



MARCO BOSCOLO BIELO

ABC DELLA PROGETTAZIONE ANTISISMICA

CONCETTI BASE ED ESEMPI PER UNA FACILE
COMPRESIONE DEL COMPORTAMENTO STRUTTURALE



WEBAPP INCLUSA
CON AGGIORNAMENTO AUTOMATICO

Marco Boscolo Bielo

ABC DELLA PROGETTAZIONE ANTISISMICA

Ed. I (01-2021)

ISBN 13 978-88-277-0216-1

EAN 9 788827 702161

Collana **Manuali** (263)

Ringrazio:

Concrete s.r.l. per Sismicad, il Prof. Enzo Siviero,
i compianti Prof. Giuseppe Creazza e Piero Pozzati,
e tutti coloro i quali hanno contribuito con la loro Cultura a formare la mia.

L'Autore



Prima di attivare Software o WebApp inclusi
prendere visione della licenza d'uso.

Inquadrare con un reader il QR Code a fianco
oppure collegarsi al link <https://grafill.it/licenza>

© **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

**CONTATTI
IMMEDIATI**



ProntoGRAFILL
Tel. 091 226679



Chiamami
chiamami.grafill.it



Whatsapp
grafill.it/whatsapp



Messenger
grafill.it/messenger



Telegram
grafill.it/telegram

Finito di stampare presso **Tipografia Publistampa S.n.c. – Palermo**

Edizione destinata in via prioritaria ad essere ceduta nell'ambito di rapporti associativi.

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

PRESENTAZIONE.....	p.	9
 1. CENNI STORICI SU TEORIE, PRINCIPI COSTRUTTIVI E NORME.....	 "	 11
1.1. Introduzione.....	"	11
1.2. Origini dei criteri costruttivi antisismici.....	"	11
1.3. Primi studi teorici	"	14
1.4. Descrizioni degli effetti sismici nella manualistica d'epoca e Regi Decreti.....	"	18
1.5. La normativa recente	"	20
1.6. Concetti moderni relativi alla sicurezza antisismica	"	22
1.6.1. Il rischio sismico.....	"	22
1.6.2. La vulnerabilità sismica.....	"	24
 2. EDIFICI IN MURATURA PORTANTE	 "	 26
2.1. La muratura.....	"	26
2.2. L'ingranamento	"	27
2.3. Comportamento del pannello murario	"	29
2.4. Classificazione di edifici in muratura	"	32
2.4.1. Edifici di prima classe.....	"	33
2.4.2. Edifici di seconda classe	"	37
2.4.3. Edifici di terza classe	"	41
2.4.4. Edifici non ordinari	"	44
2.5. I puntoni diagonali.....	"	44
 3. EDIFICI INTELAIATI.....	 "	 46
3.1. Generalità.....	"	46
3.2. La disposizione della struttura secondo due direzioni principali di pianta	"	47
ESEMPIO 3.1. Momento di inerzia di sezioni rettangolari	"	48
3.3. I collegamenti dei nodi	"	49
3.4. Effetto irrigidente dei tamponamenti.....	"	51

	ESEMPIO 3.2. Puntone diagonale muratura.....	p.	52
3.5.	Piano debole	"	54
3.6.	Gerarchia delle resistenze	"	54
3.7.	Tipologie strutturali	"	56
3.7.1.	Costruzioni in calcestruzzo armato.....	"	56
3.7.2.	Costruzioni in acciaio	"	56
3.7.3.	Costruzioni in legno.....	"	58
4.	CENNI DI DINAMICA STRUTTURALE	"	60
4.1.	Generalità.....	"	60
4.2.	Concetti elementari di equilibrio dinamico	"	60
	ESEMPIO 4.1. Determinazione del periodo proprio di un telaio ad 1 piano con traverso infinitamente rigido	"	65
4.3.	Oscillazioni libere e smorzate.....	"	66
4.4.	L'azione sismica e i suoi effetti	"	66
5.	DIAGRAMMI DI SPETTRO	"	69
5.1.	L'accelerazione sismica attesa al suolo	"	69
5.2.	Spettri di risposta in accelerazione	"	70
5.3.	Spettri di progetto	"	73
	ESEMPIO 5.1. Applicazione dello spettro elastico all'oscillatore semplice	"	73
5.4.	Periodo fondamentale di vibrazione T_1	"	75
	ESEMPIO 5.2. Determinazione del periodo fondamentale di un edificio con USCGS	"	75
	ESEMPIO 5.3. Determinazione del periodo fondamentale di un edificio con D.M. 14/01/1996.....	"	76
	ESEMPIO 5.4. Determinazione del periodo fondamentale di un edificio con Housner.....	"	76
	ESEMPIO 5.5. Determinazione del periodo fondamentale di un edificio con struttura in acciaio D.M. 14/01/2008	"	78
	ESEMPIO 5.6. Determinazione del periodo fondamentale di un edificio con struttura in calcestruzzo armato D.M. 14/01/2008 ...	"	78
5.5.	Comparazione dei valori di T_1	"	80
5.6.	Fattore di struttura	"	82
5.7.	Regolarità strutturale	"	83
5.8.	Utilizzo del foglio elettronico «Spettri-NTC».....	"	84
6.	DISTRIBUZIONE PLANIMETRICA DELL'AZIONE SISMICA	"	87
6.1.	Generalità.....	"	87
6.2.	Orizzontamenti infinitamente rigidi.....	"	88

6.3.	Osservazioni sulle forme dei solai.....	p.	88
6.4.	Funzione del solaio infinitamente rigido nella distribuzione delle azioni sismiche	"	89
	ESEMPIO 6.1. Ripartizione dell'azione sismica sui ritti.....	"	91
6.5.	Eccentricità fra baricentro delle masse e baricentro delle rigidezze.....	"	95
6.6.	Influenza dell'ipotesi di solaio infinitamente rigido nei modi di vibrare.....	"	96
6.7.	Determinazione delle rigidezze di un ritto con l'ausilio dei fogli elettronici.....	"	98
	ESEMPIO 6.2. Determinazione della rigidezza di un ritto	"	98
6.8.	Determinazione del baricentro delle masse con l'ausilio del foglio elettronico.....	"	99
	ESEMPIO 6.3. Determinazione del baricentro delle masse.....	"	99
6.9.	Determinazione del baricentro delle rigidezze con l'ausilio del foglio elettronico.....	"	102
	ESEMPIO 6.4. Determinazione del baricentro delle rigidezze.....	"	102
7.	DISTRIBUZIONE DELLE AZIONI SISMICHE LUNGO L'ALTEZZA DEGLI EDIFICI.....	"	106
7.1.	Il tagliante di base.....	"	106
	ESEMPIO 7.1. Determinazione del tagliante di base	"	106
7.2.	Distribuzione in altezza	"	107
7.3.	Le combinazioni di carico in condizione sismica (SLD e SLV).....	"	108
8.	STUDIO DEI TELAI	"	110
8.1.	Telai piani ad un grado di libertà	"	110
8.2.	Esempio di soluzione di un telaio in calcestruzzo armato.....	"	111
8.2.1.	Geometria e caratteristiche dei materiali	"	111
8.2.2.	Carichi e massa sismica	"	111
8.2.3.	Rigidezza del telaio nel piano xz.....	"	112
8.2.4.	Periodo di vibrazione lungo x.....	"	112
8.2.5.	Determinazione dello spettro di progetto orizzontale per SLD	"	113
8.2.6.	Determinazione dello spettro di progetto orizzontale per SLV.....	"	116
8.3.	Alcune considerazioni sul comportamento spaziale.....	"	118
8.4.	Studio delle sollecitazioni nei telai piani.....	"	121
8.4.1.	Generalità.....	"	121
8.4.2.	Condizioni di carico verticali	"	121
8.4.3.	Momenti sulle travi dovuti ai carichi verticali.....	"	122

8.4.4.	Momenti sui pilastri dovuti ai carichi verticali.....	p.	123
8.4.5.	Condizioni di carico orizzontale.....	"	124
8.4.6.	Tagli per condizioni di carico orizzontale	"	124
8.4.7.	Momenti sui pilastri per condizioni di carico orizzontale	"	125
8.4.8.	Momenti sulle travi per condizioni di carico orizzontale	"	127
8.4.9.	Sforzi normali sui pilastri	"	128
9.	ESEMPIO DI CALCOLO DI STRUTTURA IN CALCESTRUZZO		
	ARMATO INTELAIATA (ANALISI LINEARE STATICA).....	"	129
9.1.	Generalità.....	"	129
9.2.	Caratteristiche della costruzione e del sito di riferimento	"	130
9.3.	Diagrammi degli spettri di risposta in termini di accelerazione	"	131
9.4.	Carichi verticali	"	132
9.5.	Predimensionamento dei pilastri	"	133
9.6.	Predimensionamento delle travi	"	136
9.7.	Valutazione delle azioni sismiche (Analisi Lineare Statica).....	"	139
9.7.1.	Periodo proprio di vibrazione T_1	"	139
9.7.2.	Azioni sismiche taglianti ai vari livelli.....	"	142
9.7.3.	Prima stima dei tagli sui pilastri	"	147
9.8.	Organizzazione dei telai e sollecitazioni nei pilastri	"	148
9.9.	Sollecitazioni nelle travi	"	155
10.	ANALISI MODALI	"	157
10.1.	Generalità.....	"	157
10.2.	I modi di vibrare e loro combinazione.....	"	157
10.3.	Partecipazione dei modi di vibrare	"	161
10.4.	Modi di vibrare di strutture regolari	"	162
10.5.	Esempio di analisi modale	"	163
10.5.1.	Descrizione del modello	"	163
10.5.2.	Periodi e modi di vibrare, masse partecipanti.....	"	163
10.5.3.	Baricentri delle masse e baricentri delle rigidezze	"	167
10.5.4.	Tagliante globale in analisi modale e comparazione con analisi lineare statica.....	"	168
10.6.	Esempi di verifiche e confronti con il predimensionamento	"	169
10.6.1.	Pilastri.....	"	169
10.6.3.	Dettagli esecutivi delle travi.....	"	172
10.6.4.	Valori delle sollecitazioni sulle travi	"	173
10.6.5.	Verifiche per lo stato limite di danno.....	"	175
11.	ALTRI TIPI DI ANALISI SISMICHE.....	"	177
11.1.	Generalità.....	"	177

