

# Indice

PREFAZIONE .....	IX
PREMESSA .....	XI
SIMBOLOGIA .....	XIII
ACRONIMI .....	XLI

## Parte prima Introduzione e nozioni preliminari

<b>1 INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
1.1 LE STRUTTURE E IL LORO ESAME .....	3
1.2 LA MODELLAZIONE DELLE STRUTTURE .....	9
1.2.1 Il modello della geometria .....	10
1.2.2 Il modello dei materiali .....	12
1.2.3 Il modello delle azioni .....	18
1.3 L'ANALISI DELLA STRUTTURA .....	19
1.3.1 Metodi generali di analisi .....	19
1.3.2 Strumenti di calcolo manuale e di calcolo automatico .....	22
<b>2 LE STRUTTURE IN MURATURA .....</b>	<b>27</b>
2.1 GENERALITÀ .....	27
2.2 EVOLUZIONE DELLE COSTRUZIONI IN MURATURA .....	29
2.2.1 Dalla pietra alle costruzioni in pietra .....	29
2.2.2 Le prime costruzioni in pietra naturale .....	30
2.2.3 Le prime costruzioni in pietra artificiale .....	31
2.2.4 Le costruzioni mesopotamiche .....	34
2.2.5 Le costruzioni egizie .....	34
2.2.6 Le costruzioni megalitiche europee .....	36
2.2.7 Le costruzioni minoiche e micenee .....	37
2.2.8 Le costruzioni greche .....	38
2.2.9 Le costruzioni etrusche .....	39
2.2.10 Le costruzioni romane .....	39
2.2.11 Le costruzioni dal Medioevo al XVIII secolo .....	41
2.2.12 La rivoluzione nelle costruzioni .....	43
2.2.13 Le costruzioni moderne .....	46
2.3 CLASSIFICAZIONE DEGLI EDIFICI IN MURATURA .....	49
2.4 LA PROGETTAZIONE DELLE STRUTTURE IN MURATURA .....	52
2.4.1 Le origini greche e romane .....	52
2.4.2 Il periodo medioevale .....	54
2.4.3 Il periodo rinascimentale e i trattatisti .....	55
2.4.4 Dall'Accademie d'Architecture all'École Polytechnique .....	60
2.4.5 La progettazione nel XIX secolo .....	62
2.4.6 Prima metà del Novecento e fine dell'empirismo .....	68
2.4.7 La nascita di una Teoria delle strutture in muratura .....	70
<b>3 FILOSOFIA ATTUALE DELL'INGEGNERIA SISMICA .....</b>	<b>75</b>
3.1 RISCHIO SISMICO .....	75
3.1.1 Pericolosità .....	77

3.1.2	Vulnerabilità	82
3.1.3	Esposizione	84
3.2	INGEGNERIA SISMICA PRESTAZIONALE	86
3.2.1	Intensità sismica	86
3.2.2	Domanda sismica	95
3.2.3	Capacità sismica	162
3.2.4	Obiettivi e livelli di prestazione sismica	163
3.3	METODI DI ANALISI SISMICA	165
3.3.1	Analisi lineari e analisi non lineari	166
3.3.2	Analisi statiche e analisi dinamiche	168
3.3.3	Analisi dinamica lineare	169
3.3.4	Analisi statica lineare	177
3.3.5	Analisi dinamica non lineare	180
3.3.6	Analisi statica non lineare	189
3.4	ANALISI DEL DANNEGGIAMENTO SISMICO	216
3.5	VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI	223
3.5.1	Metodo delle tensioni ammissibili	224
3.5.2	Metodo probabilistico (III livello)	225
3.5.3	Metodi di II livello	235
3.5.4	Metodi di I livello	236
4	<b>NORMATIVA STRUTTURALE E SUA EVOLUZIONE</b>	<b>239</b>
4.1	GENERALITÀ	239
4.2	EVOLUZIONE DELLA NORMATIVA	241
4.3	NORME MODERNE PER LE COSTRUZIONI IN MURATURA	255
4.4	NORME ATTUALI PER LE COSTRUZIONI IN MURATURA	260
4.4.1	Norme italiane	260
4.4.2	Norme europee	269
4.4.3	Norme statunitensi	272

**Parte seconda  
Modellazione strutturale**

5	<b>MODELLAZIONE DEI MATERIALI</b>	<b>277</b>
5.1	CONSIDERAZIONI PRELIMINARI	277
5.2	MECCANICA DELLA MURATURA ORDINARIA	279
5.2.1	Modello teorico di base per compressione monoassiale	280
5.2.2	Criteri di resistenza	282
5.2.3	Criteri di resistenza per la macro-modellazione	285
5.2.4	Criteri di resistenza per la micro-modellazione	295
5.2.5	Criteri di resistenza per modelli ai macro-elementi	300
5.2.6	Legami costitutivi sperimentali della muratura	304
5.3	CARATTERIZZAZIONE DEGLI ELEMENTI LAPIDEI	311
5.3.1	Prove di compressione monoassiale	311
5.3.2	Prove di trazione e di splitting	313
5.4	CARATTERIZZAZIONE DELLA MALTA	315
5.5	CARATTERIZZAZIONE DELL'INTERFACCIA	315
5.5.1	Prove di aderenza	315
5.5.2	Prove di taglio diretto	317
5.6	CARATTERIZZAZIONE DELLA MURATURA	319
5.6.1	Prove di laboratorio	319
5.6.2	Prove in sito	328
5.7	IL DATABASE MADA	331
5.8	PROPRIETÀ DELLE MURATURE IN LETTERATURA	332
5.8.1	Resistenza a compressione	333

