attraverso l'individuazione di corpi rigidi, definiti da piani di frattura ipotizzabili per la scarsa resistenza a trazione della muratura, in grado di ruotare o scorrere tra loro (meccanismo di danno e collasso);
  - valutazione del moltiplicatore orizzontale dei carichi  $a_0$  che comporta l'attivazione del meccanismo (stato limite di danno);
  - valutazione dell'evoluzione del moltiplicatore orizzontale dei carichi  $a$  al crescere dello spostamento  $d_k$  di un punto di controllo della catena cinematica, usualmente scelto in prossimità del baricentro delle masse, fino all'annullamento della forza sismica orizzontale;
  - trasformazione della curva così ottenuta in curva di capacità, ovvero in accelerazione  $a^*$  e spostamento  $d^*$  spettrali, con valutazione dello spostamento ultimo per collasso del meccanismo (stato limite ultimo);
  - verifiche di sicurezza, attraverso il controllo della compatibilità degli spostamenti e/o delle resistenze richieste alla struttura.
-

Il metodo di calcolo è formalizzato nella Circolare 617 e prevede due possibili metodi di verifica entrambi basati sull'analisi limite dell'equilibrio, riprendendo quanto già descritto nell'O.P.C.M. 3431/05:

- analisi cinematica lineare (§ C8A.4.1);
- analisi cinematica non lineare (§ C8A.4.2).

In realtà il secondo metodo è un approfondimento del primo, poiché prevede il calcolo delle medesime grandezze in un impianto di verifica però più complesso.

La correlazione tra i due è molto stretta, spesso è consigliabile impostare la verifica cinematica lineare e contemplare l'uso della cinematica non lineare nel caso in cui le verifiche non risultino soddisfatte con l'analisi precedente: usualmente, infatti, la verifica non lineare è meno conservativa di quella lineare, e comunque richiede la valutazione di tutti i parametri impiegati nella precedente.

#### 4.2.1. *Analisi cinematica lineare*

L'obiettivo primario è la valutazione del moltiplicatore orizzontale limite di collasso  $\alpha_0$  corrispondente al meccanismo locale indagato.

La determinazione del coefficiente  $\alpha_0$  avviene attraverso l'impiego del Principio dei Lavori Virtuali, sintetizzato nella formula seguente (C8A.4.1, Circolare 617) e già presentata al Capitolo 1 del presente volume:

$$\alpha_0 \left( \sum_{i=1}^n P_i \delta_{x,i} + \sum_{i=1}^{n+m} P_j \delta_{x,j} \right) - \sum_{i=1}^n P_i \delta_{y,i} + \sum_{h=1}^o F_h \delta_h = L_{fi} \quad (4.1)$$

La redazione di tale equilibrio si basa sul considerare un'opportuna catena cinematica, composta da una sequenza di blocchi rigidi, soggetta ad eventuali forze esterne; nello specifico si devono considerare:

- pesi propri dei blocchi applicati nei corrispondenti baricentri;
- carichi verticali gravanti su di essi (pesi propri e sovraccarichi);
- forze orizzontali proporzionali ai carichi precedenti, nel caso in cui queste non siano adeguatamente trasmesse alla struttura (spinte orizzontali di archi o volte);
- eventuali forze esterne (ad esempio, il tiro delle catene metalliche corrispondente al termine  $F_h$ );
- eventuali forze interne (ingranamento dei conchi nell'elemento verticale) che producono il cosiddetto lavoro delle forze interne ( $L_{fi}$ ), corrispondente al termine a destra dell'uguale.

La distinzione fra i carichi  $P_i$  ed i carichi  $P_j$  è che questi ultimi corrispondono a forze peso non direttamente gravanti sui blocchi le cui masse, per effetto dell'azione sismica, generano azioni orizzontali sugli elementi della catena cinematica, in quanto non efficacemente trasmesse ad altre parti dell'edificio.

Attraverso l'uguaglianza tra il lavoro compiuto dalle forze esterne al sistema e quello interno è possibile determinare il moltiplicatore di collasso relativo al meccanismo locale considerato, indicato attraverso il coefficiente  $\alpha_0$ . Questo parametro rappresenta il coefficiente moltiplicativo dell'azione orizzontale che attiva il meccanismo: poiché le forze verticali presenti sono dovute all'accelerazione di gravità:  $\alpha_0$  è «il rapporto tra le forze orizzontali applicate ed i corrispondenti pesi delle masse presenti».

## ANALISI STATICA NON LINEARE

### 5.1. Introduzione

La resistenza all'azione sismica di un edificio dipende in modo significativo dalla sua capacità deformativa, quindi è opportuno esprimere la sua risposta attraverso un progressivo stato di spostamento, in modo da avere un controllo dell'evoluzione del danno strutturale.