11.2. Analisi non lineare statica (pushover)	p. 177
11.3. Analisi cinematiche	" 180
12. MURATURE DI TAMPONAMENTO	" 182
12.1. Generalità.....	" 182
12.2. Determinazione delle azioni sismiche agenti in un pannello in quota.....	" 183
ESEMPIO 12.1.	" 183
12.3. Verifica a pressoflessione.....	" 185
ESEMPIO 12.2.	" 185
12.4. Verifica della connessione al telaio.....	" 186
ESEMPIO 12.3.	" 186
12.5. Il meccanismo di puntone diagonale all'interno dei telai.....	" 187
12.5.1. Indicazioni di norma.....	" 187
12.5.2. Modello di calcolo del meccanismo puntone-diagonale.....	" 187
12.6. Rigidezza di un telaio tamponato e implicazioni concettuali.....	" 188
ESEMPIO 12.4.	" 188
13. ELEMENTI NON STRUTTURALI	" 193
13.1. Danni sugli elementi non strutturali	" 193
13.2. Elementi non strutturali ed elementi secondari	" 195
13.3. Pareti, parapetti, mancorrenti.....	" 196
14. CONTENUTI E ATTIVAZIONE DELLA WEBAPP	" 197
14.1. Contenuti della WebApp.....	" 197
14.2. Requisiti hardware e software	" 197
14.3. Attivazione della WebApp.....	" 197
14.4. Assistenza tecnica sui prodotti Grafill (TicketSystem).....	" 198

PRESENTAZIONE

I terremoti in Italia rappresentano eventi che, purtroppo, si presentano con frequenze periodiche anche ravvicinate e causano danni ingenti al patrimonio immobiliare e all'economia, oltre che perdite di vite umane nei casi più disastrosi. La normativa antisismica del nostro territorio ha subito una sostanziale revisione a seguito dell'entrata in vigore della nuova mappa di pericolosità che ha sostituito la vecchia distinzione del territorio in zone con una discretizzazione puntuale dell'accelerazione sismica attesa. Conseguentemente si è diffuso un nuovo approccio alla progettazione antisismica attraverso una sostanziale modifica delle norme tecniche per le costruzioni.

A fronte di questo nuovo «*modus operandi*» anche i tecnici del settore che non sono propriamente degli strutturisti necessitano di conoscenze che orientino in modo corretto le loro scelte progettuali, spesso prese a monte dell'intero percorso che condurrà al confezionamento di un progetto attento e coerente alle tematiche antisismiche. Questo volume è, pertanto, indirizzato in particolar modo a costoro.

Lo scopo è quello di accompagnare il lettore alla comprensione dei concetti fondamentale della progettazione antisismica attraverso un percorso, per quanto possibile, semplice e discorsivo. L'opera è particolarmente indirizzata a chi vuole approcciarsi alla materia per la prima volta lasciando gli approfondimenti a fasi successive della sua formazione e su altri testi più specialistici.

Cionondimeno i concetti illustrati sono accompagnati con esempi di utilità professionale che consentono di comprendere immediatamente quali siano i risvolti pratici dei modelli teorici. Gli esempi sono selezionati in modo da rendere il lettore edotto del fatto che, in questa materia è molto importante cogliere l'*ordine di grandezza dei risultati* numerici.

Qui veniamo ad un ulteriore aspetto che preme sottolineare. La diffusione dei software di calcolo automatico strutturali ha comportato senza dubbio una velocizzazione delle elaborazioni numeriche consentendo la soluzione di enormi quantità di equazioni in modo quasi istantaneo. A volte però, mi capita di riscontrare errori grossolani nei cosiddetti calcoli strutturali. Errori dovuti essenzialmente alla perdita del controllo, proprio dell'ordine di grandezza dei risultati, da parte del calcolatore (inteso questa volta come «*persona che esegue il calcolo*»). Altre volte è sbagliato proprio il *modello di calcolo* che dà risultati non compatibili con la realtà fisica della struttura che intende rappresentare. Tornare a meditare sui concetti base, quindi, non è mai vano.

Veniamo ora ai contenuti dell'opera. Innanzitutto vi è un breve richiamo storico che illustra i primi approcci con la materia e l'evoluzione della normativa. Dal mio punto di vista

questo è sempre un buon modo per iniziare l'apprendimento di un tema complesso perché mette a fuoco in modo chiaro quali siano le necessità e gli scopi essenziali.

Molto spazio è stato dedicato alla descrizione qualitativa del comportamento sismico delle tipologie strutturali fondamentali: strutture in muratura portante e strutture a telaio. Capire bene ciò non è secondario e fa parte di quel bagaglio che lo strutturista e, in generale il progettista, deve avere per modellare in modo corretto una struttura all'elaboratore e non ottenere risultati fuori dalla realtà. Allo stesso scopo sono indirizzate le tematiche sviluppate intorno alle modalità di distribuzione delle azioni sismiche in pianta e in alzata degli edifici con l'esemplificazione di concetti quali baricentro delle masse, delle rigidità, eccentricità torsionali, ecc..

Una parte è dedicata alla spiegazione dell'utilizzo di alcuni strumenti base quali: il diagramma di spettro elastico. A cosa serve? Come si usa? Può essere utilizzato in modo semplice? A queste domande verrà data risposta anche attraverso l'illustrazione di esempi pratici. Sono inoltre illustrati i concetti base che governano le analisi lineari statiche, le analisi modali e le analisi cinematiche. In particolar modo ampio spazio è stato dedicato al calcolo manuale semplificato di una ossatura in c.a. con predimensionamento di travi e pilastri e, infine, le tematiche vengono estese anche agli elementi non strutturali e agli impianti. Al volume sono allegati alcuni fogli elettronici di calcolo di cui si dà spiegazione per un facile utilizzo.

Spero che il lettore si appassioni alla materia.

Buona lettura.

Marco Boscolo Bielo

CAPITOLO 1

CENNI STORICI SU TEORIE, PRINCIPI COSTRUTTIVI E NORME

1.1. Introduzione

La progettazione antisismica è frutto di una sintesi di molte discipline che investono in principal modo la dinamica delle strutture, la sismologia, la sismografia, l'elaborazione statistica dei dati, nonché le tradizionali materie afferenti alla statica, scienza e tecnica delle costruzioni. Questa condizione multidisciplinare offre, per così dire, la base delle conoscenze scientifiche le quali, per loro stessa natura, sono in continua evoluzione. Allo strutturista, fortunatamente o sfortunatamente, a seconda dei punti di vista, spetta l'onere di una loro corretta applicazione. In questa sua mansione egli è coadiuvato da norme tecniche che rappresentano una sorta di traduzione e sintesi del complesso delle conoscenze in materia strutturale quali: algoritmi di calcolo, regole tecnico-pratiche, principi di ordine generale, principi di applicabilità, ecc..

La presente trattazione si prefigge lo scopo di «iniziare» il lettore alla conoscenza dei principi che regolano la progettazione antisismica. Nel far ciò rinunceremo a rielaborare un testo rigoroso di dinamica strutturale e di meccanica razionale¹ prediligendo un approccio diverso, certamente meno rigoroso, forse più concettuale, ma speriamo semplice.

1.2. Origini dei criteri costruttivi antisismici

Senza dubbio il tema della ricerca delle cause dei terremoti ha appassionato l'uomo fin dall'antichità. L'interesse per lo studio di questi fenomeni causò, probabilmente, la morte di Plinio il Vecchio per essersi troppo avvicinato alle esalazioni conseguenti all'eruzione del Vesuvio del 79 a.C. Anche il filosofo Immanuel Kant si interessò del «*fuoco sotterraneo*». A seguito del terremoto di Lisbona, avvenuto il giorno 1 novembre 1755, egli scriveva: «*Lo scotimento del terreno sposta gli edifici dalla loro verticale. Ora, se una fila di case è fatta oscillare da est ad ovest, si ha che, non solo ogni casa ha da mantenere il suo peso ma anche quelle di occidente premono su quelle di oriente precipitandovi sopra infallibilmente; mentre se questa fila è mossa trasversalmente, quando ogni casa ha da mantenere solo il suo equilibrio in circostanze analoghe deve verificarsi un minor danno. La sventura di Lisbona sembra quindi acconsentita dalla posizione che essa ha per tutta la sua estensione lungo la riva del Tago*»².

¹ Testi ai quali rimandiamo per una analisi e conoscenza approfondita delle tematiche.

² *Scritti sui terremoti*, 1756.

In queste considerazioni il filosofo mette in evidenza, dunque, l'interazione di una schiera di edifici costruiti senza soluzione di continuità, evidenziando la differenza di comportamento delle azioni orizzontali lungo la schiera o trasversalmente ad essa.

Il terremoto di Lisbona diede origine a una serie di norme pratiche da seguire per la costruzione degli edifici. Tuttavia il primato relativo alla definizione dei primi codici normativi in materia antisismica afferenti a disposizioni tecnico-costruttive per rendere più efficace il comportamento degli edifici di fronte al terremoto, spetta però, probabilmente all'Italia e in particolar modo il Regno di Sicilia. A seguito del terremoto del gennaio 1693 che colpì la zona di Catania e della Valle di Noto fu emanato un documento intitolato *Consiglio ed Istruzioni fatte dal Vicario Generale Duca, che fu di Camastro, col voto dell'Ill. mo Senato, e Corpo Ecclesiastico, per la nuova riedificazione della città* (28 giugno 1694).

Un secolo dopo un nuovo evento sismico di grande rilievo interessò il territorio calabro-messinese a partire dal febbraio 1783. Il Regno di Napoli emanò allora le *Norme Tecniche ed edilizie per ricostruire le case distrutte* (20 marzo 1784).

I primi criteri costruttivi antisismici, compresi quelli portoghesi, sono generalmente rivolti ad assicurare ai fabbricati una struttura intelaiata lignea (*sistema a baraccato*), opportunamente controventata mediante diagonali o croci di S. Andrea, sulla quale venivano realizzati i tamponamenti che potevano essere a loro volta in legno o in muratura (figura 1.1).