5.8.2	Deformazione ultima a compressione	335
5.8.3	Resistenza a trazione	336
5.8.4	Resistenza a taglio puro	336
5.8.5	Coefficiente di attrito	338
5.8.6	Moduli di elasticità	339
5.9	INDICAZIONI NORMATIVE PER MURATURE NUOVE	341
5.9.1	Valutazione sperimentale delle resistenze	341
5.9.2	Stima delle resistenze	342
5.9.3	Resistenze di progetto	346
5.9.4	Moduli di elasticità secanti	347
5.10	INDICAZIONI NORMATIVE PER MURATURE ESISTENTI	348
5.10.1	Costruzioni esistenti ordinarie	348
5.10.2	Costruzioni esistenti tutelate	357
5.11	INDICAZIONI DELLE NORMATIVE PREGRESSE	359
6	<b>MODELLAZIONE DELLA GEOMETRIA</b>	<b>361</b>
6.1	APPROCCI NUMERICI	361
6.1.1	Modellazione agli elementi finiti	361
6.1.2	Modellazione agli elementi discreti	366
6.2	APPROCCI AI MACRO-ELEMENTI	366
6.2.1	Modellazione di pareti per azioni nel piano	366
6.2.2	Modellazione di pareti per azioni fuori del piano	387
7	<b>MODELLAZIONE DELLE AZIONI</b>	<b>393</b>
7.1	GENERALITÀ	393
7.2	VITA NOMINALE DELLA STRUTTURA	394
7.3	TIPOLOGIE DI AZIONI	395
7.4	STATI LIMITE	398
7.5	SITUAZIONI DI PROGETTO E COMBINAZIONE DELLE AZIONI	400
7.6	AZIONI NON SISMICHE	404
7.6.1	Carichi permanenti strutturali	404
7.6.2	Carichi permanenti non strutturali	406
7.6.3	Carichi variabili	407
7.6.4	Azioni gravitazionali applicate ai pannelli murari	409
7.7	AZIONI SISMICHE	409
7.7.1	Classe d'uso	409
7.7.2	Periodo di riferimento	410
7.7.3	Valutazione della pericolosità sismica	410
7.7.4	Descrizione del moto sismico secondo la normativa	416
7.7.5	Azioni sismiche orizzontali	417
7.7.6	Azioni sismiche verticali	428

**Parte terza  
Analisi strutturale**

8	<b>ANALISI PER AZIONI NON SISMICHE</b>	<b>433</b>
8.1	PERCORSO DEI CARICHI E RISULTANTI	433
8.2	VERIFICHE DI SICUREZZA	440
9	<b>ANALISI SISMICA GLOBALE</b>	<b>443</b>
9.1	I METODI DI ANALISI A MACRO-ELEMENTI	443
9.1.1	Analisi statica lineare con metodo RAN	446
9.1.2	Analisi statica non lineare con metodo DEUM	448
9.2	CAPACITÀ DEI PANNELLI DI MASCHIO	449
9.2.1	Tipologie di crisi e ipotesi generali	449
9.2.2	Domini di resistenza a presso-flessione	451