Ciò è possibile solo mediante analisi non lineari, capaci cioè di descrivere il comportamento più o meno duttile degli elementi costituenti. È evidente però che l'uso di una trattazione più complessa richieda, sia un maggior numero di parametri da considerare nel calcolo, sia una maggiore consapevolezza da parte dei progettisti.

Nel capitolo saranno affrontati alcuni aspetti del metodo, con particolare attenzione alle operazioni di modellazione numerica che ne permettono l'applicazione:

- fondamenti teorici;
- formulazione del modello e modalità di analisi;
- implementazione dei legami costitutivi;
- approfondimento sui risultati che possono scaturire dall'analisi.

Infine si approfondirà il significato del fattore di struttura ( $q$ ) e della procedura che, proprio a partire dall'analisi statica non lineare, ne permette una valutazione diretta.

La presentazione esemplificativa dei passaggi dell'analisi statica non lineare sarà poi oggetto di approfondimento nel Capitolo 6.

### 5.2. Analisi statica non lineare

La procedura di analisi più accurata per valutare il comportamento di un edificio, a prescindere dalla tecnologia costruttiva, nei confronti di un'azione sismica, è l'analisi dinamica non lineare; tuttavia vi sono alcuni problemi che ne «scoraggiano» l'utilizzo sistematico, quali:

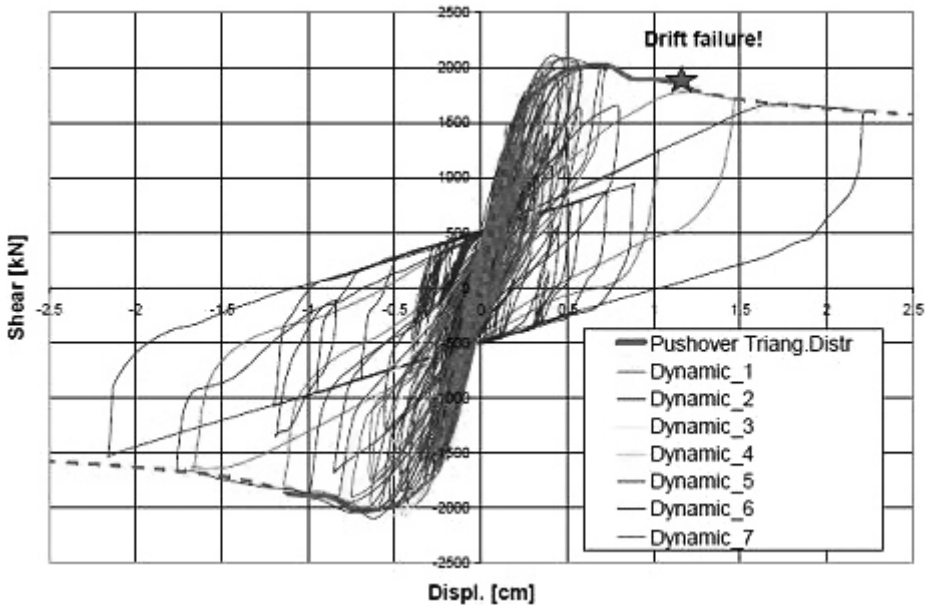
- la dipendenza della risposta dal tipo di segnale scelto (accelerogramma) che comporta l'uso di molteplici segnali per ogni direzione di analisi, questo per ottenere una risposta strutturale rappresentativa della costruzione;
- la complessità del metodo che lo rende applicabile solo in presenza di legami costitutivi, ovvero di una interpretazione del comportamento meccanico della tecnologia costruttiva adottata sotto cicli di carico e scarico, sufficientemente elaborati e disponibili in pochi software di calcolo *ad hoc*, con l'ulteriore svantaggio di tempi di analisi talvolta elevati;
- la valutazione dei risultati in chiave prestazionale è tutt'altro che immediata ed è spesso necessario l'abbinamento ad altri tipi di analisi, modale o statica non lineare, al fine di rendere i risultati comprensibili e immediatamente fruibili.

Sia la ricerca sia la pratica progettuale si sono orientate a metodologie alternative di tipo statico, ovvero metodi capaci di sintetizzare le peculiarità e le risultanze della risposta dinamica.

In campo elastico è già stata citata l'analisi statica lineare che, a partire dagli spettri elastici di accelerazione, opera una riduzione forfetaria attraverso il fattore di struttura delle azioni per tenere conto del comportamento non lineare dissipativo dell'edificio.

Più complessa, ma più realistica, è la formulazione statica non lineare, che consente di interpretare la risposta globale della costruzione cogliendo appieno l'impostazione prestazionale del calcolo sismico ed esprimendo la risposta strutturale attraverso una curva di capacità espressa in termini di forza-spostamento.