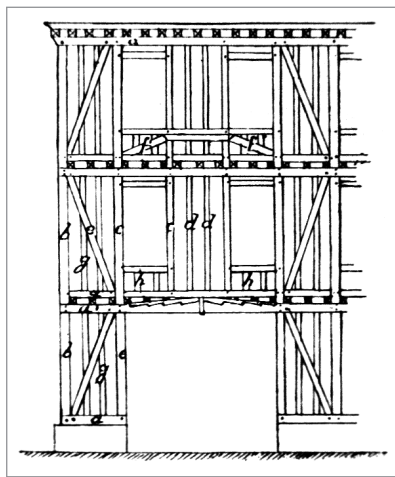


Figura 1.1. Esempio di struttura a baraccato (Masciari-Genoese Francesco, *Trattato di costruzioni antisismiche*, Milano, Ulrico Hoepli, 1915)

Il sistema *baraccato* è l'antesignano del concetto costruttivo ad *ossatura portante*, il quale scinde la funzione tra elementi portanti ed elementi portati, come avviene, ad esempio, nelle moderne tipologie a telai in calcestruzzo armato o metallici. Sul versante opposto, invece, nelle costruzioni in *muratura portante*, questa distinzione viene meno.

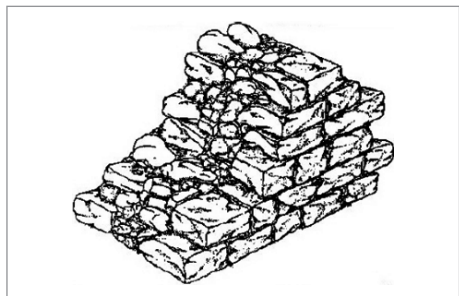
Al terremoto di Norcia del 22 agosto 1859 seguì il *Regolamento Edilizio da osservarsi per le fabbriche nel Comune di Norcia*. È interessante notare come in questo caso venga

EDIFICI IN MURATURA PORTANTE

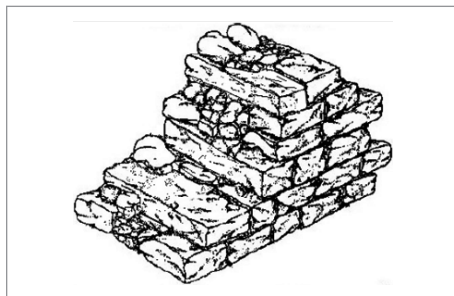
2.1. La muratura

Gli edifici in muratura portante costituiscono una fra le tipologie più diffuse nel nostro territorio, soprattutto per quanto concerne l'architettura storica. Sostanzialmente si tratta di sistemi strutturali in cui i carichi degli orizzontamenti sono trasmessi ad elementi verticali (pannelli murari) che si sviluppano lungo una direttrice prevalente (lunghezza del muro).

Nella normativa tecnica italiana le strutture in muratura sono definite nel seguente modo: *«costruzioni con struttura portante verticale realizzata con sistemi di muratura in grado di sopportare azioni verticali ed orizzontali, collegati tra di loro da strutture di impalcato, orizzontali ai piani ed eventualmente inclinate in copertura, e da opere di fondazione».*



Sezione muraria con nucleo incoerente priva di elementi di collegamento (diàtoni) tra i due paramenti.



Sezione muraria con abbondante presenza di elementi di collegamento (diàtoni) tra i due paramenti.



Presenza di ricorsi continui e discontinui in mattoni pieni, in presenza di pietrame discretamente squadrato



Presenza di ricorsi in conglomerato cementizio.

Figura 2.1. Alcuni esempi di murature storiche

Come è noto la muratura è un materiale composito costituito dall'assemblaggio di elementi, che possono essere naturali (pietre erratiche, a spacco, sbazzate o squadrate) o artificiali (laterizi). Questi, generalmente, sono «*tenuti insieme*» da un legante (malta), ma in alcuni casi possono essere posati «*a secco*», ovvero senza legante. Nell'edilizia moderna sono state messe a punto anche tipologie di «*muratura armate*».

Le variabili caratteristiche di una muratura sono:

- materiale costituente gli elementi (pietra, laterizio, terra cruda, sassi, ecc.);
- legante (malta, calce, miscele varie);
- eventuale armatura;
- dimensioni e la forma degli elementi;
- numero dei filari (ad una testa, a due teste, ecc.);
- tecnica di assemblaggio (a secco o con giunti di malta);
- tessitura, ovvero la disposizione geometrica degli elementi nel paramento murario;
- ulteriori dettagli (listatura, uso di scaglie, presenza di diatoni, presenza di camera interna, ecc.).

La risposta meccanica delle murature dipende da tutte queste variabili. I mattoni, siano essi in laterizio o di altro materiale, hanno in genere un comportamento elasto-fragile, con una resistenza a trazione sensibilmente minore rispetto a quella a compressione e che nei calcoli viene trascurata. Anche la malta presenta un comportamento elasto-fragile in trazione, con resistenza molto inferiore a quella degli elementi ed, in assoluto, molto bassa; in compressione e taglio il suo comportamento è duttile e fortemente non lineare. La risposta meccanica dei giunti di malta è influenzata anche dall'attrito.

Le caratteristiche meccaniche della muratura dipendono non solo dai parametri di resistenza e deformabilità dei materiali costituenti, ma anche dai loro valori relativi (in particolare, i diversi moduli elastici degli elementi e della malta).

Nell'edilizia storica un muro, a volte, può essere costituito da combinazioni di blocchi di varia natura. In generale, però, gli elementi sono disposti per strati successivi, in genere ad andamento orizzontale; ciò determina la formazione di giunti principali continui e di giunti secondari, al contatto tra due elementi adiacenti, discontinui in quanto opportunamente sfalsati (ingranamento).

2.2. L'ingranamento

L'orientamento dei giunti principali è in genere ortogonale alle sollecitazioni di compressione prevalenti, al fine di ottimizzare il comportamento della muratura sotto carichi di esercizio. La giusta sovrapposizione dei corsi orizzontali, secondo uno sfasamento di mezzo mattone, oltre che indice di una fattura a regola d'arte, garantisce un corretto comportamento meccanico del pannello murario e una distribuzione dei carichi che si diffonde «*a triangolo*» nei casi di azioni puntuali (figura 2.2).

Tuttavia, i giunti principali diventano potenziali piani di discontinuità, con conseguenze sulla resistenza del solido murario, in presenza di sollecitazioni di trazione e taglio dovute

EDIFICI INTELAIATI

3.1. Generalità

Gli edifici intelaiati sono sistemi strutturali organizzati su travi e pilastri che compongono *telai portanti* e che al giorno d'oggi vengono organizzati secondo due direzioni principali di pianta. In passato però non era infrequente l'organizzazione strutturale secondo una sola direzione (figura 3.1).

I materiali costruttivi utilizzati possono essere:

- calcestruzzo armato;
- calcestruzzo armato precompresso;
- profilati metallici;
- legno.

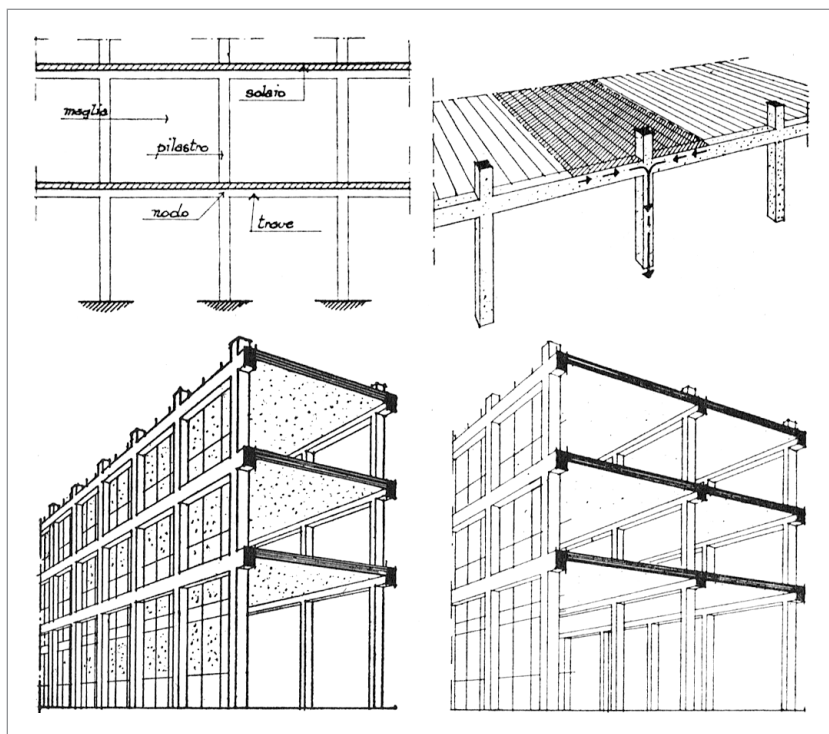


Figura 3.1. Esempio di edificio intelaiato in calcestruzzo armato con telai orditi in una sola direzione

Alle travi è affidato il compito di portare i carichi verticali dei solai e trasmetterli ai pilastri. Questi ultimi, rispetto al «*contenimento*» delle azioni sismiche, hanno una importanza fondamentale e sono gli elementi dai quali dipende in larga misura il collasso della costruzione. Tuttavia ai fini del comportamento dei telai sotto azione sismica contribuiscono anche le modalità di collegamento delle travi ai pilastri e la rigidezza delle stesse.

Ulteriore elemento fondamentale è dato dalla rigidezza degli orizzontamenti che, secondo la vigente normativa tecnica, devono essere dotati di rigidezza e resistenza tali da consentire la ridistribuzione delle forze orizzontali tra i diversi sistemi resistenti a sviluppo verticale.

3.2. La disposizione della struttura secondo due direzioni principali di pianta

La diffusione della doppia orditura dei telai portanti, rispetto all'orditura in una sola direzione, è cresciuta in relazione alla consapevolezza di un maggior cimento del sistema spaziale rispetto alle azioni sismiche, le quali, a priori non hanno una direzione nota e, anzi, ad esempio, rispetto alla geometria della pianta del fabbricato possono essere orientate secondo direzioni non coincidenti con quelle principali.

Organizzare, dunque, una intelaiatura secondo due direzioni di pianta significa predisporre il sistema strutturale ad assorbire le *componenti vettoriali* delle azioni sismiche (orizzontali) secondo le direzioni prefissate (figura 3.2).