9.2.3	Domini di resistenza a taglio da trazione .....	485
9.2.4	Domini di resistenza a taglio da scorrimento .....	487
9.2.5	Sovrapposizione dei domini di resistenza .....	493
9.2.6	Legami momento-curvatura .....	497
9.2.7	Curve caratteristiche .....	505
9.3	CAPACITÀ DEI PANNELLI DI FASCIA .....	523
9.3.1	Considerazioni preliminari .....	523
9.3.2	Resistenza a presso-flessione con approccio alle tensioni .....	527
9.3.3	Resistenza a presso-flessione con approccio alle deformazioni .....	550
9.3.4	Domini di resistenza a taglio .....	558
9.3.5	Curve caratteristiche semplificate .....	560
9.4	RISPOSTA SISMICA DI PARETI SOLLECITATE NEL PIANO .....	560
9.4.1	Pareti prive di aperture .....	560
9.4.2	Curve caratteristiche di piano delle pareti forate .....	561
9.4.3	Variazioni di sforzo normale nelle pareti forate .....	564
9.4.4	Analisi statica lineare di pareti forate .....	577
9.4.5	Analisi statica non lineare di pareti forate .....	586
9.5	SISTEMI COMBINATI DI PARETI CIECHE E FORATE .....	595
9.6	RIPARTIZIONE DELLE AZIONI SISMICHE .....	600
9.7	ANALISI STATICA LINEARE DI EDIFICI IN MURATURA .....	606
9.8	ANALISI STATICA NON LINEARE DI EDIFICI IN MURATURA .....	609
9.8.1	Considerazioni preliminari .....	609
9.8.2	Procedimento di analisi .....	610
9.8.3	Verifica di sicurezza .....	615
<b>10</b>	<b>ANALISI SISMICA PER MECCANISMI LOCALI .....</b>	<b>617</b>
10.1	CONSIDERAZIONI PRELIMINARI .....	617
10.2	ANALISI STATICA LINEARE DI SINGOLI MACRO-ELEMENTI .....	618
10.3	ANALISI CINEMATICA LINEARE .....	620
10.4	ANALISI CINEMATICA NON LINEARE .....	623
10.5	CONSIDERAZIONI TEORICO-SPERIMENTALI .....	627
<b>11</b>	<b>VALUTAZIONE DI UN EDIFICIO IN MURATURA .....</b>	<b>639</b>
11.1	L'EDIFICIO OGGETTO DI APPLICAZIONE .....	639
11.2	MODELLAZIONE DELLA STRUTTURA .....	641
11.2.1	Modello geometrico .....	641
11.2.2	Modello delle azioni .....	644
11.2.3	Modello meccanico .....	645
11.3	ANALISI SISMICA LINEARE DELLA STRUTTURA .....	646
11.3.1	Determinazione dei carichi gravitazionali allo SLU .....	647
11.3.2	Verifiche per azioni non sismiche .....	648
11.3.3	Analisi sismica statica lineare .....	651
11.4	ANALISI LINEARE TRAMITE CODICE RAN .....	670
11.4.1	Analisi per azioni non sismiche .....	670
11.4.2	Analisi per azioni sismiche .....	672
11.5	ANALISI NON LINEARE TRAMITE CODICE RAN .....	678
11.5.1	Modellazione non lineare della struttura .....	678
11.5.2	Analisi statica non lineare della struttura .....	678
11.5.3	Verifiche del modello non lineare .....	678
11.6	CONCLUSIONI .....	684
	<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....</b>	<b>687</b>

## Prefazione

Le ragioni che mi hanno spinto a scrivere questo nuovo libro sono molteplici, prima tra tutte quella che il volume *Il calcolo sismico degli edifici in muratura*, pubblicato in due successive edizioni rapidamente esaurite, non è stato più ristampato mentre l'interesse per l'argomento da parte di professionisti, ricercatori e studenti cresceva con legge esponenziale.

Sollecitato dalle richieste sempre più pressanti di colleghi e lettori di varia estrazione, sono venuto nella determinazione di scrivere nuovamente sulla progettazione e sulla verifica strutturale degli edifici in muratura, per lasciare una traccia delle tante e proficue ricerche che ho condotto in questo settore per quasi quattro decenni.

Dopo molte perplessità legate all'impegno che tale lavoro avrebbe richiesto, ma persuaso di poter fare cosa utile, ho deciso di cimentarmi nella redazione di un vero e proprio trattato su di un argomento, ogni giorno più attuale, sul quale è particolarmente difficile reperire esposizioni organiche. Con riferimento sia agli edifici nuovi che a quelli esistenti, ho voluto perciò riprendere i temi più importanti già trattati nel precedente testo ed esporre i risultati delle molte ricerche che ho portato avanti negli ultimi anni su altri argomenti come le analisi non lineari, le pareti irregolari, i legami costitutivi evoluti del materiale, il comportamento delle "fasce di piano" e su alcuni sistemi innovativi di consolidamento. Ovviamente ho colto anche l'occasione per armonizzare le verifiche ai dettami delle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni, di recente pubblicazione.

In questo ambizioso progetto ho voluto coinvolgere uno dei miei migliori figli putativi, Fulvio Parisi, attuale ricercatore universitario che mi è stato validamente vicino negli ultimi dieci anni di ricerca e di didattica e che, grazie alle sue capacità e al suo impegno, appartiene alla ristretta avanguardia scientifica della sua generazione: per lui è facile preconizzare una brillante carriera. Ci tengo peraltro a precisare che il libro è stato scritto *a quattro mani*, in piena sintonia e armonia (per usare termini cari a Fulvio, che è bravo persino come pianista).

Per chiarire lo spirito che mi ha animato nella redazione del presente testo e il taglio che abbiamo voluto dare agli argomenti trattati, ricorderò che la filosofia alla quale ho ispirato tutta la mia attività didattica è sempre stata quella di fornire agli allievi una rigorosa cultura scientifica, non disgiunta però dagli aspetti applicativi, ché la prima senza i secondi risulterebbe del tutto sterile. Cinquant'anni quasi di ricerca, di insegnamento e di attività professionale mi hanno convinto che l'unico modo per capire realmente una teoria è quello di applicarla. Ben più autorevolmente, d'altronde, Leonardo da Vinci affermava già nel XV secolo: "Studia prima la scientia e poi seguita la pratica nata da essa scientia".

Tramite il presente testo, in definitiva, abbiamo voluto riorganizzare la trattazione degli edifici in muratura e della loro analisi strutturale, per lasciare una traccia di quanto abbiamo capito sull'argomento, anche a beneficio di chi non ha la possibilità di seguire i corsi universitari.