Nella figura che segue (Fig. 5.1) è riportato un esempio di quanto appena affermato: la conduzione di un'analisi dinamica non lineare restituisce una sequenza di cicli di isteresi che possono essere espressi in termini di taglio alla base e spostamento di un opportuno nodo di controllo. Tale risultanza può essere semplificata, individuando in corrispondenza di ciascun ciclo il valore massimo di forza orizzontale raggiunta; l'involuppo di questi punti notevoli definisce la curva di involucro che può essere anche dedotta attraverso un'analisi statica non lineare.



**Figura 5.1.** La dinamica non lineare può essere sintetizzata da una curva involucro detta «pushover»<sup>1</sup>

Tale metodo è noto in letteratura con il nome di *Capacity Spectrum Method*, originariamente proposto da Freeman et al. (1975) utilizzando definizioni di smorzamento viscoso equivalente per tener conto dell'evoluzione non lineare del comportamento strutturale, per poi essere riformulato da Fajfar (1999, 2000) e introdotto all'interno del codice europeo (Eurocodice 8), con il nome di «N2 – method» che utilizza, invece, spettri di risposta ridotti attraverso fattori di struttura opportunamente definiti in funzione del periodo di vibrazione e della duttilità strutturale.

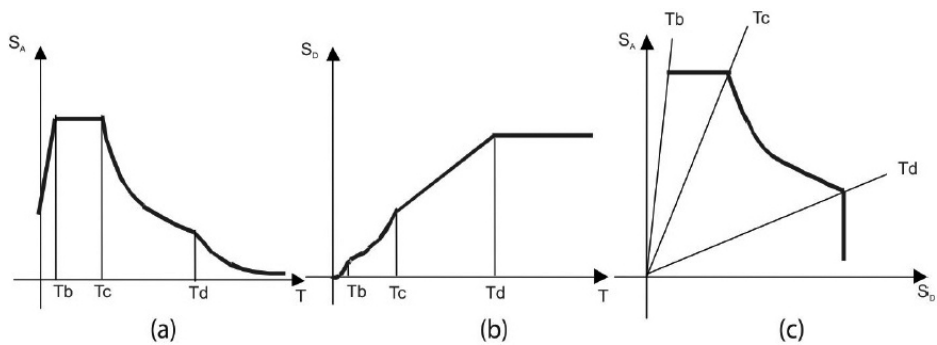
<sup>1</sup> Tratto da *Non linear macro-element dynamic analysis of masonry building*, Lagomarsino et al., 2007.

Per le costruzioni in muratura, tuttavia, l'analisi statica non lineare non rappresenta una novità in senso assoluto: sebbene i metodi di calcolo e verifica proposti ora siano diversi e aggiornati, l'idea di una più efficace descrizione della capacità della struttura attraverso una curva di capacità era già presente nelle precedenti normative (D.M. LL.PP. 2 luglio 1981, n. 593; Circ. Min. LL.PP. 30 luglio 1981, n. 21745) con il cosiddetto Metodo POR (Tomazevic, 1978).

Il metodo *N2* consiste nel confronto tra la domanda del terremoto (rappresentata attraverso gli spettri di risposta di accelerazione e spostamento) e la capacità della struttura: un diagramma forza-spostamento non lineare, da convertire in accelerazione-spostamento, ottenuto analizzando una struttura «spinta» da un sistema di forze orizzontali ai vari piani.

Si precisa che ci si riferirà impropriamente alla pseudo-accelerazione come a un'accelerazione, poiché nell'ambito nell'ingegneria civile, in generale, e delle strutture in muratura in particolare, essa rappresenta un'approssimazione accettabile<sup>2</sup>.

Gli spettri (Capitolo 2) sono solitamente definiti attraverso formulazioni analitiche che, in base alla tipologia di suolo ed alla pericolosità sismica del sito, ne definiscono i vari tratti (la formulazione analitica è riportata nel § 3.2.3.2.1 delle norme tecniche).



**Figura 5.2.** Spettri elastici di (a) accelerazione e (b) spostamento; (c) «Spettro elastico della domanda». Gli assi sono rispettivamente accelerazione e spostamento, i periodi sono implicitamente individuabili attraverso le rette uscenti dall'origine

$$S_D = \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 S_A \quad (5.1)$$

Tale formula è presente anche nelle NTC08 come (3.2.12) con la dicitura  $S_e$  per lo spettro elastico di accelerazione ( $S_A$ ) e  $S_{De}$  per lo spettro elastico di spostamento ( $S_D$ ).

Partendo da due spettri di risposta elastici di spostamento ed accelerazione è possibile costruire un unico diagramma rappresentativo della domanda del terremoto. Tale diagramma è spesso impropriamente definito come «Spettro della domanda»: in ascissa è riportato lo spettro di risposta di spostamento, mentre in ordinata lo spettro di accelerazione; il periodo proprio ( $T$ ) è quindi

<sup>2</sup> Senza entrare nel dettaglio si annota come l'accelerazione cui si riferiscono gli spettri elastici sia più precisamente una pseudo-accelerazione: tale grandezza tende a coincidere con l'accelerazione effettiva in assenza di smorzamento e per periodi non elevati (Clough et al., 1993 e Petriani et al., 2004).