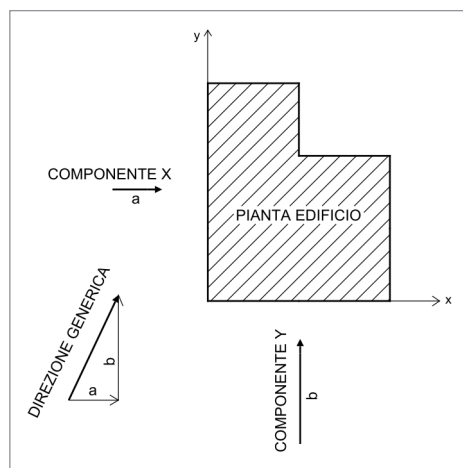


Figura 3.2. Componenti vettoriali della generica azione sismica lungo le due direzioni principali di pianta

Risulta quindi chiaro la motivazione per cui, rispetto al passato, nell'attuale normativa tecnica i criteri generali di progettazione impongono che le costruzioni debbano essere dotate di sistemi strutturali che garantiscano rigidezza, resistenza e duttilità nei confronti delle due componenti orizzontali delle azioni sismiche, tra loro ortogonali. Ovviamente ciò vale per tutti i sistemi strutturali, incluse le murature portanti.

CENNI DI DINAMICA STRUTTURALE

4.1. Generalità

Al fine di comprendere i concetti fondamentali attinenti all'analisi dinamica delle strutture nel presente capitolo vengono presentati, in modo semplificato, alcuni aspetti riferiti ad un oscillatore semplice. Ovviamente per una approfondita conoscenza si rimanda a testi specifici della materia.

4.2. Concetti elementari di equilibrio dinamico

Supponiamo di far subire ad un oscillatore semplice, quale quello rappresentato in figura 4.1a, uno spostamento orizzontale e poi di lasciarlo libero alle sue oscillazioni (figura 4.1b). L'equilibrio dinamico è dato dall'equazione:

$$m a + k x = 0 \quad (4.1)$$

dove.

- m rappresenta la massa dell'oscillatore agente in sommità;
- a rappresenta l'accelerazione a cui la massa m è soggetta a seguito del moto oscillatorio;
- k è la rigidezza dell'oscillatore;
- x sono gli spostamenti che l'oscillatore compie nel tempo.

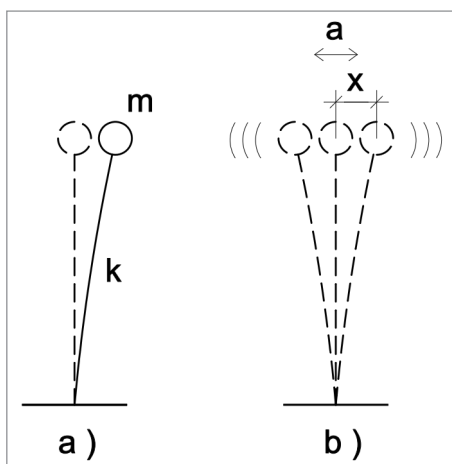


Figura 4.1. Schema dell'oscillatore semplice

La (4.1) è valida se l'oscillatore è costituito da un materiale a comportamento elastico-lineare, in condizioni di oscillazioni non smorzate¹ e in assenza di forze esterne². Il valore dell'accelerazione a della massa m varia col variare del tempo, così come lo spostamento x . In tal senso l'indicazione in formula diventerebbe.

$$m a_{(t)} = -k x_{(t)} \quad (4.2)$$

La (4.2) rappresenta la condizione che ad ogni istante, allo spostamento della massa m , si oppone l'elemento verticale rappresentato dall'asta dell'oscillatore con una forza di tipo statico:

$$F = k x \quad (4.3)$$

diretta con verso opposto a quella del moto di m .

L'accelerazione è anche la derivata seconda della funzione $x_{(t)}$, in simboli si scrive: $\ddot{x}_{(t)}$. Con questa nuova simbologia e portando tutto a sinistra del segno di uguaglianza, la (4.2) diventa:

$$m \ddot{x}_{(t)} + k x_{(t)} = 0 \quad (4.4)$$

che rappresenta una equazione differenziale del secondo ordine nell'incognita x .

Anche un sistema costituito da un insieme di ritti e da un traverso infinitamente rigido si comporta come un oscillatore semplice e, nelle stesse ipotesi fatte in precedenza vale comunque la (4.4), con l'avvertenza che la rigidezza dell'intero sistema è data dalla somma delle rigidezze dei singoli ritte. Per ciascun ritto che abbia il comportamento deformativo a taglio illustrato in figura 4.2, nell'ipotesi di comportamento elastico lineare, la rigidezza k vale:

$$k = \frac{12EJ}{H^3} \quad (4.5)$$

Per l'intero telaio piano, in cui sono presenti 3 ritte, la rigidezza totale k è:

$$k = 3 \frac{12EJ}{H^3}$$

dove:

- E è il modulo elastico del materiale;
- J è il momento di inerzia del singolo ritto rispetto all'asse orizzontale ortogonale al moto lungo x ;
- H è l'altezza.

¹ Ovvero il moto di oscillazione della massa si protrae all'infinito (oscillazioni libere).

² Dette anche «forzanti».

DIAGRAMMI DI SPETTRO

5.1. L'accelerazione sismica attesa al suolo

Nel capitolo 1 si è anticipato che l'attuale normativa tecnica italiana suddivide il territorio nazionale in 10.751 capisaldi di riferimento ai quali vengono attribuiti alcuni *parametri* necessari alla valutazione di azioni equivalenti agli effetti determinati dal sisma sulle costruzioni. Detti parametri sono:

- a_g = accelerazione massima attesa al suolo,
- F_o = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale,
- T_c^* = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Tra di essi, soffermiamo la nostra attenzione sul primo. L'accelerazione massima attesa al suolo a_g rappresenta il valore massimo che ci si attende in un determinato sito di progetto. A volte viene individuata anche con il termine PGA, che significa «*peak ground acceleration*» e in forma adimensionalizzata, ovvero normalizzata in g (accelerazione gravitazionale pari a $9,81 \text{ m/s}^2$). Ad esempio:

$$a_g = 0,25$$

significa:

$$\frac{a}{9,81 \text{ m/s}^2} = 0,25 \Rightarrow a = 0,25 \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 2,4525 \text{ m/s}^2 \quad (5.1)$$

Spesso si tende ad arrotondare il valore di g a 10 m/s^2 , per cui la valutazione di a è più immediata:

$$\frac{a}{10 \text{ m/s}^2} = 0,25 \Rightarrow a = 0,25 \times 10 \text{ m/s}^2 = 2,5 \text{ m/s}^2 \quad (5.2)$$

Le norme tecniche contengono un allegato¹ nel quale sono riportati i valori a_g , F_o , T_c^* , in funzione delle coordinate geografiche di riferimento e di alcuni periodi di ritorno T_R dell'evento sismico.

Un esempio di estratto dell'allegato è rappresentato in tabella 5.1.

¹ Si tratta dell'Allegato B alle NTC.

Tabella 5.1. Estratto dell’Allegato B delle Norme Tecniche per le Costruzioni

		SLO			SLD						SLV			SLC		
		$T_R = 30$			$T_R = 50$			$T_R = 101$			$T_R = 475$			$T_R = 2475$		
Lon.	Lat.	a_g	F_o	T_c^*	a_g	F_o	T_c^*	a_g	F_o	T_c^*	a_g	F_o	T_c^*	a_g	F_o	T_c^*
14,756	41,378	0,605	2,40	0,28	0,792	2,37	0,31	1,127	2,38	0,33	2,424	2,33	0,38	4,752	2,36	0,43

Le prime due colonne a sinistra rappresentano le coordinate geografiche (longitudine, latitudine) del sito. In successione sono poi riportate le terne a_g , F_o , T_c^* , in funzione di una serie di T_R . In alto sono poi riportate alcune condizioni che rappresentano lo stato di servizio della costruzione per le quali si vuole ottenere la funzionalità della costruzione in termini di stabilità e di resistenza. Essi sono così definiti²:

- **Stato Limite di Operatività (SLO)**: a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d’uso significativi;
- **Stato Limite di Danno (SLD)**: a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidezza nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell’interruzione d’uso di parte delle apparecchiature;
- **Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV)**: a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidezza nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidezza per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- **Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC)**: a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

5.2. Spettri di risposta in accelerazione

Lo spettro di risposta elastico in accelerazione è fra gli strumenti che le norme tecniche forniscono per determinare le azioni sismiche agenti su una struttura. Esso, dal punto di vista analitico, è rappresentato da una funzione $S_e(T)$ che viene costruita per intervalli e che descrive un grafico del tipo rappresentato in figura 5.1.

² Nel metodo semiprobabilistico agli stati limite, lo SLO e lo SLD fanno parte degli stati limite di esercizio (SLE), mentre lo SLV e lo SLC afferiscono agli stati limite ultimi (SLU).

DISTRIBUZIONE PLANIMETRICA DELL'AZIONE SIMICA

6.1. Generalità

I *solai* (o *orizzontamenti* o *impalcati*) sono elementi strutturali che svolgono principalmente due tipi di funzioni:

- 1) **sostegno dei carichi verticali** (pavimenti, mobili, persone, ecc.) e trasferirli agli elementi portanti verticali (pilastri, murature, ecc.);
- 2) **distribuzione delle azioni orizzontali** (vento, azioni sismiche, ecc.) sugli elementi resistenti verticali.

Questa seconda funzione risulta di fondamentale importanza per quanto riguarda il comportamento sismico di una costruzione ed è assicurata quando vi siano le condizioni affinché il comportamento del solaio possa definirsi *infinitamente rigido* nel proprio piano (comportamento *a diaframma*).

Nell'analisi globale dell'edificio la ripartizione delle azioni orizzontali tra le diverse pareti dipende dalla rigidezza dei solai nel proprio piano e dall'efficacia dei loro collegamenti con le murature; per la rigidezza dei solai si può fare riferimento a tre situazioni:

- solai modellabili come infinitamente rigidi;
- solai modellabili con rigidezza finita (in grado di vincolare le pareti e di ripartire le sollecitazioni sismiche);
- solai con rigidezza trascurabile (inadeguati a ridistribuire le azioni orizzontali tra le pareti).