## CALCOLO DELLA VULNERABILITÀ SISMICA – RISPOSTA GLOBALE

### 6.1. Introduzione

La procedura di calcolo descritta nel capitolo precedente è lo strumento più efficace per determinare la vulnerabilità di un edificio esistente, permettendo di valutare l'efficacia delle diverse strategie di consolidamento.

Negli edifici esistenti è spesso necessario intervenire per ragioni sia architettoniche sia strutturali (ad esempio, demolizioni, ampliamenti o consolidamenti).

Affinché il progetto di intervento risulti poco invasivo, è opportuno che siano vagliate, durante l'iter procedurale, diverse soluzioni.

Compatibilmente con la fattibilità dell'intervento, la scelta dovrebbe ricadere sulle opere che snaturino il meno possibile la struttura portante originaria. L'analisi statica non lineare, infatti, non solo permette una verifica di tipo prestazionale, ma è anche un valido strumento per elaborare una metodologia di consolidamento efficace ed appropriata.

### 6.2. Descrizione del caso studio ed interventi applicati

Il caso presentato si riferisce a un edificio esistente in muratura di mattoni, già considerato nella trattazione dei modi locali.

Il fabbricato è caratterizzato da una planimetria allungata (rapporto di 1:3,6 tra la profondità e lo sviluppo longitudinale) e da una certa regolarità in elevazione. La scelta di approfondire un edificio geometricamente non complesso permettere di focalizzare l'attenzione sulle procedure di calcolo da impiegarsi in questo tipo di analisi strutturale.

Nella presentazione di questo caso studio si affronterà il tema a partire dallo stato di progetto, al fine di permettere una miglior comprensione del metodo di calcolo.

Il progetto di ristrutturazione prevede infatti il consolidamento dei solai lignei di piano, originariamente troppo flessibili, attraverso un getto di calcestruzzo collaborante all'esistente mediante l'inserimento di opportuni connettori (una possibile soluzione è riportata nella Fig. 6.3) e nel cui spessore è stata inserita una rete elettrosaldata. Questo provvedimento garantisce una risposta d'insieme degli elementi verticali, contrariamente al caso di un solaio flessibile dove la risposta di ciascuna parete portante sarebbe stata funzione della propria rigidità generando così una risposta differenziata per ciascun pannello murario.

La presenza di un getto collaborante di opportuno spessore rende plausibile l'ipotesi di solaio infinitamente rigido, semplificando così lo studio della risposta sismica. Le strategie di consolidamento possibili saranno peraltro affrontate prevalentemente dal punto di vista computazionale; non si entrerà quindi nel merito della scelta dell'intervento più opportuno, tema che sarà invece affrontato negli esempi del Capitolo 7.

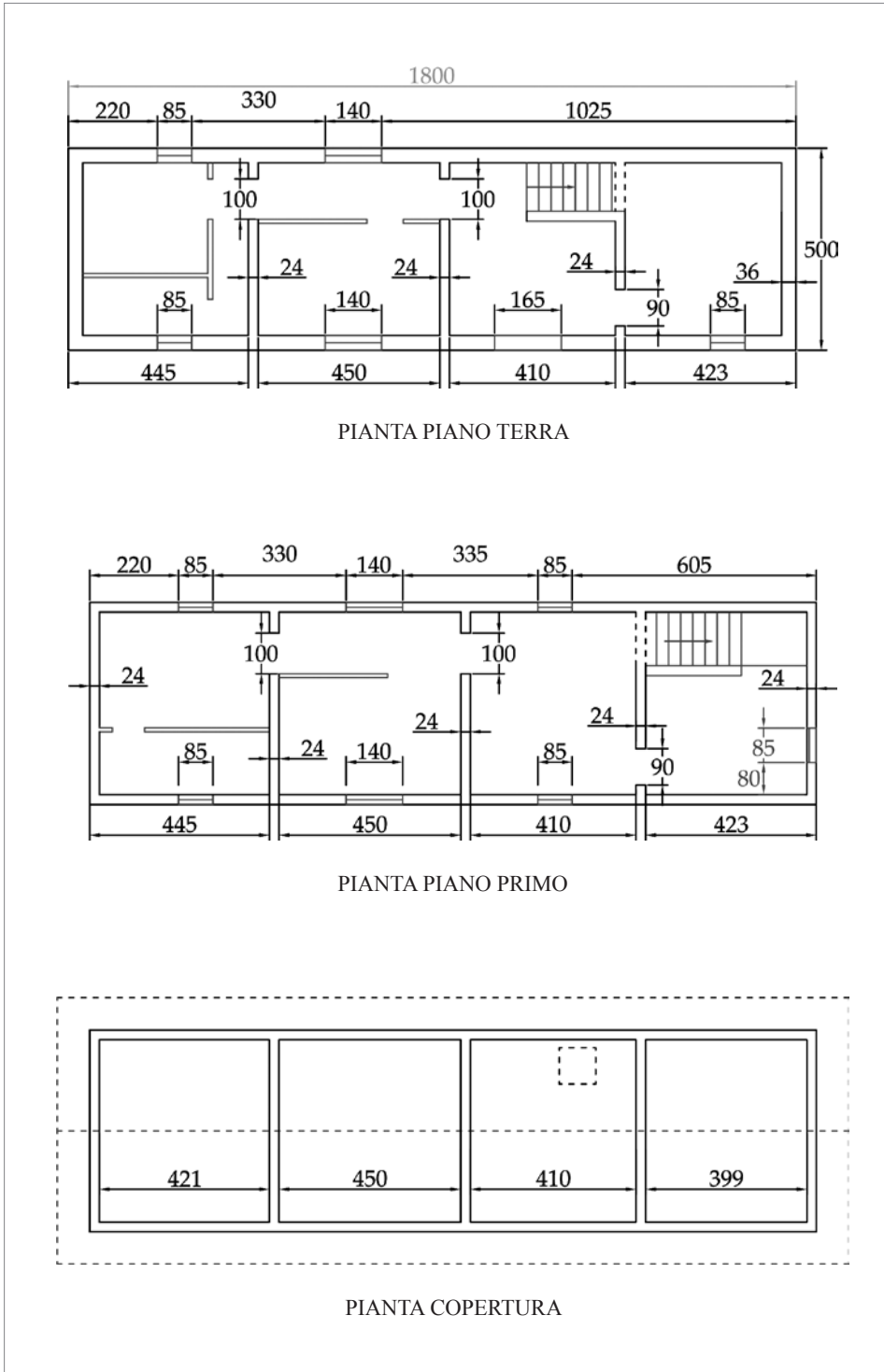


Figura 6.1. Planimetrie relative al caso studio

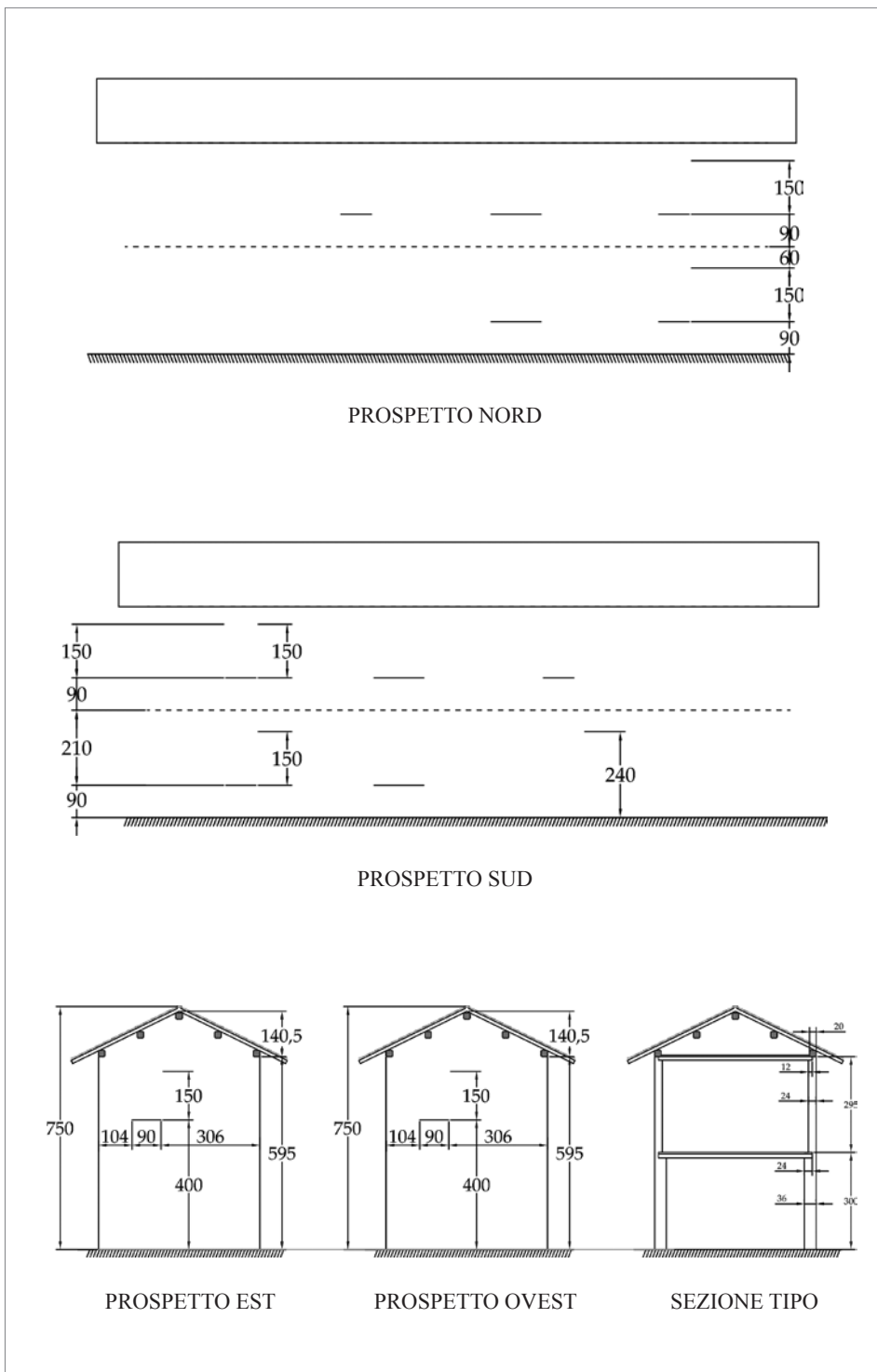


Figura 6.2. Prospetti e sezioni



## ESEMPI PROGETTUALI E TIPOLOGIE DI INTERVENTI

### 7.1. Introduzione

In questo capitolo saranno presentate diverse esperienze progettuali di calcolo di vulnerabilità sismica a completamento di quanto già mostrato in precedenza: si approfondiranno alcune situazioni di intervento frequenti nella pratica, cercando di fornire una metodologia di riferimento atta ad affrontare il progetto di consolidamento, mostrando come, a giudizio di chi scrive, sia possibile impostare il lavoro, scegliendo la corretta pratica da istruire (miglioramento, adeguamento o intervento locale).

L'individuazione della pratica corretta è opportuna sia per non incorrere, ovviamente, in contenziosi con gli uffici preposti al controllo sia per quantificare correttamente i costi della progettazione e dell'intervento: infatti se la pratica è istruibile come intervento locale avrà costi ben diversi da quelli necessari per un intervento di adeguamento sismico.

Nel Capitolo 2 (§ 2.4.11) sono state presentate sinteticamente le tipologie di intervento da operarsi sugli edifici esistenti, ovvero adeguamento, miglioramento ed intervento locale, come previsto dalle NTC08. La differenza saliente tra le sopraccitate tipologie riguarda la finalità della verifica: nel caso di adeguamento, il livello di sicurezza successivo all'intervento, dovrà essere analogo a quello previsto per una costruzione nuova (§ 8.4.1 delle NTC08). Nel caso di miglioramento sarà invece richiesto di dimostrare che le opere in progetto permettono di incrementare la sicurezza del fabbricato pur senza l'obbligo di raggiungere il livello previsto per gli edifici nuovi. Nell'intervento locale è richiesta invece solo la verifica delle opere realizzate, senza quindi una valutazione globale di vulnerabilità.