Nel caso di solai infinitamente rigidi e ben collegati alle pareti d'ambito è consentita la ripartizione delle azioni orizzontali in base alla capacità di resistenza, alla rigidezza e alla posizione in pianta delle varie pareti. Nel caso di solai di rigidezza trascurabile ciascuna parete può essere verificata per le azioni che le competono direttamente per aree di influenza dei solai a essa vincolati, tenendo conto, sempre per area di influenza, di quelle ad essa trasmesse dalle pareti investite ortogonalmente al proprio piano. Nella situazione intermedia tra questi due casi limite, ovvero in presenza di solai con rigidezza finita, la risposta può essere ottenuta inserendo nel modello della costruzione le caratteristiche meccaniche di ciascun solaio orizzontale, ove ragionevolmente identificabili; in questo caso, i solai contribuiscono a prevenire il collasso prematuro delle pareti più deboli e le connessioni tra solai e pareti risultano, in genere, meno sollecitate rispetto al caso di solai infinitamente rigidi.

In via approssimata e in alternativa alla modellazione esplicita dei diaframmi, sulla base di opportune considerazioni è possibile riferirsi ai casi limite di analisi con solai infinitamente rigidi e analisi per singole pareti.

Nei casi di edifici articolati (in particolare con porzioni realizzate in epoche successive) e in tutti i casi nei quali mancano adeguate connessioni tra solai e pareti, la ridistribuzione delle azioni sismiche è soggetta ad incertezze; al riguardo le coperture lignee a falde devono essere considerate con particolare attenzione a causa delle loro difficoltà di connessione con le murature.

Quando la costruzione, per la presenza di orizzontamenti di rigidezza trascurabile o di una maglia muraria diradata e/o non sufficientemente connessa, non manifesta un chiaro comportamento d'insieme, la verifica sismica globale può essere svolta attraverso un insieme esaustivo di verifiche locali su macro-elementi, purché la totalità delle forze sismiche sia coerentemente ripartita sugli elementi considerati e si tenga eventualmente conto delle forze che si assume vengano scambiate tra i diversi sottosistemi strutturali.

Rientrano in queste situazioni, ad esempio, le grandi chiese o gli edifici estesi di geometria complessa, privi di efficaci e diffusi sistemi di collegamento tra le diverse porzioni, caratterizzati da numerosi modi di vibrazione locali.

6.2. Orizzontamenti infinitamente rigidi

Stanti le disposizioni della normativa tecnica, nelle **nuove costruzioni**, gli orizzontamenti possono essere considerati infinitamente rigidi nel loro piano a condizione che:

- 1) siano realizzati in calcestruzzo armato;
- 2) siano realizzati in latero-cemento con soletta in c.a. di almeno 40 mm di spessore;
- 3) siano realizzati in struttura mista con soletta in cemento armato di almeno 50 mm di spessore, ad esempio solai in legno con soletta collaborante in c.a, solai in acciaio-calcestruzzo con soletta collaborante in c.a. In tal caso la soletta deve essere collegata da connettori a taglio opportunamente dimensionati agli elementi strutturali in acciaio o in legno, purché le aperture presenti non ne riducano significativamente la rigidezza.

Per quanto concerne gli **edifici esistenti**, le norme concedono più elasticità consentendo di considerare infinitamente rigidi nel loro piano quei solai per i quali gli spostamenti orizzontali massimi in condizioni sismiche non superano per più del 10% quelli calcolati con l'assunzione di piano rigido.

6.3. Osservazioni sulle forme dei solai

Da un punto di vista puramente qualitativo la forma planimetrica di un impalcato può dare alcune significative informazioni in relazione alla sua rigidezza.

Nel caso di piante in cui siano presenti sensibili restringimenti (figura 6.1a), forature (figura 6.1c) o soluzioni di continuità, l'ipotesi di indeformabilità potrebbe essere non verificata anche quando siano soddisfatte le condizioni di cui al precedente paragrafo.

Ad esempio nella zona più *debole* (tratteggiata) di figura 6.1a, e specie per eccentricità notevole fra baricentro delle masse e delle rigidezze, possono verificarsi spostamenti relativi

DISTRIBUZIONE DELLE AZIONI SISMICHE LUNGO L'ALTEZZA DEGLI EDIFICI

7.1. Il tagliante di base

Sia F_h , l'azione sismica complessiva che agisce su un edificio in una data direzione (e per una data combinazione di carico). In generale, come detto ai capitoli precedenti, si attribuiscono due direzioni principali ortogonali parallele alle direzioni principali della pianta dell'edificio. Per l'equilibrio alla traslazione orizzontale, la base dell'edificio reagisce orizzontalmente con valore eguale e contrario a F_h . Si definisce, pertanto, **tagliante di base** (o anche tagliante globale), l'azione sismica che agisce complessivamente (alla base) dell'edificio in una data direzione.

In base alla normativa tecnica vengono combinate sempre due condizioni principali che considerano il 100% dell'azione sismica in una data direzione, combinata al 30% di quella relativa alla direzione principale ortogonale, per tutti i versi possibili (*cfr.* paragrafo 7.3).

ESEMPIO 7.1. Determinazione del tagliante di base

Si consideri l'edificio di figura 7.1, per il quale si possa ipotizzare:

- una regolarità di pianta;
- regolarità di altezza;
- comportamento dei solai infinitamente rigido.

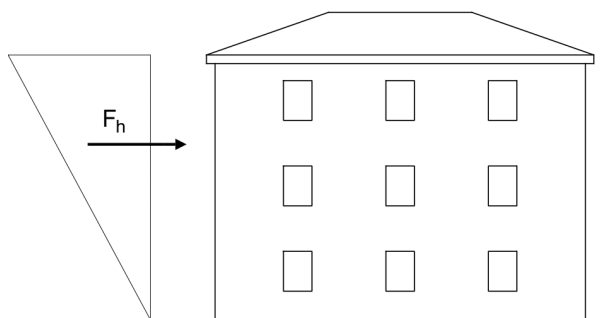


Figura 7.1. Schema dell'edificio e distribuzione in altezza dell'azione sismica

Si supponga inoltre che la massa sismica gravitazionale sia complessivamente 220 tonnellate. Sia nota inoltre la risposta di spettro $S_d = 0,34$ nelle due direzioni principali di pianta. Si determini il valore del tagliante di base F_h .

In relazione alle indicazioni di cui al Capitolo 5 si ha, per la concomitanza delle ipotesi a), b), c):

$$F_{h(x,y)} = 0,34 \times 220 \text{ t} = 74,8 \text{ t} \quad (7.1)$$

Poiché, la risposta di spettro è uguale per le due direzioni di pianta x e y, l'azione contemporanea da considerare è:

$$F_{h(x)} = \pm 74,8 \text{ t}; F_{h(y)} = \pm 0,3 \times 74,8 \text{ t} = \pm 22,44 \text{ t}$$

$$F_{h(x)} = \pm 22,44 \text{ t}; F_{h(y)} = \pm 74,8 \text{ t}$$

7.2. Distribuzione in altezza

Stabilito il valore del tagliante, come indicato nel paragrafo 7.1, resta da determinare come l'azione globale si distribuisca lungo l'altezza dell'edificio. Esistono vari modelli di calcolo che consentono di dare risposte, anche convenzionali, al problema. Nel caso in cui il comportamento dinamico del sistema strutturale si basi sul primo modo di vibrare (*cf.* paragrafo 6.6) l'andamento delle azioni può assumere una distribuzione proporzionale agli spostamenti del primo modo. In tali circostanze si ha il modello relativo all'*analisi statica lineare*.

L'entità della forza totale F_h da applicare al sistema (tagliante di base) si ottiene dall'ordinata dello spettro di progetto corrispondente al periodo T_1 e applicando la successiva relazione (7.2). La distribuzione delle azioni F_i ai vari livelli – determinate con la (7.3) – segue la forma del modo di vibrare principale nella direzione in esame, valutata in modo approssimato (figura 7.2).

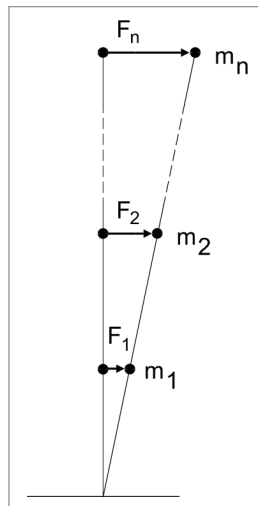


Figura 7.2. Forze associate al primo modo di vibrare linearizzato

In simboli si ha:

$$F_i = \frac{F_h \cdot z_i \cdot W_i}{\sum z_j \cdot W_j} \quad (7.2)$$

dove:

$$- F_h = S_d(T_1) W \lambda / g \quad (7.3)$$

STUDIO DEI TELAI

8.1. Telai piani ad un grado di libertà

Inizieremo lo studio considerando innanzitutto i telai piani ad un grado di libertà che, per la loro semplicità di trattazione, forniscono le indicazioni concettuali per comprendere, poi, situazioni più complesse.

I telai piani ad un grado di libertà sono caratterizzati da un'unica possibilità di spostamento nel piano orizzontale del traverso (ipotizzato) rigido. Il modello prescinde, dunque, dalla possibilità di spostamento verticale dei ritri dovuta agli allungamenti o accorciamenti elastici conseguenti a compressione o trazione ed inoltre non considera la possibilità di rotazione del traverso che implicherebbe, appunto, allungamenti o accorciamenti nei ritri.

Lo studio di alcuni casi spaziali può essere ricondotto a quello di telai piani. Ad esempio in figura 8.1 si riporta una ossatura a pianta rettangolare, costituita da 6 pilastri e da un solaio in laterocemento, simmetrica rispetto ai due assi principali di pianta.