È dunque particolarmente importante esaminare accuratamente lo stato di progetto, per poter valutare in quale casistica si ricada, valutando, cioè, se le opere previste comportino o meno l'adeguamento sismico, siano riconducibili a una procedura di miglioramento o possano risolversi per mezzo di un intervento locale.

Nella trattazione, l'interesse sarà rivolto principalmente al calcolo sismico e, in particolare, ai risvolti progettuali, pertanto si ometteranno altre verifiche eventualmente necessarie (verifiche ai carichi verticali per gli adeguamenti) né si dedicherà eccessivo spazio alla tabulazione dei risultati, a volte presentati solo sinteticamente e a completamento del ragionamento proposto.

Vi sarà poi uno spazio dedicato agli edifici inseriti in una schiera urbana, la cui analisi risulta evidentemente più complessa rispetto all'edificio isolato. La metodologia presentata per l'analisi, a giudizio di chi scrive, può essere applicata in modo generale senza le limitazioni ai procedimenti semplificati suggerite dalla norma (§ 8.7.1).

I paragrafi del presente capitolo sono organizzati come segue: il primo esempio (§ 7.3) riguarderà il caso di un miglioramento sismico relativo a un edificio isolato, dove sono attuati consolidamenti sulle strutture orizzontali, unitamente al miglioramento del comportamento globale della costruzione.

Nel § 7.4 si approfondirà il caso di adeguamento sismico, trattando alcune casistiche particolari: sarà analizzato il caso di un volume facente parte di un organismo edilizio articolato come, ad esempio, una schiera (questo caso progettuale ricorre spesso nella pratica, soprattutto quando si deve intervenire su parti edilizie inserite nel centro storico di un borgo) dove una sua parte è oggetto di una demolizione parziale (tale intervento prevede la necessità di adeguamento della porzione non demolita).

Nel § 7.5 si tratteranno gli interventi locali, mostrando un esempio corrispondente al caso più delicato, ovvero l'inserimento di una nuova apertura nel prospetto della costruzione. Gli interventi cosiddetti locali comprendono attività molto chiare da un punto di vista operativo come la sostituzione di elementi (senza modifiche della tecnologia) o l'inserimento di dispositivi antisismici (tiranti), ma allo stesso tempo di difficile concezione progettuale per quello che riguarda il calcolo della cerchiatura di ripristino.

Infine, l'ultima parte del capitolo approfondirà un aspetto importante nell'ambito della verifica sismica degli edifici in muratura ovvero il calcolo di un edificio sensibile/strategico con esplicito riferimento al calcolo di vulnerabilità richiesto per la compilazione delle schede predisposte dalla protezione civile (SchedaDPCLiv1-2 DM 2008).

## **7.2. Impostazioni generali del progetto antisismico**

Nel presente paragrafo sono illustrati i passi salienti, a giudizio di chi scrive, per lo svolgimento di un progetto di intervento su una costruzione esistente.

### **7.2.1. Riconoscimento qualitativo della tecnologia costruttiva prevalente**

Gli edifici in muratura, soprattutto quelli esistenti, possono essere il risultato di accrescimenti e cambiamenti strutturali eseguiti nel tempo: è fondamentale, prima di ogni altra attività, riuscire ad inquadrare correttamente la struttura resistente, verticale ed orizzontale, la corrispondente tecnologia e tipologia costruttiva. Oltre al caso più semplice di un edificio interamente in muratura si può operare su un edificio misto in cui sono presenti diverse soluzioni costruttive, quali calcestruzzo o acciaio con evidenti funzioni strutturali (l'accoppiamento può essere originario, ad esempio un nucleo scale in c.a., o successivo, come nel caso di pareti di muratura eliminate e sostituite da telai metallici o in calcestruzzo armato).

Infine vi sono edifici che, pur presentando ampie porzioni in muratura (mattoni o altri blocchi), possiedono una struttura portante completamente affidata ad altra tecnologia, come nel caso di edifici intelaiati in calcestruzzo armato in cui la muratura costituisce la tramezzatura non strutturale e, pertanto, non è possibile applicare le metodologie di calcolo qui illustrate.

Diverso è il caso in cui vi siano parti intelaiate abbinate a strutture murarie verticali portanti; in tal caso i metodi di calcolo qui descritti possono risultare idonei.

Questa prima individuazione serve ad introdurre i passi successivi del progetto sismico, scegliendo i metodi di indagine più appropriati e mirati al tipo di tecnologia costruttiva presente, valutando le eventuali strategie di consolidamento a seconda della struttura resistente.

### **7.2.2. Individuazione della classe d'uso ( $C_T$ )**

Solitamente gli edifici in muratura corrispondono ad opere ordinarie con una vita nominale ( $V_N$ ) corrispondente a 50 anni, occorre però definire la corretta classe d'uso, ovvero I, II, III, IV

(secondo il § 2.4.2 ed eventuali norme regionali). Se all'interno del corpo edilizio sono riconosciute diverse destinazioni d'utilizzo corrispondenti a differenti classi d'uso, il progettista dovrà assumere la classe più elevata, poiché tale scelta va direttamente ad influire sul calcolo del periodo di ritorno ( $T_R$ ) dell'azione sismica di progetto.

### **7.2.3. Inquadramento tipologia di intervento**

Solitamente il tecnico è chiamato ad intervenire nell'ambito di un progetto di ristrutturazione o trasformazione del fabbricato. Il suo compito è stabilire se l'operazione che si andrà ad eseguire sarà classificabile quale adeguamento, miglioramento o intervento locale. Come già sottolineato la scelta è fondamentale, perché da essa dipenderà l'entità finale dell'intervento e la complessità del corrispondente calcolo.

### **7.2.4. Acquisizione delle informazioni preliminari**

Per questo passaggio si può fare riferimento al § 8.5 delle NTC08 «*Procedure per la valutazione della sicurezza e la redazione dei progetti*», integrato con il § C8.5 della corrispondente Circolare esplicativa. In questo paragrafo normativo è indicato che nelle «*costruzioni esistenti le situazioni concretamente riscontrabili sono le più diverse ed è quindi impossibile prevedere regole specifiche per tutti i casi. Di conseguenza, il modello per la valutazione della sicurezza dovrà essere definito e giustificato dal Progettista, caso per caso, in relazione al comportamento strutturale attendibile della costruzione, tenendo conto delle indicazioni generali di seguito esposte*».

Certamente le informazioni disponibili su un edificio esistente sono ben diverse da quelle di uno nuovo: è chiaro, nell'impianto normativo, che la modellazione ammetterà delle assunzioni. A prescindere da ciò, è utile raccogliere informazioni utili alla caratterizzazione dell'edificio.