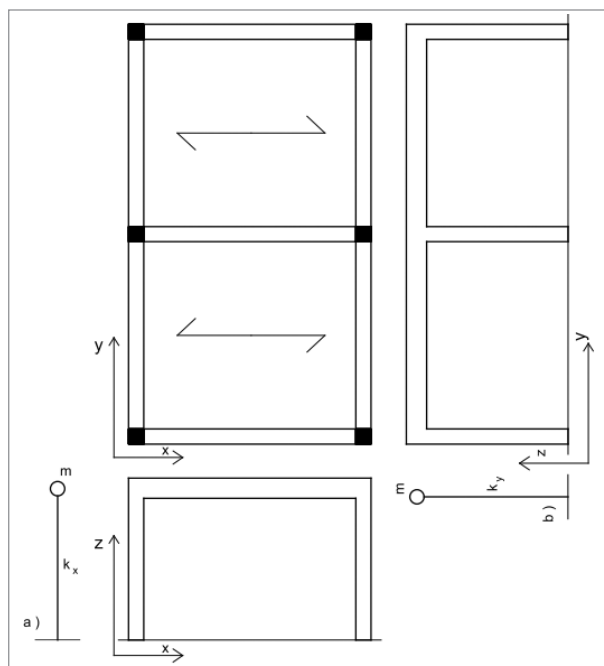


Figura 8.1. Scomposizione di un telaio spaziale in due telai piani e, a loro volta, in oscillatori semplici a) e b) lungo le direzioni x e y

Ai fini degli spostamenti lungo gli assi x e y , e dunque prescindendo dalla rotazione dell'impalcato rispetto all'asse verticale z , il sistema spaziale può essere scomposto mediante due telai piani le cui rigidezze dei ritti lungo x e y valgono rispettivamente:

$$k_x = 6 \times 12 E J_y / H^3 \quad (8.1)$$

$$k_y = 6 \times 12 E J_x / H^3 \quad (8.2)$$

8.2. Esempio di soluzione di un telaio in calcestruzzo armato

8.2.1. Geometria e caratteristiche dei materiali

Il telaio in calcestruzzo armato sia caratterizzato dalla geometria illustrata in figura 5.2 e caratteristiche dei materiali di seguito riportate:

- Asse // al piano telaio: x
- Asse verticale: z
- Asse $\perp$ al piano telaio: y
- Sezione pilastri: $b_x \times b_y = 40 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$
- Altezza pilastri ai nodi: $H = 350 \text{ cm}$
- Sezione trave: $b_x \times b_z = 30 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$
- Numero campate: 2
- Luci campate ai nodi: 400 cm
- Modulo elastico c.a.: 314.750 daN/cm^2 (cls tipo C25/30)

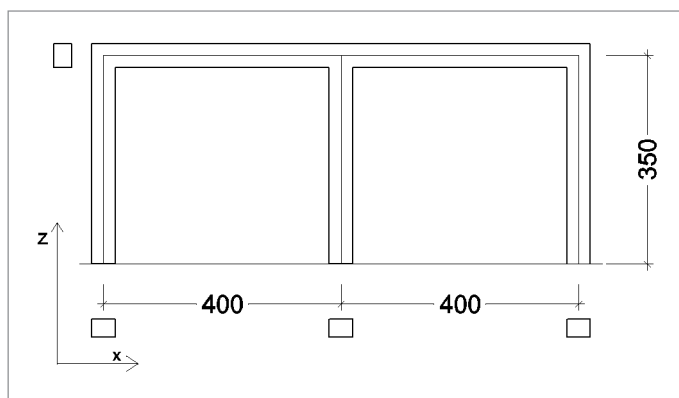


Figura 8.2. Schema del telaio piano in calcestruzzo armato

8.2.2. Carichi e massa sismica

I carichi sono determinati come valori nominali riferiti agli interassi di calcolo della struttura.

CAPITOLO 9

ESEMPIO DI CALCOLO DI STRUTTURA IN CALCESTRUZZO ARMATO INTELAIATA (ANALISI LINEARE STATICA)

9.1. Generalità

In questo capitolo, attraverso alcuni calcoli semplificati, che potremmo definire di predimensionamento, vengono illustrati alcuni aspetti relativi alla progettazione di un edificio residenziale con struttura portante in calcestruzzo armato e tamponamenti in laterizio.

Lo scopo è quello di cogliere alcuni aspetti concettuali della progettazione antisismica e, cosa non secondaria, di avere sotto controllo l'ordine di grandezza dei numeri in gioco. Quest'ultimo aspetto è di fondamentale importanza se si pensa al fatto che è un modo per poter giudicare della bontà dei risultati riportati nelle numerose elaborazioni che ormai siamo abituati ad ottenere a valle di complessi calcoli eseguiti dai software strutturali.

L'edificio presenta una pianta a forma di «L» (vedi figure 9.1 e 9.2), quindi non simmetrica, e si erge su 4 piani fuori terra. I solai sono realizzati in laterocemento con spessore complessivo di 25 cm (dei quali 5 cm di soletta armata).

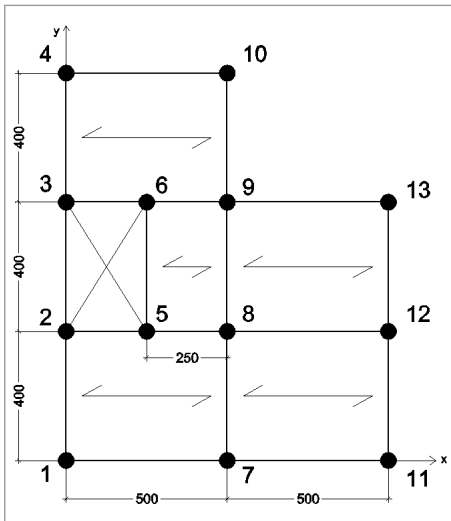


Figura 9.1. Schema di pianta

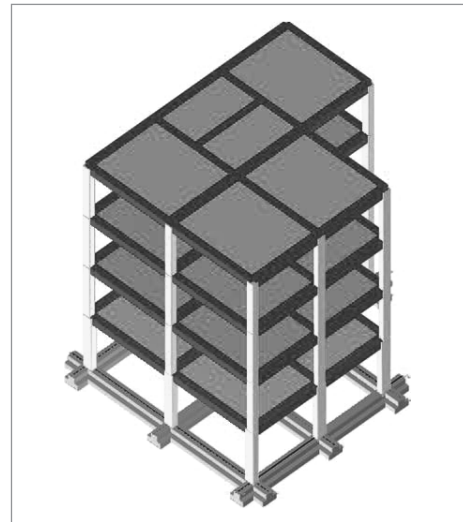


Figura 9.2. Schema tridimensionale della struttura

Secondo le disposizioni della normativa tecnica nazionale i solai in laterocemento di questo tipo possono essere considerati «*infinitamente rigidi*», salvo accurate verifiche da effettuare in condizioni particolari quali: forature eccessive, asimmetrie geometriche di

pianta con forti restringimenti localizzati, ecc.. Il manto di copertura, avente una pendenza di circa il 30%, è impostato sull'ultimo solaio di sommità mediante un sistema di muretti in laterizio e tavelloni, considerato ai soli effetti della massa.

Con questo esempio prendiamo in considerazione, quindi, i primi aspetti che devono considerarsi nell'approccio progettuale antisismico:

- orditura dei solai;
- organizzazione dei telai portanti;
- sezioni ed orientamento dei pilastri;
- tipologia di fondazione;
- collocazione delle scale, ecc..

9.2. Caratteristiche della costruzione e del sito di riferimento

Si ipotizzano i parametri sismici riportati in tabella 9.1, corrispondenti ad una zona sismica amministrativa 2.

Tabella 9.1. Parametri a_g , F_o , T_C^* a seconda degli stati limite

Stato limite	P_{VR}	T_R (anni)	a_g / g	F_o	$T_C^* (s)$
SLO	81%	30	0,0566	2,472	0,240
SLD	63%	50	0,0753	2,469	0,254
SLV	10%	475	0,2175	2,424	0,330
SLC	5%	975	0,2925	2,435	0,340

Nella tabella 9.2 sono riassunti i vari parametri caratterizzanti il sito, il diagramma di spettro e l'edificio.

Tabella 9.2. Caratteristiche sismiche della costruzione

Descrizione	Valore
Tipo di costruzione	2
V_N	50 anni
Classe d'uso	II
V_R	50 anni
Categoria del suolo	B: sabbie dense o argille consistenti
Categoria topografica	T_1
$S_S (SLD)$	1,200
$T_B (SLD)$	0,123 s
$T_C (SLD)$	0,368 s
$T_D (SLD)$	1,901 s
$S_S (SLV)$	1,190 s

[segue]

ANALISI MODALI

10.1. Generalità

Nel Capitolo 4 sono state illustrate alcune caratteristiche dinamiche dell'oscillatore semplice che rappresenta un sistema ad 1 grado di libertà e che pertanto presenta un unico modo di vibrare caratterizzato dal periodo di vibrazione dato dalla relazione (4.19). Nel paragrafo 6.6 sono state, invece, anticipate alcune considerazioni sull'influenza dell'orizzontamento rigido rispetto ai modi di vibrare. In questo capitolo cercheremo di illustrare dal punto di vista concettuale il significato dei modi di vibrare e della combinazione degli effetti dei modi.

10.2. I modi di vibrare e loro combinazione

Si prenda l'esempio dell'oscillatore semplice riportato in figura 10.1.

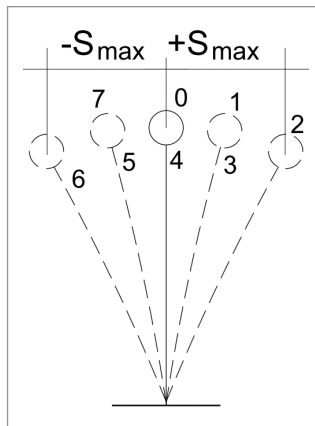


Figura 10.1. Sistema elementare con 1 massa

Il sistema ha un solo grado di libertà e, a seguito di un impulso orizzontale impresso alla base, la configurazione degli spostamenti conseguenti assume un'unica forma, detta **modo naturale di vibrazione**¹. Esso è funzione delle caratteristiche della struttura, quali la rigidità k e la massa m . Da queste grandezze è possibile determinare il valore del periodo pro-

¹ O anche: periodo proprio di vibrazione, modo principale di vibrare, periodo fondamentale di vibrazione, primo modo di vibrare; ecc..

prio di oscillazione T , che rappresenta il tempo che la massa elementare impiega per compiere una oscillazione completa ed è espresso in secondi.

La relazione che lega il periodo proprio di oscillazione T ai valori di m e k è data dalla relazione (4.19), che qui riportiamo:

$$T = 2\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (10.1)$$

In generale, se nello spazio, il sistema ha caratteristiche di rigidezza (k_x e k_y) diverse secondo le due direzioni considerate principali (x e y , una nel piano del foglio e l'altra ortogonale a questo piano), il modo naturale di vibrazione è diverso in funzione della direzione considerata, così come diversi saranno i periodi T_x , T_y . Quindi, ciascun sistema del tipo di figura 10.1, nello spazio ha due modi naturali di vibrare (detti anche fondamentali) sul piano orizzontale: uno lungo x e uno lungo y , ai quali potrebbero aggiungersene altri: verticali (sussultori) lungo z ; rotazionali intorno agli assi.