- *Analisi storica-critica*: occorre individuare il periodo storico di costruzione e gli eventuali interventi strutturali successivi. Tale operazione può essere fatta acquisendo documentazione in possesso dei proprietari o disponibile in Comune. Occorre però rammentare che prima delle Norme Tecniche del 2008, per gli edifici in muratura in zona non sismica, non era richiesto il deposito della progettazione. Può essere utile uno studio preliminare sull'evoluzione costruttiva dell'area su cui sorge il fabbricato, cercando riferimenti urbanistici e storici che ne hanno condizionato e guidato lo sviluppo. Questa fase spesso la si affronta cercando di riconoscere sul posto gli interventi eseguiti successivamente e raccogliendo le informazioni disponibili dai proprietari. «*La ricostruzione della storia edificatoria dell'edificio, o della costruzione più in generale, consentirà anche di verificare quanti e quali terremoti esso abbia subito in passato. Questo sorta di valutazione sperimentale della vulnerabilità sismica dell'edificio rispetto ai terremoti passati è di notevole utilità, perché consente di valutarne il funzionamento, a patto che la sua configurazione strutturale e le caratteristiche dei materiali costruttivi non siano stati, nel frattempo, modificati in maniera significativa*» (§ C8.5.1, Circolare n. 617/2009).
- *Rilievo del manufatto*: è indispensabile disporre di un rilievo del fabbricato, altrimenti è necessario procedere alla sua redazione. Nel primo caso occorre procedere alla sua verifica e alla sua integrazione con informazioni eventualmente mancanti e reperite in

## INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE INCLUSO

### Note sul software incluso

Il software incluso, parte integrante della pubblicazione, gestisce le seguenti utilità in materia di adeguamento e miglioramento sismico degli edifici:

- Versione demo di 3Muri<sup>®</sup>, programma per il calcolo sismico e statico delle strutture in muratura di piccole e grandi dimensioni;
- Elaborati tecnici per il miglioramento sismico (PDF);
- Scheda di rilievo del paramento (PDF);
- Scheda di sintesi della verifica sismica di edifici strategici ai fini della protezione civile o rilevanti in caso di collasso a seguito di evento sismico (PDF);
- Orientamenti interpretativi su interventi locali o di riparazione in edifici esistenti (PDF);
- Deliberazione della Giunta della Regione Liguria 20 dicembre 2013, n. 1662 – *Art. 5-bis, comma 1, lettera c), L.R. n. 29/1983. Indirizzi interpretativi in merito alla definizione interventi sopraelevazione e ampliamento sugli edifici esistenti ai fini applicazione della normativa in materia di costruzioni in zone sismiche* (PDF).

Il software di gestione consente di accedere, inoltre, ai seguenti documenti:

- **Glossario** (principali termini tecnico-normativi).
- **F.A.Q.** (domande e risposte più frequenti).
- **Test iniziale** (verifica della formazione di base).
- **Test finale** (verifica dei concetti analizzati).

### Requisiti hardware e software

- Processore da 2.00 GHz;
- MS Windows Vista/7/8/10 (è necessario disporre dei privilegi di amministratore);
- MS .Net Framework 4 o vs. successive;
- 250 MB liberi sull'HDD;
- 2 GB di RAM;
- Adobe Reader 11.x o vs. successive;
- Accesso ad internet e browser web.

### Download del software e richiesta della password di attivazione

1) Collegarsi al seguente indirizzo internet:

[http://www.grafill.it/pass/875\\_1.php](http://www.grafill.it/pass/875_1.php)

2) Inserire i codici “A” e “B” (vedi ultima pagina del volume) e cliccare [**Continua**].

- 3) **Per utenti registrati** su [www.grafill.it](http://www.grafill.it): inserire i dati di accesso e cliccare [**Accedi**], accettare la licenza d'uso e cliccare [**Continua**].
- 4) **Per utenti non registrati** su [www.grafill.it](http://www.grafill.it): cliccare su [**Iscriviti**], compilare il form di registrazione e cliccare [**Iscriviti**], accettare la licenza d'uso e cliccare [**Continua**].
- 5) Un **link per il download del software** e la **password di attivazione** saranno inviati, in tempo reale, all'indirizzo di posta elettronica inserito nel form di registrazione.

### Installazione ed attivazione del software

- 1) Scaricare il setup del software (file \*.exe) cliccando sul link ricevuto per e-mail.
- 2) Installare il software facendo doppio-click sul file **88-8207-876-8.exe**.
- 3) Avviare il software:

Per utenti MS Windows Vista/7/8: [**Start**] > [**Tutti i programmi**] > [**Grafill**] > [**Miglioramento Sismico Muratura**] (cartella) > [**Miglioramento Sismico Muratura**] (icona di avvio)

Per utenti MS Windows 10: [**Start**] > [**Tutte le app**] > [**Grafill**] > [**Miglioramento Sismico Muratura**] (icona di avvio)

- 4) Compilare la maschera *Registrazione Software* e cliccare su [**Registra**].
- 5) Dalla finestra *Starter* del software sarà possibile accedere alle utilità disponibili.