Per sviluppare il ragionamento dal punto di vista concettuale e didattico, in un modo semplice, si consideri ora una struttura avente due masse a quota diversa come indicato in figura 10.2 e analizziamo solo il comportamento nel piano.

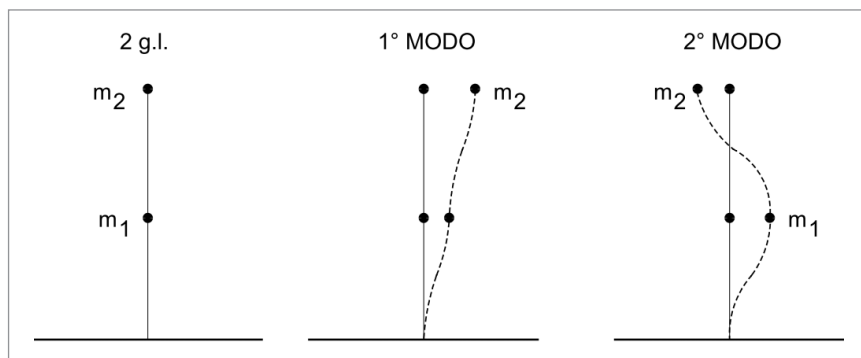


Figura 10.2. Sistema elementare con due masse

Trascurando il moto sussultorio e ipotizzando di dare due impulsi in due momenti separati alle due masse, si avranno le deformate visibili nel tratteggio della figura citata: ognuna di queste due deformate rappresenta un modo principale di vibrazione. Ciascun modo sarà caratterizzato da un proprio periodo principale T_1 e T_2 .

Si suppongano note le seguenti grandezze per ciascuna delle masse partecipanti al moto:

- T_1 : periodo di vibrazione del modo 1;
- F_1 : forza massima orizzontale associabile ad una oscillazione di periodo T_1 ;
- M_1 : momento flettente massimo alla base del sistema derivante da F_1 .

I valori F_1 e M_1 siano i massimi generati, nell'intervallo di tempo T_1 , per effetto del 1° modo di vibrazione della massa m_1 , e che assumono ciascuno due valori eguali ed opposti di segno a seconda del verso dell'azione sismica (sinistro o destro).

ALTRI TIPI DI ANALISI SISMICHE

11.1. Generalità

Nella prassi progettuale i principali tipi di analisi utilizzati sono i seguenti:

- a) analisi lineare statica;
- b) analisi lineare dinamica (o analisi modale);
- c) analisi non lineare statica (o pushover);
- d) analisi mediante i meccanismi locali di collasso.

I casi a) e b) sono stati discussi nei capitoli precedenti. Analizzando i vocaboli relativi alla definizione del tipo di analisi appaiono le parole: «*lineare*», «*statica*» e «*dinamica*». Vediamo dunque di comprendere concettualmente il significato di queste.

Le «*analisi lineari*» (statiche o dinamiche) si fondano sul presupposto che il comportamento del modello che descrive la struttura (ad es. lo schema di un telaio piano o tridimensionale) sia costituito da elementi composti da materiale a comportamento elastico-lineare. Per quanto attiene invece alla qualifica di «*statica*» o «*dinamica*» dell'analisi, si riferisce al fatto che, il modello di applicazione delle azioni sismiche, derivi dalla soluzione di condizioni di equilibrio statico o dinamico. Infine, le analisi condotte attraverso i *meccanismi locali di collasso* consistono nello scomporre un determinato complesso strutturale attraverso un insieme di macroelementi per i quali vengono effettuate le verifiche di equilibrio sotto le azioni sismiche. Il metodo viene utilizzato per i casi in cui non sia attivabile e/o attendibile una analisi degli altri tipi (ad es. per complessi edifici storici e monumentali, o porzioni di essi).

In generale la valutazione dei meccanismi locali di collasso può essere considerata anche quando la costruzione non manifesta un chiaro comportamento d'insieme, ma piuttosto tende a reagire al sisma come un insieme di sottosistemi più o meno indipendenti (edifici a carattere storico come illustrati nelle classi 1 e 2 del capitolo 2). In tali casi la verifica globale può essere effettuata attraverso un insieme esaustivo di verifiche locali, purché la totalità delle forze sismiche sia coerentemente ripartita sui meccanismi locali considerati e si tenga conto delle forze scambiate tra i sottosistemi strutturali considerati, oppure che le azioni sismiche siano computate con metodi di calcolo codificati esplicitamente previsti per le analisi dei sottosistemi.

11.2. Analisi non lineare statica (pushover)

L'analisi non lineare statica si fonda sull'ipotesi che il comportamento globale della struttura possa essere descritto da una curva carichi-spostamenti riferita ad un oscillatore sem-

plice (asta incastrata alla base e con massa concentrata in sommità) del quale sono opportunamente determinati i parametri dinamici (periodo proprio di oscillazione, rigidezza, ecc.).

La creazione della curva di capacità si esegue caricando il sistema strutturale mediante le masse verticali (che rimangono costanti in funzione della combinazione sismica) e con forze orizzontali di forma e distribuzione prestabilita dalle norme tecniche, che vengono fatte crescere sino al raggiungimento del *collasso convenzionale* (vedi figura 11.1).

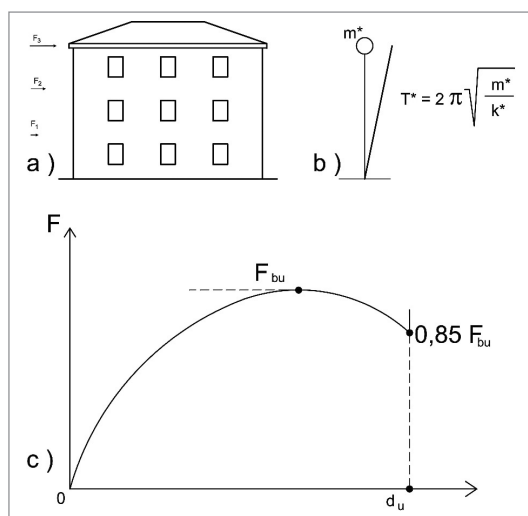


Figura 11.1. Metodo di calcolo pushover: (a) Edificio reale; (b) Oscillatore semplice equivalente; (c) Curva carichi-spostamenti (curva di capacità)

Il procedimento inizia facendo crescere dette forze mediante un coefficiente moltiplicatore comune (ad esempio: 0,1; 0,2; 0,3 ecc.). In corrispondenza di questi step si determinano gli spostamenti di un punto di controllo, opportunamente scelto in sommità della struttura, in modo che siano ben rappresentati gli spostamenti globali della medesima conseguenti alle sollecitazioni di ogni step.

Nel corso degli step si devono eseguire le verifiche degli elementi ed aggiornare di conseguenza il modello strutturale. Il modello di calcolo prevede, infatti, una definizione non lineare del comportamento del materiale (figura 11.2a). All'aumentare delle azioni (moltiplicatore delle forze) il modello strutturale «*evolve*» in funzione dei codici di calcolo utilizzati. Ad esempio possono utilizzarsi codici a «*plasticità concentrata*» che prevedono la formazione di cerniere plastiche agli estremi delle aste; oppure a «*plasticità diffusa*», ovvero mediante discretizzazione delle aste in conci definendo un legame non lineare di momento-curvatura; o anche una modellazione «*a fibre*» in cui ciascun cono è ulteriormente suddiviso in elementi striscia longitudinali (vedi figura 11.2b). In quest'ultimo caso lo stato di sforzo-deformazione di una sezione del generico elemento è ottenuto mediante l'integrazione della risposta sforzo-deformazione uniassiale non-lineare di ciascuna fibra in cui la sezione è stata suddivisa.

MURATURE DI TAMPONAMENTO

12.1. Generalità

I tamponamenti in muratura generalmente creano l'involucro dei telai portanti, siano essi in calcestruzzo armato o metallico. Possono non avere una funzione prettamente strutturale qualora non fungano da controventi per le ossature, tuttavia le norme vigenti dispongono che, in ogni caso, con esclusione dei soli tamponamenti interni di spessore non superiore a 10 cm, gli elementi costruttivi senza funzione strutturale il cui danneggiamento può provocare danni a persone, devono essere verificati, insieme alle loro connessioni alla struttura, per l'azione sismica corrispondente a ciascuno degli stati limite considerati.

Tra i principali effetti pericolosi dell'azione di un terremoto sui tamponamenti vi è quello dell'espulsione (figura 12.1) e, pertanto, una delle principali verifiche è rivolta ad eliminare questo tipo di inconveniente. A tale scopo vi sono appropriati modelli di calcolo proposti dalle norme.



Figura 12.1. *Espulsione di pannelli di tamponamento
(terremoto de L'Aquila, 2009 – Foto Arch. Roberto Amabilia)*

L'azione (sismica) F_w , può essere schematicamente applicata nel baricentro del pannello murario di tamponamento come indicato nello schema di figura 12.2. In generale, dunque, per gli elementi di tamponamento occorre eseguire i seguenti tipi di verifiche:

- per gli effetti di F_a e del peso proprio verticale del pannello deve essere verificato a pressoflessione (paragrafo 12.3);
- per gli effetti dell'azione F_a , il pannello non deve essere espulso (paragrafo 12.4);
- per gli effetti del funzionamento a puntone diagonale (paragrafo 12.5).

12.2. Determinazione delle azioni sismiche agenti in un pannello in quota

ESEMPIO 12.1.

Si abbia un tamponamento costituito da una muratura in laterizio avente le seguenti caratteristiche (figura 12.2):

- lunghezza pannello murario: $L = 360$ cm
- altezza pannello murario: $h = 300$ cm
- spessore $t = 30$ cm
- peso proprio muratura = 1.000 daN/m³
- $f_k = 45$ daN/cm²
- $\gamma_M = 2$
- $f_d = 45$ daN/cm² / 2 = $22,5$ daN/cm²
- $f_{vk0} = 2$ daN/cm²
- $f_{vk} = 2$ daN/cm² + $0,4 \sigma_n$
- σ_n = tensione normale media nel piano considerato = P / A
- $f_{vd} = f_{vk} / 2$
- $E = 45.000$ daN/cm²
- $G = 18.000$ daN/cm²

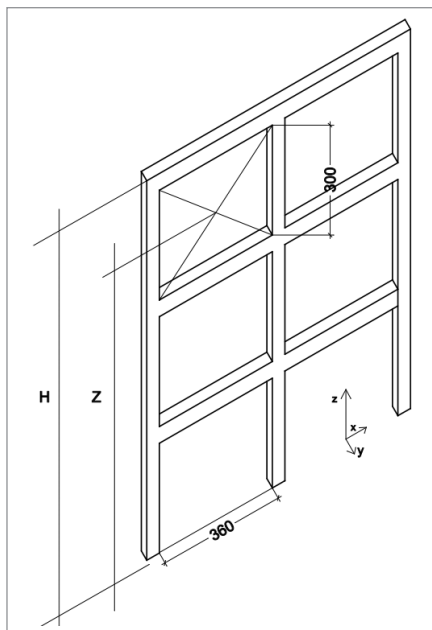


Figura 12.2. Modello del tamponamento sull'ossatura in calcestruzzo armato

ELEMENTI NON STRUTTURALI

13.1. Danni sugli elementi non strutturali

Gli esiti dei recenti terremoti accaduti hanno messo in luce che, oltre ai danni causati dal collasso dei sistemi strutturali, che possono portare al crollo di edifici, alla perdita di vita umane, ecc, possono verificarsi sensibili perdite, soprattutto in termini economici, nelle finiture, negli impianti, nei macchinari, negli arredi e, in generale, nel contenuto degli edifici. In figura 13.1 sono riassunti i dati di un recente studio¹ condotto su tipologie di costruzioni residenziali e non residenziali, stimando danni che si aggirano intorno all'80% sul contenuto e sugli impianti in uffici, alberghi e ospedali (vedi figure da 13.2 a 13.5²).

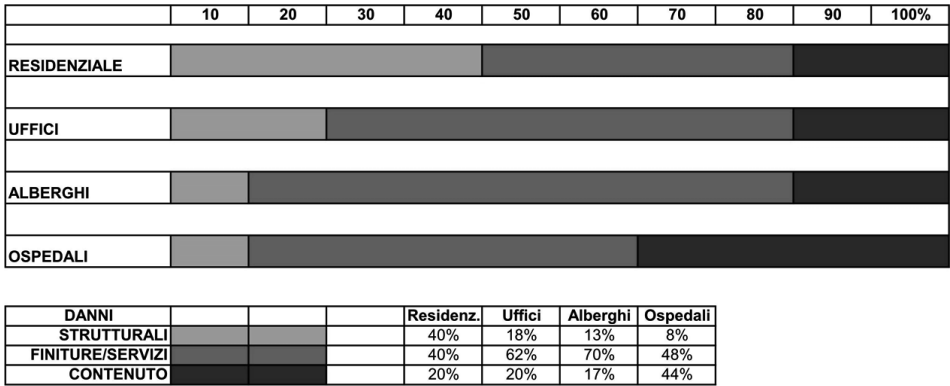


Figura 13.1. Tipologie di danni causati da terremoti

In tal senso le norme vigenti hanno introdotto controlli per gli stati limite di esercizio (SLE) da eseguirsi su elementi strutturali secondari, elementi non strutturali, macchinari ed impianti.

Nella fattispecie delle azioni sismiche, come già illustrato al paragrafo 5.1, una parte delle verifiche si coniugano anche con i controlli da eseguirsi in termini di spostamenti del sistema strutturale nel suo complesso, per lo stato limite di operatività (SLO) e lo stato limite di danno (SLD).

¹ Taghavi – Miranda, 2002.

² Immagini da: Presidenza del Consiglio dei Ministri e Dipartimento di Protezione Civile, *Linee Guida per la riduzione della vulnerabilità di elementi non strutturali, arredi ed impianti*, 2009.

Ma vi sono verifiche che vanno condotte sugli elementi stessi, ad esempio sui supporti di un macchinario piazzato all'interno di un fabbricato, sulla sua facciata o in copertura. A tal fine sono state esplicitate alcune definizioni e requisiti che di seguito riportiamo.



Figura 13.2. *Danni causati dal crollo di controsoffittature*



Figura 13.3. *Danni causati dal crollo di sistemi di illuminazione*



Figura 13.4. *Danni causati dal crollo di arredi, scorte*

CONTENUTI E ATTIVAZIONE DELLA WEBAPP

14.1. Contenuti della WebApp

- **Fogli elettronici di calcolo (in formato .xls)**
 - **Periodo oscillatore semplice:** foglio elettronico che consente di calcolare il periodo proprio (e altri parametri) di un oscillatore semplice e/o di strutture equivalenti ad oscillatori semplici.
 - **Rigidezza di pareti o pilastri:** foglio elettronico che consente di determinare la rigidezza (flessionale e a taglio) di elementi strutturali quali: pareti, pilastri, colonne, ecc..
 - **Baricentri masse e rigidezze:** foglio elettronico che consente di determinare il baricentro delle masse e delle rigidezze di un sistema di ritti e orizzontamenti costituenti una struttura portante, nonché l'eccentricità relativa.
 - **Spettri-NTCver.1.0.3:** foglio elettronico distribuito dal CSLPP che consente di determinare gli spettri di risposta di progetto per i vari stati limite in tutte le zone d'Italia inserite nella mappatura INGV.
- **Esempi applicativi**, contenuti anche nel presente manuale, che guidano il lettore a mettere in pratica tutte le spiegazioni su casi concreti.
- **Banca dati normativa e giurisprudenza** consultabile attraverso un motore di ricerca, con aggiornamenti automatici per 365 giorni dall'attivazione della WebApp.

14.2. Requisiti hardware e software

- Dispositivi con MS Windows, Mac OS X, Linux, iOS o Android;
- Accesso ad internet e browser web con Javascript attivo;
- Software per la gestione di documenti Office e PDF.

14.3. Attivazione della WebApp

- 1) Collegarsi al seguente indirizzo internet:

https://www.grafill.it/pass/0216_1.php

- 2) Accedere al **Profilo utente Grafill** oppure crearne uno su **www.grafill.it**.

- 3) Cliccare il pulsante **[G-CLOUD]**.
- 4) Cliccare il pulsante **[Vai alla WebApp]** in corrispondenza del prodotto acquistato.
- 5) Fare il *login* usando le stesse credenziali di accesso al **Profilo utente Grafill**.
Lo scaffale **Le mie App** presenterà tutte le WebApp attive.
- 6) Per accedere alle WebApp del prodotto acquistato cliccare sulla relativa copertina.

14.4. Assistenza tecnica sui prodotti Grafill (TicketSystem)

L'assistenza tecnica (gratuita per 365 giorni dall'acquisto) è relativa esclusivamente all'installazione e all'avvio del prodotto (*non è prevista assistenza per il recupero dei dati*), se la configurazione hardware rispetta i requisiti richiesti.

L'assistenza *TicketSystem* è disponibile all'indirizzo **<https://www.supporto.grafill.it>**.

Effettuare il login al *TicketSystem* utilizzando i dati del profilo utente di **www.grafill.it** ed aprire un ticket seguendo le istruzioni.

La cronologia dei ticket resterà disponibile sulla schermata principale del *TicketSystem*.



Manuale che ha lo scopo di accompagnare il lettore alla comprensione dei concetti fondamentali della progettazione antisismica, indirizzato anche a chi vuole avvicinarsi alla materia per la prima volta.

I concetti illustrati nel manuale sono accompagnati con esempi pratici, selezionati in modo da poter cogliere l'ordine di grandezza dei risultati numerici.

Fra gli argomenti trattati nel manuale ampio spazio è dato ai seguenti argomenti:

- richiami storici che illustrano i primi approcci con la materia e l'evoluzione della normativa tecnica;
- descrizione qualitativa del comportamento sismico delle tipologie strutturali fondamentali: strutture in muratura portante e strutture a telaio;
- modalità di distribuzione delle azioni sismiche in pianta e in alzata degli edifici, con l'esemplificazione di concetti quali baricentro delle masse, delle rigidezze, eccentricità torsionali, ecc.;
- l'utilizzo del diagramma di spettro elastico. A cosa serve? Come si usa? Può essere utilizzato in modo semplice? Con annessi esempi pratici;
- concetti base di analisi lineari statiche, analisi modali e analisi cinematiche.

Ampio spazio viene dedicato al calcolo manuale semplificato di una ossatura in c.a. con predimensionamento di travi e pilastri e, infine, le tematiche vengono estese anche agli elementi non strutturali e agli impianti.

La **WebApp inclusa** gestisce le seguenti utilità:

- **Fogli elettronici di calcolo** (in formato .xls)
 - **Periodo oscillatore semplice**: consente di calcolare il periodo proprio (e altri parametri) di un oscillatore semplice e/o di strutture equivalenti ad oscillatori semplici.
 - **Rigidezza di pareti o pilastri**: consente di determinare la rigidezza (flessionale e a taglio) di elementi strutturali quali: pareti, pilastri, colonne, ecc..
 - **Baricentri masse e rigidezze**: consente di determinare il baricentro delle masse e delle rigidezze di un sistema di ritte e orizzontamenti costituenti una struttura portante, nonché l'eccentricità relativa.
 - **Spettri-NTCver.1.0.3**: foglio elettronico distribuito dal CSLPP che consente di determinare gli spettri di risposta di progetto per i vari stati limite in tutte le zone d'Italia inserite nella mappatura INGV.
- **Esempi applicativi** contenuti anche nel manuale.
- **Banca dati normativa e giurisprudenza** consultabile con motore di ricerca.

REQUISITI HARDWARE E SOFTWARE

Qualsiasi dispositivo con MS Windows, Mac OS X, Linux, iOS o Android; accesso ad internet e browser web con Javascript attivo; software per la gestione di documenti Office e PDF.

Marco Boscolo Bielo, architetto, PhD doctor, libero professionista. Progettista e strutturista per il settore delle costruzioni civili, dottore di ricerca in economie e tecniche per la conservazione dei beni architettonici e culturali, titolare del protocollo SismiCasa®. È autore di numerose pubblicazioni in ambito tecnico e tecnico-storico. Svolge attività di docenza presso Ordini Professionali ed Enti di Formazione.



WebApp

Assistenza
tecnica

ISBN 13 978-88-277-0216-1



9 788827 702161 >

Euro 46,00